

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DA ALVENARIA
ESTRUTURAL A DANOS POR EXPOSIÇÃO A ALTAS
TEMPERATURAS COM MEDIDAS DE CONTROLE DA
DILATAÇÃO**

Julia Menegon

Porto Alegre
2017

JULIA MENEGON

**AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DA ALVENARIA
ESTRUTURAL A DANOS POR EXPOSIÇÃO A ALTAS
TEMPERATURAS COM MEDIDAS DE CONTROLE DA
DILATAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Porto Alegre

2017

JULIA MENEGON

**AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DA ALVENARIA
ESTRUTURAL A DANOS POR EXPOSIÇÃO A ALTAS
TEMPERATURAS COM MEDIDAS DE CONTROLE DA
DILATAÇÃO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Concentração em Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 24 de agosto de 2017

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD. pela University of Leeds / UK
Orientador

Prof.^a Ângela Gaio Graeff
PhD. pela University of Sheffield / UK
Coorientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli, PhD.
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Mauro de Vasconcellos Real (FURG)
Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Prof. Jean Marie Désir (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de
Janeiro

Dedico este trabalho àqueles que sempre confiaram no meu potencial mais do que eu mesma.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Luiz Carlos, pelos conhecimentos a mim transmitidos, pelo apoio e orientação durante o planejamento e execução deste trabalho e pelo carinho durante estes quase dois anos e meio.

Um agradecimento especial à Prof^a. Ângela, por ter sido meu suporte nos inúmeros momentos de dúvida e insegurança, por participar ativamente da orientação desta pesquisa e por ser uma de minhas inspirações e exemplos a seguir.

Aos meus pais e meu irmão, que constituem a base de tudo o que sou e conquistei até aqui, que acompanham, mesmo que distantes, todos os passos da minha trajetória. Obrigada por todo amor, compreensão, apoio e atenção dedicados a mim. Agradeço a minha sobrinha Beatriz, por encher de luz e amor meus dias mais difíceis.

Meus sinceros agradecimentos ao meu amor, por me incentivar e compreender minhas limitações na etapa final deste trabalho, por me transmitir toda a paz e serenidade que carrega, tornando minha caminhada mais aprazível e tranquila.

Aos demais familiares e todos aqueles que torcem diariamente por mim. Aos que dedicaram seu tempo para me aconselhar, me incentivar, me acalmar nos momentos de dificuldade e para compartilharem comigo diversos momentos de descontração e alegria. Obrigada pela compreensão nos momentos em que não pude me fazer presente e, mais ainda, naqueles em que minha presença não foi completa.

Aos meus amigos que compartilharam cada conquista, dificuldade, alegria e desafio encarados neste período, tornando os dias mais leves e felizes. Àqueles colegas de caminhada que, sem dificuldade, se tornaram fundamentais para meu crescimento pessoal e profissional, que deixaram um pouco de si no que sou hoje e que, certamente, levarei por toda a vida.

Todo meu carinho ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, pelo acolhimento e pela oportunidade de fazer parte desse grupo incrível. Aos técnicos, Edgar e Fontes, pelas inúmeras sugestões e pela indescritível ajuda que recebi durante todo o planejamento até o último ensaio realizado, por compartilharem seu conhecimento, suas experiências e seu esforço para que as ideias iniciais se concretizassem. Agradeço profundamente ao Gustavo, pela participação ativa e constante em todas as fases da pesquisa e pelo apoio e auxílio, nas

mais diversas formas. Às grandes amizadas que cultivei dentro do laboratório nesse período, que hoje constituem parte fundamental da minha vida, meu muito obrigada.

Obrigada aos professores que se dispuseram a participar da Banca Examinadora e a todos os membros do PPGEC, que contribuíram para minha formação e meu crescimento profissional.

Aos meus colegas da Secretaria de Obras, pelo apoio e compreensão, que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Agradeço às empresas Pauluzzi e FIDA, pela doação, respectivamente, dos blocos cerâmicos e argamassas utilizados nessa pesquisa.

À CAPES e CNPq, pela bolsa concedida.

Enfim, agradeço profundamente a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este objetivo se concretizasse. Obrigada.

A tarefa não é ver o que ninguém ainda viu, mas pensar aquilo que ninguém ainda pensou a respeito daquilo que todo mundo vê.

Arthur Schopenhauer

RESUMO

MENEGON, J. Avaliação da Suscetibilidade da Alvenaria Estrutural a Danos por Exposição a Altas Temperaturas com Medidas de Controle da Dilatação. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A alvenaria estrutural é um dos mais antigos sistemas construtivos existentes. Atualmente estruturas em alvenaria encontram uma vasta aplicação em construções residenciais, sobretudo em obras de interesse social. No entanto, ao contrário das estruturas de concreto, cujo comportamento durante exposição ao fogo e sua resistência residual tem estudos e resultados amplamente disseminados, pouco se sabe a respeito do comportamento de estruturas de alvenaria submetidas à ocorrência de sinistros dessa natureza. Com a intensificação das preocupações acerca da segurança das edificações e de seus usuários em situações de incêndio, faz-se cada vez mais imprescindível o conhecimento do comportamento dos sistemas empregados atualmente na construção civil perante a ação de altas temperaturas. Tendo isso em vista, o presente trabalho teve por objetivo a realização de uma análise dos danos e do comportamento apresentados por amostras de alvenaria com função estrutural ao serem expostas ao aquecimento excessivo. Foram avaliadas nesse estudo paredes de pequenas dimensões executadas com blocos estruturais cerâmicos. Visando simular condições mais próximas da realidade, foram restringidas, com o auxílio de macacos hidráulicos, as laterais das amostras, para que houvesse contenção da dilatação das mesmas. Com o intuito de verificar diferentes tipologias de alvenarias, foram utilizados três blocos distintos: de 14 cm de largura, com resistências de 7 e 10 MPa, e de 19 cm de largura, com 7 MPa de resistência à compressão. Também foram variadas as espessuras das juntas entre as unidades e a argamassa de assentamento das mesmas, a fim de compreender a importância desses fatores para o comportamento das amostras, e, por fim, foram ensaiadas amostras com revestimento na face exposta. As miniparedes foram acopladas a um forno de resistências elétricas e submetidas a um aquecimento próximo à curva padrão determinada por norma, até a temperatura máxima de 950°C, a qual foi mantida pelo período de 4 horas. Foram mensurados, além da temperatura dentro do forno, no interior da parede e na superfície das amostras, os deslocamentos transversais ocorridos durante o ensaio. Também se utilizaram transdutores de deslocamento para verificar a dilatação dos blocos e o esmagamento ou abertura das juntas. Imagens termográficas da face oposta ao aquecimento foram capturadas no decorrer da exposição. Ao final das análises, pôde-se inferir que as miniparedes ensaiadas apresentaram bom desempenho frente à ação das altas temperaturas, mantendo sua estanqueidade, isolamento térmico e resistência mecânica. A restrição lateral não ocasionou deslocamentos dos blocos, no entanto, pôde-se observar transferência de tensão para os mesmos quando utilizadas nas juntas argamassas pouco flexíveis. O deslocamento transversal apresentado pelas amostras indicou deflexão em direção ao forno durante o aquecimento, com posterior reversão do sentido. Tal deflexão foi atenuada pela redução da espessura das juntas, pelo uso de argamassas menos flexíveis e pelo aumento da resistência e largura dos blocos. As alvenarias de 19 cm de largura e, especialmente, as dotadas de revestimento apresentaram melhor desempenho térmico que as demais.

Palavras-chave: *altas temperaturas; alvenaria estrutural; paredes de alvenaria; blocos cerâmicos; resistência ao fogo*

ABSTRACT

MENEGON, J. Avaliação da Suscetibilidade da Alvenaria Estrutural a Danos por Exposição a Altas Temperaturas com Medidas de Controle da Dilatação. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Structural masonry is one of the oldest existing building systems. Nowadays, masonry structures find a wide application in residential constructions, mainly in those with social interest. However, unlike concrete structures, whose behavior during fire exposure and its residual resistance have widely disseminated studies and results, there is a lack of knowledge about the behavior of masonry structures submitted to fire. Because of the spread of concerns about the safety of buildings and their users in fire situations, it becomes essential to know the behavior of the systems currently used in civil construction when exposed to high temperatures. With this in view, the present study intended to analyze the damage and the behavior of structural masonry samples exposed to heating. This study evaluated clay hollow-bricks small walls, and, in order to simulate real conditions, the boundaries of the samples were restrained, with the aid of hydraulic jacks, aiming to restrain the deformation. In order to verify different types of masonry, three different blocks were used: 14 cm wide, with nominal strength of 7 and 10 MPa, and 19 cm wide, with 7 MPa of compressive strength. The thicknesses of the joints and the mortar were also varied, in order to understand the importance of these factors in the behavior of the samples, and, finally, samples were tested with a mono-layer coating at the exposed face. The small walls were coupled to an electrical furnace and subjected to a heating approximately equal to the standard curve, up to the maximum temperature of 950°C, which was maintained for 4 hours. The deflections of the samples during the test were measured, beyond the temperature inside the furnace, in the center of wall and at the non-exposed surface. Clip gages were also used to verify the expansion of the blocks and the crushing or opening of the mortar joints. Thermographic images of the opposite face were captured during the testing. At the end of this research, it was possible to affirm that the walls had good behavior against the high temperatures, maintaining their integrity, thermal insulation and load-bearing capacity. The restriction of the boundaries did not cause the spalling of the blocks, however, it was possible to observe the stress transfer to them in samples with rigid joint mortar. The deflection of the samples increases towards the furnace during the heating, and, then, they show the phenomenon of “reverse bowing”, changing the direction of the displacements. Reducing the thickness and increasing the stiffness of the joint mortars, as well as the increase in block strength and width attenuated such deflection. The masonry 19 cm width and, specially, the ones with coating shows better thermal performance, comparing to the others.

Key-words: *high temperatures; structural masonry; masonry wall; fired clay brick; fire-resistance*

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1. JUSTIFICATIVA | 20 |
| 1.2. QUESTÃO DE PESQUISA..... | 21 |
| 1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO | 21 |
| 1.3.1. Objetivo Principal..... | 21 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 22 |
| 1.4. LIMITAÇÕES..... | 22 |
| 1.5. DELIMITAÇÕES..... | 22 |
| 2. ALVENARIA ESTRUTURAL..... | 23 |
| 2.1. UNIDADE..... | 24 |
| 2.2. ARGAMASSA | 26 |
| 2.3. PAREDES, PRISMAS E PEQUENAS PAREDES | 28 |
| 3. ALVENARIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO | 34 |
| 3.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO FOGO EM PAREDES..... | 34 |
| 3.1.1. Tempo requerido de resistência ao fogo – TRRF..... | 36 |
| 3.1.2. Estanqueidade..... | 36 |
| 3.1.3. Isolamento térmico | 36 |
| 3.1.4. Resistência mecânica | 37 |
| 3.2. COMPORTAMENTO DE ALVENARIA ESTRUTURAL SOB ALTAS TEMPERATURAS | 37 |
| 3.2.1. Propriedades dos Materiais | 42 |
| 3.2.2. Deslocamentos Transversais | 43 |
| 3.3. <i>SPALLING</i> NAS ALVENARIAS | 47 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 51 |
| 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 51 |
| 4.2. MATERIAIS | 52 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.1. | Blocos | 52 |
| 4.2.2. | Argamassas de assentamento | 53 |
| 4.2.3. | Revestimentos | 53 |
| 4.3. | PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 53 |
| 4.3.1. | Etapa Preliminar | 54 |
| 4.3.1.1. | Caracterização das argamassas de assentamento..... | 54 |
| 4.3.1.2. | Caracterização dos blocos cerâmicos..... | 56 |
| 4.3.2. | Primeira Etapa | 58 |
| 4.3.3. | Segunda Etapa..... | 59 |
| 4.3.3.1. | Etapa 2a..... | 59 |
| 4.3.3.2. | Etapa 2b..... | 60 |
| 4.3.4. | Terceira Etapa..... | 60 |
| 4.4. | MINIPAREDES | 61 |
| 4.5. | NÍVEL E APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO | 64 |
| 4.6. | ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO TÉRMICA..... | 65 |
| 4.6.1. | Determinação do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)..... | 65 |
| 4.6.1.1. | Estanqueidade | 66 |
| 4.6.1.2. | Isolamento térmico..... | 66 |
| 4.6.1.3. | Resistência Mecânica | 67 |
| 4.6.2. | Informações adicionais | 68 |
| 4.6.2.1. | Deformação horizontal e vertical..... | 68 |
| 4.6.2.2. | Termografia | 70 |
| 5. | ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 72 |
| 5.1. | CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS..... | 72 |
| 5.1.1. | Blocos | 72 |
| 5.1.2. | Argamassas..... | 75 |
| 5.2. | MINIPAREDES | 77 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.2.1. | Estanqueidade e fissuração das paredes..... | 77 |
| 5.2.2. | Temperatura ao longo das amostras | 79 |
| 5.2.3. | Imagens termográficas..... | 85 |
| 5.2.4. | Deslocamento transversal..... | 91 |
| 5.2.5. | Deslocamento longitudinal..... | 100 |
| 5.2.6. | Carregamento das amostras..... | 105 |
| 6. | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 109 |
| 6.1. | CONCLUSÕES..... | 109 |
| 6.2. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 113 |
| | REFERÊNCIAS | 115 |
| | APÊNDICE A | 120 |
| A.1. | ENSAIOS REALIZADOS NOS BLOCOS..... | 121 |
| A.2. | ENSAIOS REALIZADOS NAS ARGAMASSAS..... | 123 |
| | APÊNDICE B..... | 126 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Blocos cerâmicos estruturais. (a) de paredes vazadas. (b) de paredes maciças, com paredes internas maciças ou vazadas. (c) perfurados. (NBR 15270-2:2005)..... | 25 |
| Figura 2 – Exemplo de relação entre resistência de paredes de alvenaria (f_k) e a resistência dos blocos (f_b) e argamassas (f_m) calculada de acordo com o Eurocode 6 (RAMM, s.d.)..... | 29 |
| Figura 3 – Representação de (a) prismas de duas e três fiadas e (b) miniparedes ensaiadas por Santos (2008)..... | 30 |
| Figura 4 – Incremento da resistência dos prismas de dois (a) e três (b) blocos com o aumento da resistência da argamassa de assentamento (SANTOS, 2008)..... | 30 |
| Figura 5 – Rel. entre resultados experimentais de resistências à compressão de (a) bloco e prisma (b) argamassa e prisma. (SILVA et al., 2015) | 31 |
| Figura 6 - Curva padrão de temperatura no tempo (NBR 5628:2001). | 35 |
| Figura 7 – Ocorrência de Spalling nas paredes estruturais. (a) Com juntas de argamassa tradicional, vista do lado exposto. (b) Com juntas de argamassa colante, vista do lado não exposto (NGUYEN, T.-D.; MEFTAH, 2012)..... | 39 |
| Figura 8 – Alvenarias com função estrutural em altas temperaturas. (a) Sem revestimento na face exposta (b) Revestimento em argamassa de 15 mm de espessura na face exposta. (SOUZA, 2017). | 40 |
| Figura 9 - Comportamento de miniparedes expostas à diferentes taxas de temperatura. a) Diagramas tensão-deformação. b) Redução da resistência à compressão. (AYALA, 2010)... | 42 |
| Figura 10 - Deflexões medidas em paredes ensaiadas a altas temperaturas. (a) Parede de vedação. (b) Parede estrutural. (NGUYEN; MEFTAH, 2012). | 44 |
| Figura 11 – Inclinação de um muro de alvenaria devido às ações térmicas (NAVARRO; AYALA, 2015). | 45 |
| Figura 12 – Deslocamentos horizontais. (a) Aumento da deflexão devido à aplicação de carregamento (BYRNE, 1979) (b) Reversão da deflexão - Reverse Bowing (RUSSO; SCIARRETTA, 2013)..... | 46 |
| Figura 13 – Representação dos modos de ruptura observados em blocos cerâmicos. (a) Destacamento. (b) Flambagem. (c) Esmagamento. (NGUYEN; MEFTAH, 2012)..... | 49 |
| Figura 14 – Componentes de tensão em um bloco exposto a altas temperaturas (NGUYEN; MEFTAH, 2014)..... | 50 |
| Figura 15 – Blocos estruturais cerâmicos utilizados. (a) B1. (b) B2. (c) B3. (< http://www.pauluzzi.com.br/produtos.php >)..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 16 – Fluxograma de delineamento da pesquisa..... | 54 |
| Figura 17 – Ensaio de (a) resistência à tração na flexão e (b) compressão nas argamassas. ... | 55 |
| Figura 18 – Determinação do módulo de elasticidade das argamassas. | 56 |
| Figura 19 – (a) Capeamento dos blocos cerâmicos para ensaio de resistência à compressão. (b) Posicionamento na prensa para realização do ensaio. | 57 |
| Figura 20 – Amostras de blocos cerâmicos imersos em água para determinação do índice de absorção d'água (AA). | 57 |
| Figura 21 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dos blocos cerâmicos..... | 58 |
| Figura 22 – Miniparedes ensaiadas. (a) Desenho esquemático. (b) Amostras construídas..... | 61 |
| Figura 23 – Esquema do quadro de reação utilizado para os ensaios..... | 63 |
| Figura 24 – Capeamento superior e lateral das amostras..... | 63 |
| Figura 25 – Esquema estrutural do edifício fictício. (a) Planta. (b) Elevação..... | 64 |
| Figura 26 - Posição dos termopares nas amostras. (a) Vista frontal. (b) Vista em planta | 67 |
| Figura 27 – Posicionamento e identificação dos relógios comparadores. | 68 |
| Figura 28 – Características geométricas dos <i>clip-gages</i> confeccionados para leitura de deslocamentos superficiais (BEBER, 2003). | 69 |
| Figura 29 – Posicionamento dos <i>clip-gages</i> nas miniparedes..... | 69 |
| Figura 30 – Procedimento para calibração dos <i>clip-gages</i> | 70 |
| Figura 31 – Preparação de câmera para captação de imagens termográficas. | 70 |
| Figura 32 – Ruptura à compressão de blocos de (a) paredes maciças (b) paredes vazadas..... | 73 |
| Figura 33 – Média da condutividade térmica da cerâmica em diferentes temperaturas. | 74 |
| Figura 34 – Expansão térmica de três amostras cerâmicas. (a) Peça 1. (b) Peça 2. (c) Peça 3. | 75 |
| Figura 35 – Resistência à tração na flexão e à compressão da argamassa de 4 MPa, aos 7, 14 e 28 dias. | 76 |
| Figura 36 - Resistência à tração na flexão e à compressão da argamassa de 6 MPa aos 7, 14 e 28 dias. | 76 |
| Figura 37 - Resistência à tração na flexão e à compressão da argamassa de 10 MPa aos 7, 14 e 28 dias. | 77 |
| Figura 38 – Padrão de fissuração das amostras na face exposta às altas temperaturas. | 79 |
| Figura 39 – Padrão de fissuração das amostras na face oposta ao aquecimento. | 79 |
| Figura 40 – Temperatura no interior da alvenaria para os diferentes tipos de blocos. | 80 |
| Figura 41 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 10 mm. | 81 |

| | |
|---|----|
| Figura 42 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B2, argamassa 6 MPa e junta 10 mm. | 82 |
| Figura 43 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B3, argamassa 4 MPa e junta 10 mm. | 82 |
| Figura 44 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 5 mm. | 83 |
| Figura 45 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B1, argamassa 10 MPa e junta 10 mm. | 83 |
| Figura 46 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B2 e junta de argamassa polimérica. | 84 |
| Figura 47 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa, junta 10 mm e revestimento de argamassa na face exposta. | 84 |
| Figura 48 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P1b. | 86 |
| Figura 49 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P2b. | 87 |
| Figura 50 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P3b. | 88 |
| Figura 51 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P4a. | 89 |
| Figura 52 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P5a. | 89 |
| Figura 53 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P6a. | 90 |
| Figura 54 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P7b. | 91 |
| Figura 55 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 10 mm. | 92 |
| Figura 56 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B2, argamassa 6 MPa e junta 10 mm. | 92 |
| Figura 57 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B3, argamassa 4 MPa e junta 10 mm. | 93 |
| Figura 58 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 5 mm. | 93 |

| | |
|---|-----|
| Figura 59 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B1, argamassa 10 MPa e junta 10 mm. | 93 |
| Figura 60 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B2 e junta de argamassa polimérica..... | 94 |
| Figura 61 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa, junta 10 mm e revestimento de argamassa na face exposta..... | 94 |
| Figura 62 – Mecanismos de deflexão e reversão dos deslocamentos transversais (a) Situação inicial. (b) Deflexão devido à dilatação da face exposta. (c) Reversão da deflexão devido à degradação da argamassa. | 95 |
| Figura 63 – Perfil de deformação das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 10 mm. | 96 |
| Figura 64 – Perfil de deformação das amostras de bloco B2, argamassa 6 MPa e junta 10 mm. | 97 |
| Figura 65 – Perfil de deformação das amostras de bloco B3, argamassa 4 MPa e junta 10 mm. | 98 |
| Figura 66 – Perfil de deformação das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 5 mm. | 98 |
| Figura 67 – Perfil de deformação das amostras de bloco B1, argamassa 10 MPa e junta 10 mm. | 99 |
| Figura 68 – Perfil de deformação das amostras de bloco B2 e argamassa polimérica. | 100 |
| Figura 69 – Fissura na face exposta observada após ensaio – amostra P6a..... | 102 |
| Figura 70 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 10 mm. | 103 |
| Figura 71 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B2, argamassa 6 MPa e junta 10 mm. | 103 |
| Figura 72 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B3, argamassa 4 MPa e junta 10 mm. | 104 |
| Figura 73 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 5 mm. | 104 |
| Figura 74 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B1, argamassa 10 MPa e junta 10 mm. | 104 |
| Figura 75 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B2 e junta de argamassa polimérica..... | 105 |

| | |
|---|-----|
| Figura 76 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa, junta 10 mm e revestimento de argamassa na face exposta..... | 105 |
| Figura 77 – Carregamento das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 10 mm. | 106 |
| Figura 78 – Carregamento das amostras de bloco B2, argamassa 6 MPa e junta 10 mm. | 106 |
| Figura 79 – Carregamento das amostras de bloco B3, argamassa 4 MPa e junta 10 mm. | 107 |
| Figura 80 – Carregamento das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 5 mm. | 107 |
| Figura 81 – Carregamento das amostras de bloco B1, argamassa 10 MPa e junta 10 mm. .. | 107 |
| Figura 82 – Carregamento das amostras de bloco B2 e junta de argamassa polimérica. | 108 |
| Figura 83 – Carregamento das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa, junta 10 mm e revestimento de argamassa na face exposta. | 108 |
| Figura 84 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P1a. | 127 |
| Figura 85 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P3a. | 128 |
| Figura 86 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P2a. | 128 |
| Figura 87 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P5b. | 129 |
| Figura 88 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P6b. | 130 |
| Figura 89 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P7a. | 131 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Propriedade dos blocos cerâmicos utilizados. | 52 |
| Tabela 2 - Miniparedes para primeira etapa de ensaios. | 59 |
| Tabela 3 - Miniparedes a serem ensaiadas na etapa 2a. | 60 |
| Tabela 4 - Paredes a serem ensaiadas na etapa 2b. | 60 |
| Tabela 5 – Paredes a serem ensaiadas na etapa 3. | 61 |
| Tabela 6 – Massa úmida (Mh), massa seca (Ms) e índice de absorção d’água (AA) dos blocos cerâmicos. | 72 |
| Tabela 7 – Resistência média (fbm) e característica (fbk) à compressão referente à área bruta dos blocos. | 73 |
| Tabela 8 – Módulo de Elasticidade dos blocos cerâmicos. | 74 |
| Tabela 9 – Módulo estático de elasticidade (E) das argamassas. | 77 |

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, a cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul sucumbiu perante a maior tragédia de sua história. O incêndio na Boate Kiss, em 2013, gerou grande comoção e indignação, não apenas na cidade atingida, mas no país inteiro, devido ao seu desfecho catastrófico. Não é o único exemplo em que pudemos vivenciar a destruição causada pela ação do fogo combinada à falta de medidas preventivas e de combate a incêndio - nem o que causou maior número de mortes. Ao longo dos anos, diversos outros casos semelhantes entraram para o cenário dos grandes incêndios, porém, este episódio finalmente despertou o interesse, as cobranças e a preocupação da sociedade e das autoridades para este tema tão pouco abordado até então.

Com isso, intensificaram-se as discussões acerca da segurança das edificações em situações de incêndio, tanto no que diz respeito à sua estabilidade estrutural, quanto à sua capacidade de evacuação rápida. Surgiu, então, uma maior necessidade de estudos e aperfeiçoamento das pesquisas nesta área, bem como de uma revisão das regulamentações para planos de proteção e prevenção contra incêndio (PPCI) vigentes até então. Dessa maneira, a comunidade científica vem, de forma crescente, buscando melhor compreender o comportamento das estruturas perante altas temperaturas, a fim de encontrar meios de minimizar as consequências de eventuais incêndios.

As normas que guiam atualmente as ações de proteção e prevenção contra incêndio são bastante recentes e ainda estão evoluindo no sentido de garantirem o bom desempenho das edificações e a segurança dos usuários. Além disso, tem-se pouco conhecimento acerca do comportamento frente à ação do fogo das novas tecnologias e materiais que estão sendo empregados na construção nos últimos tempos.

Sabe-se que o entendimento do funcionamento e comportamento das estruturas em situações extremas é de suma importância para o aperfeiçoamento das normas e regulamentações que norteiam, não só o trabalho dos responsáveis técnicos, como também de bombeiros e órgãos fiscalizadores. Por isso, cada vez mais torna-se imprescindível a intensificação de estudos e pesquisas acerca desse tema, para que, a partir de então, possamos projetar estruturas que se mantenham íntegras e garantam a segurança de seus usuários.

Sendo assim, para assegurar que os materiais empregados na construção proporcionem a segurança desejada em situações de incêndio e possam ser utilizados de forma racional, sem que ofereçam riscos à estabilidade da edificação, importantes pesquisas já foram e ainda vem sendo desenvolvidas no meio acadêmico.

Sabe-se que, quando expostos a altas temperaturas, os elementos sofrem degradação, seja por alteração das propriedades dos materiais ou por movimentações devido às dilatações térmicas. Enquanto pesquisas acerca da ação de altas temperaturas em concretos têm sido mais difundidas entre a comunidade científica, poucos estudos foram desenvolvidos em estruturas de alvenaria.

As paredes das edificações estão em risco constante de serem expostas a altas temperaturas por ocorrência de incêndio e, nessas ocasiões, possuem papel fundamental na proteção e segurança dos usuários e da edificação. Tendo função de compartimentação, as paredes devem impedir a propagação do incêndio para outros cômodos, bem como impedir a passagem de gases tóxicos e calor excessivo, que possam dificultar ou impedir a fuga em segurança dos usuários. Quando possuem também função estrutural, a possível falha da alvenaria perante o aumento brusco de temperatura pode desencadear o colapso de toda a edificação, resultando em danos materiais e possíveis perdas humanas.

Para que os elementos desempenhem bem sua função em situação de incêndio, é imprescindível que seu comportamento perante a exposição térmica seja de inteiro conhecimento dos projetistas, de modo que seja possível ter uma previsão razoável de seu desempenho e garantir a segurança dos ocupantes. Tendo isso em vista, torna-se essencial o desenvolvimento de pesquisas na área de alvenaria estrutural, e, principalmente, que estas pesquisas consigam reproduzir condições reais de exposição, a fim de que os conhecimentos obtidos em laboratório possam de fato serem aplicados na prática.

1.1. JUSTIFICATIVA

Por muitas vezes, os ensaios exigidos por norma e realizados em laboratório para paredes sob altas temperaturas negligenciam as forças internas que surgem nos elementos, num cenário real, devido às restrições das expansões térmicas induzidas pelo aumento de temperatura (LI et al., 2015). Isso porque, algumas normas, como a brasileira, para realização de ensaio de resistência ao fogo em paredes, estruturais ou não, recomendam que as bordas laterais da amostra analisada tenham sua movimentação livre de restrições, permitindo que se expandam lateralmente.

Porém, algumas normas internacionais, como a ISO 834-4 e a BS 476, apesar de sugerirem o uso de bordas verticais livres, permitem que sejam utilizadas restrições laterais, desde que os responsáveis pelo ensaio observem que isso corresponde a situação real a que a parede está submetida. De forma mais específica, a norma britânica supracitada recomenda o uso de restrições das bordas verticais caso a amostra da parede em questão for menor do que as dimensões reais do elemento, ou ainda se, na prática, esta parede estiver localizada entre pilares robustos.

Com base nessas normas e em estudos que serão abordados posteriormente, nota-se que o simples negligenciamento das características reais das paredes que serão analisadas em laboratório pode causar distorções significativas e importantes para o resultado final. Shields et al. (1988), por exemplo, analisaram os diferentes modos de deformação térmica de um modelo de parede de alvenaria de tamanho reduzido e, em seu estudo, observaram que a máxima deflexão, para determinada situação, depende das condições de contorno às quais o elemento está submetido, isto é, varia conforme as bordas da amostra tem seus deslocamentos restringidos. Isso também foi observado por Nguyen e Meftah (2012), que, ao medirem as deformações em diversos pontos das paredes ensaiadas, obtiveram deformadas diferentes para diferentes condições de contorno, evidenciando a influência dos vínculos no comportamento térmico do elemento.

A preocupação quanto as restrições aplicadas nas amostras surgem a partir do fato de que as forças internas originadas pela dilatação térmica impedida em situações de incêndios reais têm seus efeitos pouco explorados. Em perícia realizada em uma edificação submetida a um incêndio severo, foi possível observar ocorrências de deslocamentos (spalling) de faces de

blocos cerâmicos (NAVARRO; AYALA, 2015). Na ocasião, os elementos não possuíam função estrutural. Surge, a partir daí a necessidade de compreender em que circunstâncias tais deslocamentos ocorrem, quais os mecanismos que os desencadeiam e quais as possíveis consequências deste fenômeno no comportamento da estrutura quando a alvenaria possuir função estrutural, visto que tal técnica construtiva é amplamente utilizada em edificações de múltiplos pavimentos.

A motivação deste trabalho, portanto, encontra-se na necessidade de melhor compreender o comportamento de paredes estruturais de alvenaria frente à ação de altas temperaturas, incluindo o conceito de esforços internos originados pelas restrições das expansões térmicas, de modo que se tenha conhecimento dos danos a que os elementos estão sujeitos em situações reais, dando especial atenção à possível ocorrência de spalling nos blocos devido aos esforços adicionais causados pelos mecanismos de controle da expansão térmica.

1.2. QUESTÃO DE PESQUISA

A partir do que foi anteriormente exposto, formulou-se a seguinte questão de pesquisa:

Quais os efeitos advindos da ação de altas temperaturas em miniparedes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos quando estas são submetidas a esforços de restrição das expansões térmicas?

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos a serem alcançados com a realização deste trabalho, divididos em principal e específicos, estão descritos a seguir.

1.3.1. Objetivo Principal

Como objetivo maior deste trabalho tem-se a realização de uma análise do comportamento apresentados por miniparedes de alvenaria ao serem expostas a altas temperaturas e carregamento axial, e terem sua expansão térmica restringida lateralmente, a fim de simular condições próximas da realidade de exposição em uma situação de incêndio.

1.3.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos que se visam alcançar com o presente trabalho são:

- a) Observar se as forças internas na alvenaria, originadas a partir das restrições da expansão térmica, podem levar à ocorrência de *spalling* nos blocos cerâmicos;
- b) Verificar o tempo de resistência ao fogo dos elementos estudados quando sujeitos a medidas de controle da expansão térmica;
- c) Verificar a influência da resistência dos blocos e do tipo de argamassa de assentamento, bem como do uso de revestimento, no comportamento da alvenaria frente a ação de altas temperaturas.

1.4. LIMITAÇÕES

- a) Devido aos elevados custos dos ensaios em escala real e à disponibilidade de equipamentos no laboratório, foram realizados ensaios em amostras de paredes de tamanho reduzido, e não em tamanho real, como solicita a norma brasileira NBR 5628 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001);
- b) Foram ensaiadas miniparedes de alvenaria com blocos estruturais cerâmicos, com resistência à compressão de 7 e 10 MPa e larguras de 14 e 19 cm, disponibilizados por um único fornecedor;

1.5. DELIMITAÇÕES

- a) As argamassas empregadas na execução das amostras foram preparadas utilizando mistura pronta industrializada, necessitando apenas a adição de água às mesmas. O produto também foi oriundo de um mesmo fornecedor;
- b) As argamassas empregadas foram determinadas de forma que sua resistência à compressão, em uma primeira etapa, corresponda a, no máximo, 70% da resistência dos blocos, conforme NBR 15812-1 (ABNT, 2010);
- c) Para o pórtico em que as amostras foram posicionadas, foi utilizada estrutura metálica, devidamente dimensionada para resistir aos esforços causados pela contenção dos deslocamentos laterais, oriundos das altas temperaturas.

