

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

GUILHERME MANFREDINI BUENO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE ALVENARIA DE
BLOCOS CERÂMICOS COM INSTALAÇÕES PREDIAIS**

**São Leopoldo
2019**

GUILHERME MANFREDINI BUENO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE ALVENARIA DE
BLOCOS CERÂMICOS COM INSTALAÇÕES PREDIAIS**

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

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González

São Leopoldo

2019

B928a Bueno, Guilherme Manfredini.
Avaliação da resistência ao fogo de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos com instalações prediais / Guilherme Manfredini Bueno. – 2019.
183 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.

“Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González.”

1. Prevenção de incêndio. 2. Materiais de construção – Testes de resistência ao calor. 3. Paredes – Testes. I. Título.

CDU 699.81

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecário: Flávio Nunes – CRB 10/1298)

GUILHERME MANFREDINI BUENO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE ALVENARIA DE
BLOCOS CERÂMICOS COM INSTALAÇÕES PREDIAIS**

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

Aprovado em 17 de janeiro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Dr. João Paulo Correia Rodrigues – Universidade de Coimbra (UC)

Dr. Rogerio Cattelan Antochaves de Lima – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Dr. Bernardo Fonseca Tutikian – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Dr. Marco Aurélio Stumpf González – Universidade do Vale do Rio dos Sinos
(UNISINOS) – Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas oportunidades e força para concluir mais esta etapa.

Ao meu orientador, professor Dr. Marco Aurélio Stumpf González pelo seu incentivo e dedicação, por ter confiado em mim desde a seleção do mestrado e pela excelente oportunidade de crescimento pessoal e profissional com a concretização desta dissertação.

Ao apoio incondicional de toda a minha família, em especial à Marlise, ao Gabriel e ao Pedro Henrique.

Aos meus colegas Jéssica Fröhlich, Luís Staudt, Kátia Grings, Angélica Koppe, Eduardo Carneiro, Giulianna Piva, Ana Ramão, Patrícia Guillante, Jadna Fächter, Gustavo Benini, Ana Júlia e Rubem, com os quais pude conviver e trocar conhecimentos, além dos momentos de diversão e risadas. Um agradecimento também a minha colega da graduação Janaine Golfetto pela nossa amizade.

A Daiane de Sena Brisotto, pela parceria, por todas as dicas e conselhos, sempre me guiando para o melhor caminho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS pela excelência na transmissão do conhecimento.

Aos professores Maurício Mancio e Bernardo Fonseca Tutikian pelas sugestões na qualificação desta dissertação. Aos professores João Paulo Correia Rodrigues, Rogerio Cattelan Antochaves de Lima e novamente Bernardo Fonseca Tutikian pelas contribuições e comentários durante a defesa final desta dissertação.

A secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS, Simone Trish, pela sua disposição em auxiliar durante todas as etapas desta jornada.

Às empresas que fizeram a doação dos materiais utilizados na execução das amostras.

Aos funcionários do Instituto Tecnológico em Desempenho da Construção Civil (itt Performance), em especial ao Gabriel Bottin pela sua prestatividade e disposição em auxiliar durante todas as etapas experimentais da pesquisa.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da UNISINOS pela paciência e cooperação.

A todos que de uma forma ou outra me apoiaram e acreditam no meu potencial.

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.



Também houve apoio do Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (itt Performance) UNISINOS.



We keep moving forward, opening new doors, and doing new things, because we're curious and curiosity keeps leading us down new paths. (WALT DISNEY).

RESUMO

BUENO, G. M. **Avaliação da resistência ao fogo de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos com instalações prediais**. São Leopoldo, 2019. 183p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UNISINOS, São Leopoldo. 2019.

Situações de incêndio possuem um grande potencial destrutivo para a sociedade. Um esforço significativo tem sido feito no Brasil para a avaliação da resistência ao fogo de alguns elementos. Entretanto, em relação às paredes de vedação ou com função estrutural, compostas por alvenarias de tijolos ou blocos, gesso ou concreto, há poucos estudos acadêmicos no país em escala real e ainda não foram feitas pesquisas com elementos de instalações prediais no interior de sistemas de compartimentação. Isto evidencia a importância desta pesquisa que buscou avaliar a resistência ao fogo de paredes através da ABNT NBR 10636: 1989, verificando a influência de aberturas destinadas a instalações elétricas e hidráulicas. Para atingir o objetivo proposto, foram confeccionadas amostras em escala real e ensaiadas no forno vertical do Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (itt Performance), levando em consideração a curva de aquecimento padrão ISO 834/99 para verificação dos critérios de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico. A amostra referência (P-1) fora executada com blocos cerâmicos e revestimento argamassado, não possuindo instalação predial e, para fins de comparação, a amostra 2 (P-2) possuía aberturas com dimensões de 120 mm x 80 mm, contendo caixas de PVC para tomadas e componentes elétricos e a amostra 3 (P-3) aberturas de diâmetro 30 mm no ponto de saída de água das instalações hidráulicas. Durante a etapa de caracterização dos materiais, foram encontradas variações nas propriedades da argamassas utilizadas no revestimento das amostras. Conforme os resultados experimentais, todas as paredes mantiveram sua estabilidade e estanqueidade durante os 240 minutos de ensaio, entretanto, a capacidade de isolar termicamente foi comprometida em determinado instante. A P-1, P-2 e P-3 foram qualificadas como TRF 134 minutos, TRF 124 minutos e P-3 com TRF 193 minutos, respectivamente. O desempenho da amostra referência (P-1) foi comprometido devido ao deslocamento do revestimento argamassado e o lascamento dos blocos cerâmicos no decorrer do ensaio, o que também ocorreu na P-2. Logo, não se pode isolar os efeitos combinados da dilatação térmica diferencial, do deslocamento do revestimento, lascamento do substrato cerâmico, das propriedades dos materiais empregados, assim como da transferência de calor pelas aberturas nas amostras com instalações, que influenciaram no desempenho das paredes. Concluiu-se que, nas regiões com aberturas de instalações prediais que permitem a passagem de gases quentes, a superfície não exposta às altas temperaturas perde sua capacidade de isolamento em um menor tempo em comparação à superfície no entorno, o que reduz a resistência ao fogo de sistemas de compartimentação.

Palavras-chave: Segurança contra incêndio. Resistência ao fogo. Paredes. Instalações prediais. Aberturas.

ABSTRACT

BUENO, G. M. **Evaluation of the fire resistance of masonry walls with building installations**. São Leopoldo, 2019. 183p. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, UNISINOS, São Leopoldo, 2019.

Fire situations have great destructive potential for society. A significant effort has been made in Brazil to evaluate the fire resistance of some elements. However, regarding walls, composed of masonry bricks or blocks, plaster or concrete, there are few national academic studies in full scale and no research has been done with elements of buildings built inside partitioning systems. This implies the urge of this research that sought to evaluate the performance of compartmentation walls with a fire resistance rate function, verifying the influence of openings for electrical and hydraulic installations. In order to reach the proposed objective, full scale samples were constructed and tested according to the ABNT NBR 10636:1989 in the vertical furnace of the Technological Institute in Civil Construction Performance (itt Performance - UNISINOS), taking into consideration the ISO 834/14 standard heating curve to verify stability, sealing and thermal insulation criteria. The reference sample (P-1) was performed with clay blocks and coating mortar, without any type of building installation, and for comparison purposes, sample 2 (P-2) contained openings with dimensions of 120 mm x 80 mm, containing electrical installations and sample 3 (P-3) openings of 30 mm diameter for hydraulic installations. During the materials characterization stage, there were variations in the properties of the mortars used in the coating of the samples. According to the experimental results, all systems maintained their stability and sealing during the 240 minutes of test, however, the ability to thermally insulating was compromised at a certain moment. P-1, P-2 and P-3 were qualified as TRF 134 minutes, TRF 124 minutes and P-3 with TRF 193 minutes, respectively. The performance of the reference sample (P-1) was compromised due to the mortar coating displacement and spalling of the blocks. Therefore, it is not possible to isolate the combined effects of the thermal expansion, coating displacement, spalling of the ceramic blocks, the properties of the materials employed, as well as the heat transfer from the openings in the samples with installations, which influenced in the performance of the walls. It was concluded that in regions with openings of building installations that allow the passage of hot gases, the surface not exposed to high temperatures loses its insulation capacity in a shorter time compared to the surrounding surface, which reduces the fire resistance of the compartmentation systems.

Key words: Fire safety. Fire resistance. Walls. Building installations. Openings.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Tetraedro do fogo..... | 33 |
| Figura 2 – Mecanismos de transferência de calor..... | 35 |
| Figura 3 – Transferência de calor por condução..... | 36 |
| Figura 4 – Transferência de calor por convecção..... | 38 |
| Figura 5 – Troca de calor por radiação..... | 38 |
| Figura 6 – Transferência de calor através de blocos ou tijolos com cavidades..... | 39 |
| Figura 7 – Desenvolvimento da temperatura durante um incêndio..... | 41 |
| Figura 8 – Fatores que influenciam um incêndio..... | 41 |
| Figura 9 – Curvas padrão para diferentes cenários de incêndio..... | 45 |
| Figura 10 – Evolução da temperatura ao longo do tempo conforme a ISO 834..... | 46 |
| Figura 11 – Representação de sistema vertical de compartimentação corta-fogo.... | 52 |
| Figura 12 – Laje contendo aberturas para passagem de instalações hidráulicas com utilização de selagem corta-fogo..... | 52 |
| Figura 13 – Representação do afastamento vertical entre aberturas situadas em paredes externas: (a) sem marquise e (b) com marquise corta-fogo..... | 53 |
| Figura 14 – Isolamento de risco para áreas com grau de risco de incêndio baixo ou médio..... | 54 |
| Figura 15 – Representação da deformação sob exposição à altas temperaturas: (a) sistema de vedação e (b) sistema estrutural..... | 56 |
| Figura 16 – Esquema do encurvamento da alvenaria..... | 57 |
| Figura 17 – Fissuras provocadas pelas tensões geradas devido à restrição do deslocamento..... | 57 |
| Figura 18 – Fissuras oblíquas em cantos de paredes de compartimentação..... | 58 |
| Figura 19 – Esquemas de testes para avaliação do desempenho ao fogo de sistemas de vedações verticais: (a) sem função estrutural e (b) com função estrutural..... | 61 |
| Figura 20 – Representação esquemática do efeito do <i>spalling</i> em blocos cerâmicos.... | 63 |
| Figura 21 – Parede ensaiada: (a) termopares instalados na amostra antes do teste e (b) superfície da amostra exposta ao fogo após o teste..... | 64 |
| Figura 22 – Aspecto visual das geometrias investigadas..... | 65 |
| Figura 23 – Esquema de uma abertura do tipo “shaft” em um edifício..... | 68 |
| Figura 24 – Representação de uma instalação hidráulica em parede..... | 69 |

| | |
|--|-----|
| Figura 25 – Ensaio de resistência ao fogo: (a) montagem da amostra, (b) amostra após ensaio e (c) vaso sanitário destruído na parte superior da laje | 70 |
| Figura 26 – Configuração de teste de resistência ao fogo de parede de gesso com aberturas de tubulação hidrossanitária | 71 |
| Figura 27 – Abertura em parede destinada para instalação elétrica | 71 |
| Figura 28 – Equipamento para fins experimentais: (a) propagação de chamas para o fio horizontal e (b) propagação de chamas para o fio vertical | 73 |
| Figura 29 – Evolução das chamas em fios isolados de mesmo diâmetro e mesma camada de isolamento: (a) fio sem núcleo na horizontal, (b) fio com núcleo de cobre na horizontal, (c) fio sem núcleo na vertical e (d) fio com núcleo de cobre na vertical | 74 |
| Figura 30 – Configurações experimentais | 75 |
| Figura 31 – Selagem de elementos destinados a passagem de cabos | 76 |
| Figura 32 – Programa experimental da pesquisa | 77 |
| Figura 33 – Geometria do bloco | 79 |
| Figura 34 – Paginação da amostra P-1 | 82 |
| Figura 35 – P-1 antes do ensaio: (a) superfície exposta às altas temperaturas e (b) superfície não exposta às altas temperaturas | 83 |
| Figura 36 – Paginação da amostra P-2 | 83 |
| Figura 37 – P-2 antes do ensaio: (a) superfície exposta às altas temperaturas e (b) superfície não exposta às altas temperaturas | 84 |
| Figura 38 – Elementos utilizados na instalação hidráulica | 85 |
| Figura 39 – Paginação da amostra P-3 | 85 |
| Figura 40 – P-3 antes do ensaio: (a) superfície exposta às altas temperaturas e (b) superfície não exposta às altas temperaturas | 86 |
| Figura 41 – Representação do posicionamento das amostras no forno | 86 |
| Figura 42 – Locais de leitura dos deslocamentos horizontais da amostra: (a) pontos de medição e (b) posicionamento da estação total | 89 |
| Figura 43 – Sentido do deslocamento do plano (seção transversal) | 90 |
| Figura 44 – Posicionamento dos termopares do forno, com distâncias em metros .. | 91 |
| Figura 45 – Posicionamento dos termopares externos, com distâncias em metros .. | 92 |
| Figura 46 – Detalhe esquemático da posição dos termopares adicionais instalados nos sistemas investigados: (a) vista superior e (b) seção transversal | 93 |
| Figura 47 – Subdivisão da superfície não exposta | 94 |
| Figura 48 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo | 101 |

| | |
|---|-----|
| Figura 49 – Fissuras na parte inferior da amostra..... | 104 |
| Figura 50 – Surgimento de fissuras: (a) vertical, no terço médio à esquerda e oblíqua no canto superior esquerdo e (b) imagem termográfica aos 20 minutos..... | 105 |
| Figura 51 – Lascamento do substrato na face exposta as chamas..... | 106 |
| Figura 52 – P-1: (a) superfície não exposta e (b) imagem térmica aos 50 minutos..... | 106 |
| Figura 53 – Face não exposta da P-1 aos 120 minutos de ensaio..... | 107 |
| Figura 54 – Verificação da estanqueidade da P-1..... | 108 |
| Figura 55 – Deslocamento horizontal da P-1 aos 15 minutos de ensaio..... | 110 |
| Figura 56 – P-1 ao término do ensaio: (a) superfície exposta e (b) superfície não exposta às altas temperaturas | 111 |
| Figura 57 – Temperatura no forno durante o ensaio da P-1 | 112 |
| Figura 58 – Evolução da temperatura pontual registrada pelos termopares T6 a T15 na P-1..... | 113 |
| Figura 59 – Evolução da temperatura média na face não exposta da P-1..... | 114 |
| Figura 60 – Fissura oblíqua no canto superior direito da P-2..... | 116 |
| Figura 61 – Fissura aos 9 minutos de ensaio na P-2 | 117 |
| Figura 62 – Fissura oblíqua na superfície não exposta da P-2 | 118 |
| Figura 63 – Imagem térmica da P-2: (a) aos 20 minutos e (b) aos 30 minutos..... | 119 |
| Figura 64 – Presença de umidade na superfície não exposta da P-2..... | 119 |
| Figura 65 – Teste de estanqueidade: (a) região de maior temperatura, (b) fissura horizontal na borda lateral esquerda e (c) fissura horizontal na borda lateral direita | 120 |
| Figura 66 – Deformação horizontal da P-2 aos 10 minutos de ensaio | 122 |
| Figura 67 – P-2 ao término do ensaio: (a) superfície exposta e (b) superfície não exposta às altas temperaturas | 123 |
| Figura 68 – Temperatura no forno durante o ensaio da P-2 | 123 |
| Figura 69 – Evolução da temperatura pontual registrada pelos termopares T6 a T15 na P-2..... | 125 |
| Figura 70 – Evolução da temperatura média na face não exposta da P-2..... | 126 |
| Figura 71 – Fissuras na amostra: (a) superfície não exposta aos 8 minutos e (b) imagem térmica aos 10 minutos..... | 129 |
| Figura 72 – Face não exposta às altas temperaturas da P-3 aos 14 minutos de ensaio | 129 |
| Figura 73 – Manchas com indícios de umidade na P-3..... | 130 |
| Figura 74 – P-3: (a) umidade em 90 minutos e (b) imagem térmica aos 120 minutos | 131 |

| | |
|---|-----|
| Figura 75 – Verificação da estanqueidade na P-3..... | 132 |
| Figura 76 – Imagem térmica da P-3 aos 240 minutos de ensaio | 132 |
| Figura 77 – Deformação horizontal da P-3 aos 20 minutos de ensaio | 134 |
| Figura 78 – P-3 ao término do ensaio: (a) superfície exposta e (b) superfície não exposta às altas temperaturas | 135 |
| Figura 79 – Temperatura no forno durante o ensaio da P-3 | 136 |
| Figura 80 – Evolução da temperatura pontual registrada pelos termopares T6 a T15 na P-3..... | 137 |
| Figura 81 – Evolução da temperatura média na face não exposta da P-3..... | 138 |
| Figura 82 – Representação da espessura equivalente antes e após o lascamento das duas primeiras partições do substrato frente às altas temperaturas | 140 |
| Figura 83 – Deformação horizontal das paredes no decorrer dos ensaios | 143 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Classes de incêndio | 34 |
| Tabela 2 – Condutividades térmicas (λ) e calor específico (C) de diferentes materiais de construção..... | 37 |
| Tabela 3 – Critérios de desempenho | 47 |
| Tabela 4 – Classificação das edificações e áreas de risco de incêndio quanto à altura...54 | |
| Tabela 5 – Classificação das edificações e áreas de risco de incêndio quanto ao grau de risco de incêndio | 55 |
| Tabela 6 – Características da câmara termográfica..... | 88 |
| Tabela 7 – Características da estação total | 89 |
| Tabela 8 – Caracterização geométrica dos blocos cerâmicos | 94 |
| Tabela 9 – Caracterização física dos blocos cerâmicos..... | 95 |
| Tabela 10 – Caracterização mecânica dos blocos cerâmicos..... | 95 |
| Tabela 11 – Caracterização da argamassa de assentamento no estado fresco | 95 |
| Tabela 12 – Caracterização da argamassa de assentamento no estado endurecido ... | 96 |
| Tabela 13 – Classificação da argamassa de assentamento | 96 |
| Tabela 14 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado fresco: P-1..... | 97 |
| Tabela 15 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado fresco: P-2..... | 97 |
| Tabela 16 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado fresco: P-3..... | 97 |
| Tabela 17 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado endurecido: P-197 | |
| Tabela 18 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado endurecido: P-298 | |
| Tabela 19 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado endurecido: P-3.98 | |
| Tabela 20 – Classificação da argamassa de revestimento: P-1 e P-2 | 98 |
| Tabela 21 – Classificação da argamassa de revestimento: P-3..... | 99 |
| Tabela 22 – Caracterização mecânica do cimento CP II F – 32..... | 99 |
| Tabela 23 – Caracterização física do cimento CP II F – 32 | 100 |
| Tabela 24 – Caracterização química do cimento CP II F – 32 | 100 |
| Tabela 25 – Caracterização do agregado miúdo..... | 101 |
| Tabela 26 – Deformação horizontal da P-1 | 109 |
| Tabela 27 – Temperatura medida pelos termopares T11 a T15 no decorrer do ensaio da P-1 | 115 |
| Tabela 28 – Deformação horizontal da P-2..... | 121 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 29 – Temperatura medida pelos termopares T11 a T15 no decorrer do ensaio da P-2 | 127 |
| Tabela 30 – Deformação horizontal da P-3..... | 133 |
| Tabela 31 – Temperatura medida pelos termopares T12 a T15 no decorrer do ensaio da P-3 | 138 |
| Tabela 32 – Classificação das paredes investigadas..... | 139 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 – Investigações de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos quanto a resistência ao fogo | 66 |
| Quadro 2 – Matriz experimental da pesquisa | 80 |
| Quadro 3 – Ocorrências do ensaio de resistência ao fogo da P-1 | 104 |
| Quadro 4 – Ocorrências do ensaio de resistência ao fogo da P-2 | 115 |
| Quadro 5 – Ocorrências do ensaio de resistência ao fogo da P-3 | 127 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-----------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| CAU | Conselho de Arquitetura e Urbanismo |
| CBIC | Câmara Brasileira da Indústria da Construção |
| CF | Corta-Fogo |
| CREA | Conselho Regional de Engenharia e Agronomia |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| IT | Instrução Técnica |
| itt Performance | Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil |
| LMC | Laboratório de Materiais de Construção |
| NBR | Normas Brasileiras de Regulação |
| NFPA | <i>National Fire Protection Association</i> |
| PC | Para-Chama |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| SEMAE | Serviço Municipal de Água e Esgotos |
| SVVIE | Sistema de Vedação Vertical Interna e Externa |
| TRF | Tempo de Resistência ao Fogo |
| TRRF | Tempo Requerido de Resistência ao Fogo |
| UNISINOS | Universidade do Vale do Rio dos Sinos |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 27 |
| 1.1 Delimitação da Pesquisa | 28 |
| 1.2 Objetivos | 29 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 29 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 29 |
| 1.3 Justificativa | 29 |
| 1.4 Estrutura do Trabalho | 31 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 33 |
| 2.1 Fogo | 33 |
| 2.1.1 Mecanismos de Transferência de Calor | 34 |
| 2.2 Incêndio | 39 |
| 2.2.1 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo | 42 |
| 2.2.2 Tempo de Resistência ao Fogo..... | 43 |
| 2.2.3 Curvas de Aquecimento | 44 |
| 2.3 Desempenho de Edificações | 47 |
| 2.4 Proteção Contra Incêndio | 49 |
| 2.5 Classificação das Edificações e Áreas de Risco de Incêndio | 54 |
| 2.6 Comportamento de Sistemas Construtivos em Situação de Incêndio | 55 |
| 2.6.1 Avaliação da Resistência ao Fogo | 60 |
| 2.6.2 Estudos de Desempenho ao Fogo | 61 |
| 2.6.3 Instalações Prediais em Paredes de Compartimentação | 67 |
| 2.7 Considerações Finais | 76 |
| 3 MÉTODO | 77 |
| 3.1 Planejamento Experimental | 77 |
| 3.1.1 Variáveis de Resposta..... | 77 |
| 3.1.2 Fatores Controláveis | 78 |
| 3.1.3 Fatores Não-controláveis | 80 |
| 3.2 Confeção das Amostras | 80 |
| 3.3 Ensaio de Desempenho ao Fogo | 87 |
| 3.4 Caracterização dos Materiais | 94 |
| 3.4.1 Blocos Cerâmicos | 94 |
| 3.4.2 Argamassa | 95 |

| | |
|---|------------|
| 3.4.2.1 Assentamento | 95 |
| 3.4.2.2 Revestimento | 96 |
| 3.4.3 Cimento | 99 |
| 3.4.4 Agregado Miúdo | 100 |
| 3.4.5 Água | 102 |
| 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS | 103 |
| 4.1 Ensaio de Resistência ao Fogo..... | 103 |
| 4.1.1 Ensaio de Resistência ao Fogo da P-1 | 103 |
| 4.1.1.1 Estanqueidade | 104 |
| 4.1.1.2 Estabilidade..... | 108 |
| 4.1.1.3 Isolamento Térmico..... | 111 |
| 4.1.2 Ensaio de Resistência ao Fogo da P-2 | 115 |
| 4.1.2.1 Estanqueidade | 116 |
| 4.1.2.2 Estabilidade..... | 120 |
| 4.1.2.3 Isolamento Térmico..... | 123 |
| 4.1.3 Ensaio de Resistência ao Fogo da P-3 | 127 |
| 4.1.3.1 Estanqueidade | 128 |
| 4.1.3.2 Estabilidade..... | 132 |
| 4.1.3.3 Isolamento Térmico..... | 135 |
| 4.2 Discussão dos resultados | 139 |
| 5 CONCLUSÕES | 145 |
| 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros | 147 |
| REFERÊNCIAS..... | 149 |
| APÊNDICE A – PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES COM INSTALAÇÕES PREDIAIS | 163 |
| APÊNDICE B – DEFORMAÇÃO LATERAL P-1 | 167 |
| APÊNDICE C – DEFORMAÇÃO LATERAL P-2 | 173 |
| APÊNDICE D – DEFORMAÇÃO LATERAL P-3 | 179 |

1 INTRODUÇÃO

Situações de incêndio são devastadoras para a sociedade, pois causam perdas irreparáveis, levando muitas pessoas a morte, além das perdas patrimoniais e dos danos ambientais, que estão associados a geração de resíduos. Por tratar-se de uma ação excepcional, um incêndio pode ocorrer em qualquer tipo de edificação, independente do seu uso e ocupação. A segurança dos ocupantes na ocorrência de um sinistro depende de diversos fatores de concepção e construção do edifício. (BUCHANAN; ABU, 2017; LIMA, 2005).

Os incêndios residenciais vêm se tornando cada vez mais intensos desde a década de 1950, principalmente porque os materiais empregados nas edificações são compostos por substâncias químicas altamente tóxicas (PURSER, 2016; STEC, 2017) que, durante o incêndio, liberam gases nocivos à saúde e ao meio ambiente. (DEMLING, 2008; PURSER; McALLISTER, 2016).

A legislação de segurança contra incêndio no Brasil foi intensificada nos anos 70, época em que o país foi palco de casos de incêndios de grandes proporções, como foi o caso dos edifícios Andraus e Joelma, ambos localizados na capital paulista, assim como nas Lojas Americanas e Lojas Renner em Porto Alegre. (RODRIGUES, 2016; SILVA, 2012).

Após a tragédia ocorrida em janeiro de 2013 na Boate Kiss, a legislação brasileira aperfeiçoou leis e normas técnicas relacionadas com a segurança contra incêndio, dando mais rigor as exigências para aprovação de projetos e exigindo a validação do desempenho de novos elementos e sistemas construtivos. (RODRIGUES, E.; RODRIGUES, J.; SILVA FILHO, 2017).

Em dezembro de 2013, entrou em vigor no Rio Grande do Sul a Lei Complementar nº 14376 (RIO GRANDE DO SUL, 2013), abrangendo aspectos relacionados à segurança, prevenção e proteção contra incêndios em edificações e áreas susceptíveis à ocorrência de um incêndio. Dentre os itens que a Lei traz como obrigatórios, encontra-se o uso de compartimentação vertical e horizontal para edifícios com altura superior a 12m, ou conforme a ocupação e uso. Em 2017 foi sancionada a Lei Federal nº 13425 (BRASIL, 2017) que “[...] estabelece diretrizes gerais e ações complementares sobre prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público”.

Mortes e perdas patrimoniais ocasionadas por incêndios podem ser atenuadas, ou até mesmo eliminadas quando se empregam sistemas de prevenção e controle de incêndio e materiais mais eficientes na construção de edificações, ou ainda se o fogo for extinto logo ao iniciar, não permitindo a sua propagação.

É necessário reduzir a probabilidade de ocorrência de um incêndio, pela impossibilidade de previsão da sua ocorrência. Existe uma variedade de estratégias para reduzir o seu impacto (BUCHANAN; ABU, 2017), como o controle dos materiais de acabamento e revestimento, assim como a utilização de sistemas de compartimentação com uma maior resistência ao fogo.

As paredes de compartimentação que vem sendo avaliadas quanto a resistência ao fogo não levam em consideração as instalações elétricas e hidráulicas que, na grande maioria das edificações, estão presentes no interior das paredes. Estes componentes de instalações prediais, geralmente em PVC, são combustíveis, e assim reagem ao fogo, possuindo uma temperatura de fusão, de acordo com Wilkes et al. (2005), variando entre 100 a 260 °C, representando uma menor resistência ao fogo em relação a alvenaria.

Os projetistas devem considerar que as penetrações existentes nas paredes, destinadas a passagem de elementos de instalações prediais, como cabos elétricos e tubulação hidráulica, não propaguem o fogo durante um incêndio. Além disso, a espessura equivalente da parede é reduzida com a instalação, o que pode diminuir a sua capacidade de isolamento térmico.

1.1 Delimitação da Pesquisa

Este trabalho delimita-se a investigar o desempenho ao fogo de paredes de alvenaria considerando a curva de aquecimento padrão da ISO 834 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), 1999), utilizando blocos cerâmicos e argamassa de assentamento do mesmo lote e revestindo todas as amostras com argamassa estabilizada. Algumas amostras foram executadas com instalações prediais, buscando verificar a influência destas na resistência ao fogo.

Por se tratar de um estudo em que as amostras foram confeccionadas em escala real, o custo para tal investigação acaba se tornando oneroso em função da quantidade de materiais e mão de obra necessária para confeccionar os elementos

analisados, além do gás liquefeito de petróleo (GLP) que é necessário para a propulsão das chamas durante o ensaio. Por isso, foi definido um programa experimental com apenas um ensaio para cada configuração analisada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta dissertação é avaliar a resistência ao fogo de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos com instalações prediais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) avaliar a transmissão de calor, a estanqueidade e a estabilidade em paredes de alvenaria de blocos cerâmicos para determinação da resistência ao fogo;
- b) investigar se a presença de aberturas destinadas a instalações elétricas influencia na resistência ao fogo do elemento;
- c) verificar se a presença de aberturas destinadas a instalações hidráulicas influencia na resistência ao fogo do elemento.

1.3 Justificativa

A segurança contra incêndios tem extrema relevância para a sociedade e está relacionada com as decisões de projeto desenvolvidas pelos profissionais que trabalham no setor da construção civil. Assim, o projeto das edificações deve proporcionar condições para que, em caso de incêndio, o edifício ofereça meios para que os usuários realizem a evacuação segura e rápida do imóvel, fácil acesso às ações de combate a incêndio e segurança dos bombeiros.

Além da segurança dos ocupantes, outra preocupação é a emissão da fumaça com presença de gases poluentes e a água utilizada no combate ao incêndio, que acaba sendo contaminada gerando impactos ambientais. (BUCHANAN; ABU, 2017). Após o incêndio, a demolição/reconstrução da edificação

acaba consumindo uma grande quantidade de recursos naturais, causando um impacto negativo sob o ponto de vista ambiental, além de exigir recursos financeiros.

Embora ainda seja um tema relativamente desconhecido no país, existem normas para a avaliação do desempenho de sistemas, e há estudos numéricos e experimentais que vem crescendo nos últimos anos no Brasil. A norma NBR 15575-4 aborda o desempenho dos sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE) de edificações habitacionais ou de seus elementos, considerando vários aspectos, e em especial o desempenho ao fogo. (ABNT, 2013c). Existem outras normas relacionadas com a segurança contra incêndio, dentre as quais pode-se citar: NBR 5628, NBR 8681, NBR 10636, NBR 14432, NBR 15200 (ABNT, 2001, 2003, 1989, 2001, 2004).

Um esforço significativo tem sido feito no Brasil para a avaliação da resistência ao fogo de alguns elementos, com especial atenção para as estruturas de concreto. (BRITEZ; COSTA, 2011; COSTA, 2008; KIRCHHOF, 2010; SOUZA, 2010; ZAGO; MORENO JUNIOR; MARIN, 2015). Nesta linha de pesquisa, também foram estudados elementos específicos, tais como pilares (BOLINA, 2016; FARIAS, 2015; JACINTHO et al., 2014, KLEIN JUNIOR, 2011; SILVA, 2008), vigas (SILVA, 2011) e lajes (PIERIN; SILVA, 2014). Entretanto, em relação às paredes de vedação ou com função estrutural, compostas por alvenarias de tijolos ou blocos, gesso ou concreto, há poucos estudos acadêmicos no país. Podem ser citados, por exemplo: Rosemann (2011), Moreira (2017) e Souza (2017).

Em outros países há uma produção expressiva de trabalhos experimentais sobre o tema. Diversos estudos foram realizados com divisórias leves, tais como *steel frame*, *wood frame* e gesso acartonado (ALFAWAKHIRI, 2003; ARAÚJO et al., 2015; BÉNICHOU e SULTAN, 2005; GERLICH et al., 1996; JATHEESHAN e MAHENDRAN, 2016; SULTAN, 2010; SULTAN; KODUR, 2000).

O comportamento de sistemas estruturais em madeira em situação de incêndio também deve ser compreendido. Marcolan Júnior e Moraes (2018) afirmam que muitos estudos ainda devem ser realizados, em função das incertezas do material e sobre as ações que as altas temperaturas exercem sobre a estrutura. Sob a mesma perspectiva, Oliveira et al. (2013) afirmam que são necessárias maiores investigações para garantir a segurança estrutural e entender como ocorre a perda de resistência mecânica em elementos estruturais em madeira, que durante uma situação de incêndio liberam compostos como monóxido de carbono, metano,

formaldeído, ácido fórmico e acético e metanol, os quais são nocivos ao homem e ao meio ambiente.

Sobre alvenarias e concreto também existem alguns estudos internacionais (BIDOUNG et al., 2016; GO et al., 2012; KHALIQ e BASHIR, 2016; NGUYEN et al., 2009; RUSSO e SCIARRETTA, 2012), assim como paredes construídas com blocos de solo-cimento (BUSON et al., 2012).

Em nenhum dos casos mencionados, a investigação foi feita com elementos de instalações prediais presentes no interior dos sistemas, tal como é encontrado nas edificações. Do mesmo modo, os fabricantes de blocos, paredes de concreto armado ou gesso, que testam os seus sistemas construtivos para obter o laudo de resistência fogo não levam em consideração nos ensaios as instalações prediais presentes no interior dos sistemas, sendo elementos comumente encontrados em paredes de compartimentação.

Diante do exposto, evidencia a importância desta pesquisa que, além de contribuir com a escassa literatura técnica, irá auxiliar todos os entes envolvidos na segurança contra incêndio, dentre eles o Corpo de Bombeiros, responsáveis técnicos, proprietários e usuários de edificações, prefeituras, Conselhos Regionais de Engenharia e Agronomia (CREA), Conselhos de Arquitetura e Urbanismo (CAU) e estabelecimentos de ensino a aprimorarem o conhecimento sobre a resistência ao fogo, explorando as lacunas detectadas.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi organizado em 5 capítulos. Inicialmente, no capítulo 1, é feita a apresentação do tema da pesquisa, a relevância do trabalho e objetivos. O capítulo 2 é destinado a fundamentação teórica, onde são apresentados os principais conceitos relacionados à incêndios em edificações, mecanismos de propagação do fogo e formas de prevenção, além disso, também é feita uma contextualização de outros trabalhos em que foi verificado o desempenho ao fogo de sistemas construtivos. No capítulo 3 é apresentado o programa experimental desenvolvido durante a pesquisa. O capítulo 4 é destinado a análise e discussão dos resultados obtidos na investigação experimental. Por fim, a conclusão do presente trabalho e as sugestões para trabalhos futuros estão no capítulo 5. Após o capítulo final, são encontradas as referências bibliográficas consultadas e apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

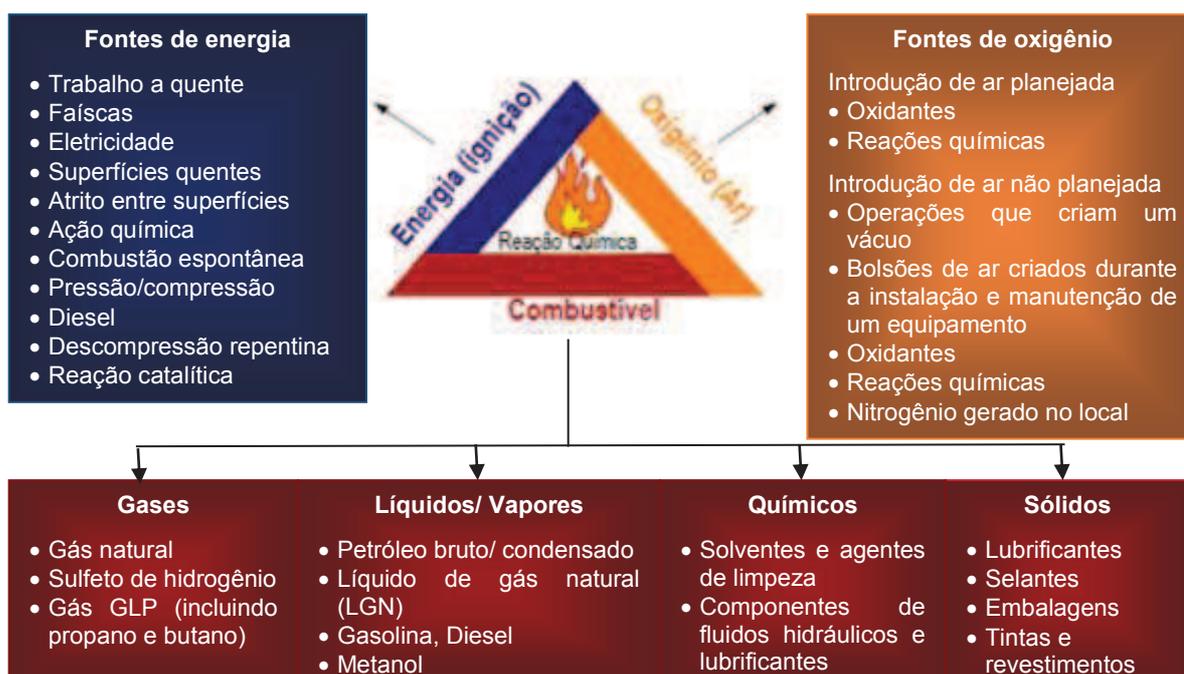
Este capítulo abrange os conceitos de fogo e incêndio. Através da revisão da literatura, são apresentadas as diferenças entre seus conceitos, os mecanismos de transferência de calor, os fatores que influenciam um incêndio e o comportamento de sistemas quando expostos à altas temperaturas. Também são apresentadas as curvas de aquecimento padronizadas e o ensaio que avalia a resistência ao fogo de paredes.

2.1 Fogo

O fogo deixou sua marca na história e foi um elemento fundamental para o desenvolvimento da humanidade. Seria difícil sobreviver sem a queima de carvão, gás e petróleo. Ainda, no presente momento, o poder da combustão impulsiona as economias mundiais desenvolvidas. (QUINTIERE, 2017).

A NBR 13860 (ABNT, 1997) define o fogo como “[...] o processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz”. Para o fogo começar, é necessário a interação entre combustível, comburente e uma fonte de ignição (DAS, 2014; STAUFFER; NICDAÉID, 2013). Estes três itens essenciais geram uma reação química que dão origem ao fogo (Figura 1).

Figura 1 – Tetraedro do fogo



Fonte: Adaptada de ENFORM (2016).

As classes do fogo são dependentes dos materiais existentes em um determinado edifício ou estabelecimento, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de incêndio

| Classe | Combustíveis |
|---------------|--|
| A | materiais combustíveis sólidos |
| B | líquidos e gases inflamáveis ou combustíveis sólidos |
| C | equipamentos de instalações elétricas energizadas |
| D | metais pirofóricos |

Fonte: Elaborada pelo autor, com base na RT n° 2 (RIO GRANDE DO SUL, 2014).

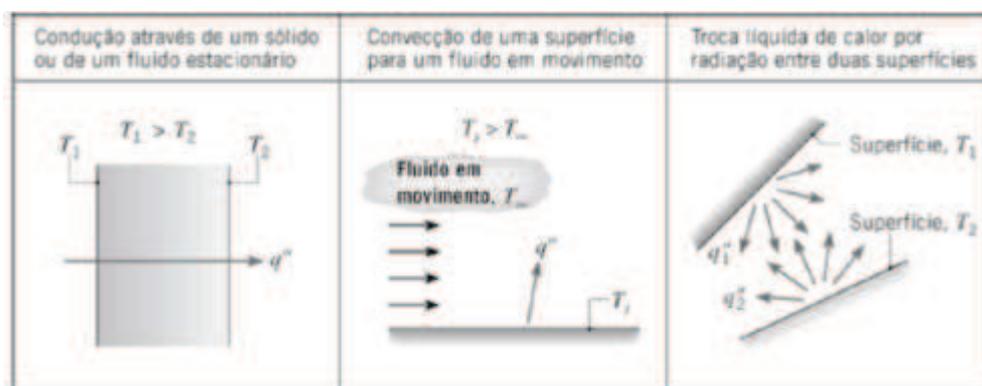
A energia gerada pela reação química emite uma luz, que pode ser azul, estando relacionada aos emissores químicos que formam a chama ou variando de amarela a vermelha devido a fuligem ou carbonização. Dentre as principais causas naturais do fogo, cabe citar a queda de raios, efeitos de terremotos, meteoros e atividades vulcânicas (QUINTIERE, 2017).

2.1.1 Mecanismos de Transferência de Calor

O calor é uma forma de energia em trânsito que surge durante a interação entre corpos com diferentes temperaturas. Sempre que houver transferência de calor vai ocorrer troca e conversão de energia. (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2014).

Conforme a ISO 13943 (ISO, 2017), a transferência de calor consiste na troca de energia térmica dentro de um sistema físico ou entre sistemas físicos, dependendo da temperatura e pressão, por dissipação de calor. Em outras palavras, a transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço (BERGMAN et al., 2014) e ocorre por meio da condução, convecção e radiação (Figura 2). É necessário a presença de um gradiente de temperatura em meio material para a transferência de calor ocorrer por meio de condução e convecção, enquanto que a radiação térmica ocorre sem a necessidade de contato com a matéria.

Figura 2 – Mecanismos de transferência de calor



Fonte: Bergman et al. (2014).

Na área de segurança contra incêndio é necessário ter conhecimento a respeito da taxa de propagação de chamas, relacionada ao seu crescimento e limites de inflamabilidade. As chamas podem variar significativamente na forma e comportamento em função dos materiais combustíveis presentes no ambiente, assim como as condições no entorno. (BHATTACHARJEE et al., 2017).

Na radiação o calor é transferido através de ondas eletromagnéticas. Na convecção uma substância em movimento, isto é, com energia interna, faz trocas térmicas entre diferentes sistemas. A condução consiste na troca de calor entre dois (ou mais) elementos, através da vibração de átomos e moléculas e movimento de elétrons. (BAUER; WESTFALL; DIAS, 2013).

Conforme estabelecido no item 7 da NBR 15200 (ABNT, 2012), durante o período de tempo em que a estrutura é atingida por um incêndio, os elementos estarão sujeitos a distribuições de temperatura provenientes da transmissão de calor, o que reduz a resistência dos materiais e a capacidade estrutural.

Halliday, Resnick e Walker (2009) mencionam que a condução acontece pelo atrito entre átomos de elementos que estão em contato físico direto. Considerando um exemplo de transferência de calor por condução entre placas com diferentes temperaturas, a energia calorífica é conduzida da placa de maior temperatura para a placa de menor temperatura, durante um intervalo de tempo, até as mesmas entrarem em equilíbrio atingindo as mesmas temperaturas. Através da Equação 1 pode ser encontrada a energia transferida ao longo do tempo, descrita matematicamente pela lei de Fourier.

$$P_{cond} = kA \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Onde:

P_{cond} – Taxa de condução (W/m²);

k – condutividade térmica (W/m.K);

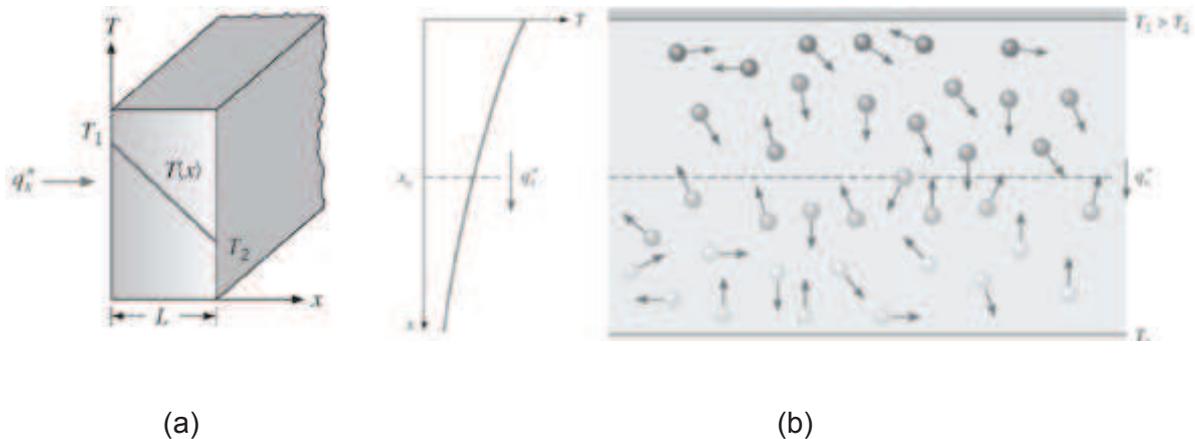
A – área (m²);

ΔT – variação de temperatura (Kelvins - K);

L – espessura (m).

O esquema da Figura 3 representa a transferência de calor por condução, onde a energia das moléculas é proveniente do movimento de translação e, internamente, aos movimentos internos de rotação e de vibração. A colisão entre as partículas faz com que as moléculas com mais energia transfiram energia para as menos energéticas.

Figura 3 – Transferência de calor por condução



Fonte: Bergman et al. (2014).

A Tabela 2 apresenta a capacidade de condução de calor e o calor específico de alguns materiais utilizados na construção civil.

Tabela 2 – Condutividades térmicas (λ) e calor específico (C) de diferentes materiais de construção

| Material | λ (W/m.K) | C (KJ/kg.K) |
|-------------------------------------|-------------------|-------------|
| Argamassa comum | 1,15 | 1,00 |
| Argamassa de gesso (ou cal e gesso) | 0,70 | 0,84 |
| Argamassa celular | 0,40 | 1,00 |
| Tijolos e telhas de barro | 0,70 – 1,05 | 0,92 |
| Placas de fibrocimento | 0,65 – 0,95 | 0,84 |
| Concreto normal | 1,75 | 1,00 |
| Placa de gesso; gesso acartonado | 0,35 | 0,84 |

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Nas situações em que um fluido, como o ar presente no compartimento, entra em contato com um elemento com temperatura superior, acontece a transferência de energia térmica por convecção, ocasionando a expansão do fluido devido ao seu contato com temperaturas elevadas, podendo ser calculado através da Equação 2.

$$q''_c = \frac{q_c}{A} = h_c \Delta T \quad (2)$$

Onde:

q''_c – intensidade do fluxo por convecção (W/m²);

q_c – taxa de transferência de calor por convecção (W);

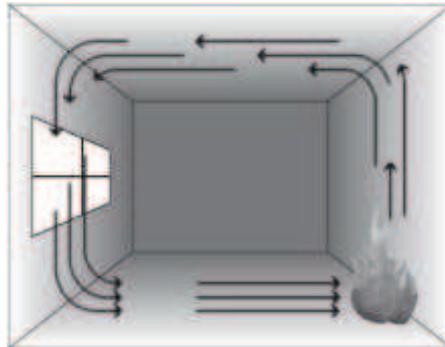
A – área de transmissão de calor (m²);

h_c – coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².K);

ΔT – variação de temperatura (Kelvins - K).

Essa expansão torna o fluido menos denso em relação ao fluido ao seu redor e, conseqüentemente, a força de empuxo o faz subir, conforme representado na Figura 4. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Figura 4 – Transferência de calor por convecção



Fonte: Silva (2014).

A transmissão de calor por meio da emissão de ondas eletromagnéticas é a chamada radiação térmica (Figura 5), que ocorre quando a matéria se encontra a uma temperatura não-nula, ou seja, diferente de zero. As mudanças na estrutura dos átomos que constituem a matéria promovem a emissão de calor (BERGMAN et al., 2014), que pode ser calculada por meio da Equação 3:

$$P_{rad} = \sigma \varepsilon AT^4 \quad (3)$$

Onde:

P_{rad} – taxa de emissão de radiação térmica (W/m^2);

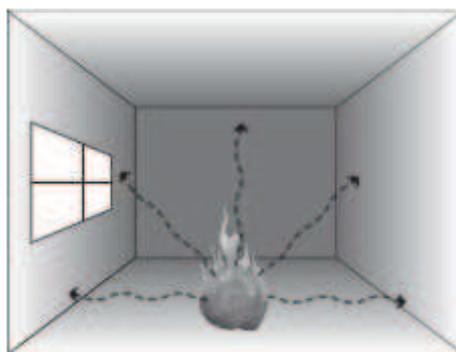
σ – constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$);

ε – emissividade da superfície do objeto (número entre 0 e 1);

A – área da superfície do objeto (m^2);

T – temperatura da área superficial do objeto (*Kelvins* - K).

Figura 5 – Troca de calor por radiação

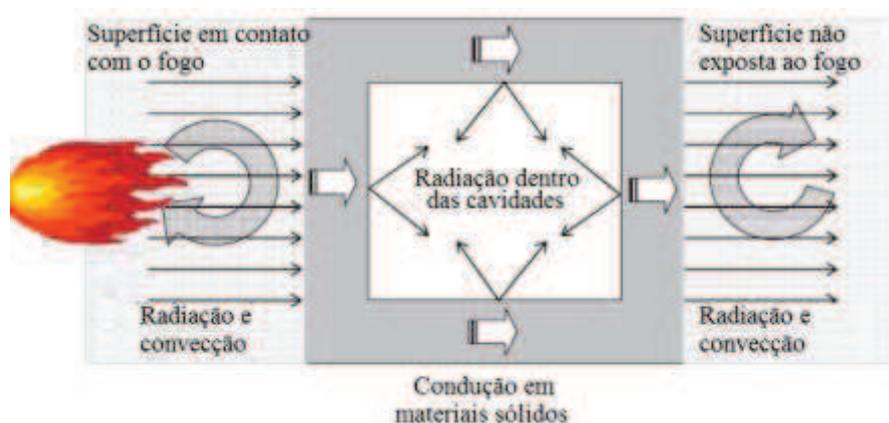


Fonte: Silva (2014).

Os três modos de transferência de calor da superfície exposta para a superfície não exposta de uma parede construída com blocos ou tijolos com cavidades (Figura 6), que podem ser levados em consideração durante uma situação de incêndio são:

- a) condução nas partes sólidas e nas juntas;
- b) convecção e radiação da superfície exposta as altas temperaturas para a superfície não exposta;
- c) radiação dentro das cavidades.

Figura 6 – Transferência de calor através de blocos ou tijolos com cavidades



Fonte: Adaptada pelo autor de Nguyen e Meftah (2014).

2.2 Incêndio

Em casos de incêndio, o fogo acaba se propagando de uma maneira descontrolada no tempo e espaço, apresentando riscos para a sociedade, economia e meio ambiente (ABNT, 1997; DAS, 2014; ISO, 1987; QUINTIERE, 2017).

Dados apresentados no Relatório n° 29 do Centro Mundial de Estatísticas de Incêndio mostram que os custos decorrentes de perdas de incêndio são estimados em aproximadamente 1% do PIB global por ano, evidenciando que para a garantia da segurança dos usuários é essencial levar em consideração a segurança contra incêndio. (WORLD FIRE STATISTICS CENTRE (WFSC), 2014).

Casos de incêndios podem ocorrer em cidades de qualquer porte, afetando edifícios residenciais e comerciais. (WFSC, 2012). Cada edificação está sujeita a diferentes probabilidades de propagação e desenvolvimento do fogo, por isso uma

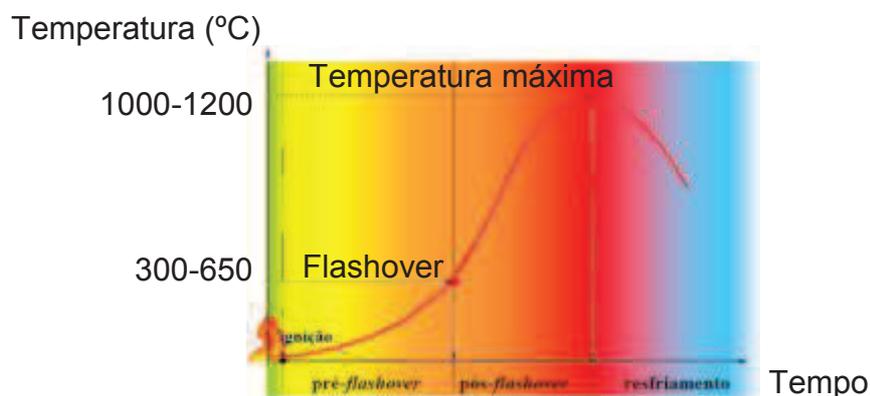
situação de incêndio nunca será igual a outra. (SILVA, 2012). O tipo e sistema construtivo da edificação, assim como as propriedades térmicas dos materiais que compõem os sistemas de compartimentação são alguns dos fatores que influenciam o desenvolvimento do incêndio. (ZHANG; MEHAFFEY; HADJISOPHOCLEOUS, 2016).

Situações de incêndio aumentaram a preocupação da sociedade em relação ao combate e prevenção. A partir do século XX notou-se um aumento nos esforços para aumentar a segurança contra incêndio em edificações, instante em que foram iniciadas as pesquisas para investigar as consequências da ação do fogo em elementos utilizados na construção civil. (QUINTIERE, 2017). Durante as últimas duas décadas, notou-se um desenvolvimento na segurança contra incêndio em edificações pelo fato dos projetistas estarem considerando o risco de incêndios e especificando materiais e sistemas construtivos que apresentem um bom desempenho ao fogo. (NASSIF; YOSHITAKE; ALLAM, 2014).

O primeiro estágio de um incêndio é a pré-ignição, que pode ocorrer por abrasamento ou chamejamento de materiais combustíveis. Quando o fogo se desenvolve por meio do abrasamento, apresenta combustão lenta que é suficiente para gerar gases combustíveis e fumaça no compartimento, enquanto que no chamejamento, tem-se a presença de chamas e fumaça. No segundo estágio o fogo se propaga, ocasionando o crescimento do incêndio e atinge os elementos no entorno do foco. A temperatura vai se elevando até a ocorrência da inflamação generalizada, também conhecida como *flashover*. (SEITO et al., 2008).

A ISO 13943 (ISO, 2017) conceitua *flashover* como sendo a transição para um estado de envolvimento total da superfície em um incêndio de materiais combustíveis dentro de um ambiente. Para Karlsson e Bengtsson (1999), *flashover* se refere a transição súbita e sustentada do fogo em fase de propagação para um incêndio totalmente desenvolvido, com temperaturas acima de 1000°C. Nesta fase o incêndio toma conta do ambiente e todos os materiais combustíveis presentes entram em combustão, sendo consumidos pelo fogo. Após o fogo consumir os materiais combustíveis, o incêndio vai perdendo força e sua intensidade vai diminuindo, passando para o quarto estágio. A Figura 7 apresenta as fases de desenvolvimento de um incêndio, relacionando como a temperatura evolui em função tempo.

Figura 7 – Desenvolvimento da temperatura durante um incêndio



Fonte: Adaptada de Costa (2008).

Dentre os fatores que exercem uma maior influência durante um incêndio (Figura 8) em edificações encontram-se as propriedades dos materiais componentes do sistema de compartimentação, a carga de incêndio, concentração de materiais combustíveis no ambiente, condições climáticas, características do projeto arquitetônico, a ventilação e medidas de proteção. (COSTA, 2008; DRYSDALE, 2011; SEITO et al., 2008; ZAGO; MORENO JUNIOR; MARIN, 2015).

Figura 8 – Fatores que influenciam um incêndio



Fonte: Costa (2008).

O desempenho ao fogo de uma parede de alvenaria é dependente dos seguintes fatores (BELLOVÁ, 2016):

- a) matéria prima do bloco: argila, concreto, concreto celular, entre outros;
- b) tipo de bloco: sólido ou com cavidades e sua espessura;
- c) tipo de argamassa;
- d) relação entre a carga de projeto com a resistência da parede;
- e) esbeltez da parede;
- f) excentricidade do carregamento (para sistemas estruturais);
- g) densidade dos blocos;
- h) qualidade da execução da parede;
- i) tipo de revestimento aplicado.

2.2.1 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

Os elementos de compartimentação devem proporcionar condições seguras de fuga aos ocupantes durante uma situação de incêndio por um determinado período de tempo, chamado de tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). O TRRF consiste no intervalo de tempo obtido experimentalmente sob condições de um incêndio padronizado, buscando simular uma situação de incêndio real, no qual o sistema analisado, de vedação ou estrutural, deve atender aos requisitos de estabilidade estrutural, estanqueidade aos gases quentes e a fumaça e ter isolamento térmico (MOREIRA, 2017; SILVA, 2012).

No Brasil, as exigências quanto ao TRRF em função de fatores como o uso e ocupação da edificação, área dos pavimentos, área total, altura, localização, grau de risco de incêndio, e se há ou não a presença de um sistema de extinção de incêndio devem ser verificadas na NBR 14432 (ABNT, 2001).