2. ALVENARIA ESTRUTURAL

A alvenaria estrutural é um dos mais antigos sistemas construtivos existentes. Com sua origem nos primórdios das civilizações, surgiu no momento em que se intencionou construir paredes através do empilhamento organizado de blocos e pedras. Em alguns casos, tais pedras eram solidarizadas através do uso de barro entre elas, a fim de aumentar sua estabilidade. Segundo o Council on Tall Buildings and Urban Habitat (1978), até o início do século XX a alvenaria, em suas várias formas, foi o principal material utilizado para construção de edificações altas. A partir de então, passou a ser largamente substituída por estruturas de aço e concreto armado. Isso se deu devido ao fato de a alvenaria, tradicionalmente, não ter sido tratada como um material de engenharia, portanto, as regulamentações ultrapassadas levavam à necessidade de construir-se paredes excessivamente espessas e, conseqüentemente, antieconômicas para edificações superiores a dois ou três pavimentos, o que freou seu uso frente às novas tecnologias disponíveis.

A partir da segunda metade do século XX, porém, com o crescimento do interesse da comunidade científica no que tange a alvenaria estrutural, passando a dedicar grandes esforços em pesquisas nesta área, foi propiciado o desenvolvimento de técnicas de projeto mais racionais. Devido a isso e à melhoria da qualidade dos materiais empregados, a alvenaria como elemento estrutural apresentou significativos avanços em relação às demais formas construtivas (ROMAN et al., 1999). Estima-se que, no Brasil, os primeiros edifícios construídos com blocos vazados estruturais tenham surgido em São Paulo, no ano de 1966 e, apesar da chegada tardia, esse sistema se consolidou como uma alternativa eficiente e econômica para edificações residenciais e industriais (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), no início do século XXI, devido à estabilização da economia e ao aumento da concorrência, a construção em alvenaria estrutural experimentou, no Brasil, grande impulso, implementando-se novos materiais e acelerando as pesquisas em torno do tema. Atualmente estruturas em alvenaria encontram uma vasta aplicação em construções residenciais, sobretudo em obras de interesse social.

Conforme definido por Roman et al. (1999, p. 16), a alvenaria estrutural trata-se de um “processo construtivo em que se utilizam as paredes da habitação para resistir às cargas, em substituição aos pilares e vigas utilizados nos sistemas de concreto armado, aço ou madeira”. As paredes nessas situações devem transmitir as ações por meio de tensões de compressão, sendo esse o principal conceito estrutural ligado à utilização desse método construtivo, segundo Ramalho e Corrêa (2003).

As predes de alvenaria são elementos laminares compostos basicamente por unidades, ou blocos, e argamassa, sendo, em muitos casos, reforçadas com graute e armadura. Quando utilizadas como elemento estrutural, a alvenaria exerce diferentes funções em uma edificação, tais como: definição da geometria dos ambientes, resistência às cargas atuantes, isolamento térmico e acústico e resistência ao fogo. O Council on Tall Buildings and Urban Habitat (1978) salienta que o uso dessa forma construtiva reduz a quantidade de material empregado e destaca que, para construções em que estruturas de alvenaria sejam apropriadas, seu custo é compatível com estruturas em concreto armado e pode inclusive ser mais econômica devido à natureza multifuncional das paredes.

Por apresentarem baixa resistência à tração, as estruturas em alvenaria devem ter esse tipo de ação restrita a determinados pontos e com valores relativamente baixos, a fim de que sejam economicamente viáveis (RAMALHO; CORRÊA, 2003). A segurança estrutural e os critérios a serem estabelecidos para o projeto, portanto, são condicionados às propriedades dos elementos. Dessa forma, tais propriedades devem ser o ponto principal a ser considerado ao optar-se por construções em alvenaria (COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT, 1978).

A resistência à compressão dos elementos de alvenaria está diretamente relacionada às propriedades de seus componentes, portanto, as propriedades da parede são controladas pelas propriedades dos materiais, individualmente, e a interação entre eles (COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT, 1978). Dessa forma, é imprescindível compreender as características dos componentes para obter um entendimento do elemento como um todo.

2.1. UNIDADE

As unidades são componentes básicas de uma parede de alvenaria, responsáveis por fornecer resistência aos elementos. São elas os blocos cerâmicos, de concreto ou sílico-calcários e os

tijolos maciços ou furados. Os blocos podem estar divididos em blocos de vedação e estruturais, esses para uso específico em alvenaria com função estrutural, e estão disponíveis em uma enorme variedade de tamanhos e com diferentes padrões de cavidades. Para blocos estruturais, tais cavidades, ou furos, devem, obrigatoriamente, ser posicionadas na vertical, a fim de garantir a resistência necessária aos elementos.

Segundo o Council on Tall Buildings and Urban Habitat (1978), as unidades mais antigas utilizadas são as cerâmicas de dimensões retangulares, e estas permanecem com uso largamente difundido na atualidade. A NBR 15270-2 (ABNT, 2005b) define três tipos diferentes de blocos cerâmicos estruturais: de paredes vazadas, de paredes maciças e perfurados (Figura 1).

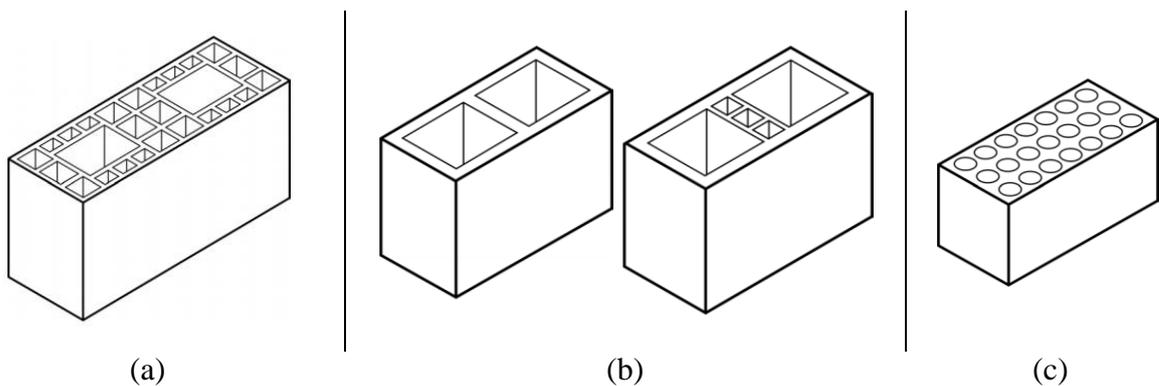


Figura 1 – Blocos cerâmicos estruturais. (a) de paredes vazadas. (b) de paredes maciças, com paredes internas maciças ou vazadas. (c) perfurados. (NBR 15270-2:2005)

Roman et al. (1999) salientam que a realização de ensaios para caracterização dos blocos é imprescindível para a análise de seu comportamento, pois a qualidade das unidades cerâmicas é dependente da qualidade das argilas empregadas na fabricação e do processo de produção das mesmas, o que torna difícil a padronização dos componentes. Os blocos empregados na alvenaria estrutural devem atender a um controle de qualidade mais rigoroso do que os demais. Os requisitos para determinação da conformidade das unidades cerâmicas estão descritos pela NBR 15270-2 (ABNT, 2005b) e os métodos para a execução dos ensaios a serem realizados a fim de verificar tais requisitos são estabelecidos pela NBR 15270-3 (ABNT, 2005b). Para avaliar a conformidade dos blocos, é exigido que se determinem as características geométricas – dimensões e planeza das faces, espessura de septos e paredes

externas e desvio em relação ao esquadro – além de características físicas e mecânicas, como massa seca, índice de absorção d'água e resistência à compressão dos componentes.

A disposição dos furos nos blocos cerâmicos estruturais também é um fator importante na resistência dos mesmos e, conseqüentemente, das paredes que constituem. A disposição e os tipos de furos nos blocos vazados podem gerar concentrações de tensões que, ao aumentarem bruscamente, podem conduzir a uma ruptura frágil. Por outro lado, furos bem equilibrados reduzem tais concentrações e induzem a um aumento da resistência das paredes (SILVA et al., 2015 e COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT, 1978).

A resistência à compressão dos blocos disponíveis no mercado varia para atender às diferentes necessidades de projeto. Os blocos mais comuns encontrados e utilizados possuem resistência na faixa de 6 ou 7 MPa, porém, blocos mais resistentes, de até 18 MPa vêm sendo disponibilizados a fim de suprir a demanda para prédios mais elevados.

O módulo de elasticidade das unidades cerâmicas, assim como a resistência à compressão, é influenciado pela composição da matéria prima crua, pela temperatura de queima, pelo processo de fabricação e pela porosidade das mesmas. Dessa forma, pode-se encontrar diferentes características para diferentes lotes de unidades fabricadas, mesmo que provenham de um mesmo fornecedor.

2.2. ARGAMASSA

A argamassa é o material utilizado nas juntas das alvenarias, responsável por promover adesão entre os blocos e por contribuir para o comportamento mecânico das paredes. Segundo definição trazida pela NBR 13281, a argamassa consiste em uma “mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria” (ABNT, 2005a). A fim de adicionar propriedades hidráulicas e contribuir para a trabalhabilidade da mistura, frequentemente é adicionada cal à argamassa (COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT, 1978).

Uma importante função da argamassa é que seja capaz de transferir as tensões uniformemente entre os blocos, compensando as possíveis irregularidades e variações dimensionais encontradas. Também é a argamassa que auxilia as alvenarias a resistirem a esforços laterais,

promovendo união entre as unidades (ROMAN et al., 1999). Ao contrário do concreto, a argamassa é assentada sobre superfícies que absorvem água e fica exposta à evaporação. Tal absorção ocasionada pelas unidades de alvenaria é fundamental para a aderência entre as interfaces dos materiais, porém, em excesso pode comprometer a hidratação do cimento, e conseqüentemente, enfraquecer a ligação bloco-argamassa. Dessa forma, a retentividade de água pela argamassa é também um importante fator a ser observado (ROMAN et al., 2010).

Por possuírem diferentes comportamentos mecânicos para diferentes misturas, faz-se necessária a realização de ensaios de caracterização das argamassas, de forma que seja possível conhecer suas propriedades, e compreender seu comportamento. Segundo HENDRY (1990), as propriedades do material das juntas controlam a resistência a ser alcançada pela alvenaria. No estado fresco, a propriedade de maior importância é a trabalhabilidade da argamassa, pois dela depende a facilidade com que o material será espalhado sobre a superfície do bloco e penetrar-lhe-á os poros (ROMAN et al., 2010). Para medir indiretamente a trabalhabilidade da argamassa utiliza-se ensaio de consistência, em que é determinado o espalhamento de um tronco de cone do material após 30 golpes sucessivos em uma mesa específica para este fim.

No estado endurecido, as principais propriedades são a resistência à compressão e a aderência da argamassa. A aderência depende das características da interface com a unidade de alvenaria e é influenciada por uma série de fatores, como taxa de absorção inicial do bloco, mão-de-obra, quantidade de cimento na mistura, temperatura, entre outros (ROMAN et al., 2010). Quanto à resistência à compressão, determina-se que a argamassa endurecida deve ser resistente o suficiente para suportar os esforços a que será submetida, porém nunca excedendo a resistência dos blocos, de modo a assegurar que as possíveis fissuras, oriundas de expansões térmicas ou demais movimentos, venham a ocorrer nas juntas, e não nas unidades (ROMAN et al., 1999).

Ramalho e Corrêa (2003) salientam que, mais importante do que a resistência de uma argamassa de assentamento é sua plasticidade, pois tal característica permite que sejam transferidas as tensões entre as unidades adjacentes. A norma brasileira que trata dos projetos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, a NBR 15812-1 (ABNT, 2010), define que a resistência à compressão da argamassa de assentamento deve estar compreendida entre 1,5 MPa e 70% da resistência à compressão do bloco utilizado, e especifica que o ensaio deve ser realizado segundo a NBR 13279:2005. Hendry (1990) destaca que, devido às restrições

laterais impostas pelos blocos, a argamassa aplicada nas juntas tende a resistir a tensões de compressão maiores do que aquelas obtidas através de ensaios.

2.3. PAREDES, PRISMAS E PEQUENAS PAREDES

Segundo o Council on Tall Buildings and Urban Habitat (1978), apesar de a argamassa fornecer uma ligação entre as unidades adjacentes, ela não origina uma massa monolítica. Portanto, a combinação de blocos e argamassa forma, na verdade, um meio heterogêneo periódico, que, segundo Dutra (2012), se trata de um material heterogêneo onde uma estrutura se repete ao longo de suas dimensões. No caso da alvenaria, tal estrutura é formada pelo bloco e uma junta de argamassa. Por conta disso, não se pode atribuir à alvenaria as propriedades somente dos blocos, tampouco somente da argamassa. Dessa forma, diversos estudos foram e vêm sendo desenvolvidos buscando compreender o comportamento mecânico de elementos de alvenaria.

Na alvenaria estrutural, o conhecimento da resistência à compressão das paredes é de fundamental importância para a segurança da estrutura. Pela dificuldade de realização em laboratório de ensaios em verdadeira grandeza que possam aferir essa propriedade, as normas trazem metodologias de ensaios com elementos padronizados em dimensões reduzidas, que, através de correlações, permitem estimar a resistência à compressão de paredes em escala real.

Nesse sentido, a NBR 15812-1 (ABNT, 2010) indica que, se a resistência à compressão simples da alvenaria (f_k) não puder ser determinada por meio de ensaio em dimensões reais, esta pode ser estimada como sendo 70% da resistência do prisma (f_{pk}) ou 85% da resistência de pequenas paredes (f_{ppk}), ambos ensaiados conforme procedimentos descritos pela NBR 15812-2:2010. O Eurocode 6 (EN BS 1996-1-1, 2005), código europeu que rege os projetos de alvenaria estrutural, traz uma relação entre a resistência à compressão das paredes e as resistências das unidades e da argamassa que a compõem. Para alvenarias executadas com argamassa tradicional e com juntas de espessura usual, tal relação é dada pela equação abaixo.

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3} \quad (1)$$

Em que:

f_b é a resistência à compressão do bloco;

f_m é a resistência da argamassa;

K é uma constante tabelada, relacionada ao tipo de bloco e argamassa utilizados, que varia de 0,35 a 0,55 para blocos cerâmicos com argamassa tradicional. Esta constante pode ser modificada para casos específicos, conforme descrito pela norma em questão.

RAMM [s.d.] traz um exemplo ilustrado da variação da resistência estimada das paredes de alvenaria de acordo com as resistências de unidades e argamassas, calculada de acordo com a equação 1, considerando $K = 0,60$ (Figura 2). Pode-se observar a tendência de aumento da resistência das paredes com o aumento das resistências dos seus componentes, individualmente.

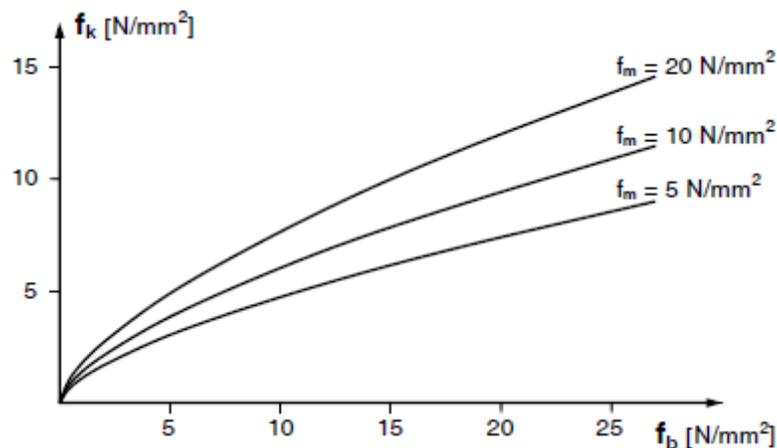


Figura 2 – Exemplo de relação entre resistência de paredes de alvenaria (f_k) e a resistência dos blocos (f_b) e argamassas (f_m) calculada de acordo com o Eurocode 6 (RAMM, s.d.).

Em sua dissertação de mestrado, Santos (2008) ensaiou blocos, prismas e pequenas paredes à compressão, além de analisar seu módulo de elasticidade, visando verificar a influência da geometria das unidades cerâmicas e da resistência das argamassas de assentamento no comportamento mecânico dos elementos. Em seu estudo, o autor combinou blocos cerâmicos de paredes vazadas e maciças com argamassas com resistências variando entre 4 e 17 MPa. Além de caracterizar os blocos e argamassas, foram analisados cinco prismas de duas e três fiadas sobrepostas e quatro pequenas paredes de dois blocos e meio por quatro fiadas de altura. A Figura 3 mostra a geometria dos elementos utilizados, bem como a instrumentação empregada para medição de deslocamentos verticais, a fim de determinar seus módulos de elasticidade.

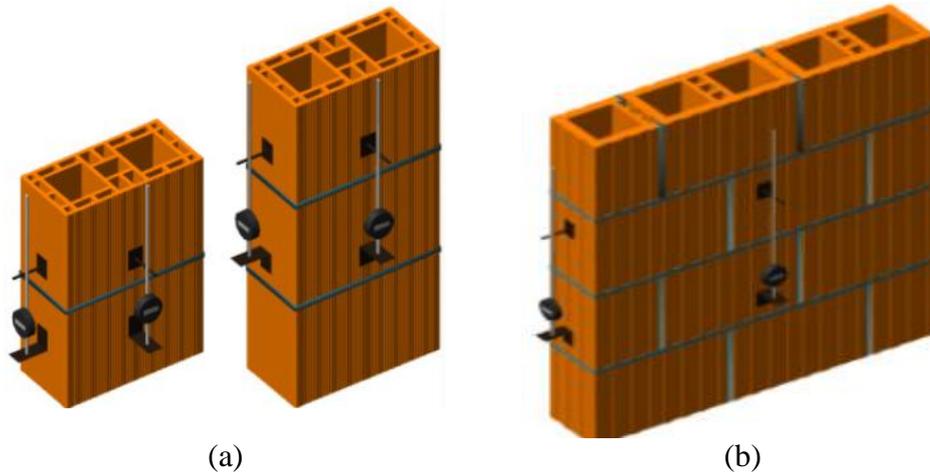


Figura 3 – Representação de (a) prismas de duas e três fiadas e (b) miniparedes ensaiadas por Santos (2008).

Em seus resultados, Santos (2008) verificou que a resistência à compressão dos prismas de dois e três blocos aumentou com o aumento da resistência da argamassa (Figura 4), porém, tal aumento foi, de fato, significativo apenas para os prismas com blocos de paredes maciças (BPM), quando analisado estatisticamente. Também observou que a resistência da argamassa de assentamento representou, aproximadamente, 17 a 20% da resistência dos prismas de blocos com paredes vazadas e entre 28 e 38% para os de blocos com paredes maciças, o que novamente indica maior influência da argamassa quando utilizados blocos de paredes maciças.

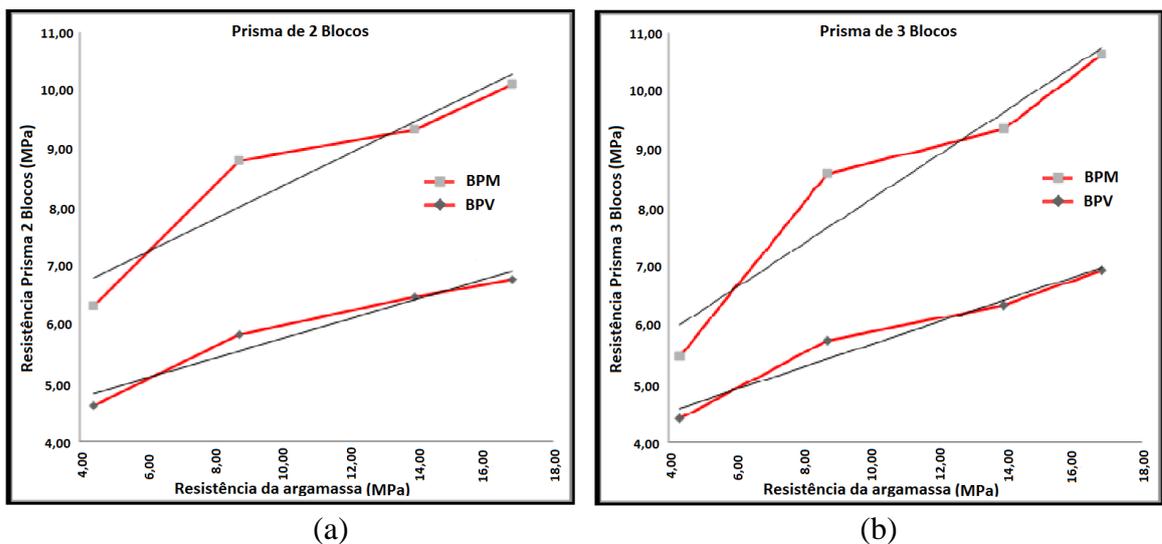


Figura 4 – Incremento da resistência dos prismas de dois (a) e três (b) blocos com o aumento da resistência da argamassa de assentamento (SANTOS, 2008).

Para as pequenas paredes, apesar de a resistência à compressão apresentar-se inferior à dos prismas, conforme esperado, também se observou crescimento da mesma com argamassas mais resistentes. Esse comportamento mostrou-se mais expressivo novamente nas pequenas paredes com blocos de paredes maciças, o que evidencia a influência da geometria do bloco no incremento de resistência das alvenarias em função da argamassa. O mesmo foi observado para as pequenas paredes ensaiadas por Pasquali (2007), porém o crescimento da resistência da alvenaria com argamassas de maiores resistência, neste estudo, foi bastante discreto. Rizzatti et al. (2012), por sua vez, não observou influência significativa do aumento da resistência do material das juntas na resistência à compressão de paredes ensaiadas em tamanho real.

Silva et al. (2015) também estudaram a correlação entre resistências de blocos cerâmicos, argamassa de assentamento e sua combinação em prismas de dois blocos. Seus resultados foram plotados em dois gráficos, juntamente com os valores obtidos por Mendes (1998), Arantes (2003), Santos (2008) e Rizzatti et al. (2012), de modo a verificar a influência da resistência dos blocos e das argamassas na resistência dos elementos. Conforme pode ser observado na Figura 5, a resistência à compressão da alvenaria aumenta de forma praticamente linear com o aumento da resistência à compressão das unidades, enquanto que, quando a resistência das argamassas é relacionada à dos prismas, os resultados são mais desordenados, não sendo possível afirmar, portanto, que o aumento da resistência da argamassa origina uma alvenaria mais resistente. O mesmo é salientado por Roman et al. (1999), que afirma que "uma argamassa mais forte não implica necessariamente numa parede mais forte. Não há uma relação direta entre as duas resistências". Tais resultados reforçam o conceito de que os blocos são os principais determinantes da resistência das alvenarias.

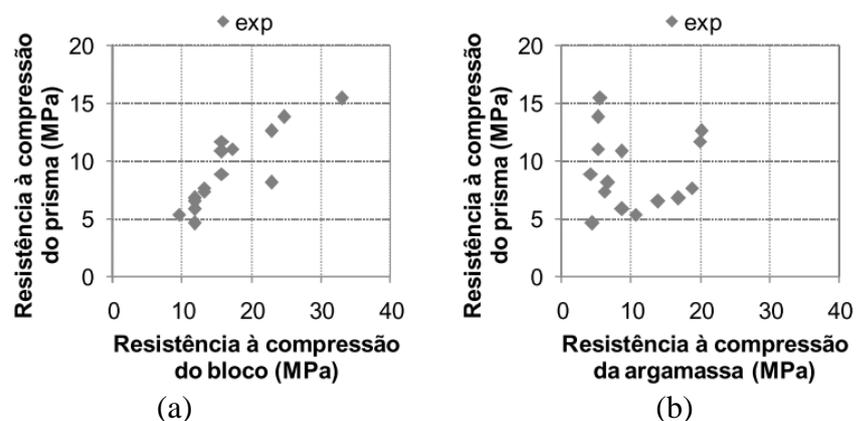


Figura 5 – Rel. entre resultados experimentais de resistências à compressão de (a) bloco e prisma (b) argamassa e prisma. (SILVA et al., 2015)

Segundo o Council on Tall Buildings and Urban Habitat (1978), pode-se dizer que, de maneira geral, aumentar a resistência do bloco utilizado implica num aumento da resistência da parede, mas outros fatores podem ter igual importância, como regularidade e uniformidade dos blocos ou concentrações de tensões. A qualidade da mão de obra empregada na construção da alvenaria também é um importante fator de influência no desempenho da parede. Segundo Roman et al. (1999), juntas incompletas reduzem em até 33% a resistência das alvenarias e desvios do prumo ou do alinhamento de 12 a 20 mm ocasionam cerca de 13 a 15% de enfraquecimento.

Quanto ao modo de ruptura das paredes de alvenaria, Hendry (1990) define como sendo dependente da resistência da argamassa em relação ao bloco. Isto significa que uma argamassa de assentamento mais forte pode ocasionar ruptura brusca, por possuir menor capacidade de deformação e, portanto, não absorver bem as tensões sofridas pela alvenaria. Santos (2008) enfatiza que, ao ser comprimida, a argamassa tende a expandir-se lateralmente, nesse caso as forças de atrito entre a mesma e os blocos pode ocasionar o fendilhamento da unidade, ou então pode ocorrer o esmagamento da argamassa.

Quanto ao módulo de elasticidade da alvenaria, este é dependente do módulo de elasticidade de seus componentes, ou seja, de suas unidades e do material das juntas (SAHLIN, 1971; SHUBERT, 1977 apud COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT, 1978). Santos (2008) verificou que o módulo de elasticidade de prismas de alvenaria não sofre alteração com o aumento da resistência da argamassa, porém são influenciados pela geometria do bloco, isto é, prismas com blocos de parede maciça tem módulo de elasticidade maior do que aqueles com blocos de paredes vazadas.

Tal comportamento também foi observado por Pasquali (2007) em ensaios realizados em pequenas paredes, onde o módulo de elasticidade foi influenciado pela geometria do bloco e pelo tipo de argamassamento. Isso significa que quando a argamassa de assentamento de uma alvenaria é aplicada sobre todas as paredes dos blocos, inclusive as internas, o que é chamado de argamassamento pleno, o módulo de elasticidade apresenta valores superiores aos casos em que a argamassa é aplicada apenas nas paredes externas dos blocos, conhecido por argamassamento longitudinal. Esse fator tem grande influência também na resistência à compressão da alvenaria, representando um aumento significativo da mesma quando utilizado argamassamento pleno. O efeito do tipo de argamassamento é mais acentuado em alvenarias

com blocos de paredes maciças, em que a argamassa tem maior influência no comportamento mecânico do elemento.

Os resultados encontrados para estudos em alvenaria estrutural demonstram a complexidade desse sistema construtivo e a dificuldade em compreender com clareza o comportamento dos elementos. As diversas variáveis possíveis de se encontrar em paredes de alvenaria dificultam a formação de um conhecimento universal acerca de suas propriedades, o que evidencia ainda mais a necessidade de contínuos estudos acerca do tema.

3. ALVENARIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

3.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO FOGO EM PAREDES.

O ensaio para determinação da resistência ao fogo de componentes construtivos estruturais é descrito pela norma brasileira NBR 5628 (ABNT, 2001). Ela determina que os elementos a serem ensaiados devem ser submetidos a um programa térmico padrão, definido por uma curva de elevação da temperatura no tempo, e ao final do ensaio alguns requisitos devem ser atendidos para que o elemento seja considerado aceitável em sua função.

A curva padrão temperatura-tempo, ou curva de incêndio padrão, é uma curva sempre crescente que simula a elevação da temperatura durante o período de incêndio. Essa simulação é feita de forma geral, sem considerar as características peculiares do ambiente em que o sinistro ocorre, nem a quantidade de material combustível existente, por isso não se trata de uma representação exata da realidade (SILVA, 1997).

As curvas mais utilizadas como referência, segundo Silva (1997), são as indicadas pela norma internacional ISO 834 (ISO, 1999) e pela norma americana ASTM E119 (ASTM, 2015). A curva dada pela norma brasileira é bastante semelhante à da ISO, e está representada na Figura 6.

Para as paredes, especificamente, o ensaio de resistência ao fogo consiste em aproximar uma amostra de tamanho representativo da parede real, ou no mínimo com dimensões de 2,5 x 2,5 m, da boca de um forno aquecido conforme a curva de incêndio-padrão, por um determinado tempo, de modo a acompanhar o comportamento do elemento no período de exposição.

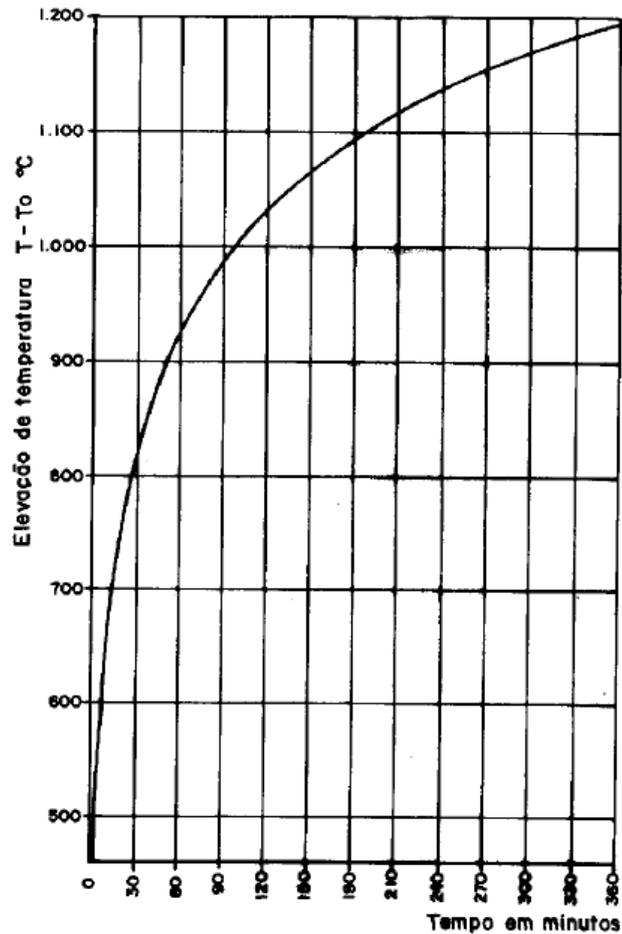


Figura 6 - Curva padrão de temperatura no tempo (NBR 5628:2001).

O tempo durante o qual a parede deve permanecer com sua funcionalidade adequada depende de sua função na edificação. As paredes podem ter função apenas de vedação, como podem servir como elementos estruturais da edificação. Também existem elementos verticais que são projetados com finalidade de compartimentar ambientes, ou seja, são pensadas para que tenham a função de impedir que as chamas, fumaças e gases quentes se alastrem para as demais áreas da edificação, bem como impedir o aumento excessivo da temperatura nas zonas adjacentes ao foco do incêndio, permitindo assim a fuga em segurança dos usuários, o acesso dos combatentes na edificação e a minimização de danos das edificações adjacentes. Para estas paredes, as normas exigem que resistam aos ensaios durante o tempo recomendado considerando três requisitos básicos: estanqueidade, isolamento térmico e resistência mecânica.

3.1.1. Tempo requerido de resistência ao fogo – TRRF

A norma brasileira NBR 14432 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – procedimentos (ABNT, 2000) estabelece condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação para que seja evitado o colapso da estrutura em situação de incêndio. Além de trazer diversas informações básicas acerca do tema, esta norma introduz o conceito de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo, o TRRF.

O TRRF trata-se de um período mínimo durante o qual uma amostra de um elemento construtivo deve resistir ao fogo, atendendo aos requisitos exigidos, quando sujeita ao incêndio-padrão (NBR 14432, 2000). Os elementos têm seu TRRF determinado a partir de uma tabela do Anexo A da referida norma, que leva em consideração a ocupação, ou uso, da edificação, a profundidade do subsolo, caso se aplique, e a altura da edificação. Os tempos requeridos variam de 30 a 120 minutos, dependendo da situação observada.

3.1.2. Estanqueidade

Por estanqueidade, entende-se a capacidade da parede de impedir que gases quentes, fumaça tóxica ou labaredas se propaguem para o lado não exposto às chamas. Como citado anteriormente, essa característica é exigida quando há necessidade de compartimentação vertical das peças, como, por exemplo, em rotas de fuga e escadas enclausuradas.

O requisito de estanqueidade geralmente falha ao ocorrerem manifestações de fissuras, rachaduras ou falhas por outros mecanismos, como *spalling*, que causem abertura de tal magnitude que permitam a passagem dos gases ou chamas através da parede. Em laboratório, o ensaio previsto pela NBR 5628 (ABNT, 2001) consiste em aproximar do local danificado, a uma distância máxima de 30 mm da amostra, sem que haja contato com a mesma, por um período de 10 segundos, um chumaço de algodão, com características também normatizadas, a fim de verificar se há passagem de gases que permitam o algodão incandescer, inflamar ou fumegar. O procedimento deve ser repetido a curtos intervalos de tempo, a fim de realizar o monitoramento da estanqueidade da amostra.

3.1.3. Isolamento térmico

O isolamento térmico também é um requisito que visa a segurança dos ocupantes e dos responsáveis por ações de combate ao incêndio da edificação. Ao ser atendido esse critério,

permite-se que haja circulação no ambiente adjacente ao incêndio sem que as temperaturas atinjam níveis insuportáveis para os usuários.

Para que o critério de isolamento seja atendido, a temperatura na face não exposta da amostra não deve sofrer elevação, a partir do início do aquecimento, superior a 140°C em média ou 180°C em qualquer ponto de medição. Tais temperaturas são medidas por no mínimo cinco termopares e registradas continuamente, ou a intervalos de no máximo 5 minutos.

3.1.4. Resistência mecânica

É imprescindível, sobretudo em paredes estruturais, que após a exposição térmica aliada ao carregamento mecânico, a amostra apresente-se estável estruturalmente, sem deslocamentos transversais ou deformações excessivas e sem ocorrência de ruína por, no mínimo, o tempo requerido de resistência ao fogo. O componente estrutural é considerado inutilizado após a ocorrência de ruptura ou de deslocamentos maiores que o aceitável. (NBR 5628, 2001)

Segundo a norma brasileira, o carregamento aplicado durante o ensaio deve ser reaplicado após 24 horas de seu fim, caso a amostra não tenha sido levada a ruína durante o mesmo.

3.2. COMPORTAMENTO DE ALVENARIA ESTRUTURAL SOB ALTAS TEMPERATURAS

Embora existam regulamentações nacionais e internacionais para a realização dos ensaios de resistência ao fogo em paredes, sejam elas de vedação ou estrutural, os equipamentos e a estrutura física que tais ensaios demandam os tornam bastante onerosos. Por esse motivo, algumas adaptações são feitas por parte dos pesquisadores para que seja possível avaliar o comportamento desses elementos de maneira mais simplificada. Dessa forma, a realização de ensaios fora do padrão estabelecido dificulta que sejam feitas comparações e constatações definitivas acerca desses componentes, além de não ser possível corroborar os resultados que por vezes são obtidos.

Adicionalmente, ao contrário das estruturas de concreto, cujo comportamento durante o fogo e sua resistência residual pode ser mais facilmente analisado por meio de diversos ensaios desenvolvidos e conhecimentos disseminados, poucos estudos foram realizados no que tange a verificação das estruturas de alvenaria pós ocorrência de incêndio. Os ensaios especificados pelas normas fornecem valores de isolamento, estanqueidade e resistência mecânica que se

aplicam somente para determinada configuração específica, o que não os permite serem estendidos para outras configurações devido à grande variabilidade dos materiais, das condições de contorno do elemento, entre outros (NGUYEN; MEFTAH, 2012).

Sendo um dos trabalhos que norteiam os estudos que foram realizados nesta pesquisa, Nguyen e Meftah (2012) testaram paredes em tamanho representativo, com e sem aplicação de cargas, a fim de verificar sua resistência em relação aos principais critérios requeridos para estes elementos. Neste ensaio foram utilizados blocos cerâmicos vazados, fazendo variação entre tamanho dos blocos, orientação dos furos, carregamento aplicado, restrições da amostra e tipos de juntas.

Em uma das amostras foi utilizada uma junta fina de argamassa colante como elemento de união dos blocos, para fins de ser comparada com uma segunda amostra, com juntas de argamassa tradicional. Apesar de terem sido tomadas as precauções recomendadas e designadas por normas europeias para as amostras com juntas de argamassa colante, como redução de carregamento e utilização de material isolante, esta apresentou um tempo de resistência ao fogo de cerca da metade da amostra com junta tradicional. Esse comportamento foi atribuído ao fato de que a argamassa colante não possui capacidade de absorção e acomodação de deformações, como ocorre com argamassas tradicionais.

Em adição, ambas as amostras apresentaram a ocorrência de *spalling* localizados, que se apresentaram em forma de deslocamentos das paredes dos blocos, conforme visualizado na Figura 7, atribuídos à deformação térmica sofrida e aos danos originados nos mesmos. Este comportamento, porém, mostrou-se mais significativo na amostra com juntas finas de argamassa colante do que com argamassa tradicional.

Para paredes sem função estrutural, ou seja, aquelas que não sofreram aplicação de carregamento durante o ensaio, foram restringidas três de suas extremidades, deixando apenas uma das bordas verticais livres. Essa configuração ocasionou *spalling* generalizado na face exposta ao fogo da parede. Embora os deslocamentos, neste caso, não tenham representado a falha estrutural da amostra ensaiada, pôde-se confirmar a influência das restrições das expansões térmicas nos resultados obtidos após exposição ao fogo.

Portanto, em seu trabalho, Nguyen e Meftah (2012) observaram que o mecanismo predominante que norteia a resistência ao fogo em paredes estruturais de blocos cerâmicos é a perda de estabilidade estrutural devido à ocorrência de *spalling* localizado, o que chamou a

atenção para este fenômeno, que é largamente citado por pesquisadores na área de concreto, mas não possui muitas menções no que diz respeito à alvenaria.

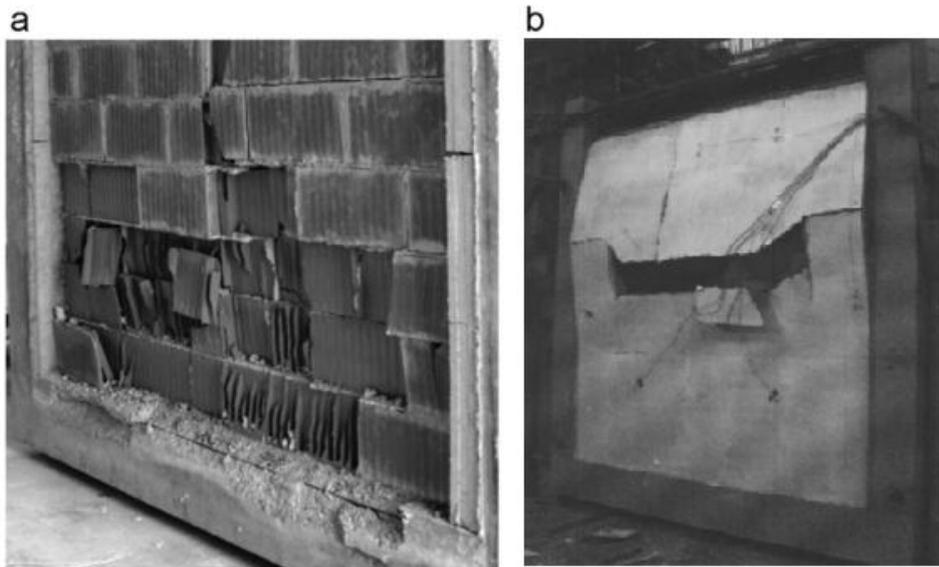


Figura 7 – Ocorrência de Spalling nas paredes estruturais. (a) Com juntas de argamassa tradicional, vista do lado exposto. (b) Com juntas de argamassa colante, vista do lado não exposto (NGUYEN, T.-D.; MEFTAH, 2012).

Souza (2017) avaliou a influência do revestimento e do carregamento no desempenho térmico de amostras em tamanho real. Em sua pesquisa, o autor verificou o colapso da alvenaria a cerca de 100 minutos do início do ensaio, quando esta foi submetida a um carregamento de 100 kN/m, sem a presença de revestimento na face exposta (Figura 8a). Quando aplicado um revestimento argamassado na face exposta de 15 mm de espessura, a alvenaria, estando sujeita ao mesmo carregamento, manteve sua estabilidade estrutural, apresentando, no entanto, destacamento de todo o revestimento argamassado, além de deslocamento da face exposta do bloco (Figura 8b).

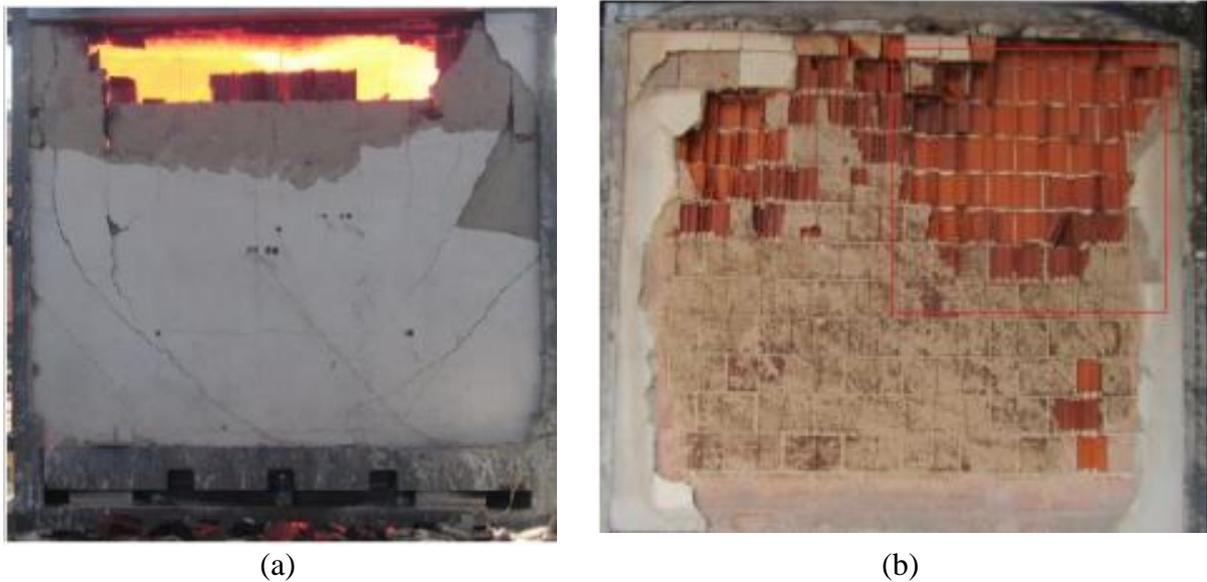


Figura 8 – Alvenarias com função estrutural em altas temperaturas.
 (a) Sem revestimento na face exposta (b) Revestimento em argamassa de 15 mm de espessura na face exposta. (SOUZA, 2017).

A ocorrência de *spalling* em amostras de paredes de alvenaria estrutural submetidas a altas temperaturas também foi registrada por Al-Sibahy e Edwards (2013), porém, neste caso os blocos em questão eram elaborados com concreto leve e as amostras utilizadas foram de tamanho reduzido – miniparedes.

Tais amostras foram ensaiadas com aumento de temperatura em ambas as faces simultaneamente, o que difere do que é recomendado pelas normas, tanto brasileiras como internacionais. Mesmo assim, foi possível avaliar as deformações verticais, a distribuição de temperatura nas faces e o modo de falha das amostras. As miniparedes que foram construídas com blocos de concreto com adição de argila expandida sofreram efeito de *spalling* à uma temperatura de 400°C, mesmo sem aplicação de carga sobre elas. A justificativa dada pelos autores para esta ocorrência baseou-se no fato que os blocos possuíam sua microestrutura bastante densa, apresentando reduzida permeabilidade. Este fenômeno é explicado por diversos outros pesquisadores e está relacionado aos mecanismos de *spalling* em concreto, conforme será descrito no item 3.2.3.

De maneira semelhante ao que foi feito por Al-Sibahy e Edwards (2013), o trabalho desenvolvido por Ayala (2010) também apresenta ensaios em pequenas paredes confeccionadas com blocos de concreto, focando sua pesquisa na redução da resistência à compressão da alvenaria devido à exposição a altas temperaturas. Foi verificado o

comportamento em temperatura ambiente e, posteriormente, à 200°C, 400°C, 600°C, 700°C e 800°C. Também foram expostas amostras dos blocos utilizados para a elaboração das paredes às taxas de temperatura citadas acima, e da argamassa de assentamento à 200°C e 400°C, afim de verificar o comportamento dos elementos individualmente.

Para determinação da perda de resistência à compressão, foram ensaiadas três pequenas paredes para cada temperatura, e foram registrados os carregamentos aplicados até a ruptura, bem como os deslocamentos verticais sofridos pelas amostras. É possível verificar pelos resultados obtidos para as relações tensão-deformação que até 200°C as tensões sofreram uma redução mínima para uma mesma deformação, enquanto que de 200 a 600°C a redução pode ser considerada moderada. Entre 600 e 800°C, porém, a redução das tensões suportadas é consideravelmente grande e as deformações sofridas demonstram a deterioração da alvenaria.

Tal deterioração também é verificada quando se observa a perda de resistência à compressão das miniparedes com o aumento da temperatura. Segundo Ayala (2010), as perdas de resistência, em comparação com o que foi medido em temperatura ambiente, chegaram a 60% à 700°C e a 83% com temperatura de exposição de 800°C. Esses são dados importantes e preocupantes, devido ao fato de que, em um incêndio real, as temperaturas podem atingir mais de 900°C e a capacidade de carga das alvenarias será, portanto, consideravelmente reduzida .

Adicionalmente à redução da resistência à compressão das miniparedes, o módulo de elasticidade das mesmas também sofreu grande decréscimo, chegando a 98% para a temperatura de 800°C em relação ao ensaio à temperatura ambiente (AYALA, 2010). As relações tensão-deformação e a redução da resistência à compressão das miniparedes estão representadas graficamente na Figura 9a e Figura 9b, respectivamente.

CUNHA et al. (2014) também observaram para miniparedes de alvenaria submetidas à ação de altas temperaturas e carregamento axial uma redução na resistência à compressão, resultando em cerca de 50% da resistência inicial, tanto para parede de blocos cerâmicos como para blocos de concreto. Similarmente, Rigão (2012a) registrou uma redução de cerca de 34% na resistência à compressão de miniparedes após exposição térmica à temperaturas superiores a 900°C.

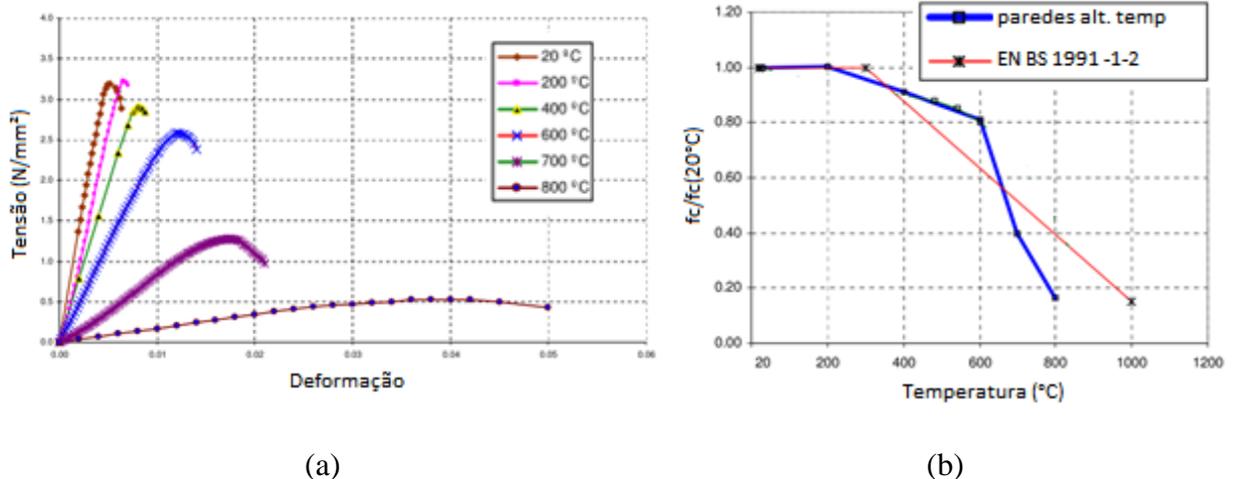


Figura 9 - Comportamento de miniparedes expostas à diferentes taxas de temperatura. a) Diagramas tensão-deformação. b) Redução da resistência à compressão. (AYALA, 2010)

3.2.1. Propriedades dos Materiais

Outras observações apontadas pelos autores que executaram ensaios termomecânicos em paredes de alvenaria são as alterações nas características dos materiais envolvidos no ensaio. Neste aspecto, Andreini et al. (2015) analisaram corpos de prova de materiais utilizados em blocos de alvenaria, como argila, concreto leve, concreto celular autoclavado, entre outros, e os tipos mais usuais de argamassa, comparando suas propriedades a temperaturas elevadas com as propriedades à temperatura ambiente. Para as argamassas, a resistência à compressão apresenta um acréscimo até certa temperatura, após a qual começa a decrescer.

Foi observada para os diversos tipos de blocos uma tendência de redução da sua resistência à compressão e aumento da deformação última dos mesmos, conduzindo, portanto, a uma redução do módulo de elasticidade do material. Em uma análise do material cerâmico componente de blocos de alvenaria de vedação, NGUYEN et al. (2009), por sua vez, observaram um aumento na resistência à compressão e no módulo de elasticidade com o aumento da temperatura, seguido de um decréscimo acelerado a partir dos 750°C. O comportamento da cerâmica, no entanto, está diretamente relacionado com a matéria prima utilizada para sua fabricação, bem como com os processos de manufatura, o que torna muito difícil a generalização dos resultados. Além disso, diferentes procedimentos de ensaio dificultam a comparação de resultados.

O mesmo comportamento citado por Andreini et al. (2015) para as argamassas foi observado por outros autores como Al-Sibahy e Edwards (2013), Rigão (2012), Andreini e Sassu (2011)

e Ayala (2010). Entretanto, para as pequenas paredes como um todo, Al-Sibahy e Edwards (2013) encontraram reduções da capacidade de carga e do módulo de elasticidade após exposição ao fogo, em geral, muito pequenas. Os autores atribuem a pequena perda de resistência à compressão ao fato de que, trabalhando em conjunto, há um balanço entre a perda de resistência do bloco e o ganho de resistência da argamassa. Porém, a máxima temperatura a que as paredes do ensaio em questão foram expostas foi de 400°C, temperatura em que, segundo Rigão (2012) e Karahan (2011) as argamassas ainda apresentam resistência à compressão satisfatória, enquanto em temperaturas mais elevadas a resistência residual tem redução considerável. Isto sugere que, caso Al-Sibahy e Edwards (2013) houvessem, em seus ensaios, aquecido as amostras a temperaturas maiores, provavelmente teriam encontrado resultados semelhantes aos de Ayala (2010), em que a redução de resistência foi significativa.

Andreini et al. (2015) salientam que, mesmo que sejam importantes análises a nível de material, é necessário levar em consideração a interação mecânica entre os blocos e juntas de argamassa, com suas geometrias, texturas, dimensões e restrições, para compreender o comportamento dos elementos em conjunto.

3.2.2. Deslocamentos Transversais

Quando um elemento estrutural é submetido a um gradiente térmico, observa-se, devido às maiores dilatações térmicas do lado exposto ao fogo, a ocorrência de flexão do elemento. Diferentes modos de deformação devido à exposição térmica foram analisados por Shields et al. (1988) em um modelo de parede de alvenaria de tamanho reduzido. Pôde-se constatar que a máxima deflexão, para determinada situação, depende das condições de contorno a que o elemento está submetido, isto é, varia conforme as restrições das bordas da amostra.

O mesmo foi observado por Nguyen e Meftah (2012), que obtiveram diferentes configurações de deformação ao variarem as condições de contorno de amostras de alvenaria de tamanho real e aferirem os deslocamentos fora do plano em diversos pontos das paredes (Figura 10). Os exemplares sem carregamento apresentaram deflexão em duas direções, mesmo que para o caso ensaiado as laterais tenham tido sua expansão térmica restringida. Isso por que a ligação entre a parede e o quadro de suporte originam apenas esforços de atrito na direção transversal, e estes não são suficientes para impedir deslocamentos fora do plano. A amostra, portanto, comportou-se como um diafragma preso apenas por suas quatro pontas. Paredes com função estrutural, por sua vez, apresentam uma deformação com curvatura em uma única direção,

comportando-se como se a carga aplicada exercesse um papel semelhante a um engaste. Como os furos dos blocos utilizados foram posicionados na vertical, a argamassa que se acumula na parte inferior da parede - que cai através dos furos no momento da execução - exerce uma função coesiva da parede com o suporte, criando também um apoio engastado.

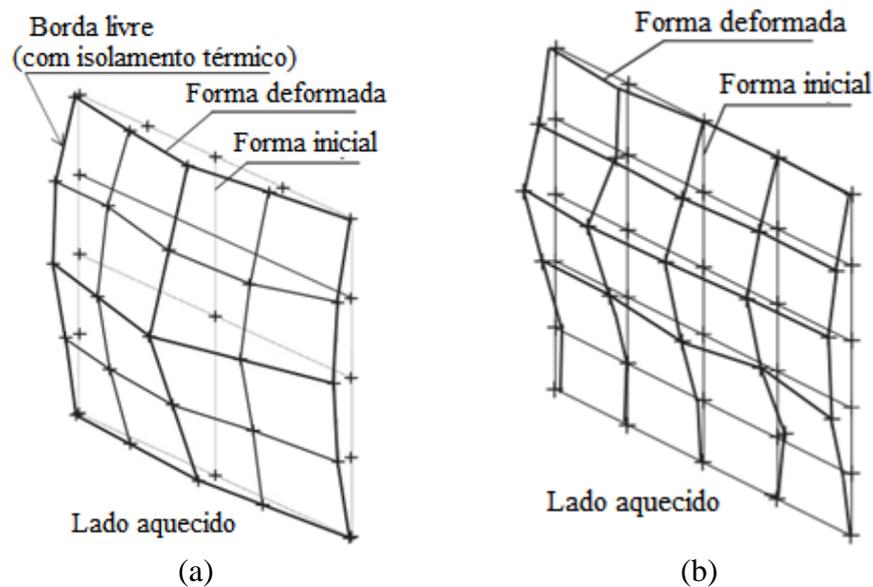


Figura 10 - Deflexões medidas em paredes ensaiadas a altas temperaturas. (a) Parede de vedação. (b) Parede estrutural. (NGUYEN; MEFTAH, 2012).

Em seu estudo de caso, Navarro e Ayala (2015) observaram a deformação de um muro de divisa submetido à carga de incêndio que acometeu um estoque de óleo, localizado no terreno ao lado. Pode-se observar na Figura 11 a curvatura em direção à face exposta ao fogo (à direita na imagem) e visualizar a característica da deformação quando a alvenaria tem deslocamento livre em uma de suas extremidades, evidenciando novamente a relevância dos vínculos no comportamento frente ao fogo.



Figura 11 – Inclinação de um muro de alvenaria devido às ações térmicas (NAVARRO; AYALA, 2015).

O deslocamento transversal de paredes expostas a altas temperaturas também foi observado por Nahhas et al. (2007). Como era esperado, os maiores registros foram obtidos no centro da parede. Nesta análise, destacou-se a divisão das deformações horizontais em duas fases: uma primeira com deflexões aumentando de forma linear com o aumento da temperatura, e a segunda, em que os deslocamentos se mantiveram aproximadamente constantes.

Nguyen et al. (2009) afirmam que o deslocamento horizontal da parede aumenta rapidamente no início do ensaio, quando há um rápido incremento de temperatura na face exposta e forma-se um grande gradiente térmico ao longo da espessura. Nesse momento, portanto, a dilatação térmica sofrida pela face exposta é superior à face não exposta, o que origina a deflexão observada. Após decorrido algum tempo, a parede começa a retornar a sua posição original. Esse comportamento, segundo os autores, se deve ao fato de a temperatura no interior da parede começar a aumentar também, tendendo a equiparar as dilatações térmicas. O decréscimo do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura também influencia nesse fenômeno. Tais afirmações foram feitas para paredes de vedação, sem função estrutural.

Byrne (1979), por sua vez, desenvolveu uma teoria sobre o comportamento de paredes estruturais submetidas à ação do fogo no que tange o deslocamento fora do plano. O autor cita que a tendência observada para as curvas de deformação no tempo, com o aumento de temperatura, pode ser explicada por uma combinação entre a aplicação de carga e os efeitos térmicos. A partir disso, ele divide o comportamento em três fases: primeiro, um rápido aumento da deflexão, causado pelo efeito das deformações térmicas, também citado por Nguyen et al. (2009), seguido de uma fase de estabilização dos deslocamentos, devido ao fato

de que a carga aplicada, agora com certa excentricidade, contrabalança o efeito térmico, inibindo a deformação. Por fim, a terceira fase é caracterizada pelo recomeço das deflexões e ela inicia no momento em que a superfície da parede adjacente ao fogo perde sua resistência devido à deterioração, então a carga aplicada atinge maior valor de excentricidade, acelerando a ocorrência de deformação. Paredes mais esbeltas tendem a não sofrerem influência da segunda e terceira fase do seu deslocamento, pois atingem a deformação crítica devido aos efeitos térmicos muito rapidamente, antes que as demais fases iniciem (BYRNE, 1979).

Em contrapartida, Nadjai et al. (2003) trazem o fenômeno conhecido como *reverse bowing*, ilustrado por Russo e Sciarretta (Figura 12), que admite que, ao ocorrer a degradação da superfície exposta ao fogo, é originado um carregamento excêntrico em direção ao fogo, que nesta análise, se o carregamento for grande o suficiente, reverte o sentido da deflexão, mitigando os efeitos da expansão térmica. São duas explicações diferentes para o fenômeno, mas ambas identificam o carregamento como um fator importante para o comportamento estrutural de uma parede submetida à situação de incêndio.

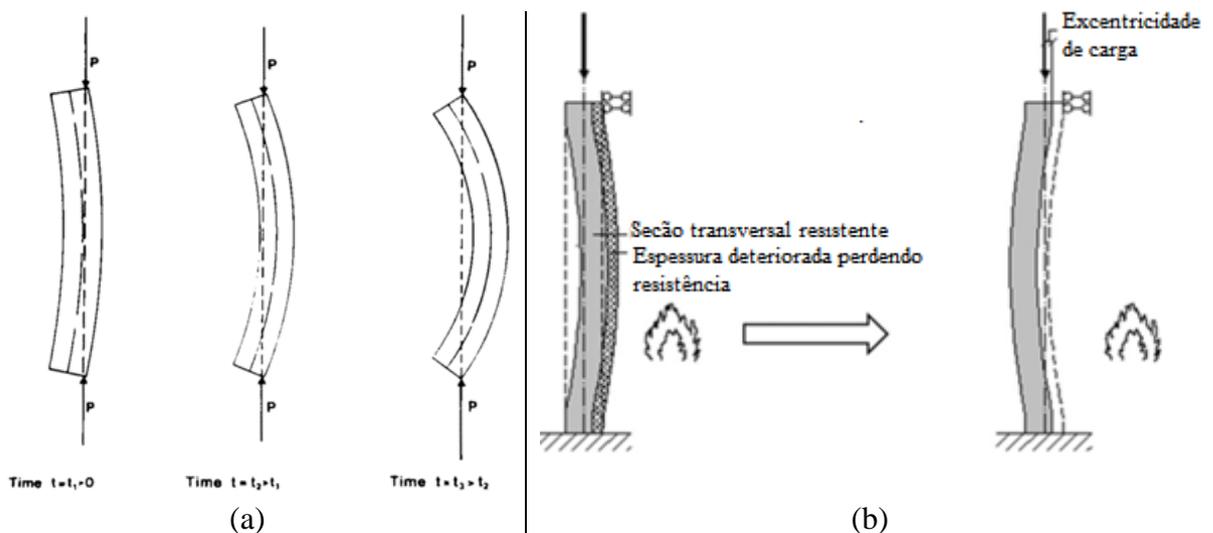


Figura 12 – Deslocamentos horizontais. (a) Aumento da deflexão devido à aplicação de carregamento (BYRNE, 1979) (b) Reversão da deflexão - Reverse Bowing (RUSSO; SCIARRETTA, 2013).

Souza (2017) também avaliou as deformações transversais de alvenarias estruturais ou não, com e sem revestimento. Comparando as mesmas tipologias, o autor encontrou maiores deformações para alvenarias sem carregamento vertical, o que foi atribuído à ausência da restrição que a aplicação de carga origina em uma das direções da parede. Soma-se a isso o fato de a carga contrabalançar a deformação, reduzindo a deflexão máxima, conforme citado no parágrafo anterior. O autor supracitado também encontrou em seu estudo menores

deformações para paredes dotadas de revestimento na face exposta, devido à maior proteção térmica que tal revestimento proporciona à alvenaria.

3.2.3. *Spalling* nas alvenarias

Segundo Fu e Li (2010), *spalling* é o rompimento, violento ou não, da superfície de um elemento estrutural quando este é exposto ao calor excessivo ou a um rápido aumento de temperatura. Portanto, o termo é utilizado para designar os deslocamentos ocorridos nos elementos quando submetidos, sobretudo, a situações de incêndio.

Por ser um fenômeno que ocorre predominantemente em elementos de concreto, o conhecimento acerca dos deslocamentos devido à ação de altas temperaturas nesse material é amplamente estudado, avaliado e difundido. Neste caso, os mecanismos predominantes que norteiam o fenômeno têm natureza termo-hidráulica e termomecânica.

O processo termomecânico está relacionado aos gradientes de dilatação térmica que surgem no elemento. Já o processo termo-hidráulico está associado à transferência de massa, ou seja, ar, vapor ou água líquida, pela rede de poros do material, o que resulta em aumento da poro-pressão e formação de gradientes de poro-pressão. Ambos os processos supracitados ocorrem simultaneamente, o que torna o fenômeno de deslocamentos um processo termo-hidro-mecânico (KALIFA et al., 2000).

Deste modo, forças internas são originadas no concreto como uma sobreposição de poro-pressões, tensões devido aos gradientes térmicos e retrações devido à evaporação de água. Quando essas forças internas excedem a capacidade resistente do material, acabam por surgir fissuras e ocorrer deslocamentos. (SANJAYAN; STOCKS, 1993, apud FU; LI, 2010).

Diversos estudos realizados identificaram alguns fatores que influenciam a ocorrência de *spalling* no concreto, tais como permeabilidade do material, grau de saturação, tamanho e tipo do agregado, geometria do elemento, taxa de aquecimento e carregamento aplicado. Tais fatores podem ser divididos em duas categorias: intrínsecos e externos (FU; LI, 2010). Devido às suas características, portanto, os concretos de alta resistência estão mais suscetíveis aos deslocamentos e, por esse motivo, tornaram-se o foco da maioria dos estudos relacionados ao *spalling*.

No caso da alvenaria de blocos cerâmicos, o mecanismo causador do *spalling* é de natureza somente termomecânica, pois os blocos já são submetidos a altas temperaturas no momento

de sua fabricação e, dessa forma, não há quantidade considerável de água livre no interior de seus poros. Portanto, o deslocamento que ocorre em uma parede de alvenaria constituída de blocos cerâmicos é fruto dos gradientes de temperatura originados pela ação do fogo, que originam dilatações térmicas, muitas vezes de forma não uniforme.

Nguyen e Meftah (2012), ao observarem em sua pesquisa a ocorrência de deslocamentos das paredes dos blocos cerâmicos, atribuíram alguns mecanismos como causas do fenômeno, conforme ilustrado pela Figura 13. Os autores identificaram, através de uma câmera de alta velocidade, que, para alguns blocos, o deslocamentos consistia em um destacamento da parte frontal dos mesmos, que caíam sem que se fragmentassem. Aparentemente, neste caso, o *spalling* se dava devido ao rompimento das abas internas, que delimitam os orifícios dos blocos (Figura 13a).

Outro mecanismo analisado manifestou-se através de uma expulsão violenta devido à flambagem da parte frontal dos blocos, que se comportaram como placas submetidas à compressão em seu plano e presas nas juntas argamassadas. Este mecanismo está ilustrado na Figura 13b.