Além da NBR 14432, a IT 08 (SÃO PAULO, 2018a) do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (CBMSP) estabelece o TRRF que deve ser atendido por sistemas estruturais e de vedações, sendo muito utilizada como referência no cenário nacional e dispõe de alguns exemplos de sistemas, incluindo paredes de tijolos de barro e cerâmicos, paredes de blocos de concreto, paredes de concreto armado e paredes *drywall*, que atendem a um determinado TRRF.

2.2.2 Tempo de Resistência ao Fogo

Durante uma situação de incêndio, o período de tempo em que os elementos constituintes do sistema construtivo da edificação resistem ao efeito das altas temperaturas e desempenham as funções para os quais foram projetados é chamado de tempo de resistência ao fogo. (LEITE; MORENO JUNIOR; TORRES, 2016; MORENO JUNIOR; MOLINA, 2012).

Em testes padronizados de resistência ao fogo de elementos estruturais e/ou de compartimentação, o tempo máximo que as amostras ensaiadas resistem aos critérios de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico é chamado de tempo de resistência ao fogo (TRF), que deve ser maior ou igual ao TRRF. (COSTA, 2008).

Conforme prescrições da RT n° 02 (RIO GRANDE DO SUL, 2014), um sistema é considerado corta-fogo (CF) durante o período de tempo pelo qual atende aos requisitos de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico. Já quando apenas os requisitos de estabilidade e estanqueidade forem atendidos, o sistema é classificado com para-chamas (PC).

A incidência de altas temperaturas em paredes de alvenaria estrutural reduz sua resistência e rigidez, o que tem influência direta na sua estabilidade, ocorrendo também uma significativa expansão térmica que gera deformações no sistema. (NAHHAS et al., 2007). A exposição das paredes ao fogo em apenas um lado ocasiona uma mudança assimétrica de força e rigidez, o que produz uma alteração dos esforços de compressão, também devido ao aumento da excentricidade e, portanto, uma diminuição da capacidade de carga. (ANDREINI; DE FALCO; SASSU, 2014).

A falta de estanqueidade do lado exposto ao fogo provoca o vazamento de fumaça e gases quentes para outros ambientes, podendo resultar em vítimas fatais. (NASSIF; YOSHITAKE; ALLAM, 2014).

O isolamento térmico deve garantir que a temperatura não se eleve no lado oposto ao que está sendo submetido às altas temperaturas para evitar que o incêndio atinja ambientes adjacentes. (MANZELLO et al., 2004).

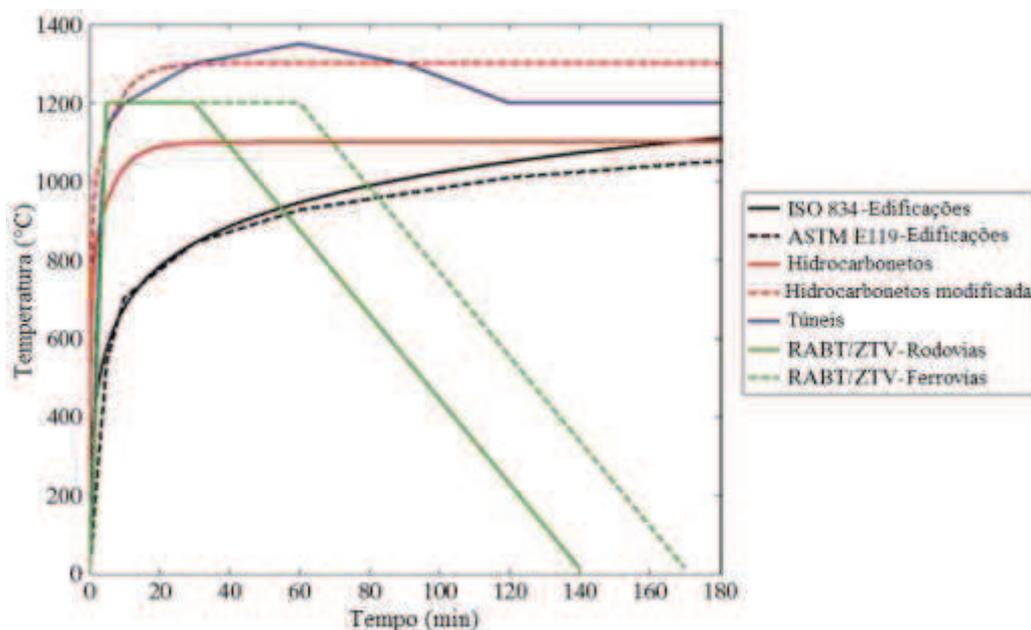
2.2.3 Curvas de Aquecimento

Para que os ensaios experimentais tenham validade, é necessário seguir uma padronização normativa. Curvas que representam a evolução de um incêndio, relacionando o acréscimo da temperatura ao longo do tempo foram sugeridas no início do século XX. (MORENO JUNIOR; MOLINA, 2012). Os diferentes perfis levam em consideração a carga de incêndio estimada para um determinado cenário de incêndio.

As curvas de incêndio (Figura 9) são utilizadas na avaliação da resposta térmica de sistemas e materiais construtivos (KHOURY, 2000; MARAVEAS e VRAKAS, 2014):

- a) ISO 834 (ISO, 2014): utilizada em ensaios de elementos e materiais encontrados em edifícios, como vigas, pilares, lajes e paredes;
- b) ASTM E119 (ASTM, 2016): se assemelha à curva ISO 834, representada por uma temperatura que cresce de maneira contínua;
- c) curva de hidrocarbonetos: utilizada para materiais perigosos, como combustíveis e produtos químicos. Diferente da ISO 834 e da ASTM E119, esta curva fornece um rápido aumento da temperatura do ar dentro dos primeiros minutos, atingindo seu valor máximo após 30 minutos;
- d) curva de hidrocarbonetos aumentada: baseada na curva de hidrocarbonetos. Foi proposta na França, considerando um cenário mais severo com combustão rápida e completa dos materiais perigosos;
- e) curva para o projeto de túneis: apresenta uma pequena redução de temperatura após 60 minutos de exposição ao fogo;
- f) curvas RABT/ZTV: utilizadas para dois grupos de incêndio: em túneis rodoviários e ferroviários. A última possui uma extensão de 30 minutos na temperatura máxima. Ambas estabelecem uma fase linearmente descendente (resfriamento) de 110 minutos.

Figura 9 – Curvas padrão para diferentes cenários de incêndio



Fonte: Adaptada de Maraveas e Vrakas (2014).

As normas mais utilizadas pelo meio técnico e científico a nível mundial para estabelecer parâmetros que sirvam de base para a análise de elementos estruturais e sistemas construtivos quando submetidos as altas temperaturas diante de uma situação de incêndio são a ISO 834 (ISO, 1999) e ASTM E 119 (ASTM, 2016). No Brasil, a curva mais utilizada por pesquisadores é a ISO 834.

A forma da curva de incêndio se relaciona fortemente com o comportamento de um elemento construtivo durante um incêndio. Embora a curva de incêndio padrão tenha sido usada por mais de 100 anos para determinar a classificação de resistência ao fogo dos componentes de construção, ela não representa a maioria dos incêndios em edifícios modernos (ARIYANAYAGAM; MAHENDRAN, 2015). Um incêndio real tem uma fase de decaimento, enquanto que a curva de incêndio padrão, de acordo com a ISO 834 (ISO, 1999) aumenta de forma contínua.

A Equação 4 representa a curva de incêndio padrão ISO 834 (ISO, 1999), baseada na taxa de queima dos materiais encontrados na edificação e fundamentada pelo aumento de temperatura do forno de ensaio em função do tempo. Considerando uma temperatura inicial T_0 de 20°C aplicada na Equação 4, pode-se estabelecer o TRRF mostrado na curva da Figura 10, representando a evolução da temperatura ao longo do tempo.

$$T = T_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (4)$$

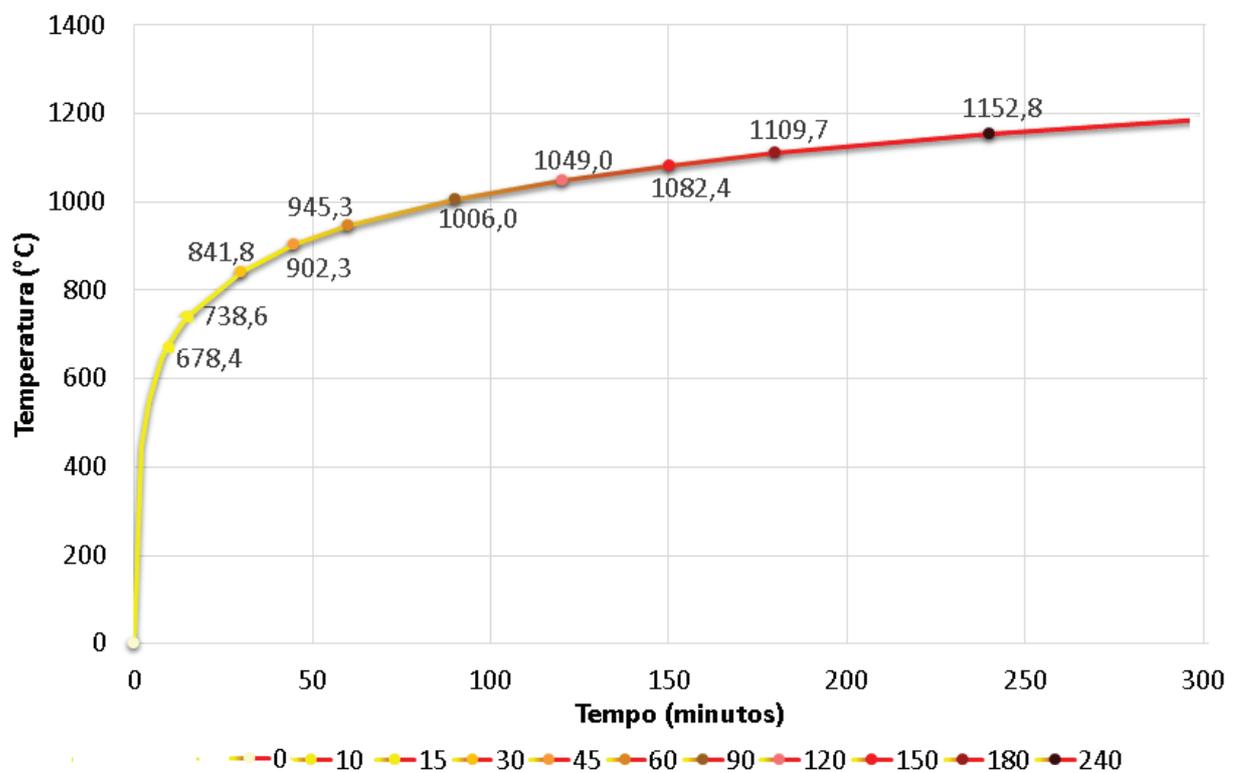
Onde:

T – temperatura dos gases atmosféricos no compartimento no instante t (°C);

T₀ – temperatura dos gases atmosféricos no compartimento no início do incêndio (°C);

t – duração total do incêndio (minutos).

Figura 10 – Evolução da temperatura ao longo do tempo conforme a ISO 834



Fonte: Elaborada pelo autor, com base na Equação 4.

Há preocupações cada vez maiores sobre o comportamento de sistemas construtivos durante um incêndio. Os ensaios de resistência ao fogo que adotam na metodologia a curva padronizada fornecem bons resultados comparativos para sistemas de construção testados em condições idênticas. No entanto, não fornecem uma classificação precisa da resistência ao fogo para edifícios residenciais e comerciais modernos onde a carga de combustível é maior devido ao aumento do uso de materiais termoplásticos, espumas e tecidos sintéticos. (ARIYANAYAGAM; MAHENDRAN, 2015; BWALYA et al., 2007; LEWIS 2008).

2.3 Desempenho de Edificações

Em voga desde 2013, a Norma de Desempenho - NBR 15575 (ABNT, 2013a) estabelece requisitos e critérios de desempenho que devem ser aplicados a edificações habitacionais de até cinco pavimentos de maneira geral e específica para cada sistema construtivo, bem como seus elementos e componentes. Os sistemas devem atender a requisitos mínimos de qualidade, satisfazendo as exigências dos usuários envolvendo aspectos de segurança, habitabilidade e sustentabilidade.

Os critérios de desempenho estabelecidos na NBR 15575 (ABNT, 2013a) foram baseados na ISO 6241 (ISO, 1984), conforme mostra a Tabela 3, sendo que foram feitos os devidos ajustes levando em consideração a realidade brasileira (POSSAN; DEMOLINER, 2013).

Tabela 3 – Critérios de desempenho

| Itens | ISO 6241 (1984) | NBR 15575 (2013) |
|--------------|--|----------------------------------|
| 1 | Estabilidade estrutural e resistência a cargas estáticas, dinâmicas e cíclicas | Desempenho estrutural |
| 2 | Resistência ao fogo | Segurança contra incêndio |
| 3 | Resistência à utilização | Segurança no uso e na operação |
| 4 | Estanqueidade | Estanqueidade |
| 5 | Conforto higratérmico | Desempenho térmico |
| 6 | Conforto acústico | Desempenho acústico |
| 7 | Conforto visual | Desempenho lumínico |
| 8 | Durabilidade | Durabilidade e manutenibilidade |
| 9 | Higiene | Saúde, higiene e qualidade do ar |
| 10 | Conforto tátil | Funcionalidade e acessibilidade |
| 11 | Conforto antropométrico | Conforto tátil e antropodinâmico |
| 12 | Qualidade do ar | Adequação ambiental |
| 13 | Custos | - |

Fonte: Possan e Demoliner (2013).

A NBR 15575 (ABNT, 2013a) foi dividida em seis partes, abordando diferentes sistemas que compõem a edificação, como sistemas estruturais, pisos, paredes, coberturas e sistemas hidrossanitários. Na primeira parte é feita uma

abordagem de requisitos gerais, e é salientado que a responsabilidade em especificar materiais, sistemas e processos para que a edificação atenda ao desempenho mínimo é incumbência dos projetistas, que devem estar cientes das propriedades dos elementos especificados na concepção do projeto.

A etapa de projeto é de extrema importância para o desempenho da edificação através da concepção arquitetônica, escolha dos sistemas construtivos e especificações e detalhamento da execução. Um dos requisitos exigidos pela Norma de Desempenho para serem levados em consideração nos projetos é a segurança contra incêndio das edificações, cabendo ao projetista especificar materiais e sistemas que dificultem a ocorrência da inflamação generalizada, propagação do incêndio e da fumaça, além disso o sistema estrutural deve se manter estável durante e após o sinistro. Ainda, conforme a parte 4 da NBR 15575 (ABNT, 2013c), quando houver isolantes térmicos e absorventes acústicos na parte interna do SVVIE, estes materiais devem ser incombustíveis ou respeitar as classificações especificadas no item 8 (segurança contra incêndio) da respectiva norma.

A Norma de Desempenho tem como referência normativa outras normas relacionadas à segurança contra incêndio, dentre as quais podem ser citadas a NBR 14323 (ABNT, 2013), a NBR 14432 (ABNT, 2001) e a NBR 15200 (ABNT, 2012).

O mau uso pelos usuários, a falta de manutenção e as manifestações patológicas que vão surgindo ao longo do tempo nas edificações acabam afetando a segurança estrutural, no uso e operação. Além disso, em casos excepcionais pode haver grande influência de ações térmicas, oriundas de uma situação de incêndio, atuando na edificação, o que mostra a importância do fator segurança contra incêndio abordado na Norma de Desempenho e sua implantação nos projetos de edificações.

Cabe salientar que a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) promoveu ao longo de 2018, encontros entre profissionais envolvidos com o setor da construção civil objetivando levantar subsídios para a revisão da Norma de Desempenho, cujas discussões envolvem, dentre tantos temas, os requisitos relativos à segurança contra incêndio, buscando minimizar os riscos em casos de sinistros.

2.4 Proteção Contra Incêndio

A segurança contra incêndio é um conceito que não se restringe apenas as medidas para tentar controlar o incêndio ou evitar o surgimento do fogo, estando associada a medidas que visem a prevenção e garantam que os ocupantes estejam seguros, incluindo elementos construtivos resistentes e dispositivos que permitam extinguir o fogo. Para especificar medidas que sejam efetivas na proteção contra incêndio deve-se entender todas as etapas deste fenômeno, que envolvem desde a ignição de materiais e formas de propagação do fogo até a extinção do incêndio. A partir desse conhecimento, pode-se pensar em soluções de segurança contra incêndio. (RODRIGUES, 2016; SEITO et al., 2008).

Além da proteção da vida humana, a segurança contra incêndio tem a função de evitar perdas patrimoniais na edificação, sejam elas parciais ou totais. No planejamento de um sistema de segurança contra incêndio, deve ser considerada a extensão dos danos admissíveis que um sinistro irá causar na edificação, tendo em vista uma otimização dos custos com medidas protetivas. (SILVA, 2014).

Os regulamentos de construção civil exigem que os sistemas construtivos apresentem resistência ao fogo suficiente para permitir que os ocupantes escapem com segurança, além de minimizar as perdas patrimoniais. (CRAFT; DESJARDINS; MEHAFFEY, 2011). A segurança contra incêndio resulta em custos adicionais na edificação. Entretanto, para garantir que a edificação seja eficaz na segurança contra incêndio é mais viável economicamente especificar ainda na concepção do projeto as medidas de proteção e selecionar corretamente os materiais a serem empregados na execução, levando em consideração as características da edificação, como a ocupação e altura. (LIMA et al., 2004; ONO, 2007; TORERO et al., 2014). Venezia e Ono (2014) apontam que o processo de projeto é determinante para o bom desempenho da segurança contra incêndio.

A ISO 13571 (ISO, 2012) considera que os gases tóxicos, o calor e o obscurecimento da fumaça estão entre os principais riscos associados a um incêndio que podem impedir a fuga dos ocupantes de uma edificação. De acordo com Viegas (2016), a fumaça consiste na principal razão pelas mortes relacionadas a um incêndio. Para evitar estes riscos e garantir a proteção contra incêndios de edifícios e estruturas de engenharia civil são utilizadas tanto medidas de proteção ativas quanto passivas. (JONES JUNIOR, 2013). Ambas têm como objetivo proteger

a vida dos ocupantes, reduzir ao máximo a propagação do incêndio, auxiliar as operações de combate e salvamento, bem como preservar o patrimônio, devendo ser utilizadas de maneira combinada durante a concepção do projeto. (SILVA, 2014).

Boas estratégias de proteção contra incêndio devem envolver os sistemas ativos e passivos, e também deve haver treinamentos de como agir em situações de emergência. (RODRIGUES, E.; RODRIGUES, J.; SILVA FILHO, 2017). A utilização de sistemas de proteção busca manter a temperatura dos componentes da edificação, abaixo da temperatura crítica durante o incêndio, mas também são destinados a confinar um incêndio no compartimento de origem. (MRÓZ; HAGER; KORNIEJENKO, 2016).

A proteção contra incêndio ativa inclui sistemas de detecção automática de focos de incêndio, assim como mecanismos de extinção, como os extintores de incêndio, sprinklers, entre outros. A ISO 13943 (ISO, 2017) define proteção passiva contra incêndio como um método utilizado para reduzir ou prevenir a propagação e os efeitos do fogo, calor ou fumaça por meio do projeto e/ou do uso apropriado de materiais e não requerendo detecção e/ou ativação após a detecção, sendo que, os fatores determinantes na proteção passiva contra um incêndio são a estrutura, a compartimentação vertical e horizontal e os materiais que compõem a edificação. (BUCHANAN; ABU, 2017; MRÓZ; HAGER; KORNIEJENKO, 2016).

Viegas (2016) menciona que para evitar a propagação da fumaça, estão sendo utilizadas paredes e portas corta-fogo, além de sistemas de controle de fumaça. Tais medidas refletem em condições mais seguras para os ocupantes durante um incêndio, minimizando os riscos de mortes. Deve-se ter o cuidado com as portas corta-fogo, uma vez que, podem prejudicar o reconhecimento das rotas de fuga, delongando o tempo para a evacuação segura da edificação. Uma alternativa para evitar a propagação da fumaça é com a utilização de cortinas de ar, que não reduzem a visibilidade das rotas de fuga pelos ocupantes.

Em relação ao aumento da resistência estrutural em situações de incêndio de forma passiva, Kirchhof (2010) concluiu que o TRF de elementos estruturais armados com barras de aço é maior, na medida em que a espessura do cobrimento de concreto das armaduras aumenta, acarretando em um atraso para as altas temperaturas atingirem o aço.

A compartimentação é uma medida passiva com a função de proteger as edificações e, por isso, deve ser constituída por elementos resistentes ao fogo,

sendo que estes devem evitar ou atenuar a sua propagação, bem como o calor e gases, interna ou externamente ao edifício (BERTO, 2009; BOLINA et al., 2015), assim como prevenir ou evitar o colapso estrutural. (CRAFT; DESJARDINS; MEHAFFEY, 2011).

Segundo a RT n° 02 (RIO GRANDE DO SUL, 2014), ambas as compartimentações, vertical e horizontal, tem por objetivo “[...] evitar ou minimizar a propagação do fogo, calor e gases, interna ou externamente ao edifício, no mesmo pavimento ou para pavimentos elevados consecutivos”.

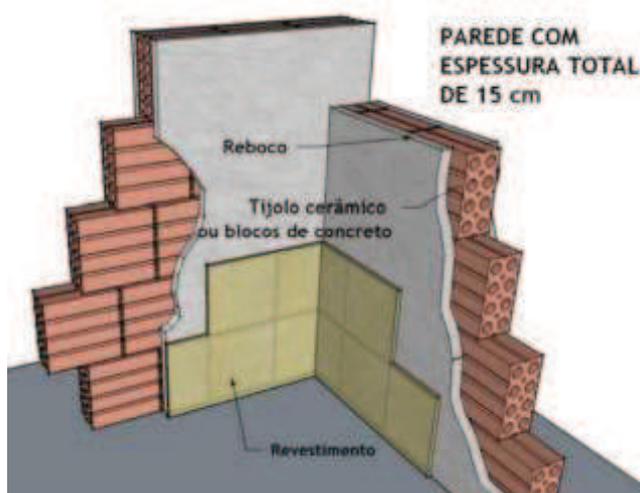
De acordo com o Relatório 221 (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA), 2017) da Associação Nacional de Proteção Contra Incêndios a função das paredes de compartimentação é subdividir as áreas de uma edificação para impedir a propagação do fogo e a passagem de calor e chamas. A parede deve ter boa resistência ao fogo e manter sua estabilidade.

Para cumprir sua função de barreira corta-fogo, as paredes devem ser construídas com base nos sistemas já ensaiados de acordo com testes padrões de laboratório aceitável para garantir a capacidade de resistir a um incêndio. (GAPS, 2015). Contudo, a maioria dos sistemas testados, não levam em consideração no ensaio de resistência ao fogo as instalações prediais que ficam dispostas no interior dos sistemas.

No Brasil, não existe uma norma que especifique requisitos para o projeto de paredes de alvenaria resistentes ao fogo. Por outro lado, existe uma Instrução Técnica, a IT 08 (SÃO PAULO, 2018a), que exemplifica algumas alternativas de paredes com tijolos, blocos de concreto e cerâmicos, concreto armado e *drywall*. Em relação ao dimensionamento de alvenaria estrutural em situação de incêndio, é possível consultar no Eurocode 6 (CEN, 2005) as exigências. O Eurocode também ressalta que é importante conhecer as características dos materiais componentes do sistema, incluindo as propriedades dos blocos, argamassa de assentamento, entre outros, para o estabelecimento do TRRF.

Conforme recomendações da RT n° 05 (RIO GRANDE DO SUL, 2016), as paredes de compartimentação, feitas com tijolos cerâmicos ou blocos de concreto, devem ter pelo menos 15 cm de espessura e devem ser revestidas em ambos os lados com material incombustível, visando aumentar a resistência ao fogo do sistema de compartimentação (Figura 11).

Figura 11 – Representação de sistema vertical de compartimentação corta-fogo



Fonte: Rio Grande do Sul (2016).

A mão de obra encarregada pela execução também é responsável pelo desempenho que o sistema irá apresentar. Falhas nas juntas de assentamento e/ou revestimento podem provocar a redução no TRF do sistema, além de prejudicar o desempenho térmico e o acústico, por exemplo.

Em casos onde tem-se uma abertura ou penetração destinada a passagem de instalações prediais, como por exemplo uma instalação hidráulica (Figura 12), recomenda-se que seja executada uma selagem com o objetivo de evitar a propagação das chamas e gases quentes. As aberturas se tornam caminhos por onde o ar pode percorrer, facilitando a propagação do fogo. (BUCHANAN e ABU, 2017).

Figura 12 – Laje contendo aberturas para passagem de instalações hidráulicas com utilização de selagem corta-fogo

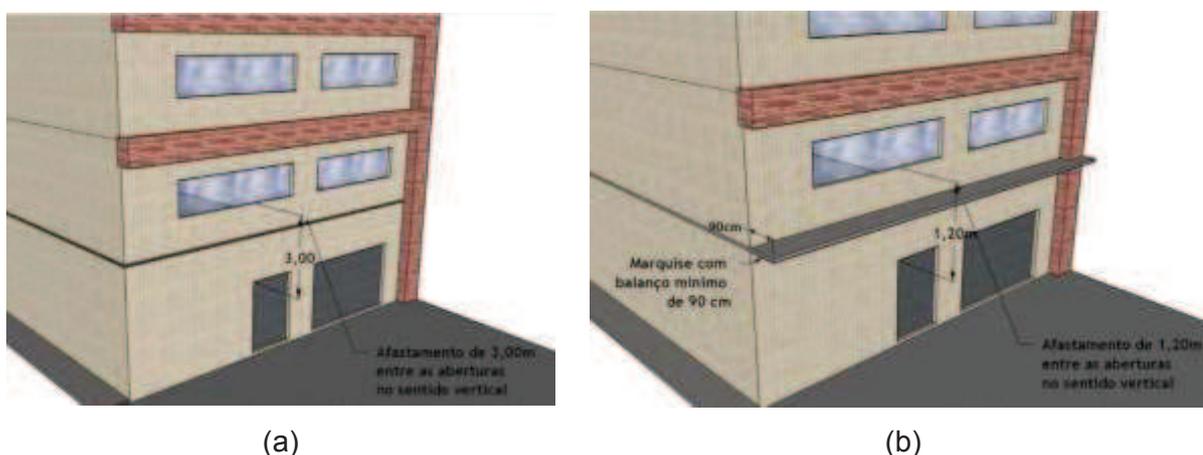


Fonte: Buchanan e Abu (2017).

A IT 09 (SÃO PAULO, 2018b), assim como o Manual da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2013) estabelecem que as aberturas em sistemas de compartimentação, destinadas a tubulação hidráulica, com diâmetro igual ou superior a 40 mm sejam providas de selagem que tenha a capacidade de fechar a abertura em uma situação de incêndio. Em relação ao cenário internacional, na Inglaterra, por exemplo, o *Approved Document B* (HM GOVERNMENT, 2011), que estabelece requisitos de segurança contra incêndio em edificações, também especifica medidas de proteção para aberturas destinadas a instalações a partir de 40 mm de diâmetro.

Em relação as aberturas contidas nas fachadas de edificações, deve-se manter um afastamento mínimo de 3 m entre as mesmas, visando evitar que durante uma situação de incêndio o fogo se propague para outros andares (Figura 13a), e nos casos onde tem-se um elemento corta-fogo auxiliar, como uma marquise ou recuo na fachada, com pelo menos 90 cm de largura, pode-se considerar um afastamento mínimo de 1,20 m entre as aberturas das paredes externas (Figura 13b).

Figura 13 – Representação do afastamento vertical entre aberturas situadas em paredes externas: (a) sem marquise e (b) com marquise corta-fogo

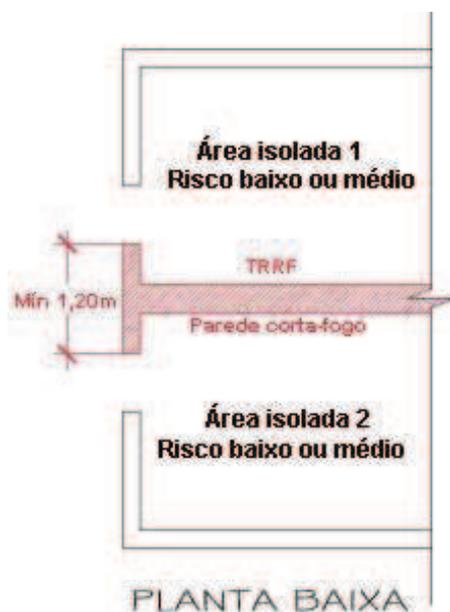


Fonte: Rio Grande do Sul (2016).

Paredes corta-fogo devem ser utilizadas para isolar os riscos através da separação de áreas em uma mesma edificação. A parede de compartimentação deve resistir ao TRRF mínimo estabelecido nas normas ou instruções técnicas durante um incêndio. Um exemplo para grau de risco de incêndio baixo e/ou médio com aberturas no mesmo alinhamento, representado na Resolução Técnica de

Transição (RIO GRANDE DO SUL, 2017), estabelece que a distância horizontal mínima entre as aberturas deve ser 1,2m, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 – Isolamento de risco para áreas com grau de risco de incêndio baixo ou médio



Fonte: Rio Grande do Sul (2017).

2.5 Classificação das Edificações e Áreas de Risco de Incêndio

Com base no Decreto n° 53.280 (RIO GRANDE DO SUL, 2016) é possível classificar as edificações e áreas de risco de incêndio quanto à ocupação, altura e grau de risco de incêndio. A classificação quanto à ocupação/uso pode ser residencial, comercial, locais de reunião de público, entre outros. Na Tabela 4 é mostrada a classificação da edificação em função da altura.

Tabela 4 – Classificação das edificações e áreas de risco de incêndio quanto à altura

| Tipo | Altura |
|------|------------------------------|
| I | Térrea |
| II | $H \leq 6,00$ m |
| III | $6,00$ m < $H \leq 12,00$ m |
| IV | $12,00$ m < $H \leq 23,00$ m |
| V | $23,00$ m < $H \leq 30,00$ m |
| VI | Acima de $30,00$ m |

Fonte: Rio Grande do Sul (2016).

A partir das classificações são estabelecidas as medidas exigidas para a segurança contra incêndio que podem ser consultadas com mais detalhes no Decreto nº 53.280 (RIO GRANDE DO SUL, 2016).

A eficiência da segurança contra incêndio em uma edificação depende das medidas adotadas no projeto que devem levar em conta o grau de risco e o potencial de danos, estando associadas às fases de propagação do incêndio, desde o seu surgimento até sua extinção. (RODRIGUES, 2016).

A estimativa do grau de risco de incêndio é uma das maneiras mais utilizadas para obter uma classificação quanto ao tipo de incêndio. (OLIVEIRA et al., 2013). Rodrigues (2016) menciona que o grau de risco consiste em quão intenso é um incêndio, devendo também ser considerado o nível de dificuldade para sua extinção. A partir da determinação do grau de risco, os sistemas de segurança contra incêndio devem ser instalados de tal forma que sejam eficientes para determinada situação.

Conforme apresentado no Decreto nº 53.280 (RIO GRANDE DO SUL, 2016), o grau de risco de incêndio possui três classificações que consideram a carga de incêndio (Tabela 5).

Tabela 5 – Classificação das edificações e áreas de risco de incêndio quanto ao grau de risco de incêndio

| Grau de risco de incêndio | Carga de incêndio MJ/m² |
|----------------------------------|---|
| Baixo | Até 300 |
| Médio | Acima de 300 até 1200 |
| Alto | Acima de 1200 |

Fonte: Rio Grande do Sul (2016).

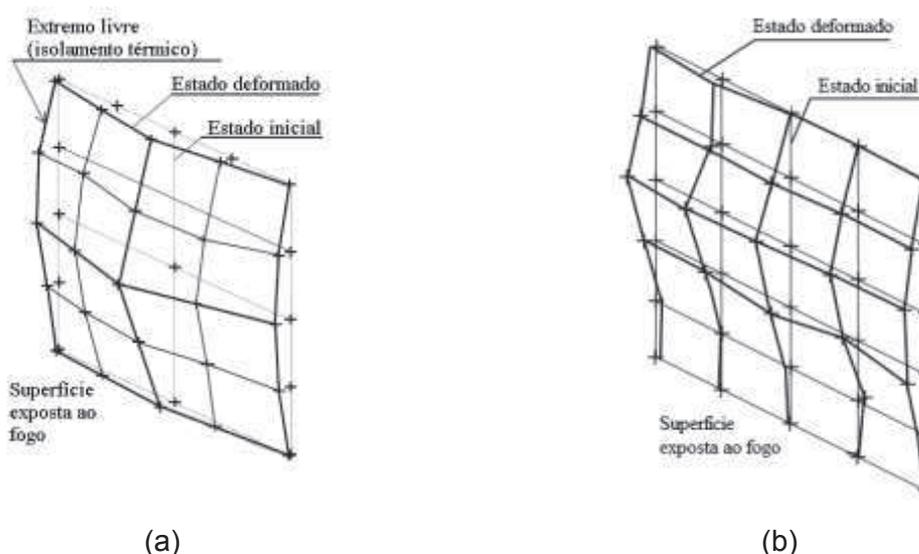
2.6 Comportamento de Sistemas Construtivos em Situação de Incêndio

Quando um sistema é exposto à altas temperaturas, o seu comportamento irá depender das propriedades intrínsecas de cada um de seus componentes, assim como do comportamento em conjunto destes componentes (LEITE, 2018). Conforme Rocha, Rodrigues e Munaiar Neto (2018) a exposição de uma parede às altas temperaturas gera gradientes térmicos na sua seção transversal, resultando em deformações, fenômeno conhecido como curvatura térmica.

Durante a exposição as altas temperaturas, paredes com função de vedação apresentam um comportamento de placa fixada nos quatro cantos (Figura 15a),

sendo que as bordas laterais não tem influência significativa na deformação do tipo dupla curvatura, que tende a ser maior no centro da parede, na direção das altas temperaturas. (NGUYEN; MEFTAH, 2012). Para paredes estruturais, a deformação de curvatura única pode ser observada na Figura 15b, onde o arqueamento proveniente das forças de flexão na direção das altas temperaturas é maior na parte superior da parede. As investigações, como as de Nguyen e Meftah (2012) e Souza (2017) indicaram que as deformações em alvenaria estrutural são menores quando comparados as alvenarias de vedação. No decorrer do tempo de ensaio, os sistemas de alvenaria tendem a retornar em direção a posição de origem, o que, conforme mencionado por Hennemann et al. (2017) e Nguyen et al. (2009), tem relação com a recuperação da rigidez e redução do módulo de elasticidade.

Figura 15 – Representação da deformação sob exposição à altas temperaturas: (a) sistema de vedação e (b) sistema estrutural



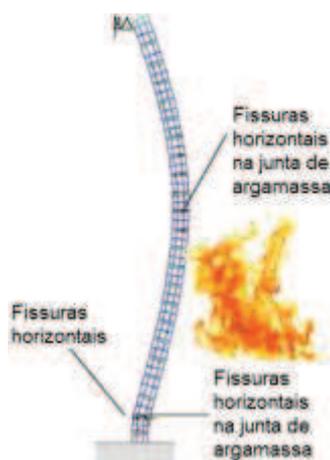
(a)

(b)

Fonte: Adaptada de Nguyen e Meftah (2012).

De acordo com Nadjai et al. (2006) os sistemas verticais tendem a se curvar na direção das altas temperaturas devido ao gradiente térmico entre a face exposta e a face não exposta, ocasionado uma dilatação térmica diferencial entre as superfícies, gerando tensões de tração que superam a resistência a tração da argamassa e, por consequência, surgem fissuras nas juntas de assentamento que se propagam até o revestimento, conforme observa-se no esquema da Figura 16.

Figura 16 – Esquema do encurvamento da alvenaria

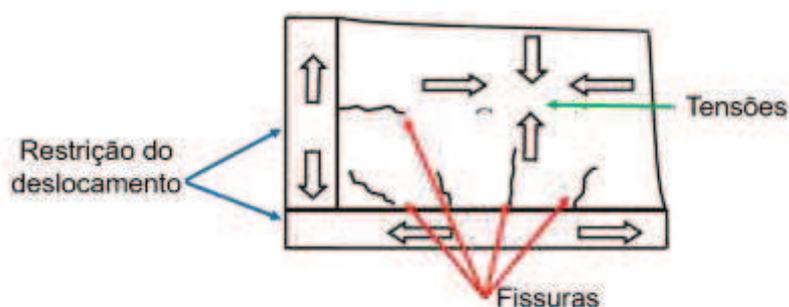


Fonte: Adaptada de Nadjai et al. (2006).

Correia, Rodrigues e Silva (2010) avaliaram o desempenho ao fogo de uma parede de alvenaria de tijolos cerâmicos com um pilar de aço embutido, em um forno vertical, conforme a curva padrão ISO 834 (ISO, 1999), e constataram que o elevado gradiente térmico da seção transversal da parede provocou forças e momentos desfavoráveis na seção transversal do pilar. Ou seja, em relação aos elementos estruturais, como vigas e pilares, as paredes possuem um efeito favorável durante um incêndio, protegendo-os do aquecimento excessivo resultante do fogo, e por outro lado, o aquecimento gera gradientes térmicos que incidem sobre a estrutura.

A superfície não exposta de paredes de compartimentação tende a fissurar em casos de incêndio (Figura 17).

Figura 17 – Fissuras provocadas pelas tensões geradas devido à restrição do deslocamento



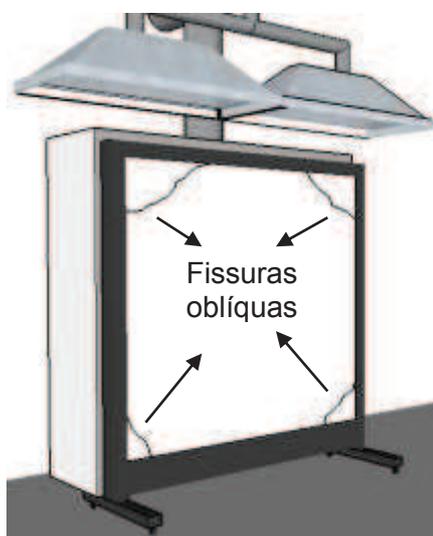
Fonte: Adaptada de Gilbert (2015).

As tensões geradas com a dilatação térmica na superfície não exposta de paredes de compartimentação provocam fissuras horizontais nas bordas laterais e

verticais nas extremidades inferiores e superiores. Nos cantos, é comum se manifestarem fissuras oblíquas, em função da restrição de deslocamento, devido ao vínculo com os elementos estruturais, como vigas e pilares. (GILBERT, 2015).

Em relação aos sistemas verticais construídos em laboratório para avaliação quanto a resistência ao fogo, o vínculo é com o pórtico sob o qual foram construídos, e também há a possibilidade de manifestarem-se fissuras oblíquas nos cantos (POPE; ZALOK, 2017), conforme mostrado no esquema da Figura 18. Além dos cantos, as tensões também provocam fissuras horizontais e verticais.

Figura 18 – Fissuras oblíquas em cantos de paredes de compartimentação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Juntamente com as deformações, a causa das fissuras e trincas, conforme Thomaz (2000), durante um incêndio, quando a parede possui revestimento argamassado e é exposto à altas temperaturas, é devido a desidratação dos componentes estáveis (C-S-H e carbonato de cálcio ou magnésio) da mistura, ou seja, a argamassa perde suas propriedades quando aquecida em condições extremas (BUCHANAN; ABU, 2017).

Lima et al. (2018) concluíram que o súbito aquecimento de sistemas construtivos pode levar a perda da aderência entre a alvenaria executada com blocos cerâmicos e o revestimento argamassado. No mesmo sentido, Manica et al. (2018) mencionam que quando o revestimento na face exposta entra em colapso, geralmente só o revestimento na superfície não exposta às altas temperaturas permanece na parede. Entretanto, cabe ressaltar que, além da exposição à altas

temperaturas, a aderência entre o substrato e o revestimento argamassado pode vir a ser comprometida no caso de argamassas estabilizadas com elevados teores de aditivos incorporadores de ar.

Os aditivos incorporadores de ar, com a função de aumentar a trabalhabilidade da mistura, quando adicionados nas argamassas estabilizadas devem ser dosados com muita cautela, pois seu excesso resulta em um revestimento com baixa resistência superficial, além de prejudicar a aderência entre a base e a argamassa. Isso se deve ao fato das pequenas bolhas de ar adicionadas elevarem o teor de vazios, fazendo com que área efetiva em contato da argamassa com o substrato seja menor. (ALVES, 2002; BAUER, 2005; BELLEI et al., 2015; CARASEK, 2010).

Alves (2002) observou uma redução de 55% no valor da resistência de aderência à tração, com o aumento do teor de ar em argamassas de revestimento, a partir de valores de teor de ar incorporados de 22%. Conforme Carasek (2010), não é recomendável um teor de ar superior a 20%, e além dos aditivos, que interferem nas propriedades da mistura, a aderência também é influenciada pelas condições climáticas e pela energia de aplicação da argamassa, relacionada a mão de obra.

Schafer (2015) avaliou o comportamento da argamassa de revestimento sob altas temperaturas, fazendo ensaios com placas em mufla e com uma amostra de parede em escala real. No ensaio de resistência de aderência à tração com o revestimento de argamassa aplicado em uma parede com tamanho real, foi verificado que houve uma melhora nas propriedades da argamassa até a temperatura de 100 °C, comparado com o revestimento de referência, aumentando a resistência de aderência média em aproximadamente 19%. Aos 300 °C e 500 °C verificou-se uma queda na resistência, de 52% e 78%, respectivamente, em relação ao revestimento de referência. Ainda, aos 500 °C iniciou-se o processo de queda do revestimento, sendo que aos 700 °C não havia mais aderência da argamassa com o substrato. A ocorrência de deslocamento do revestimento de paredes de compartimentação na face exposta às altas temperaturas, resulta em um acréscimo na temperatura da face não exposta e, conseqüentemente, provoca uma redução na capacidade de isolar termicamente. (BOTTIN et al., 2018).

De acordo com Russo e Sciarretta (2013), pouco antes da temperatura no lado não exposto atingir 100°C, a evaporação do teor de água mantém a temperatura em um estado estacionário por cerca de 15 a 30 minutos, até que a

amostra esteja completamente seca. Posteriormente, há um acréscimo de temperatura mais acentuado. Segundo Pope e Zalok (2017), a quantidade de umidade varia ao longo da superfície de uma parede de alvenaria, e assim a temperatura no lado não exposto pode variar. A água presente no revestimento pode migrar através das fissuras.

Assim como em edificações reais, quando as paredes de compartimentação contém em seu interior instalações prediais, que tem como matéria prima o PVC, como é o caso das tubulações hidráulicas, eletrodutos e caixas para tomadas, em caso de incêndio, os elementos podem entrar em combustão e liberar uma determinada quantidade de calor. De acordo com Purkiss e Li (2014) os elementos em PVC possuem uma carga de incêndio entre 16 a 17 MJ/kg, ou seja, ao se ignizarem podem contribuir para o aumento da temperatura no cômodo incendiado e liberar fumaça tóxica. Na investigação de Ebert (2016), realizada no laboratório de reação ao fogo do itt Performance - UNISINOS, concluiu-se que elementos em PVC geram gases inflamáveis, comprometendo ainda mais a segurança em uma situação de incêndio, caso ocorra a inalação destes pelos ocupantes.

2.6.1 Avaliação da Resistência ao Fogo

A avaliação da resistência ao fogo de componentes construtivos baseia-se em testes padronizados para determinar o tempo de resistência até que um critério de falha seja alcançado. (NASSIF; YOSHITAKE; ALLAM, 2014).

Para a avaliação experimental da resistência ao fogo dos paredes de compartimentação deve ser utilizado um forno vertical. Não existe uma padronização internacional para os detalhes da construção de um forno. O único critério que é exigido consiste em seguir uma curva padrão durante o ensaio. (BUCHANAN; ABU, 2017).

O cenário de incêndio mais utilizado no mundo para avaliar a resistência ao fogo de um sistema construtivo está descrito na norma ISO 834 (ISO, 1999), onde a temperatura que incide sobre um sistema vertical ou horizontal, aumenta ao longo do tempo seguindo uma curva de aquecimento padronizada. (CRAFT; DESJARDINS; MEHAFFEY, 2011).

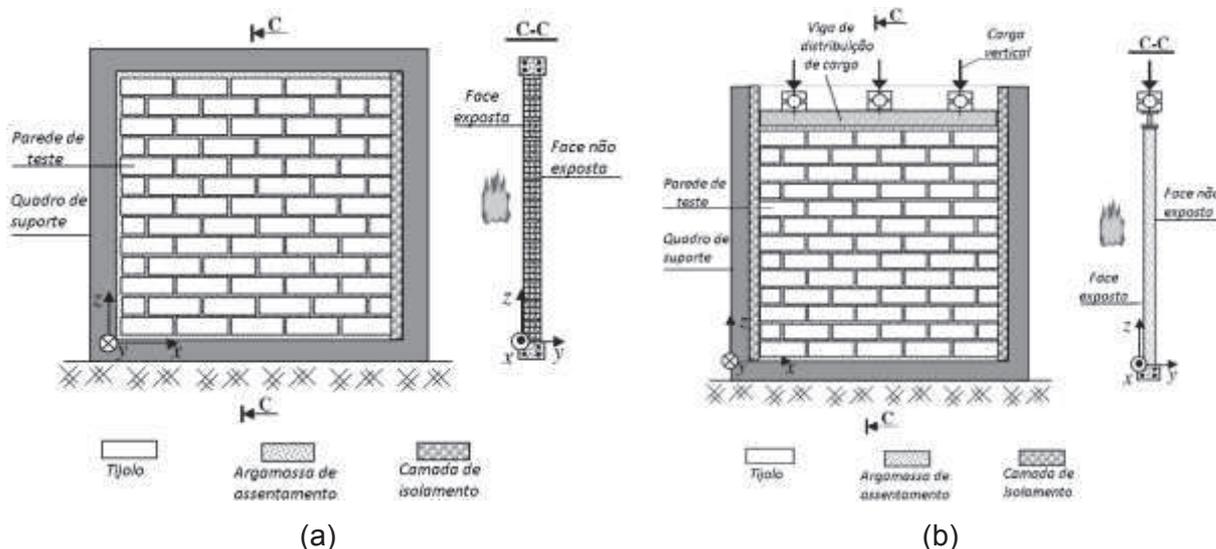
No Brasil, o método para determinar a resistência ao fogo de sistemas de vedação vertical deve seguir as recomendações da NBR 10636: Paredes divisórias

sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo (ABNT, 1989). Nos casos que além de compartimentar, o sistema vertical tem função portante, devem ser seguidas as prescrições da NBR 5628: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo (ABNT, 2001), que determina a aplicação de um carregamento nas amostras durante o ensaio.

Durante os ensaios de resistência ao fogo em fornos verticais, conforme mencionado por Spohr (2016), os gases tendem a subir quando aquecidos, fenômeno físico conhecido como convecção, promovendo um acréscimo na temperatura nas regiões mais altas do forno vertical e, conseqüentemente, no sistema que está sendo testado.

A Figura 19 apresenta a configuração sugerida para testar a resistência ao fogo de paredes (a) sem função estrutural e (b) com função estrutural. Após a montagem e cura da parede, ela deve ser posicionada em frente ao forno vertical para a realização do ensaio e avaliação da resistência ao fogo.

Figura 19 – Esquemas de testes para avaliação do desempenho ao fogo de sistemas de vedações verticais: (a) sem função estrutural e (b) com função estrutural



Fonte: Adaptada de Nguyen (2009).

2.6.2 Estudos de Desempenho ao Fogo

Neste item serão abordadas algumas investigações com paredes de compartimentação, cujo foco era avaliar a resistência ao fogo.

Rosemann (2011) realizou uma investigação com o objetivo de verificar o isolamento térmico de paredes de vedação em alvenaria executadas com blocos cerâmicos. O programa experimental contou com amostras sem revestimento, amostras revestidas com argamassa e amostras preenchidas com areia. Os resultados indicaram que as paredes não revestidas e sem preenchimento mantem a capacidade de isolamento por 106 minutos. Observou-se que quando a parede possui revestimento em ambas as superfícies (exposta as altas temperaturas e não exposta), há um acréscimo de 80% na capacidade de isolamento. A alternativa que, além do revestimento em ambas as superfícies, incorporou areia nos principais alvéolos dos blocos, apresentou uma capacidade 100% superior de manter o isolamento térmico em comparação ao sistema sem revestimento.

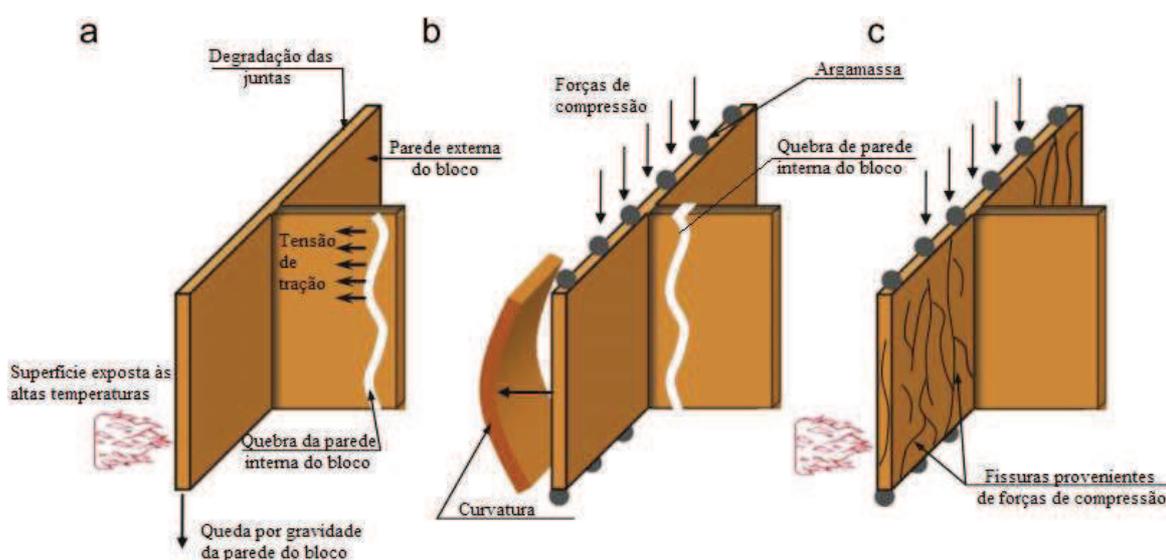
Nguyen e Meftah (2012) avaliaram experimentalmente a resistência ao fogo de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos em escala real. A amostra 1 tinha função de vedação, não possuía revestimento e sua espessura efetiva era 10,0cm. A amostra 2 também tinha a função de vedação e não possuía revestimento. Entretanto, variou-se a geometria do substrato, sendo que a espessura efetiva do sistema era 20,0 cm. A amostra 3 tinha função estrutural, sendo carregada com 130 kN/m, não possuía revestimento e a sua espessura efetiva era de 20,0 cm. A amostra 4 tinha função estrutural, sendo carregada com 90 kN/m, possuindo revestimento em ambas as faces resultando em uma espessura efetiva de 30,5cm.

As amostras 1 e 2 se mantiveram estáveis durante os 240 minutos de ensaios, mesmo com a ocorrência de deslocamento na face exposta da amostra 2. O isolamento térmico foi comprometido em um determinado instante, qualificando a amostra 1 como TRF 43 minutos e a amostra 2 como TRF 104 minutos. Em relação as amostras com função estrutural, o exemplar 3 perdeu sua estabilidade, sendo qualificado como TRF 136 minutos. Já a amostra 4 fora qualificada como TRF 60 minutos, também devido ao colapso estrutural.

Com a investigação de Nguyen e Meftah (2012), concluiu-se que a transferência de calor, durante uma situação de incêndio, dentro de paredes de alvenaria construídas com blocos cerâmicos vazados, ocorre principalmente devido à radiação e a convecção, atentando para o fato de que quanto maior for a espessura das paredes, maior será o isolamento térmico. O lascamento (*spalling*) dos blocos com furos na vertical, que ocorreu em algumas amostras, pode estar associado principalmente a 3 causas (Figura 20):

- (a) pela quebra das paredes internas do bloco;
- (b) pela tendência do bloco a flambar e apresentar, conseqüentemente, uma curvatura;
- (c) presença de zonas frágeis nas paredes externas dos blocos, que se quebram e vão caindo em pequenos pedaços.

Figura 20 – Representação esquemática do efeito do *spalling* em blocos cerâmicos



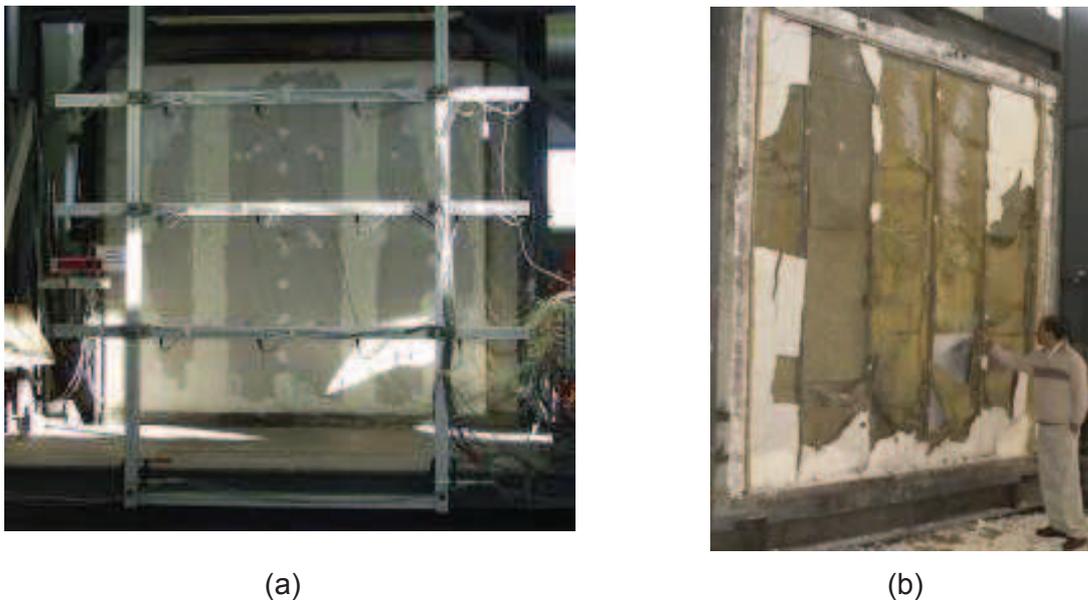
Fonte: Adaptada de Nguyen e Meftah (2012).

Kwon e Jee (2012) avaliaram sistemas de *steel frame* (estrutura de aço) em escala real, concluindo que a estrutura de perfis metálicos revestida com 2 painéis de gesso reforçados com fibra de vidro de 12,5 mm de espessura em cada lado, proporciona uma resistência ao fogo de 60 minutos, mantendo sua estanqueidade, estabilidade e isolamento térmico.

Nassif, Yoshitake e Allam (2014) realizaram ensaios de resistência ao fogo em paredes de gesso preenchidas com um isolante térmico e acústico incombustível, observando o surgimento de fissuras na superfície das placas de gesso expostas ao fogo aos 8 minutos de ensaio e, aos 48 minutos, os painéis começaram a cair, deixando os perfis de aço completamente expostos ao fogo. Na superfície não exposta ao fogo, aos 33 minutos de ensaio foi constatado a presença de fumaça na parte superior do sistema e, aos 40 minutos de ensaio, constatou-se que havia umidade e a presença de água na parte inferior da parede, o que está associado com o processo de desidratação do gesso. Além disso, foi concluído que

o gesso perdeu suas propriedades mecânicas com perda total de rigidez em temperaturas superiores a 150 °C. A Figura 21 mostra o sistema ensaiado.

Figura 21 – Parede ensaiada: (a) termopares instalados na amostra antes do teste e (b) superfície da amostra exposta ao fogo após o teste



Fonte: Nassif; Yoshitake; Allam (2014).

Bolina et al. (2015) avaliaram duas paredes maciças de concreto armado com função de vedação seguindo as recomendações da NBR 10636 (ABNT, 1989), utilizando como parâmetros fixos um concreto com resistência à compressão de 25 MPa, relação a/c de 0,60 e cimento CP IV, variando a espessura das amostras, uma com 10,0 cm e outra com 14,0 cm. Ambas as amostras mantiveram os critérios de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico pelo tempo de 120 minutos, sendo consideradas seguras para utilização como medida de proteção passiva corta-fogo.