Por último, e menos frequentes, foram identificados blocos que romperam em pequenos pedaços, devido a um possível esmagamento (Figura 13c). Aparentemente, estes casos ocorreram devido a falhas ou defeitos pré-existentes nos blocos, e não a um comportamento intrínseco da cerâmica, de ser quebradiça quando aquecida e comprimida.

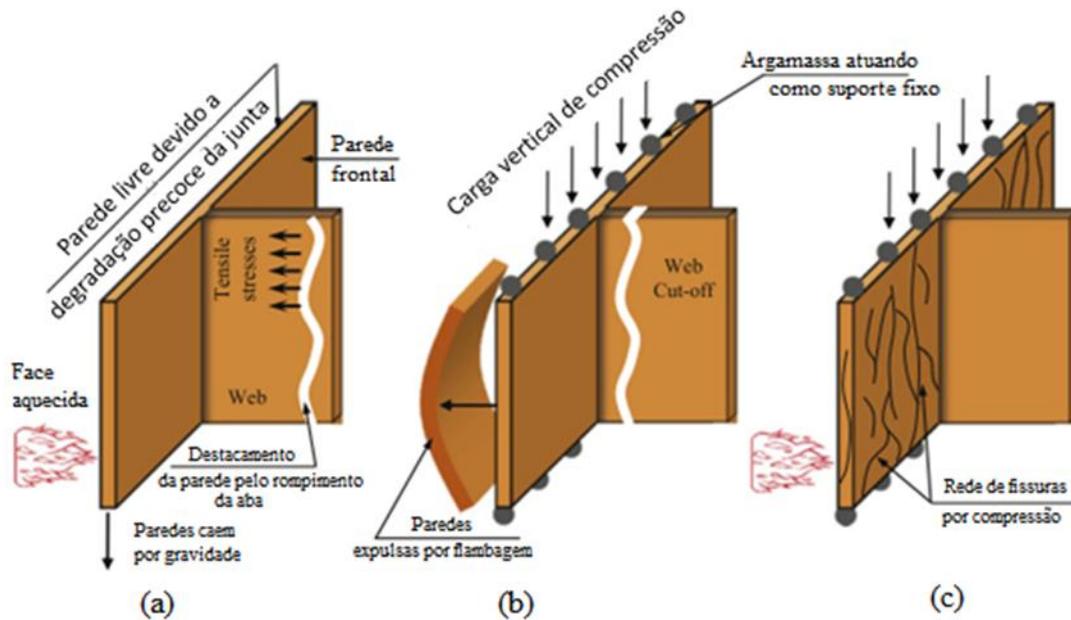


Figura 13 – Representação dos modos de ruptura observados em blocos cerâmicos. (a) Destacamento. (b) Flambagem. (c) Esmagamento. (NGUYEN; MEFTAH, 2012).

Para modelar numericamente a ocorrência de *spalling* na alvenaria estudada, Nguyen e Meftah (2014) refinaram alguns conceitos expostos na pesquisa experimental. Foi assumido que, devido à pequena espessura das paredes dos blocos analisados, as principais tensões nesses elementos se dão em seu próprio plano. Dessa forma, as paredes expostas ao fogo estão sujeitas à compressão, ocasionada pela tentativa de dilatação restringida pela vizinhança, enquanto as paredes internas do bloco sofrem tensões de tração (Figura 14). Essas tensões de tração justificam o primeiro mecanismo citado por Nguyen e Meftah (2012), em que há destacamento da parede frontal do bloco, enquanto a compressão de tal parede propicia a ocorrência dos outros dois mecanismos: esmagamento e expulsão por flexão.

Os autores também relacionaram os mecanismos causadores dos deslocamentos com a perda de rigidez da argamassa de assentamento. Devido ao fato de que em análises experimentais o módulo de elasticidade da argamassa torna-se praticamente nulo a partir dos 600°C, foi suposto que, até atingir tal temperatura, as paredes do bloco ainda estão aderidas à argamassa, e, portanto, o deslocamento ocorre por meio de expulsão por flexão. Ao exceder os 600°C e perder rigidez, a argamassa deixa de exercer influência sobre o bloco, e então a parede frontal simplesmente cai ao ocorrer rompimento de uma das abas internas.

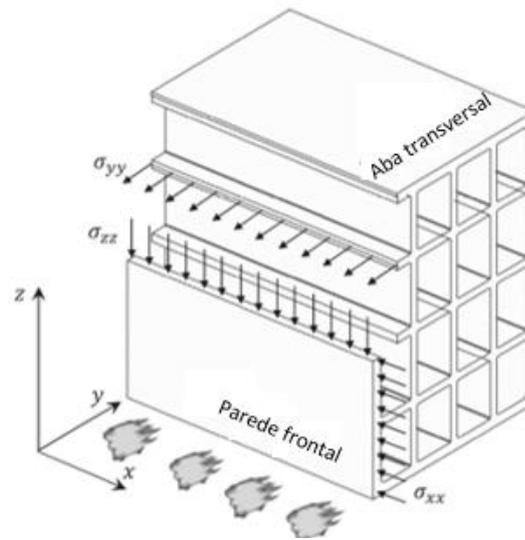


Figura 14 – Componentes de tensão em um bloco exposto a altas temperaturas (NGUYEN; MEFTAH, 2014)

Tais mecanismos foram observados para uma configuração específica de bloco, dessa forma, servem de base teórica para outras aplicações, porém não representam o comportamento de todos os blocos cerâmicos existentes. Dessa forma, faz-se necessária a análise dos materiais utilizados na construção civil brasileira para verificação da ocorrência de fenômenos similares.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais que foram utilizados na presente pesquisa, bem como os métodos e considerações utilizadas para alcançar os objetivos almejados.

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho teve por objetivo a análise do comportamento de paredes de alvenaria estrutural expostas a altas temperaturas e submetidas a tensões de confinamento durante a exposição. Para isso, confeccionaram-se paredes de tamanho reduzido, ou miniparedes, que foram acopladas a um forno aquecido por resistências elétricas, de forma a impor um aquecimento às amostras semelhante à curva padrão estabelecida por norma para ensaios de resistência ao fogo. Tal aquecimento atingiu um valor máximo de temperatura de 950°C, que foi mantido por um período de 4 horas.

Durante a exposição às altas temperaturas as amostras foram submetidas à ação de carregamento axial, de modo a simular as solicitações de serviço às quais as paredes de alvenaria com função estrutural estão sujeitas em situações reais. Para cumprir com o objetivo principal da pesquisa, os deslocamentos, ou expansões térmicas, laterais das amostras foram restringidos. Um quadro de reação foi projetado e executado para esse fim e para possibilitar a aplicação do carregamento, conforme será descrito nos próximos itens.

Com o objetivo de avaliar algumas variáveis existentes em alvenarias estruturais nos resultados obtidos experimentalmente, foram ensaiadas amostras com três tipos de blocos diferentes, com variadas espessuras de juntas e argamassas de assentamento, com e sem aplicação de revestimento argamassado. Para maior confiabilidade dos resultados obtidos, duas amostras por configuração de parede foram submetidas ao ensaio, totalizando, dessa forma, 14 amostras testadas.

Os materiais empregados na pesquisa, tais como argamassa e blocos, estão descritos a seguir, bem como a metodologia utilizada para sua caracterização e procedimentos para moldagem e ensaios das miniparedes.

4.2. MATERIAIS

As amostras estudadas foram construídas com blocos cerâmicos e argamassa tradicional, de forma a representarem a situação real das edificações brasileiras, além de argamassa polimérica a fim de testar a influência de tal tecnologia. As características dos materiais empregados na confecção das amostras são dadas a seguir.

4.2.1. Blocos

Foram utilizados para esta pesquisa três tipos diferentes de blocos, todos em material cerâmico produzidos pelo mesmo fornecedor. A diferença entre os blocos se deu na resistência e dimensões dos mesmos. Foram ensaiadas amostras com blocos de resistência de 7 e 10 MPa com 14 cm de largura e blocos de 7 MPa com 19 cm de largura. As dimensões e demais características dos blocos estão esquematizadas na Tabela 1. Os blocos têm paredes vazadas ou maciças e possuem dois septos centrais, que devem ser posicionados verticalmente no momento da confecção das amostras (Figura 15), de forma que a ação do carregamento se dê paralelamente à direção das cavidades.

Tabela 1 - Propriedade dos blocos cerâmicos utilizados.

| Identificação | Resistência Característica | Dimensões (l x h x c) | Resist. do prisma (argamassa fak 4MPa) | Rel. A. liq/A. bruta |
|---------------|----------------------------|-----------------------|--|----------------------|
| B1 | 7 MPa | 14 x 19 x 29 cm | ≈ 3,5 Mpa | ≈ 0,41 |
| B2 | 10 Mpa | 14 x 19 x 29 cm | ≈ 6,0 Mpa | ≈ 0,48 |
| B3 | 7 MPa | 19 x 19 x 29 cm | ≈ 3,0 Mpa | ≈ 0,36 |

Fonte: Adaptado de <<http://www.pauluzzi.com.br/produtos.php>>

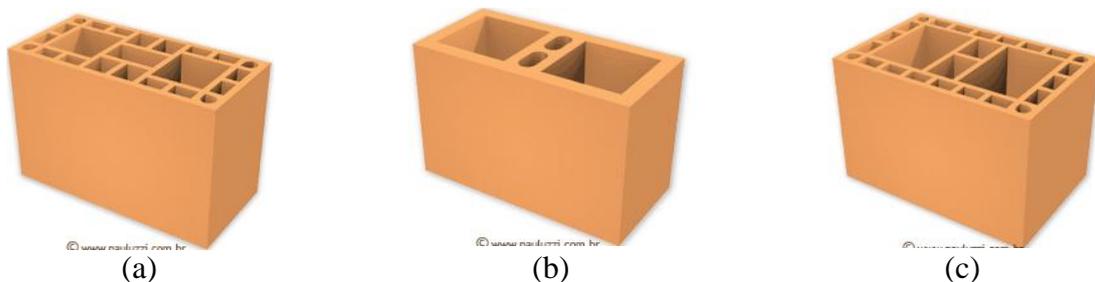


Figura 15 – Blocos estruturais cerâmicos utilizados. (a) B1. (b) B2. (c) B3. (<<http://www.pauluzzi.com.br/produtos.php>>)

4.2.2. Argamassas de assentamento

As argamassas tradicionais utilizadas para assentamento dos blocos foram preparadas com mistura pronta, fabricada por um fornecedor especializado, específica para uso em alvenaria estrutural. O uso de argamassa industrializada visou obter controle de qualidade do produto e controle de dosagem, além de garantir que as características da mesma sejam semelhantes ao que é utilizado na prática da construção civil. As resistências das argamassas estão de acordo com a NBR 15812-1 (ABNT, 2010), que estipula um valor mínimo de 1,5 MPa e máximo de 70% da resistência à compressão do bloco, referente a sua área líquida. Foram utilizadas argamassas com três resistências diferentes – 4, 6 e 10 MPa – de acordo com o bloco empregado. Tais valores de resistência representam a especificação do fornecedor e serão utilizados como designação das argamassas utilizadas. Contudo, as resistências à compressão reais foram determinadas através de ensaios de caracterização, e resultaram em valores que giram em torno dos especificados.

Também foi avaliada a utilização de argamassa polimérica para assentamento dos blocos, com o intuito de verificar o comportamento da mesma quando submetida ao calor excessivo e à ação de carregamento, observando as consequências para a alvenaria como um todo. A argamassa polimérica empregada está disponível, pronta para aplicação, no mercado e também é proveniente de um único fornecedor.

4.2.3. Revestimentos

Em uma das etapas da pesquisa, as amostras receberam revestimento de argamassa antes de serem ensaiadas. Foi empregado para o revestimento argamassado material industrializado, específico para este fim, proveniente do mesmo fornecedor das argamassas de assentamento. Tal revestimento foi executado com cerca de 1 cm de espessura, conforme o que é usualmente utilizado, a fim de verificar sua influência no comportamento das amostras.

4.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental realizado foi dividido em três etapas. Inicialmente, foi realizada uma etapa preliminar, a fim de caracterizar os materiais utilizados, posteriormente iniciou-se uma etapa exploratória (etapa 1), seguida por uma etapa de avaliação das variáveis envolvidas (etapa 2). Por fim, foi realizada a etapa em que é adicionado revestimento às amostras, constituindo, portanto, a etapa 3 dessa pesquisa. A Figura 16 apresenta um fluxograma com o

delineamento da pesquisa. As abordagens de cada etapa estão descritas nos próximos sub-ítem.

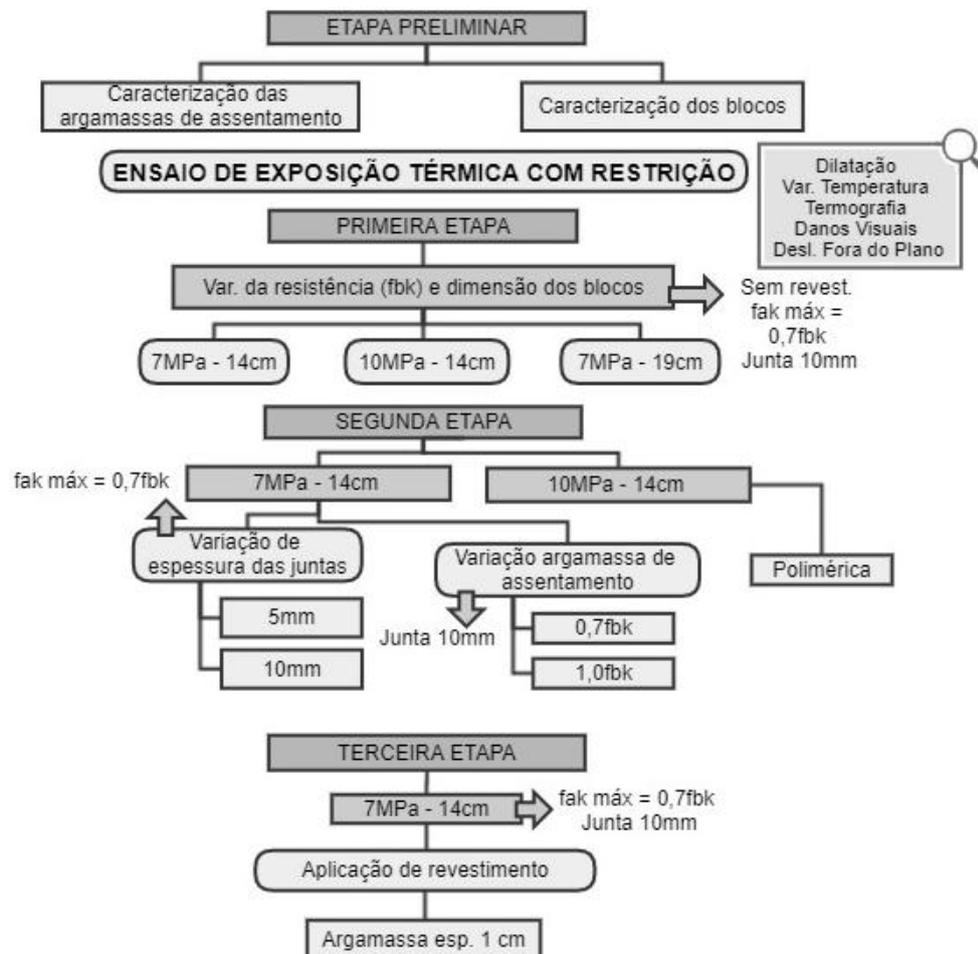


Figura 16 – Fluxograma de delineamento da pesquisa.

4.3.1. Etapa Preliminar

A etapa preliminar tratou-se de uma fase de caracterização dos materiais empregados. Foram realizados, portanto, ensaios nos blocos e argamassas, a fim de verificar suas propriedades básicas.

4.3.1.1. Caracterização das argamassas de assentamento.

Os ensaios realizados para as argamassas de assentamento tradicionais foram aqueles descritos pelas normas brasileiras NBR 13276 (ABNT, 2002) e NBR 13279 (ABNT, 2005), que tratam, respectivamente, da avaliação do índice de consistência da argamassa no estado fresco, e da resistência à tração na flexão e à compressão no estado endurecido, além de

ensaios para determinação do módulo de elasticidade das mesmas. Os ensaios de resistência à tração na flexão, conforme determinado pela norma indicada, foram realizados em três corpos de prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm por traço (Figura 17a), e os ensaios de compressão foram realizados com corpos de prova cúbicos de 4 x 4 x 4 cm, adaptando-se as metades oriundas do rompimento dos corpos de prova na flexão, totalizando, portanto, seis amostras por traço (Figura 17b).

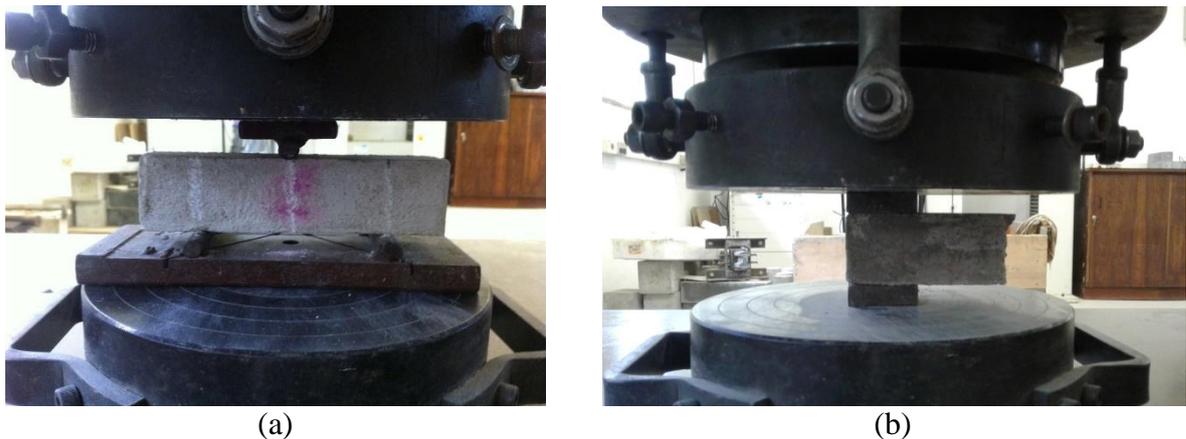


Figura 17 – Ensaio de (a) resistência à tração na flexão e (b) compressão nas argamassas.

Para determinação do módulo de elasticidade das argamassas, o procedimento utilizado foi o determinado pela NBR 8522 (ABNT, 2008), que determina o método de ensaio para determinação do módulo estático de elasticidade do concreto à compressão. Foram feitas algumas adaptações visando adequar o ensaio ao tipo de material utilizado, portanto, foram utilizados corpos de prova cilíndricos menores, com dimensões de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura e a velocidade de aplicação da carga foi reduzida para 0,25 MPa/s. Os deslocamentos causados nos corpos de prova foram lidos por meio de transdutores de deslocamentos, do tipo LVDT, acoplados aos mesmo (Figura 18) e registrados através do sistema de aquisição de dados do tipo QuantumX MX840B.



Figura 18 – Determinação do módulo de elasticidade das argamassas.

Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram devidamente retificados, a fim de garantir aplicação uniforme de carregamento. Conforme determinado pela norma supracitada, o nível máximo de carregamento para este ensaio foi de 30% da resistência à compressão das argamassas.

4.3.1.2. Caracterização dos blocos cerâmicos.

Para os blocos cerâmicos, foram realizadas caracterizações térmica e mecânica, a fim de verificar as propriedades das unidades a serem utilizados nos ensaios.

Foi realizado, para caracterização mecânica, ensaio para verificação da resistência à compressão dos mesmos, conforme descrito pelo Anexo C da norma brasileira NBR 15270-3 (ABNT, 2005). Para este ensaio, os blocos foram previamente capeados com argamassa rica em cimento, de acordo com a norma supracitada, a fim de obter uma superfície plana para aplicação do carregamento, e imersos em água durante pelo menos 6 horas, para que o ensaio à compressão fosse realizado com o bloco saturado. Foi utilizada uma placa metálica rígida para ampliar a área de aplicação da carga, visando distribuição uniforme na superfície do bloco. A Figura 19 mostra o processo de capeamento dos blocos e a preparação para o rompimento na prensa.



Figura 19 – (a) Capeamento dos blocos cerâmicos para ensaio de resistência à compressão. (b) Posicionamento na prensa para realização do ensaio.

Também de acordo com a NBR 15270-3 (ABNT, 2005), foi realizado ensaio para determinação da massa seca e do índice de absorção d'água (AA) das unidades cerâmicas, descrito pelo Anexo B da referida norma. A Figura 20 ilustra as amostras imersas em água para realização do ensaio.



Figura 20 – Amostras de blocos cerâmicos imersos em água para determinação do índice de absorção d'água (AA).

Para caracterizar mecanicamente os blocos, também foram realizados ensaios de determinação do módulo de elasticidade dos mesmos. A metodologia para aquisição dos valores das deformações durante o carregamento seguiu a utilizada por SILVA et al. (2015), que consiste na fixação de LVDTs de base 10 mm em duas paredes dos blocos (Figura 21). O carregamento máximo aplicado foi de 30% da resistência à compressão dos blocos, a uma taxa de 0,05 MPa/s.



Figura 21 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dos blocos cerâmicos.

A caracterização térmica das unidades se deu em nível de material, ou seja, da cerâmica que compõe os blocos. A caracterização da cerâmica foi realizada por meio de ensaios de condutividade térmica e dilatométrica do material

Na dilatométrica foram medidas as alterações nas dimensões das amostras enquanto submetidas ao aumento de temperatura, ou seja, a expansão térmica do material constituinte dos blocos. Os dados de condutividade térmica, por sua vez, foram utilizados para compreender a capacidade do material de conduzir calor.

Para os ensaios de condutividade térmica foram utilizadas três amostras cerâmicas ensaiadas a 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C e 500°C, e os resultados foram obtidos calculando-se a média entre as três amostras em cada nível de temperatura. O ensaio de dilatométrica do material cerâmico foi realizado com três amostras submetidas a temperatura de 20°C, 50°C, 100°C, 200°C e 300°C. Ambos acima descritos foram realizados no Laboratório de Cerâmica (LaCer) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4.3.2. Primeira Etapa

Na primeira etapa, foram elaboradas e expostas ao ensaio térmico miniparedes com os diferentes tipos de blocos citados no item 4.2.1, sem aplicação de nenhum tipo de revestimento. Como mencionado em item supracitado, foram utilizados três blocos diferentes,

com argamassas de assentamento de resistência correspondente a no máximo 70% das resistências características à compressão dos blocos. As juntas de assentamento entre os blocos nessa etapa foram executadas com espessura de 10 ± 3 mm, preenchidas com as argamassas especificadas, tanto vertical quanto horizontalmente.

Como citado anteriormente, para cada tipo de parede serão ensaiadas duas amostras, desta forma, para os ensaios realizados na primeira etapa, teremos seis amostras de três paredes diferentes, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Miniparedes para primeira etapa de ensaios.

| Parede | Identificação | Bloco utilizado | Argamassa utilizada | Espessura da junta |
|---------------|------------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| Paredes 1 e 2 | P1a e P1b | B1 | fak \approx 4,0MPa | 10 ± 3 mm |
| Parede 3 e 4 | P2a e P2b | B2 | fak \approx 6,0MPa | 10 ± 3 mm |
| Parede 5 e 6 | P3a e P3b | B3 | fak \approx 4,0MPa | 10 ± 3 mm |

4.3.3. Segunda Etapa.

Na segunda etapa foi escolhido para prosseguimento dos ensaios apenas um tipo de bloco dentre os ensaiados na etapa 1. Nesta etapa, variou-se a espessura das juntas e a argamassa utilizada na execução das amostras, a fim de verificar sua influência na resposta das mesmas às solicitações às quais serão submetidas. Como critério de seleção, optou-se pelo bloco de maior utilização na construção civil, de 14 cm de espessura, com resistência característica de 7 MPa - bloco B1. Para as miniparedes com argamassa polimérica, no entanto, foi utilizado o bloco de 10 MPa (B2), devido a dificuldades construtivas, já que os blocos B1 possuem paredes vazadas, o que dificultaria a aplicação da argamassa.

A segunda etapa compreende duas subetapas, conforme segue.

4.3.3.1. Etapa 2a.

Nesta fase do programa experimental foi avaliada, para um mesmo tipo de bloco, a relação entre a espessura das juntas horizontais das paredes com a ocorrência de danos e, conseqüentemente, com a resistência ao fogo do elemento ensaiado. Para essa etapa, foram ensaiadas mais duas amostras, executadas com o bloco B1 e junta de 5 mm de espessura, conforme Tabela 3, salientando que para a espessura de 10 mm os resultados já terão sido obtidos na etapa 1.

Tabela 3 - Miniparedes a serem ensaiadas na etapa 2a.

| Parede | Identificação | Bloco utilizado | Argamassa utilizada | Espessura da junta |
|---------------|------------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| Paredes 7 e 8 | P4a e P4b | B1 | fak \approx 4,0MPa | \approx 5mm |

4.3.3.2. Etapa 2b.

Para essa etapa de ensaios, o parâmetro variado foi a argamassa utilizada nas juntas das amostras. Dessa forma, para uma mesma espessura de juntas (10 mm) e mesmo tipo de bloco, avaliaram-se amostras com argamassa de assentamento de resistências diferentes, e também amostras construídas com argamassa polimérica (Tabela 4). Desta forma, torna-se possível verificar a influência desse parâmetro no comportamento das miniparedes, de modo a compreender as consequências das variações no material de preenchimento das juntas em uma possível situação de incêndio.

Salienta-se que, apesar de usualmente as juntas verticais de alvenarias construídas com argamassa polimérica tratem-se de juntas secas, para a presente pesquisa foi também aplicado o produto nessas juntas, visando manter a estanqueidade das miniparedes frente a ação das altas temperaturas e garantir a segurança durante a execução do ensaio.

Neste caso, precisaram ser construídas mais quatro miniparedes – duas amostras para cada tipologia – levando-se em conta que as amostras com argamassa de resistência de \approx 70% da resistência do bloco em relação à área bruta já haviam sido ensaiadas na primeira etapa.

Tabela 4 - Paredes a serem ensaiadas na etapa 2b.

| Parede | Identificação | Bloco utilizado | Argamassa utilizada | Espessura da junta |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------------|--------------------|
| Paredes 9 e 10 | P5a e P5b | B1 | fak \approx 10,0 MPa | 10 \pm 3 mm |
| Paredes 11 e 12 | P6a e P6b | B2 | Polimérica | - |

4.3.4. Terceira Etapa

Na terceira e última etapa foi avaliada a influência do revestimento na superfície exposta das amostras, e, novamente, somente uma tipologia de bloco foi utilizada nessa fase. Conforme citado anteriormente, o bloco escolhido foi o de 14 cm de largura e 7 MPa de resistência característica à compressão (B1), por ser o mais comumente utilizado na construção civil.

Conforme citado no item 4.2.3, foi utilizado revestimento argamassado de 10 mm de espessura. Tal revestimento foi executado somente na face exposta ao fogo, a fim de não prejudicar o posicionamento da instrumentação na face oposta. Dessa forma, mais duas amostras foram confeccionadas, totalizando quatorze miniparedes ao final da pesquisa. As especificações das amostras que foram avaliadas nessa etapa são dadas pela Tabela 5.

Tabela 5 – Paredes a serem ensaiadas na etapa 3.

| Parede | Id. | Bloco | Espessura da junta | Argamassa utilizada | Revestimento |
|-----------------|------------------|-------|--------------------|---------------------|------------------|
| Paredes 13 e 14 | P7a e P7b | B1 | 10 ± 3 mm | fak ≈ 4,0MPa | Argamassa 1,0 cm |

4.4. MINIPAREDES

As paredes foram construídas com os blocos e argamassas especificados no item 4.2. Devido às restrições do tamanho do forno, as amostras ensaiadas foram executadas com dimensões de 90 x 80 cm, se tratando, portanto, de miniparedes. Estas foram construídas sobre um perfil metálico de chapa dobrada em forma de U, a fim de permitir seu deslocamento no interior do laboratório. A disposição dos blocos nas fiadas, bem como as dimensões das miniparedes, estão especificadas na Figura 22.

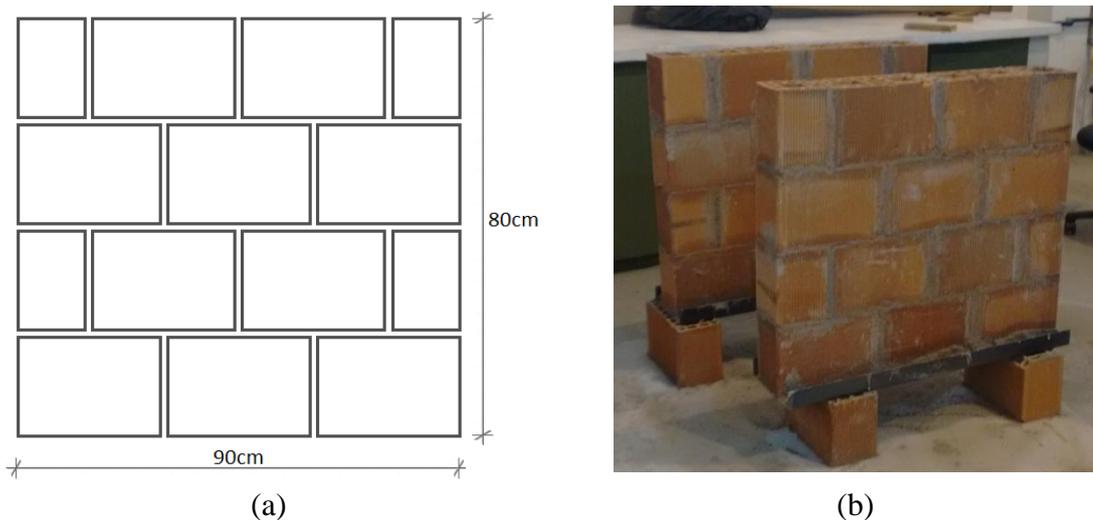


Figura 22 – Miniparedes ensaiadas. (a) Desenho esquemático.
(b) Amostras construídas.

Inicialmente, não foi utilizado nenhum tipo de revestimento ou tratamento da superfície das amostras, a fim de simular a pior situação possível de exposição ao fogo. Em etapa posterior foi, então, incluído revestimento da superfície, conforme descrito no item anterior.

Após a construção das amostras, foi respeitado um tempo de cura mínimo de 56 dias, para que a umidade presente na argamassa de assentamento fosse reduzida e os resultados não sofressem interferência de efeitos que estariam presentes apenas nas idades iniciais. Da mesma forma, para as amostras que receberam revestimento argamassado, o mesmo foi executado após decorridos, no mínimo 7 dias da construção das miniparedes, e então aguardaram-se mais ao menos 56 dias até a realização dos ensaios.

As amostras foram acomodadas para o ensaio dentro de um pórtico de carregamento planejado para resistir aos esforços aplicados e impedir as expansões laterais. Este também foi dimensionado para permitir a aplicação de carregamento vertical distribuído, a fim de simular o carregamento de uma parede estrutural. Trata-se de um quadro feito com perfis de trilhos ferroviários inutilizados, do tipo ASCE 7540 (TR 37), com área da seção de 47,39 cm², momento de inércia de 951,4 cm⁴ e massa linear de 37,20 kg/m.

Utilizaram-se dois macacos hidráulicos durante os ensaios, um para aplicação do carregamento vertical e outro para o confinamento lateral das miniparedes. Ambos foram acoplados a células de carga para monitoramento dos incrementos de carga sofridos. O esforço realizado pelos macacos foi distribuído nas faces das paredes por meio de perfis metálicos devidamente posicionados. O desenho esquemático do equipamento planejado para a realização do ensaio e o equipamento já montado pode ser visto na Figura 23.

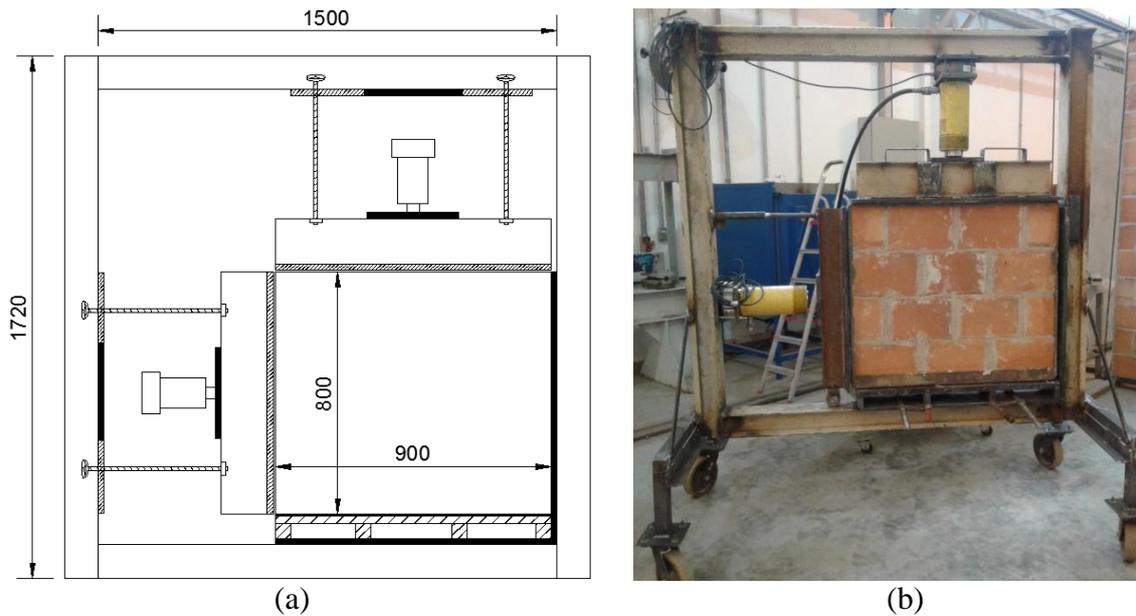


Figura 23 – Esquema do quadro de reação utilizado para os ensaios.

Para que os carregamentos fossem aplicados e distribuídos de maneira uniforme ao longo da parede, foi realizado capeamento das mesmas, com argamassa rica em cimento, tanto na face superior quanto nas laterais, a fim de obter-se uma superfície plana (Figura 24).



Figura 24 – Capeamento superior e lateral das amostras.

Uma vez posicionada no quadro de reação, a amostra era acoplada à abertura de um forno de resistências elétricas Sanchis, modelo especial, de modo que uma de suas faces estivesse sujeita ao aquecimento. Na face não exposta, posicionaram-se os instrumentos para monitoramento de temperatura e deslocamento.

4.5. NÍVEL E APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO

Uma parede de alvenaria estrutural possui função de suportar e redistribuir esforços. Portanto, com a finalidade de simular as condições de serviço a que os elementos estão submetidos em situações reais, foi aplicado carregamento equivalente à realidade sobre as amostras durante o ensaio, o que é exigido pela NBR 5628 (ABNT, 2001). A aplicação se deu por meio de um macaco hidráulico com capacidade de até 30tf, acoplado à parte superior do pórtico e foi transmitido à alvenaria por meio de uma viga de distribuição, a fim de que a amostra recebesse sobre si um carregamento uniformemente distribuído. Nas laterais não foi aplicado carregamento, os macacos atuaram apenas com a finalidade de restringir as possíveis dilatações das amostras.

As cargas aplicadas sobre as amostras foram calculadas de forma que as mesmas recebessem carregamento de acordo com o que é prescrito pela NBR 6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações (ABNT, 1980). Para uma estimativa de carregamento, utilizou-se uma planta de edificação simplificada, contendo apenas duas lajes e oito pavimentos, conforme esquematizado na Figura 25.

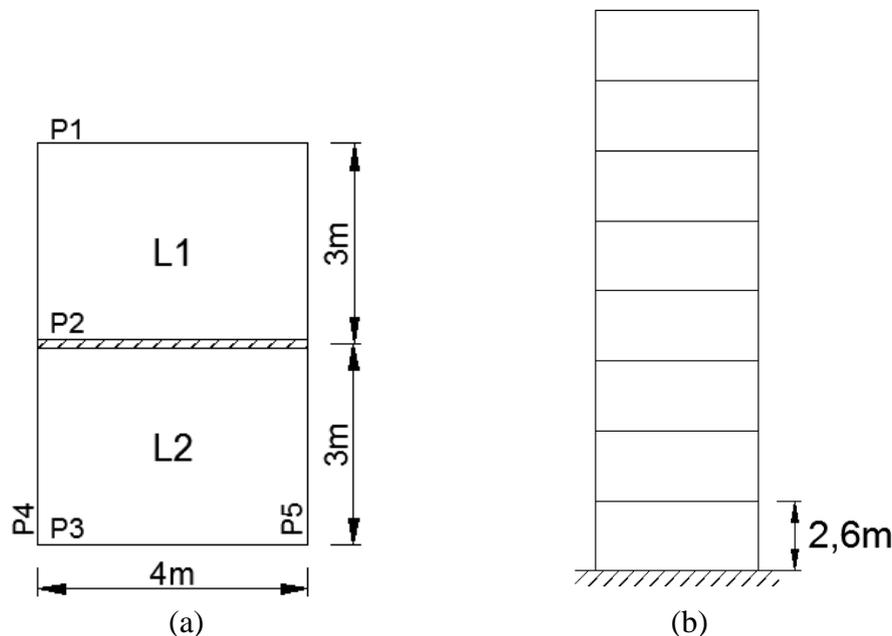


Figura 25 – Esquema estrutural do edifício fictício. (a) Planta.
(b) Elevação.

As dimensões de ambas as lajes foram fixadas em 3,0 x 4,0 metros, considerando-as como lajes pré-moldadas e desconsiderando existência de revestimento do piso. O pé-direito

considerado para cálculo foi de 2,60 metros, por ser um valor usual. Para fins de simplificação, foi admitido que todas as paredes seriam construídas com blocos de 14 cm de espessura. Tendo como peso específico da alvenaria de blocos cerâmicos vazados o valor indicado pela NBR 15812-1 (ABNT, 2010) de 12 kN/m^3 e considerando o pé-direito definido anteriormente, tem-se um carregamento linear de $4,37 \text{ kN/m}$ causado pela alvenaria em cada pavimento.

Dado o esquema estrutural determinado inicialmente, tomou-se como base o carregamento na parede solicitada por ambas as lajes (P2), a fim de determinar a maior solicitação. Para calcular a porção de carga das lajes resistida por tal elemento, utilizou-se o método das charneiras plásticas, definindo-se, assim, uma área de influência da parede central sobre cada laje de $4,7 \text{ m}^2$. Sabendo-se o peso próprio estimado para laje pré-moldada ($2,2 \text{ kN/m}^2$), e tendo as cargas acidentais estipuladas em $1,5 \text{ kN/m}^2$ para os pavimentos tipo e $0,5 \text{ kN/m}^2$ para a cobertura (considerando-a sem acesso de pessoas), obteve-se o valor de $6,34 \text{ kN/m}$ de carga linear sobre a parede devido às lajes de cobertura, e $8,70 \text{ kN/m}$ de contribuição das lajes dos pavimentos tipos.

Somando todos os carregamentos acima da parede estrutural do pavimento térreo, temos uma estimativa de carga linear de $97,83 \text{ kN/m}$ atuando sobre a mesma. Este carregamento foi aplicado na amostra antes do início do ensaio de resistência ao fogo, sofrendo incrementos, devido às tentativas de expansão, após o início do mesmo.

4.6. ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO TÉRMICA

A fim de obter os resultados e informações desejadas com esta pesquisa, foram adotados alguns procedimentos através dos quais se extraíram os dados relevantes. Os mesmos estão descritos a seguir.

4.6.1. Determinação do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)

Um dos principais dados a serem obtidos com esta pesquisa é o tempo durante o qual as amostras ensaiadas resistem à ação de altas temperaturas com atendimento dos critérios exigidos, conforme citado no capítulo de revisão de literatura e o modo de falha das amostras.

Para isso, foi realizado o ensaio de resistência ao fogo descrito no capítulo 3. Porém, devido às limitações quanto aos equipamentos disponíveis no laboratório, o ensaio previsto pela NBR

5628 (ABNT, 2001) foi adaptado para paredes de pequenas dimensões, que se adéquam ao tamanho do forno disponível.

A temperatura do forno foi elevada a uma taxa que segue aproximadamente a curva padrão descrita pela norma supracitada, até uma temperatura máxima de 950°C, por ser uma temperatura usualmente atingida durante um incêndio real. As miniparedes eram, então, mantidas em tal exposição de temperatura durante cerca de 4 horas.

O tempo de resistência ao fogo foi medido utilizando os métodos descritos a seguir.

4.6.1.1. Estanqueidade

Para fins de verificação da estanqueidade das amostras, foi realizado sempre que necessário o teste do chumaço de algodão, descrito pela NBR 5628 (ABNT, 2001). Neste teste, observou-se a passagem de gases quentes ou labaredas por fissuras que eventualmente surgissem durante o ensaio, que pudessem inflamar o chumaço de algodão posicionado próximo a ela.

4.6.1.2. Isolamento térmico

O isolamento térmico foi verificado através do uso de termopares com ponta em disco de cobre para medição da temperatura na face não exposta das amostras, conforme recomendação trazida pela NBR 5628:2001. Além dos termopares dispostos na face externa das amostras, foram posicionados também termopares do tipo K ao longo da espessura da parede, visando obter valores de temperatura no interior do forno e no interior dos blocos. O intervalo de medição desses equipamentos é de -90°C a 1380°C, cobrindo, portanto, a temperatura a qual as amostras foram submetidas.

Foram distribuídos, ao todo, sete termopares, sendo cinco deles na face externa, para o controle de isolamento térmico, e os demais para obtenção de informações adicionais. As posições dos termopares nas miniparedes estão descritas na Figura 26.

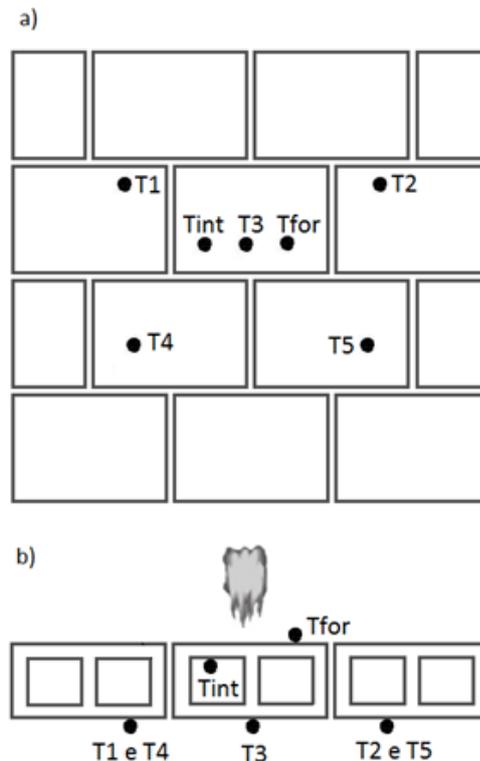


Figura 26 - Posição dos termopares nas amostras. (a) Vista frontal. (b) Vista em planta

4.6.1.3. Resistência Mecânica

Para que pudesse ser determinado eventualmente o momento do rompimento e conseqüente inutilização da amostra, realizou-se análise visual. Dessa forma, a determinação do TRF, nos casos em que a perda de resistência mecânica é critério de falha predominante, seria realizada através da observação e monitoramento do comportamento frente à exposição. A análise visual foi utilizada também para verificação de possíveis ocorrências de *spalling* nas paredes dos blocos, acarretando ou não a falha estrutural do elemento como um todo. Não foi possível reaplicar o carregamento nas amostras após 24 horas, conforme indicado pela NBR 5628 (ABNT, 2001), devido ao reduzido tempo para realização dos demais ensaios.

Segundo a norma brasileira, a deformação transversal também deve ser monitorada a fim de verificar o atendimento do critério de resistência mecânica, de modo que não deva haver deslocamentos excessivos fora do plano. Foi, portanto, medido o deslocamento fora do plano em três pontos na face não exposta: próximo ao centro das amostras, por ser o local em que o deslocamento tende a ser máximo, e em dois pontos nas extremidades superior esquerda e inferior direita, de forma que seja possível traçar um perfil de deslocamentos. Tais medições foram realizadas por meio de relógios comparadores, cujas leituras eram registradas

manualmente a determinados intervalos de tempo. O posicionamento e identificação dos relógios comparadores estão apresentados na Figura 27.

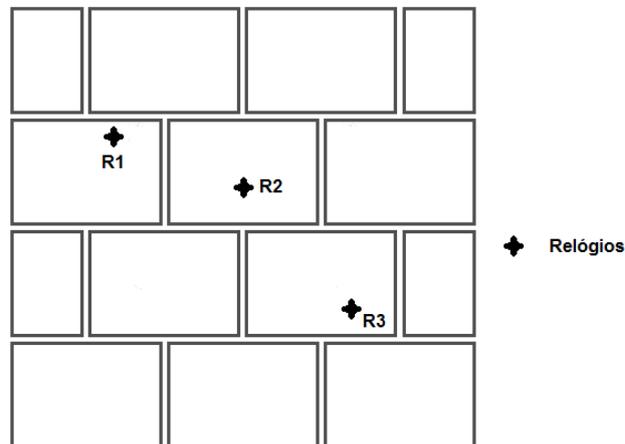


Figura 27 – Posicionamento e identificação dos relógios comparadores.

4.6.2. Informações adicionais

Além da verificação dos requisitos básicos exigidos por norma para verificação da resistência ao fogo das amostras, foram feitas outras análises visando uma coleta do maior número de informações possíveis dos ensaios realizados. Dessa forma foi possível observar o comportamento de cada amostra com maior precisão e detalhamento. Para isso, foram utilizados os métodos descritos nos próximos itens.

4.6.2.1. Deformação horizontal e vertical

Por meio de transdutores de deslocamento, ou *clip-gages*, posicionados na face não exposta de um bloco na região central das miniparedes, foram medidas as deformações horizontais e verticais sofridas por ele ao ser submetido ao aquecimento. Estes dispositivos foram confeccionados com base no que foi utilizado por Beber (2003), e consistem em arcos dotados de *strain gages* (extensômetros) em suas faces inferior e superior (Figura 28). Esses arcos são fixados à superfície cujos deslocamentos se deseja medir e, então, a deformação específica determinada pelos *strain gages* na seção central dos arcos é correlacionada aos deslocamentos relativos entre os pontos A e B fixados. Os dois extensômetros são ligados através de ligação $\frac{1}{2}$ ponte de Wheatstone, o que minimiza os efeitos de temperatura e amplifica o sinal transmitido.

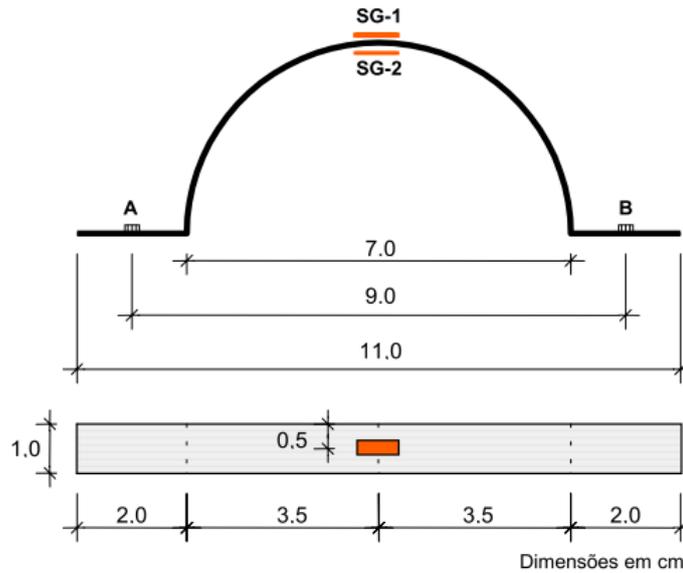


Figura 28 – Características geométricas dos *clip-gages* confeccionados para leitura de deslocamentos superficiais (BEBER, 2003).

O afastamento ou aproximação entre diferentes blocos de uma mesma fiada e de fiadas consecutivas também foi medido através do uso de *clip-gages* nas juntas, o que proporciona um indicativo da absorção pela argamassa dos deslocamentos ocorridos devido à deformação térmica. O posicionamento dos *clip gages* nas amostras está esquematizado na Figura 29.

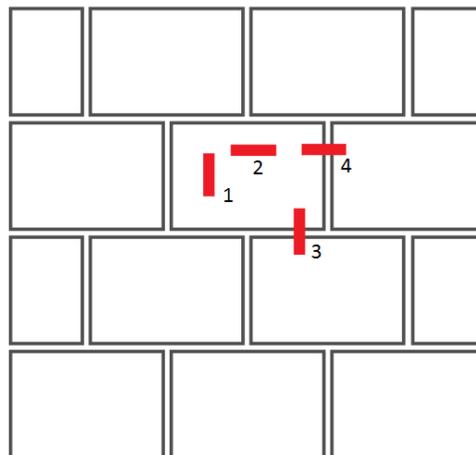


Figura 29 – Posicionamento dos *clip-gages* nas miniparedes.

Para estabelecer a correlação entre as deformações específicas lidas pelos *strain gages* e os deslocamentos obtidos no material, os *clip-gages* foram calibrados, ou seja, estabeleceu-se, com o auxílio de um calibrador (Figura 30), uma relação linear entre os deslocamentos relativos dos pontos A e B e as leituras de deformação específica no centro do arco.

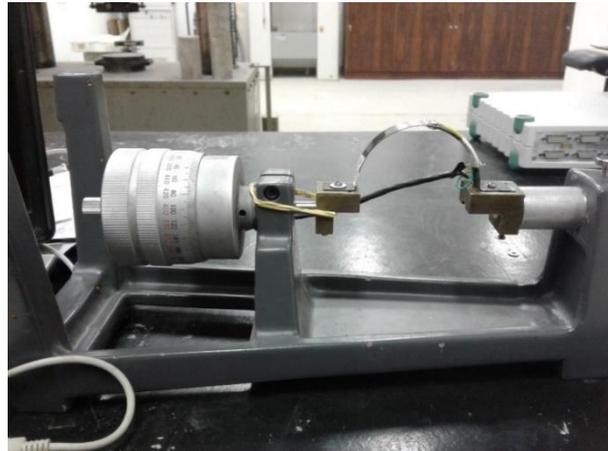


Figura 30 – Procedimento para calibração dos *clip-gages*.

4.6.2.2. Termografia

Foi realizada também uma análise termográfica das amostras durante à exposição ao tratamento térmico (Figura 31). A utilização dessa técnica permitiu que fosse feito um mapeamento da temperatura ao longo da superfície das amostras, através da detecção, por meio de uma câmera termográfica FLIR T440, da radiação infravermelha emitida pelas mesmas ao serem aquecidas.



Figura 31 – Preparação de câmera para captação de imagens termográficas.

Por meio desse equipamento foi possível distinguir áreas com temperaturas distintas, bem como monitorar a elevação da temperatura ao longo do ensaio, além de identificar zonas de

possíveis falhas na alvenaria. Também possibilitou fazer um comparativo da propagação de calor nas diferentes tipologias de alvenarias.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão expostos os resultados obtidos durante a execução dos ensaios, bem como as análises realizadas a partir dos mesmos. Dados complementares podem ser encontrados no Apêndice.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1. Blocos

Foi realizado para os três tipos de blocos utilizados, ensaio para determinação da massa seca (Ms) e do índice de absorção d'água (AA). Os resultados encontram-se na Tabela 6. Pode-se observar um menor índice de absorção (7,71%) para o bloco B2, devido ao fato de se tratar de um bloco com parede maciça, ao contrário dos demais, o que implica em menor área superficial para absorção de água. Os outros dois blocos - B1 e B3 - cujas paredes são vazadas, indicaram valores semelhantes de índice de absorção, em torno de 13%.

Tabela 6 – Massa úmida (Mh), massa seca (Ms) e índice de absorção d'água (AA) dos blocos cerâmicos.

| Bloco | Mh (g) | Ms (g) | AA | C.V (%) |
|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| B1 | 6600,5 | 5837,5 | 13,07% | 2,24 |
| B2 | 7681,2 | 7131 | 7,71% | 2,16 |
| B3 | 7594,2 | 6727 | 12,89% | 0,90 |

Para resistência à compressão dos blocos, obtiveram-se os resultados constantes na Tabela 7, referentes à área bruta dos mesmos. Estão expressos os resultados médios e característicos dos mesmos. Observa-se que as resistências médias obtidas se mostraram superiores às resistências características especificadas pelo fabricante e determinadas pelos ensaios, visto que se obteve em torno de 8 a 10 MPa para blocos especificados para 7MPa, e aproximadamente 17 MPa para aqueles especificados como de 10MPa.

Tabela 7 – Resistência média (f_{bm}) e característica (f_{bk}) à compressão referente à área bruta dos blocos.

| Bloco | f_{bm} (MPa) | f_{bk} (MPa) | D.P | C.V |
|-------|----------------|----------------|------|--------|
| B1 | 10,45 | 7,65 | 1,94 | 18,6% |
| B2 | 16,92 | 11,13 | 2,96 | 17,47% |
| B3 | 7,96 | 6,24 | 1,80 | 22,61% |

O rompimento dos blocos, como esperado, se deu de forma brusca, e foi observado, sobretudo nos blocos de parede maciça, deslocamento das paredes. O principal modo de ruptura foi por fendilhamento do bloco (Figura 32).



Figura 32 – Ruptura à compressão de blocos de (a) paredes maciças
(b) paredes vazadas

Os resultados obtidos para os módulos de elasticidade dos blocos encontram-se na Tabela 8. Observa-se maior módulo de elasticidade para os blocos de maior resistência, conforme era esperado. Salienta-se a proximidade dos resultados para os blocos de menor resistência com aquele obtido por (SILVA et al., 2015) para blocos semelhantes, indicando coerência nos valores encontrados. No caso citado, para blocos de resistência média à compressão de 9,42 MPa, foi obtido módulo de elasticidade no valor de 3,08 GPa.

Tabela 8 – Módulo de Elasticidade dos blocos cerâmicos.

| BLOCO | E (GPa) | D.P. | C.V. |
|-------|---------|------|------|
| B1 | 3,65 | 0,7 | 20% |
| B2 | 4,85 | 1,7 | 36% |
| B3 | 2,69 | 0,2 | 6% |

Nos ensaios realizados a nível de material, foram obtidos dados de condutividade térmica em diferentes temperaturas, e da dilatação térmica da cerâmica. Para os ensaios de condutividade, foram obtidos os resultados dados pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e dispostos no gráfico da Figura 33. O resultado indica que a condutividade térmica do material cerâmico aumenta linearmente com o aumento de temperatura. Isso significa que a capacidade da cerâmica de conduzir energia térmica aumenta conforme a temperatura a que está exposta sofre incrementos.

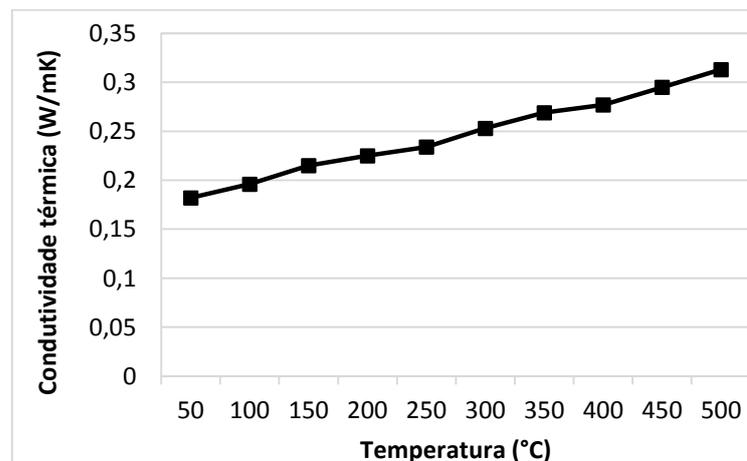


Figura 33 – Média da condutividade térmica da cerâmica em diferentes temperaturas.

Os dados obtidos através da dilatométrica, ilustrados pelos gráficos da Figura 34, indicam que a cerâmica sofre aumento de suas dimensões de forma aproximadamente linear com o aumento da temperatura. Tal tendência se observa até a temperatura máxima abordada nesse ensaio, que foi de 300°C. Conforme pode ser visto no estudo de Marino e Boschi (1998), a curva de expansão térmica de uma amostra cerâmica após a queima tende a manter-se linear com o aumento da temperatura. No caso citado a temperatura foi elevada até cerca de 1100°C, portanto, pode-se considerar que a linearidade apresentada nos gráficos da Figura 34 se estende até a máxima temperatura que atingem os ensaios feitos na presente pesquisa.

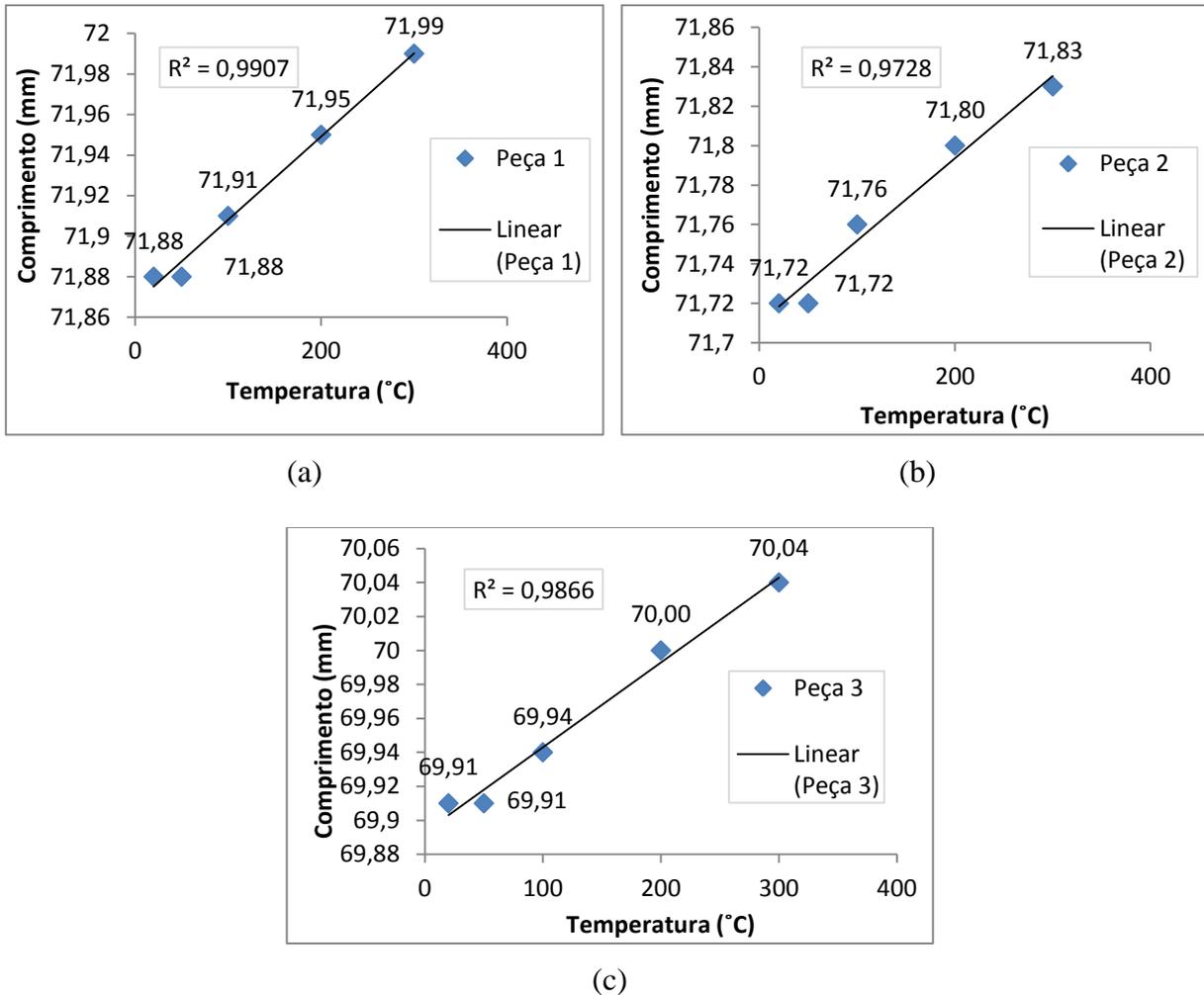


Figura 34 – Expansão térmica de três amostras cerâmicas. (a) Peça 1. (b) Peça 2. (c) Peça 3.

5.1.2. Argamassas

Para as argamassas no estado fresco, os resultados obtidos para o índice de consistência foram de 272 mm para a argamassa de 4 MPa, 308 mm para a de 6 MPa e 254 mm para a argamassa de 10MPa. No estado endurecido, as curvas de elevação das resistências à tração na flexão e à compressão das argamassas em relação à idade do ensaio são dadas pelas figuras 35, 36 e 37.

Pode-se observar que a resistência à compressão das argamassas ficou bem próxima ao especificado pelo fabricante - 3,95, 6,11 e 9,21 MPa, para as argamassas de 4, 7 e 10 MPa, respectivamente. A resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas estruturais representou de 33 a 43% da resistência à compressão na mesma idade, ficando dentro da normalidade.

Salienta-se que a resistência das argamassas depende da quantidade de água adicionada à mistura. Esta quantidade deve estar dentro dos limites recomendados pelos fabricantes, de 4,7 a 5,1 litros para cada 25 kg. Qualquer variação pode representar perda ou acréscimo de resistência à argamassa em seu estado endurecido.

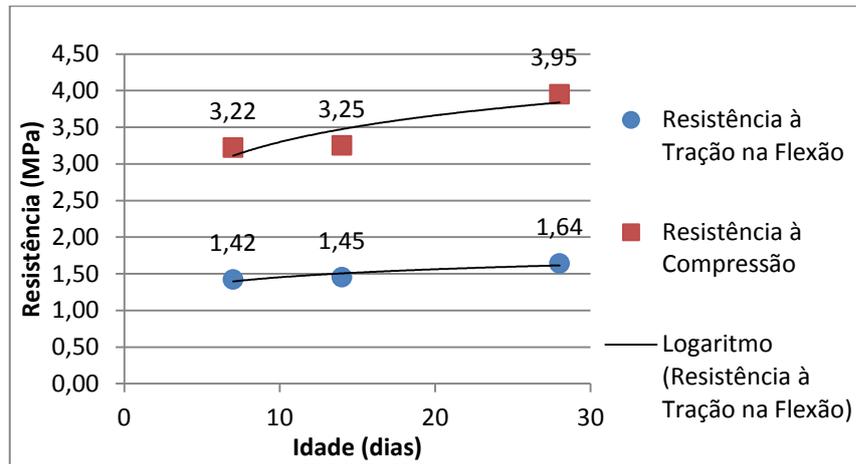


Figura 35 – Resistência à tração na flexão e à compressão da argamassa de 4 MPa, aos 7, 14 e 28 dias.

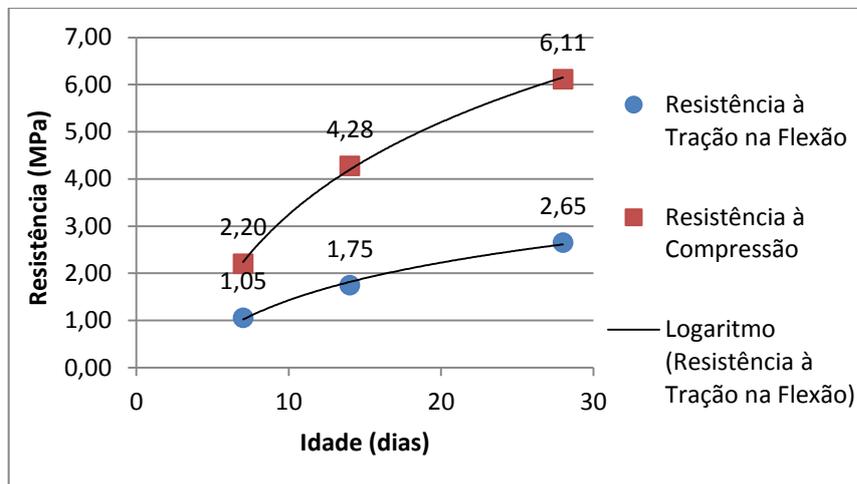


Figura 36 - Resistência à tração na flexão e à compressão da argamassa de 6 MPa aos 7, 14 e 28 dias.