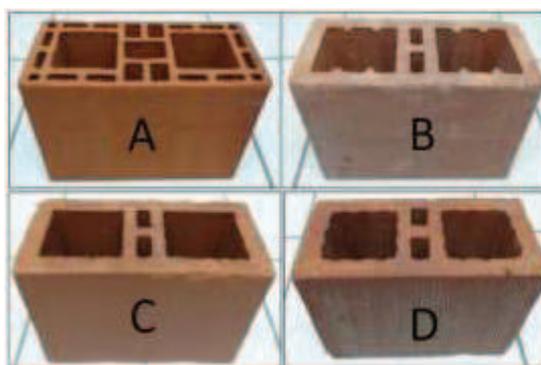
Moreira (2017) avaliou paredes compostas por placas de concreto armado. A pesquisa incluiu a análise de amostras com diferentes idades de cura, entre 7 e 84 dias. Foi constatado que quanto maior o tempo de cura, menor é a presença de umidade na amostra, o que melhora o desempenho quanto ao TRF.

Souza (2017) avaliou a influência da espessura do revestimento de argamassa em paredes com função de vedação e com função estrutural, concluindo que quanto maior for a espessura do revestimento, maior será o TRF. O carregamento também mostrou sua influência no deslocamento lateral das amostras, sendo que as paredes com carga tiveram um menor deslocamento

quando comparadas com as paredes sem carregamento. As paredes sem carregamento tiveram um TRF maior em comparação aos sistemas estruturais, com um maior deslocamento.

Lima et al. (2018) investigaram o comportamento de paredes de alvenaria expostas à altas temperaturas variando a geometria do bloco. Foram utilizadas 4 geometrias diferentes de blocos de argila para a construção das amostras com função estrutural, cujas dimensões eram de 75 x 80 cm (comprimento x altura), sendo o bloco A com resistência à compressão de 7 MPa, o bloco B com 10 MPa, o bloco C com 15 MPa e o bloco D com 18 MPa. A Figura 22 mostra o aspecto visual dos blocos investigados. Todos blocos tinham dimensões de 150 x 200 x 300 mm (largura x altura x comprimento), e as amostras receberam chapisco e revestimento argamassado externo de 2,0 cm e revestimento interno de 1,0 cm. As amostras foram submetidas a uma temperatura de 900 °C por 240 minutos, mantendo sua integridade estrutural e estanqueidade durante todo o ensaio. No que concerne ao isolamento térmico as amostras confeccionadas com os blocos A e D mantiveram sua capacidade até os 240 minutos de exposição, enquanto que as amostras construídas com os blocos B e C se mantiveram isolantes por 180 minutos e 210 minutos, respectivamente. O bloco A foi o que apresentou o melhor desempenho.

Figura 22 – Aspecto visual das geometrias investigadas



Fonte: Lima et al. (2018).

A partir das investigações apresentadas, elaborou-se o Quadro 1, com foco nos estudos de alvenarias com blocos cerâmicos, contendo os principais objetivos e características das amostras analisadas, assim como os resultados encontrados.

Quadro 1 – Investigações de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos quanto a resistência ao fogo

| Objetivo(s) e características do sistema construtivo investigado | Método de ensaio | Resultados | Autor(es) |
|---|------------------|--|------------------------|
| Verificar o isolamento térmico de paredes com função de vedação, construídas com blocos cerâmicos, com e sem revestimento argamassado, e ainda preenchidas com areia. | NBR 5628 | * Parede sem revestimento e sem preenchimento - TRF 106 minutos; * Parede revestida (1,5cm em ambas as faces), sem preenchimento - TRF 196 minutos; * Parede sem revestimento e com preenchimento - TRF 243 minutos; * Parede revestida (1,5cm em ambas as faces) e com preenchimento - TRF 405 minutos | Rosemann (2011) |
| Avaliar a resistência ao fogo de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos, sendo: P1 – Vedação, sem revestimento. Espessura de 10,0cm P2 – Vedação, sem revestimento. Espessura de 20,0cm P3 – Sem revestimento e carga de 130 kN/m. Espessura de 20,0cm P4 – Revestimento no lado exposto (gesso de 10 mm de espessura e uma camada de 80 mm de lã de rocha) e no lado não exposto 15mm de revestimento argamassado Carga de 90kN/m. Espessura efetiva de 30,5cm. | ISO 834 | P1 – TRF 43 minutos P2 – TRF 104 minutos P3 – TRF 136 minutos P4 – TRF 60 minutos | Nguyen e Mefteh (2012) |
| Avaliar a influência do revestimento argamassado e do carregamento na resistência ao fogo de paredes de alvenaria confeccionadas com blocos cerâmicos, sendo: P1 – 25mm de revestimento externo P2 – 25mm de revestimento externo. Carga: 10 tf/m P3 – Revestimento: 15 mm interno e 25,0mm externo P4 – Revestimento: 15 mm interno e 25,0mm externo. Carga: 10 tf/m P5 – Revestimento: 25mm interno e 25mm externo P6 – Revestimento: 25mm interno e 25mm externo. Carga: 10 tf/m | NBR 5628 | P1 – TRF 131 minutos P2 – TRF 81 minutos P3 – TRF 208 minutos P4 – TRF 142 minutos P5 – TRF 240 minutos P6 – TRF 221 minutos | Souza (2017) |
| Investigar a influência da geometria do bloco cerâmico na resistência ao fogo de paredes de alvenaria | NBR 5628 | A alvenaria de blocos com paredes longitudinais e transversais e um duplo alvéolo central transmitiu menos calor. | Lima et al. (2018) |

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.6.3 Instalações Prediais em Paredes de Compartimentação

É muito comum que paredes contenham aberturas, as quais se destinam a instalação dos elementos elétricos e hidráulicos que fazem parte do projeto. Como medida de segurança, a IT 09 (SÃO PAULO, 2018b) recomenda que as aberturas com diâmetro superior a 40,0 mm, existentes em sistemas de compartimentação, sejam protegidas com elementos corta-fogo visando evitar a propagação do fogo e fumaça, garantindo a resistência ao fogo do sistema. A NBR 15575-3 (ABNT, 2013b) também estabelece como requisito a selagem corta-fogo em prumadas elétricas e hidráulicas.

No entanto, além da escassez de trabalhos na literatura técnica sobre a avaliação do desempenho ao fogo de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos construídas em escala real, foram encontrados poucos estudos publicados com amostras na qual havia a presença de componentes de instalações elétricas e/ou hidrossanitárias embutidos em sistemas de compartimentação, analisando o efeito das aberturas na resistência ao fogo. Entretanto, existem inúmeras patentes registradas na qual foram desenvolvidos elementos elétricos, hidráulicos e selagens com a função de evitar a propagação das chamas e resistir às condições de exposição severa de altas temperaturas. Alguns exemplos:

- a) Patente 0008098 A1 – trata-se de um cabo elétrico elaborado para resistir ao fogo, água e tensões mecânicas, através da barreira externa ao condutor, composta por 3 camadas, sendo uma camada de materiais compósitos polímero-metal entre duas camadas de material inorgânico. Dentre os 4 cabos testados, 1 foi aprovado na questão da resistência ao fogo, água e tensões mecânicas, o qual foi exposto e resistiu durante 360 minutos a uma temperatura de 1050 °C e uma voltagem de 150/250 V, na presença de choque mecânico e jatos de água com vazão de 0,8 l/min e 12 l/min. (SCAGLIONE et al., 2014);
- b) Patente 194558 A2 – refere-se a um material corta-fogo para ser usado em sistemas de compartimentação verticais ou horizontais, quando providos de uma abertura tal como a feita por um cabo ou tubo. O material desenvolvido é poroso, possui propriedades resilientes e é impregnado com um agente intumescente, que se expande quando aquecido a uma

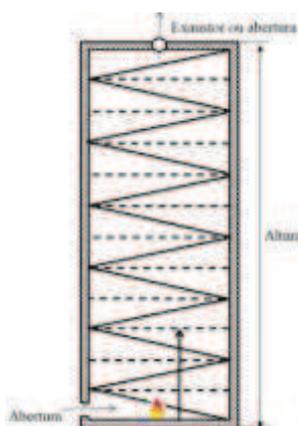
determinada temperatura, obstruindo a abertura e evitando a passagem das chamas. (OUTRAM et al., 2017).

As aberturas em sistemas de compartimentação são o ponto fraco para a passagem de fumaça e propagação do fogo (AUDOUIN et al., 2013; GAPS, 2015), permitindo a transferência de calor, principalmente, através da convecção. (PRÉTREL et al., 2017).

Independentemente da classificação corta-fogo de uma parede, quando houver aberturas no elemento, a compartimentação será ineficaz na segurança contra incêndio caso as aberturas estejam desprotegidas ou se a proteção da abertura não sofrer manutenções periódicas (GAPS, 2015). Assim, ensaios que avaliam o desempenho de uma parede de alvenaria construída somente com blocos, não fazendo o uso de elementos prediais comumente empregados nos edifícios, como é o caso das instalações elétricas e hidrossanitárias que ficam embutidos em seu interior, podem aferir resultados insatisfatórios em relação a resistência ao fogo.

Em uma abertura do tipo shaft (Figura 23), durante uma situação de incêndio, a transferência de calor ocorre devido a convecção e radiação, em função do fluxo de fumaça no interior. (QI et al., 2017).

Figura 23 – Esquema de uma abertura do tipo “shaft” em um edifício



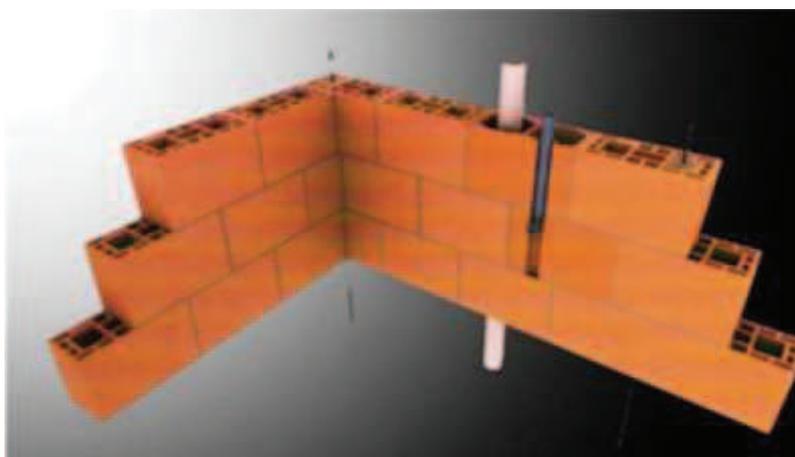
Fonte: Adaptada de QI et al. (2017).

Para as aberturas em paredes de compartimentação feitas para tubulações, eletrodutos ou dutos, há opções para garantir a integridade da parede durante uma situação de incêndio, sendo que uma das alternativas é a selagem intumescente

corta-fogo. Uma abertura desprotegida através de uma parede de compartimentação fornece um caminho de passagem para que o fogo fissure a parede (SCHROLL, 2016), fazendo com que o elemento perca ou reduza a sua resistência ao fogo, se tornando ineficaz em relação à segurança contra incêndio. Por isso, o *Uniform Plumbing Code* (Código de encanamentos) recomenda que todas as aberturas destinadas a passagem de tubulações, existentes em lajes e/ou paredes, sejam protegidas de maneira a garantir que o fogo não se propague para compartimentos adjacentes (WASHINGTON STATE BUILDING CODE, 2016).

A tubulação plástica que atravessa paredes e lajes com função corta-fogo acaba aumentando as chances de que o fogo, a fumaça e os gases quentes se propaguem para ambientes adjacentes. Para evitar danos maiores, desde a década de 70 já era recomendado o uso de selantes intumescentes que tem como objetivo fechar as aberturas das instalações prediais mediante um evento de incêndio. A Figura 24 mostra a instalação hidráulica em uma parede.

Figura 24 – Representação de uma instalação hidráulica em parede

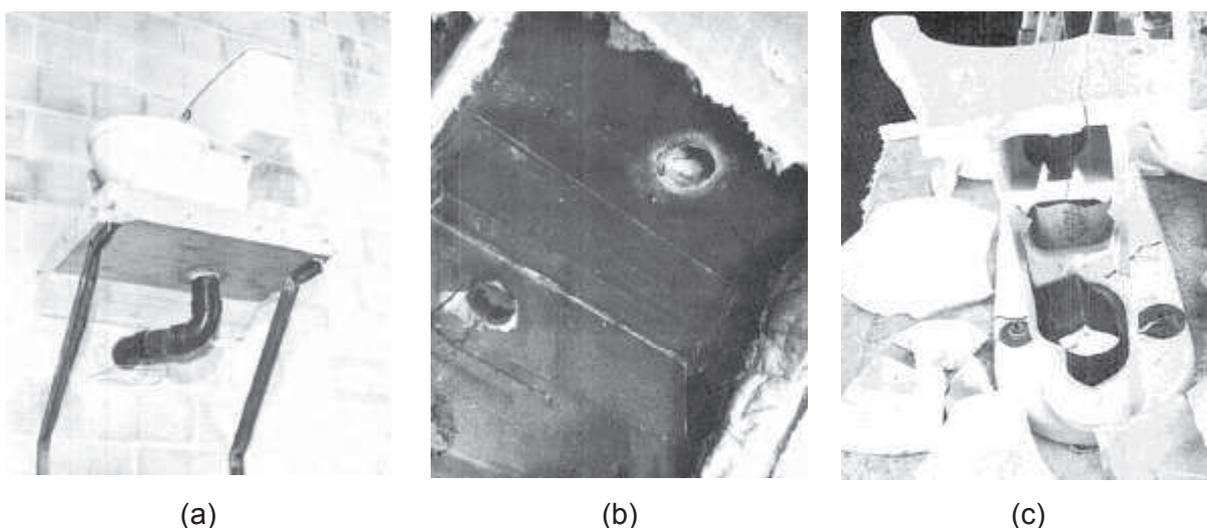


Fonte: Borges (2015).

Publicações de longa data, como a de McGuire (1973) já alertava sobre o risco que as aberturas existentes em pisos e paredes causam na propagação do incêndio. McGuire (1974) avaliou experimentalmente a resistência ao fogo de um sistema constituído por alvenaria de blocos de concreto e laje de concreto armado com uma instalação hidrossanitária, conforme mostrado na Figura 25. Após a realização do teste, que teve uma duração de 2 horas e seguiu as recomendações da ASTM E119, foi verificado que tanto a parede, assim como a laje não apresentavam sinais de comprometimento da segurança estrutural, entretanto a

tubulação de PVC sofreu colapso na face exposta e na face não exposta às altas temperaturas, assim como o sistema perdeu a capacidade manter o isolamento térmico e a estanqueidade. Foi mencionado que, se tivesse sido utilizada uma selagem corta-fogo, provavelmente o sistema apresentaria um melhor desempenho.

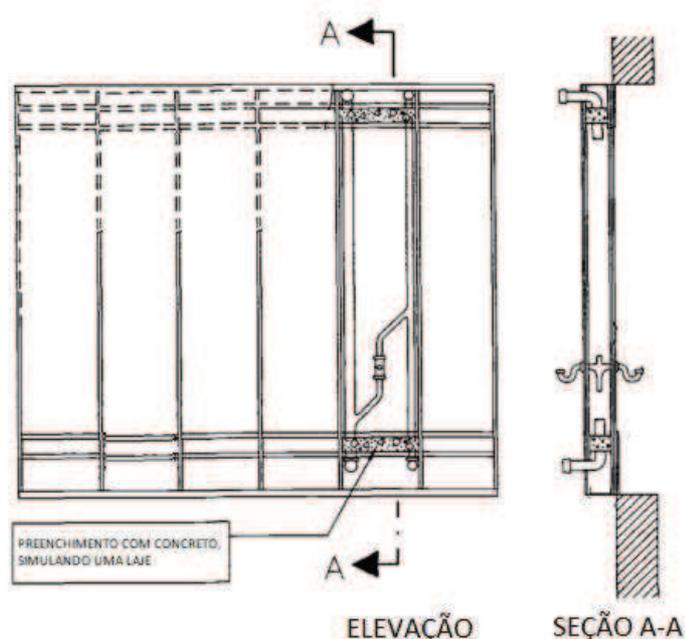
Figura 25 – Ensaio de resistência ao fogo: (a) montagem da amostra, (b) amostra após ensaio e (c) vaso sanitário destruído na parte superior da laje



Fonte: McGuire (1974).

Zicherman (1992) testou o desempenho sob altas temperaturas de um sistema de gesso com tubulação plástica embutida, conforme o esquema da Figura 26. As amostras continham aberturas destinadas para a conexão da tubulação com torneiras, uma no lado exposto às altas temperaturas e outra no lado não exposto. O sistema incluía a simulação de pisos inferiores e superiores, através do preenchimento com concreto no limite vertical inferior e superior da amostra. Os resultados indicaram que a resistência ao fogo foi comprometida e, o uso de uma selagem no sistema poderia ter promovido um desempenho mais satisfatório.

Figura 26 – Configuração de teste de resistência ao fogo de parede de gesso com aberturas de tubulação hidrossanitária



Fonte: Adaptada pelo autor de Zicherman (1992).

Conforme mostrado na Figura 27, é muito comum que paredes de compartimentação contenham elementos elétricos embutidos dentro do sistema, tais como eletrodutos, caixas de luz, fios, cabos, entre outros, o que acarreta em uma perda da espessura equivalente da seção transversal. Para que uma instalação elétrica seja considerada segura é necessário levar em consideração no projeto os requisitos abordados na NBR 5410 (ABNT, 2004), garantindo um correto dimensionamento de condutores e demais elementos elétricos.

Figura 27 – Abertura em parede destinada para instalação elétrica



Fonte: Registrada pelo autor.

Além do projeto elétrico estar em conformidade com as exigências normativas vigentes para evitar as chances de curtos-circuitos, que podem ser uma das causas do início de um incêndio, também é necessário utilizar materiais não propagantes ou retardantes às chamas. Assim, os elementos que compõem as instalações elétricas devem ser incombustíveis e, estes aliado a um sistema de compartimentação resistente ao fogo, irá tornar a edificação mais segura em relação à segurança contra incêndio.

Os cabos podem perder suas funções ou serem menos eficientes quando expostos a fontes de calor, mudando sua resistência, deteriorando sua qualidade de sinal ou provocando curto circuito, o que pode causar um incêndio. Além disso, são compostos por uma camada de isolamento, geralmente materiais plásticos, que são inflamáveis e podem ser decompostos em altas temperaturas, liberando calor, partículas de fuligem e gases tóxicos. Esse problema é de grande interesse por causa do crescente uso de cabos para transmissão de energia e comunicação nas edificações atuais. (COURTY; GARO, 2017; HE et al., 2016).

Conforme mencionado em Kobayashi et al. (2017) e Gong, Xie e Huang (2018), a ignição dos cabos elétricos é consequência do mau funcionamento devido a erros de projeto ou por falhas na instalação, resultando, na maioria das vezes, como a principal causa dos incêndios em edificações. Após o superaquecimento devido a sobrecargas na rede, os cabos entram em ignição atingindo o isolante que envolve os condutores de eletricidade, dando início ao foco de incêndio, podendo resultar em grandes catástrofes nos casos em que o fogo não é controlado e se propaga para compartimentos adjacentes.

Atualmente existem diversos produtos que são usados como isolante em condutores elétricos, sendo que a maioria são revestimentos poliméricos, geralmente à base de policloreto de vinila (PVC), desenvolvidos para não propagarem chamas até a faixa de 70 °C. Apesar do fato de não propagarem chamas, ao ser exposto a altas temperaturas ocorre o seu gotejamento, atingindo elementos próximos e, assim, ocasionando a propagação do fogo.

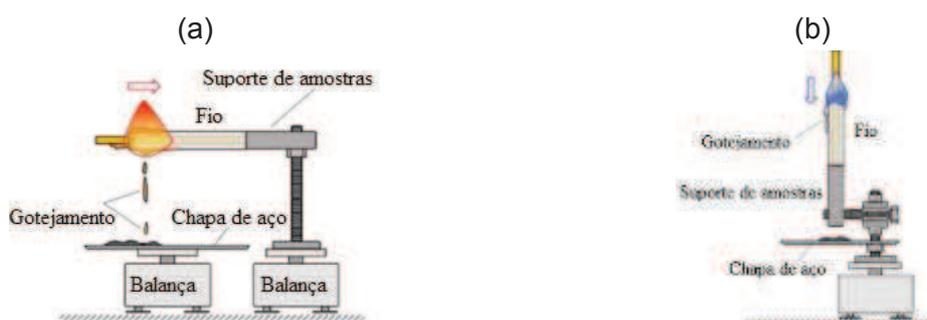
Em situações adversas, como um incêndio, serviços elétricos são desligados para que a água usada no combate às chamas não conduza eletricidade evitando que o fogo cause curtos-circuitos na rede e se alastre e, principalmente, para evitar choques fatais. Por outro lado, conforme mencionado por Konnick e Mennone (2009) a eletricidade pode salvar vidas durante um incêndio, pelo fato de gerar energia para

iluminar saídas de emergência, além de outras situações. A eletricidade também é fundamental em hospitais, que são locais onde há enfermos que dependem de dispositivos elétricos para sobreviver.

Conforme já foi mencionado, durante um incêndio, as temperaturas podem ultrapassar 1000 °C, dependendo da carga de incêndio presente no ambiente e entorno. Atualmente, a maioria dos cabos e fios elétricos não resistiria as altas temperaturas atingidas durante um incêndio. Para minimizar o efeito do fogo, alguns cabos foram desenvolvidos e patenteados visando um melhor desempenho sob altas temperaturas. Um exemplo é o condutor elétrico disposto na Patente US n. 7538275 B2 (KONNICK; MENNONE; 2009), que resiste a temperaturas de até 1090 °C por pelo menos 60 minutos, sendo composto por um fio condutor, envolvido por uma trança inorgânica, coberta por um polímero (borracha de silicone ceramificável) e uma capa de retenção não metálica (visando inibir a expansão do polímero ceramificável). Empresas no cenário nacional dispõem de alternativas como tintas intumescentes e revestimentos ablativos que protegem os cabos por até 2 horas durante uma situação de incêndio.

Algumas pesquisas, como a de Kobayashi et al. (2017) investigaram o comportamento isolado de condutores elétricos, analisando como se dá o derretimento e gotejamento de fios elétricos posicionados na horizontal e na vertical durante a propagação de chama e verificando a influência do diâmetro dos fios e diferentes isolantes de polietileno. Também houve variação no núcleo do fios, avaliando fios de cobre, aço inoxidável e sem núcleo. Para a amostra sem núcleo, foi posicionada uma barra oca de aço de 1,0 mm que apenas mantinha a posição do tubo de isolamento. A configuração dos testes é mostrada na Figura 28.

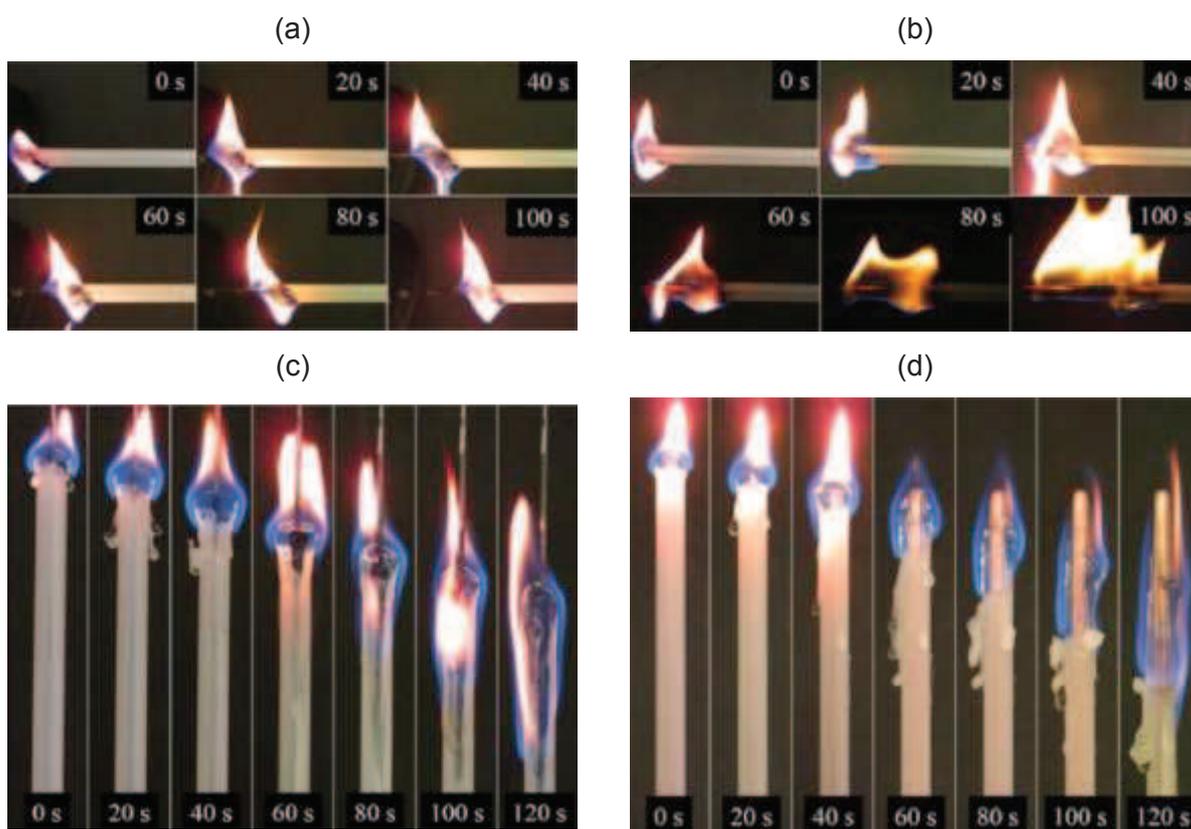
Figura 28 – Equipamento para fins experimentais: (a) propagação de chamas para o fio horizontal e (b) propagação de chamas para o fio vertical



Fonte: Adaptada de Kobayashi et al. (2017).

Foi constatado que quando o cabo é aquecido, a camada de isolamento começa a derreter e os diferentes tipos de isolantes usados no estudo de Kobayashi et al. (2017), por serem da mesma matéria-prima, não apresentaram variação significativa no gotejamento apesar de apresentarem densidades e propriedades físico-químicas distintas. Entretanto, foi constatado que os cabos dispostos na posição horizontal tendem a gotejar mais que os cabos na posição vertical, sendo mais críticos na contribuição para provocar a ignição de elementos presentes no entorno e propagar o fogo. É possível ver na Figura 29 a evolução das chamas em alguns dos fios utilizados na pesquisa.

Figura 29 – Evolução das chamas em fios isolados de mesmo diâmetro e mesma camada de isolamento: (a) fio sem núcleo na horizontal, (b) fio com núcleo de cobre na horizontal, (c) fio sem núcleo na vertical e (d) fio com núcleo de cobre na vertical

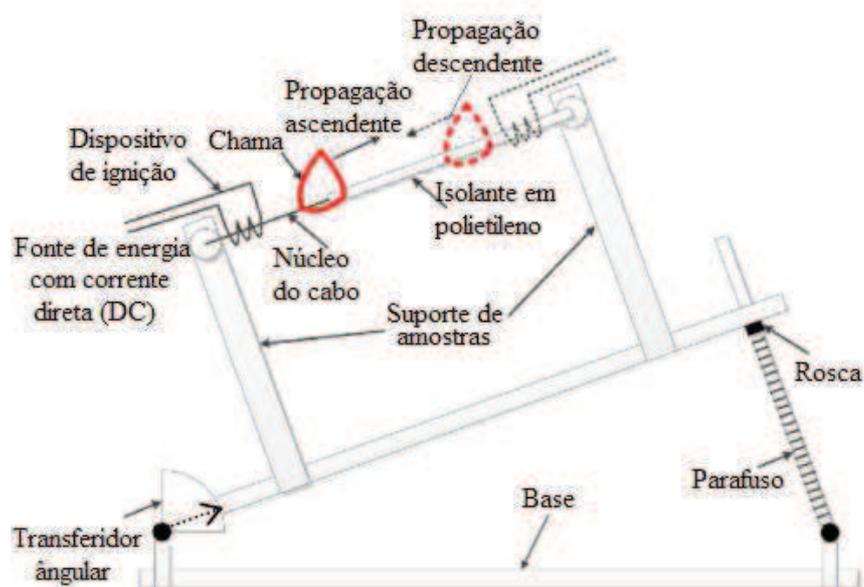


Fonte: Kobayashi et al. (2017).

Hu et al. 2015 analisaram experimentalmente a propagação de chamas em cabos elétricos com diferentes ângulos de inclinação, cujo núcleo era de cobre, considerado um metal de alta condutividade térmica e a isolação era a base de

polietileno. Foi constatado que a propagação é menor quando o cabo está na posição horizontal. A representação do dispositivo construído para testar os materiais variando o ângulo pode ser visto na Figura 30.

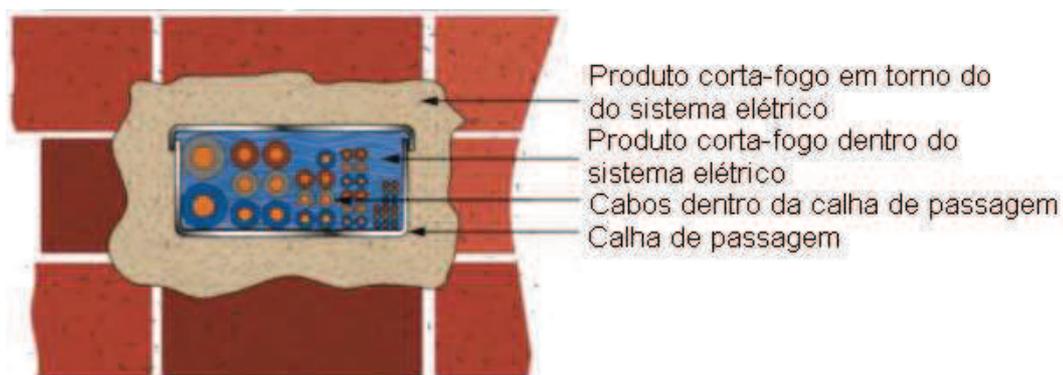
Figura 30 – Configurações experimentais



Fonte: Adaptada pelo autor de Hu et al. (2015).

Nos casos em que a instalação elétrica está embutida dentro da parede, a selagem corta-fogo nas aberturas deve ser utilizada para evitar que chamas se propaguem para outros ambientes. Em outros países, como é o caso dos EUA, por exemplo, o estado de Illinois conta com um *Project Manual* (CAPITAL DEVELOPMENT BOARD, 2017) o qual estabelece que as instalações elétricas que passam por paredes, divisórias ou lajes com função corta-fogo sejam providas de uma barreira eficaz contra a propagação de chamas, fumaça e gases quentes. A selagem entra em ação nos casos em que o fogo se origina no compartimento, e exerce sua função fechando as aberturas para evitar que o fogo atinja as instalações prediais e compartimentos adjacentes. A Figura 31 mostra uma calha de passagem de fios e cabos elétricos com a aplicação da selagem corta-fogo.

Figura 31 – Selagem de elementos destinados a passagem de cabos



Fonte: Adaptada de *Electrical Safety First* (2015).

2.7 Considerações Finais

Conforme a revisão da literatura técnica, o desempenho ao fogo de paredes de compartimentação variam em função das diferentes propriedades de blocos, propriedades das argamassas, cargas de incêndio presente na edificação, entre outros fatores. Além disso, as situações de incêndios são únicas e nunca irão se repetir, portanto, cada caso tem a suas singularidades e deve ser analisado levando em consideração os fatores daquele contexto específico que desencadeou o incêndio.

É comum que paredes de compartimentação contenham componentes de instalações elétricas e hidrossanitárias, porém foram encontradas poucas pesquisas com esses elementos embutidos no interior das amostras.

Ainda há a necessidade de mais estudos para compreender o comportamento de paredes de compartimentação expostas às altas temperaturas, variando os parâmetros que influenciam no seu desempenho. Os ensaios para avaliação da resistência ao fogo com amostras testadas em escala real são extremamente válidos e pertinentes, pois é possível avaliar de maneira mais realística como os sistemas de compartimentação se comportam durante uma situação de incêndio.

3 MÉTODO

Neste capítulo é apresentado o programa experimental adotado neste estudo com o objetivo de avaliar a resistência ao fogo de diferentes paredes de alvenaria. São apresentadas as etapas de execução das amostras, bem como o procedimento de ensaio no forno vertical.

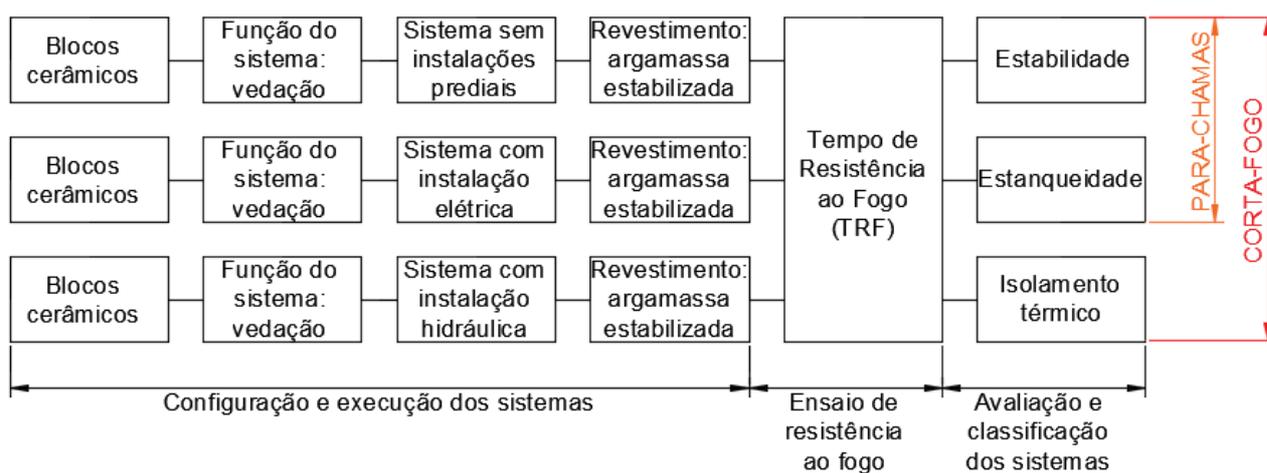
A investigação experimental contemplou as seguintes etapas:

- a) caracterização dos materiais;
- b) confecção das amostras;
- c) ensaios de resistência ao fogo.

3.1 Planejamento Experimental

A Figura 32 apresenta o programa experimental definido para este estudo. Como forma de otimização do projeto, foram definidos os fatores controláveis e as variáveis de resposta, os quais foram descritos a seguir.

Figura 32 – Programa experimental da pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.1 Variáveis de Resposta

Este trabalho experimental busca avaliar a resistência ao fogo de diferentes paredes de compartimentação, comparando o comportamento das amostras entre si

e verificando se as mesmas atendem aos critérios estabelecidos pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013c) para serem consideradas como um elemento corta-fogo (CF). Sendo assim, as variáveis de resposta do projeto são:

- a) estabilidade;
- b) estanqueidade à passagem de chamas e gases quentes;
- c) isolamento térmico.

3.1.2 Fatores Controláveis

Os fatores controláveis, que foram mantidos constantes são:

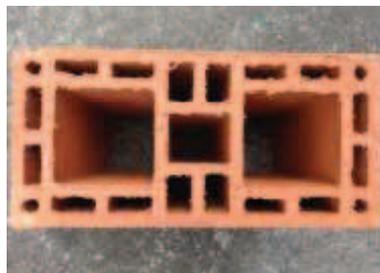
- a) função do sistema;
- b) tipo de bloco;
- c) argamassa de assentamento;
- d) componentes de instalações prediais: elétrica e hidráulica;
- e) curva de aquecimento do ensaio.

Optou-se por realizar ensaios em paredes sem função estrutural, pois grande parte dos edifícios brasileiros executados pelo processo construtivo convencional em concreto armado utiliza paredes de alvenaria para o fechamento dos vãos da estrutura. Foi escolhido o bloco cerâmico devido ao fato de sua larga utilização na construção civil, e executou-se alvenaria de vedação racionalizada.

A utilização do bloco cerâmico com furos na vertical permitiu fazer a paginação das amostras, evitando a quebra da alvenaria e geração de resíduos. Foram realizados cortes apenas nos blocos que continham as caixas de PVC para tomadas elétricas, na amostra com instalações elétricas. Na amostra com instalações hidráulicas, os cortes foram feitos nos blocos com o ponto de água para conexão das torneiras. Nenhuma das amostras possuía esquadrias. Foi estabelecido não variar as características do bloco, pois o principal objetivo da pesquisa é avaliar a influência das aberturas destinadas as instalações prediais na resistência ao fogo de paredes de compartimentação e, também vale ressaltar que foram utilizados blocos do mesmo lote para todas as amostras da pesquisa. É

possível ver na Figura 33 a geometria do bloco que foi utilizada na confecção das paredes investigadas.

Figura 33 – Geometria do bloco



Fonte: Registrada pelo autor.

A escolha da argamassa industrializada se deu em função do crescimento da sua aplicação na construção civil, sendo que ao empregar este tipo de mistura em uma determinada obra, tem-se ganhos em produtividade. Para o assentamento, foi utilizada argamassa industrializada pré-misturada em sacos.

A literatura carece de investigações que elucidem o comportamento de paredes de compartimentação com elementos elétricos e hidráulicos frente às altas temperaturas. Assim, diante do fato destes elementos serem comumente encontrados nas paredes de edificações, optou-se por inseri-los nas amostras investigadas, da mesma forma como são posicionados em edificações reais, a fim de verificar a sua influência na resistência ao fogo.

A curva de aquecimento padrão adotada para o programa térmico foi a ISO 834 (ISO, 1999) em função da sua vasta utilização em ensaios de resistência ao fogo, conforme já mencionado na revisão bibliográfica.

É fundamental ressaltar que a resistência ao fogo de sistemas de compartimentação não está limitada aos fatores controláveis determinados. Todavia, devido ao tempo e recursos disponíveis para o desenvolvimento da pesquisa, foram analisados somente os fatores controláveis especificados anteriormente, sendo que os mesmos exercem grande influência na resistência ao fogo.

3.1.3 Fatores Não-controláveis

As paredes foram curadas em temperatura ambiente dentro das dependências do Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (itt Performance), estando protegidos contra a ação do vento e da chuva.

Optou-se por revestir as paredes com argamassa industrializada estabilizada com tempo de aplicação de 36 horas. Para cada amostra foi solicitado 0,5 m³ de argamassa. Os materiais utilizados na produção da mistura podem variar conforme cada lote produzido, acarretando em variações nas propriedades das argamassas.

Alguns fatores como as propriedades das argamassas e a forma de execução, por exemplo, afetam o desempenho de revestimentos de argamassa. (TORRES, ROMANO; PILEGGI, 2017). A NBR 13528 (ABNT, 2010), que é utilizada na determinação da resistência de aderência à tração de revestimentos, aponta que a forma de lançamento do revestimento argamassado na parede é particular de cada pedreiro, repercutindo na interferência da mão de obra nos resultados.

Após a definição das variáveis de resposta, fatores controláveis e não-controláveis, foi elaborada a matriz experimental desta dissertação, mostrada no Quadro 2.

Quadro 2 – Matriz experimental da pesquisa

| Amostra | Fatores | | | | | Variáveis de resposta | | |
|---------|--------------|---------|--------------------------|------------|---|-----------------------|---------------|--------------------|
| | Controláveis | | | | Não-controláveis | | | |
| | Blocos | Função | Argamassa assentamento | Instalação | Argamassa revestimento | Estabilidade | Estanqueidade | Isolamento térmico |
| P-1 | Cerâmicos | Vedação | Industrializada ensacada | Não possui | Industrializada estabilizada (36 horas) | TRF | TRF | TRF |
| P-2 | | | | Elétrica | | | | |
| P-3 | | | | Hidráulica | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Confeção das Amostras

As amostras foram confeccionadas em escala real, com dimensões de 3,00x2,90 m (comprimento x altura) e espessura total de 19,00 cm sobre um pórtico metálico que facilitou o transporte até o forno para a execução dos ensaios. Foram utilizados blocos cerâmicos com resistência característica de 7 MPa, com dimensões

de 14x19x29 cm (largura x altura x comprimento) e meio blocos, estes com dimensões de 14x19x14 cm (largura x altura x comprimento).

O assentamento dos blocos em todas as amostras foi feito com argamassa industrializada pré-misturada em sacos, com juntas desencontradas de 1,0 cm nas duas direções, ou seja, na vertical e horizontal. As juntas horizontais foram preenchidas somente longitudinalmente, enquanto que as verticais tiveram o preenchimento com dois filetes.

A etapa subsequente a montagem das amostras foi a aplicação do chapisco, que ocorreu após 24 horas do levantamento da alvenaria. Todas as amostras receberam o chapisco com traço 1:3 (cimento:areia grossa, em volume) e espessura de 5,0 mm, em ambas as superfícies. Aguardou-se por mais 72 horas para aplicação do revestimento das amostras, executado com argamassa industrializada estabilizada, com traço de 1:5 (cimento:areia, em volume), composta por cimento, areia, água e aditivos aeradores e estabilizadores de pega, com tempo de utilização de 36 horas. A espessura de ambos os lados do revestimento das paredes, tanto interno quanto externo, era de 20,0 mm, obedecendo todas as recomendações da NBR 13749 (ABNT, 2013).

Na investigação de Moreira (2017) foi possível constatar que, em idades mais avançadas, concretos e argamassas apresentam menores teores de umidade, sendo um dos fatores que mais influencia no desempenho de sistemas quando expostos à altas temperaturas.

Assim, o ideal seria ensaiar as amostras desta dissertação com uma idade de, pelo menos, 90 dias, tempo considerado suficiente para ter ocorrido uma redução no teor de umidade do revestimento argamassado, devido as reações de hidratação da pasta de cimento, bem como a evaporação da água.

Entretanto, o cronograma previsto inicialmente e as alterações e imprevistos ao longo do programa experimental permitiram que o revestimento de todas as amostras passasse por um período de cura de 68 dias. A água presente nas amostras é evaporada durante a exposição às altas temperaturas, o que gasta energia e mantém a temperatura estável até que toda água livre seja liberada.

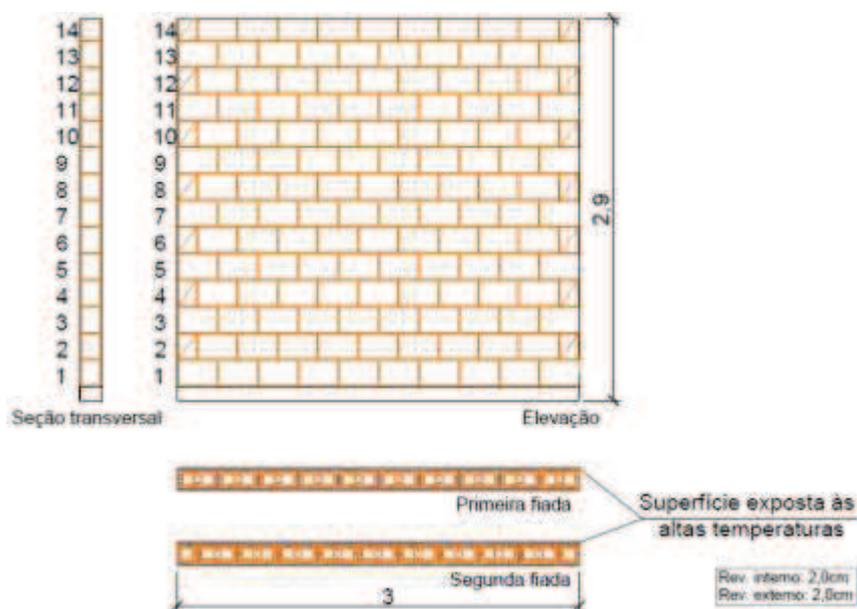
Conforme Yu et al. (2009), durante a exposição às altas temperaturas a umidade presente nos poros da argamassa aumenta a sua condutividade térmica, pois a água libera vapores aumentando a condução de calor e,

consequentemente, reduz o isolamento térmico. Por isso, a cura é uma etapa importante, período em que ocorre a redução da presença de umidade nas amostras até a idade do ensaio ao mesmo tempo que há um ganho na resistência.

A descrição detalhada de cada amostra é feita a seguir.

A P-1 é composta por blocos cerâmicos e revestimento argamassado com espessura de 2,0 cm em ambas as superfícies, conforme pode ser observado no esquema da Figura 34, e não contém nenhum tipo de instalação predial embutida.

Figura 34 – Paginação da amostra P-1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a execução do revestimento, a amostra ficou condicionada no itt Performance para posterior realização do ensaio de resistência ao fogo. É possível ver na Figura 35(a) a amostra durante o período de cura e na Figura 35(b) a amostra antes do ensaio.

Figura 35 – P-1 antes do ensaio: (a) superfície exposta às altas temperaturas e (b) superfície não exposta às altas temperaturas

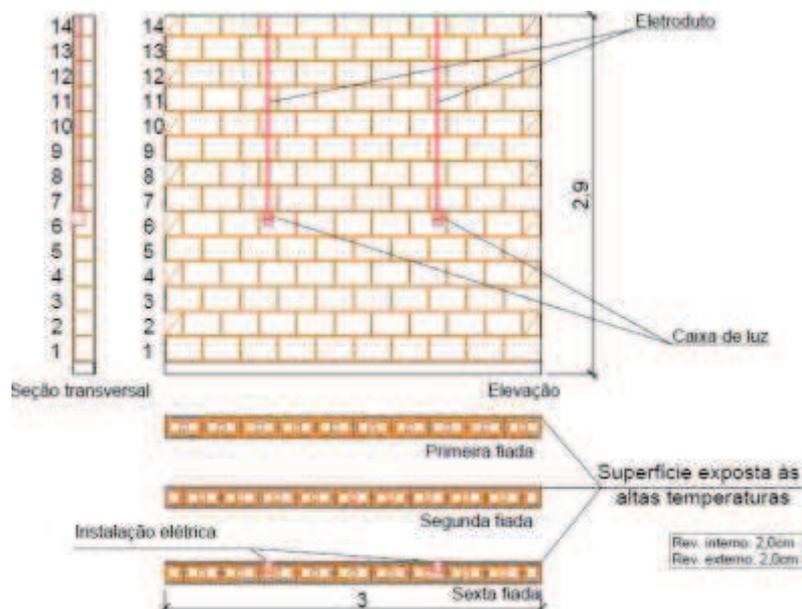


(a) (b)

Fonte: Registrada pelo autor.

A P-2 possui duas instalações elétricas idênticas que consistem no conjunto de eletrodutos, caixas de PVC, cabos flexíveis e tomadas, conforme mostra o esquema da Figura 36. O ponto de instalação das tomadas está localizado na sexta fiada de blocos, onde foi necessário fazer uma abertura com dimensão de 120x80 mm em cada bloco.

Figura 36 – Paginação da amostra P-2



Fonte: Elaborada pelo autor.

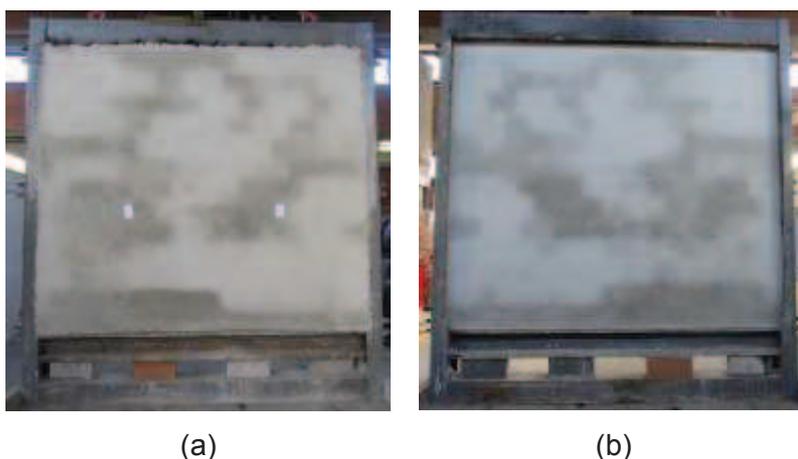
Em relação a execução, foram cortados os blocos onde seriam instaladas as caixas de PVC para tomadas elétricas. Então iniciou-se o levantamento da alvenaria e os blocos destinados as caixas elétricas foram devidamente posicionados conforme a

paginação definida. Após o levantamento da alvenaria, foram colocados os eletrodutos flexíveis corrugados de policloreto de polivinila (PVC) com diâmetro nominal de 25,0 mm dentro das cavidades dos blocos. Não foi necessário fazer quebras nos blocos para o posicionamento dos eletrodutos, uma vez que os furos verticais dos blocos permitiram a passagem dos mesmos. Conforme a empresa fabricante, os eletrodutos atendem a NBR 15465 (ABNT, 2008) e não propagam chamas.

Posteriormente, foi executado o revestimento e foram fixadas as caixas 4x2'' para posicionar as tomadas elétricas, com dimensões de 10,8x7x4,7 cm (altura x largura x profundidade) e matéria-prima PVC. Segundo a empresa fabricante, o produto não propaga chama.

Em seguida, foi feita a colocação dos cabos flexíveis com diâmetro 4,0 mm. O tipo de material do condutor é o cobre e o isolamento consiste em PVC anti-chama e o produto atende a NBR NM 247 (ABNT, 2011), conforme mencionado pela empresa fabricante. Ao final da execução da amostra, foi realizada a instalação das tomadas 2P+T (2 pólos + terra) com capacidade para corrente elétrica de 10A. A montagem das instalações elétricas seguiu as recomendações da NBR 5410 (ABNT, 2004). A Figura 37 mostra a P-2 antes do ensaio de resistência ao fogo. Cabe ressaltar que não foi feita a ligação das instalações elétricas com a rede elétrica.

Figura 37 – P-2 antes do ensaio: (a) superfície exposta às altas temperaturas e (b) superfície não exposta às altas temperaturas



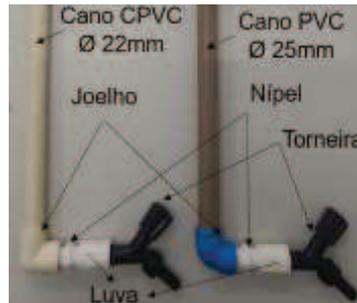
Fonte: Registrada pelo autor.

A P-3 possui duas instalações hidráulicas. Uma das instalações é composta por um cano de Policloreto de Vinila Clorado (CPVC) destinado para distribuição de

água quente com diâmetro 22,0 mm e, a outra instalação consiste em um cano com diâmetro de 25,0 mm destinado para a distribuição de água fria.

Ambos os canos continham os respectivos conectores (joelhos) que foram ligados com um prolongador (nípel), e este conectado a uma luva que ligava a torneira plástica. Os elementos das instalações hidráulicas são mostrados na Figura 38.

Figura 38 – Elementos utilizados na instalação hidráulica

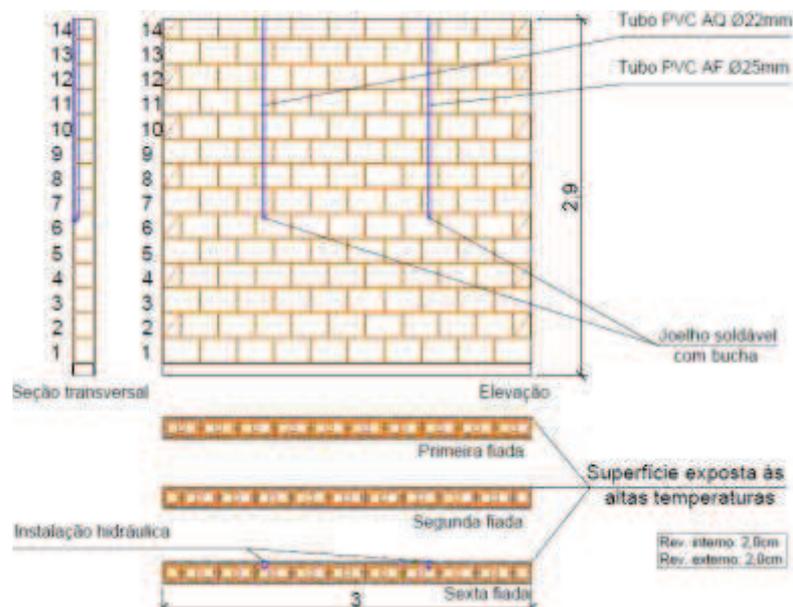


Fonte: Registrada pelo autor.

Os pontos de saída da água da P-3, estão localizados na sexta fiada de blocos, onde foi necessário fazer uma abertura com diâmetro de 30,0 mm em cada bloco, na mesma posição das instalações elétricas da P-2.

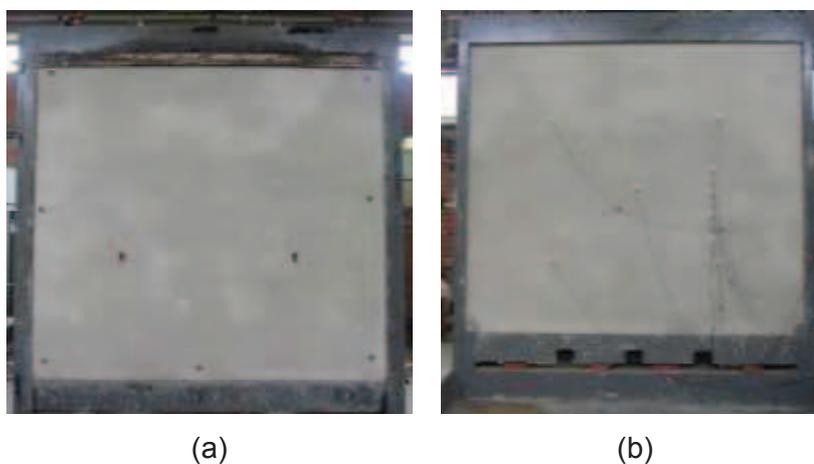
A paginação da parede P-3 é mostrada na Figura 39, enquanto que a Figura 40 mostra as faces da amostra executada. Vale destacar que as instalações hidráulicas não foram conectadas a qualquer rede de água.

Figura 39 – Paginação da amostra P-3



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 40 – P-3 antes do ensaio: (a) superfície exposta às altas temperaturas e (b) superfície não exposta às altas temperaturas



Fonte: Registrada pelo autor.

Após o período de cura (68 dias), foi feito o posicionamento das amostras no forno vertical para a realização dos ensaios de resistência ao fogo, conforme representado na Figura 41.

Figura 41 – Representação do posicionamento das amostras no forno



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um procedimento de confecção das amostras e realização do ensaio de resistência ao fogo foi proposto, e está apresentado no Apêndice A.

3.3 Ensaio de Desempenho ao Fogo

As amostras foram ensaiadas no forno vertical padronizado do Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (itt Performance) localizado no campus da Unisinos em São Leopoldo/RS, levando em consideração a curva de aquecimento padrão ISO 834 (ISO, 1999) para verificação dos critérios de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico. O forno é constituído externamente por uma estrutura em aço e internamente é revestido com isolante de fibra cerâmica. Dentre os dispositivos que servem para fazer as medições nas amostras, são encontrados termopares internos com a função de regular e controlar a temperatura da face da amostra exposta às altas temperaturas, termopares externos para mensuração da temperatura da face da amostra não exposta às altas temperaturas, transdutores de pressão, dumper de abertura e fechamento da chaminé para controle da pressão interna e quatro queimadores laterais, que promovem a incidência indireta de chamas nas amostras. O propulsor combustível do forno é o gás liquefeito de petróleo (GLP).

Para a realização dos ensaios, foi feito o acoplamento da amostra no forno vertical após o período de cura. Antes de iniciar o ensaio, foi feito o registro da temperatura ambiente, umidade e velocidade do ar dentro do laboratório de resistência ao fogo com o auxílio do termohigrômetro Instrutemp ITMP 600. A área efetiva da amostra em contato com as altas temperaturas é de 6,25 m² (2,5 m x 2,5 m). Como o objetivo do trabalho consiste em avaliar a resistência ao fogo de paredes de compartimentação sem função estrutural, o método de ensaio adotado para esta pesquisa segue as recomendações da NBR 10636 (ABNT, 1989).

Uma câmera termográfica foi posicionada em frente ao forno. A função deste dispositivo consiste em visualizar a temperatura de superfícies através da radiação térmica, que é um dos mecanismos de troca de calor. (CORTIZO, BARBOSA e SOUZA, 2008; LEE; YANG, 2017). O equipamento indica diferentes temperaturas através de cores, sendo possível identificar os locais onde há uma influência mais significativa da temperatura de aquecimento. Com a câmera foi possível analisar como a temperatura se distribuiu na superfície não exposta às altas temperaturas e também facilitou a verificação da estanqueidade e possíveis falhas e fissuras nas amostras ensaiadas. É possível ver na Tabela 6 as características da câmera usada nos ensaios.

Tabela 6 – Características da câmera termográfica

| | |
|--------------------------------------|------------------------|
| Marca | Flir |
| Modelo | A320 |
| Precisão angular | 320 x 240 pixels |
| Sensibilidade ao comprimento de onda | 7,5 a 13 μm |
| Temperatura | 0°C a 350°C |
| Resolução térmica | $\pm 2^\circ\text{C}$ |

Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos dados fornecidos pelo fabricante.

A NBR 10636 (ABNT, 1989) estabelece que para a verificação do critério de estabilidade de uma parede de compartimentação exposta à altas temperaturas, a sua deformação transversal deve ser medida no decorrer do ensaio. A partir de uma estação total, são realizadas medições, para correlacionar a deformação e o dano que ela causa na amostra em análise (ACIKGOZ; SOGA; WOODHAMS, 2017; PARKER; SHARRATT; RICHMOND, 2012).

Além disto, a NBR 10636 (ABNT, 1989) também estabelece que faltando 3 minutos para o término do ensaio, seja realizado o impacto mecânico de três esferas de aço, as quais transmitem uma energia de 20 joules na parede. Entretanto, optou-se por verificar se as amostras se manteriam íntegras, sem apresentar sinais de instabilidade ou colapso, somente pela verificação da deformação lateral. A energia de 20 joules é de baixo impacto (SARACURA et al., 2012), sendo improvável de causar instabilidade ou ruína em uma parede de alvenaria. Assim, com o auxílio de uma estação total, foram verificadas as deformações horizontais pela medição dos deslocamentos em pontos pré-determinados da amostra em toda a superfície, conforme ilustração da Figura 42.

A verificação espacial do deslocamento, que permite uma melhor compreensão da curvatura térmica, seria inviabilizada caso houvesse o suporte, com as esferas que promovem o impacto, posicionado em frente à superfície não exposta, pois seria um obstáculo para as medições da estação total. Em outras investigações, como a de Nguyen e Meftah (2009) e Souza (2017), por exemplo, dentre as paredes avaliadas sem carregamento, ou seja, apenas com função de vedação, tais como as amostras desta dissertação, a deformação lateral também foi utilizada na verificação da estabilidade das amostras.

As medições do deslocamento horizontal, nos 30 minutos iniciais do ensaio foram realizadas a cada 5 minutos, e a cada 10 minutos no restante do ensaio. Com

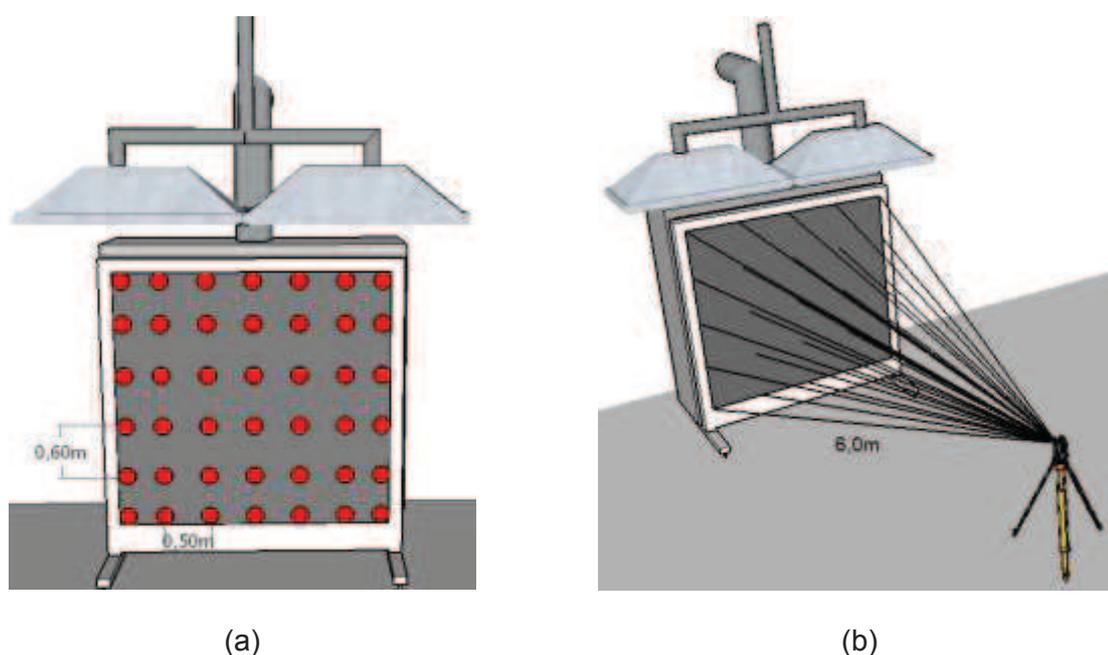
os dados obtidos referente ao deslocamento lateral, assim como diante dos sinais de ruína ou colapso, foi possível constatar se a amostra se manteve estável. A malha de pontos de medição da deformação englobou uma área de 8,70 m², com 42 pontos espaçados entre si 0,60 m na vertical e 0,50 m na horizontal. As características do equipamento estão dispostas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características da estação total

| | |
|------------------|------------------------------------|
| Marca | Leica |
| Modelo | TS 15 |
| Precisão angular | ±3" |
| Precisão linear | ±(1 mm + 1,5 mm km ⁻¹) |

Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos dados fornecidos pelo fabricante.

Figura 42 – Locais de leitura dos deslocamentos horizontais da amostra: (a) pontos de medição e (b) posicionamento da estação total



Fonte: Elaborada pelo autor.

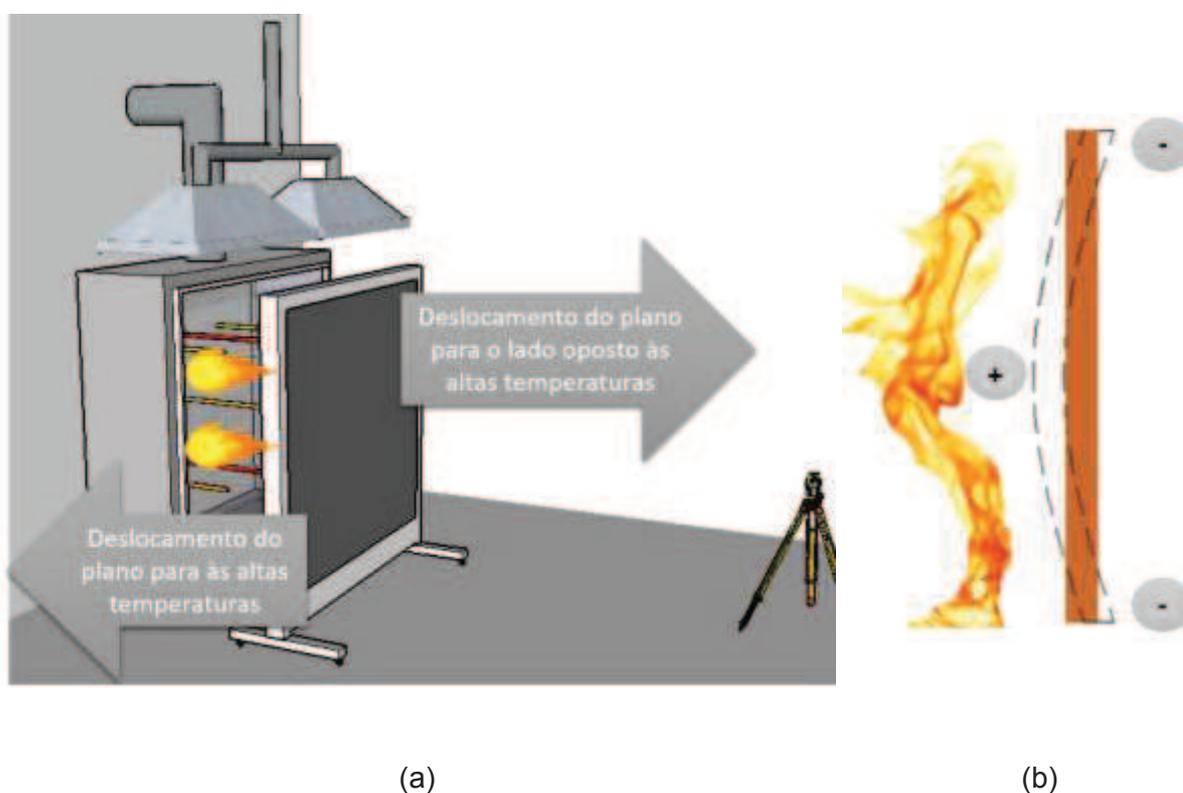
Foi utilizado o software CloudCompare para fazer a leitura dos dados obtidos com a estação total e gerar perfis com a representação da deformação espacial no plano horizontal. O software gerou uma nuvem de pontos para cada medição. Foi utilizado o tempo zero como referência e feita a comparação no decorrer do ensaio com as demais medições para que pudesse ser avaliada a deformação lateral da

amostra no plano voltado para às altas temperaturas, bem como no sentido oposto às altas temperaturas (Figura 43a).

Foi considerada uma deformação positiva do sistema, no sentido da fonte de calor, enquanto que no lado oposto, foi considerada uma deformação negativa (Figura 43b).

Conforme mencionado por Będkowski et al. (2015), o CloudCompare é um programa para manipulação, visualização e processamento de nuvem e malha de pontos de diferentes formatos, permitindo a visualização de grandes grupos de dados.

Figura 43 – Sentido do deslocamento do plano (seção transversal)



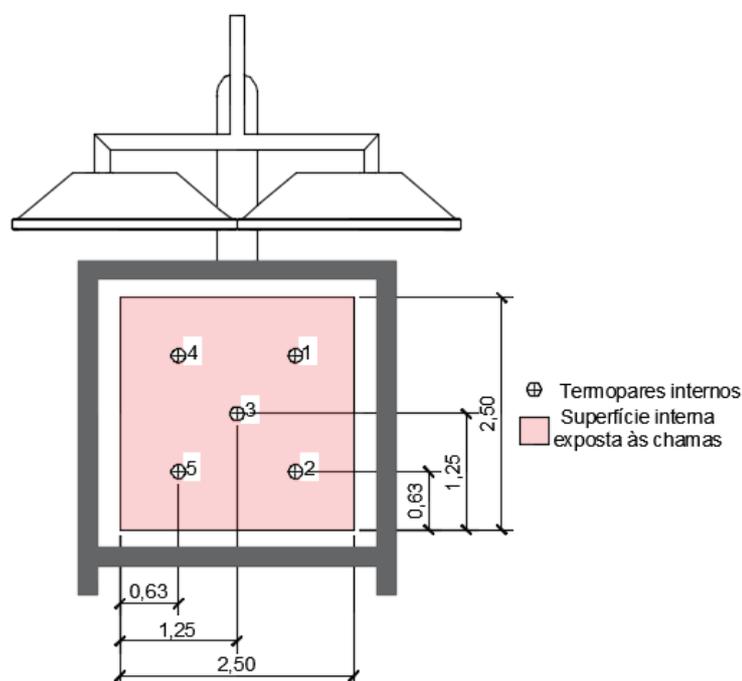
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na avaliação da estanqueidade, uma porção de algodão foi posicionada a uma distância entre 1,0 a 3,0 cm das fissuras encontradas nas amostras e nas regiões com temperaturas mais elevadas indicadas pela câmera termográfica, durante um período de 10 segundos. A amostra foi considerada estanque nos casos em que o algodão não sofreu inflamação, ou seja, não ocorreu flamabilidade dos gases.

Para a análise da amostra quanto ao isolamento térmico, foram medidas as temperaturas com o uso de termopares. A utilização de termopares serve para conhecer o fluxo de calor que percorre determinados sistemas. (SINGH et al., 2017). Na parte interna do forno foram utilizados termopares do tipo K com \varnothing 6,0 mm, enquanto que na face não exposta às altas temperatura a temperatura foi medida com termopares do tipo T com \varnothing 0,7 mm e na profundidade do substrato da amostra foram utilizados termopares do tipo K com \varnothing 1,5 mm.

Conforme mencionado por Nguyen e Mefhah (2012), o posicionamento de termopares em diferentes pontos tem como finalidade avaliar os gradientes de temperatura distribuídos na área do sistema de maneira representativa. O forno conta com 5 cinco termopares (T1 a T5) dispostos internamente seguindo as recomendações da NBR 10636 (ABNT, 1989), os quais foram utilizados para fazer as medições das temperaturas na face das amostras exposta às altas temperaturas (Figura 44).

Figura 44 – Posicionamento dos termopares do forno, com distâncias em metros

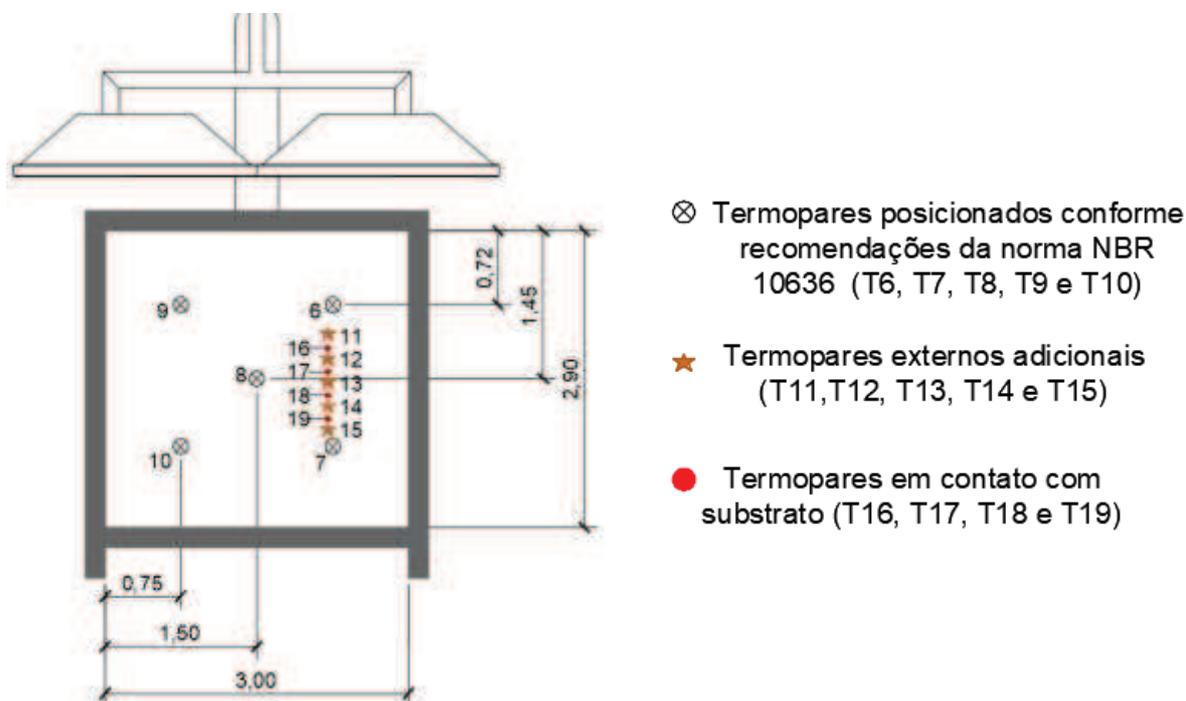


Fonte: Elaborada pelo autor.

Em todas as amostras, 14 termopares foram distribuídos na superfície não exposta às chamas. Além dos 5 termopares estabelecidos pela NBR 10636 (ABNT, 1989) na face não exposta às altas temperaturas, 9 termopares adicionais foram

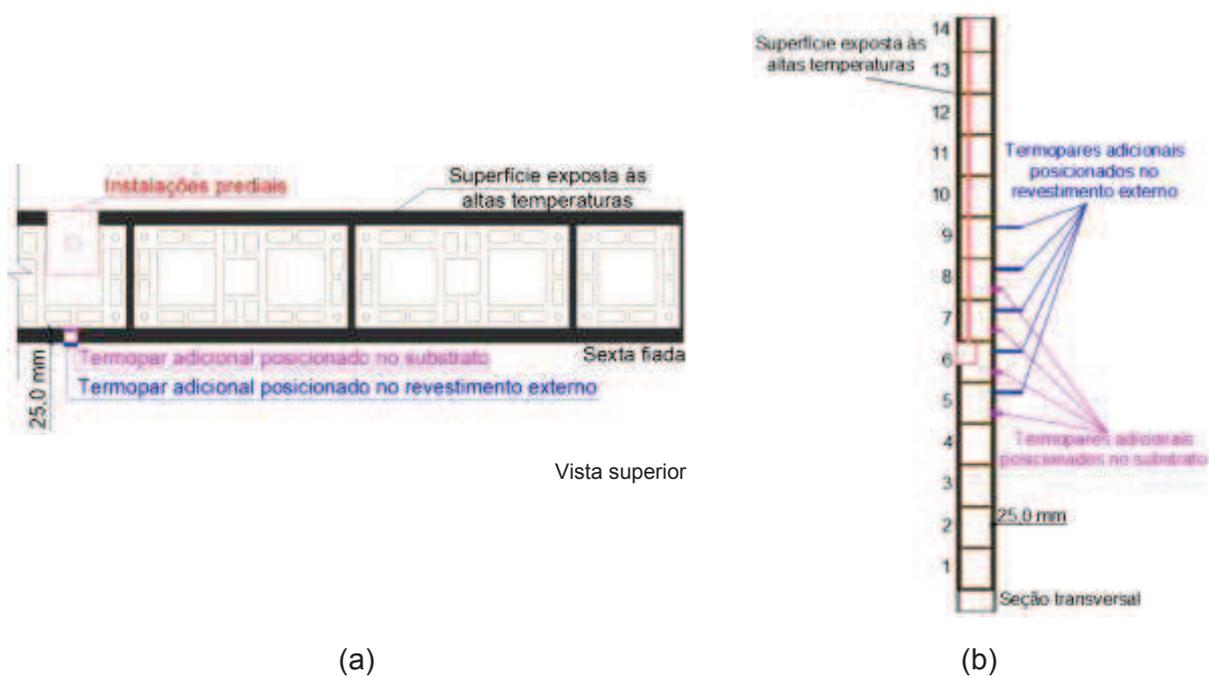
posicionados na prumada que continha as instalações das amostras 2 e 3, e para fins de comparação também foram posicionados na amostra 1. Do total de termopares adicionais, 4 foram instalados na superfície em contato com o substrato de cada amostra, (T16 a T19) seguindo as posições mostradas no esquema da Figura 45. As posições consistem nas fiadas de blocos 5, 6, 7 e 8. Os demais termopares foram posicionados na mesma prumada, entretanto estavam em contato direto com o revestimento argamassado (T11 a T15), nas fiadas de blocos 5, 6, 7, 8 e 9 (Figura 46). Tal posicionamento se justifica pois tinha-se o intuito de investigar como a propagação do calor se distribuía ao longo das fiadas, logo a 5ª fiada representava a prumada abaixo da abertura das instalações, enquanto que a 6ª fiada continha a abertura destinada a caixa de luz (amostra 2) e saída de água (amostra 3) e, nas fiadas acima (7ª, 8ª e 9ª), para verificar se haveria mudanças na temperatura ocasionadas pela passagem das chamas, vapores, fumaça e gases quentes, que tendem a subir pelo fenômeno de convecção.

Figura 45 – Posicionamento dos termopares externos, com distâncias em metros



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 46 – Detalhe esquemático da posição dos termopares adicionais instalados nos sistemas investigados: (a) vista superior e (b) seção transversal



(a)

(b)

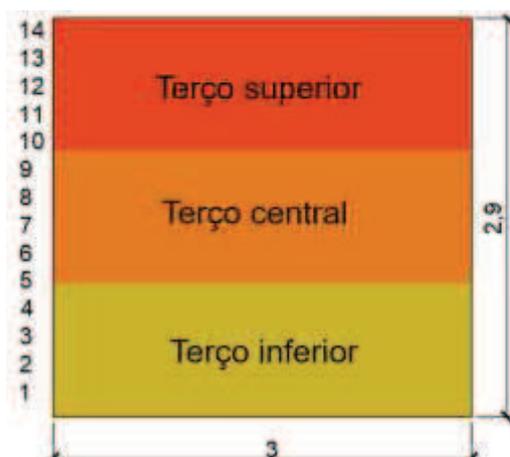
Fonte: Elaborada pelo autor.

A escolha pela disposição dos termopares adicionais nos pontos mostrados no esquema da Figura 46 tem o intuito de investigar se as amostras com aberturas, destinadas as instalações prediais elétricas (P-2) e hidráulicas (P-3) desprotegidas por selagens, são mais propensas a perderem a capacidade de resistir ao fogo em um menor intervalo de tempo em relação a amostra referência (P-1), e verificar como é a distribuição da temperatura na prumada que contém a abertura.

Conforme a NBR 10636 (ABNT, 1989), para que a parede seja considerada um isolante térmico, a média aritmética da temperatura na superfície não exposta às chamas deverá ser menor que 140 °C, e em qualquer um dos termopares externos deverá ser menor que 180 °C, considerando o acréscimo da temperatura ambiente no início do ensaio.

Para as análises, foi considerada a subdivisão da superfície não exposta mostrada na Figura 47. A subdivisão facilitou descrever as manifestações de ocorrências nas diferentes regiões das amostras durante as análises da investigação experimental.

Figura 47 – Subdivisão da superfície não exposta



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 Caracterização dos Materiais

Para a obtenção de uma amostra de boa qualidade, é indispensável o conhecimento dos materiais que serão empregados na sua produção. A seguir são apresentados os materiais empregados na confecção das amostras e suas respectivas características. Também são abordados os métodos normatizados utilizados para a correta execução dos ensaios.

3.4.1 Blocos Cerâmicos

Para o levantamento da alvenaria foram utilizados blocos cerâmicos com resistência à compressão de 7,0 MPa. Através das recomendações da NBR 15270 (ABNT, 2017) foram determinadas as propriedades geométricas dos blocos, cujos resultados são apresentados na Tabela 8. O índice de absorção de água é expresso na Tabela 9 e a resistência mecânica na Tabela 10.

Tabela 8 – Caracterização geométrica dos blocos cerâmicos

| Caracterização geométrica | Resultados | Método de ensaio |
|------------------------------------|-------------------|-------------------------|
| Largura (mm) | 141,10 | NBR 15270 (ABNT, 2017) |
| Altura (mm) | 190,50 | NBR 15270 (ABNT, 2017) |
| Comprimento (mm) | 291,30 | NBR 15270 (ABNT, 2017) |
| Planeza das faces (mm) | 0,60 | NBR 15270 (ABNT, 2017) |
| Desvio em relação ao esquadro (mm) | 1,00 | NBR 15270 (ABNT, 2017) |
| Área bruta (cm ²) | 411,10 | NBR 15270 (ABNT, 2017) |
| Área líquida (cm ²) | 169,20 | NBR 15270 (ABNT, 2017) |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 9 – Caracterização física dos blocos cerâmicos

| Índice de absorção | Resultados | Método de ensaio |
|---|-------------------|-------------------------|
| Inicial - face de assentamento ((g/194 cm ²)/min) | 104,70 | NBR 15270 (ABNT, 2017) |
| Total (%) | 18,90 | NBR 15270 (ABNT, 2017) |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 10 – Caracterização mecânica dos blocos cerâmicos

| Resistência mecânica | Resultado | Método de ensaio |
|-----------------------------|------------------|-------------------------|
| Compressão (MPa) | 8,20 | NBR 15270 (ABNT, 2017) |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A caracterização dos blocos indicou que os mesmos obedeceram aos requisitos dimensionais, físicos e mecânicos da NBR 15270 (ABNT, 2017) e, portanto, estavam aptos para serem utilizados na execução das amostras.

3.4.2 Argamassa

A seguir é feita a apresentação dos dados referentes a caracterização da argamassa utilizada no assentamento e revestimento das amostras.

3.4.2.1 Assentamento

Para o assentamento, foi utilizada a argamassa industrializada ensacada. O material vem pronto para uso. Trata-se de uma mistura de cimento Portland, agregados minerais e aditivos químicos. Conforme as recomendações do fabricante, foi adicionada a quantidade de água que estava indicada na embalagem. A caracterização foi realizada no LMC da Unisinos e é apresentada nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Caracterização da argamassa de assentamento no estado fresco

| Características avaliadas | Unidade | Resultados | Método de ensaio |
|---|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Índice de consistência por espalhamento | Mm | 263,00 | NBR 13276 (ABNT, 2016) |
| Densidade de massa | kg/m ³ | 1550,30 | NBR 13278 (ABNT, 2005) |
| Teor de ar incorporado | % | 20,00 | NBR NM 47 (ABNT, 2002) |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 12 – Caracterização da argamassa de assentamento no estado endurecido

| Características avaliadas | Unidade | Resultados | Método de ensaio |
|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------|
| Resistência à compressão | MPa | 3,94 | NBR 13279 (ABNT, 2005) |
| Resistência à tração na flexão | MPa | 1,45 | NBR 13279 (ABNT, 2005) |
| Densidade de massa | kg/m ³ | 1518,10 | NBR 13280 (ABNT, 2005) |
| Absorção capilar | t: 10 min. | g/cm ² | NBR 15259 (ABNT, 2005) |
| | t: 90 min. | g/cm ² | NBR 15259 (ABNT, 2005) |
| Coeficiente de capilaridade | g/dm ² .min ^{1/2} | 3,93 | NBR 15259 (ABNT, 2005) |
| Absorção total | (%) | 14,23 | NBR 9778 (ABNT, 2005) |
| Índice de vazios | (%) | 21,93 | NBR 9778 (ABNT, 2005) |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A argamassa utilizada no assentamento, sendo do mesmo lote para todas as amostras, foi classificada conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005) que especifica os requisitos que a mistura utilizada em assentamento e revestimento de paredes e forros deve atender, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Classificação da argamassa de assentamento

| Propriedades | Resultados | Classificação NBR 13281 | Método de ensaio |
|--|------------|-------------------------|------------------|
| Resistência à compressão (MPa) | 3,94 | P3 | NBR 13279:2005 |
| Densidade de massa aparente (kg/m ³) | 1518,61 | M4 | NBR 13280:2005 |
| Resistência à tração na flexão (MPa) | 1,45 | R2 | NBR 13279:2005 |
| Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2}) | 3,93 | C4 | NBR 15259:2005 |
| Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³) | 1550,3 | D3 | NBR 13278:2005 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.2.2 Revestimento

A argamassa utilizada no revestimento é do tipo industrializada estabilizada, dosada em central e, portanto, pronta para utilização. Os aditivos utilizados na mistura permitiam o tempo de utilização de até 36 horas.

A empresa que produz a argamassa, devido a motivos comerciais, não fez a divulgação dos traços que empregou na dosagem das argamassas e nem forneceu os materiais para ser realizada a caracterização. Assim, foi realizada somente a caracterização do produto final, ou seja, das argamassas que foram recebidas no itt Performance e utilizadas na confecção das amostras.

As Tabelas 14, 15 e 16 mostram a caracterização no estado fresco das argamassas utilizadas na execução das amostras P-1, P-2 e P-3, respectivamente.

Tabela 14 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado fresco: P-1

| Características avaliadas | Unidade | Resultados | Método de ensaio |
|---|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Índice de consistência por espalhamento | mm | 245,30 | NBR 13276 (ABNT, 2016) |
| Densidade de massa | kg/m ³ | 1831,00 | NBR 13278 (ABNT, 2005) |
| Teor de ar incorporado | % | 25,00 | NBR NM 47 (ABNT, 2002) |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 15 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado fresco: P-2

| Características avaliadas | Unidade | Resultados | Método de ensaio |
|---|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Índice de consistência por espalhamento | mm | 266,70 | NBR 13276 (ABNT, 2016) |
| Densidade de massa | kg/m ³ | 1791,80 | NBR 13278 (ABNT, 2005) |
| Teor de ar incorporado | % | 26,00 | NBR NM 47 (ABNT, 2002) |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado fresco: P-3

| Características avaliadas | Unidade | Resultados | Método de ensaio |
|---|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Índice de consistência por espalhamento | mm | 248,70 | NBR 13276 (ABNT, 2016) |
| Densidade de massa | kg/m ³ | 1729,80 | NBR 13278 (ABNT, 2005) |
| Teor de ar incorporado | % | 16,00 | NBR NM 47 (ABNT, 2002) |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas Tabelas 17, 18 e 19 é possível ver a caracterização no estado endurecido das argamassas empregadas na execução das amostras P-1, P-2 e P-3, respectivamente.

Tabela 17 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado endurecido: P-1

| Características avaliadas | Unidade | Resultados | Método de ensaio | |
|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Resistência à compressão | MPa | 6,85 | NBR 13279 (ABNT, 2005) | |
| Resistência à tração na flexão | MPa | 3,25 | NBR 13279 (ABNT, 2005) | |
| Densidade de massa | kg/m ³ | 1673,23 | NBR 13280 (ABNT, 2005) | |
| Absorção capilar | t: 10 min. | g/cm ² | 0,08 | NBR 15259 (ABNT, 2005) |
| | t: 90 min. | g/cm ² | 0,25 | NBR 15259 (ABNT, 2005) |
| Coeficiente de capilaridade | g/dm ² .min ^{1/2} | 2,63 | NBR 15259 (ABNT, 2005) | |
| Absorção total | (%) | 11,42 | NBR 9778 (ABNT, 2005) | |
| Índice de vazios | (%) | 19,49 | NBR 9778 (ABNT, 2005) | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 18 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado endurecido: P-2

| Características avaliadas | Unidade | Resultados | Método de ensaio | |
|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| Resistência à compressão | MPa | 6,77 | NBR 13279 (ABNT, 2005) | |
| Resistência à tração na flexão | MPa | 2,47 | NBR 13279 (ABNT, 2005) | |
| Densidade de massa | kg/m ³ | 1658,61 | NBR 13280 (ABNT, 2005) | |
| Absorção capilar | t: 10 min. | g/cm ² | 0,10 | NBR 15259 (ABNT, 2005) |
| | t: 90 min. | g/cm ² | 0,24 | NBR 15259 (ABNT, 2005) |
| Coeficiente de capilaridade | g/dm ² .min ^{1/2} | 2,27 | NBR 15259 (ABNT, 2005) | |
| Absorção total | (%) | 11,20 | NBR 9778 (ABNT, 2005) | |
| Índice de vazios | (%) | 18,66 | NBR 9778 (ABNT, 2005) | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 19 – Caracterização da argamassa de revestimento no estado endurecido: P-3

| Características avaliadas | Unidade | Resultados | Método de ensaio | |
|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| Resistência à compressão | MPa | 4,18 | NBR 13279 (ABNT, 2005) | |
| Resistência à tração na flexão | MPa | 1,69 | NBR 13279 (ABNT, 2005) | |
| Densidade de massa | kg/m ³ | 1583,17 | NBR 13280 (ABNT, 2005) | |
| Absorção capilar | t: 10 min. | g/cm ² | 0,14 | NBR 15259 (ABNT, 2005) |
| | t: 90 min. | g/cm ² | 0,33 | NBR 15259 (ABNT, 2005) |
| Coeficiente de capilaridade | g/dm ² .min ^{1/2} | 3,03 | NBR 15259 (ABNT, 2005) | |
| Absorção total | (%) | 12,29 | NBR 9778 (ABNT, 2005) | |
| Índice de vazios | (%) | 19,83 | NBR 9778 (ABNT, 2005) | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

As argamassas utilizadas no revestimento das amostras foram classificadas conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005) que especifica os requisitos que a mistura utilizada em assentamento e revestimento de paredes e forros deve atender.

É possível observar na Tabela 20 que a classificação das argamassas de revestimento utilizadas nas amostras P-1 e P-2, foi a mesma para todas as propriedades analisadas.

Tabela 20 – Classificação da argamassa de revestimento: P-1 e P-2

| Propriedades | Resultados | | Classificação NBR 13281 | Método de ensaio |
|--|------------|---------|----------------------------|------------------|
| | P-1 | P-2 | | |
| Resistência à compressão (MPa) | 6,85 | 6,77 | P5 | NBR 13279:2005 |
| Densidade de massa aparente (kg/m ³) | 1673,23 | 1658,61 | M5 | NBR 13280:2005 |
| Resistência à tração na flexão (MPa) | 3,25 | 2,47 | R4 | NBR 13279:2005 |
| Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2}) | 2,63 | 2,27 | C3 | NBR 15259:2005 |
| Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³) | 1831,00 | 1791,84 | D4 | NBR 13278:2005 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A argamassa de revestimento da amostra P-3 apresentou uma classificação diferente das demais amostras, com exceção da densidade de massa no estado fresco, conforme mostra a Tabela 21.

Tabela 21 – Classificação da argamassa de revestimento: P-3

| Propriedades | Resultados P-3 | Classificação NBR 13281 | Método de ensaio |
|---|-----------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Resistência à compressão (MPa) | 4,18 | P4 | NBR 13279:2005 |
| Densidade de massa aparente (kg/m ³) | 1583,17 | M4 | NBR 13280:2005 |
| Resistência à tração na flexão (MPa) | 1,69 | R3 | NBR 13279:2005 |
| Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2}) | 3,03 | C4 | NBR 15259:2005 |
| Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³) | 1729,84 | D4 | NBR 13278:2005 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.3 Cimento

Para a produção do chapisco foi utilizado o Cimento Portland composto com material carbonático (CP II F – 32). O cimento utilizado foi produzido conforme as especificações da NBR 11578 (ABNT, 1991), tendo em sua composição formada por 90 % a 94 % de clínquer e sulfatos de cálcio (gesso) e 6% a 10% de material carbonático (fíler).

Vale ressaltar que em julho de 2018 a NBR 11578 (ABNT, 1991) foi substituída pela NBR 16697 (ABNT, 2018), que especifica um limite de composição de 75% a 89% de clínquer e gesso e 11% a 25% de material carbonático. Entretanto, a confecção das amostras ocorreu antes de julho 2018, e portanto o cimento utilizado foi produzido conforme a versão anterior da norma. As especificações técnicas do cimento estão descritas nas Tabelas 22 a 24, conforme dados do fabricante.

Tabela 22 – Caracterização mecânica do cimento CP II F – 32

| Resistência à compressão (MPa) | Resultados do fabricante | Exigências normativas |
|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 1 dia | 15,2 | - |
| 3 dias | 27,7 | ≥ 10 |
| 7 dias | 33,9 | ≥ 20 |
| 28 dias | 41,8 | ≥ 32 |

Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos dados do fabricante.

Tabela 23 – Caracterização física do cimento CP II F – 32

| Características avaliadas | | Resultados do fabricante | Exigências normativas |
|------------------------------------|--------|---------------------------------|------------------------------|
| Expansão a quente (mm) | | 0,27 | ≤5,0 |
| Tempo de pega (h: min) | Início | 3:53 | ≥60 |
| | Fim | 4:58 | ≤600 |
| Consistência normal (%) | | 26,5 | - |
| Finura Blaine (cm ² /g) | | 3245 | ≥2600 |
| Resíduo peneira #200µm (%) | | 1,69 | ≤12,0 |
| Resíduo peneira #325µm (%) | | 11,16 | - |

Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos dados do fabricante.

Tabela 24 – Caracterização química do cimento CP II F – 32

| Parâmetros avaliados (% da massa) | Resultados do fabricante | Exigências normativas |
|---|---------------------------------|------------------------------|
| Al ₂ O ₃ | 4,30 | - |
| SiO ₂ | 18,58 | - |
| Fe ₂ O ₃ | 2,91 | - |
| CaO | 60,32 | - |
| MgO | 3,72 | ≤6,5 |
| SO ₃ | 2,70 | ≤4,0 |
| Perda ao fogo | 4,74 | ≤6,5 |
| CaO Livre | 0,45 | - |
| Resíduo Insolúvel | 1,00 | ≤2,5 |
| Equivalente Alcalino (Na ₂ O e K ₂ O) | 0,67 | - |

Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos dados do fabricante.

A massa específica do cimento foi determinada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da UNISINOS. O método de ensaio seguiu as recomendações da NBR 16605 (ABNT, 2017), no qual encontrou-se o valor de 3,08 g/cm³.

3.4.4 Agregado Miúdo

Para o chapisco foi utilizado como agregado miúdo a areia natural grossa, proveniente da região de Porto Alegre/RS.

Foram feitos ensaios para determinar sua massa específica (ABNT NBR NM 52: 2009), massa unitária (ABNT NBR NM 45: 2006), composição granulométrica (ABNT NBR NM 248:2003) e absorção de água (ABNT NBR NM 30: 2001).

Todos os ensaios foram realizados no LMC da UNISINOS. Os resultados e propriedades obtidas estão apresentadas na Tabela 25.

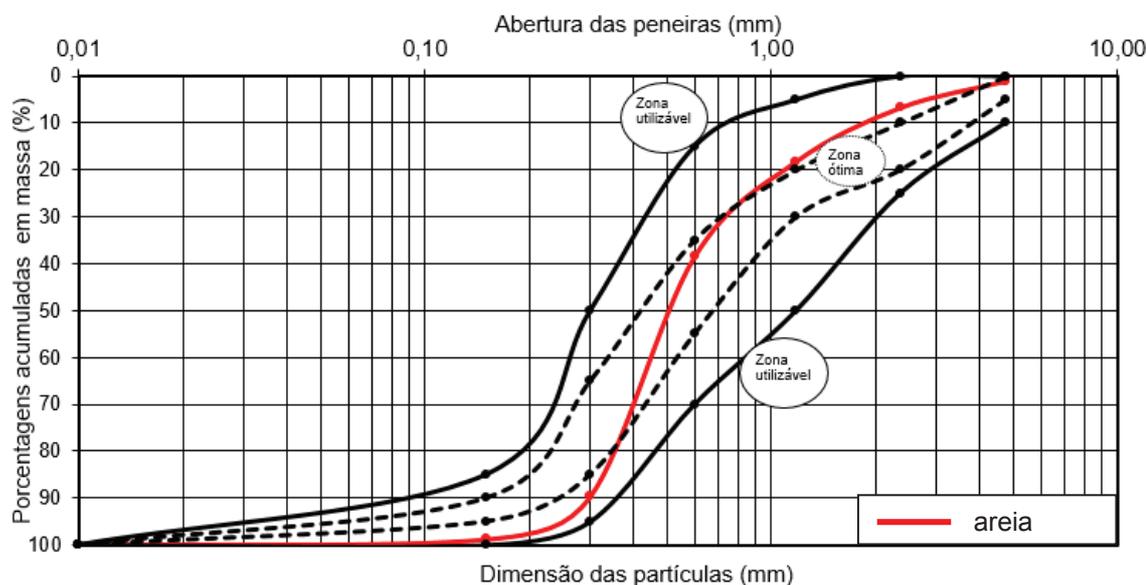
Tabela 25 – Caracterização do agregado miúdo

| Granulometria - Agregado miúdo | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------------|--|------------|--------------------|-----------------|
| Abertura das peneiras (mm) | Caracterização da areia | | Limites da distribuição granulométrica (ABNT NBR 7211:2009) | | | |
| | | | Porcentagem, em massa, retida acumulada | | | |
| | Média retida (%) | Média retida acumulada (%) | Limites inferiores | | Limites superiores | |
| | | | Zona utilizável | Zona ótima | Zona ótima | Zona utilizável |
| 4,75 | 0,98 | 0,98 | 0 | 0 | 5 | 10 |
| 2,36 | 5,66 | 6,64 | 0 | 10 | 20 | 25 |
| 1,18 | 11,49 | 18,13 | 5 | 20 | 30 | 50 |
| 0,60 | 20,38 | 38,51 | 15 | 35 | 55 | 70 |
| 0,30 | 51,25 | 89,76 | 50 | 65 | 85 | 95 |
| 0,15 | 9,00 | 98,76 | 85 | 90 | 95 | 100 |
| Fundo | 1,24 | 100,00 | - | - | - | - |
| Módulo de finura | | 2,53 | Nota 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90. | | | |
| Dimensão máxima característica | | 4,75 | Nota 2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20. | | | |
| Massa específica (g/cm ³) | | 2,57 | Nota 3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50. | | | |
| Massa unitária (g/cm ³) | | 1,63 | | | | |
| Absorção de água (%) | | 0,71 | | | | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível observar na Figura 48 a curva granulométrica do agregado miúdo utilizado na produção do chapisco.

Figura 48 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.5 Água

A água utilizada para a mistura dos agregados com o aglomerante é proveniente do abastecimento público do município de São Leopoldo/RS. A água é administrada pelo Serviço Municipal de Água e Esgotos de São Leopoldo (SEMAE), o qual realiza o controle diário da qualidade desta.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos através dos ensaios de resistência ao fogo realizados conforme as recomendações da NBR 10636 (ABNT, 1989). Para cada amostra, primeiramente, é apresentada uma visão geral da forma como cada ensaio ocorreu. A seguir, é feita uma análise da estanqueidade e estabilidade no decorrer dos ensaios. Para o isolamento térmico, é apresentada a evolução da temperatura no forno, assim como na superfície não exposta das amostras. Os resultados são analisados levando em consideração a influência dos fatores controláveis da pesquisa (tipo de bloco, função do sistema, argamassa de assentamento e existência ou não de aberturas no sistema) na resistência ao fogo. Ao final, é feita uma comparação entre os resultados obtidos.

4.1 Ensaios de Resistência ao Fogo

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência ao fogo para as diferentes amostras investigadas.

4.1.1 Ensaio de Resistência ao Fogo da P-1

No início do ensaio, foram verificadas, com o uso de um termohigrômetro, as seguintes condições ambientais no laboratório de resistência ao fogo:

- a) temperatura ambiente (T_0): 16,3 °C;
- b) umidade: 71,9%;
- c) velocidade do ar: 0,0 m/s.

O Quadro 3 exibe, resumidamente, a evolução das ocorrências no decorrer do ensaio, como o surgimento de fissuras, emissão de estalos, saída de vapor, entre outros.

Quadro 3 – Ocorrências do ensaio de resistência ao fogo da P-1

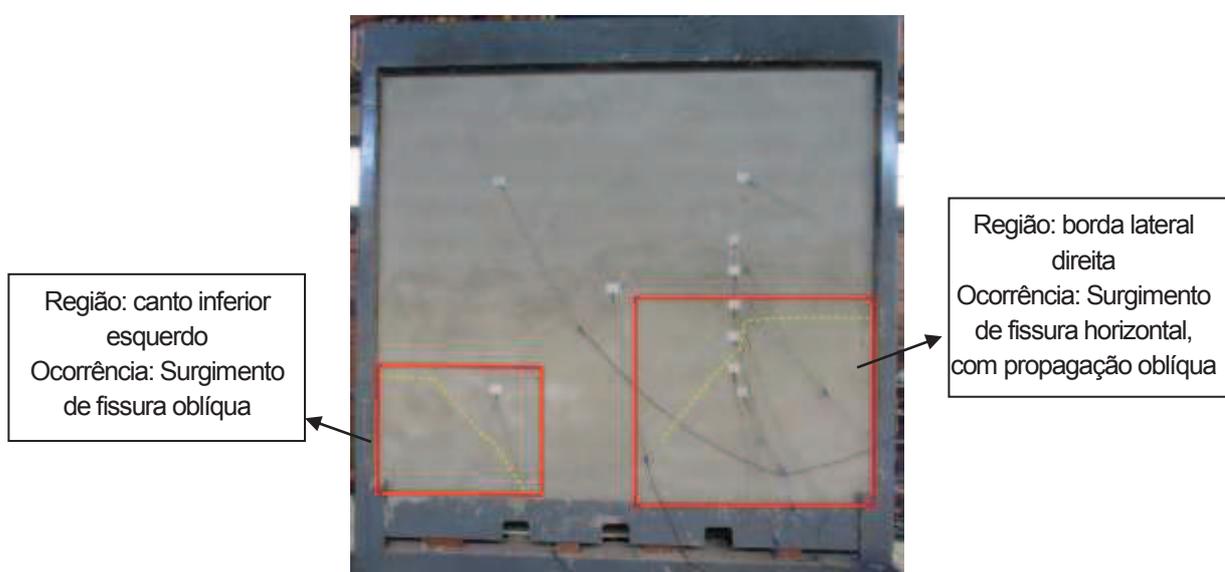
| Tempo (min) | Ocorrência |
|-------------|--|
| 0 | Início do programa térmico |
| 9 | Surgimento de fissura horizontal na borda lateral direita |
| 12 | Estalo emitido pela parede |
| 13 | Surgimento de fissura oblíqua no canto inferior esquerdo |
| 16 | Estalo emitido pela parede |
| 18 | Surgimento de fissura vertical no terço central esquerdo |
| 19 | Surgimento de fissura oblíqua no canto superior esquerdo |
| 46 | Estalo emitido pela parede |
| 47 | Constatação de vapor expelido no canto inferior esquerdo |
| 51 | Constatação de vapor expelido no canto superior direito |
| 87 | Estalo emitido pela parede |
| 120 | Surgimento de fissuras horizontais nas laterais direita e esquerda |
| 154 | Estalo emitido pela parede |
| 240 | Fim do programa térmico |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.1 Estanqueidade

Transcorridos 9 minutos do início do ensaio, a P-1 apresentou na face não exposta às altas temperaturas uma fissura horizontal na borda lateral direita, e a mesma foi se propagando a 45° em direção a base da amostra. Decorridos 13 minutos de ensaio, surgiu uma fissura oblíqua no canto inferior esquerdo. A Figura 49 exibe as manifestações identificadas.

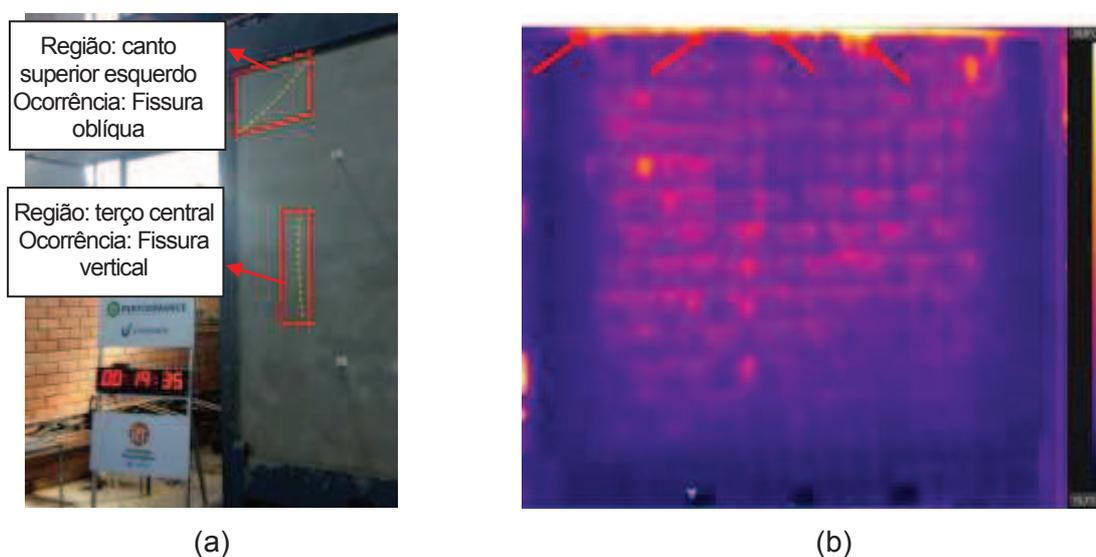
Figura 49 – Fissuras na parte inferior da amostra



Fonte: Registrada pelo autor.

Novas manifestações vieram a ocorrer aos 18 minutos, se tratando de uma fissura vertical no terço central à esquerda, com escape de vapor, o que está associado ao processo de evaporação da água retida na parede. Posteriormente, aos 19 minutos, surgiu uma fissura oblíqua no canto superior esquerdo (Figura 50a). Havia presença de vapor na borda superior, e conforme a câmera termográfica (Figura 50b), a temperatura na face não exposta era de 30,9°C aos 20 minutos de ensaio.

Figura 50 – Surgimento de fissuras: (a) vertical, no terço médio à esquerda e oblíqua no canto superior esquerdo e (b) imagem termográfica aos 20 minutos



Fonte: Registrada pelo autor.

Os estalos emitidos pela amostra, a partir dos 12 minutos de ensaio, estavam indicando sinais de fragilização do revestimento na face exposta às altas temperaturas e a possibilidade de estar iniciando o seu deslocamento, sendo que o mesmo estava perdendo suas propriedades perante a exposição às altas temperaturas. O aquecimento também é a causa da dilatação térmica diferencial dos materiais, que pode ter levado ao deslocamento do revestimento interno. Neste instante, a temperatura no forno estava na faixa de 680 °C com base na curva padrão ISO 834 (ISO, 1999).

Este deslocamento do revestimento na face exposta às altas temperaturas, resultou no lascamento dos blocos cerâmicos. A Figura 51, registrada aos 46 minutos de ensaio, instante em que a amostra emitiu estalos de forma intensa, confirma a hipótese. Através de uma abertura na parte traseira do forno vertical (Figura 51), foi possível observar que, em uma determinada área da amostra, as

duas primeiras partições dos blocos frente às altas temperaturas haviam lascado, o que possibilitou a visualização de seus septos internos.

Figura 51 – Lascamento do substrato na face exposta as chamas



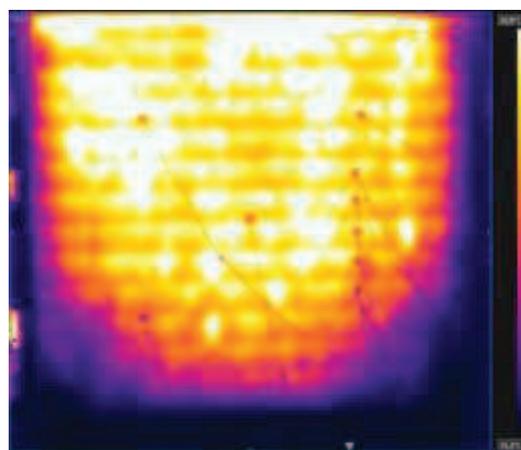
Fonte: Registrada pelo autor.

A amostra expeliu vapor no canto inferior esquerdo e no canto inferior direito, aos 47 minutos e aos 51 minutos de ensaio, respectivamente. Foi feita a verificação da estanqueidade com um chumaço de algodão, e o mesmo não entrou em ignição comprovando que a amostra permanecia estanque (Figura 52a). É possível ver na Figura 52b a imagem térmica da amostra aos 50 minutos de ensaio, que mostra alguns pontos mais quentes (coloração amarelada), indicando evidências de que, nestes locais, havia ocorrido o deslocamento do revestimento argamassado e o lascamento do substrato cerâmico. A temperatura que incidia no lado exposto era superior a 890 °C conforme a curva padrão, e a câmera térmica indicava que a temperatura do vapor expelido na face não exposta era de aproximadamente 45 °C.

Figura 52 – P-1: (a) superfície não exposta e (b) imagem térmica aos 50 minutos



(a)



(b)

Fonte: Registrada pelo autor.

As últimas ocorrências na P-1 se deram aos 120 minutos de ensaio, instante em que despontaram duas fissuras horizontais em ambas as laterais da amostra, direita e esquerda, a cerca de 2 metros da base, conforme mostra a Figura 53. A partir deste instante, a amostra não apresentou mais ocorrências até o fim do ensaio, aos 240 minutos de exposição as temperaturas da curva padrão.

Figura 53 – Face não exposta da P-1 aos 120 minutos de ensaio



Fonte: Registrada pelo autor.

As tensões geradas com o aquecimento contribuíram para o surgimento de fissuras no revestimento da face não exposta. As fissuras que se manifestaram horizontalmente, e se propagaram de maneira oblíqua, geralmente ocorreram nos cantos, sendo locais onde há restrições de deslocamento devido a vinculação da parede com o pórtico. Juntamente com as deformações resultantes do encurvamento da alvenaria, ocorreu a desidratação da argamassa, que perdeu suas propriedades e fissurou.

A verificação da estanqueidade foi realizada com um chumaço de algodão no decorrer do ensaio. O posicionamento se deu nos locais com temperaturas mais elevadas, conforme indicado na câmera térmica e nas fissuras de maiores aberturas. A última verificação (Figura 54), ocorreu faltando 3 minutos para o término do ensaio, ou seja, aos 237 minutos. Em todas as verificações a amostra se apresentou estanque.

Figura 54 – Verificação da estanqueidade da P-1



Fonte: Registrada pelo autor.

4.1.1.2 Estabilidade

Com o auxílio da estação total foi possível obter o deslocamento horizontal da P-1 e verificar possíveis sinais de colapso para aferir a estabilidade da parede. É possível identificar na Tabela 26 que a deformação lateral máxima do plano voltada para às altas temperaturas foi de 39,239 mm, aos 15 minutos de ensaio.

Conforme apresentado no Quadro 3, aos 16 minutos de ensaio a amostra emitiu estalos, logo após atingir a deformação máxima, a partir de então verificou-se que houve um alívio nas tensões, e a deformação foi diminuindo.

Aos 230 minutos de ensaio a amostra apresentou um deslocamento máximo do plano voltado para o lado externo, variando -34,399 mm em relação a posição de origem.

Os dados fornecidos pela estação total foram inseridos no software CloudCompare para processar a nuvem de pontos de referência (no início do ensaio), com os demais tempos. Assim, gerou-se a visualização espacial do deslocamento através da manipulação de cores (Figura 55).

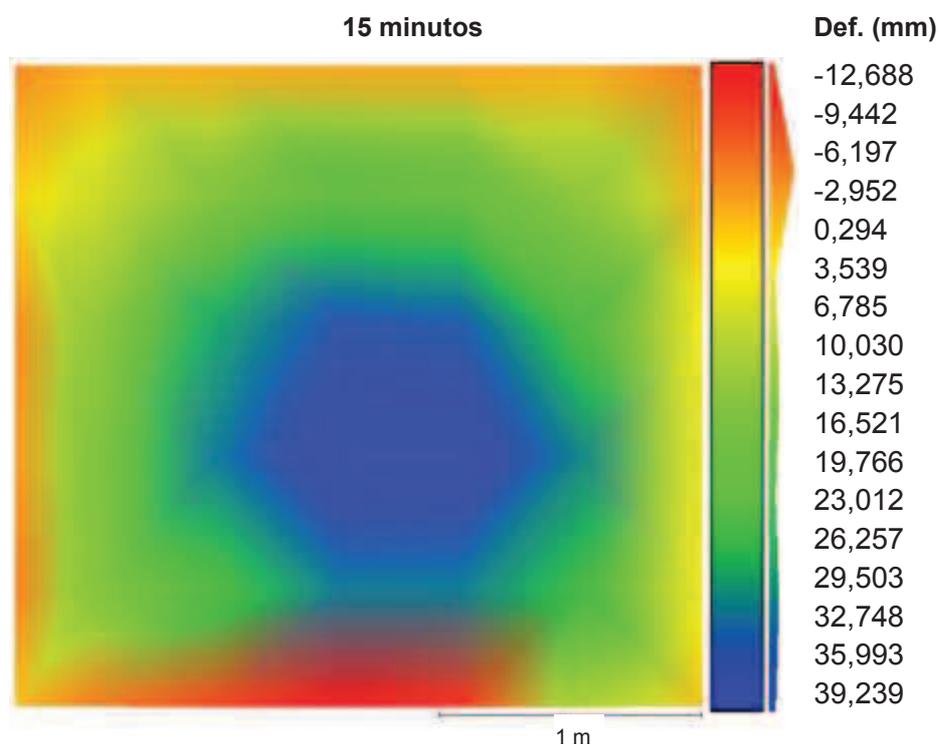
Tabela 26 – Deformação horizontal da P-1

| Tempo (min) | Deformação lateral (mm) | |
|-------------|---------------------------------|--------------------|
| | Superfície voltada para o forno | Superfície externa |
| 0 | 0,000 | 0,000 |
| 5 | 12,914 | -4,575 |
| 10 | 26,940 | -9,319 |
| 15 | 39,239 | -12,688 |
| 20 | 30,117 | -11,242 |
| 25 | 27,195 | -11,279 |
| 30 | 26,777 | -11,174 |
| 40 | 25,463 | -11,432 |
| 50 | 25,417 | -11,158 |
| 60 | 26,091 | -10,045 |
| 70 | 26,627 | -10,833 |
| 80 | 26,763 | -10,489 |
| 90 | 27,379 | -11,625 |
| 100 | 28,331 | -11,381 |
| 110 | 28,532 | -11,128 |
| 120 | 28,686 | -11,097 |
| 130 | 29,310 | -10,368 |
| 140 | 28,431 | -11,369 |
| 150 | 28,449 | -10,407 |
| 160 | 27,966 | -12,448 |
| 170 | 28,256 | -12,420 |
| 180 | 27,985 | -12,748 |
| 190 | 27,863 | -12,371 |
| 200 | 27,517 | -11,993 |
| 210 | 27,303 | -29,436 |
| 220 | 26,786 | -15,377 |
| 230 | 26,179 | -34,399 |
| 240 | 25,971 | -17,596 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

O deslocamento máximo do plano na direção das altas temperaturas (39,239 mm) ocorreu aos 15 minutos de ensaio, localizado na região central da amostra (cor azulada), conforme Figura 55.