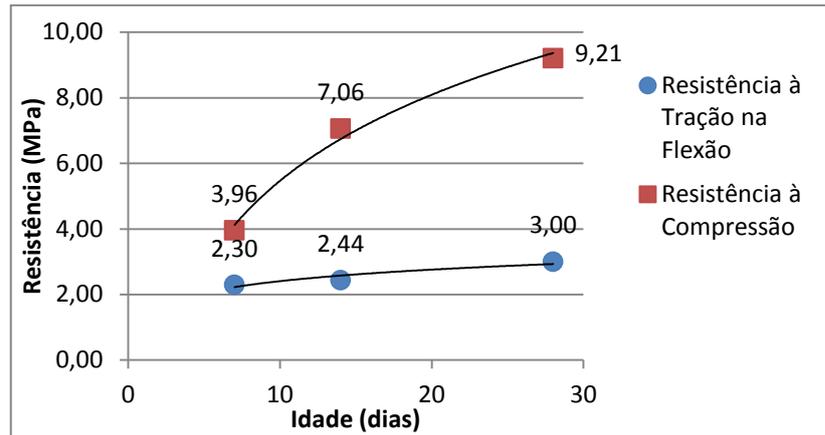


Figura 37 - Resistência à tração na flexão e à compressão da argamassa de 10 MPa aos 7, 14 e 28 dias.

Foram realizados ensaio de módulo de elasticidade para as argamassas estruturais de 4, 6 e 10 MPa. Os resultados, mostrados na Tabela 9, indicam módulo de elasticidade maior para a argamassa de maior resistência. No entanto, destaca-se o elevado coeficiente de variação obtido para tal resultado, que pode ter sido causado por eventuais imprecisões nos equipamentos utilizados.

Tabela 9 – Módulo estático de elasticidade (E) das argamassas.

| | E (GPa) | D.P. (MPa) | C.V. (%) |
|---------------|---------|------------|----------|
| 4 MPa | 7,1 | 0,3 | 5 |
| 6 MPa | 10,3 | 0,9 | 9 |
| 10 MPa | 12,8 | 5,1 | 40 |

5.2. MINIPAREDES

Neste item serão abordados os resultados coletados durante os ensaios de exposição das miniparedes às altas temperaturas. Também serão introduzidas discussões acerca dos mesmos, visando compreender o comportamento das alvenarias em suas diferentes formas frente a ação de temperaturas elevadas.

5.2.1. Estanqueidade e fissuração das paredes

Segundo a NBR 5628, durante o ensaio de resistência ao fogo as amostras de paredes não devem apresentar fissuração que permita a passagem de gases quentes, fumaça ou labareda, capaz de inflamar um chumaço de algodão de dimensões padronizadas (ABNT, 2001). A

abertura de fissura é verificada visualmente, realizando-se o teste do chumaço de algodão caso se verifique a possibilidade de perda de estanqueidade. A constatação da perda de estanqueidade significa falha da amostra e culmina na finalização do ensaio.

Para os ensaios realizados neste trabalho, observou-se o surgimento de fissuras verticais nos blocos e na interface bloco-argamassa, tanto na face exposta ao calor quanto na face externa. A predominância de fissuras, no entanto, se deu na face exposta. O surgimento dessas fissuras atribui-se ao fato de que os materiais sofrem expansões térmicas de formas distintas, provocando destacamento entre argamassa e unidades, além do fato de que, ao expandirem-se, surgem tensões de tração ao longo dos blocos, provocando sua fissuração. As figuras 38 e 39 trazem os padrões de fissuração que ocorreram nas alvenarias. As fissuras observadas foram realçadas para facilitar a visualização.

O padrão de fissuração acompanhou o sentido de aplicação da carga, ganhando pouca horizontalidade em alguns casos. Em sua maioria, as ocorrências se deram no centro dos blocos cerâmicos.

Apesar do surgimento de fissuras, em nenhuma das paredes foi verificada a perda de estanqueidade ou de estabilidade frente às solicitações. Por meio das imagens, é possível observar também a perda de resistência da argamassa de assentamento da alvenaria, que, com a exposição às temperaturas elevadas, tornou-se friável, esfarelando-se quando escarificadas.



Figura 38 – Padrão de fissuração das amostras na face exposta às altas temperaturas.



Figura 39 – Padrão de fissuração das amostras na face oposta ao aquecimento.

5.2.2. Temperatura ao longo das amostras

Durante a execução dos ensaios, conforme citado no capítulo anterior, foram coletadas informações acerca da temperatura atingida no decorrer das mais de quatro horas de ensaio. Para cada miniparede ensaiada foram utilizados sete termopares, realizando monitoramento de temperatura no interior do forno, ao longo da espessura da amostra e na sua face externa. As figuras 41 a 47 mostram as temperaturas registradas por cada um desses termopares nas diferentes configurações de paredes. Também, foram destacados os resultados obtidos para os

termopares de contato posicionados na face não exposta das amostras, a fim de facilitar sua visualização.

É possível visualizar que a temperatura do forno para realização dos ensaios teve sua elevação bastante próxima da curva padrão ISO, sendo limitada a cerca de 950°C, conforme especificado no capítulo anterior. As diferenças observadas nos registros das paredes P4a e P5b se deram devido a uma falha no termopar localizado no interior do forno, que precisou ser substituído, e a uma queda de luz no decorrer do aquecimento, respectivamente. Tais falhas não afetaram significativamente o andamento dos ensaios e a aquisição dos demais dados.

Nota-se, pelos gráficos apresentados, que, em sua maioria, os resultados para o termopar intermediário, localizado no interior dos blocos, tiveram seu máximo em torno dos 600°C. Os casos em que este termopar indicou valores distintos foram para as amostras P3a, P3b, P7a e P7b. As primeiras apresentaram valores pouco inferiores aos 600°C das demais, como pode ser visualizado na Figura 40, o que se deu devido ao fato de serem construídas com o bloco B3, de maior espessura. Já as duas últimas, apresentaram significativa diferença neste ponto, não ultrapassando os 400°C. Isso é explicado pelo fato de que tais amostras receberam revestimento em sua face exposta, reduzindo o fluxo de calor para o interior do bloco e, conseqüentemente, para a face oposta.

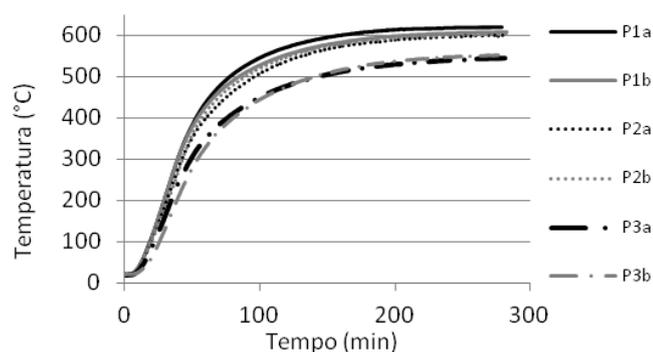


Figura 40 – Temperatura no interior da alvenaria para os diferentes tipos de blocos.

As temperaturas registradas nas faces das paredes opostas à exposição ao calor tiveram valores em torno de 120 a 150°C, excetuando-se aquelas dotadas de revestimento argamassado em sua face exposta. Essas mantiveram temperaturas abaixo de 90°C, evidenciando, novamente, a capacidade de isolamento que o revestimento proporciona ao

elemento, mesmo que somente presente em uma de suas faces, sendo, portanto, fator importante para o bom desempenho das paredes em situação de incêndio.

Salienta-se que não houve perda de resistência ao fogo das alvenarias por falha de isolamento térmico, visto que em praticamente todos os casos foram obedecidas as elevações de temperatura máximas pontuais e médias estipuladas por norma para esse critério. Um caso em particular – P4a – apresentou temperaturas mais elevadas em sua face mais protegida, porém essa ocorrência ainda não significou perda de isolamento térmico, além de não ser atribuída ao desempenho da alvenaria, já que se deu devido a uma pequena falha na argamassa da junta vertical próxima ao termopar central, que acabou por permitir maior passagem de calor nesse ponto, afetando a aquisição dos dados no local. Tal falha pode ser visualizada nas imagens termográficas apresentadas no item 5.2.3.

Conforme esperado, as resistências dos blocos e as juntas de assentamento não exercem influência significativa nos resultados de temperatura das alvenarias ensaiadas.

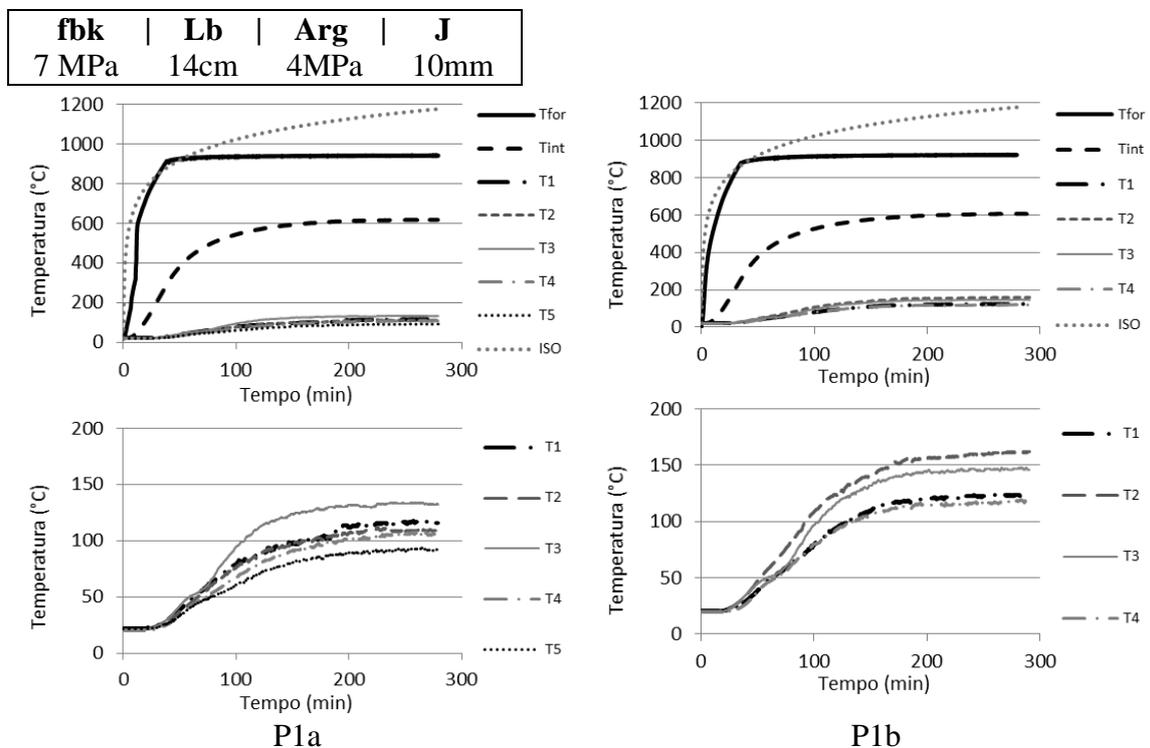
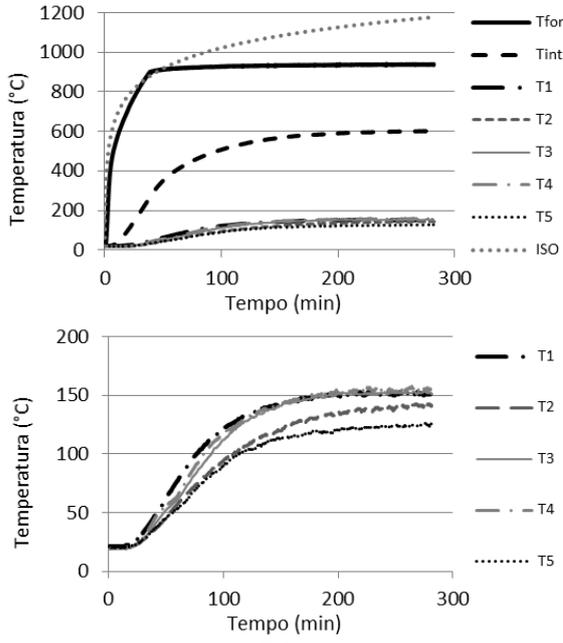
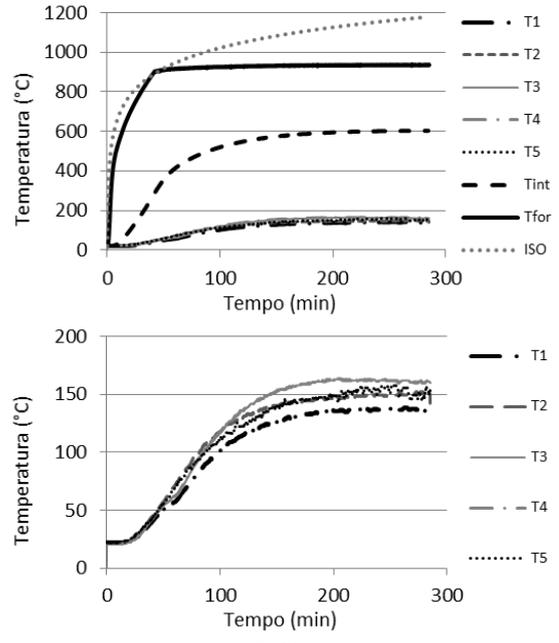


Figura 41 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 10 mm.

| | | | |
|------------|-----------|------------|----------|
| fbk | Lb | Arg | J |
| 10 MPa | 14cm | 6MPa | 10mm |



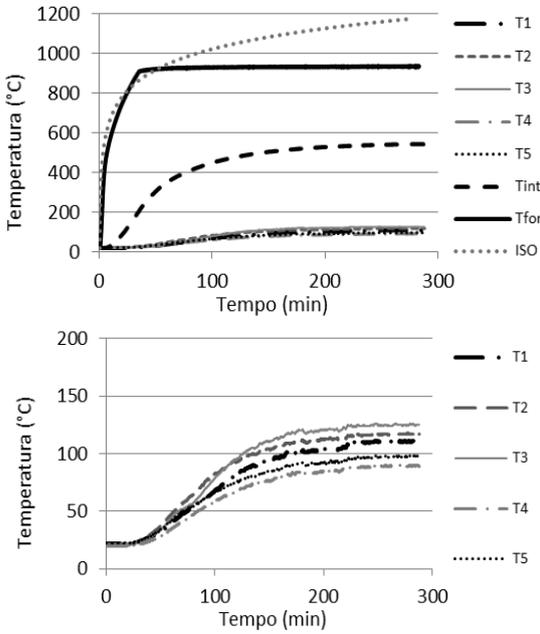
P2a



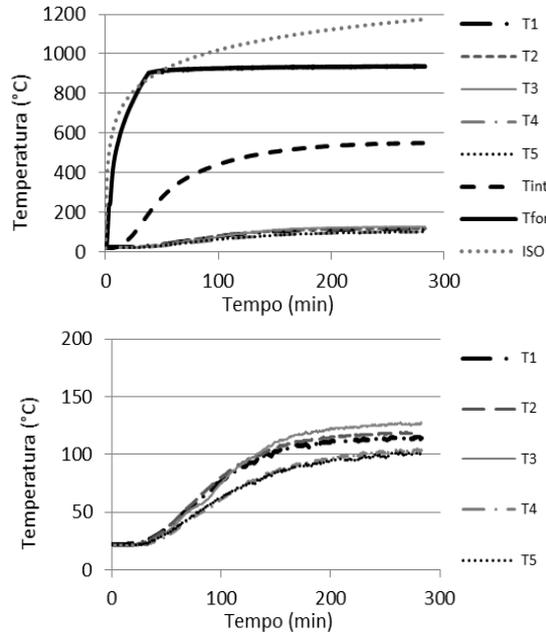
P2b

Figura 42 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B2, argamassa 6 MPa e junta 10 mm.

| | | | |
|------------|-----------|------------|----------|
| fbk | Lb | Arg | J |
| 7 MPa | 19cm | 4MPa | 10mm |



P3a



P3b

Figura 43 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B3, argamassa 4 MPa e junta 10 mm.

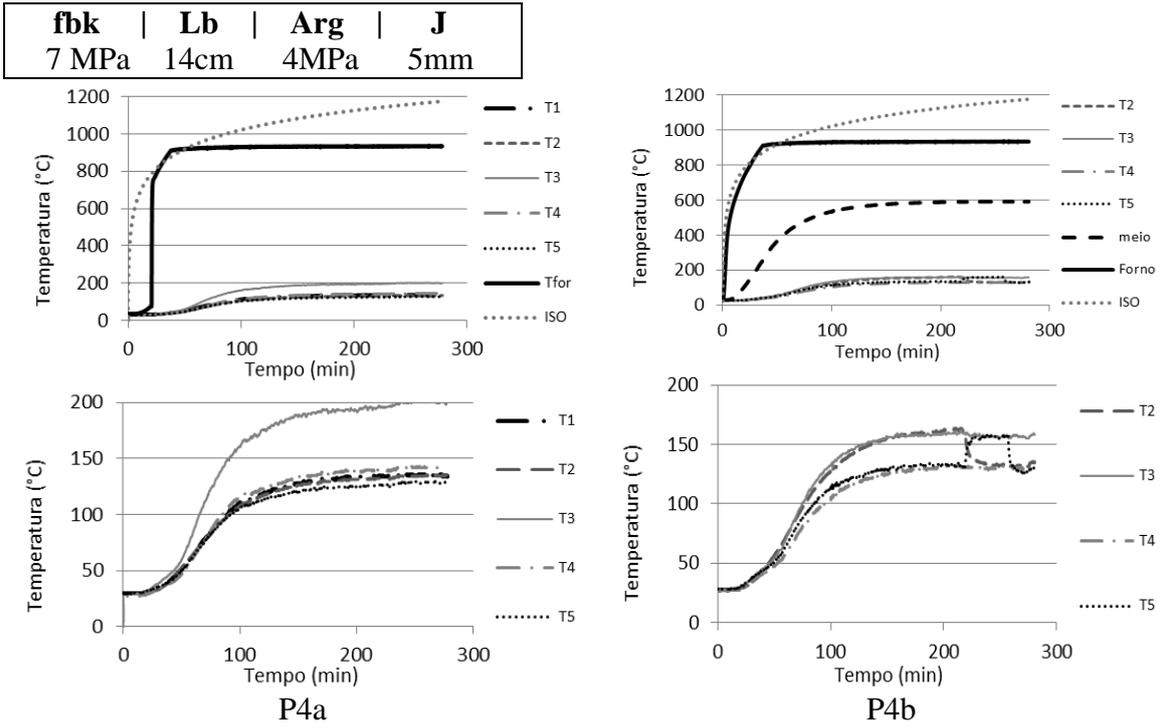


Figura 44 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 5 mm.

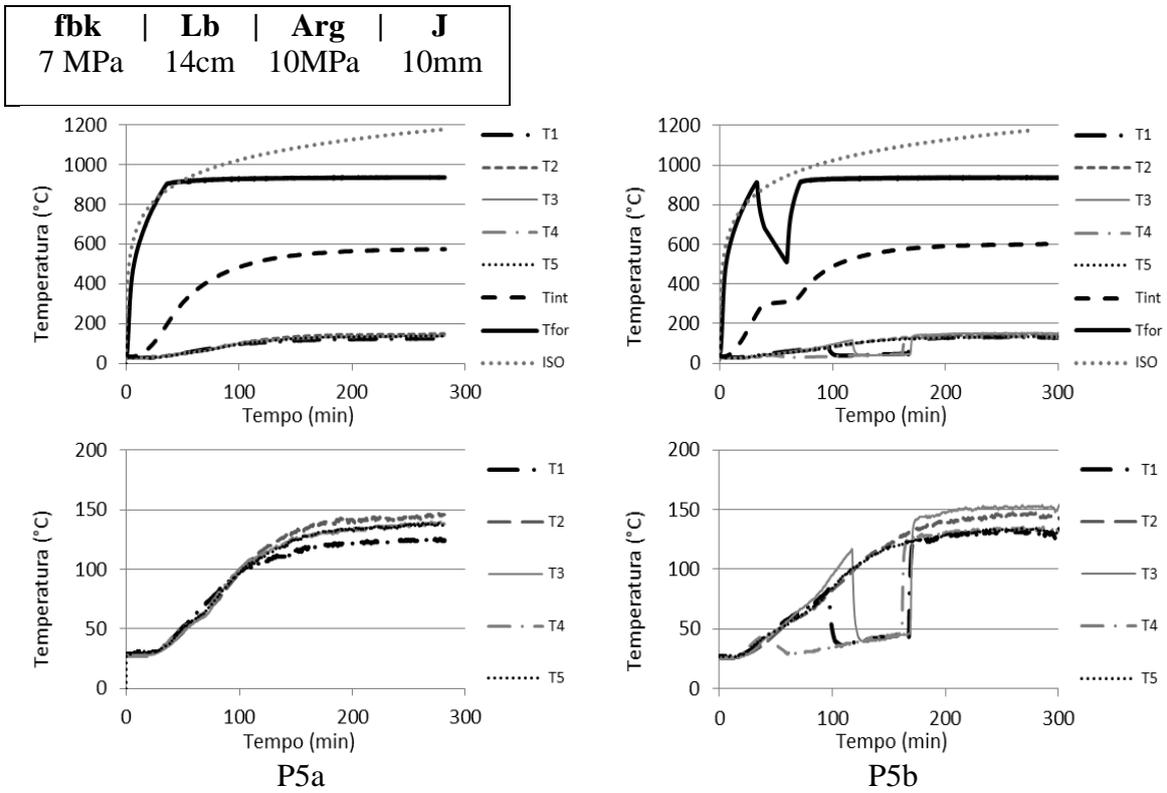


Figura 45 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B1, argamassa 10 MPa e junta 10 mm.

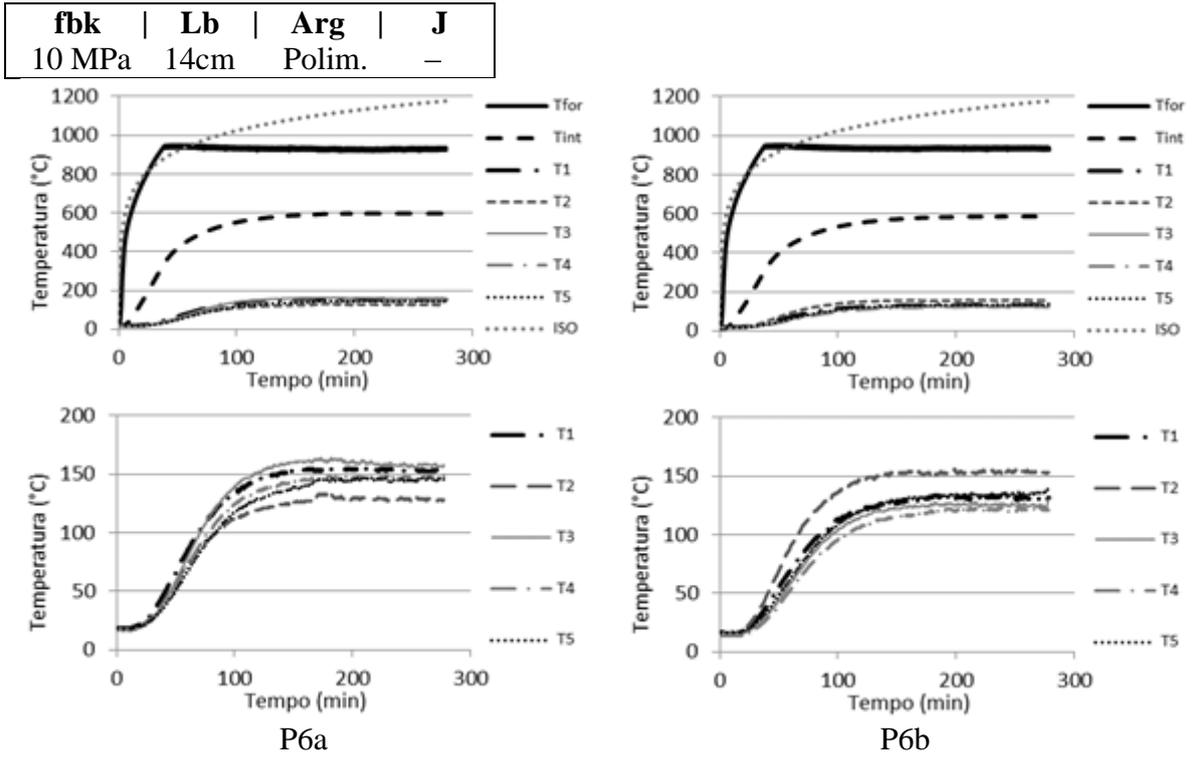


Figura 46 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B2 e junta de argamassa polimérica.

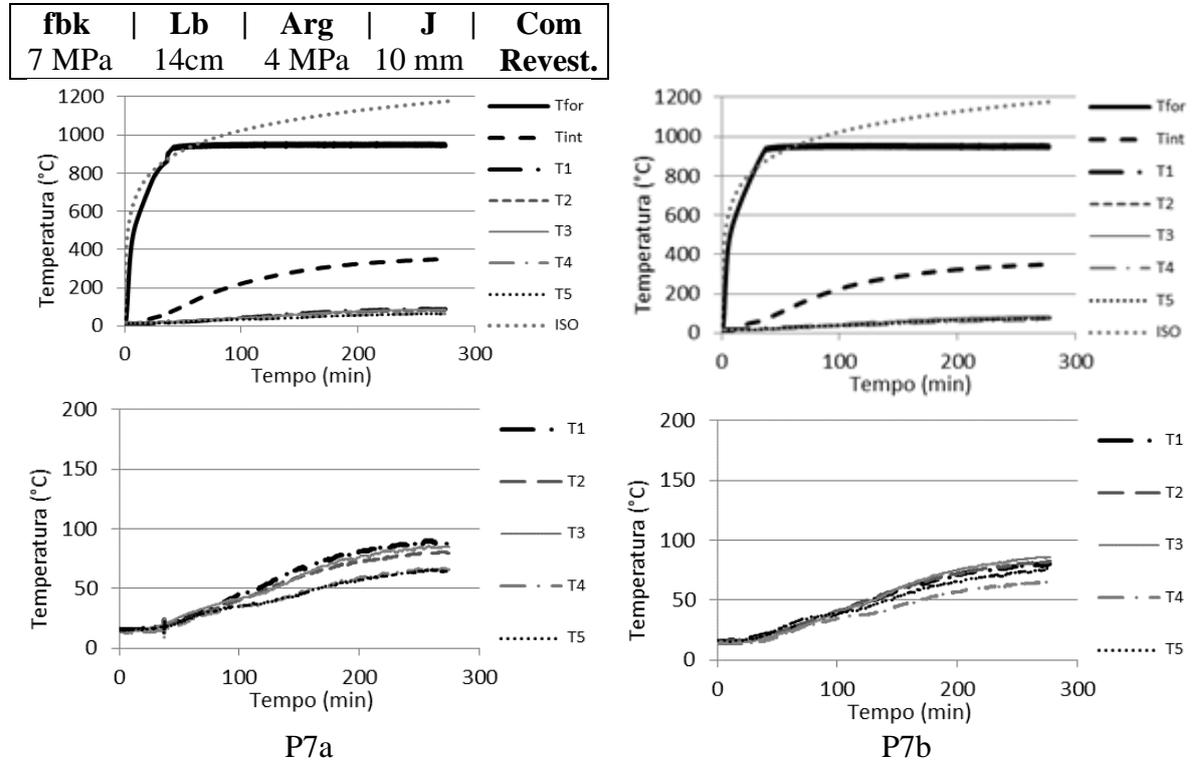


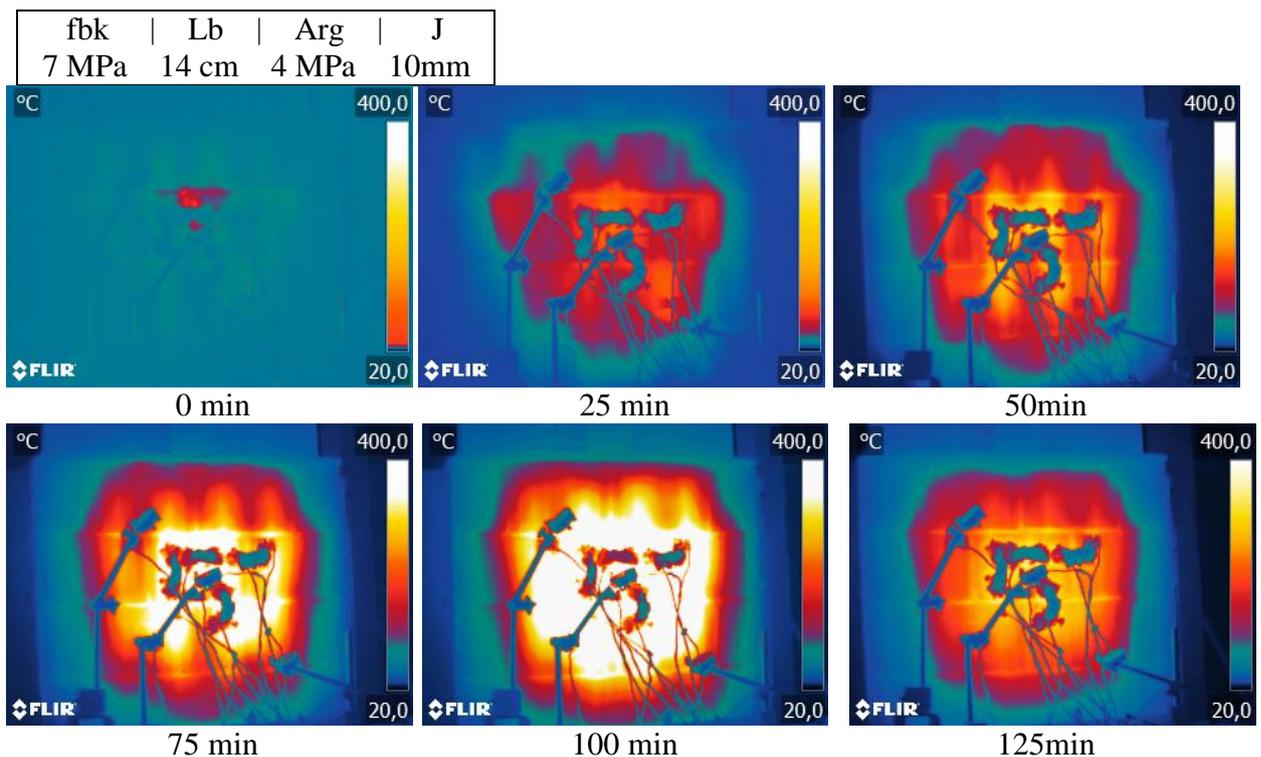
Figura 47 – Temperaturas registradas nas amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa, junta 10 mm e revestimento de argamassa na face exposta.

5.2.3. Imagens termográficas.

Com o intuito de comparar a distribuição de temperatura nas alvenarias ao longo do tempo, foi realizada a captura de imagens termográficas das mesmas durante o decorrer do ensaio. Foram selecionadas imagens capturadas a cada 25 minutos, até os primeiros 150 minutos de ensaio, período em que a face não exposta sofre incremento significativo de temperatura.

O valor de temperatura registrado pelas imagens não pôde ser levado em consideração devido ao grande volume de interferências na superfície das amostras, causadas pela instrumentação das mesmas. Desse modo, as análises realizadas foram apenas com fim comparativo entre as diferentes configurações de alvenarias.

Ao analisar as imagens, pode-se comprovar o melhor isolamento térmico das amostras com bloco de 19 cm de espessura (Figura 50) e providas de revestimento na face exposta (Figura 54), conforme já havia sido constatado pelas aquisições de dados de temperatura pelos termopares. Observa-se que para a amostra P1b (Figura 48), aparentemente a temperatura é superior nos tempos 75 e 100 minutos do que para os tempos posteriores, porém esta impressão se dá apenas devido a uma falha nas configurações da câmera durante a aquisição de imagens para esses dois tempos, que foi corrigida posteriormente.