Figura 55 – Deslocamento horizontal da P-1 aos 15 minutos de ensaio



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em média, o deslocamento do plano para o lado oposto as chamas (externo) foi cerca de -11,0 mm, variando aproximadamente $\pm 1,0$ mm entre os 15 e os 200 minutos de ensaio.

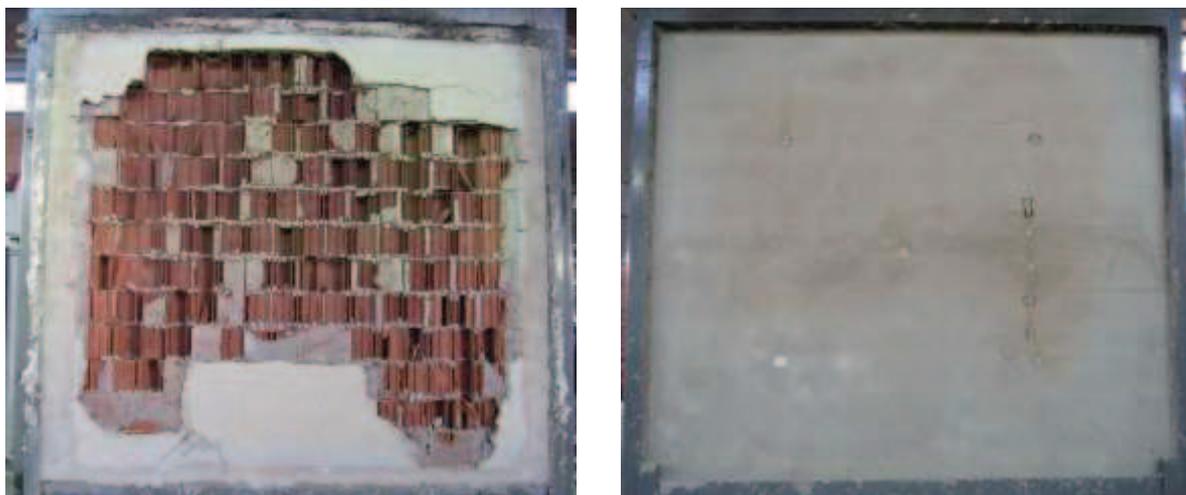
Já para a direção do forno, a partir de 25 minutos de ensaio, a parede apresentou deslocamento de 27,0 mm, variando $\pm 2,0$ mm até o final do ensaio. Diante dos estalos que foram detectados a partir dos 12 minutos de ensaio e com os dados obtidos quanto ao deslocamento horizontal, acredita-se que a amostra foi se curvando até os 25 minutos, instante em que houve um alívio de tensões em função da dilatação provocada pelo calor, ocasionado o deslocamento do revestimento argamassado e o lascamento do substrato cerâmico.

A amostra manteve a estabilidade durante os 240 minutos de ensaio, uma vez que a análise das deformações e fissuras que se manifestaram, não resultaram no colapso ou sinais de instabilidade que afetariam a segurança dos ocupantes.

É possível ver na Figura 56 o aspecto final da P-1 em ambas as faces após o término do ensaio. Observou-se que a parede perdeu grande parte de sua espessura equivalente, através da ocorrência de lascamento dos blocos em praticamente toda a superfície exposta. Por outro lado, na superfície não exposta,

a abertura de fissuras de pequena espessura não comprometeu a estabilidade da amostra.

Figura 56 – P-1 ao término do ensaio: (a) superfície exposta e (b) superfície não exposta às altas temperaturas



(a)

(b)

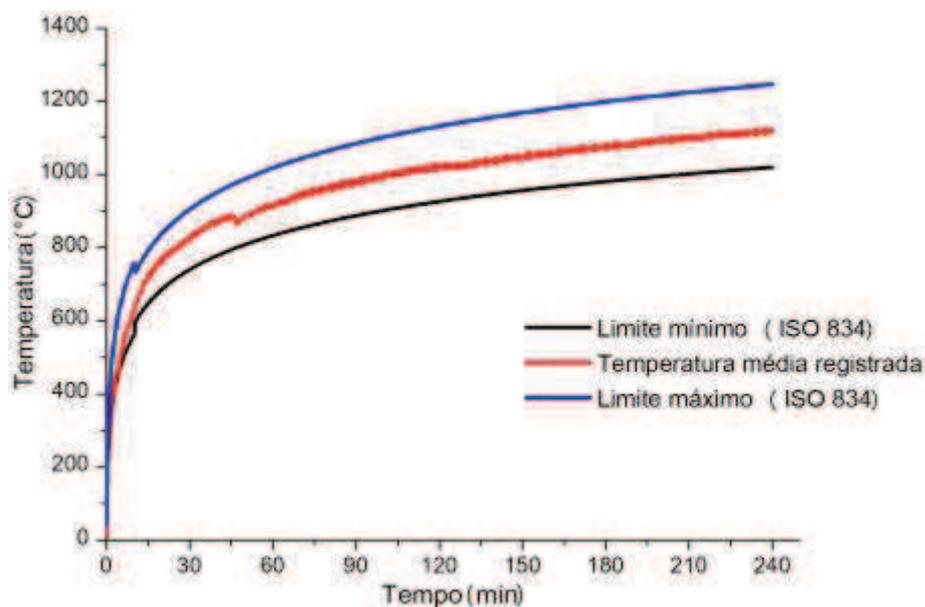
Fonte: Registrada pelo autor.

4.1.1.3 Isolamento Térmico

Para que o ensaio tenha validade é fundamental verificar a temperatura do forno, que deve estar entre os limites definidos na curva ISO 834 (ISO, 1999).

Com base nos termopares internos do forno, foi possível medir as temperaturas que incidiam sobre a amostra. Durante todo o ensaio a temperatura média registrada estava dentro dos limites de tolerância estabelecidos na normativa, conforme mostra a Figura 57.

Figura 57 – Temperatura no forno durante o ensaio da P-1



Fonte: Elaborada pelo autor.

A temperatura ambiente registrada no início do ensaio foi de 16,3 °C, portanto para a P-1 ser caracterizada como isolante térmico, a temperatura pontual máxima na face não exposta que a parede poderia atingir era de 196,3 °C (16,3 °C + 180 °C), enquanto que a temperatura média máxima que poderia ser alcançada era de 156,3 °C (16,3 °C + 140 °C).

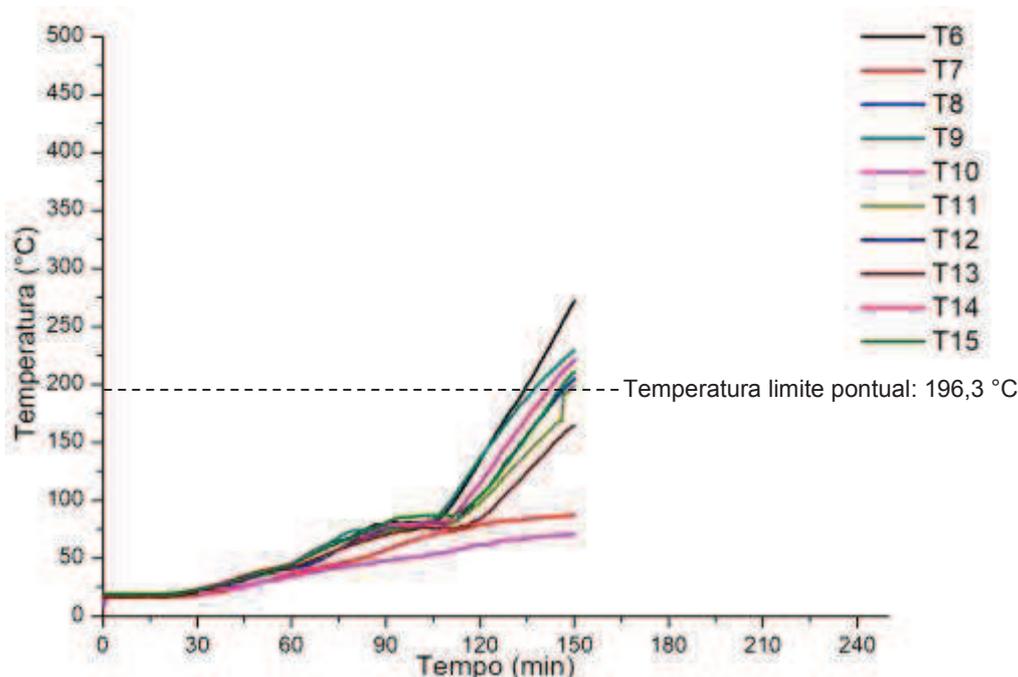
A temperatura dos termopares T6 a T15, posicionados no revestimento argamassado da face não exposta, foi utilizada para fins de verificação quanto a capacidade de isolamento térmico.

A Figura 58 mostra o desenvolvimento da temperatura ao longo do ensaio nos pontos medidos pelos termopares T6 a T15. Aos 135 minutos de ensaio o termopar T6 atingiu uma temperatura de 197,6 °C, excedendo o limite de temperatura pontual de 196,3 °C, o que caracterizou a amostra como TRF 134 minutos. Neste mesmo instante, a temperatura média entre os termopares T6 a T15, era de 140,0 °C.

No decorrer do ensaio, a temperatura aumentou de tal forma que foi necessário fazer a retirada dos termopares externos do tipo T acoplados no revestimento argamassado (T6 a T15), interrompendo a medição da temperatura, que prosseguiu apenas com os termopares fixados no substrato (T16 a T19), do tipo K. Foi necessário fazer a retirada, pois os termopares do tipo T utilizados poderiam ser danificados em temperaturas superiores a 300 °C, e aos 150 minutos de ensaio a temperatura em alguns pontos já era da ordem de 300 °C, justificando a remoção.

É possível observar que por volta da faixa de 100 °C, o aumento da temperatura era estável para os termopares dispostos no revestimento externo da amostra e, posteriormente, tem-se um pico no crescimento da temperatura, o que tem relação com a evaporação da água presente no revestimento argamassado. Contudo, este comportamento não foi observado nos termopares T7 e T10 (posicionados no terço inferior na amostra) até os 150 minutos de ensaio, visto que a temperatura não chegou a atingir os 100 °C até aquele instante.

Figura 58 – Evolução da temperatura pontual registrada pelos termopares T6 a T15 na P-1



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 59 identifica as curvas com a evolução da temperatura média no revestimento da superfície não exposta (T11 a T15) e no substrato da amostra (T16 a T19).

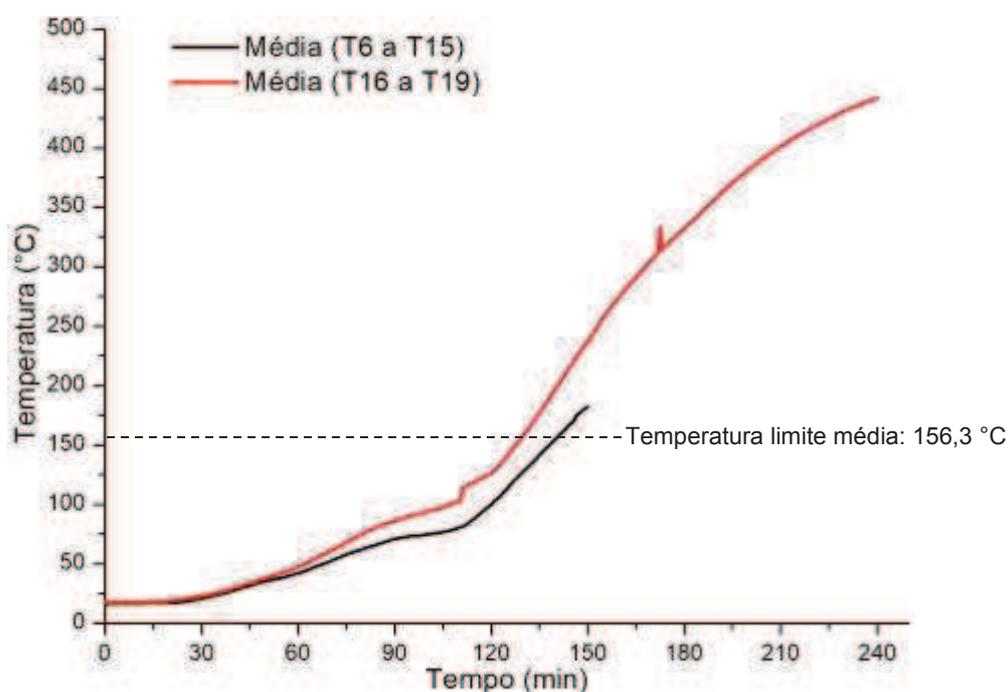
No substrato, a temperatura média, com base nos termopares T16 a T19, excedeu o limite para a capacidade de isolamento aos 129 minutos. Enquanto que no revestimento externo, os termopares T6 a T15, indicaram que a temperatura foi ultrapassada aos 141 minutos de ensaio.

Notou-se uma diferença de temperatura de aproximadamente 40 °C entre o revestimento argamassado e o substrato, acarretando em um aumento de cerca de

12 minutos na capacidade de isolamento do sistema quando revestido, diante dos dados mensurados pelos sensores térmicos para o sistema investigado.

A partir de 150 minutos de ensaio, após a remoção dos termopares T6 a T15, somente os termopares T16 a T19, posicionados no substrato, continuaram as medições até o fim do ensaio, aferindo uma temperatura média de 441,9 °C.

Figura 59 – Evolução da temperatura média na face não exposta da P-1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar da P-1 não conter qualquer tipo de instalação predial, foram posicionados sensores de temperatura na mesma prumada que continha as instalações prediais nas demais amostras, para fins de comparação.

Observa-se na Tabela 27 que a sexta fiada registrou as maiores temperaturas no decorrer do ensaio. Houve um decréscimo da temperaturas nas duas fiadas acima, seguido de um aumento na temperatura na 9ª fiada.

Tabela 27 – Temperatura medida pelos termopares T11 a T15 no decorrer do ensaio da P-1

| Fiada | Termopar | Tempo (min) | | | | | | | | |
|-------|----------|------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | | 5 | 10 | 20 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| | | Temperatura (°C) | | | | | | | | |
| 9 | 11 | 16,3 | 16,4 | 16,8 | 20,6 | 32,1 | 41,9 | 72,2 | 97,8 | 198,3 |
| 8 | 12 | 16,5 | 16,6 | 16,9 | 20,8 | 32,7 | 42,2 | 69,8 | 83,9 | 163,7 |
| 7 | 13 | 16,5 | 16,6 | 16,9 | 20,8 | 32,7 | 42,2 | 69,8 | 83,9 | 163,7 |
| 6 | 14 | 19,0 | 19,1 | 19,4 | 23,6 | 35,3 | 45,7 | 78,4 | 114,5 | 220,7 |
| 5 | 15 | 18,9 | 19,0 | 19,3 | 23,0 | 33,7 | 45,0 | 80,5 | 103,5 | 210,6 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2 Ensaio de Resistência ao Fogo da P-2

As condições ambientais no início do ensaio foram verificadas e são apresentadas a seguir:

- a) temperatura no início do ensaio (T_0): 22,7 °C;
- b) umidade: 62,2%;
- c) velocidade do ar: 0,0 m/s.

Após a verificação das condições ambientais, o ensaio foi iniciado. O Quadro 4 mostra as ocorrências que se sucederam durante a aplicação do programa térmico na P-2.

Quadro 4 – Ocorrências do ensaio de resistência ao fogo da P-2

(continua)

| Tempo (min) | Ocorrência |
|-------------|--|
| 0 | Início do programa térmico |
| 3 | Estalo emitido pela parede |
| 6 | Constatação de fumaça expelida nas bordas superiores |
| 6 | Odor com provável combustão dos elementos elétricos |
| 6 | Surgimento de fissura oblíqua no canto superior direito |
| 8 | Estalo emitido pela parede |
| 9 | Surgimento de fissura horizontal no canto inferior esquerdo |
| 10 | Constatação de vapor expelido na borda lateral direita |
| 10 | Estalo emitido pela parede |
| 12 | Constatação de vapor sendo expelido por ambas as bordas laterais |
| 13 | Estalo emitido pela parede |

Quadro 4 – Ocorrências do ensaio de resistência ao fogo da P-2

(conclusão)

| Tempo (min) | Ocorrência |
|-------------|---|
| 14 | Constatação de vapor sendo expelido por ambas as laterais |
| 16 | Estalo emitido pela parede |
| 19 | Surgimento de fissura oblíqua na lateral esquerda |
| 24 | Estalo emitido pela parede |
| 25 | Constatação de vapor no canto inferior esquerdo |
| 30 | Aparição de umidade em ambas as laterais |
| 43 | Estalo emitido pela parede |
| 92 | Estalo emitido pela parede |
| 240 | Fim do programa térmico |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2.1 Estanqueidade

A P-2 emitiu estalos aos 3 minutos de ensaio. Aos 6 minutos de ensaio, apresentou uma fissura oblíqua, localizada no canto superior direito (Figura 60), instante em que expeliu fumaça pela borda superior, com um odor de plástico queimado, indicando a possível combustão das instalações elétricas pela exposição às altas temperaturas.

Novos estalos foram emitidos pela amostra aos 8 minutos de ensaio, sendo que também notou-se o crescimento da fissura a 45° mencionada anteriormente, no canto superior direito. A temperatura no forno era superior a 670 °C, conforme a curva padrão da ISO 834 (ISO, 1999) e o odor da provável combustão dos elementos elétricos em PVC, foi ficando mais acentuado no laboratório. Como os gases gerados pelos elementos em PVC são tóxicos, a inalação pelos ocupantes em uma situação real de incêndio, poderia reduzir as chances de sobrevivência.

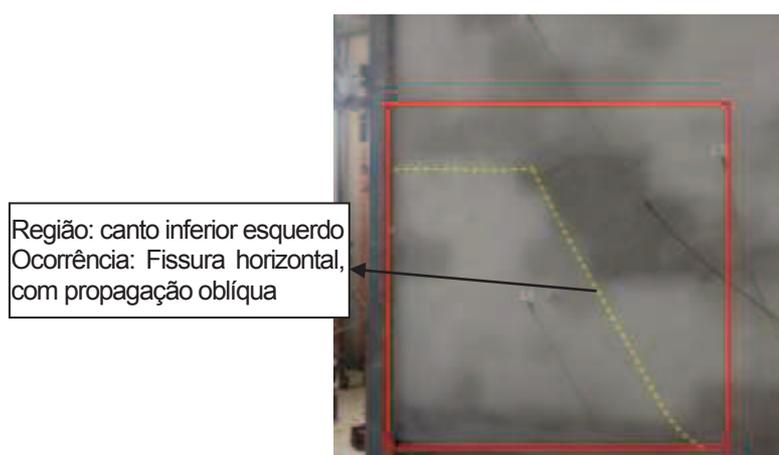
Figura 60 – Fissura oblíqua no canto superior direito da P-2



Fonte: Registrada pelo autor.

Outra fissura manifestou-se na parede aos 9 minutos de ensaio, estando localizada no lado esquerdo, do tipo horizontal. A fissura horizontal seguiu da borda esquerda em direção ao centro da amostra e foi se propagando de forma oblíqua em direção a base (Figura 61), em função das tensões nos cantos provocadas pela restrição com o pórtico.

Figura 61 – Fissura aos 9 minutos de ensaio na P-2



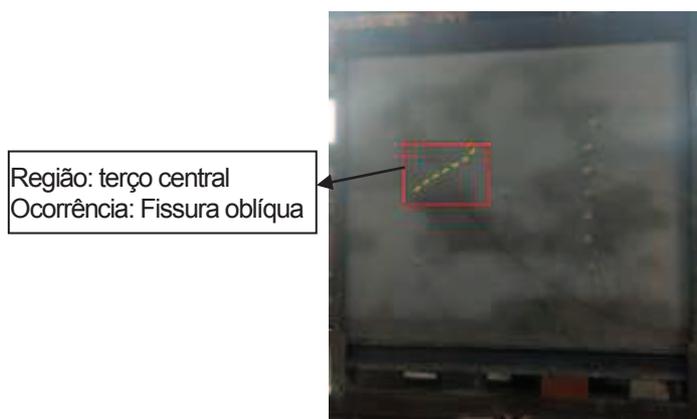
Fonte: Registrada pelo autor.

Transcorridos 10 minutos de ensaio, constatou-se que a amostra expeliu vapor pela borda direita, e havia a possibilidade do revestimento argamassado estar se deslocando, em função da emissão de estalos e ruídos intensos, com indicação da queda do mesmo.

Aos 12 minutos de ensaio, o vapor também passou a ser expelido pela borda esquerda, e o odor indicava que os componentes elétricos estavam sofrendo combustão. A temperatura no forno, de acordo com a curva padrão era de 710 °C.

Aos 19 minutos surgiu uma nova fissura oblíqua, localizada no terço central (Figura 62), sendo a região mais propensa para a parede se curvar na direção das altas temperaturas, o que provoca tensões. Houve um período com frequente emissão de estalos, que durou até os 24 minutos de ensaio, com posterior saída de vapor através do canto inferior esquerdo. Entretanto as verificações indicaram que a P-2 permanecia estanque.

Figura 62 – Fissura oblíqua na superfície não exposta da P-2



Fonte: Registrada pelo autor.

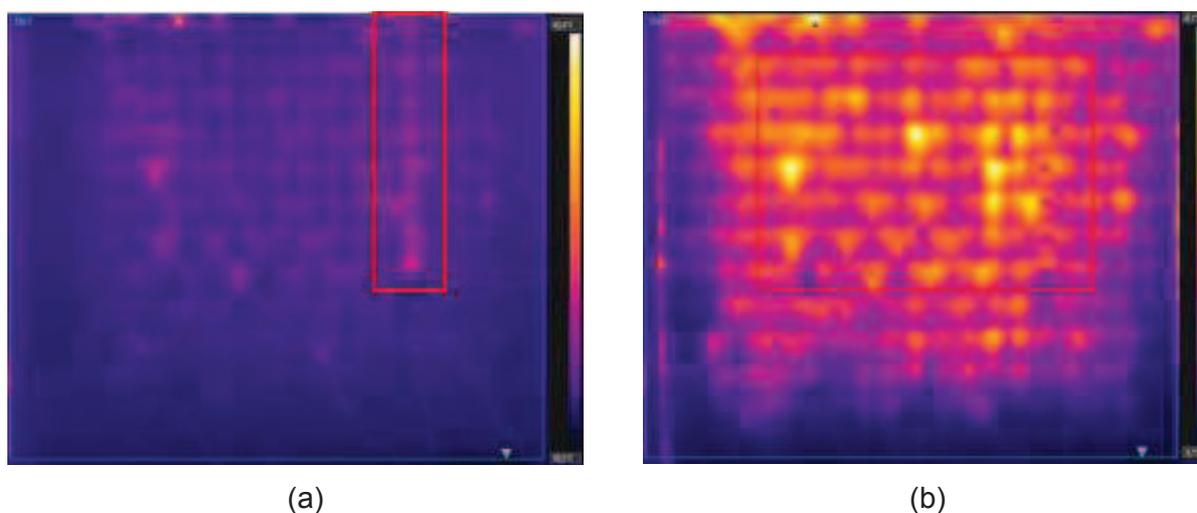
A câmera térmica indicou que, aos 20 minutos de ensaio, as temperaturas na face não exposta, na região que continha as instalações elétricas, eram superiores as temperaturas no entorno. No forno, as temperaturas eram da ordem de 770,0 °C e, a provável combustão dos elementos elétricos, aliada a passagem de gases quentes pelas aberturas podem ter contribuído com o aumento da temperatura na face não exposta.

É possível ver na Figura 63a que a prumada que continha a instalação elétrica, apresentou uma coloração em tons mais quentes, com 40,4 °C, enquanto que no entorno a temperatura era de 18,2 °C, ou seja, a temperatura no entorno da prumada com as instalações era 55% menor. Havia indícios, devido aos estalos emitidos pela amostra, de que o revestimento estava comprometido, passando a deslocar.

Após os 20 minutos decorridos do início do ensaio, a parede passou a emitir estalos e ruídos de forma intensa até os 30 minutos de ensaio, o que indicava a possibilidade do revestimento argamassado já ter deslocado e estar ocorrendo o lascamento do substrato cerâmico no terço central e no terço superior.

A imagem térmica (Figura 63b), aos 30 minutos de ensaio, mostra indícios de lascamento dos blocos cerâmicos na área exposta. A temperatura que incidia na face exposta, de acordo com a curva padrão era cerca de 810 °C aos 30 minutos de exposição.

Figura 63 – Imagem térmica da P-2: (a) aos 20 minutos e (b) aos 30 minutos



Fonte: Registrada pelo autor.

Aos 30 minutos de ensaio a parede começou a apresentar manchas de umidade, que estava evaporando através do revestimento, nas bordas laterais do terço inferior (Figura 64). Ainda, aos 43 e 92 minutos de ensaio, houve a emissão de estalos. Posteriormente, a P-2 não apresentou novas ocorrências até o fim do programa térmico.

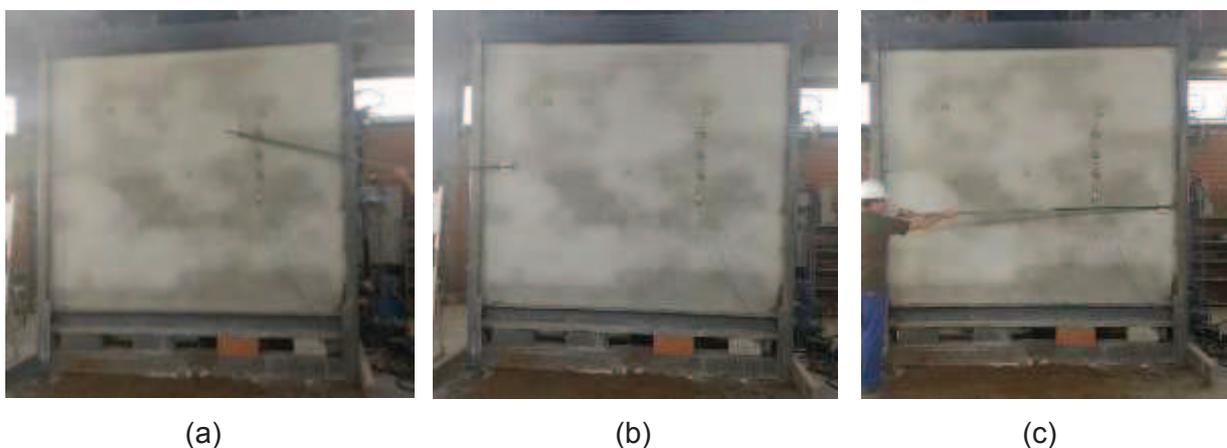
Figura 64 – Presença de umidade na superfície não exposta da P-2



Fonte: Registrada pelo autor.

Faltando 3 minutos para o término do programa térmico, os testes de estanqueidade foram feitos nos locais onde se concentravam as fissuras de maior espessura e na região apontada pela câmera termográfica como sendo a de maior temperatura, conforme mostrado na Figura 65. As verificações indicaram que a parede estava apresentando estanqueidade aos 240 minutos de ensaio.

Figura 65 – Teste de estanqueidade: (a) região de maior temperatura, (b) fissura horizontal na borda lateral esquerda e (c) fissura horizontal na borda lateral direita



Fonte: Registrada pelo autor.

4.1.2.2 Estabilidade

A partir do deslocamento horizontal e sinais de colapso na P-2, foi possível verificar a sua estabilidade. A variação do deslocamento está expressa na Tabela 28. Notou-se que aos 10 minutos de ensaio, ocorreu o maior deslocamento em direção às altas temperaturas (16,803 mm), neste mesmo instante, conforme apresentado no Quadro 4, a amostra emitiu estalos com o provável deslocamento do revestimento argamassado na face exposta às altas temperaturas, por isso, nos instantes seguintes a deformação foi reduzindo, devido ao alívio nas tensões. Já em relação a superfície oposta o deslocamento teve maior intensidade aos 25 minutos de ensaio, alcançando -25,370 mm.

A partir de 120 minutos de ensaio, o deslocamento horizontal da P-2 em relação ao lado externo praticamente se estabilizou, com cerca de $-5,0 \text{ mm} \pm 2,0 \text{ mm}$ de variação em relação a posição original até o final do ensaio.

Por outro lado, na direção do forno, o deslocamento foi diminuindo ao longo do tempo, passando de 10,642 mm (120 minutos) para 2,512 mm (240 minutos) em relação ao plano de origem. Notou-se que a curvatura máxima da P-2 em direção as altas temperaturas (16,803 mm) foi praticamente a metade da P-1 (39,239 mm).

Tabela 28 – Deformação horizontal da P-2

| Tempo (min) | Deformação lateral (mm) | |
|-------------|---------------------------------|--------------------|
| | Superfície voltada para o forno | Superfície externa |
| 0 | 0,000 | 0,000 |
| 5 | 4,757 | -0,607 |
| 10 | 16,803 | -16,066 |
| 15 | 13,636 | -12,097 |
| 20 | 8,568 | -2,130 |
| 25 | 7,985 | -25,370 |
| 30 | 9,413 | -20,583 |
| 40 | 10,470 | -9,317 |
| 50 | 10,510 | -4,005 |
| 60 | 9,862 | -2,258 |
| 70 | 10,269 | -4,351 |
| 80 | 10,364 | -4,643 |
| 90 | 11,623 | -4,077 |
| 100 | 12,452 | -2,617 |
| 110 | 11,163 | -3,910 |
| 120 | 10,642 | -5,454 |
| 130 | 9,533 | -5,076 |
| 140 | 8,648 | -4,808 |
| 150 | 8,190 | -3,903 |
| 160 | 7,122 | -3,807 |
| 170 | 6,760 | -3,951 |
| 180 | 6,376 | -4,409 |
| 190 | 5,366 | -4,280 |
| 200 | 4,722 | -4,663 |
| 210 | 4,213 | -5,096 |
| 220 | 3,606 | -5,435 |
| 230 | 4,818 | -5,428 |
| 240 | 2,512 | -7,134 |

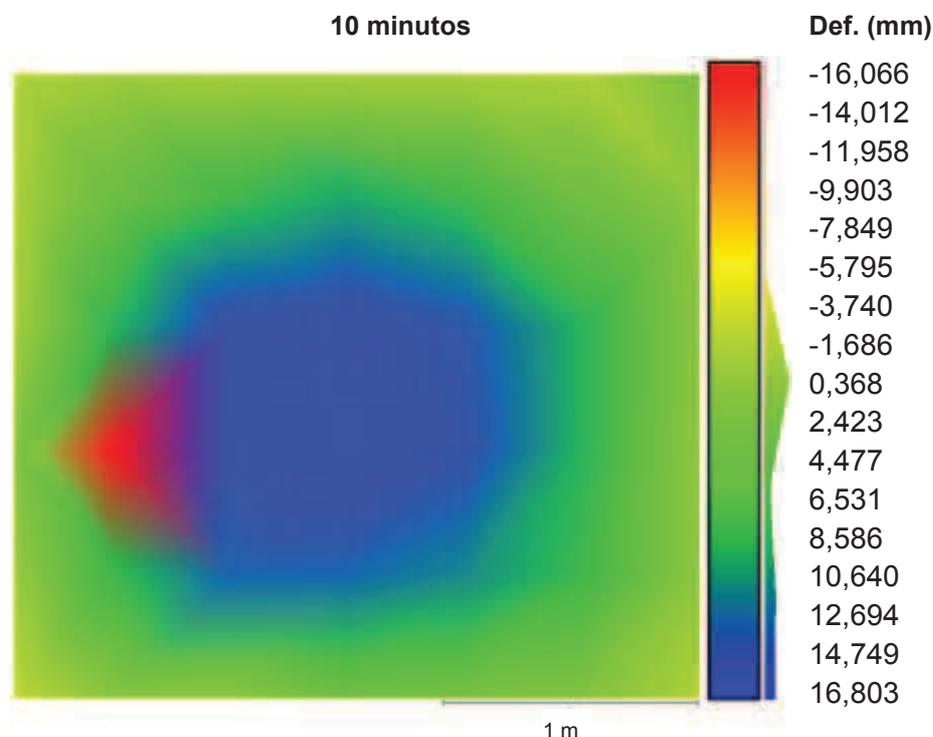
Fonte: Elaborada pelo autor.

O provável deslocamento do revestimento argamassado na face exposta às altas temperaturas, antes dos 20 minutos de ensaio, reduziu as tensões causadas pela expansão térmica diferencial, acarretando na regressão da deformação horizontal até o final do programa térmico.

Interpretando a malha escalar do deslocamento lateral (Figura 66), constatou-se que a deformação do plano em direção às altas temperaturas foi máxima no centro da parede (região azulada) aos 10 minutos de ensaio. Em função dos estalos e ruídos que vinham se manifestando na amostra, e se intensificaram aos 10 minutos, acredita-se que após a ocorrência de comprometimento do revestimento e

lascamento do substrato cerâmico, houve uma redução nas tensões na face exposta, fazendo com que a parede fosse retornando a sua posição de origem.

Figura 66 – Deformação horizontal da P-2 aos 10 minutos de ensaio



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível ver na Figura 67 a aparência final da P-2 ao término do ensaio de resistência ao fogo. Nada restou das instalações elétricas e, em toda a área da parede em contato com às altas temperaturas ocorreu o deslocamento do revestimento argamassado e o lascamento do substrato cerâmico. Entretanto, durante todo o ensaio, a amostra não apresentou sinais de instabilidade que prejudicassem a segurança dos ocupantes e não entrou em colapso. As fissuras que se manifestaram na face não exposta às altas temperaturas eram de pequena espessura, portanto, a parede foi considerada estável. A aparência da P-2 na área exposta é bem semelhante a P-1, com predominância de lascamento das duas primeiras partições dos blocos cerâmicos frente às altas temperaturas.

Figura 67 – P-2 ao término do ensaio: (a) superfície exposta e (b) superfície não exposta às altas temperaturas



(a)

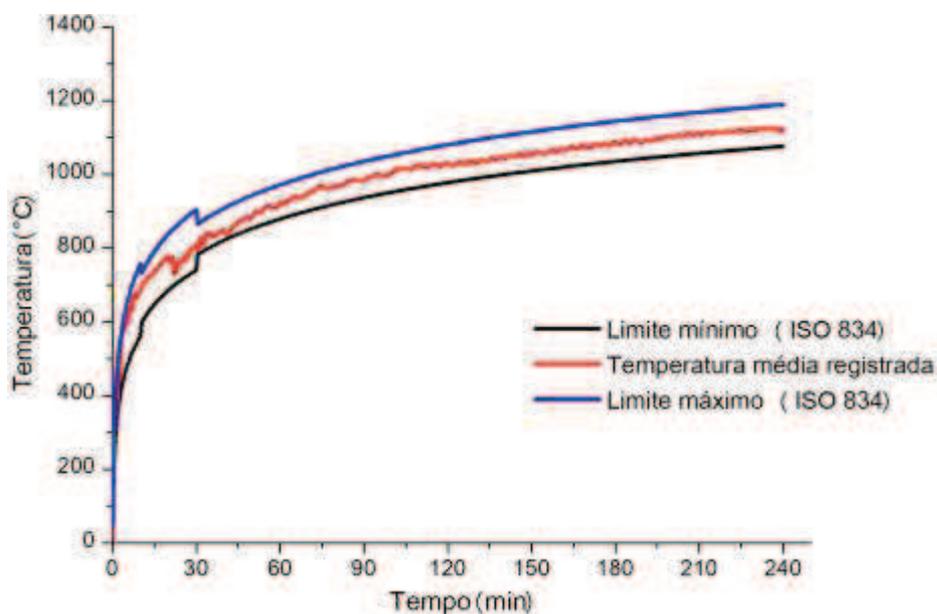
(b)

Fonte: Registrada pelo autor.

4.1.2.3 Isolamento Térmico

É essencial que a temperatura no interior do forno esteja entre os limites admissíveis pela curva padrão ISO 834 (ISO, 1999) durante os ensaios de resistência ao fogo. A partir da visualização da Figura 68, é possível constatar que, durante o ensaio da P-2, a temperatura média no forno estava enquadrada entre os limites normativos, validando o programa térmico que repercutiu na amostra.

Figura 68 – Temperatura no forno durante o ensaio da P-2



Fonte: Elaborada pelo autor.

No início do ensaio foi registrada a temperatura de 22,7 °C, assim, a temperatura pontual máxima que poderia ser registrada na face não exposta da amostra era de 202,7 °C (22,7 °C + 180 °C), enquanto que a temperatura média máxima poderia alcançar 162,7 °C (22,7 °C + 140 °C) para que o critério de isolamento térmico fosse atendido. Foram utilizados os termopares T6 a T15 para verificar a capacidade da parede de manter o isolamento térmico.

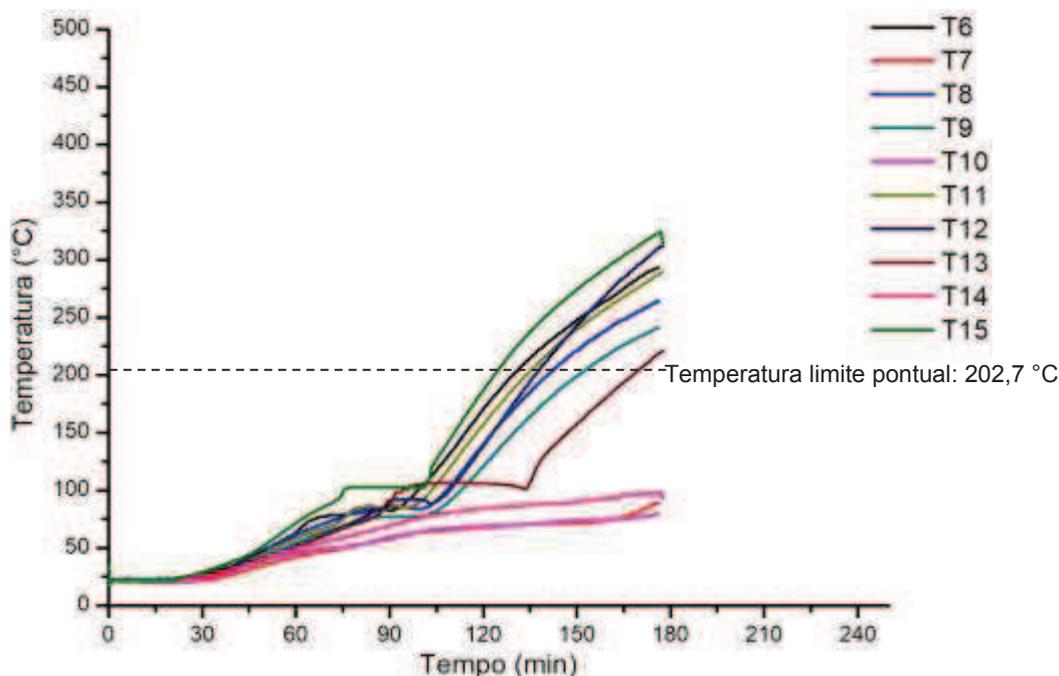
Na Figura 69 é possível ver o desenvolvimento da temperatura com base nos dados fornecidos pelos termopares T6 a T15. O isolamento térmico da P-2 se manteve até os 124 minutos de ensaio, instante em que a temperatura pontual registrada no termopar T15 foi de 201,5 °C.

Posteriormente, o limite pontual de temperatura para a capacidade de isolamento da parede foi extrapolado pelo termopar T15, caracterizando a P-2 em TRF 124 minutos. Neste momento, a temperatura média entre os termopares T6 a T15 era de 132,3 °C.

As medições da temperatura nos termopares T6 a T15 foram realizadas até os 176 minutos de ensaio, pois neste instante as temperaturas estavam próximas dos 300 °C em alguns dos sensores térmicos e estes poderiam ser danificados. A medição prosseguiu apenas com os termopares do tipo K (T16 a T19), posicionados no substrato.

Notou-se, na Figura 69, que as curvas com a evolução da temperatura na face não exposta da P-2 vinham crescendo de maneira estável até a faixa dos 100 °C. Posteriormente, ocorreu um pico de temperatura, uma vez que a água retida na parede evaporou. Este comportamento não foi observado nos termopares T7, T10 e T14, devido a temperatura não atingir 100 °C naqueles pontos.

Figura 69 – Evolução da temperatura pontual registrada pelos termopares T6 a T15 na P-2

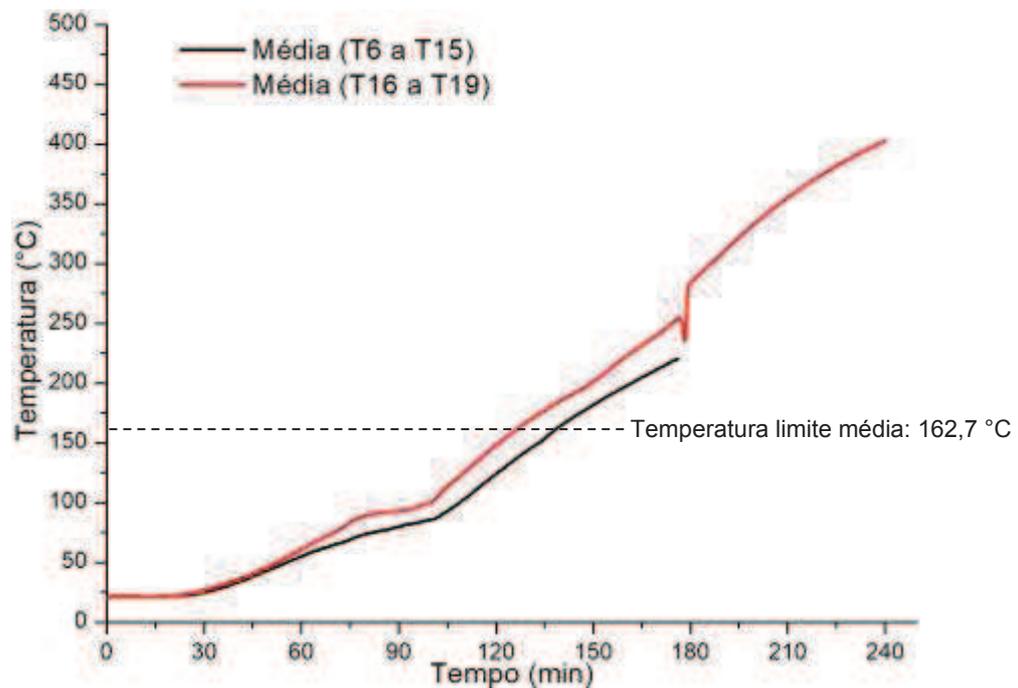


Fonte: Elaborada pelo autor.

A P-2 continha duas instalações elétricas que incluíam caixas de PVC para tomadas, cabos e eletrodutos no interior da parede. As aberturas na sexta fiada, para o posicionamento das caixas de PVC para tomadas elétricas, possuíam dimensões de 120 mm x 80 mm cada.

A Figura 70 exhibe as curvas com a evolução das temperaturas médias no revestimento externo e no substrato. Verificou-se que o aquecimento foi maior nos sensores posicionados no substrato (T16 a T19), enquanto que o revestimento retardou a transferência de calor para o lado externo. A temperatura média ultrapassou o limite para a capacidade de isolamento aos 127 minutos de ensaio no substrato e aos 139 minutos entre os termopares T6 a T15. Ao final do ensaio, a temperatura média no substrato era de 402,7 °C.

Figura 70 – Evolução da temperatura média na face não exposta da P-2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Há evidências de que houve o deslocamento do revestimento argamassado e o lascamento dos blocos cerâmicos na face exposta às altas temperaturas durante o ensaio, o que comprometeu a espessura equivalente da parede, além de reduzir a capacidade de isolamento. As instalações elétricas nas prumadas e as aberturas na sexta fiada, possivelmente tiveram influência no desempenho atingido pela P-2. A passagem de chamas e gases quentes pelas aberturas, sugerem uma contribuição para o aquecimento na face não exposta e fenômenos que se manifestaram na amostra.

Na Tabela 29 são apresentadas as temperaturas medidas na face não exposta ao longo das fiadas. Observou-se que, a partir de 30 minutos de ensaio, período em que houve indícios do lascamento do substrato, as temperaturas foram maiores na 5ª fiada. Na 6ª fiada, cujo bloco continha uma abertura destinada a caixa de PVC para tomada elétrica, a temperatura era menor em relação a 5ª fiada. Nas fiadas logo acima, em geral, as temperaturas foram superiores. Na P-1, as maiores temperaturas foram registradas na 6ª fiada.

Tabela 29 – Temperatura medida pelos termopares T11 a T15 no decorrer do ensaio da P-2

| Fiada | Termopar | Tempo (min) | | | | | | | | |
|-------|----------|------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | | 5 | 10 | 20 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| | | Temperatura (°C) | | | | | | | | |
| 9 | 11 | 21,2 | 20,9 | 21,1 | 25,2 | 39,1 | 58,3 | 84,8 | 156,9 | 239,8 |
| 8 | 12 | 23,2 | 23,0 | 23,5 | 27,8 | 38,0 | 51,4 | 88,3 | 138,6 | 242,9 |
| 7 | 13 | 23,0 | 22,7 | 23,2 | 26,5 | 35,8 | 50,4 | 91,0 | 106,1 | 157,6 |
| 6 | 14 | 23,0 | 22,8 | 23,0 | 23,7 | 36,2 | 49,3 | 69,3 | 84,2 | 90,0 |
| 5 | 15 | 22,8 | 22,7 | 23,2 | 29,0 | 44,3 | 71,7 | 102,7 | 186,8 | 274,3 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.3 Ensaio de Resistência ao Fogo da P-3

Para iniciar o programa térmico, foram verificadas as seguintes condições ambientais:

- temperatura no início do ensaio (T_0): 24,4 °C;
- umidade: 65,3%;
- velocidade do ar: 0,0 m/s.

O programa térmico, com incidência de temperatura na amostra, iniciou após a verificação das condições ambientais no laboratório. As ocorrências que se manifestaram no decorrer do ensaio da P-3 podem ser observadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Ocorrências do ensaio de resistência ao fogo da P-3

(continua)

| Tempo (min) | Ocorrência |
|-------------|--|
| 0 | Início do programa térmico |
| 1 | Estalo emitido pela parede |
| 4 | Surgimento de fissura horizontal na borda lateral direita |
| 5 | Surgimento de fissura vertical na região central da parede |
| 6 | Surgimento de fissura horizontal na lateral esquerda do terço central |
| 6 | Propagação a 45° da fissura horizontal da borda lateral direita (terço inferior) para a base da parede |
| 9 | Odor indicando a provável combustão dos elementos hidráulicos |
| 9 | Constatação de vapor expelido na borda lateral esquerda |
| 11 | Estalo emitido pela parede |
| 12 | Surgimento de fissuras obliquas nos cantos superiores |

Quadro 5 – Ocorrências do ensaio de resistência ao fogo da P-3

(conclusão)

| Tempo (min) | Ocorrência |
|--------------------|---|
| 14 | Surgimento de fissura horizontal na borda lateral direita |
| 15 | Constatação de vapor expelido nos cantos inferiores |
| 16 | Odor indicando a provável combustão dos elementos hidráulicos |
| 16 | Constatação de vapor expelido em ambas as bordas laterais |
| 18 | Constatação de presença de umidade na fissura oblíqua localizada na lateral direita |
| 23 | Aparição de umidade na borda lateral direita |
| 23 | Aparição de umidade na fissura vertical na região central da parede |
| 30 | Aparição de umidade em ambas as bordas laterais esquerda e direita |
| 70 | Aparição de umidade na extremidade superior e nas fissuras oblíquas dos cantos superiores |
| 120 | Constatação de emissão de vapores pelas fissuras dos cantos superiores |
| 240 | Fim do programa térmico |

Fonte: Elaborado pelo autor.

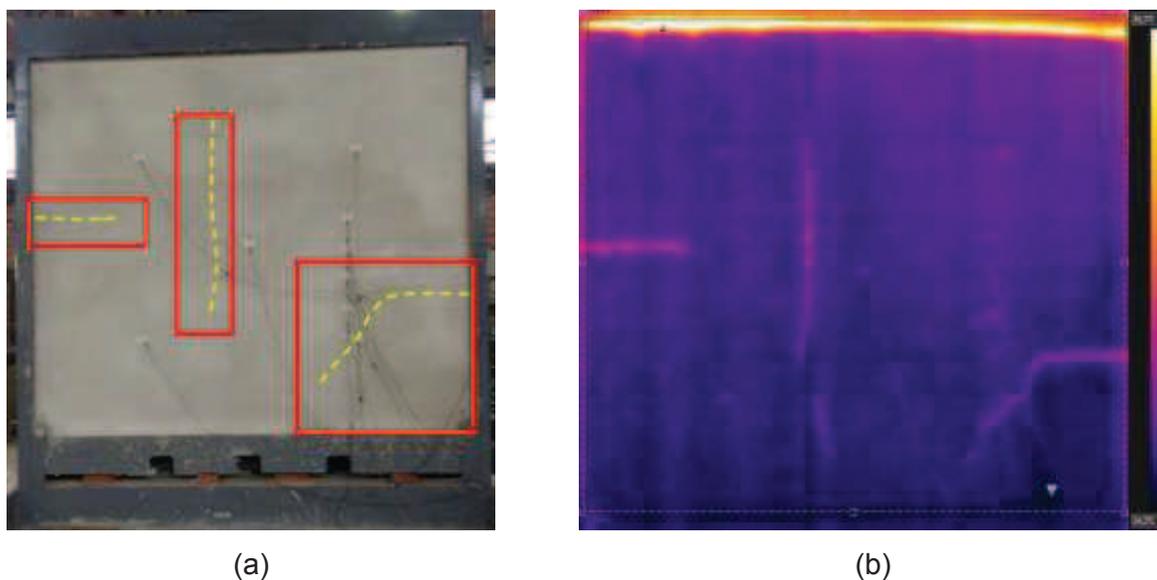
4.1.3.1 Estanqueidade

Logo após o primeiro minuto do início do programa térmico ouviu-se os primeiros estalos na amostra. Contudo, a primeira fissura veio a surgir aos 4 minutos de ensaio, estando localizada no terço inferior, na borda direita e sendo do tipo horizontal. Uma fissura vertical manifestou-se na região central, aos 5 minutos de ensaio. Aos 6 minutos, outra fissura horizontal surgiu na borda esquerda do terço central e sua extensão foi se prolongando em direção a região central, período no qual ocorreu a propagação da fissura localizada na lateral inferior direita, de forma oblíqua em direção a base da parede, provavelmente devido à restrição de deslocamento pela vinculação com o pórtico.

Aos 9 minutos de ensaio, havia um odor sendo expelido pela P-3, indicando a possibilidade de combustão da tubulação hidráulica. Notou-se a emissão de vapor pela lateral esquerda da amostra. Neste instante, a temperatura no forno de acordo com a curva padrão ISO 834 (ISO, 1999) era de 620,0 °C, enquanto que a imagem térmica indicava uma temperatura máxima de 28,0 °C sendo expelida pelos gases quentes. Na P-2 esta sensação de que estava ocorrendo a combustão das instalações ocorreu aos 6 minutos. É possível ver na Figura 71 as ocorrências

relatadas na face não exposta da P-3, assim como a imagem térmica aos 10 minutos de ensaio, que mostra que a temperatura era maior nas fissuras.

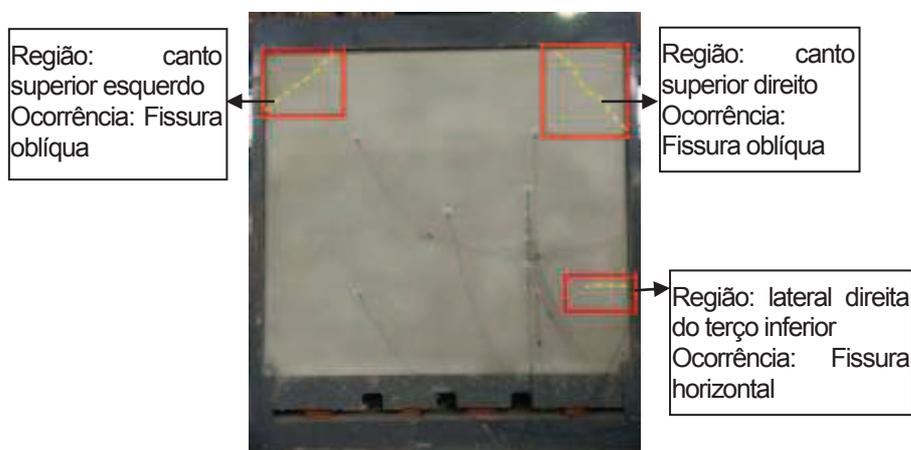
Figura 71 – Fissuras na amostra: (a) superfície não exposta aos 8 minutos e (b) imagem térmica aos 10 minutos



Fonte: Registrada pelo autor.

A P-3 emitiu novos estalos aos 11 minutos de ensaio. Fissuras oblíquas manifestaram-se em ambos os cantos superiores (direito e esquerdo) aos 12 minutos, e dois minutos após, uma nova fissura horizontal exteriorizou-se na lateral direita do terço inferior, conforme indicado na Figura 72. A restrição da alvenaria com o pórtico, nos cantos inferiores e superiores, gerou tensões que facilitaram o surgimento de fissuras nestes locais.

Figura 72 – Face não exposta às altas temperaturas da P-3 aos 14 minutos de ensaio

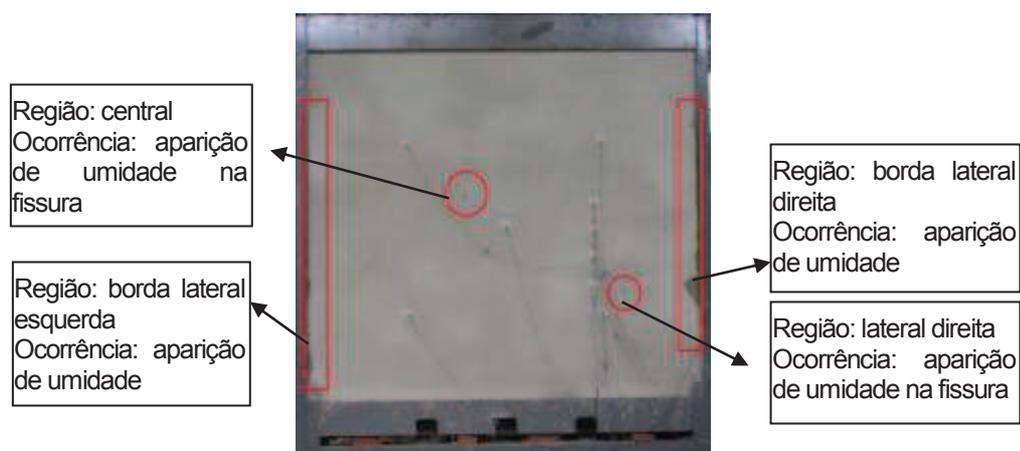


Fonte: Registrada pelo autor.

Decorridos 15 minutos do programa térmico, a amostra passou a apresentar saída de vapor através dos cantos inferiores e pelas bordas laterais, com um acentuado odor indicando que as tubulações hidráulicas haviam entrado em combustão.

A umidade se fez presente na superfície não exposta, aos 18 minutos de ensaio, quando eram perceptíveis manchas na fissura oblíqua da lateral direita. Cinco minutos depois, a umidade estava presente na borda lateral direita e em um trecho da fissura vertical próxima ao centro da amostra. Passados 30 minutos do ensaio, a umidade também estava presente na borda lateral esquerda, instante em que a câmera termográfica indicou que a temperatura dos gases expelidos era de 52,9 °C e a temperatura no forno, de acordo com a curva padrão ISO 834 (ISO, 1999) era de 865,0 °C. É possível observar na Figura 73 as manifestações relatadas.

Figura 73 – Manchas com indícios de umidade na P-3



Fonte: Registrada pelo autor.

As fissuras oblíquas dos cantos superiores apresentaram manchas de umidade aos 70 minutos de exposição, as quais ficaram mais intensas aos 90 minutos de ensaio, ou seja, a parede estava perdendo água (Figura 74a).

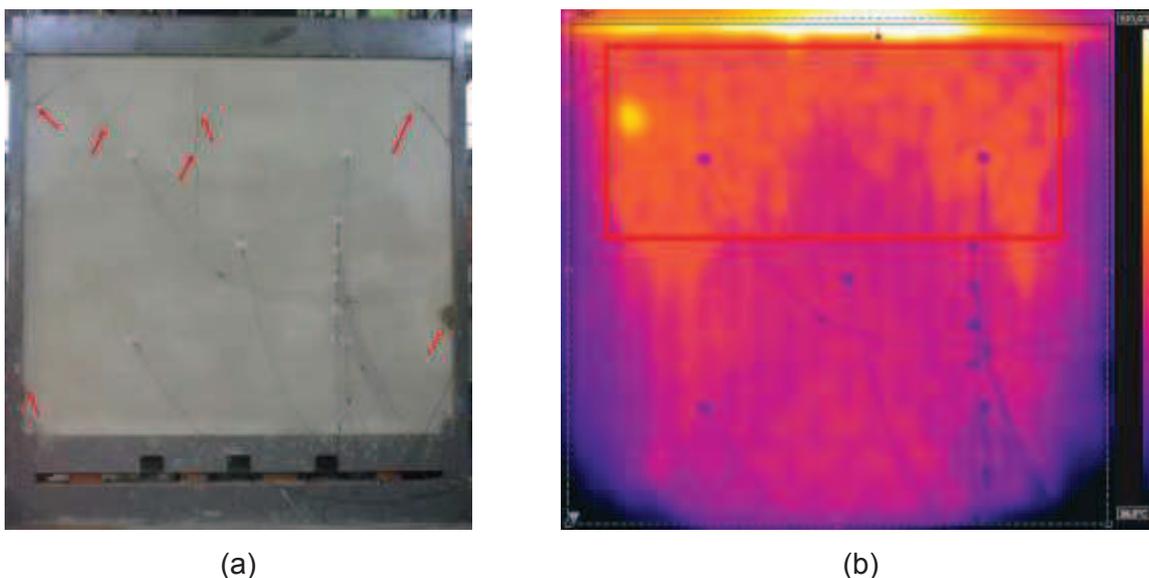
A amostra P-1 não apresentou manchas de umidade, enquanto que na P-2 as manchas de umidade se manifestaram aos 30 minutos de ensaio, estando localizadas em um pequeno trecho das bordas laterais. Entretanto, na P-3, além das bordas laterais, as manchas de umidade estavam presentes nas fissuras.

Assim, sugere-se que na P-1 e P-2, o deslocamento do revestimento logo nos instantes iniciais do programa térmico tenha ocasionado em uma maior

transferência de calor para o lado não exposto, acelerando a perda de umidade, enquanto que na P-3 o revestimento no lado exposto se manteve aderido ao substrato durante um maior período, retardando a perda de água, que foi sendo expelida através das fissuras no lado não exposto às altas temperaturas. Além deste fato, as próprias propriedades do revestimento, que variaram, podem ter acarretado em um maior retenção de água até a idade do ensaio.

Decorridos 120 minutos do ensaio, houve emissão de vapor pelas fissuras existentes nos cantos superiores. Conforme exposto na Figura 74b, a imagem térmica mostrava que no terço superior estavam concentradas as maiores temperaturas expelidas pelos vapores com 131,4 °C, enquanto que no forno a temperatura era de 1052,0 °C, conforme a curva padrão ISO 834 (ISO, 1999). Nos momentos subsequentes do ensaio, até o final do programa térmico, não se manifestaram novas ocorrências.

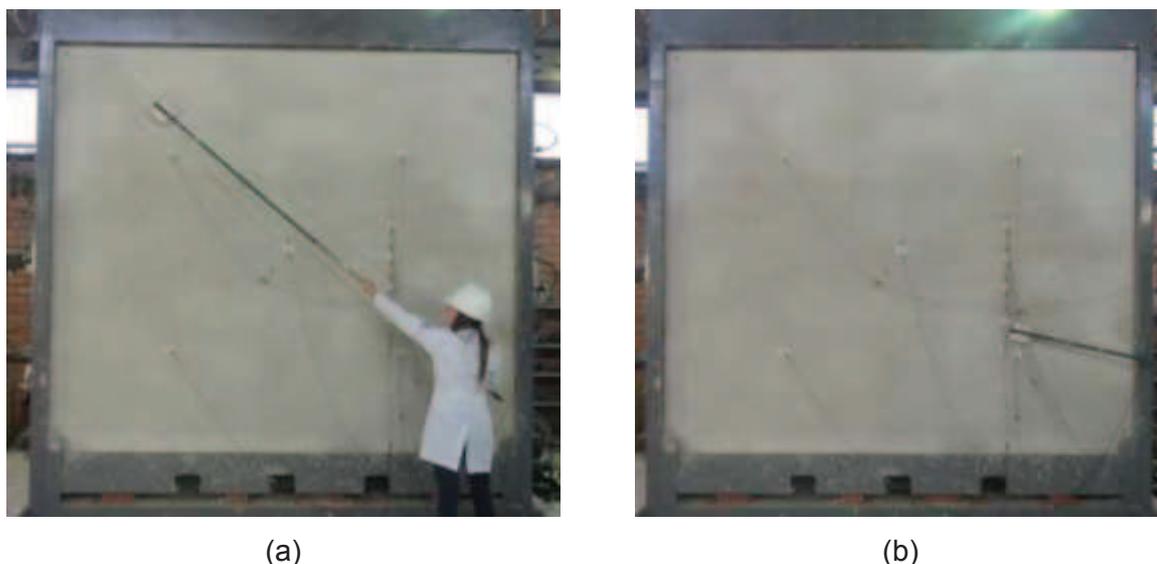
Figura 74 – P-3: (a) umidade em 90 minutos e (b) imagem térmica aos 120 minutos



Fonte: Registrada pelo autor.

Nos 3 últimos minutos para o término do ensaio, a estanqueidade foi verificada com o posicionamento de um chumaço de algodão nas fissuras de maiores aberturas e nos locais com temperaturas mais elevadas (Figura 75), entretanto em nenhuma das verificações o algodão sofreu inflamação, o que evidencia que a parede se manteve estanque durante todo o programa térmico.

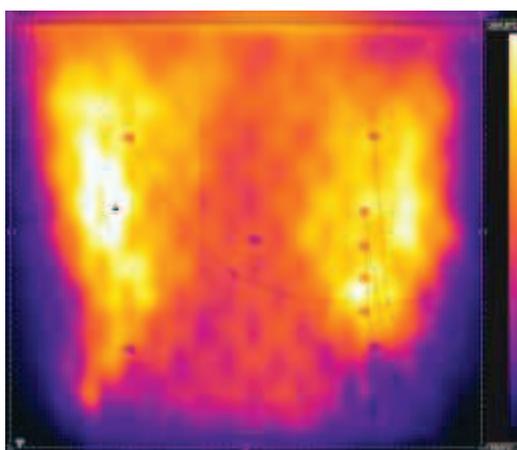
Figura 75 – Verificação da estanqueidade na P-3



Fonte: Registrada pelo autor.

Ao final do ensaio, a imagem térmica (Figura 76) apontou que as maiores temperaturas, em tons de amarelo, estavam localizadas na região das prumadas que continham as instalações hidráulicas, em função da passagem de gases quentes pelas aberturas.

Figura 76 – Imagem térmica da P-3 aos 240 minutos de ensaio



Fonte: Registrada pelo autor.

4.1.3.2 Estabilidade

A partir da observação de sinais de colapso e da deformação lateral da amostra foi verificada a estabilidade da P-3. Aos 20 minutos de ensaio ocorreu o deslocamento horizontal máximo de 42,376 mm em direção às altas temperaturas

(forno) e de -17,186 mm na direção oposta. A amostra P-3 não emitiu estalos após atingir a deformação máxima aos 20 minutos, é possível constatar pela Tabela 30 que a deformação do plano no decorrer do ensaio foi mais uniforme em relação as demais amostras.

Tabela 30 – Deformação horizontal da P-3

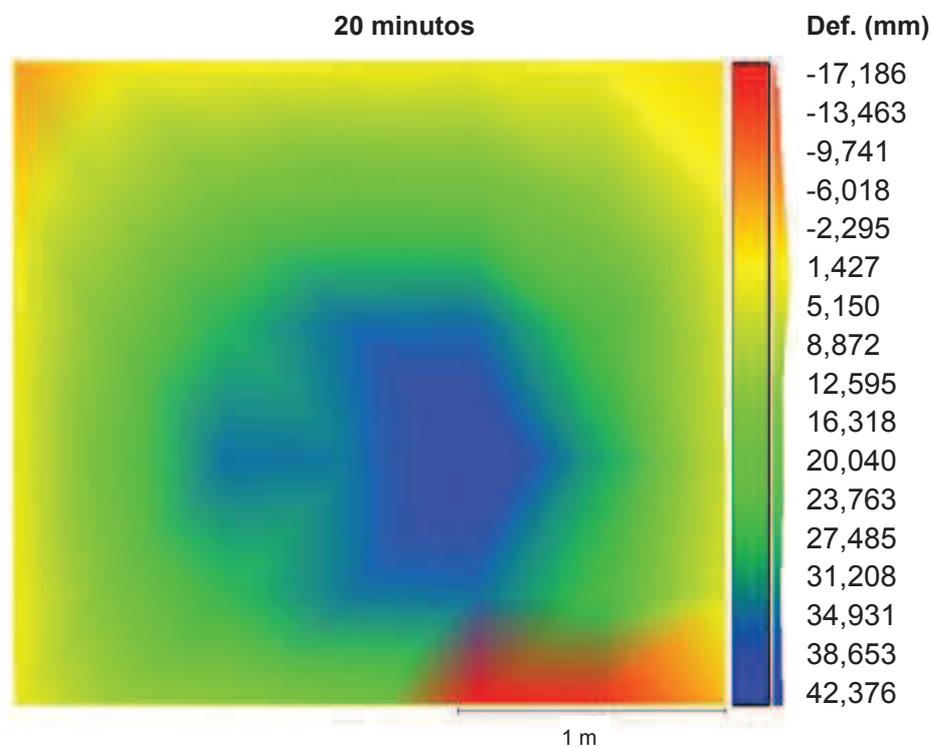
| Tempo (min) | Deformação lateral (mm) | |
|-------------|---------------------------------|--------------------|
| | Superfície voltada para o forno | Superfície externa |
| 0 | 0,000 | 0,000 |
| 5 | 12,377 | -3,431 |
| 10 | 29,290 | -12,082 |
| 15 | 42,126 | -17,023 |
| 20 | 42,376 | -17,186 |
| 25 | 39,460 | -16,625 |
| 30 | 37,864 | -15,863 |
| 40 | 36,826 | -15,997 |
| 50 | 36,253 | -15,938 |
| 60 | 35,498 | -15,741 |
| 70 | 35,080 | -15,106 |
| 80 | 34,339 | -14,797 |
| 90 | 34,398 | -14,754 |
| 100 | 34,173 | -15,307 |
| 110 | 33,929 | -15,386 |
| 120 | 34,684 | -14,943 |
| 130 | 34,798 | -15,226 |
| 140 | 34,815 | -15,054 |
| 150 | 34,973 | -15,373 |
| 160 | 34,801 | -15,679 |
| 170 | 35,553 | -15,511 |
| 180 | 35,778 | -15,824 |
| 190 | 35,451 | -15,536 |
| 200 | 35,159 | -15,683 |
| 210 | 35,108 | -15,997 |
| 220 | 35,647 | -15,720 |
| 230 | 35,547 | -16,703 |
| 240 | 35,537 | -16,787 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Através da malha espacial gerada com a nuvem de pontos (Figura 77), foi possível perceber que o deslocamento horizontal em direção às altas temperaturas (42,376 mm) foi máximo na região central da amostra, indo de encontro aos

resultados de outras investigações, como a de Nguyen e Meftah (2012, 2014) e Souza (2017).

Figura 77 – Deformação horizontal da P-3 aos 20 minutos de ensaio

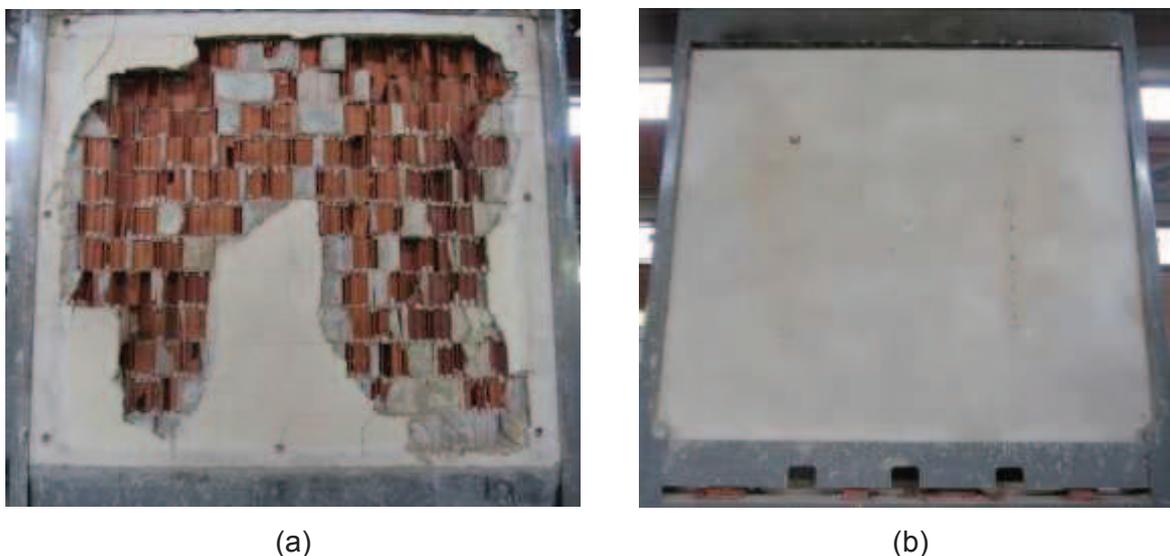


Fonte: Elaborada pelo autor.

Após 30 minutos de ensaio, a deformação do plano para o lado externo estabilizou-se, com um deslocamento médio de -15,0 mm com variações de $\pm 1,0$ mm. Já o deslocamento voltado para o forno se apresentou estável após 60 minutos de ensaio, com uma deformação, em média, de 35,0 mm em relação a posição de origem, variando $\pm 1,0$ mm até o final do ensaio. Com a estabilização do deslocamento, e a não ocorrência de qualquer sinal que indicasse que a parede iria colapsar, a P-3 foi considerada estável até o final do ensaio.

Durante o ensaio de resistência ao fogo, a P-3 não emitiu ruídos que dessem indícios da ocorrência de deslocamento do revestimento na face exposta. Contudo, após o término do ensaio a amostra emitiu ruídos com sintomas de que estava ocorrendo o deslocamento de parte do revestimento e o desprendimento de partições lascadas do substrato. Depois do desacoplamento da P-3 do forno vertical, foi possível visualizar o seu aspecto na face exposta (Figura 78a) e na face não exposta às altas temperaturas (Figura 78b).

Figura 78 – P-3 ao término do ensaio: (a) superfície exposta e (b) superfície não exposta às altas temperaturas



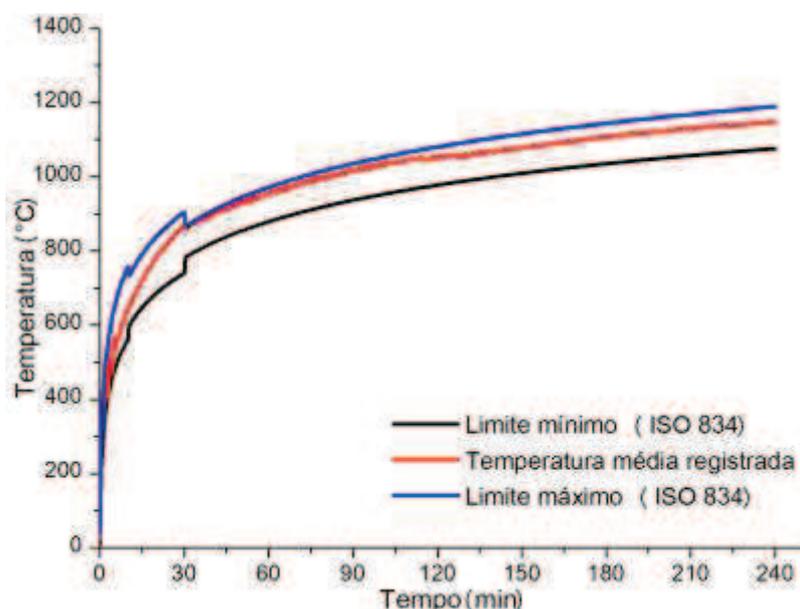
Fonte: Registrada pelo autor.

No lado exposto às altas temperaturas, foi confirmada a ocorrência de deslocamento do revestimento argamassado e o lascamento de uma parte do substrato cerâmico após o desacoplamento da P-3 do forno. Pelo que as evidências indicam, o revestimento se manteve aderido ao substrato da P-3 por um intervalo maior de tempo em comparação as demais paredes investigadas, assim, dentre a maioria dos substratos cerâmicos que se romperam, o lascamento ocorreu apenas na primeira partição do bloco, enquanto que nas outras amostras a ruptura das duas primeiras partições do substrato frente às altas temperaturas foi predominante.

4.1.3.3 Isolamento Térmico

A temperatura média registrada no interior do forno estava em conformidade com os limites mínimos e máximos estabelecidos na ISO 834 (ISO, 1999) durante todo o período de ensaio, conforme mostrado na Figura 79, tornando válida a aplicação das altas temperaturas na amostra.

Figura 79 – Temperatura no forno durante o ensaio da P-3



Fonte: Elaborada pelo autor.

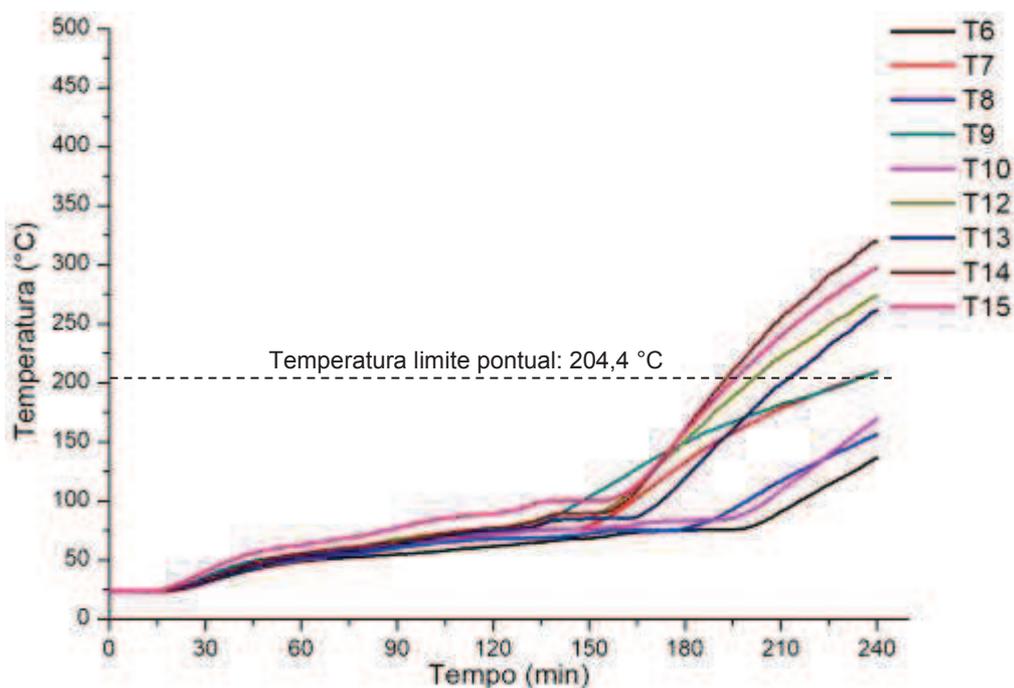
Registrou-se a temperatura de 24,4 °C no início do ensaio, assim, a temperatura média máxima que a amostra poderia atingir na face não exposta, para que a P-3 fosse capaz de isolar termicamente, era de 164,4 °C (24,4 °C + 140 °C), enquanto que a temperatura pontual máxima poderia alcançar 204,4 °C (24,4 °C + 180 °C). A partir dos termopares T6 a T15, foi verificado o atendimento da parede quanto a capacidade de isolamento térmico. Entretanto, o registro das temperaturas no termopar T11 não foi realizado devido a um problema técnico na transmissão dos dados.

A Figura 80 mostra a evolução da temperatura pontual na face não exposta às altas temperaturas. É possível observar que a temperatura praticamente se estabilizou ao ficar próxima da faixa de 100 °C e, posteriormente, houve um pico de aquecimento, o que pode estar atribuído a evaporação da água presente na amostra, comportamento semelhante ao que fora observado nos perfis de temperatura da P-1 e P-2. Entretanto, nas outras amostras investigadas, os indícios de deslocamento do revestimento na face exposta às altas temperaturas, acabou promovendo a transferência de calor e, conseqüentemente, o aquecimento da face não exposta em um menor intervalo de tempo ao serem comparadas com a P-3.

Até os 193 minutos de ensaio a temperatura pontual registrada na face não exposta pelo termopar T14, na região das instalações hidráulicas, era de 203,9 °C,

abaixo da temperatura pontual máxima que a P-3 poderia atingir para ser considerada isolante térmico. Posteriormente, o limite de temperatura pontual foi ultrapassado pelo sensor T14, acarretando na perda de seu isolamento térmico, portanto, fora qualificada como TRF 193 minutos.

Figura 80 – Evolução da temperatura pontual registrada pelos termopares T6 a T15 na P-3

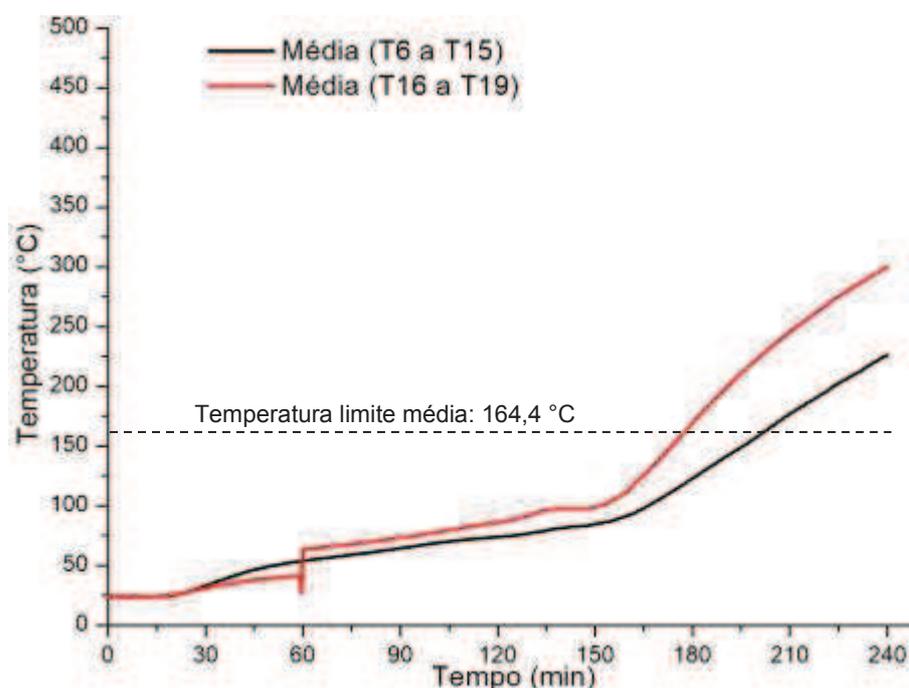


Fonte: Elaborada pelo autor.

A P-3 possuía aberturas com diâmetro de 30,0 mm destinadas aos pontos de saída de água e instalações hidráulicas. A Figura 81 apresenta as curvas com a evolução das temperaturas médias.

Observou-se que, conforme o esperado, a temperatura foi maior nos termopares T16 a T19, posicionados no substrato, em comparação aos demais termopares posicionados no revestimento. Tais resultados reforçam o que já fora investigado pela literatura técnica como Souza (2017) e Manica et al. (2018), indicando que o revestimento promove um melhor isolamento as paredes de compartimentação.

Figura 81 – Evolução da temperatura média na face não exposta da P-3



Fonte: Elaborada pelo autor.

A temperatura limite média, na face não exposta, que a P-3 poderia atingir para que a capacidade de isolamento térmico fosse atendida era de 164,4 °C. Este limite foi ultrapassado pelos termopares T16 a T19 aos 178 minutos e pelos termopares T6 a T15 aos 203 minutos.

A Tabela 31 exhibe as temperaturas medidas pelos termopares T12 a T15 no decorrer do ensaio, os quais estavam posicionados em uma das prumadas com a instalação hidráulica. As temperaturas na sexta fiada (com a abertura de 30,0 mm destinada a saída de água) foram menores que as temperaturas na quinta fiada, até os 150 minutos. Durante todo o ensaio a temperatura na sétima fiada foi inferior a oitava fiada, apenas ao final do ensaio, após a P-3 ter perdido a capacidade de isolamento térmico, que o comportamento inverteu-se entre a sétima e oitava fiada.

Tabela 31 – Temperatura medida pelos termopares T12 a T15 no decorrer do ensaio da P-3

| Fiada | Termopar | Tempo (min) | | | | | | | | | | | |
|-------|----------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | 5 | 10 | 20 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 |
| | | Temperatura (°C) | | | | | | | | | | | |
| 8 | 12 | 24,05 | 24,06 | 24,91 | 32,30 | 46,3 | 54,27 | 67,61 | 76,64 | 85,62 | 150,49 | 221,57 | 320,60 |
| 7 | 13 | 23,50 | 23,55 | 24,44 | 31,06 | 44,33 | 52,49 | 62,73 | 74,62 | 85,30 | 119,31 | 198,96 | 343,30 |
| 6 | 14 | 23,67 | 23,74 | 24,88 | 33,40 | 47,43 | 55,73 | 65,85 | 77,20 | 89,90 | 160,27 | 254,70 | 275,20 |
| 5 | 15 | 24,00 | 24,00 | 27,80 | 40,30 | 55,70 | 62,20 | 77,50 | 89,40 | 100,50 | 158,50 | 239,80 | 260,60 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Discussão dos resultados

Os resultados experimentais indicaram que todas as paredes investigadas mantiveram sua estanqueidade e estabilidade durante os 240 minutos do ensaio de resistência ao fogo, critérios relacionados a categoria para-chamas (PC). Em relação ao isolamento térmico, em um determinado instante do ensaio, a temperatura na face não exposta às altas temperaturas extrapolou o limite para a capacidade de isolamento das paredes, sendo a P-1, P-2 e P-3 qualificadas como TRF 134 minutos, TRF 124 minutos e TRF 193 minutos, respectivamente.

A partir dos resultados obtidos, foi possível classificar as paredes quanto ao grau de resistência ao fogo estabelecido na NBR 10636 (ABNT, 1989), conforme está apresentado na Tabela 32. A NBR 14432 (ABNT, 2001) pode ser consultada para verificar em quais grupos de edificações seria possível utilizar os sistemas investigados, com base no TRRF exigido.

Tabela 32 – Classificação das paredes investigadas

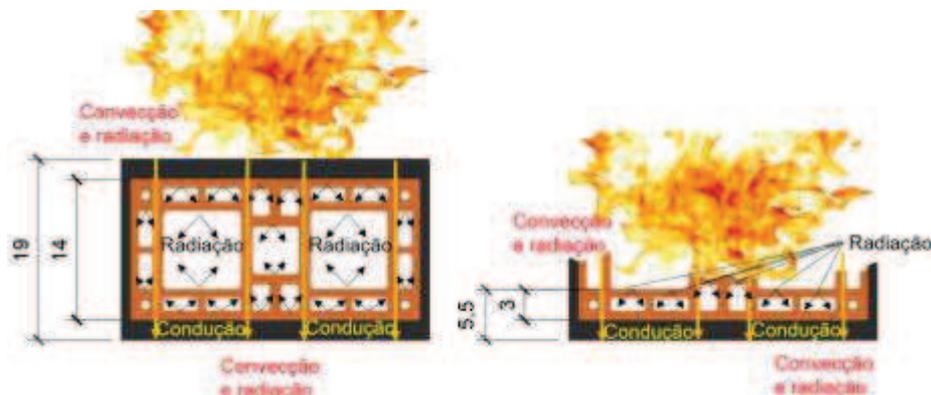
| Amostra | TRF (min) | Classificação | |
|---------|-----------|---------------|------------|
| | | Para-chamas | Corta-fogo |
| P-1 | 134 | PC 240 | CF 120 |
| P-2 | 124 | PC 240 | CF 120 |
| P-3 | 193 | PC 240 | CF 180 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

As fissuras que se manifestaram durante a realização dos ensaios nas paredes investigadas foram de pequena espessura, e não ocasionaram a inflamação do chumaço de algodão, por isso as amostras foram consideradas estanques até o final dos ensaios.

Constatou-se na amostra referência (P-1), por volta dos 45 minutos de ensaio, que havia ocorrido o lascamento das duas primeiras partições de alguns blocos na área exposta às altas temperaturas, revelando que a espessura equivalente da parede nos locais desta ocorrência decresceu, passando de 19,0 cm para 5,5 cm, conforme representado no esquema da Figura 82. Caso não tivesse ocorrido o deslocamento do revestimento, a transferência de calor para o lado não exposto seria menor e a amostra teria apresentado um desempenho superior.

Figura 82 – Representação da espessura equivalente antes e após o lascamento das duas primeiras partições do substrato frente às altas temperaturas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme apresentado na caracterização dos materiais (capítulo 3), houve variação nas propriedades das argamassas utilizadas no revestimento das amostras, tanto no estado fresco quanto no endurecido. No estado fresco, o ensaio de verificação do teor de ar foi o que apresentou maior variação, indicando que as argamassas utilizadas nos revestimentos das paredes P-1, P-2 e P-3, continham 25%, 26% e 16% de teor de ar incorporado, respectivamente. Observou-se que o teor medido nas amostras 1 e 2 foram similares, porém em quantidade consideravelmente superior ao teor da amostra 3. Já no estado endurecido, também houve variações na resistência a compressão, absorção total e índice de vazios, por exemplo.

As paredes P-1 e P-2 foram confeccionadas em datas próximas. Contudo, a confecção da P-3, por questões logísticas, não ocorreu conforme o cronograma previsto inicialmente, o qual teve que ser reajustado. Consequentemente, os materiais que foram utilizados na central de produção da argamassa estabilizada de revestimento da P-3 não foram os mesmos empregados na mistura da P-1 e P-2, visto que a empresa fornecedora necessitou adquirir novos materiais para produzir a mistura. Assim, as variações nas propriedades das argamassas são justificadas em função dos diferentes materiais que foram utilizados pela central dosadora para produzir a mistura. Tais variações influenciaram no desempenho das amostras investigadas.

Houve indícios de que, na face exposta da P-2, ocorreu o deslocamento do revestimento instantes após o início do programa térmico, devido aos ruídos e estalos emitidos pela amostra. Assim como na P-1, as ocorrências sugerem que o

deslocamento é proveniente da dilatação térmica diferencial entre a argamassa de revestimento e o substrato cerâmico que compõe a alvenaria. Em adição a isso, as propriedades da argamassa de revestimento, como por exemplo, o elevado teor de ar incorporado nas amostras P-1 e P-2, apontam uma redução na superfície de contato entre a argamassa e o substrato, que também influencia no deslocamento.

Além disso, as aberturas na P-2 com dimensões de 120 mm x 80 mm, contribuíram com a passagem de gases quentes para o interior da parede, o que pode ter promovido um acréscimo na transferência de calor para a superfície não exposta e influenciado no gradiente térmico diferencial ao longo da espessura da amostra. Pelo fato de ter ocorrido o deslocamento do revestimento, o calor estava incidindo diretamente no substrato, o que propiciou o lascamento dos blocos, dificultando a verificação sobre a influência das aberturas destinadas às instalações elétricas na resistência ao fogo.

O revestimento da P-3 se manteve aderido por mais tempo na parede, e após o desacoplamento da amostra do forno vertical, constatou-se o lascamento parcial do substrato, que ocorreu, em geral, na primeira partição voltada para às altas temperaturas. Por outro lado, na P-1 e na P-2, percebeu-se que o lascamento do substrato cerâmico, em geral, ocorreu na segunda partição dos blocos.

As aberturas na face exposta, com diâmetro de 30,0 mm na P-3 sendo menores que as aberturas com dimensões 120,0 mm x 80,0 mm na P-2, reduziram a passagem de gases quentes para o interior da parede. Este fator, aliado a manutenção do revestimento durante o ensaio da P-3, refletiu na maior resistência ao fogo em relação a P-2, uma vez que, a temperatura na face não exposta da amostra 3 manteve sua capacidade de isolamento térmico por um tempo maior que a amostra 2.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, a literatura recomenda que sistemas de compartimentação que contenham qualquer passagem de tubulação com diâmetro superior a 40,0 mm, recebam uma selagem que tenha a capacidade de obstruir o buraco deixado pela passagem dos componentes ao ser consumido pelo fogo.

No instante em que a P-3 perdeu a capacidade de isolamento, após 193 minutos de ensaio, a temperatura média medida pelos termopares T12 a T15 (na prumada com as tubulações hidráulicas) era cerca de 25% superior que a temperatura média entre os termopares T6 a T10, desta forma, o uso de selagem

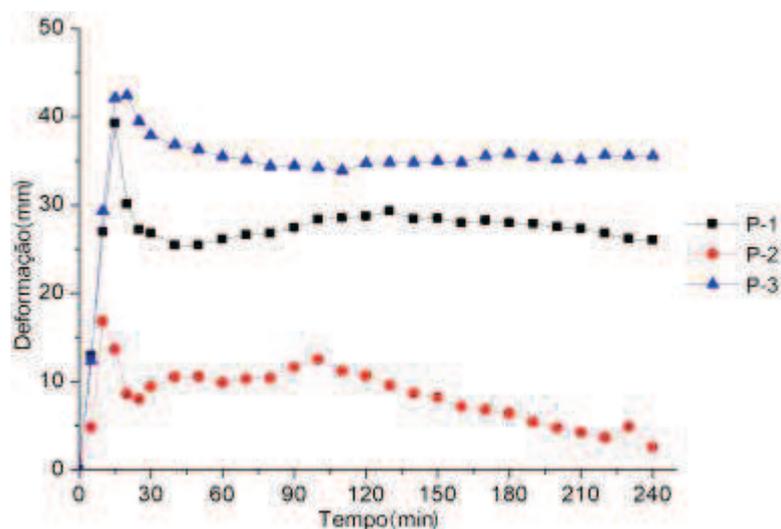
para aberturas de diâmetro 30,0 mm poderia ser considerada na parede para evitar o aquecimento na região com tendência a passagem de gases quentes e os riscos associados a perda de isolamento térmico.

Não foi observado um padrão de comportamento da forma como o calor se propagou ao longo das fiadas, com base nas temperaturas mensuradas pelos termopares posicionados nas prumadas contendo instalações no interior das paredes. Percebeu-se que, em geral, as temperaturas no decorrer do ensaio foram maiores na fiada com a abertura ou nas fiadas adjacentes às aberturas (logo abaixo ou logo acima), nas paredes com instalações prediais.

Ao comparar a deformação horizontal das paredes investigadas, constatou-se que todas as amostras tiveram o mesmo comportamento nos primeiros instantes do programa térmico, ao curvarem-se em direção à superfície exposta às altas temperaturas. Ao longo do ensaio, as amostras foram estabilizando as deformações, sendo que notou-se uma tendência de retornarem em direção a posição original. Em nenhuma das paredes foram observados sinais de colapso que comprometeriam a segurança dos ocupantes, portanto todas as amostras foram consideradas estáveis.

Na Figura 83 é possível observar que na P-2, a deformação foi menor em comparação às demais amostras. Esta constatação pode estar relacionada ao provável deslocamento do revestimento logo nos primeiros minutos do ensaio, o que causou um alívio nas tensões que induziam as deformações na parede, fazendo com a mesma fosse retornando a posição de origem. Em contrapartida, na P-3, que apresentou um maior deslocamento em comparação às demais amostras, houve uma melhora na absorção do calor transferido para a superfície não exposta em função da ausência de sinais e ruídos que indicassem o deslocamento do revestimento na face exposta, o que gerou maiores tensões e uma maior deformação transversal.

Figura 83 – Deformação horizontal das paredes no decorrer dos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

As malhas espaciais do deslocamento horizontal no decorrer dos ensaios estão apresentadas no Apêndice B (P-1), Apêndice C (P-2) e Apêndice D (P-3). Observou-se que, nas paredes P-1 e P-3, o deslocamento horizontal máximo ocorreu na região central das amostras, no sentido das altas temperaturas, durante todo o período de ensaio. Entretanto, na P-2 este comportamento foi diferente, visto que, por volta dos 100 minutos de ensaio até os 220 minutos, a deformação horizontal máxima foi se estendendo do centro até as bordas (superior e inferior) da amostra, e ao final do ensaio a deformação central estava voltada para o lado não exposto às altas temperaturas.

No estudo de Souza (2017), dentre as 6 amostras analisadas, a que mais se assemelha as paredes investigados nesta dissertação é a parede P3 com função de vedação, sem instalações prediais, sendo composta por blocos cerâmicos da mesma geometria e mesmas dimensões (14 x 19 x 29 cm), mesma espessura de chapisco (5,0 mm), revestimento interno de 15,0 mm e externo de 25,0 mm, com uma espessura equivalente de 19,0 cm, ou seja, a mesma espessura de seção transversal das amostras desta dissertação.

Apesar da P-1 ser similar a P3 analisada por Souza (2017), o deslocamento do revestimento da amostra P-1 investigada nesta dissertação, acarretou em uma redução significativa na sua capacidade de isolamento térmico em comparação à P3 investigada por Souza (2017).

Ao comparar a capacidade de isolamento térmico da amostra P-3 com a parede P3 do estudo de Souza (2017), verificou-se que amostra investigada nesta dissertação apresentou uma redução de 15 minutos no TRF.

Em relação ao deslocamento horizontal máximo, notou-se uma semelhança, visto que na investigação de Souza (2017) a parede P3 se deslocou 43,0 mm na região central da amostra em direção às altas temperaturas aos 30 minutos de ensaio, enquanto que a P-3, investigada nesta dissertação, se deslocou 42,0 mm na mesma região aos 20 minutos de ensaio.

Os resultados experimentais e as simulações numéricas de Nguyen e Meftah (2009, 2014), com paredes de alvenaria com função de vedação, indicaram que a deformação máxima dos sistemas expostos às condições da curva padrão ISO 834 (ISO, 1999) foi de aproximadamente 40,0 mm, mantendo sua estabilidade até o final do ensaio, condição semelhante ao que foi encontrado para as amostras P-1 e P-3 investigadas nesta dissertação.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo o estudo experimental da resistência ao fogo de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos, buscando avaliar a influência das aberturas destinadas às instalações prediais elétricas e hidráulicas.

A P-1 representa a amostra referência, sem qualquer abertura ao longo da seção transversal que acarretasse em uma diminuição da espessura equivalente da parede. A P-2 contém duas aberturas de 120,0 mm x 80,0 mm e tubulação elétrica embutida. A P-3 foi construída com duas aberturas de diâmetro 30,0 mm e tubulação hidráulica embutida.

As fissuras que se manifestaram nas paredes eram de pequena espessura e não comprometeram a estanqueidade. Para todas as amostras investigadas, o deslocamento do plano não foi excessivo e não foram observados sinais de ruína que comprometessem a estabilidade. Deste modo, concluiu-se que os critérios de estanqueidade e estabilidade foram atendidos durante os 240 minutos de ensaio para todas as paredes.

Em relação ao aquecimento na superfície não exposta, a P-1 manteve a sua capacidade de isolar termicamente até os 134 minutos de ensaio, a P-2 até os 124 minutos de ensaio e a P-3 preservou a sua capacidade isolante até os 193 minutos de ensaio.

A princípio, pode-se supor que aberturas destinadas a instalações prediais em paredes de compartimentação tendem a diminuir o TRF. Porém, os resultados experimentais não permitiram a confirmação desta suposição, pois houve o deslocamento do revestimento e o lascamento do substrato na amostra referência (P-1) durante o ensaio, o que comprometeu a espessura da seção transversal e, conseqüentemente, o desempenho da parede. Tais ocorrências, como o deslocamento do revestimento e o lascamento do substrato também ocorreu no decorrer do ensaio da P-2.

Acredita-se que o revestimento argamassado foi o fator determinante que exerceu influência no desempenho das amostras, visto que durante a etapa de caracterização da argamassa foram encontradas variações nas propriedades das misturas. O teor de ar da amostra 3, por exemplo, promoveu uma melhora na extensão de aderência do revestimento com o substrato, reduzindo as chances de

ocorrer o seu deslocamento. Também houve variação em outras propriedades, o que influenciou no desempenho das amostras.

Desta forma, não se pode isolar os efeitos combinados da transferência de calor pelas aberturas, da dilatação térmica diferencial que afetou os diferentes materiais componentes da parede, assim como das propriedades dos materiais que influenciaram no deslocamento do revestimento e, por consequência, o lascamento do substrato cerâmico.

A dimensão das aberturas na P-3 (30,0 mm) foi inferior à dimensão das aberturas da P-2 (120,0 mm x 80,0 mm) e, de acordo com os resultados experimentais, a amostra P-3 apresentou um melhor desempenho em relação à P-2. Ou seja, as aberturas da P-3 permitiram a passagem de menor quantidade de chamas e gases quentes para o interior da parede durante à exposição as altas temperaturas em comparação à P-2.

A análise da capacidade de isolamento térmico indicou que tanto a P-2, assim como a P-3, perderam a capacidade de isolar termicamente no instante em que a temperatura de termopares posicionados na região da prumada com as aberturas e instalações prediais excederam a temperatura máxima que poderiam atingir naqueles pontos para garantir o isolamento térmico das paredes. Diante desta evidência, pode-se concluir que nas regiões com aberturas que permitem a passagem de gases quentes, a superfície não exposta perde sua capacidade de isolamento em um menor tempo em comparação a superfície no entorno, o que reduz a resistência ao fogo de paredes. Por mais que não haja uma diferença representativa em relação a temperatura no entorno, cada minuto que os ocupantes dispõem para garantir a evacuação segura durante uma situação de incêndio é de grande importância.

Em relação ao deslocamento do plano das paredes, na direção das altas temperaturas, o deslocamento do revestimento na P-2 no início do programa térmico aliviou as tensões na amostra, que apresentou uma deformação menor entre as paredes investigadas. Na P-3, o deslocamento foi maior em relação as demais paredes. Concluiu-se que a manutenção do revestimento aumentou a capacidade de isolamento térmico, assim, a amostra absorveu mais calor, e consequentemente gerou mais tensões, as quais ocasionaram em maior deformação em relação a posição original da amostra.

Buscou-se com esta pesquisa contribuir para um melhor entendimento de como as paredes de compartimentação de alvenaria com blocos cerâmicos, construídas com aberturas e instalações prediais no interior, se comportam quando são atingidas por altas temperaturas.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Além da alvenaria com blocos cerâmicos, o surgimento de novos materiais para a execução de sistemas construtivos, torna imprescindíveis os ensaios que avaliam o TRF para os sistemas que serão empregados nas edificações, tendo em vista garantir o desempenho mínimo em relação à segurança contra incêndio.

É necessário promover a compatibilização entre as normas e a legislação em segurança contra incêndio, a fim de evitar ambiguidades e facilitar que o desempenho esperado pelas edificações seja atingido, e principalmente ter a garantia da segurança da vida dos ocupantes evitando assim, mortes e perdas patrimoniais, bem como facilitar o acesso às ações de combate a incêndio e segurança dos bombeiros.

Os resultados experimentais indicam a necessidade de novas investigações para a melhor compreensão dos fenômenos encontrados. A partir das imagens registradas com a câmera termográfica durante os ensaios experimentais, podem ser desenvolvidos modelos do comportamento das paredes ensaiadas utilizando técnicas de análise de imagens como redes neurais artificiais (RNA) para a avaliação da transferência de calor no tempo e espaço.

Do mesmo modo, poderiam ser desenvolvidos modelos de comportamento para a curvatura térmica das paredes ao longo do tempo, utilizando redes neurais artificiais (RNA), através das imagens espaciais geradas no software CloudCompare.

Seria possível desenvolver, através de softwares como Abaqus ou Ansys, um modelo numérico, baseado em elementos finitos tridimensionais, para prever a resposta térmica de uma parede de alvenaria com instalações prediais exposta às altas temperaturas.

Sugere-se que sejam feitas novas investigações com outros sistemas construtivos que estão sendo utilizados na construção civil, fazendo o uso de elementos de instalações prediais, para simular de maneira realística o

comportamento frente às altas temperaturas. As investigações poderiam contemplar paredes com função de vedação, assim como função estrutural.

Também poderiam ser feitas investigações com o uso de proteções passivas nas aberturas destinadas as instalações, inclusive os próprios elementos elétricos e hidráulicos poderiam receber pinturas intumescentes para avaliar sua eficiência.

REFERÊNCIAS

- ACIKGOZ, S.; SOGA, K.; WOODHAMS, J. Evaluation of the response of a vaulted masonry structure to differential settlements using point cloud data and limit analyses. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 150, p. 916-931, 2017.
- ALFAWAKHIRI, Farid. **Behaviour of cold-formed-steel-framed walls and floors in standard fire resistance tests**. National Library of Canada - Bibliothèque Nationale du Canada, 2003.
- ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. 2002. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM E 119**: standard test methods for fire tests of building construction and materials. West Conshohocken, 2016.
- ANDREINI, M.; DE FALCO, A.; SASSU, M. Stress-strain curves for masonry materials exposed to fire action. **Fire Safety Journal**, [S.l.], v. 69, p. 43-56, Oct. 2014.
- ARAÚJO, Alexandre et al. Fire behaviour of tabique walls. In: THE INTERNATIONAL FIRE SAFETY SYMPOSIUM, 2015, Coimbra. **Proceedings...** Coimbra, 2015. p. 263-270.
- ARIYANAYAGAM, A. D.; MAHENDRAN, M. Fire design rules for load bearing cold-formed steel frame walls exposed to realistic design fire curves. **Fire Safety Journal**, v. 77, p. 1–20, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Manual de revestimentos de argamassa**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10636**: paredes divisórias sem função estrutural: determinação da resistência ao fogo: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11578**: cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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 (ABNT). **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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 (ABNT). **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13528**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15465**: Sistemas de eletrodutos plásticos para instalações elétricas de baixa tensão — Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575**: Edificações Habitacionais — Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575**: Edificações Habitacionais — Desempenho. Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575**: Edificações Habitacionais — Desempenho. Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5410**: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais: determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 247**: Cabos isolados com policloreto de vinila (PVC) para tensões nominais até 450/750 V, inclusive. Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

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

AUDOUIN, L. et al. OECD PRISME project: Fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments - Overview and main experimental results. **Fire Safety Journal**, v. 62, n. PART B, p. 80–101, 2013.

BAUER, E. **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. LEM-UnB/Sinduscom. 92p. Brasília, 2005.

BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. **Física para Universitários**: relatividade, oscilações, ondas e calor. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

BĘDKOWSKI, J.; PEŁKA, M.; MAJEK, K.; FITRI, T.; NARUNIEC, J. Open source robotic 3D mapping framework with ROS - Robot Operating System, PCL - Point Cloud Library and Cloud Compare. **The 5th International Conference on Electrical Engineering and Informatics 2015**. Bali, 2015.

BELLEI, P.; JANTSCH, A. C.; TEMP, A. L.; NUNES, G. R.; OLIVEIRA, M. D.; MOHAMAD, G. Estudo comparativo do desempenho no estado fresco e endurecido de argamassas estabilizadas de 36h e 72h. XI **SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**. Porto Alegre, 2015.

BELLOVÁ, M. Fire Walls Made from Concrete and Masonry - Barriers against a Fire Spreading. **Key Engineering Materials**, v. 691, p. 408–419, 2016.

BÉNICHOU, Nouredine; SULTAN, Mohamed A. Behaviour of lightweight-framed timber construction under elevated temperatures. In: APEC Seminar-Fire Performance of Timber Construction, Wellington, NZ. **Proceedings...** 2005. p.1-12.

BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Tradução Fernando Pessoa e Eduardo Queiroz. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BERTO, A. F. Segurança ao fogo. **Revista Técnica**, São Paulo, ed. 142, p. 1-3, 2009.

BHATTACHARJEE, S. et al. Measurement of instantaneous flame spread rate over solid fuels using image analysis. **Fire Safety Journal**, v.91, p.123-129, 2017.

BIDOUNG, J. C.; PLIYA, P.; MEUKAM, P.; NOUMOWÉ, A.; BEDA, T. Behaviour of clay bricks from small-scale production units after high temperature exposure. **Materials and Structures**, v.49, n.12, p.4991-5006, 2016.

BOLINA, F. L. **Avaliação experimental da influência dos requisitos de durabilidade na segurança contra incêndio de protótipos de pilares pré-fabricados de concreto armado**. 2016. 170 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2016.

BOLINA, F. L.; PRAGER, G. L.; RODRIGUES, E.; TUTIKIAN, B. F. Avaliação da resistência ao fogo de paredes maciças de concreto armado. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 291-305, 2015.

BORGES, R. Alvenaria estrutural compensa mesmo? **Linkedin**, 2 dezembro 2015. Disponível em <<https://pt.linkedin.com/pulse/alvenaria-estrutural-compensa-mesmo-ricardo-borges>>. Acesso em 13 de setembro de 2017.

BOTTIN, G.; PRAGER, G.; GIL, A. M.; TUTIKIAN, B. F.; BOLINA, F. L. Estruturas de alvenaria em situação de incêndio: avaliação experimental em escala real da influência da geometria dos blocos cerâmicos no desempenho estrutural às altas temperaturas. **X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas (2018 XCBPE)**. Anais... Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

BRASIL. **Lei nº. 13425, de 30 de março de 2017**. Estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13425.htm>. Acesso em: 24 jun. 2017.

BRITEZ, C. A.; COSTA, C. N. Ações do Fogo nas Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v.2 cap. 29, p.1029-1068, 2011.

BUCHANAN, A. H.; ABU, A. K. **Structural design for fire safety**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2ªed., 438p., 2017.

BUSON, M.; LOPES, N. VARUM, H.; SPOSTO, R. M.; REAL, P. V. Fire resistance of walls made of soil-cement and Kraftterra compressed earth blocks. **Fire and Materials**, v. 37, p. 547-562, 2012.

BWALYA, A. C.; LOUGHEED G.S.; SU, J.; TABER, B.; BENICHOU, N.; KASHEF, A. Development of a fuel package for use in the fire performance of houses project, in: **Proceedings of the Fire and Materials Conference**, San Francisco, USA, 2007.

CAPITAL DEVELOPMENT BOARD. Various roof and building additions. **Project Manual**, Illinois, Mar. 2017.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 2, cap. 28, p. 893-944.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). **EN 1996-1-2**: Eurocode 6 – Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels, 2005.

CORREIA, A. M.; RODRIGUES, J. P. C.; SILVA, V. P. A simplified calculation method for temperature evaluation of steel columns embedded in walls. **Fire and Materials**, v. 35, p. 431-441, 2010.

CORTIZO, E. C.; BARBOSA, M. P.; SOUZA, L. A. C. Estado da arte da termografia. **Fórum Patrimônio: ambiente construído e patrimônio sustentável**. Belo Horizonte, v. 2, n. 2, p. 158-193, 2008.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. 405f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo (USP), 2008.

COURTY, L.; GARO, J.P. External heating of electrical cables and auto-ignition investigation. **Journal of Hazardous Materials**, 2017.

CRAFT, S. T.; DESJARDINS, R.; MEHAFFEY, J. R. Investigation of the Behaviour of CLT Panels Exposed to Fire. **12th Twelfth International Conference Fire and Materials**. Anais... FPIInnovations, Ottawa, Canada, 2011.

DAS, A. K. **Principles of fire safety engineering: understanding fire and fire protection**. Delhi, India: PHI Learning, 208p., 2014.

DEMLING, R. H. Smoke inhalation lung injury: an update. **Eplasty**, v. 8, p. e27, 2008.

DRYSDALE, D. D. **An Introduction to Fire Dynamics**, 3rd edition, John Wiley & Sons, West Sussex, 2011.

EBERT, J. R. **Análise de ensaio de incombustibilidade em amostras de forro de policloreto de vinila – PVC**. 2016. 61f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Santa Cruz do Sul, 2016.

ENFORM. The Safety Association for Canada's Upstream Oil and Gas Industry. **Fire and Explosion Hazard Management**, Calgary, Alberta. 96p., 2016.

FARIAS, V. P. **Pilares de Concreto Armado com Armaduras Corroídas Submetidos a Altas Temperaturas: Resistência ao Estado Limite Último**. 2015. 99f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2015.

GERLICH, J. T.; COLLIER, Peter Clive Robert; BUCHANAN, Andrew Hamilton. Design of Light Steel-framed Walls for Fire Resistance. **Fire and Materials**, v.20, n.2, p.79-96, 1996.

GILBERT, R. I. Shrinkage and early-age temperature induced cracking and crack control in concrete structures. **International Conference on Performance-based**

and Life-cycle Structural Engineering, Brisbane, QLD, Australia, Brisbane, QLD, Australia: School of Civil Engineering, The University of Queensland, 2015.

GLOBAL ASSET PROTECTION SERVICES (GAPS). **Fire walls, fire Barriers and fire partitions** - Guideline. Hartford, Connecticut, 2015.

GO, C. G.; TANG, J. R.; CHI, J. H.; CHEN, C. T.; HUANG, Y. L. Fire-resistance property of reinforced lightweight aggregate concrete wall. **Construction and Building Materials**, v.30, p. 725-733, 2012.

GONG, T.; XIE, Q.; HUANG, X. Fire behaviors of flame-retardant cables part I: Decomposition, swelling and spontaneous ignition. **Fire Safety Journal**, v.95, p.113-121, 2018.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física 2 – gravitação, ondas e termodinâmica**. Tradução Ronaldo Sérgio de Biasi. 8ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 295p., 2009.

HE, H. et al. The influence of currents on the ignition and correlative smoke productions for PVC-insulated electrical wires. **Fire Technology**, v. 53, p.1275-1289, 2017.

HENNEMANN, G. G.; GIL, A. M.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. Avaliação teórico-experimental da influência da espessura de alvenaria na resistência ao fogo de sistemas verticais de vedação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 183-195, out./dez. 2017.

HM GOVERNMENT. **Approved Document B: Fire safety – Volume 1: Dwellinghouses**. The Building Regulations 2010. London, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13571: Life-threatening Components of Fire – Guidelines for the Estimation of time to Compromised Tenability in Fires**. Genebra, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13943: Fire Safety – Vocabulary**. Genebra, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 6241: performance standards in building – principles for their preparation and factors**. Genebra, 1984.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 834-1: Fire resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements**. Genebra, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 8421-1: Fire protection - Vocabulary - Part 1: General terms and phenomena of fire**. Genebra, 1987.

JACINTHO, A. E. P. G. A.; SILVA, V. P.; REQUENA, J. A. V.; LINTZ, R. C. C.; GACHET-BARBOSA, L. A.; PIMENTEL, L. L. Analysis of composite steel and concrete columns at high temperatures. **Fire and Materials**, v.40, p.305-317, 2014.

JATHEESHAN, Varathananthan; MAHENDRAN, Mahen. Fire resistance of LSF floors made of hollow flange channels. **Fire Safety Journal**, v.84, p.8-24, 2016.

JONES JUNIOR, A. M. **Fire Protection Systems**. Burlington, Massachusetts: Jones & Bartlett Learning, 2^aed., 512p., 2013.

KARLSSON, B.; BENGTSSON, L. Flashover, backdraft and smoke gas explosion — the fire service perspective, Interflam, in: **Proceedings of the 8th International Fire Science and Engineering Conference**, Interscience Communications Ltd., London, 1999.

KHALIQ, Wasim; BASHIR, Muhammad Farrukh. High temperature mechanical and material properties of burnt masonry bricks. **Materials and Structures**, v.49, n.12, p.5195-5208, 2016.

KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v.2, p. 429–447, 2000.

KIRCHHOF, L. D. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas**. 2010. 237f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.

KLEIN JÚNIOR, O. **Pilares de concreto armado em situação de incêndio submetidos à flexão normal composta**. 2011. 210f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2011.