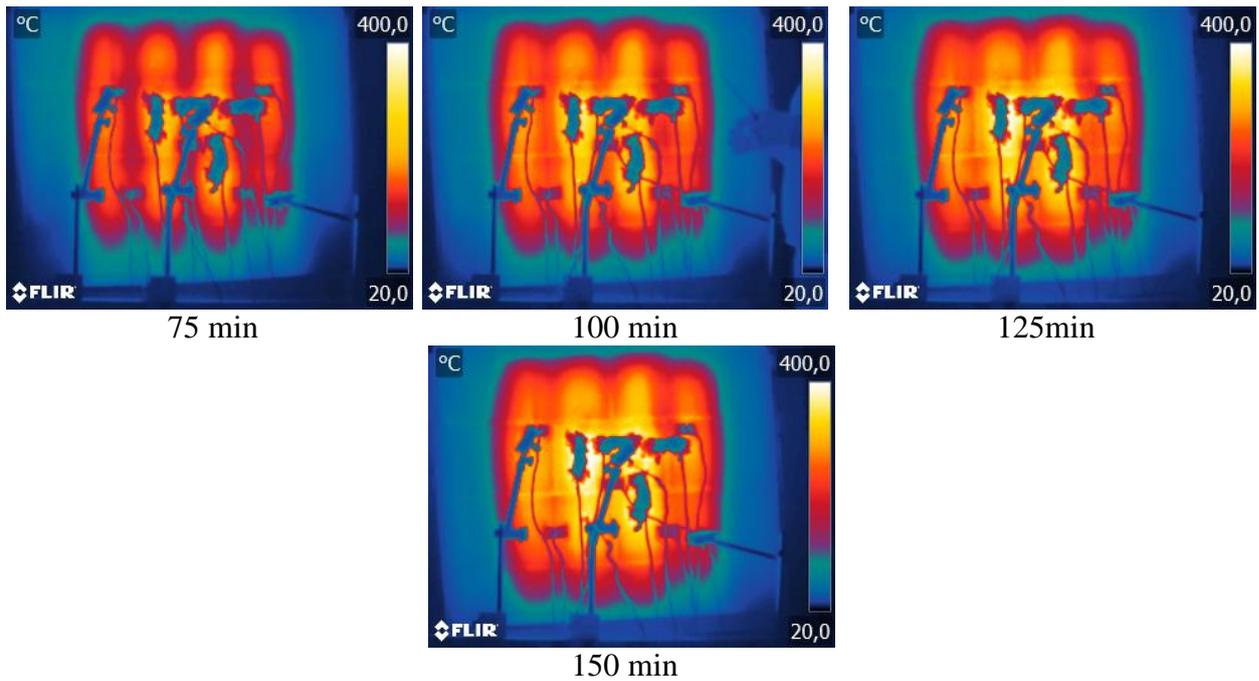
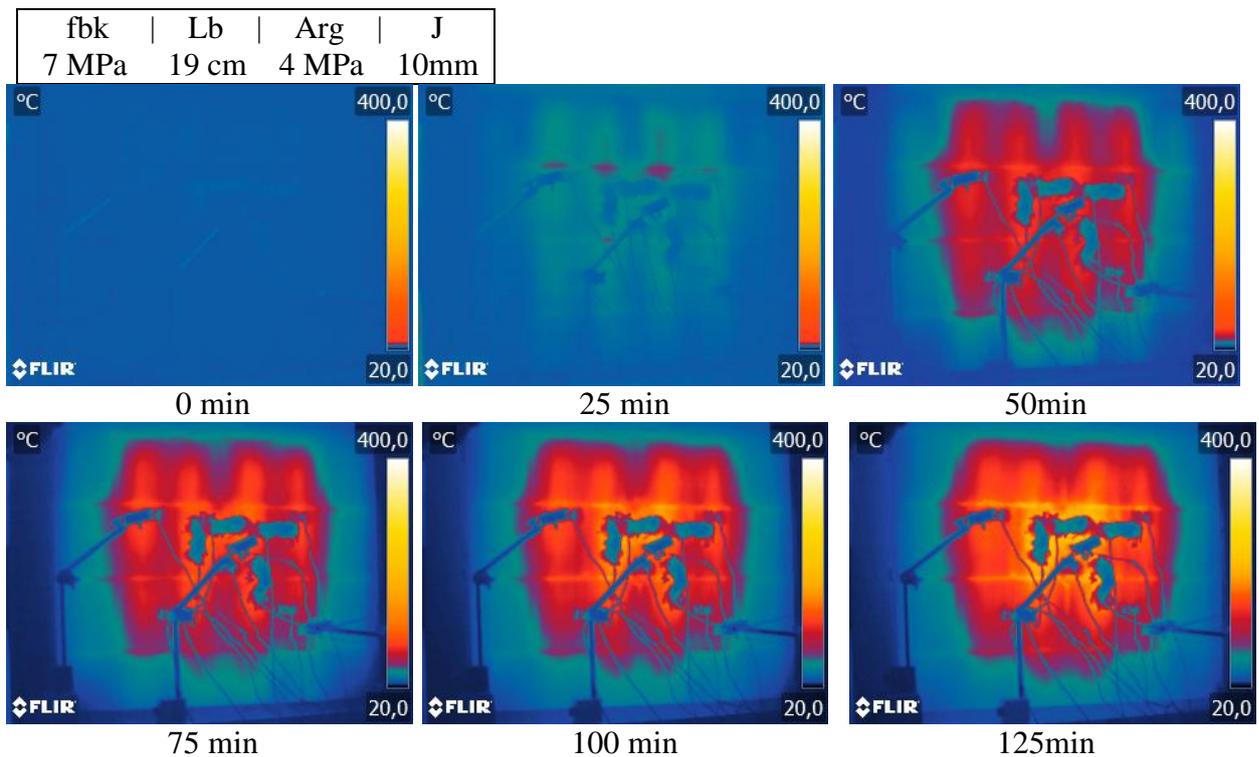


Figura 49 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P2b.



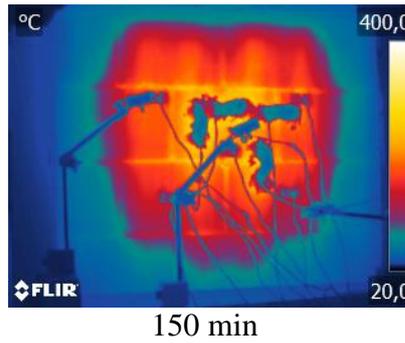
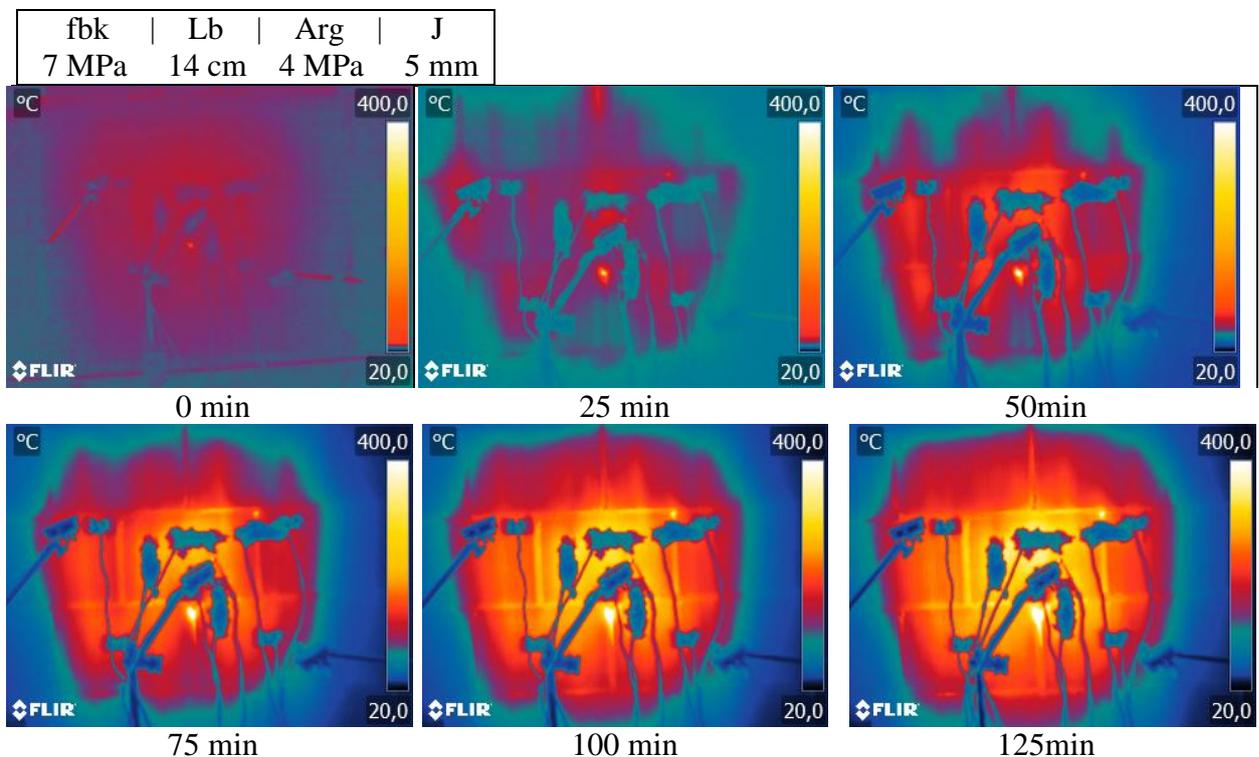
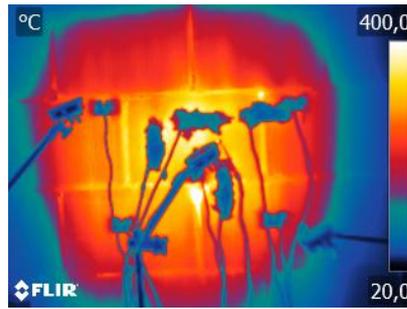


Figura 50 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P3b.

Nas imagens obtidas para a amostra P4a (Figura 51) é possível observar que há um ponto onde a temperatura se mostra superior, aproximadamente no centro da miniparede. Este ponto trata-se de um local onde houve falha no preenchimento da argamassa de assentamento, permitindo maior fluxo de calor da face aquecida para a mais protegida. Novamente percebe-se que a espessura das juntas não exerceu influência no isolamento da alvenaria (Figura 51 e Figura 52).





150 min

Figura 51 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P4a.

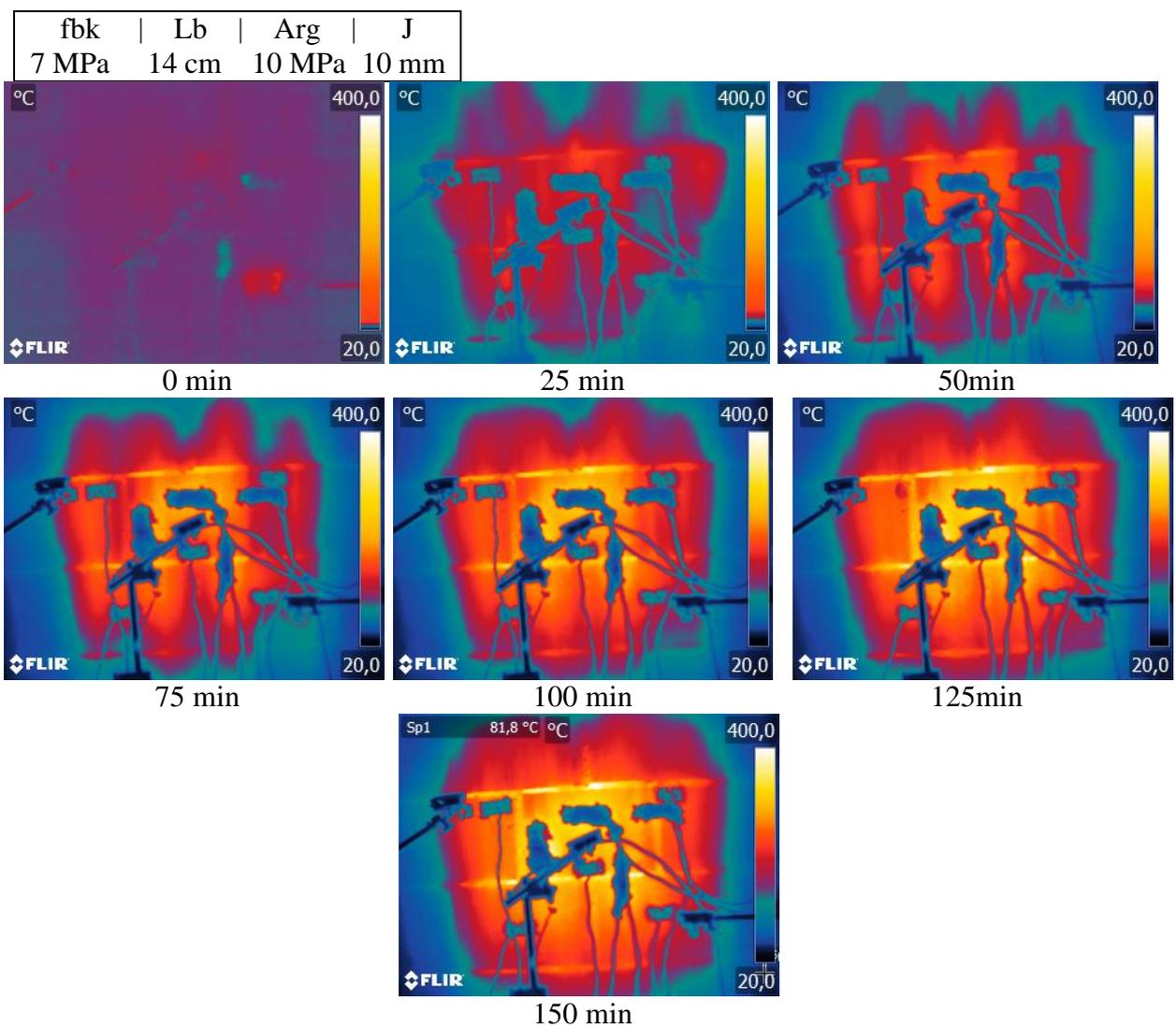


Figura 52 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P5a.

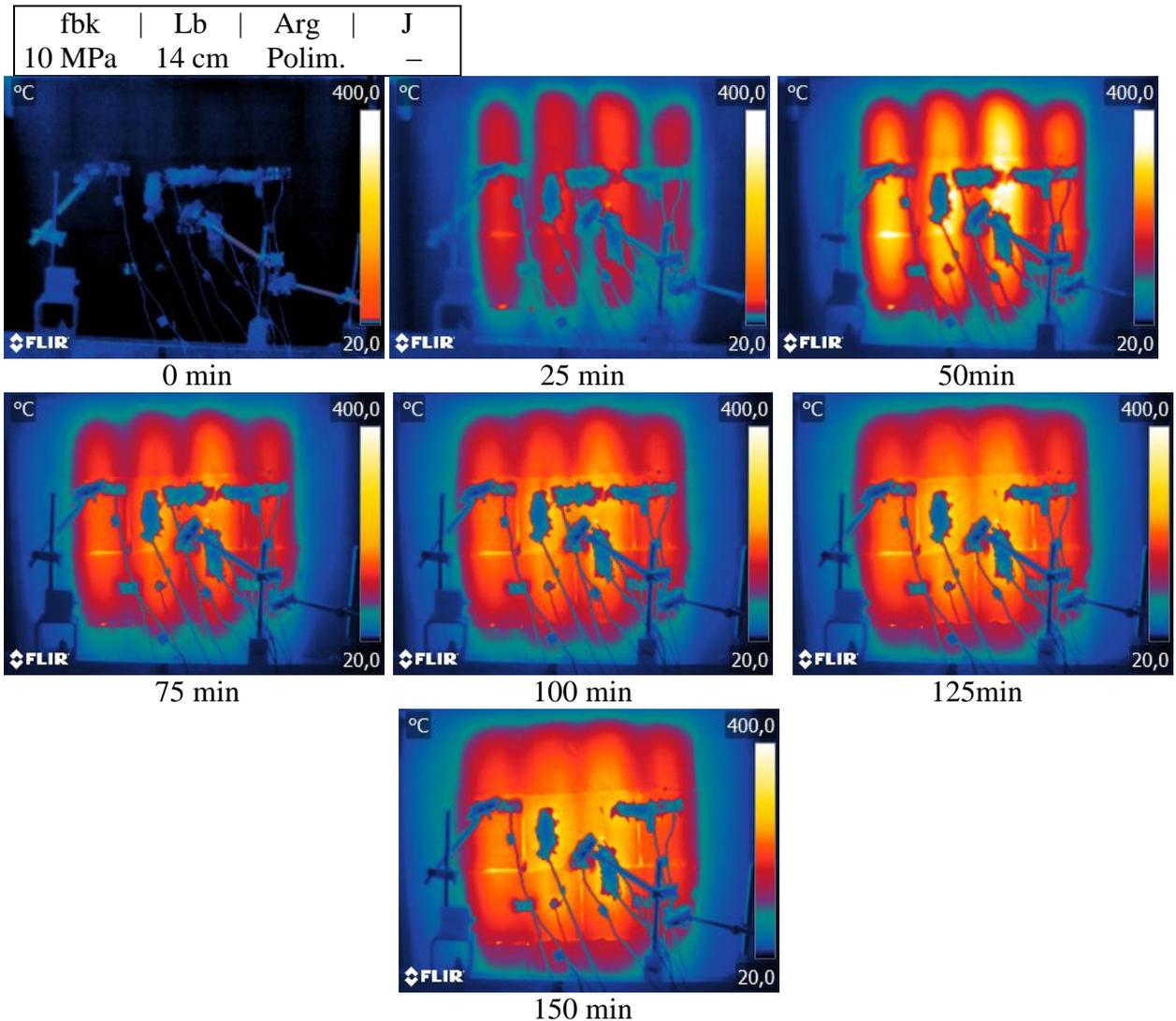


Figura 53 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P6a.

Para as amostras com revestimento na face aquecida, o aquecimento da região não exposta foi retardado e amenizado, conforme citado anteriormente. É possível visualizar na captura aos 25 minutos da Figura 54, no entanto, manchas com temperatura mais elevada. Essas manchas podem estar atribuídas a prováveis fissurações e deslocamentos da argamassa de revestimento dessas regiões, o que permitiu a maior propagação local de calor.

A diferença de coloração e, portanto, de temperatura que pode ser visualizada entre as primeiras imagens (tempo 0 min) de cada figura é atribuída às diferentes temperaturas ambiente nos dias dos ensaios, que variam muito ao longo do ano na região onde os mesmos foram realizados.

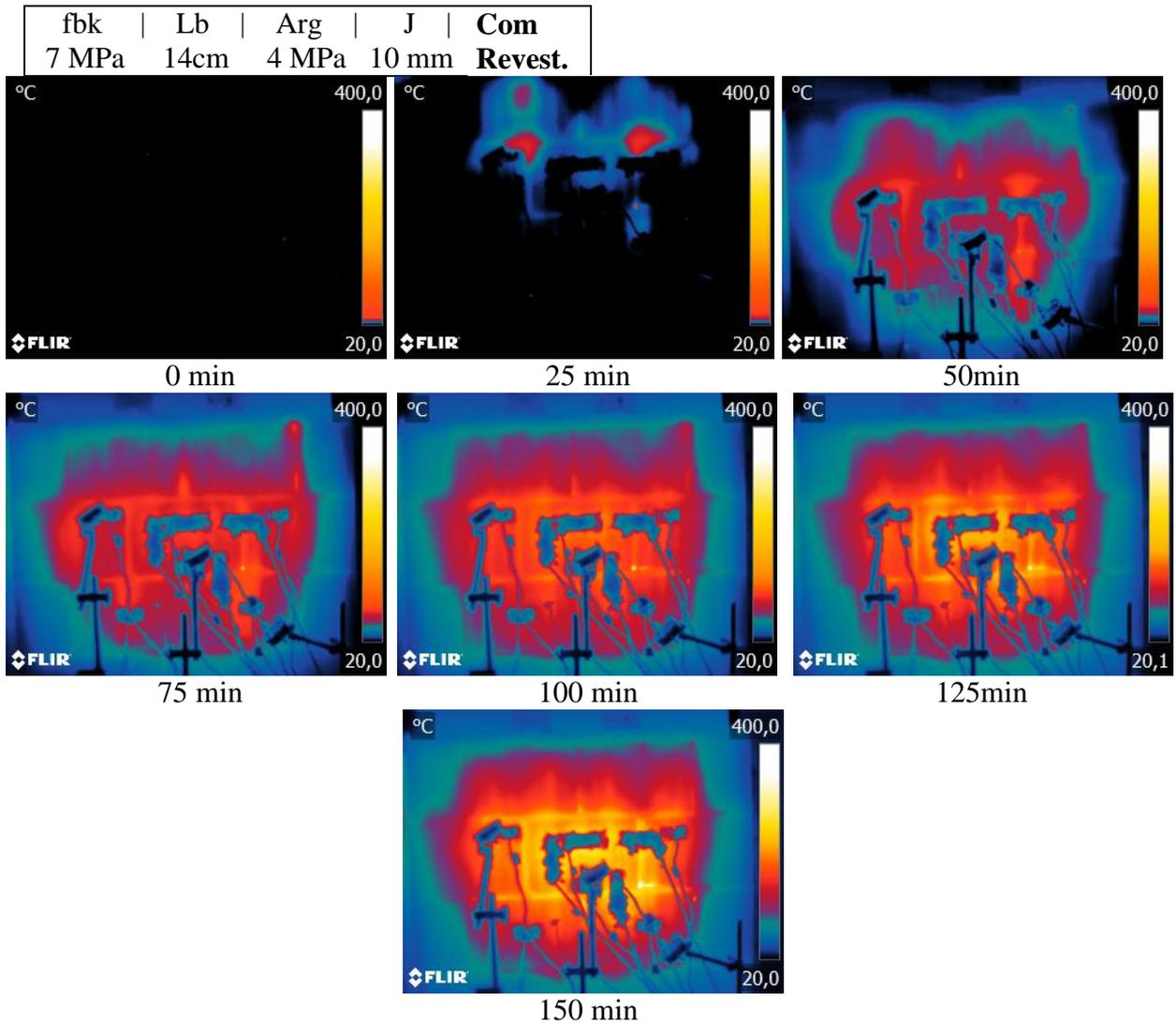


Figura 54 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P7b.

As imagens das paredes não incluídas nesse capítulo estão disponíveis para visualização no Apêndice B.

5.2.4. Deslocamento transversal.

O deslocamento transversal, ou deslocamento fora do plano, foi medido por meio de relógios comparadores, conforme citado no capítulo anterior. Os resultados obtidos estão dispostos nas figuras 55 a 61. É importante salientar que os valores negativos apresentados nos gráficos significam movimentação em direção ao forno, enquanto os valores positivos significam afastamento em relação à fonte de calor.

Dessa forma, pode-se observar uma tendência inicial das paredes a movimentarem-se de modo a causar aproximação da fonte de calor. Esse comportamento perdura aproximadamente o tempo de aquecimento do forno. Depois disso, os deslocamentos passam a estabilizarem-se e, então, o sentido do movimento é revertido, apresentando afastamento em relação ao forno, até que a alvenaria retorne aproximadamente à sua posição original.

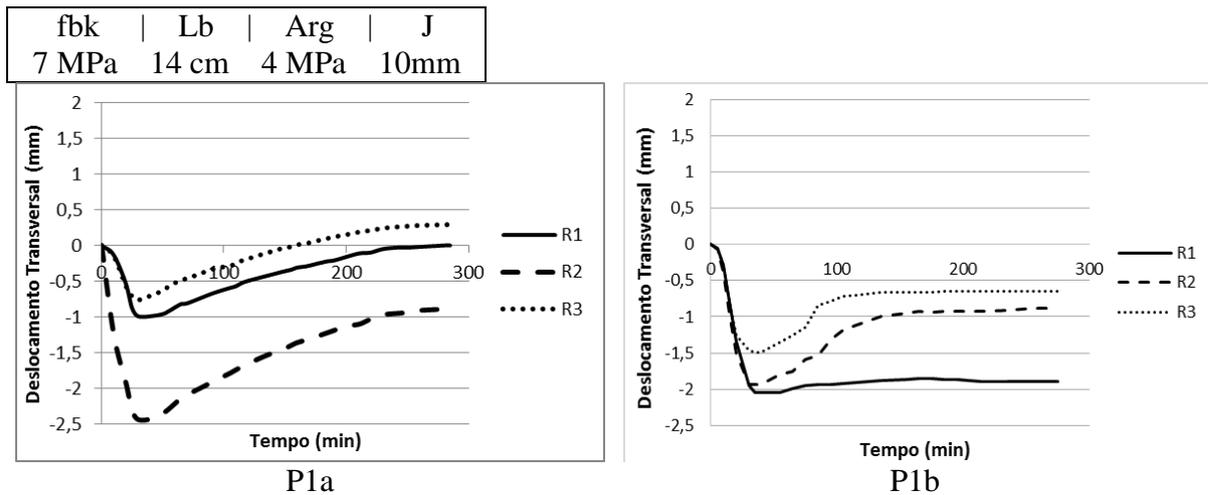


Figura 55 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 10 mm.

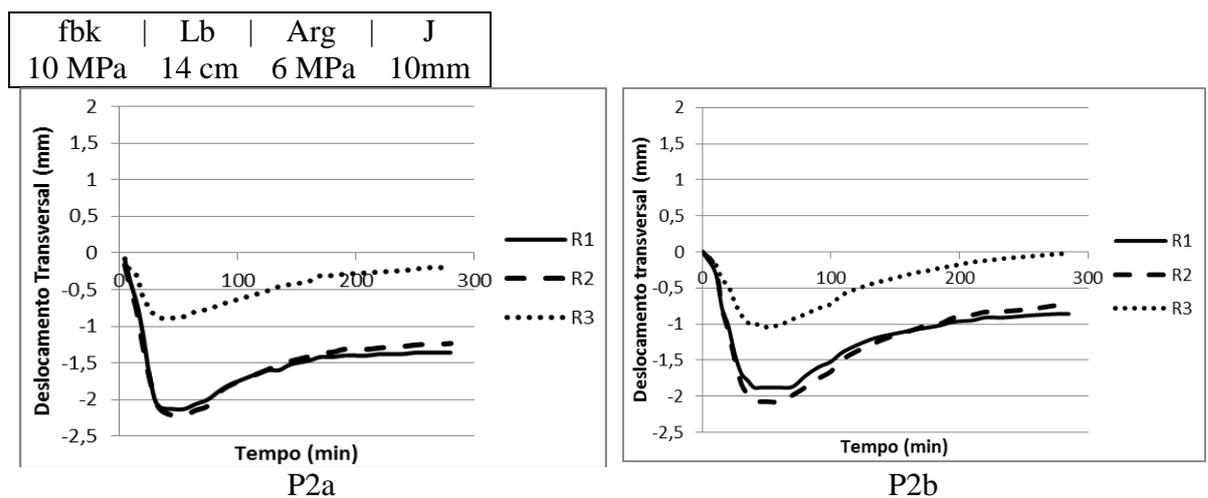


Figura 56 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B2, argamassa 6 MPa e junta 10 mm.

| | | | |
|-------|-------|-------|------|
| fbk | Lb | Arg | J |
| 7 MPa | 19 cm | 4 MPa | 10mm |

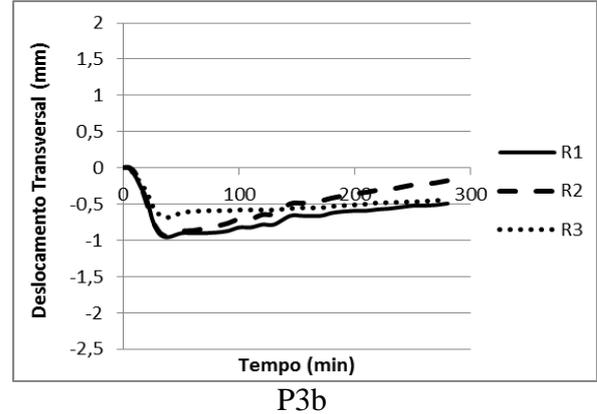
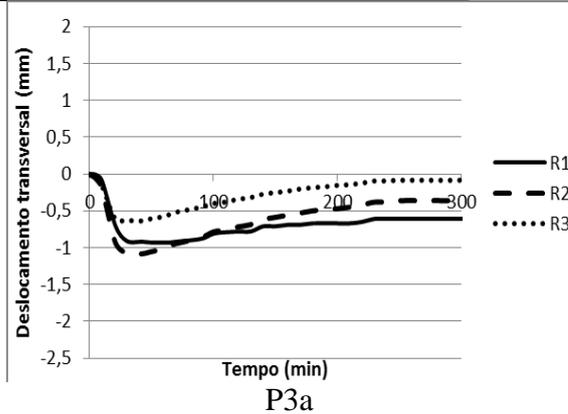


Figura 57 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B3, argamassa 4 MPa e junta 10 mm.

| | | | |
|-------|-------|-------|------|
| fbk | Lb | Arg | J |
| 7 MPa | 14 cm | 4 MPa | 5 mm |

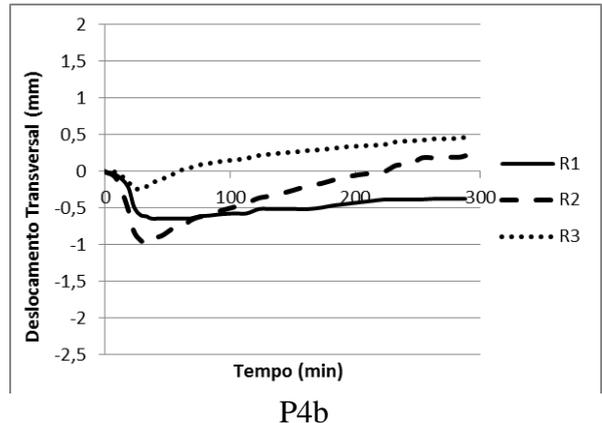
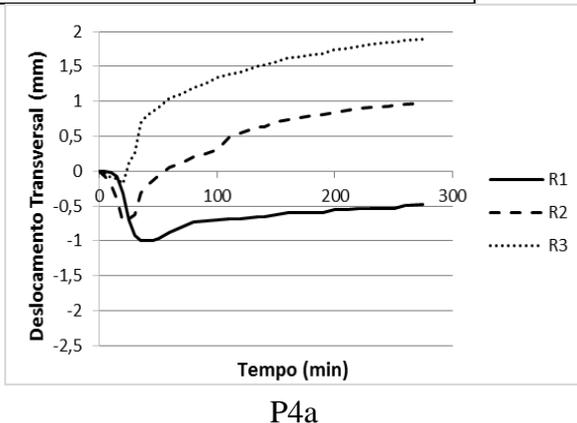


Figura 58 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 5 mm.

| | | | |
|-------|-------|--------|------|
| fbk | Lb | Arg | J |
| 7 MPa | 14 cm | 10 MPa | 10mm |

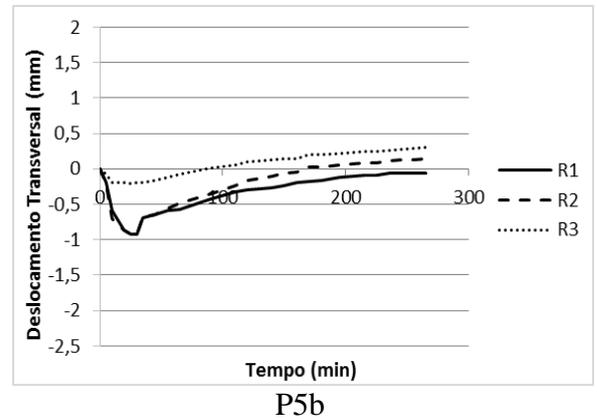
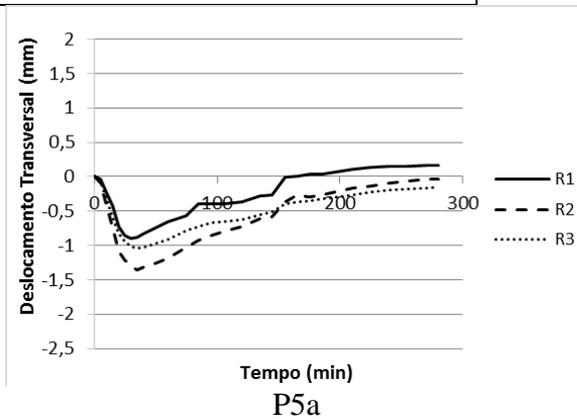


Figura 59 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B1, argamassa 10 MPa e junta 10 mm.