KOBAYASHI, Y. et al. Flame spread over horizontal and vertical wires: The role of dripping and core. **Fire Safety Journal**, v. 91, p.112-122, 2017.

KONNIK, R.; MENNONE, M. **Fire resistant cable**. United States Patent US 7538275 B2. May 26. 2009.

KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. **Princípios de transferência de calor**. 7^a ed., Cengage Learning Brasil, São Paulo, 600p., 2014.

KWON, I. K.; JEE, N. Y. Experimental study of the fire resistance of walls and floors constructed with steel studs and steel joists. **Fire and Materials**, v. 38, p. 77-91, 2012.

LEE, C.; YANG, H. A context-awareness system that uses a thermographic camera to monitor energy waste in buildings. **Energy and Buildings**, v. 135, p. 148-155, 2017.

LEITE, H. A. L. **Alvenaria estrutural em situação de incêndio – proposta de avaliação com vistas à normalização**. 2018. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2018.

LEITE, H. A. L.; MORENO JÚNIOR, A. L.; TORRES, D. L. Dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio: contribuição à futura normatização nacional. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 89-107, 2016.

LEWIS, C. Are house fires changing? – Chris Lewis questions whether domestic house fires are becoming faster and more ferocious. **The Australian Journal of Emergency Management**, n. 23 (1), p.44-48, 2008.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2005.

LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF, L. D.; CASONATO, C. A.; SILVA FILHO, L. C. P. Efeito de altas temperaturas no concreto. In: Seminário de Patologia das Edificações, 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2004.

LIMA, R. C. A.; RIGÃO, A. O.; MOHAMAD, G.; KIRCHHOF, L. D.; SANTOS NETO, A. B. S. Assess of hollow clay block masonry wallets under high temperature. **Revista Matéria**, v.2, n.3, p. e-12191, 2018.

MANICA, G. C.; HENNEMANN, G. G.; GIL, A. M.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. Avaliação experimental da influência da espessura do revestimento argamassado em paredes de alvenaria estrutural em situação de incêndio. **X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas** (2018 XCBPE). Anais... Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

MANZELLO, S. L.; GANN, R. G.; KUKUCK, S. R.; PRASAD, K. JONES, W. W. Real fire performance of partition assemblies. Real fire performance of partition assemblies. **Fire and Materials**, v. 29, n. 6, p. 351–366, 2005.

MARAVEAS, C.; VRAKAS, A. A. Design of Concrete Tunnel Linings for Fire Safety. **Structural Engineering International**, v. 24, n. 3, p. 319–329, 2014.

MARCOLAN JÚNIOR, A. C.; MORAES, P. D. Reliability on timber columns under fire situation. **Fire Research**, v. 2, p. 52, 2018.

McGUIRE, J. H. A full-scale fire test of a wall penetrated by plumbing facilities. **Building Research Note**, 97, p. 7, 1974.

McGUIRE, J. H. Penetration of fire partitions by plastic DWV pipe. **Fire Technology**, v.9(1), p. 5-14, 1973.

MOREIRA, M. A. B. **Estudo da influência do teor de umidade na resistência ao fogo de placas maciças pré-fabricadas de concreto**. 2017. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 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 5628:2001. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 4, p. 37-53, 2012.

MRÓZ, K.; HAGER, I.; KORNIEJENKO, K. Material solutions for passive fire protection of buildings and structures and their performances testing. **Procedia Engineering**, v. 151, p. 284-291, 2016.

NADJAI, A. et al. Compartment masonry walls in fire situations. **Fire technology**, v. 42, p. 211-231, 2006.

NAHHAS, F. AL et al. Resistance to fire of walls constituted by hollow blocks: experiments and thermal modeling. **Applied thermal engineering**, 2007. v. 27, n. 1, p. 258–267.

NASSIF, A. Y.; YOSHITAKE, I.; ALLAM, A. Full-scale fire testing and numerical modelling of the transient thermo-mechanical behaviour of steel-stud gypsum board partition walls. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 51–61, 2014.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). **221**: Standard for High Challenge Fire Walls, Fire Walls, and Fire Barrier Walls, 2017.

NGUYEN, T. D.; MEFTAH, F.; CHAMMAS, R.; MEBARKI, A. The behaviour of masonry walls subjected to fire: Modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks. **Fire Safety Journal**, v.44, n.4, p.629-641, 2009.

NGUYEN, T.-D. **Etude du comportement au feu des maçonneries de briques en terre-cuite: approche expérimentale et modélisation du risque d'écaillage**. 2009. 115f. Tese (Doutorado) - Université Paris-Est, French, 2009.

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

NGUYEN, T.-D.; MEFTAH, F. Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire. Part 2: 3D finite element modeling and spalling assessment. **Fire Safety Journal**, v. 66, p. 35–45, 2014.

OLIVEIRA, L. K.; GRAEFF, A. G.; RODRIGUES, E. E. C.; SILVA FILHO, L. C. P. Estudo experimental sobre o comportamento da resistência mecânica de amostras de madeira sob ação de fogo simulando incêndios residenciais. **Revista Alconpat**, v. 3, p. 53–68, 2013.

ONO, R. Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos. **Ambiente Construído**, n. 1, p. 97–113, 2007.

OUTRAM, I.; JONES, S.; TAYLOR, A.; GEYER, W.; KOMMA, M.; PRONOLD, M. **Fire-stopping product**. World Intellectual Property Organization Patent WO 2017/194558 A2. Nov. 16. 2017.

PARKER, J.; SHARRATT, M.; RICHMOND, J. The Shard, London, UK: response of arches to ground movements. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering**, v. 165, n. 3, p. 185–194, 2012.

PIERIN, I.; SILVA, V. P. Fire design of composite ribbed slabs. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.7, n.2, p.178-207, 2014.

POPE, H.; ZALOK, E. Issues with masonry and fire: spalling and thermal bowing. **13th Canadian Masonry Symposium (13th CMS)**. Anais... Halifax, Canada, 2017.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**. 1^aed., p.1-14, 2013.

PRÉTREL, H. et al. Experimental study based on large-scale smoke propagation fire tests through a horizontal opening connecting two mechanically ventilated compartments. **Fire Safety Journal**, v. 90, p. 28–43, 2017.

PURKISS, J.; LI, L. Y. **Fire Safety Engineering Design of Structures**. Boca Raton: CRC Press. BUCHANAN, A. H.; ABU, A. K. Structural design for fire safety. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 3^aed., 454p., 2014.

PURSER, D. A. Combustion toxicity. **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**, 5 ed., Springer, New York, NY, capítulo 62, p. 2207–2307 2016,

PURSER, D. A.; McALLISTER, J., L. **Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat**. **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**. Springer, 5 ed., Springer, New York, NY, capítulo 63, p. 2308–2428, 2016.

QI, D. et al. Dimensionless analytical solutions for steady-state fire smoke spread through high-rise shaft. **Fire Safety Journal**, v. 93, p. 12–20, 2017.

QUINTIERE, J. G. **Principles of fire behavior**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, CRC Press, 2^aed., 437p., 2017.

RIO GRANDE DO SUL. Corpo de Bombeiros. Polícia Militar. Secretaria da Segurança Pública. **Resolução Técnica de Transição**. Porto Alegre, 2017.

RIO GRANDE DO SUL. Corpo de Bombeiros. Polícia Militar. Secretaria da Segurança Pública. **Resolução Técnica nº 02**: terminologia aplicada a segurança contra incêndio. Porto Alegre, 2014.

RIO GRANDE DO SUL. Corpo de Bombeiros. Polícia Militar. Secretaria da Segurança Pública. **Resolução Técnica nº 05**: processo de segurança contra incêndio: plano simplificado de prevenção e proteção contra incêndio - PSPCI. Porto Alegre, 2016.

RIO GRANDE DO SUL. **Decreto nº 53.280, de 01 de novembro de 2016**. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei complementar nº 14376, de 26 de dezembro de 2013**. Estabelece normas sobre Segurança, Prevenção e Proteção contra Incêndios nas edificações e áreas de risco. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ROCHA, F. M; RODRIGUES, J. P. C.; MUNAIAR NETO, J. Fire behavior of steel and partially encased composite columns embedded on walls. **Journal of Construction Steel Research**, v.149, p. 105-118, 2018.

RODRIGUES, E. E. C. **Sistema de Gestão da Segurança contra Incêndio e Pânico nas Edificações: Fundamentação para uma Regulamentação Nacional**. 2016. 336f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2016.

RODRIGUES, E. E. C.; RODRIGUES, J. P. C.; DA SILVA FILHO, L. C. P. Comparative study of building fire safety regulations in different Brazilian states. **Journal of Building Engineering**, v. 10, p. 102–108, 2017.

ROSEMANN, F. **Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos pelo critério de isolamento térmico**. 2011. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2011.

RUSSO, S.; SCIARRETTA, F. Experimental and theoretical investigation on masonry after high temperature exposure. **Experimental mechanics**, v.52, n.4, p.341-359, 2012.

RUSSO, S.; SCIARRETTA, F. Masonry exposed to high temperatures: Mechanical behaviour and Properties – An overview. **Fire Safety Journal**, v. 55, p. 69-86, 2013.

SÃO PAULO. Corpo de Bombeiros. Polícia Militar. Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública. **Instrução Técnica nº 08**: segurança estrutural contra incêndio. São Paulo, 2018a.

SÃO PAULO. Corpo de Bombeiros. Polícia Militar. Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública. **Instrução Técnica nº 09**: compartimentação horizontal e compartimentação vertical. São Paulo, 2018b.

SARACURA, R. G. M.; SANTOS, F. S.; RAZZINO, C. A.; LIBARDI, W.; TARPANI, J. R.; CANTO, R. B. Análise dos campos de deslocamento e de deformação pela técnica de correlação de imagens digitais em laminados compósitos sólidos ensaiados por compressão após impacto. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais - 20º CBECIMAT. **Anais..**, Joinville, 2012.

SCAGLIONE, A.; SOCCAL, C.; MAZZUCATO, A.; RUCCI, R.; PRYSMIAN, S.P.A. **Electrical cable resistant to fire, water and mechanical stresses**. United States Patent US 2014/0008098 A1. Jan. 9. 2014.

SCHAFER, M. **Análise da influência de elevadas temperaturas em revestimento de argamassa**. 2015. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2015.

SCHROLL, R. C. **Industrial fire protection handbook**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, CRC Press, 2ªed., 252p., 2016.

SEITO, A. I. et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto, 496p., 2008.

SILVA, V. P. Concrete beams fire design: enhancement of some recommendations of the Eurocode. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.4, n.2, p.277-303, 2011.

SILVA, V. P. Fire design of reinforced concrete columns: an alternative to the tabular method presented by the Brazilian standard NBR 15200: 2004. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.1, n.4, p.379-392, 2008.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012**. São Paulo: Blucher, 238p., 2012.

SILVA, Valdir Pignatta. **Segurança contra Incêndios em edifícios: Considerações para o projeto de arquitetura**. 1. Ed. São Paulo: Blucher, v.1, 129p., 2014.

SINGH, S. K.; YADAV, M. K.; SONAWANE, R.; KHANDEKAR, S.; MURALIDHAR, K. Estimation of time-dependent wall heat flux from single thermocouple data. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 115, p. 1–15, 2017.

SOUZA, A. A. A. **Procedimento para verificação em laboratório da tendência ao deslocamento do concreto em situação de incêndio**. 2010. 377f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), São Paulo, 2010.

SOUZA, R. P. **Avaliação da influência da espessura do revestimento argamassado e do carregamento no comportamento de alvenaria frente a altas temperaturas**. 2017. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2017.

SPOHR, J. A. **Simulação computacional de paredes de alvenaria estrutural em situação de incêndio: estudo de caso**. 2016. 72 f. Projeto de Pesquisa do Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2016.

STAUFFER, E.; NICDAÉID, N. Chemistry of Fire. **Encyclopedia of Forensic Sciences**, p.161-166, 2013.

STEC, A. A. Fire toxicity - The elephant in the room? **Fire Safety Journal**, 2017.

SULTAN, Mohamed A. Comparison of gypsum board fall-off in wall and floor assemblies exposed to furnace heat. In: 12th Int. Conf. on Fire Science and Engineering. **Proceedings...** 2010.

SULTAN, Mohamed A.; KODUR, Venkatesh R. Light-weight frame wall assemblies: parameters for consideration in fire resistance performance-based design. **Fire Technology**, v.36, n.2, p.75-88, 2000.

THOMAZ, E. Além de outras causas, largamente difundidas, trincas e fissuras em argamassas de revestimento podem ocorrer devido ao processo natural de envelhecimento do material, além, naturalmente, da sua falta de conservação. **PINI WEB**. 2000. Disponível em: <<http://piniweb17.pini.com.br/construcao/noticias/alem->

de-outras-causas-largamente-difundidas-trincas-e-fissuras-em-83993-1.aspx>. Acesso em: 03 nov. 2018.

TORERO, J. L.; MAJDALANI, A. H.; ABECASSIS-EMPIS, C.; COWLARD, A. Revisiting the Compartment Fire. **Fire Safety Science-Proceedings of the Eleventh International Symposium**, p. 28-45, 2014.

TORRES, D. R.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G. Influência da variação da velocidade de rotação e do tipo de cimento nas propriedades de argamassas de revestimento nos estados fresco e endurecido. **Cerâmica**, v. 63, p.508-516, 2017.

VENEZIA, A. P. G.; ONO, R. Parâmetros para qualidade do projeto sob o aspecto da segurança contra incêndio. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Proceedings...** 2014. p.2061-2070.

VIEGAS, J. C. Saltwater experiments with air curtains for smoke control in the event of fire. **Journal of Building Engineering**, v.8, p.243-248, 2016.

WASHINGTON STATE BUILDING CODE. **Uniform plumbing Code**: 2015. Olympia, July 2016.

WILKES, C. E. et al. **PVC Handbook**. Hanser, 723p., 2005.

WORLD FIRE STATISTICS (WFSC). **Bulletin nº. 28**. The Geneva Association, Geneva, 2012.

WORLD FIRE STATISTICS (WFSC). **Bulletin nº. 29**. The Geneva Association, Geneva, 2014.

YU, M.; SUI, X.; PENG, X.; FANG, Z. Influence of moisture content on measurement accuracy of porous media thermal conductivity. **Heat Transfer – Asian Research**, v. 38, n. 8, p. 492-500, 2009.

ZAGO, C. S.; MORENO JUNIOR, A. L.; MARIN, M. C. Considerações sobre o desempenho de estruturas de concreto pré-moldado em situação de incêndio. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 1, p. 49-61, 2015.

ZHANG, X.; MEHAFFEY, J.; HADJISOPHOCLEOUS, G. Life risks due to fire in mid- and high-rise, combustible and noncombustible residential buildings. **Journal of Building Engineering**, 2016.

ZICHERMAN, J. B. Performance of plastic plumbing and electrical products in fire resistive assemblies. **Fire Hazard and Fire Risk Assessment**, ASTM STP 1150, Marcelo M. Hirshchler, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 66- 83, 1992.

APÊNDICE A – PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES COM INSTALAÇÕES PREDIAIS

Os requisitos básicos que as paredes com função corta-fogo devem atender incluem: estanqueidade a passagem de chamas e gases quentes, estabilidade e isolamento térmico.

Objetivo

Este apêndice tem por objetivo apresentar o procedimento para realização do ensaio de resistência ao fogo de paredes de compartimentação sem função estrutural, com aberturas e instalações prediais no interior e/ou penetrações.

Equipamentos

- a) forno vertical;
- b) termopares;
- c) câmera termográfica;
- d) estação total.

Corpo de prova

A amostra de parede deve ser construída com dimensões representativas de uma situação de uso e espessura idêntica à que será adotada no projeto.

Deve dispor de instalações prediais, tais como estão dispostas nas edificações em situação de uso. Paredes construídas em escala média, com dimensões de 2,4 m (altura) x 1,35 m (comprimento) e área de superfície de 3,2 m² devem dispor de apenas uma abertura ou penetração, que deve estar posicionada no centro da amostra.

Quando a amostra for construída em escala real, com dimensões de 3,0m (altura) x 3,0m (comprimento) e área de 9,0 m², admite-se até duas aberturas, no máximo, destinadas a instalações contidas no interior ou penetrações que atravessem o sistema. Para o caso de duas instalações na amostra, estas devem estar dispostas a uma distância de, pelo menos, 1,0 m entre si, sendo uma na

esquerda e outra na direita. No caso de apenas 1 instalação/penetração, a mesma deve estar posicionada, preferencialmente na região central da amostra.

As restrições sugeridas quanto a quantidade de aberturas para instalações/penetrações é devido à instabilidade que pode ocorrer no forno durante o ensaio, devido a fuga de temperatura através das aberturas/penetrações.

Condicionamento

A amostra deve permanecer em local seguro e protegido da ação de chuvas e do vento durante a confecção até a idade de ensaio.

Recomenda-se um tempo mínimo de cura de 90 dias quando a amostra de alvenaria possuir revestimento argamassado, visando reduzir a umidade presente na mistura.

Execução do ensaio

As condições ambientais, como temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do ar devem ser monitoradas e anotadas antes do início do ensaio de resistência ao fogo.

A temperatura que deve incidir na amostra no decorrer do ensaio de resistência ao fogo deve estar em conformidade com a curva padronizada ISO 834 (ISO, 1999).

Decorridos 10 minutos do início do ensaio, a pressão no interior do forno deve ser medida em intervalos de 5 minutos. O valor deve estar situado na faixa entre (10 ± 5) Pa.

Medição da estanqueidade

Para a verificação da estanqueidade, um chumaço de algodão deve ser posicionado a uma distância entre 1 a 3 cm da superfície não exposta da amostra pelo período de 10 segundos, nos locais com aberturas de fissuras/trincas e regiões de maiores temperaturas, indicadas pela imagem captada pela câmera termográfica.

Medições da estabilidade

Para a verificação da estabilidade, uma estação total deve ser posicionada a uma distância de aproximadamente 6,0 m da amostra para aferir a sua deformação horizontal. Os pontos de medição devem englobar toda a superfície não exposta da amostra.

Medições de temperatura

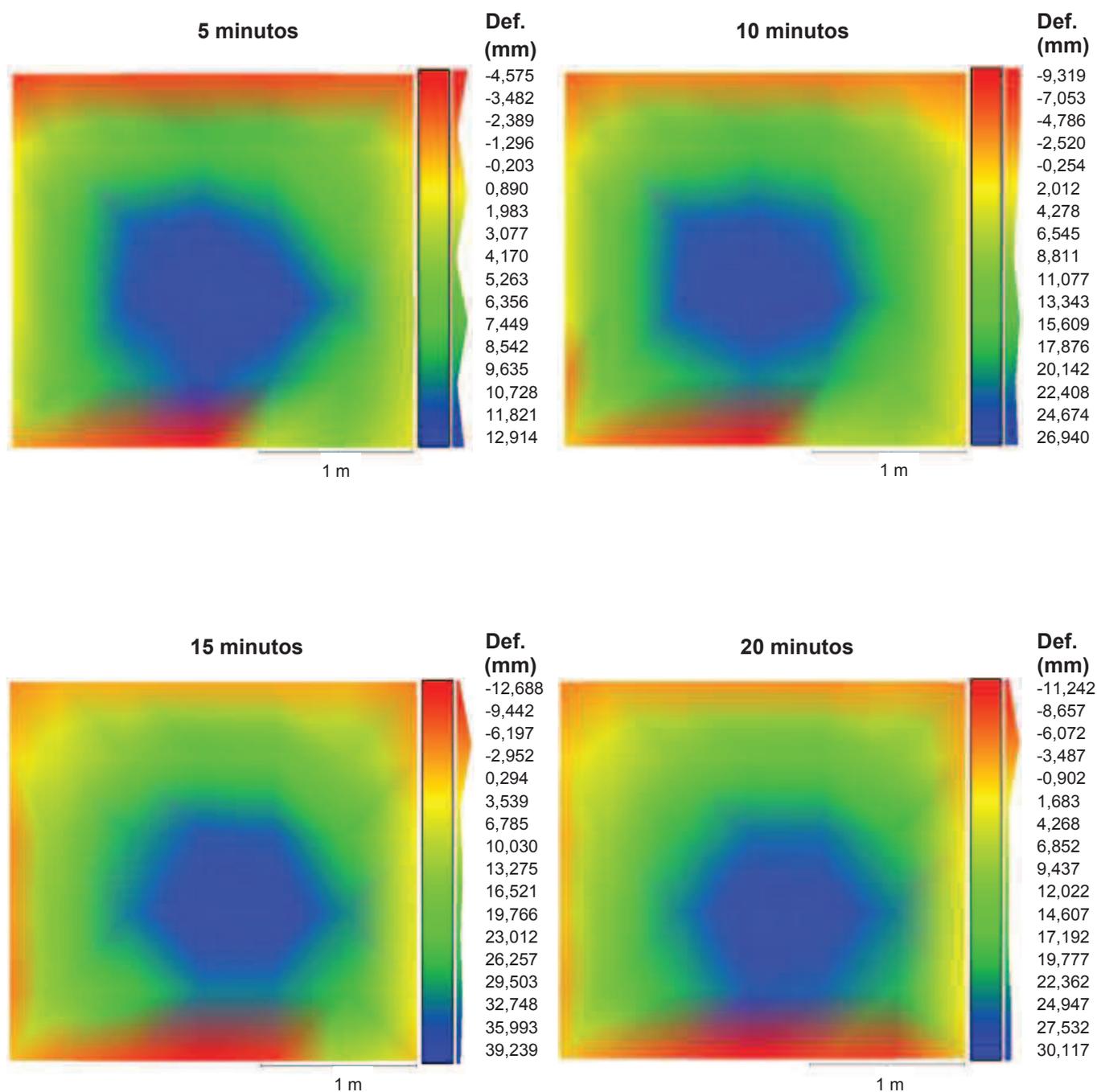
Devem ser posicionados, pelo menos 5 termopares na parte interior do forno para medição da temperatura na superfície exposta às altas temperaturas da amostra distribuídos simetricamente. Um dos termopares deve estar posicionado no centro geométrico da amostra. A amostra deve ser dividida em quatro quadrantes e, no centro geométrico de cada quadrante deve ser posicionado um termopar.

Na superfície não exposta, as medições da temperatura devem ser feitas com, no mínimo, 5 termopares dispostos simetricamente na mesma posição dos termopares da superfície exposta. Além disso, termopares adicionais devem ser posicionados na(s) prumada(s) com as instalações prediais (1 termopar em cada fiada) e no caso de penetrações, no entorno desta.

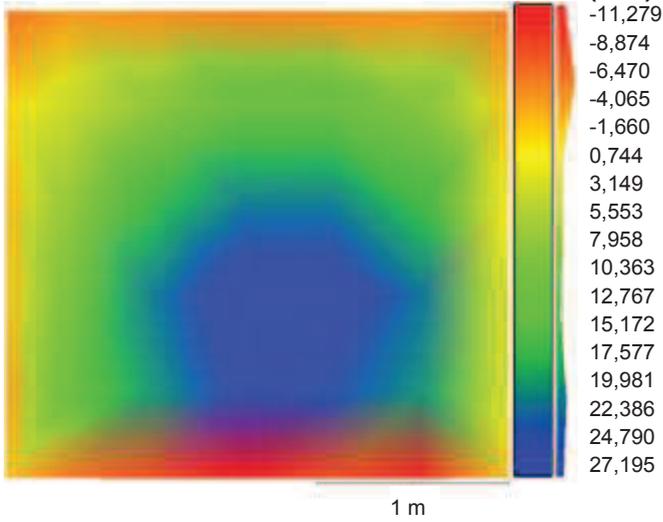
Ainda, também é recomendável fazer as medições do gradiente de temperatura. Para isso, devem ser posicionados termopares adicionais ao longo da espessura da parede.

APÊNDICE B – DEFORMAÇÃO LATERAL P-1

Partindo das medições realizadas com a estação total para verificação da deformação lateral no plano da amostra 1, a partir das nuvens de pontos geradas, foram modelados os perfis correspondentes a cada medição, com o auxílio do software CloudCompare.



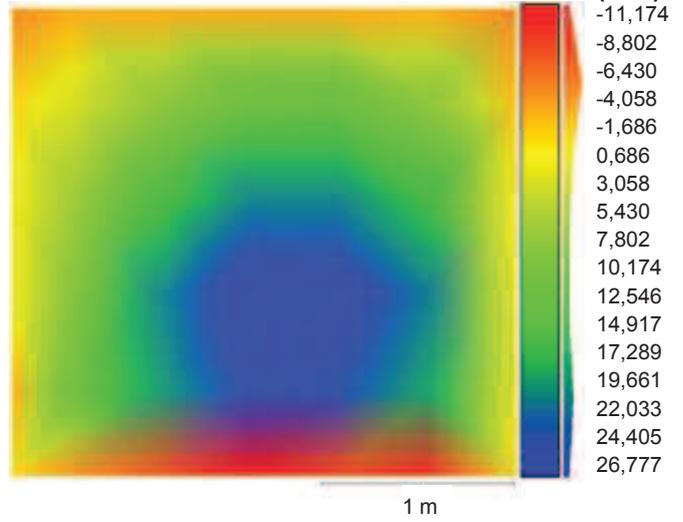
25 minutos



Def.
(mm)

- 11,279
- 8,874
- 6,470
- 4,065
- 1,660
- 0,744
- 3,149
- 5,553
- 7,958
- 10,363
- 12,767
- 15,172
- 17,577
- 19,981
- 22,386
- 24,790
- 27,195

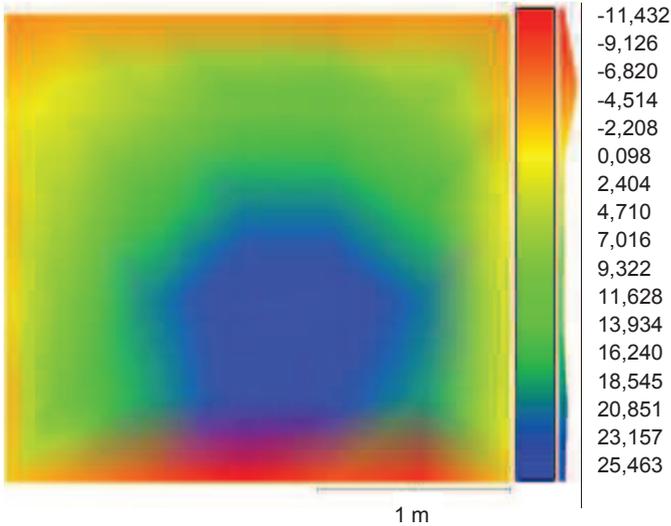
30 minutos



Def.
(mm)

- 11,174
- 8,802
- 6,430
- 4,058
- 1,686
- 0,686
- 3,058
- 5,430
- 7,802
- 10,174
- 12,546
- 14,917
- 17,289
- 19,661
- 22,033
- 24,405
- 26,777

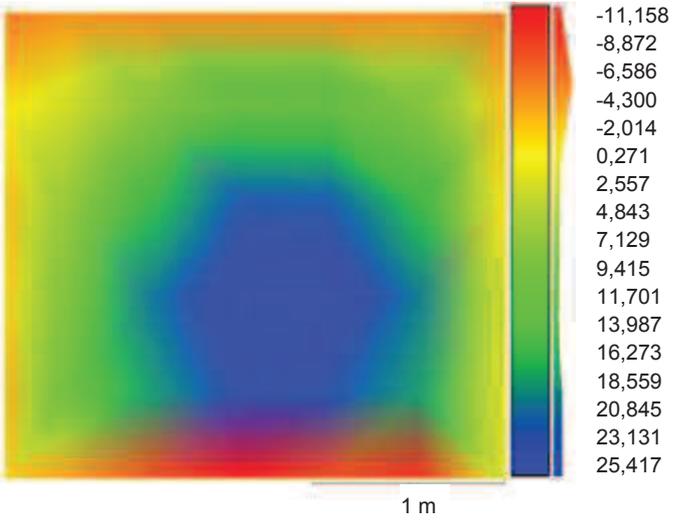
40 minutos



Def.
(mm)

- 11,432
- 9,126
- 6,820
- 4,514
- 2,208
- 0,098
- 2,404
- 4,710
- 7,016
- 9,322
- 11,628
- 13,934
- 16,240
- 18,545
- 20,851
- 23,157
- 25,463

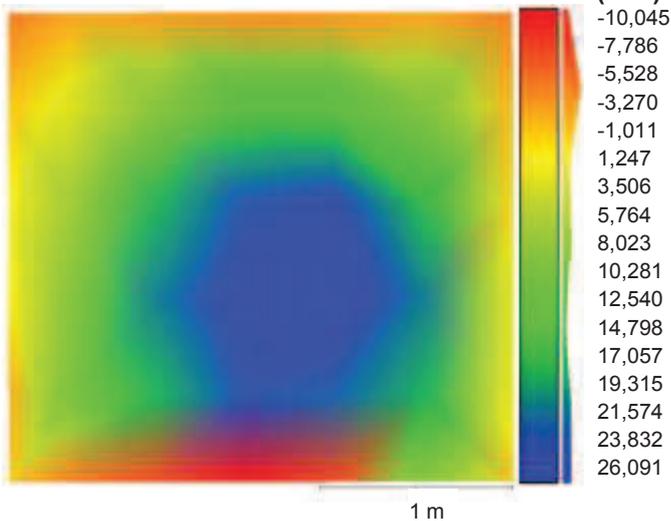
50 minutos



Def.
(mm)

- 11,158
- 8,872
- 6,586
- 4,300
- 2,014
- 0,271
- 2,557
- 4,843
- 7,129
- 9,415
- 11,701
- 13,987
- 16,273
- 18,559
- 20,845
- 23,131
- 25,417

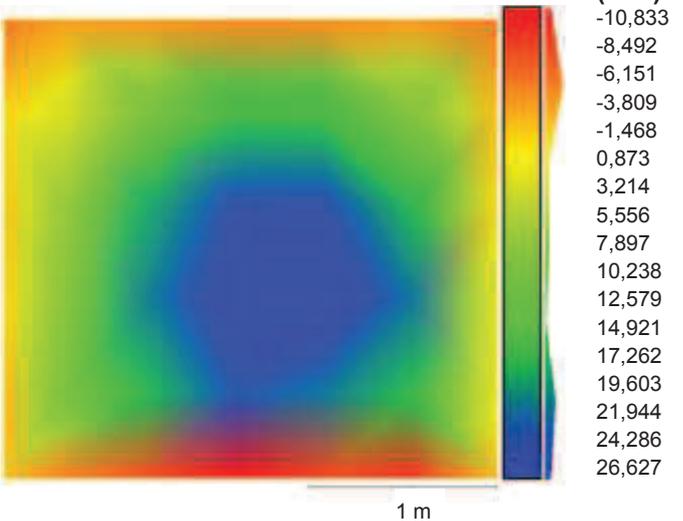
60 minutos



Def.
(mm)

- 10,045
- 7,786
- 5,528
- 3,270
- 1,011
- 1,247
- 3,506
- 5,764
- 8,023
- 10,281
- 12,540
- 14,798
- 17,057
- 19,315
- 21,574
- 23,832
- 26,091

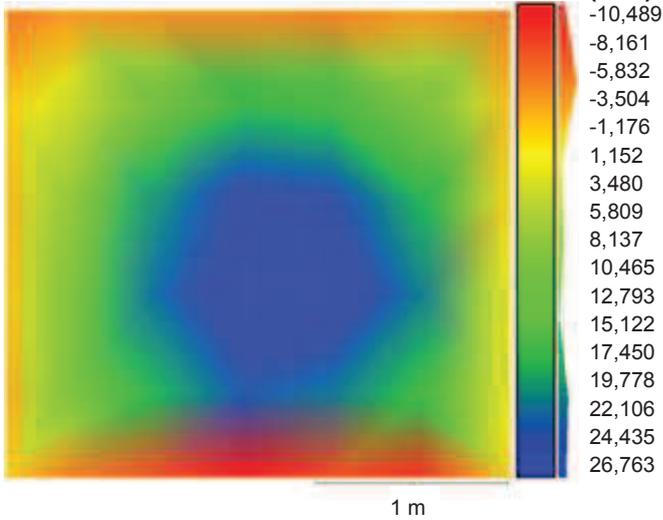
70 minutos



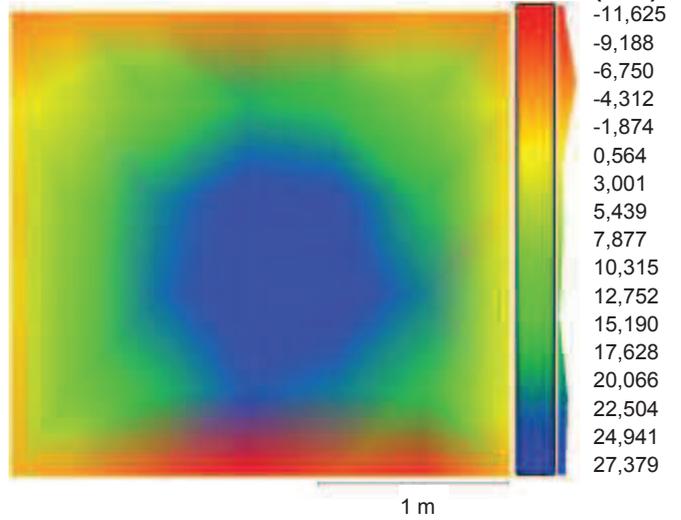
Def.
(mm)

- 10,833
- 8,492
- 6,151
- 3,809
- 1,468
- 0,873
- 3,214
- 5,556
- 7,897
- 10,238
- 12,579
- 14,921
- 17,262
- 19,603
- 21,944
- 24,286
- 26,627

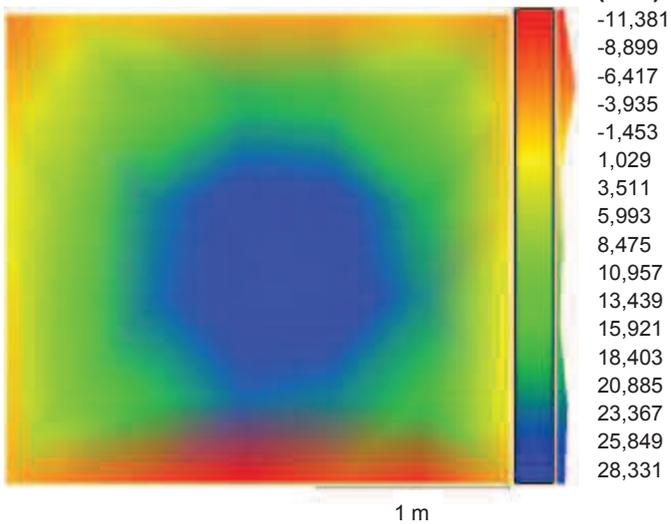
80 minutos



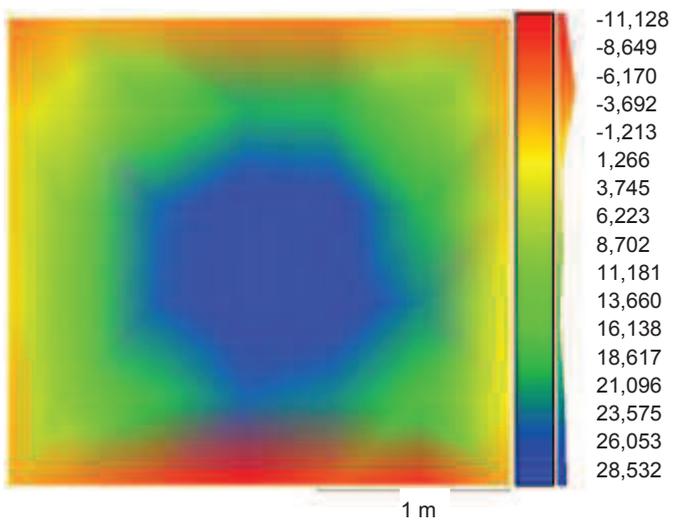
90 minutos



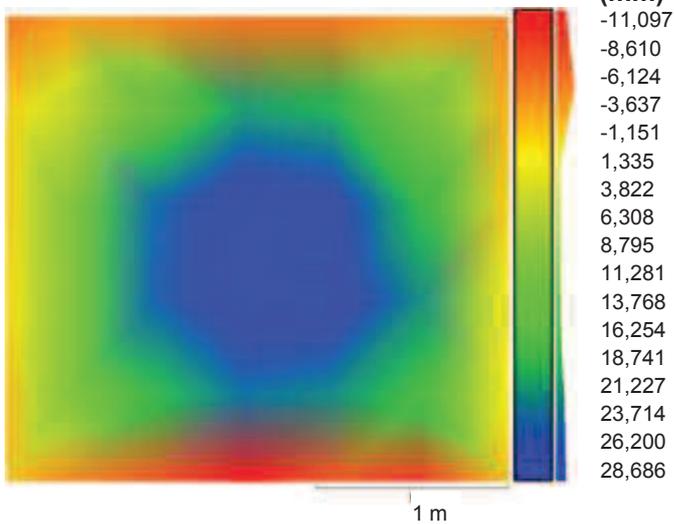
100 minutos



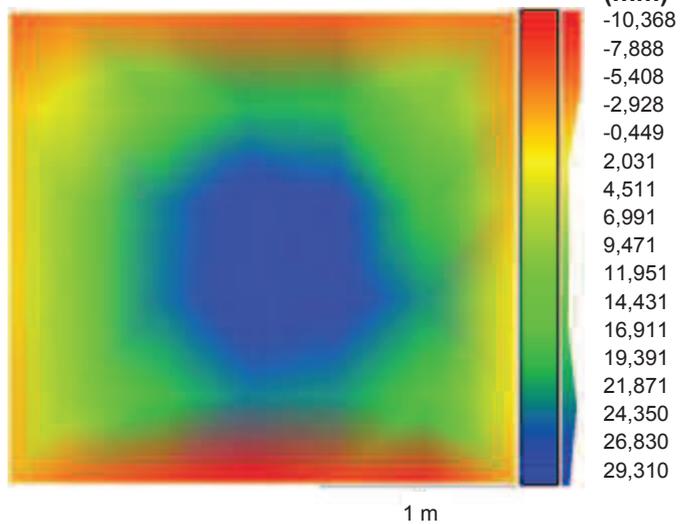
110 minutos

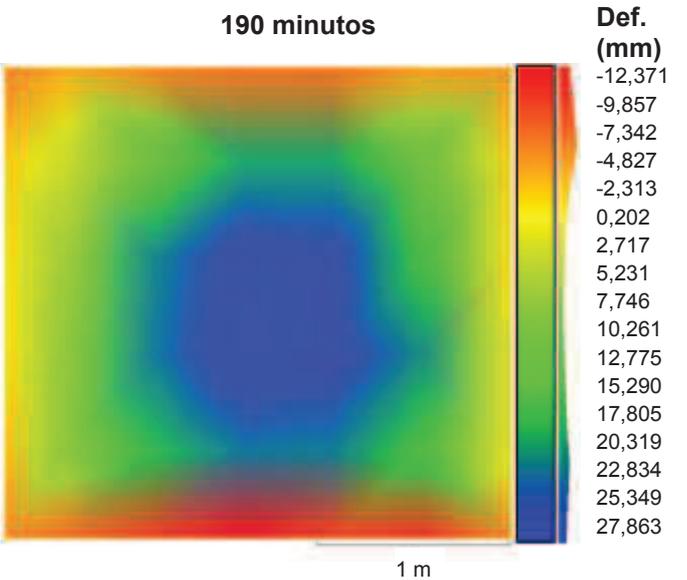
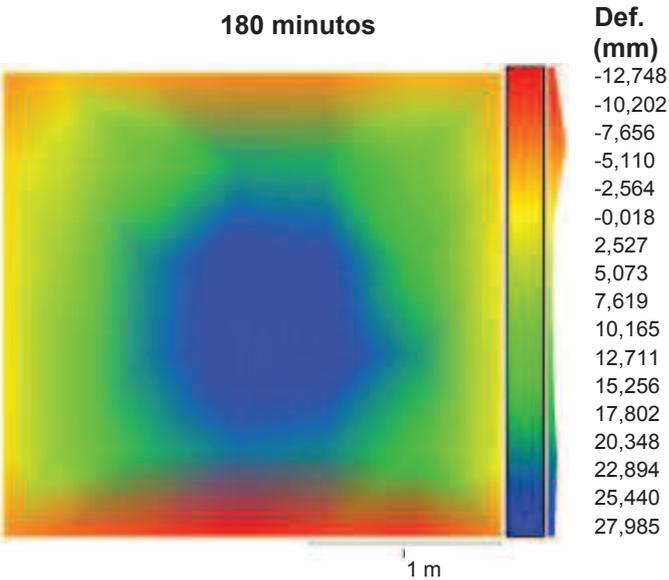
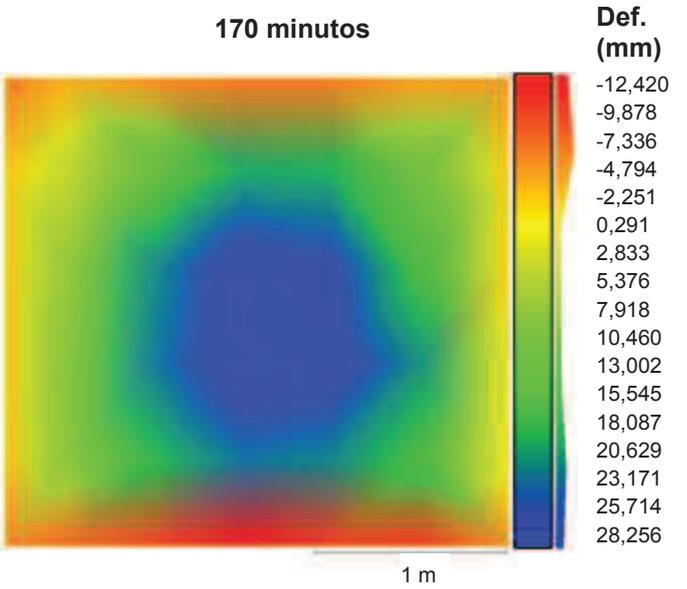
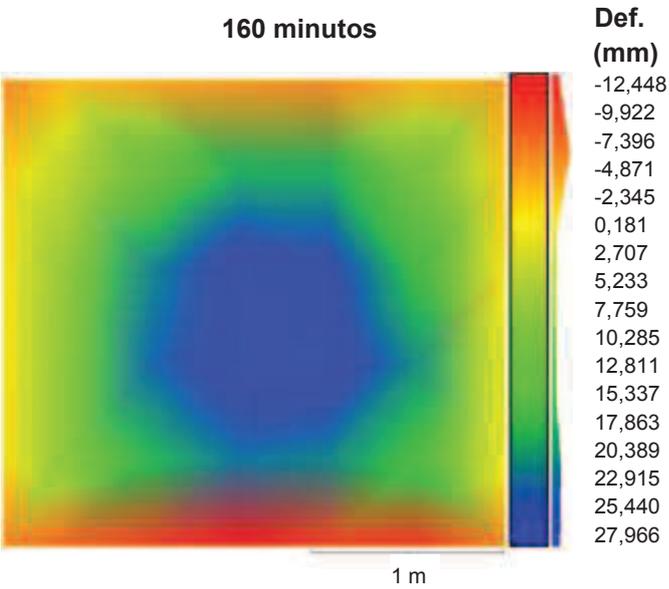
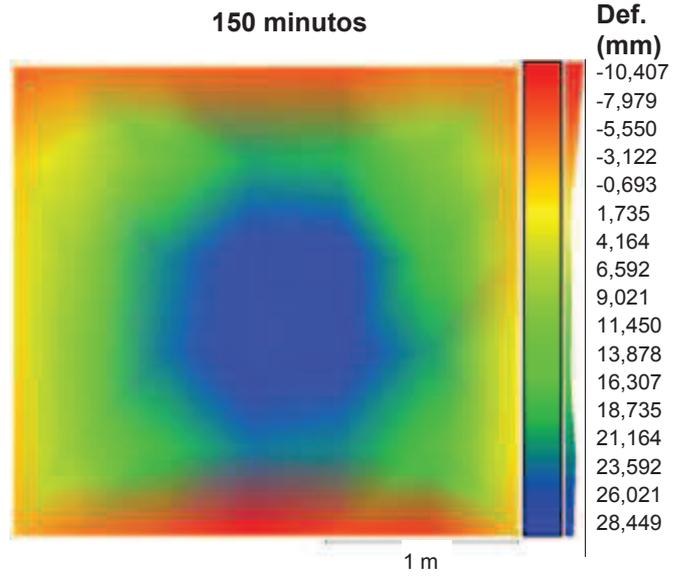
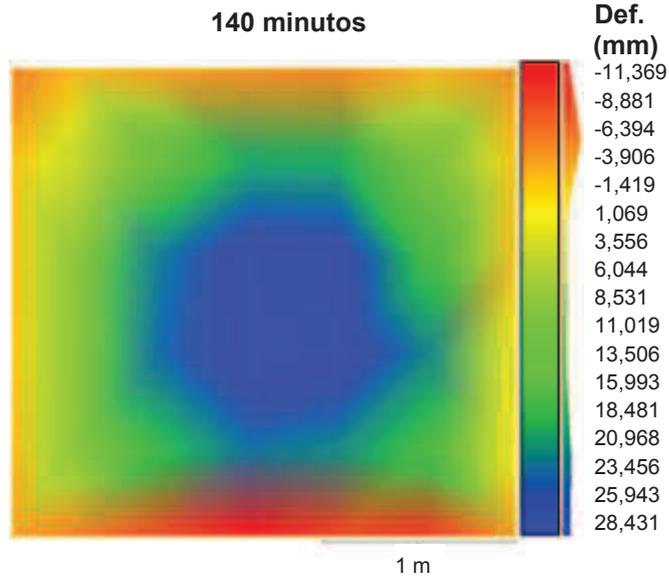


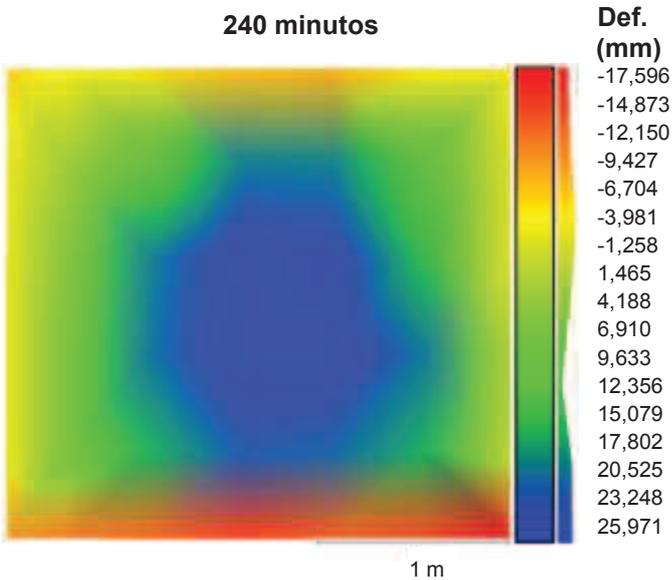
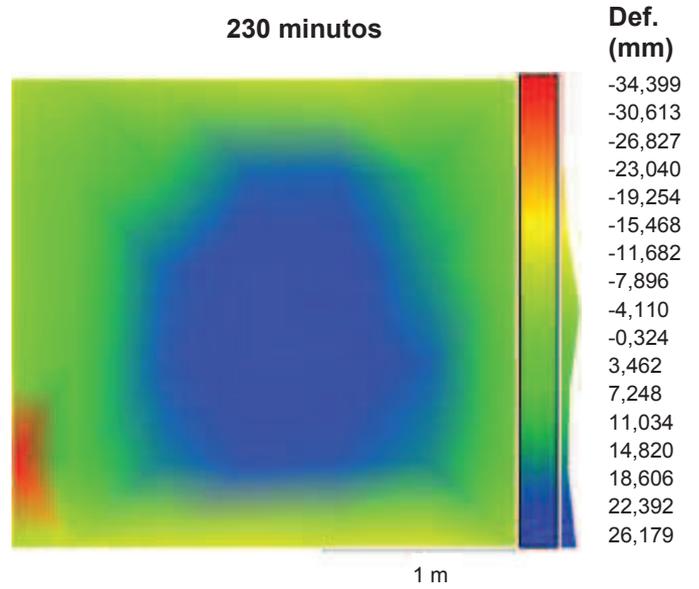
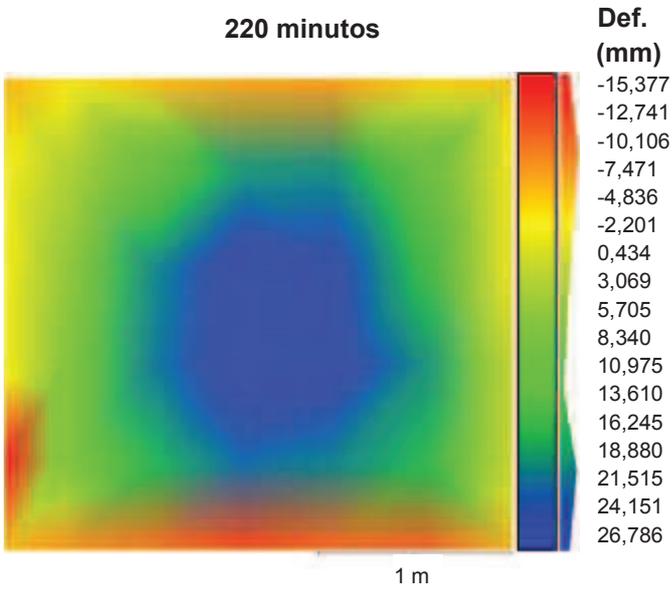
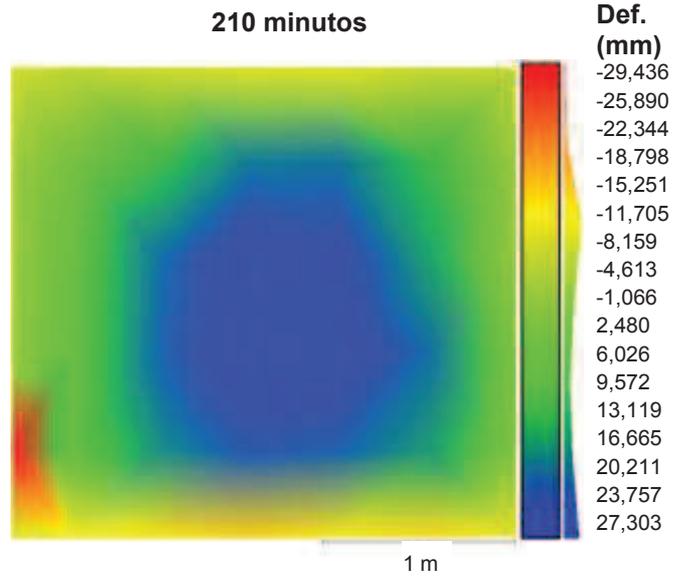
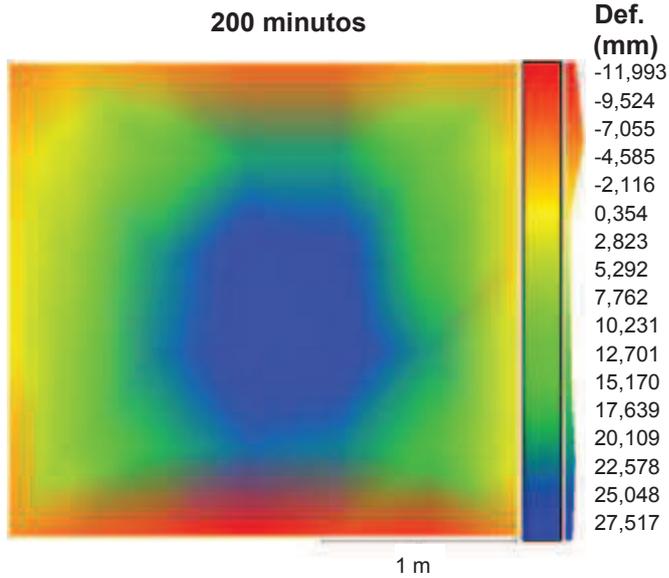
120 minutos



130 minutos

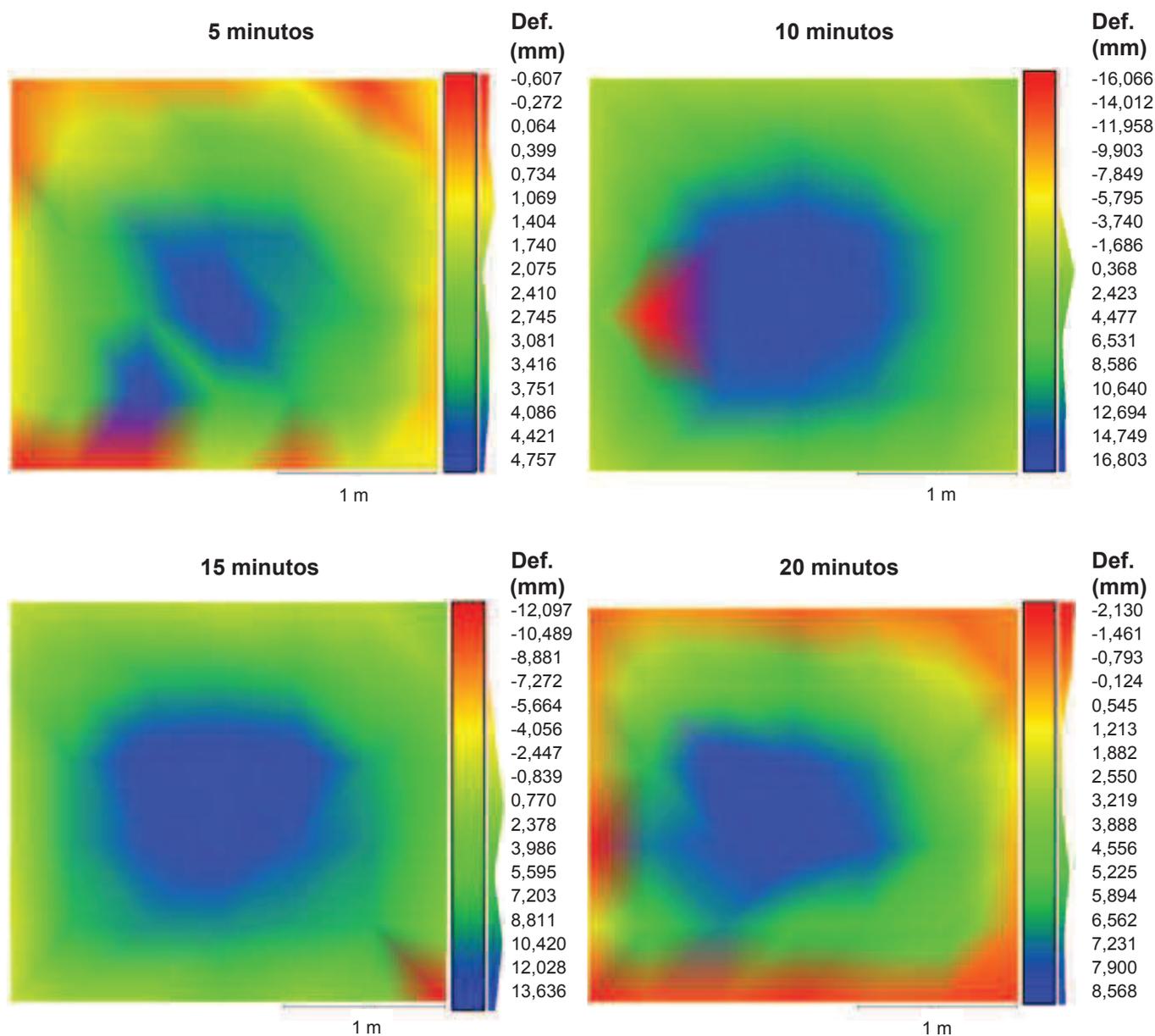




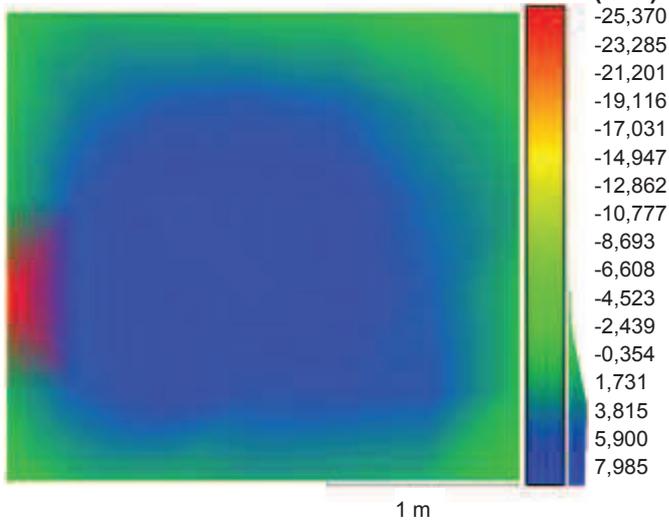


APÊNDICE C – DEFORMAÇÃO LATERAL P-2

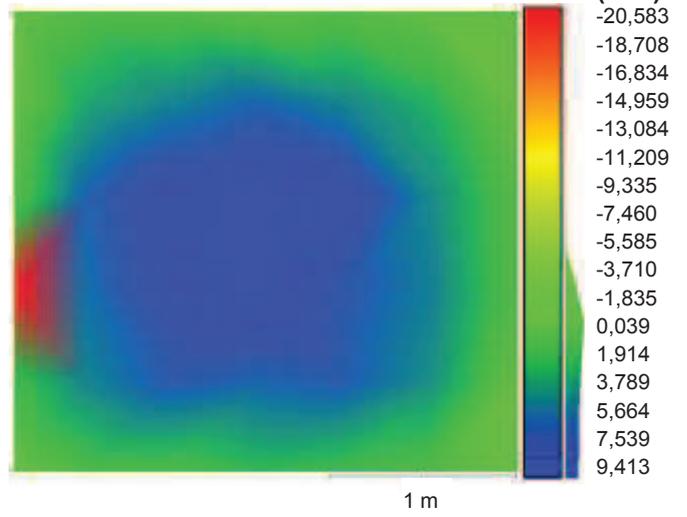
Partindo das medições realizadas com a estação total para verificação da deformação lateral no plano da amostra 2, foram modelados, com o auxílio do software CloudCompare, os perfis correspondentes a cada medição ao longo do tempo, mostrados a seguir.



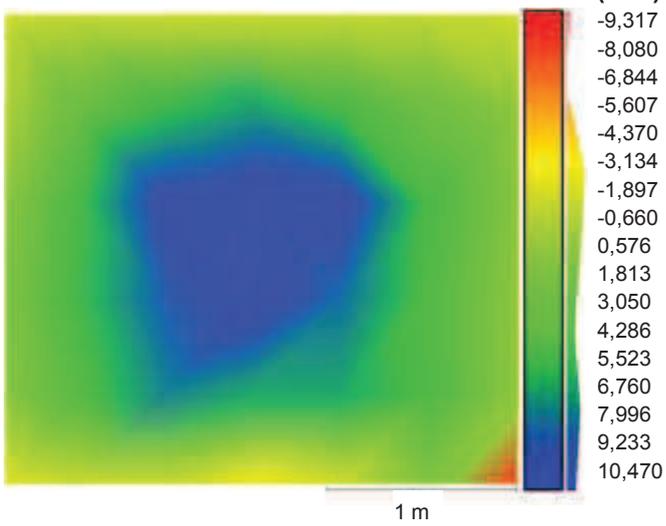
25 minutos



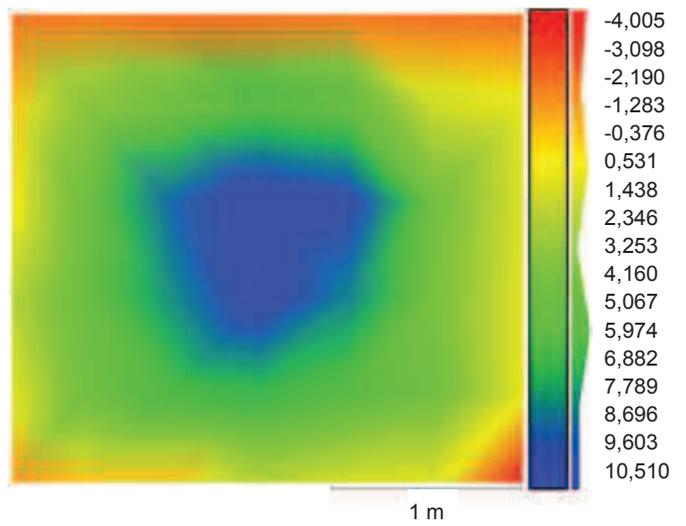
30 minutos



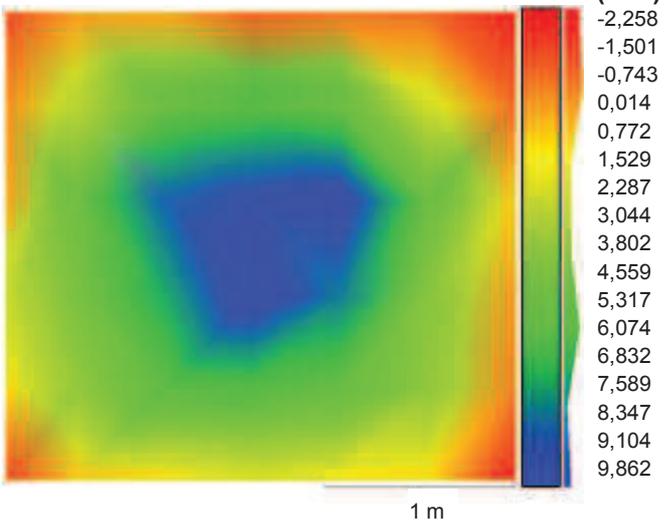
40 minutos



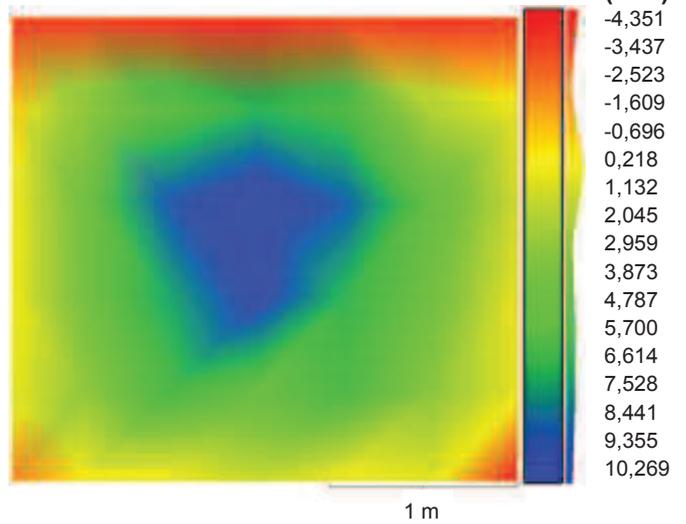
50 minutos



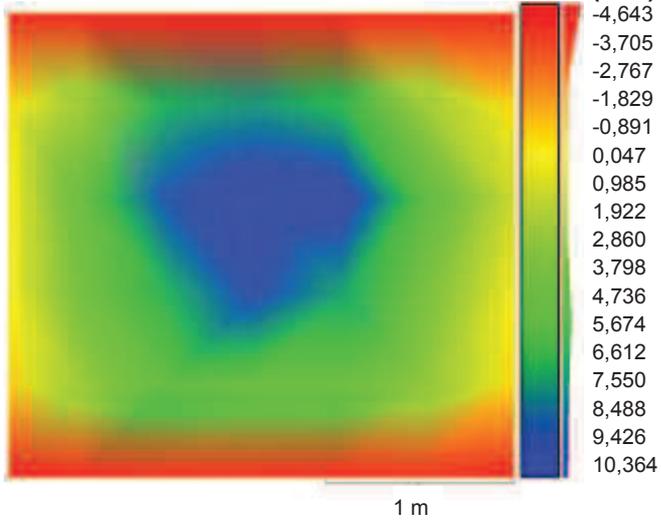
60 minutos



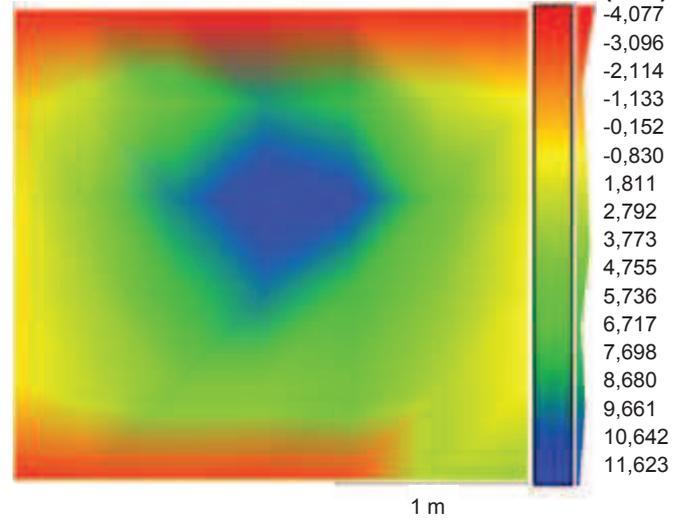
70 minutos



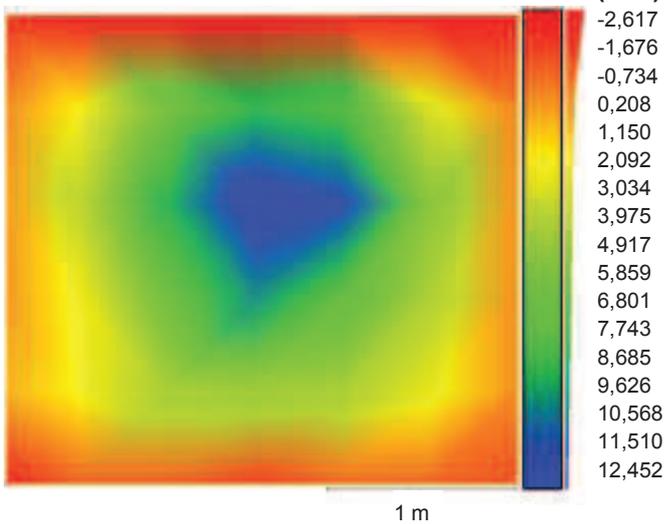
80 minutos



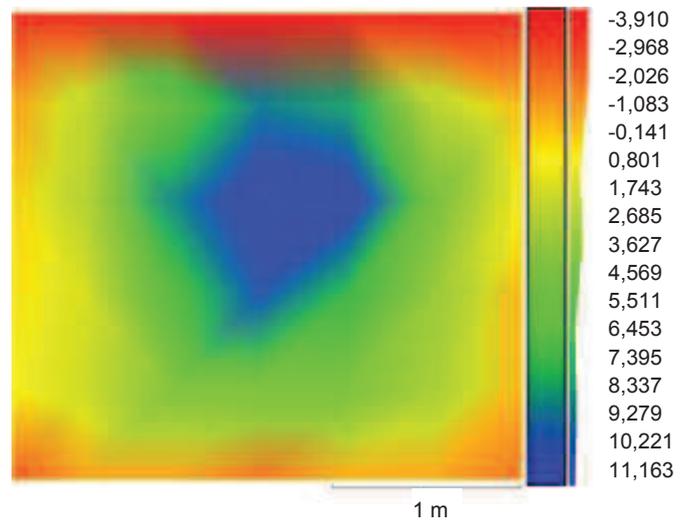
90 minutos



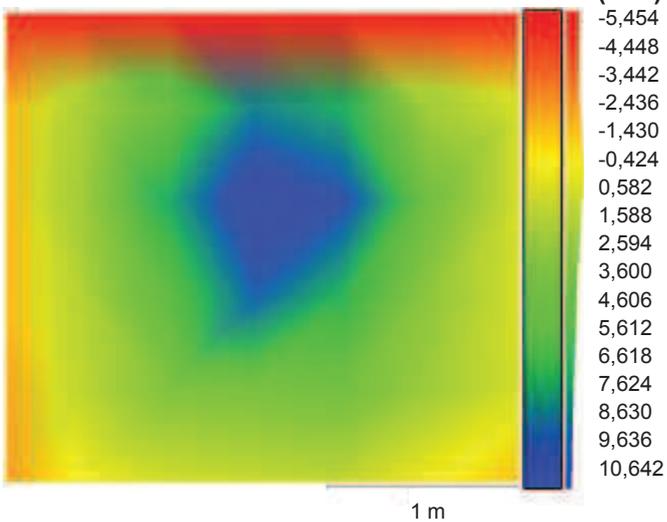
100 minutos



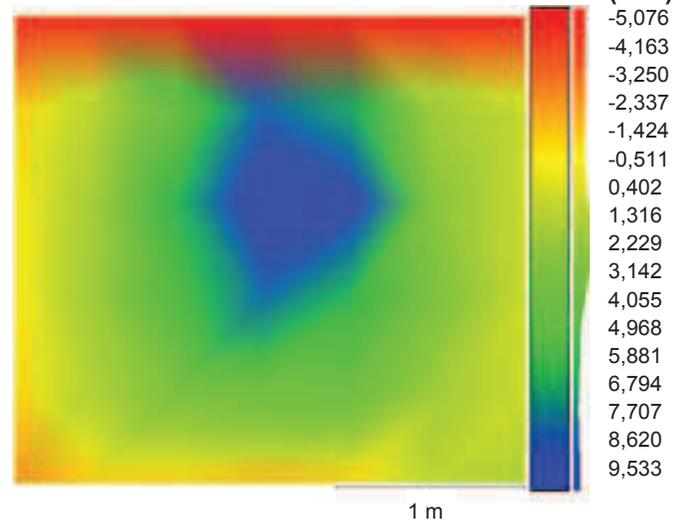
110 minutos

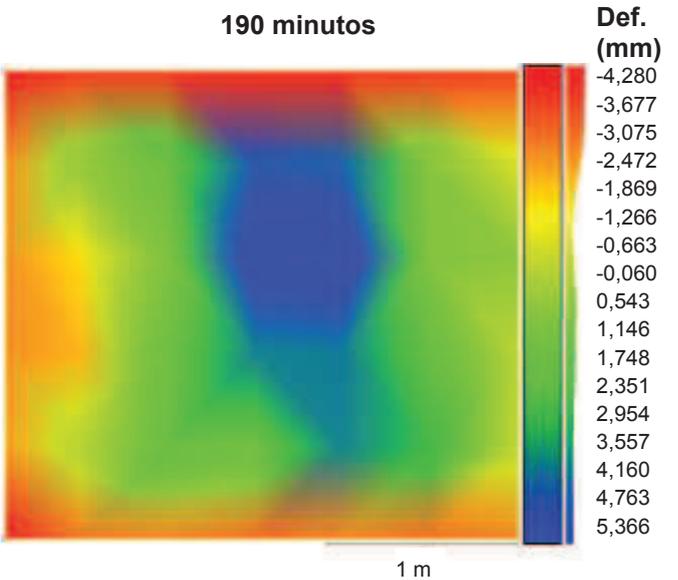
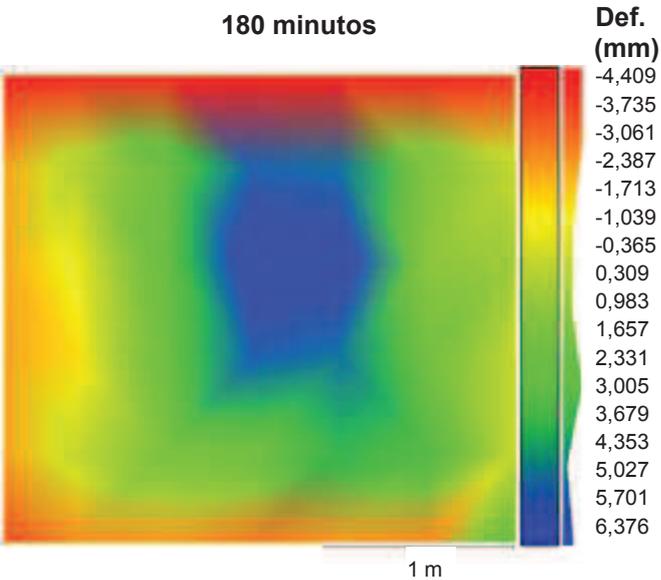
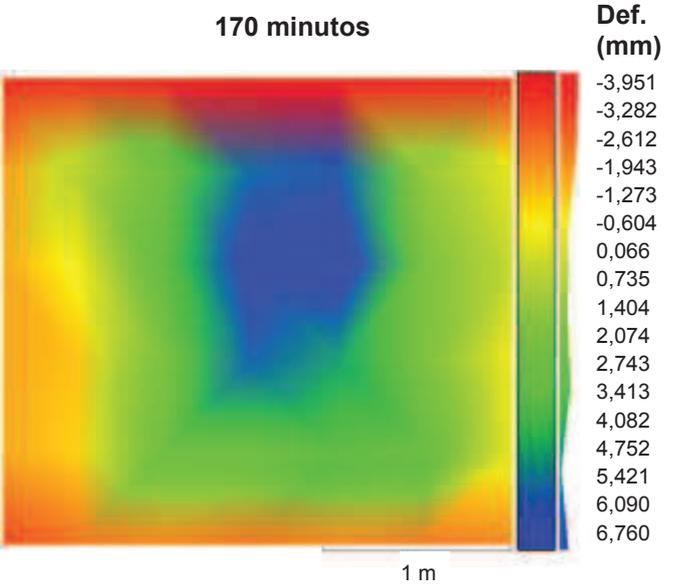
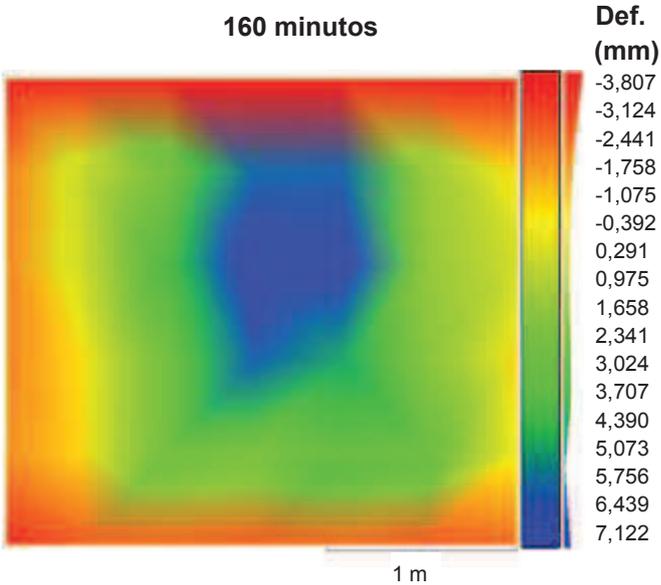
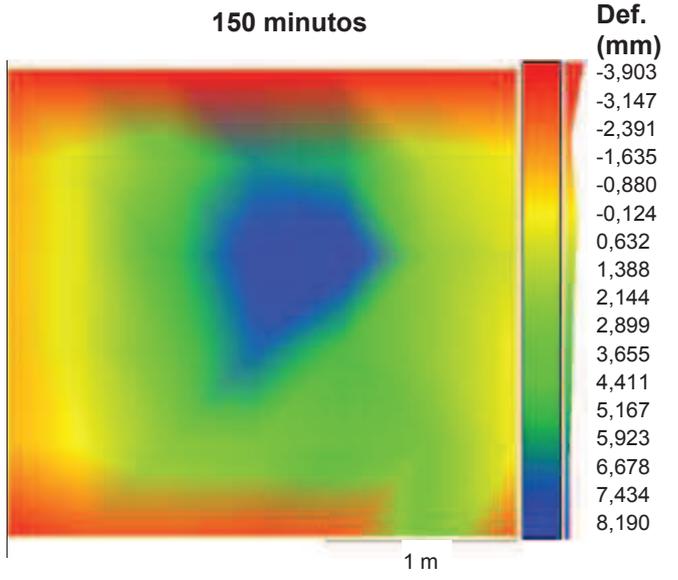
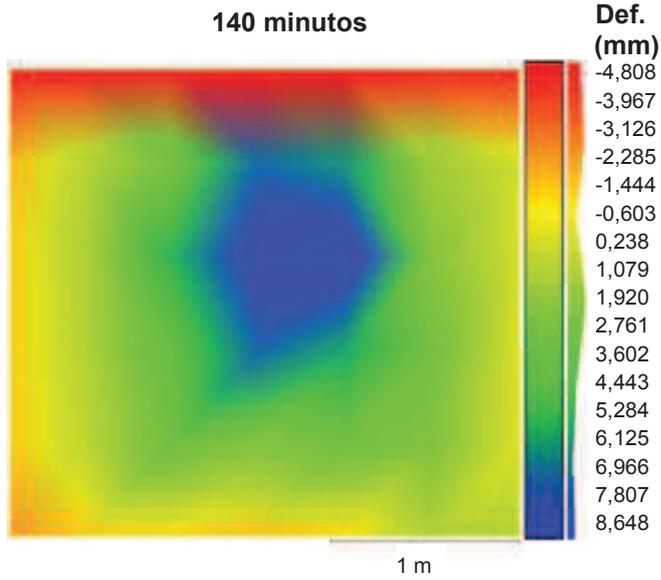


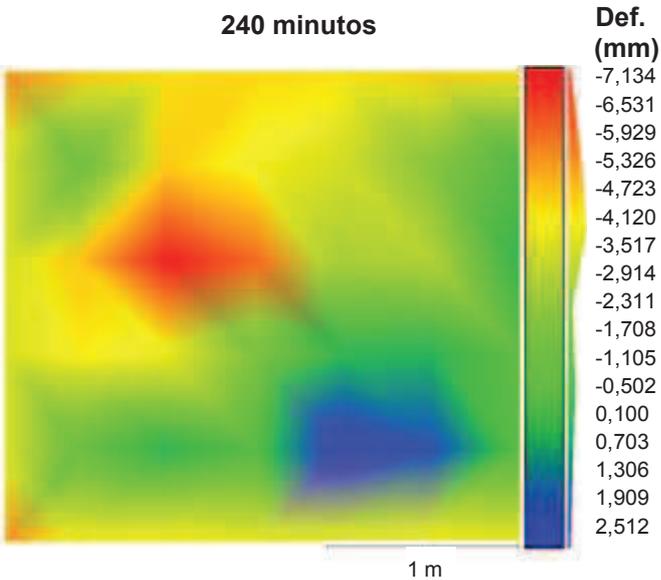
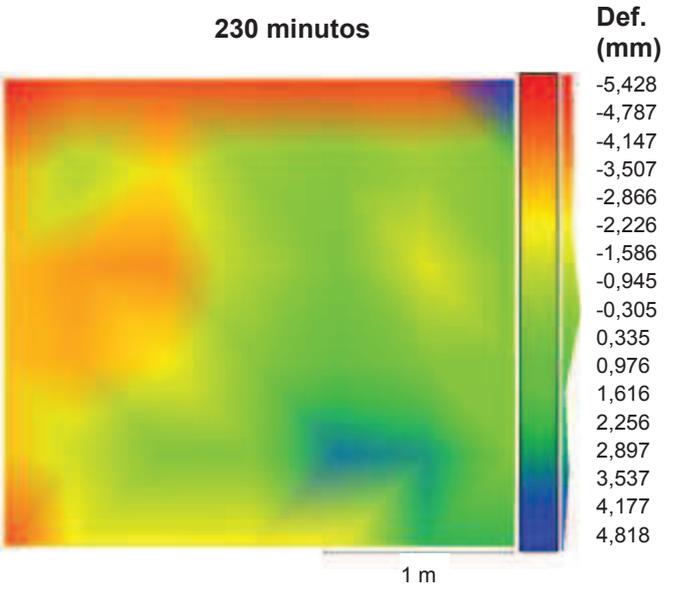
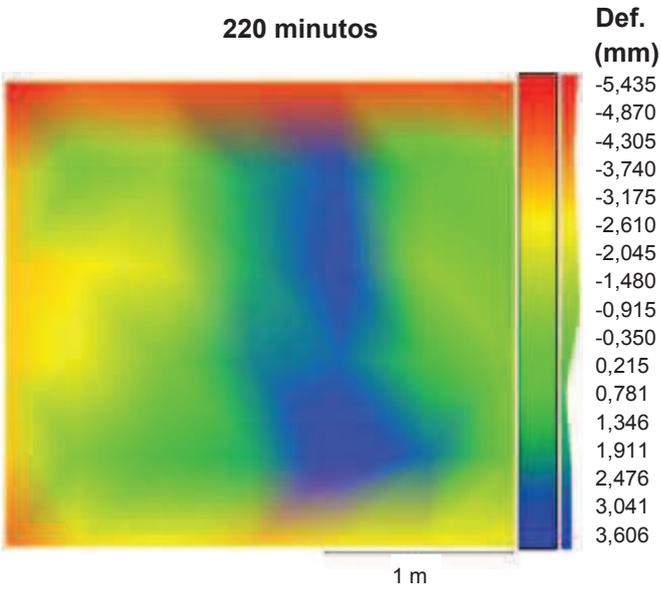
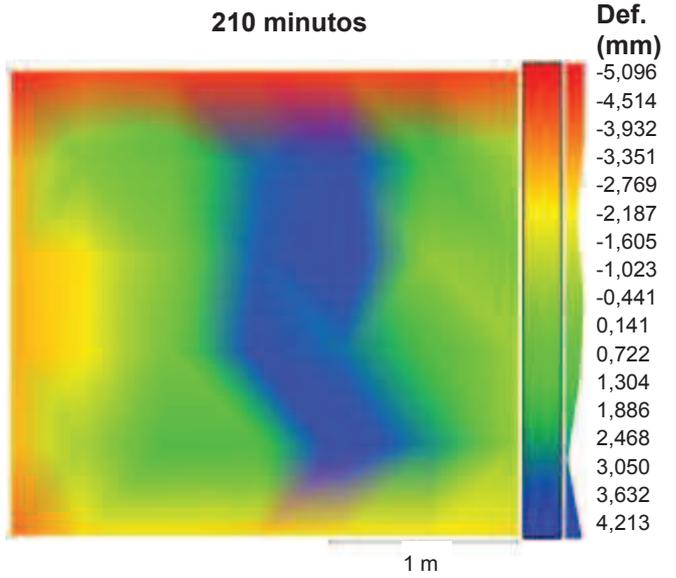
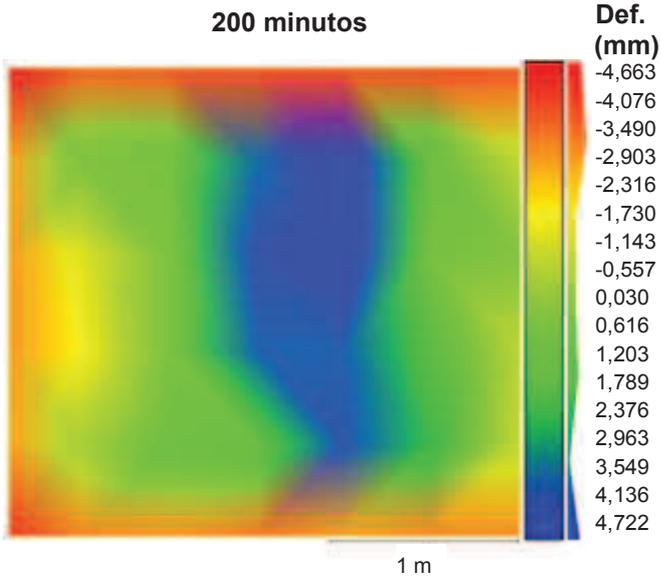
120 minutos



130 minutos

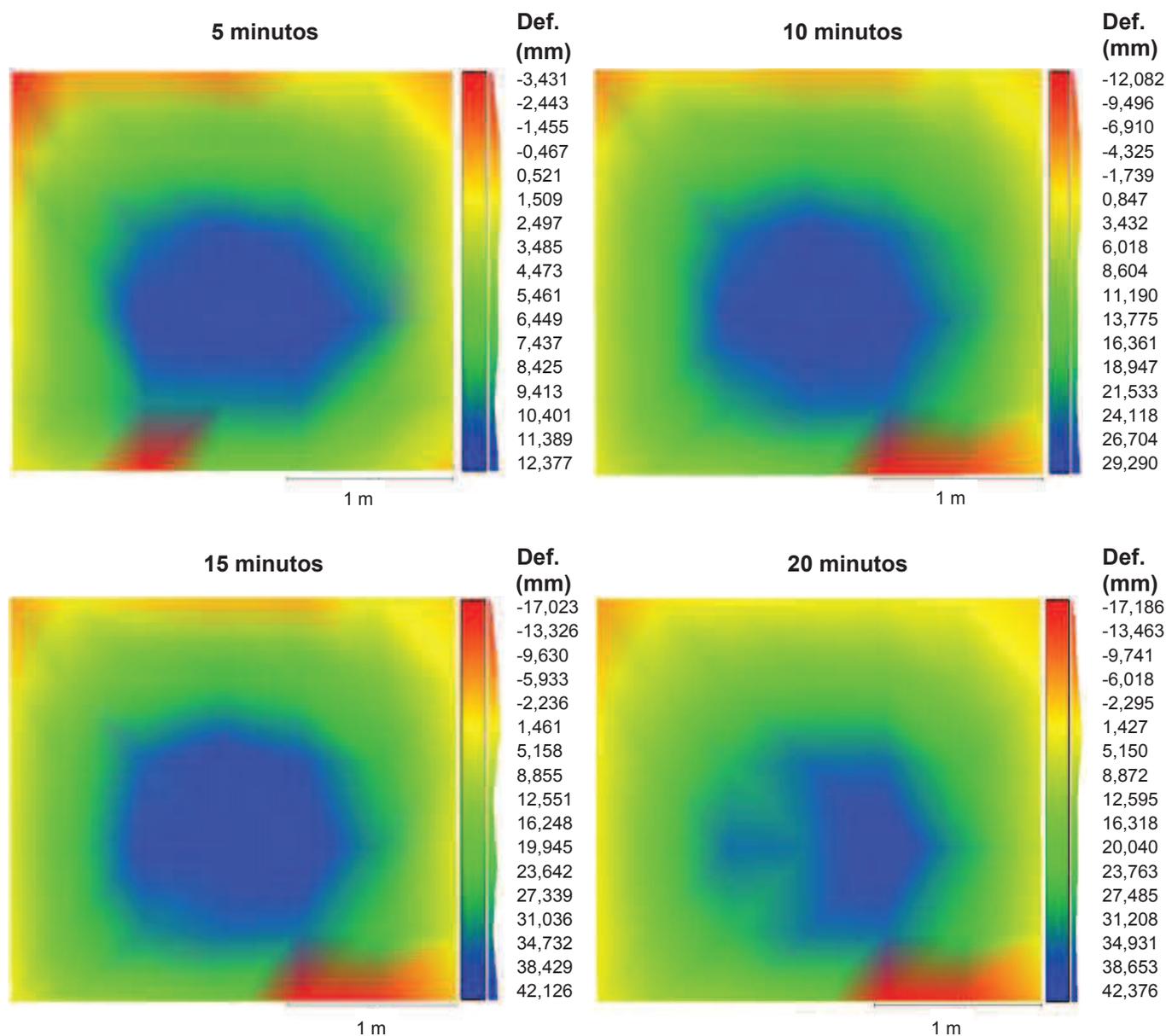




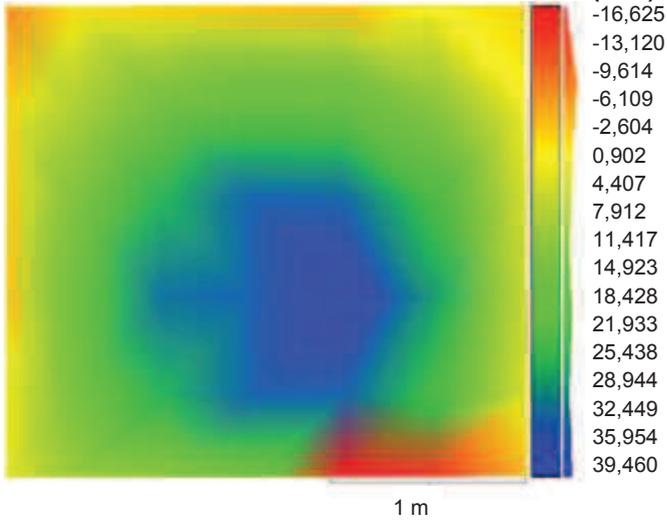


APÊNDICE D – DEFORMAÇÃO LATERAL P-3

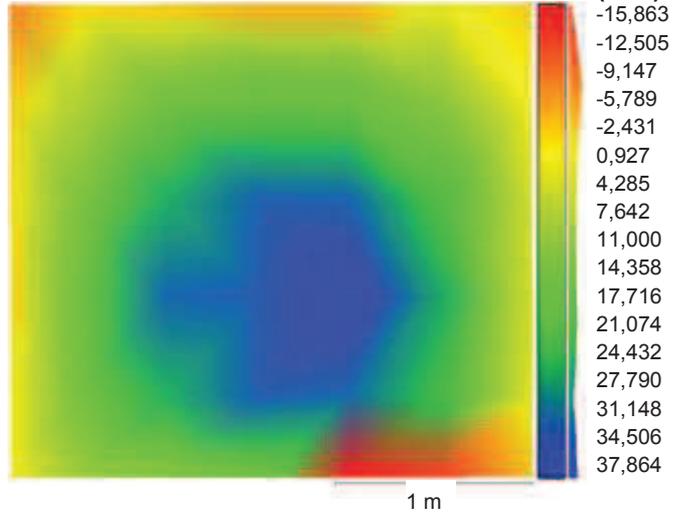
Partindo das medições realizadas com a estação total para verificação da deformação lateral no plano da amostra 3, os perfis correspondentes a cada medição foram modelados com o auxílio do software CloudCompare e são mostrados a seguir.



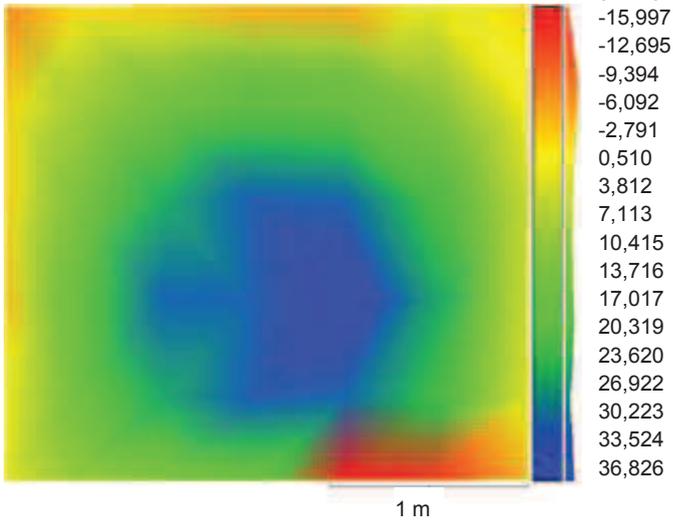
25 minutos



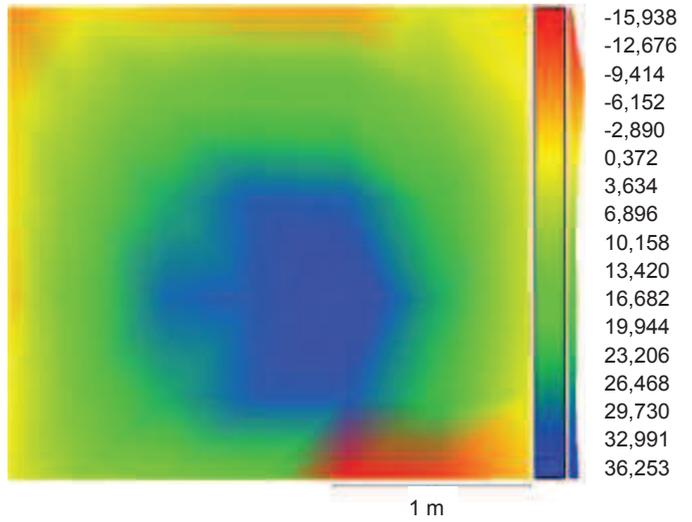
30 minutos



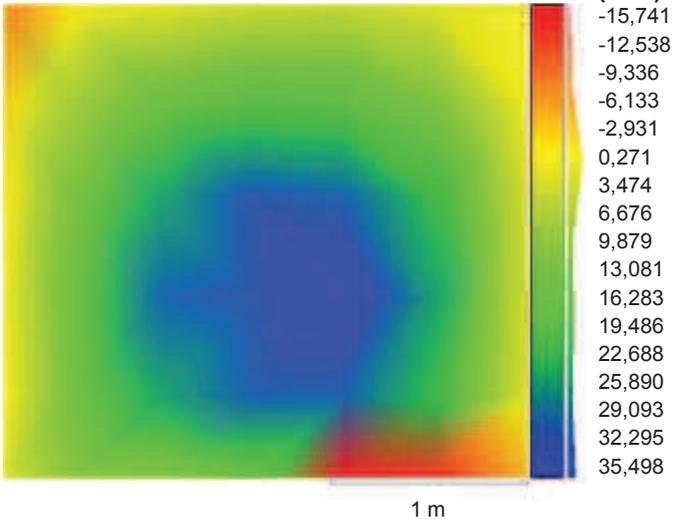
40 minutos



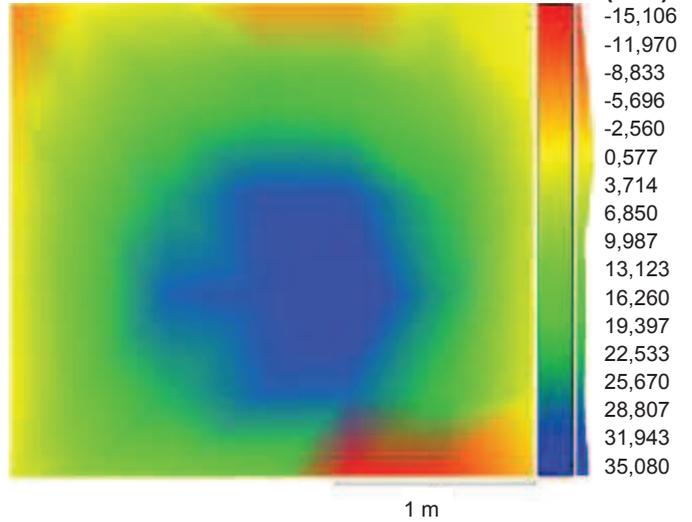
50 minutos



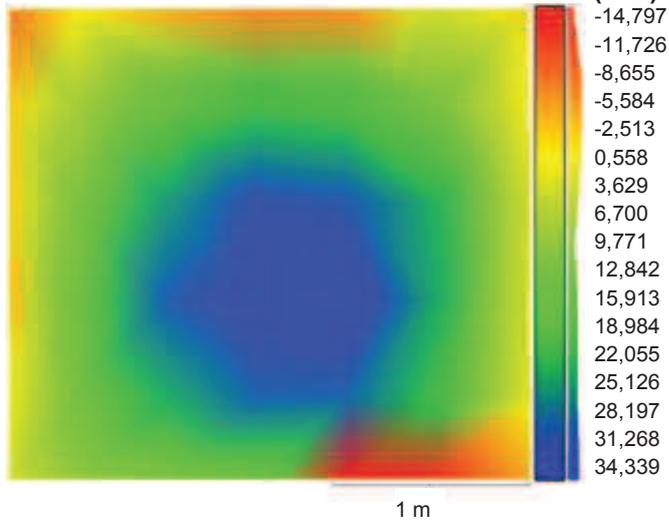
60 minutos



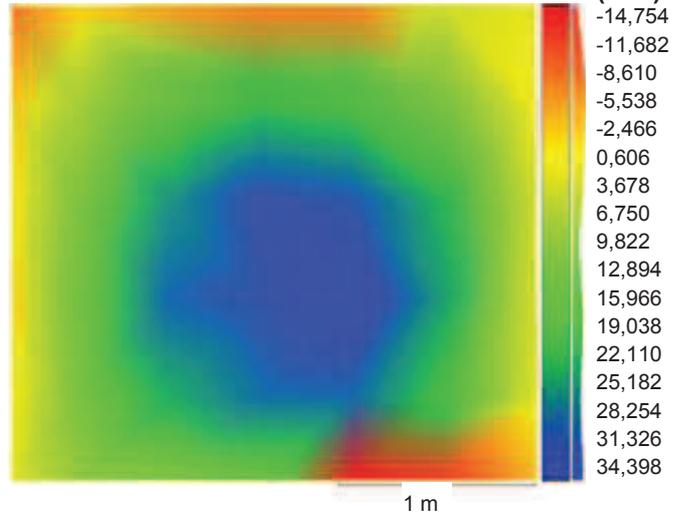
70 minutos



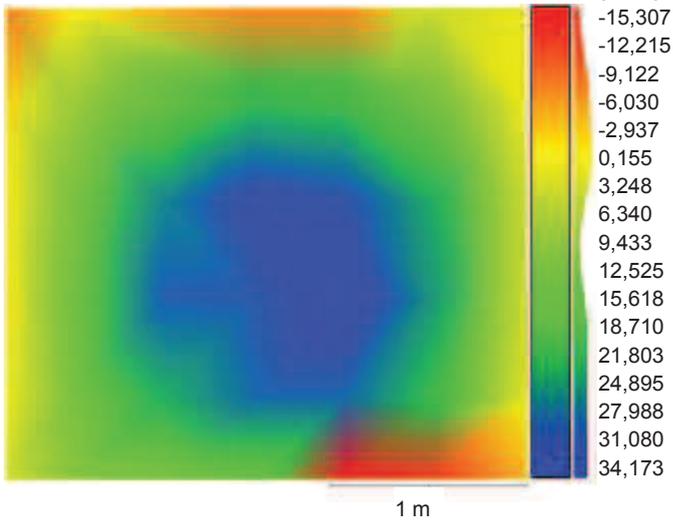
80 minutos



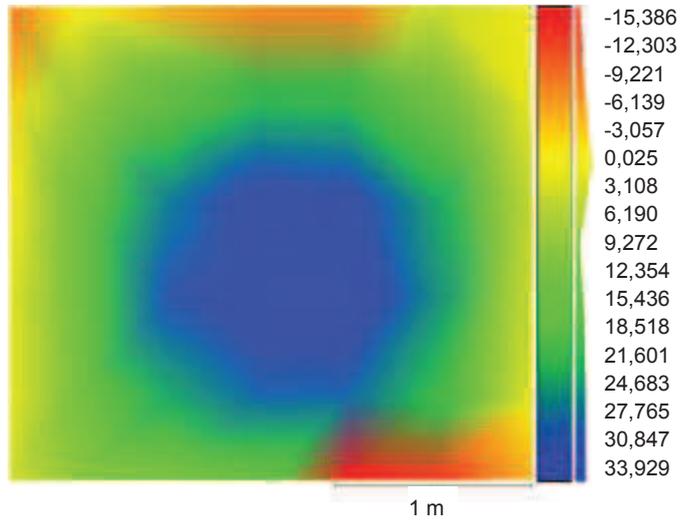
90 minutos



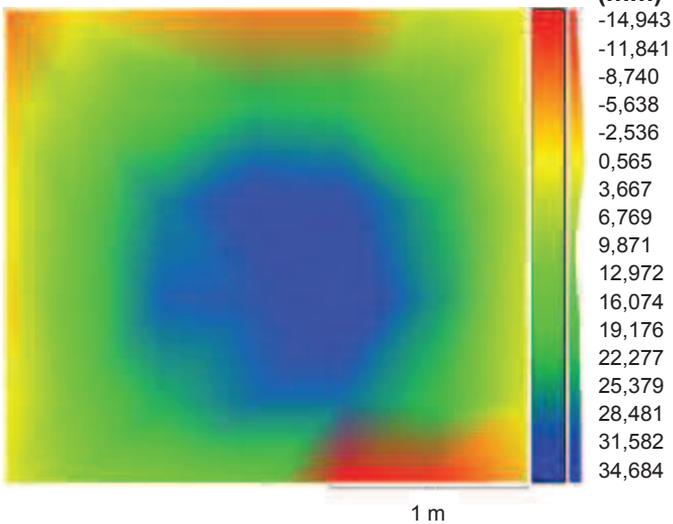
100 minutos



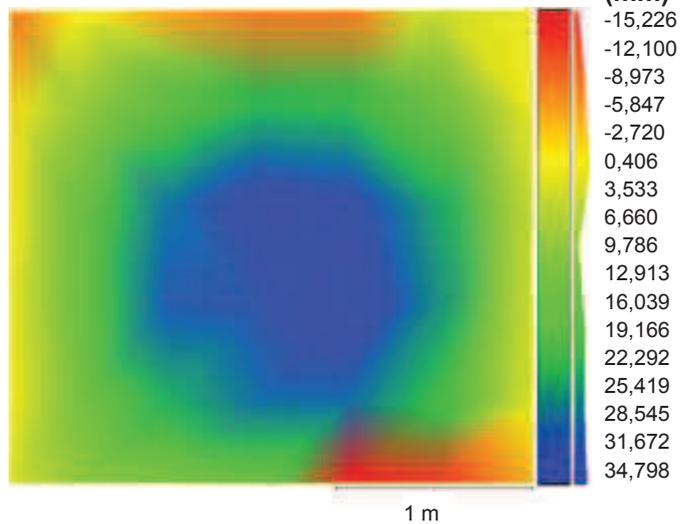
110 minutos



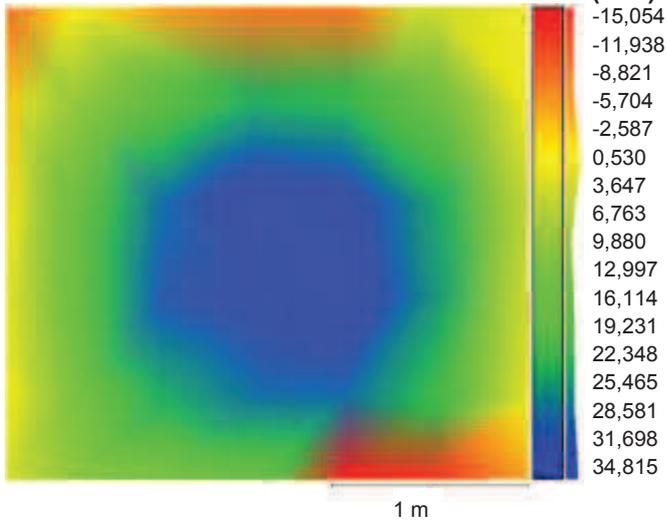
120 minutos



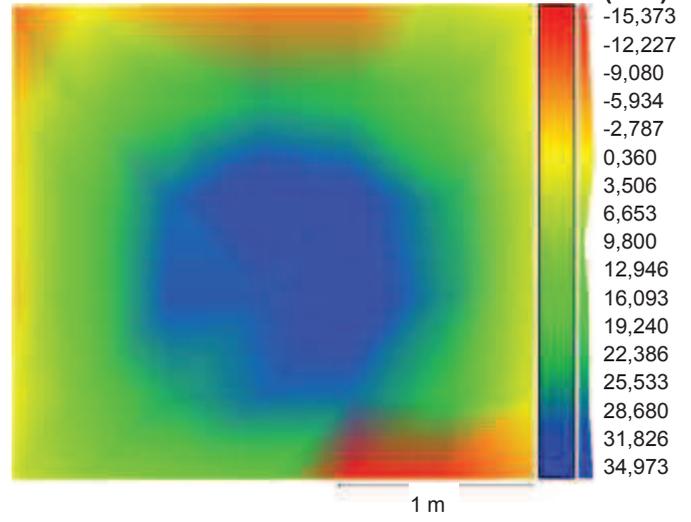
130 minutos



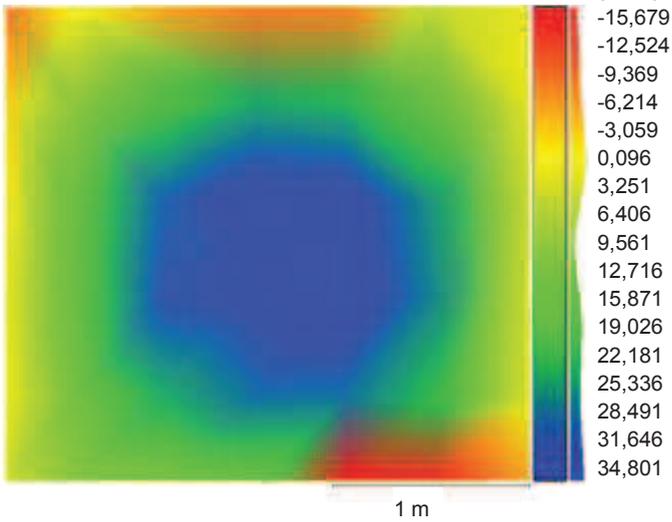
140 minutos



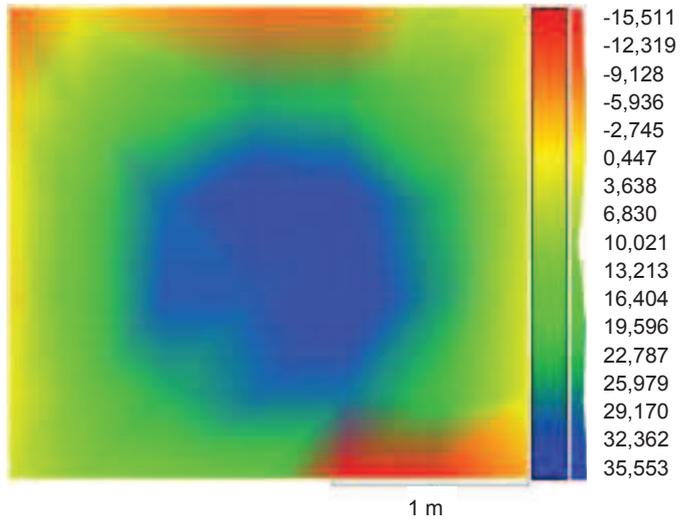
150 minutos



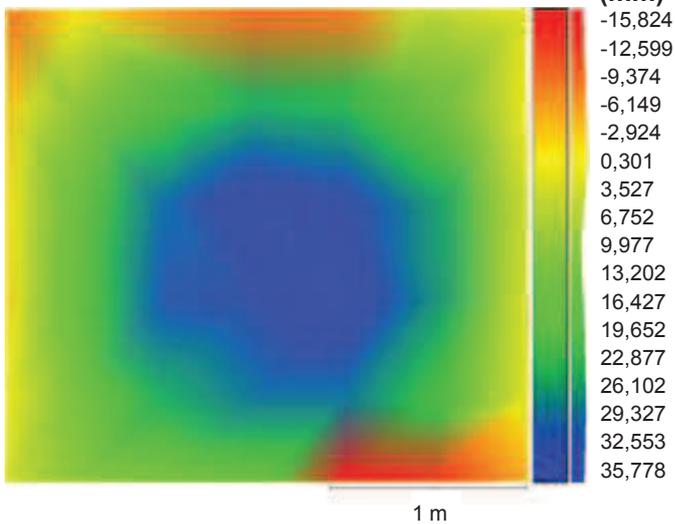
160 minutos



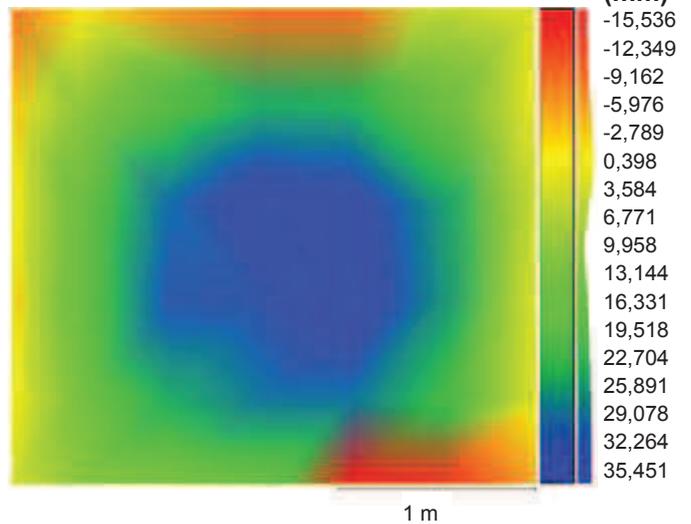
170 minutos



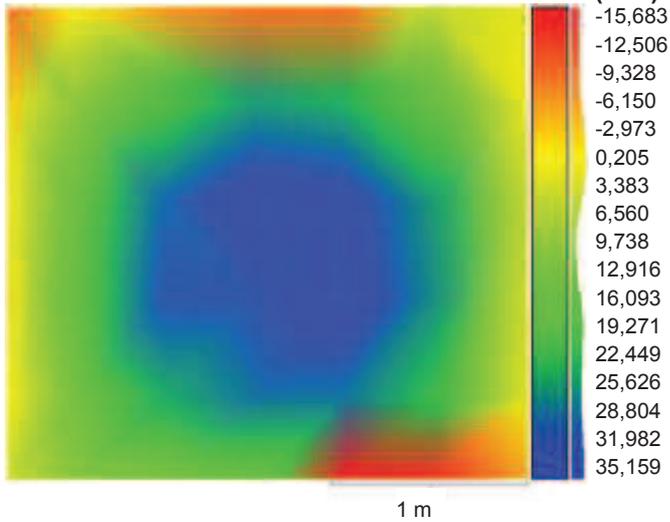
180 minutos



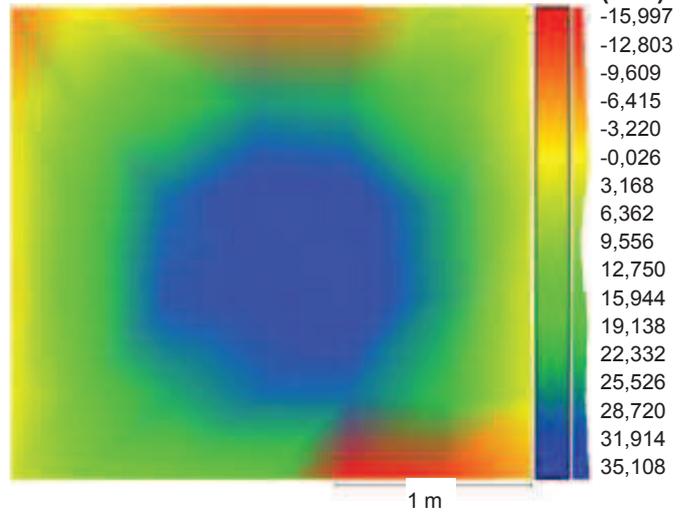
190 minutos



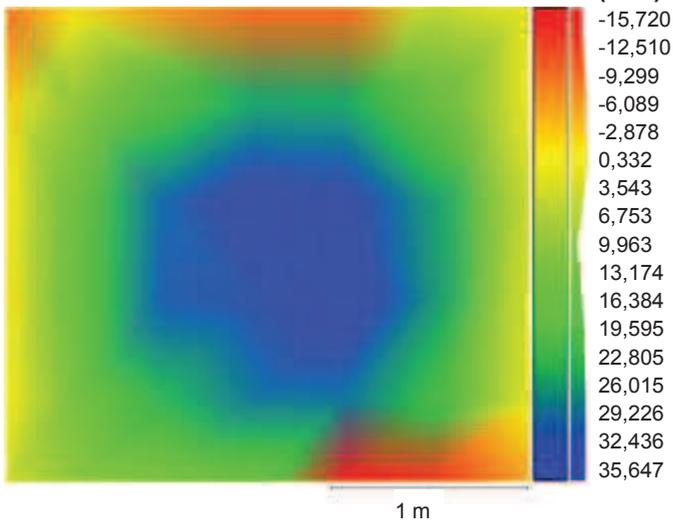
200 minutos



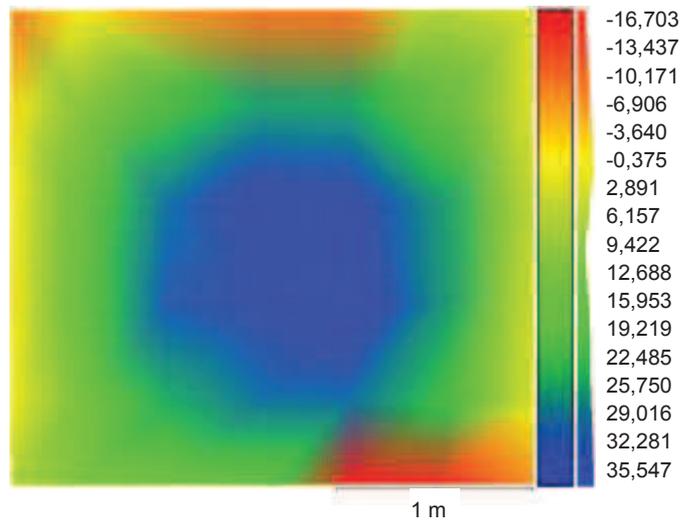
210 minutos



220 minutos



230 minutos



240 minutos