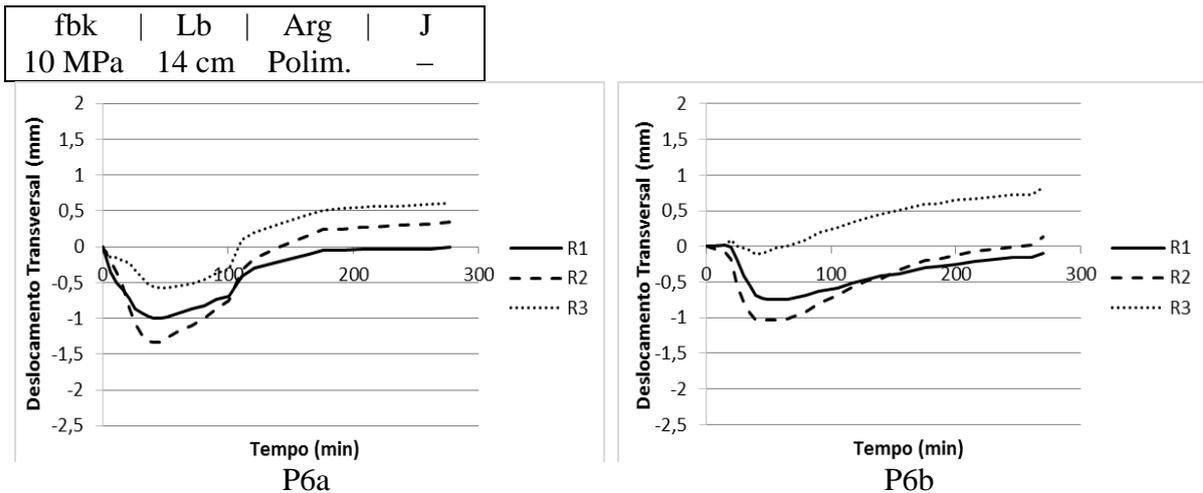


Figura 60 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B2 e junta de argamassa polimérica.

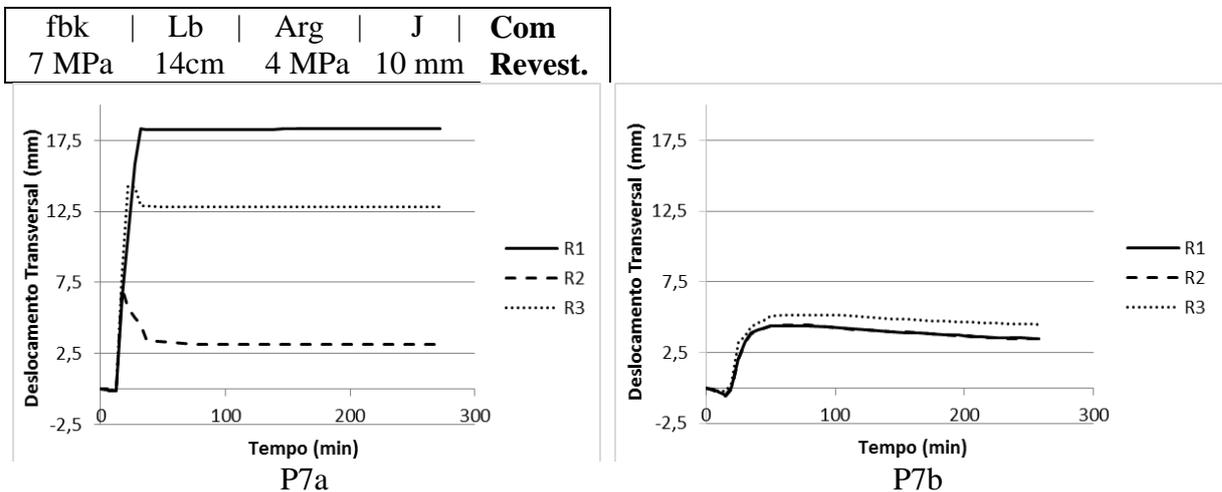


Figura 61 – Deslocamento transversal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa, junta 10 mm e revestimento de argamassa na face exposta.

O comportamento observado nos primeiros minutos é explicado por Nguyen et al. (2009), conforme descrito no capítulo 3, os quais atribuem o aumento inicial dos deslocamentos transversais ao rápido incremento de temperatura, que gera grande gradiente térmico, ocasionando maior dilatação na face exposta em comparação com a face oposta ao fogo. Tal movimentação gera variação dos esforços de compressão da junta ao longo da espessura da parede (Figura 62b). Ainda segundo os autores supracitados, a tendência de uniformização da temperatura ao longo da espessura da parede acarreta o retorno da mesma à posição inicial. Entretanto, como é possível verificar pelos dados de temperatura, nos casos analisados o gradiente térmico entre a face exposta e a mais protegida do calor permanece grande durante toda a realização do ensaio, tornando essa explicação inválida para a presente situação.

Dessa forma, a mitigação dos deslocamentos transversais pode ser explicada de maneira análoga ao fenômeno *reverse bowing* (NADJAI, 2003), segundo o qual ocorreria degradação da face exposta, acarretando em excentricidade de carga em direção ao fogo e reversão do sentido da deflexão. No entanto, para a alvenaria em estudo, a degradação ocorre na junta de argamassa, e não em toda a face exposta ao aquecimento. À vista disso, o mecanismo que origina a reversão do deslocamento foi ilustrado pela Figura 62c.

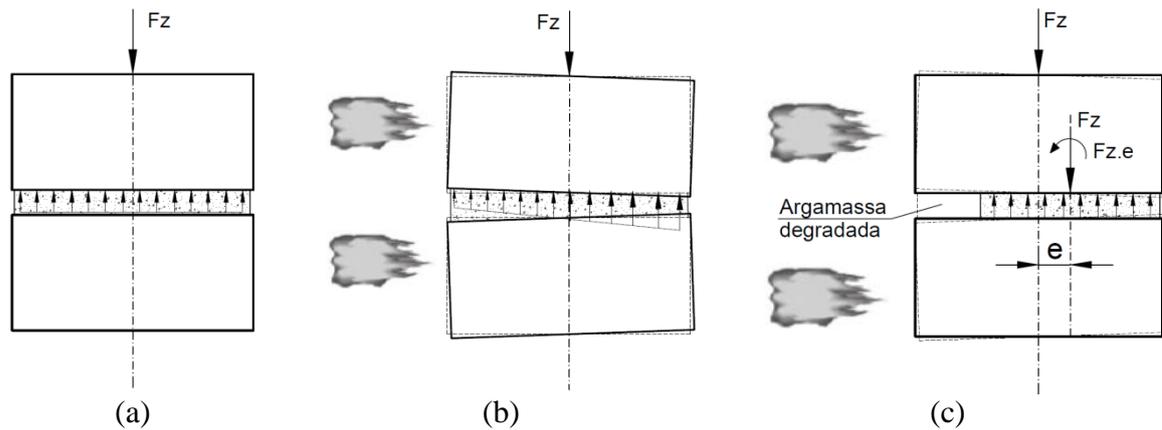


Figura 62 – Mecanismos de deflexão e reversão dos deslocamentos transversais (a) Situação inicial. (b) Deflexão devido à dilatação da face exposta. (c) Reversão da deflexão devido à degradação da argamassa.

Esse padrão de deslocamento é observado para praticamente todas as amostras, exceto aquelas dotadas de revestimento em sua face exposta. Nesses casos em particular, pôde-se observar que o aquecimento ocasionou descolamento da argamassa de revestimento em sua interface com o bloco, causando um “estufamento” da mesma, o que acabou por empurrar a amostra no sentido contrário ao forno. Esse comportamento mostrou-se mais acentuado na parede P7a, porque, provavelmente, para essa amostra não tenha sido realizado travamento adequado do pórtico de suporte, o que permitiria sua movimentação. Dessa forma, os resultados obtidos nessas amostras não representam o real comportamento da alvenaria submetida ao aquecimento, mas a movimentação do sistema devido à degradação do revestimento. Ressalta-se que, para esses casos, a escala dos gráficos foi alterada visando possibilitar a visualização dos dados.

Em geral, o relógio comparador R3, localizado no canto inferior direito, sofre menor deslocamento máximo, enquanto o relógio posicionado no centro da parede (R2) registra os maiores valores, indicando que a deformação fora do plano sofrida pelas amostras em seu momento de pico se assemelha àquela apresentada por Nguyen e Meftah (2012) para

alvenarias com carregamento axial, apresentada na Figura 10b. O menor deslocamento próximo à base das paredes é explicado pelos autores pelo acúmulo de argamassa de assentamento nessa região, criando certo engastamento da base. Também pode ser atribuído ao fato de a temperatura tender a ser maior na região superior, causando maiores dilatações nesses pontos.

Assumindo que a deformada das amostras ensaiadas seguiu o padrão descrito pelos autores supracitados, traçaram-se os perfis de deslocamento fora do plano para o instante de maior deflexão e para a posição no momento do encerramento dos ensaios. Para possibilitar a visualização dos resultados, os valores obtidos foram aumentados em cem vezes. As deformadas estão dispostas nas figuras 63 a 68.

No primeiro grupo, cujas amostras foram construídas com blocos de 14 cm de largura e f_{bk} 7 MPa, argamassa de 4 MPa e junta de 10 mm, visualiza-se possíveis diferenças na fixação das amostras, visto que, apesar dos valores semelhantes – máximos entre 2,0 e 2,5 mm – a deformação se deu de forma distinta. Em todo o caso, fica evidenciada a capacidade de movimentação dessas alvenarias, indicando menor rigidez do sistema. Levando em consideração o comportamento esperado, assume-se que a amostra P1a representa melhor a deformação deste grupo.

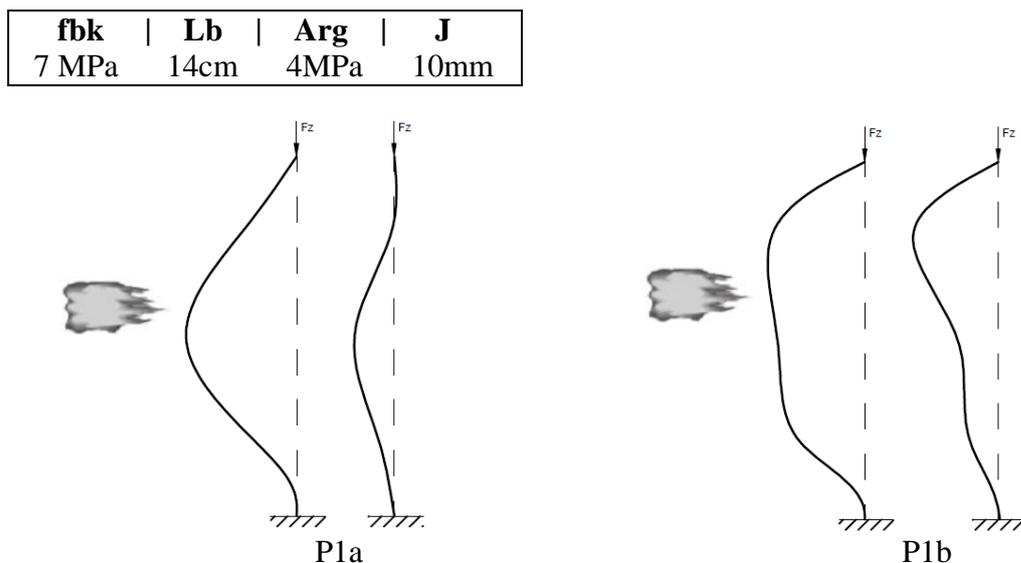


Figura 63 – Perfil de deformação das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 10 mm.

Para o grupo 2, os deslocamentos apresentaram-se mais comportados. Os valores máximos giraram em torno de 2,0 mm, não chegando a retornar à posição inicial ao final do ensaio. O comportamento mais uniforme dessas amostras pode estar relacionado ao fato de as paredes maciças do bloco proporcionarem maior aderência com a argamassa, cuja resistência também é superior à do primeiro grupo, possibilitando, assim, movimentação de forma mais monolítica.

| fbk | Lb | Arg | J |
|------------|-----------|------------|----------|
| 10 MPa | 14cm | 6MPa | 10mm |

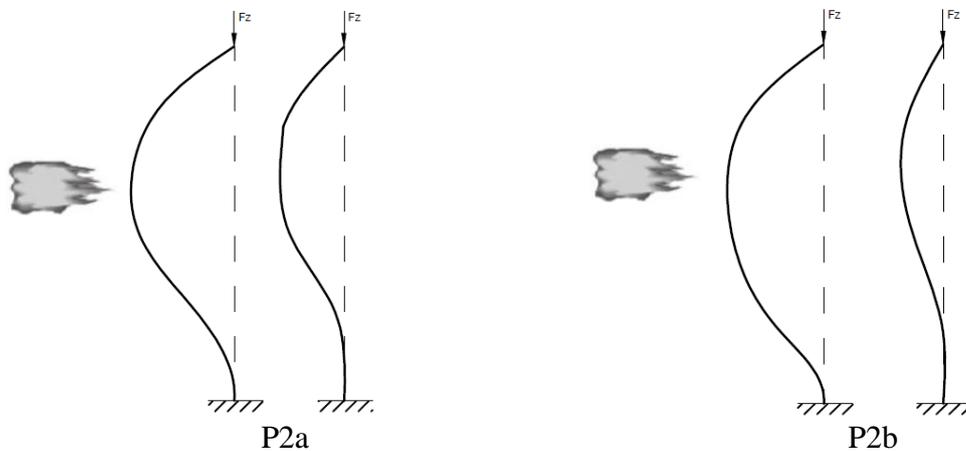


Figura 64 – Perfil de deformação das amostras de bloco B2, argamassa 6 MPa e junta 10 mm.

Nota-se, no terceiro grupo analisado, uma significativa atenuação nos deslocamentos máximos, mantendo-se na faixa de 1,0 mm. Tal atenuação é atribuída ao uso de bloco cerâmico de maior espessura na composição da alvenaria, o que proporciona maior rigidez ao sistema. Esse comportamento indica outra vantagem no uso de blocos de 19 cm de espessura, já que menores deslocamentos indicam melhor desempenho frente à possibilidade de danos e fissuração. Salienta-se que essa redução na deformada se deu apesar de a argamassa de assentamento possuir a mesma resistência à compressão do primeiro grupo.

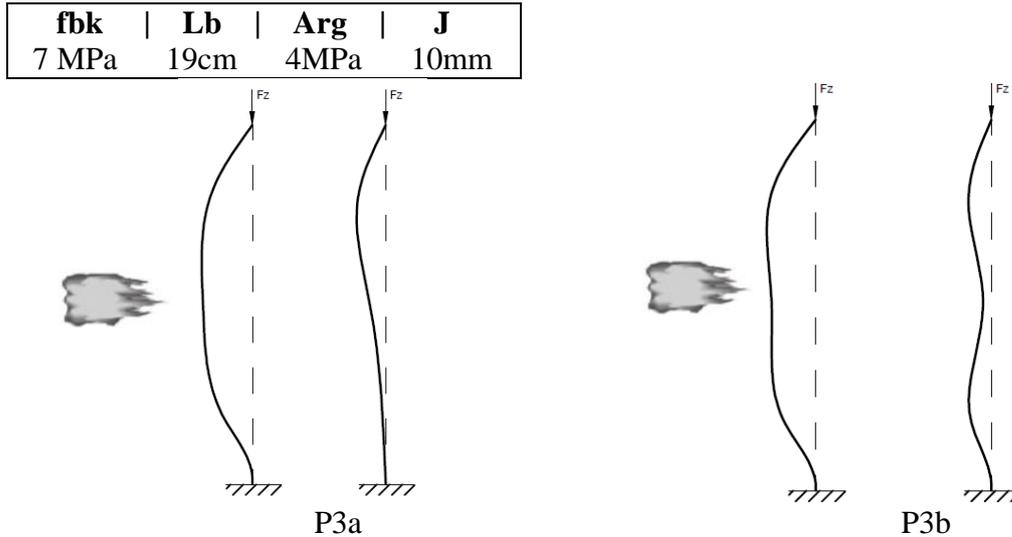


Figura 65 – Perfil de deformação das amostras de bloco B3, argamassa 4 MPa e junta 10 mm.

Para o quarto grupo estudado também foram observadas atenuações dos deslocamentos transversais máximos, mantendo-se na mesma ordem do grupo 3. Isso porque a redução da espessura da junta de argamassa reduz a flexibilidade e a liberdade para movimentação da alvenaria. No entanto, o comprometimento da junta, aparentemente, foi maior para essa configuração, visto que o efeito de reversão dos deslocamentos mostrou-se mais acentuado, chegando, inclusive, a inverter o sentido da deflexão. É possível que, pela menor quantidade de argamassa presente nas juntas, essa tenha se deteriorado com maior facilidade, perdendo sua capacidade de suporte próximo à face exposta e conduzindo à excentricidade de carga apresentada na Figura 62b.

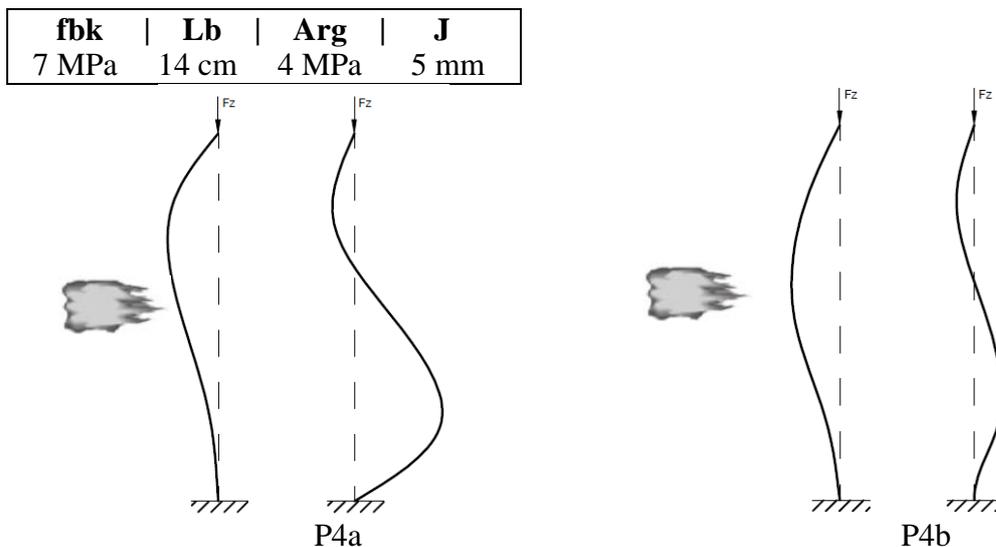


Figura 66 – Perfil de deformação das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 5 mm.

Nos casos do grupo 5, em que foi utilizada argamassa de maior resistência, a redução dos deslocamentos transversais também foi visualizada, mantendo-se novamente por volta de 1,0 mm. Isso porque, assim como outros fatores, o aumento da resistência da argamassa de assentamento também traz incremento à rigidez da alvenaria. Ao final do ensaio, as amostras retornam aproximadamente à sua posição inicial, indicando movimentações mais bem-comportadas do que com menor espessura de junta.

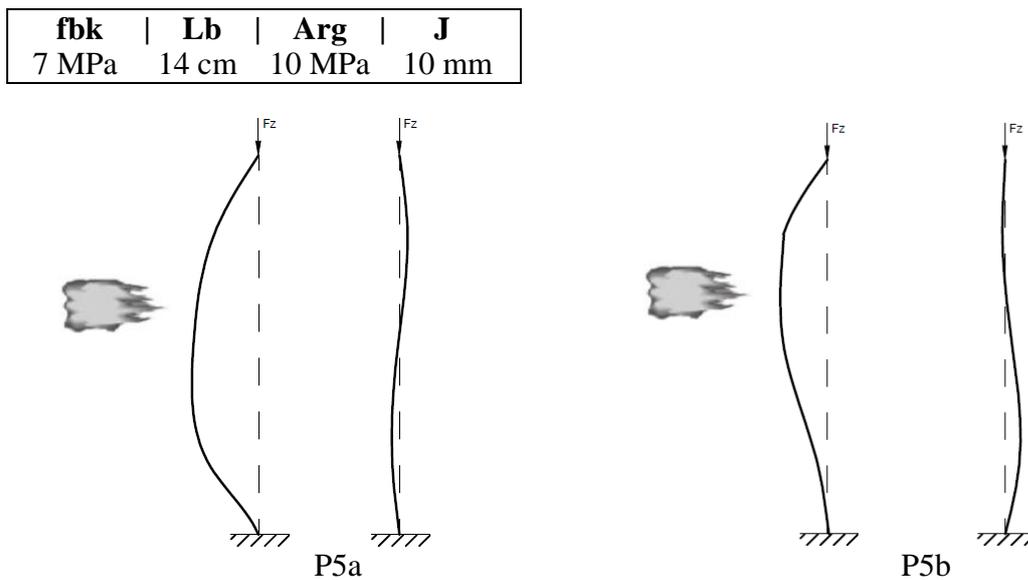


Figura 67 – Perfil de deformação das amostras de bloco B1, argamassa 10 MPa e junta 10 mm.

Os deslocamentos transversais das amostras do sexto grupo, apesar de construídas com blocos diferentes, se assemelham com as do grupo 4, com menor espessura de junta. Da mesma forma, portanto, os deslocamentos são atenuados a aproximadamente 1,0 mm, invertendo o sentido da deflexão ao final do ensaio. A argamassa polimérica produz juntas pouco flexíveis e de pequena espessura, por esse motivo a semelhança entre os grupos pode ser observada. A degradação do material, então, causa o mesmo efeito de excentricidade de carga mencionado anteriormente.

| | | | |
|------------|-----------|------------|----------|
| fbk | Lb | Arg | J |
| 10 MPa | 14 cm | polim. | – |

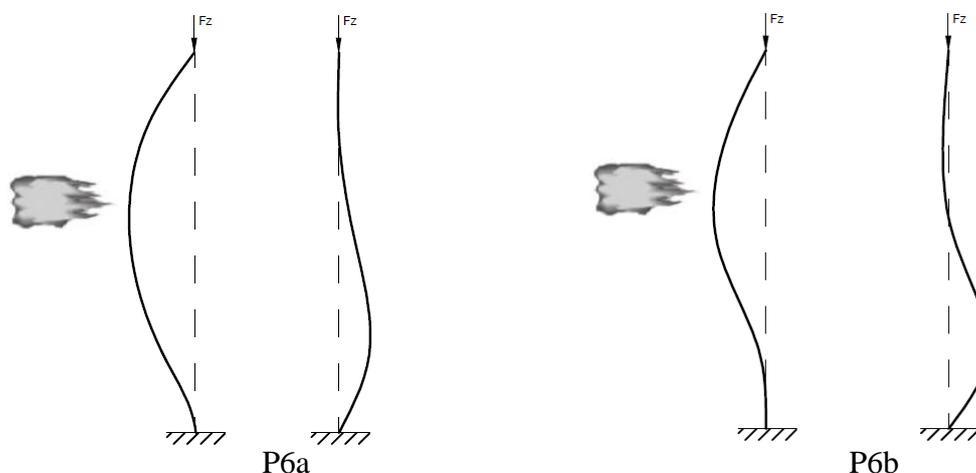


Figura 68 – Perfil de deformação das amostras de bloco B2 e argamassa polimérica.

Os perfis de deformação das amostras com face exposta revestida não foram analisados pelo fato de os deslocamentos medidos não serem representativos do comportamento da alvenaria em questão, conforme citado no início desse subitem.

5.2.5. Deslocamento longitudinal

Os deslocamentos apresentados nesse item tratam das movimentações dentro do plano das paredes de alvenaria submetidas aos ensaios de exposição térmica. Foram mensuradas as dilatações dos blocos na direção vertical e horizontal, bem como o esmagamento ou afastamento das juntas de assentamento da alvenaria. Os resultados obtidos estão dispostos nas figuras 70 a 76. Notabiliza-se que foram perdidos os dados de deslocamento longitudinal da parede P1b.

Para exposição dos resultados, foram considerados relevantes os dados obtidos durante os primeiros 150 minutos de ensaio, pois após esse período os mesmos poderiam sofrer interferência da temperatura, visto que, a essa altura do ensaio, o aquecimento da face não exposta ao calor atingia aproximadamente seu máximo, aquecendo também os *clip-gages* utilizados na instrumentação. Salienta-se que os valores negativos nos gráficos representam o movimento de fechamento dos transdutores de deslocamento, enquanto valores positivos indicam a abertura dos mesmos.

Os resultados obtidos com o uso dos *clip-gages* indicam algumas características importantes de serem destacadas. Uma das observações que pode ser feita é de que amostras com juntas mais flexíveis, ou seja, de 10 mm e elaboradas com argamassas de menor resistência, tendem a permitir a dilatação do bloco, formando um sistema mais deformável em comparação com os demais. Esse comportamento pode ser observado na amostra do primeiro grupo, por exemplo, onde os transdutores fixados ao bloco central – CG 1 e CG 2 – apresentaram comportamento que indica expansão em ambas as direções. O início da dilatação coincide com o momento em que a temperatura na face externa começa a se elevar.

No segundo grupo, apesar de a argamassa ter resistência apenas um pouco superior à do primeiro, a dilatação do bloco não se apresentou da mesma forma. Isto pode ter se dado pelo fato de a restrição lateral ter sido mais eficaz, ou ainda pela maior rigidez do bloco, que possui paredes maciças, e não vazadas, a fim de lhe conferir maior resistência.

Melhorando a resistência da argamassa a ponto de alcançar ou até ultrapassar a resistência do bloco, como nos casos P5a e P5b, a junta passa a não absorver mais as deformações, transferindo, então, tensões de compressão para o bloco, denotadas pelos valores negativos de CG2. O mesmo acontece para a argamassa polimérica, que, por ser pouco deformável, também transfere tensões para o bloco, causando sua compressão em ambas as direções – CG1 e CG2.

Essas transferências de tensão de compressão para o bloco podem significar um sinal de alerta para a possível ocorrência de *spalling* na alvenaria quando executada com argamassa de resistência alta. Na amostra P6a, por exemplo, construída com argamassa polimérica, foi possível visualizar no bloco uma fissura de maior expressão, se comparada às demais, mesmo em se tratando de unidade com paredes maciças (Figura 69). Essa fissura pode estar relacionada às tensões de compressão sofridas pela mesma.



Figura 69 – Fissura na face exposta observada após ensaio – amostra P6a.

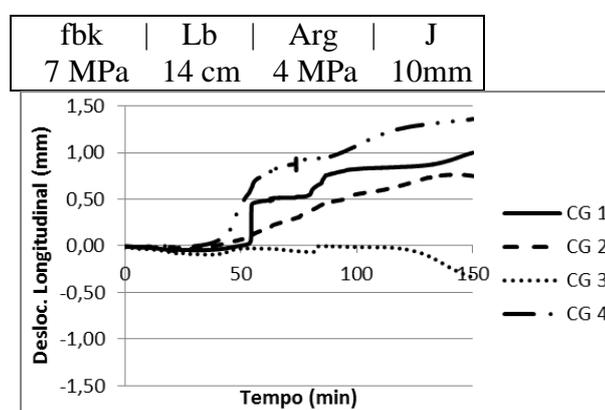
Para praticamente todos os casos, a junta horizontal, monitorada pelo CG 3, apresenta fechamento, sinalizando compressão da mesma. Tal manifestação pode ser originada, tanto pelo carregamento vertical aplicado à amostra, quanto pela dilatação dos blocos adjacentes a ela, ou ainda por uma combinação de ambos. Os casos que se excetua desse padrão são os das amostras pertencentes ao grupo 6, construídas com argamassa polimérica, em que a junta horizontal num período inicial se comporta como as demais, apresentando compressão, e posteriormente inverte seu movimento, o que denota abertura da junta.

O comportamento observado para a junta horizontal das amostras com argamassa polimérica pode ser explicado pelo fenômeno de reversão da deflexão transversal, ilustrado na Figura 62, em que inicialmente o bloco gira, comprimindo a junta, e posteriormente retorna a sua posição original ou, inclusive, reverte o sentido da deformação. Essa manifestação fica mais evidente para essa argamassa pelo fato de a mesma ser menos flexível que as demais, e, portanto, acomodar menos os deslocamentos dos blocos.

Destaca-se também, que os grupos 3 e 7, que apresentaram melhor isolamento térmico na análise de temperatura, indicaram pouca movimentação de dilatação dos blocos, o que era esperado, visto que a temperatura na face externa se apresentou inferior às demais. Nas amostras P3a e P3b, a partir dos 100 minutos, momento em que a temperatura nos termopares de superfície começa a se elevar significativamente, passa a ocorrer certa movimentação dos *clip-gages*, indicando o início da dilatação. Os baixos deslocamentos longitudinais apontados

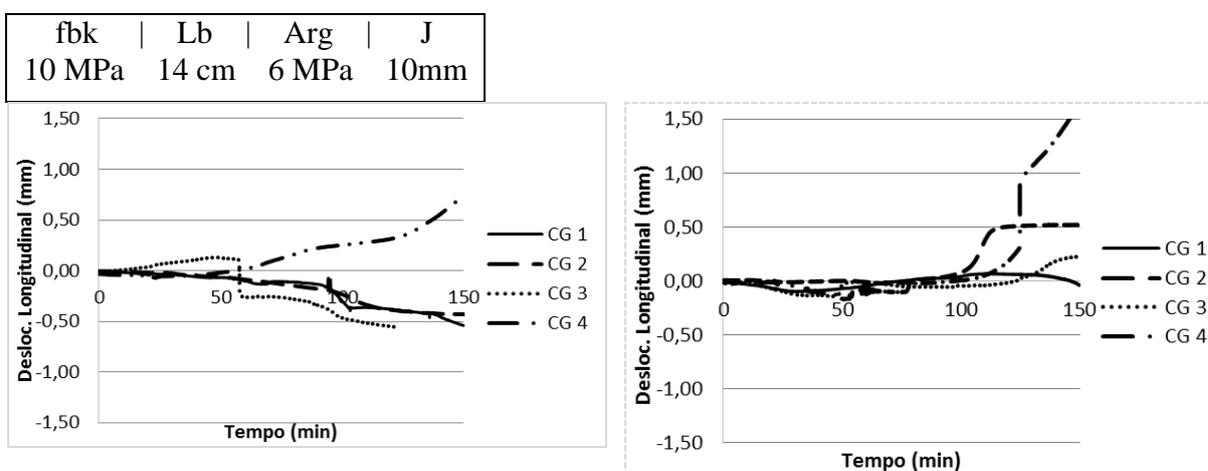
para esses dois grupos também estão relacionados às menores movimentações transversais dessas amostras.

O movimento de abertura do CG 4, manifestado para a maioria dos resultados obtidos, pode ter sido fruto de uma movimentação da parede como um todo, que poderia estar se expandindo lateralmente de forma geral devido a uma restrição ineficiente nessa direção. É possível que a argamassa utilizada para o capeamento das amostras não tenha resistência suficiente a ponto de impedir as deformações, apesar de se tratar de uma argamassa rica em cimento. Tendo isso em vista, o efeito de esmagamento da junta entre os blocos é melhor visualizado na direção vertical, pelo *clip-gage* 3, já que nessa direção a aplicação de carga torna a restrição mais efetiva.



P1a

Figura 70 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 10 mm.



P2a

P2b

Figura 71 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B2, argamassa 6 MPa e junta 10 mm.

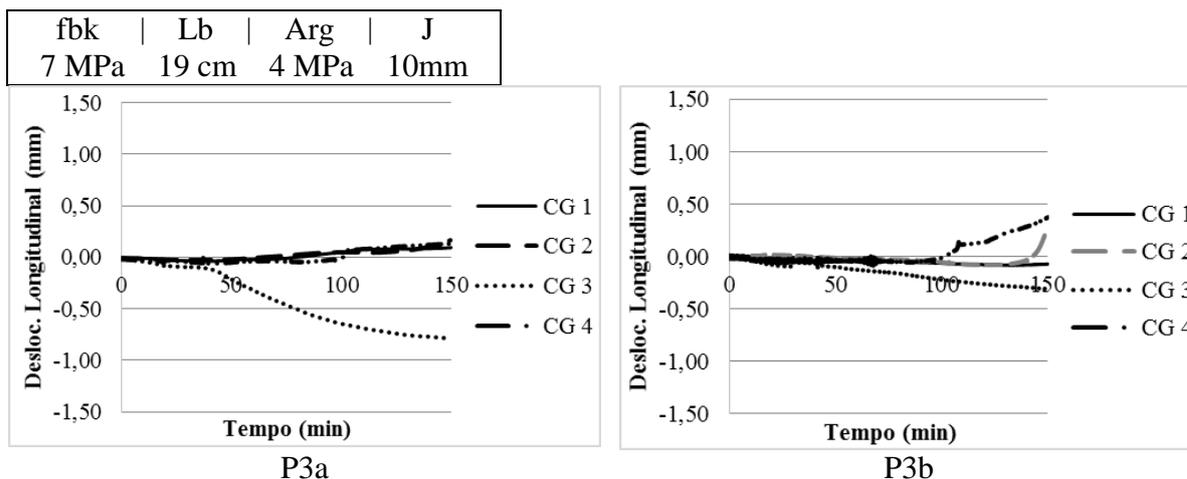


Figura 72 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B3, argamassa 4 MPa e junta 10 mm.

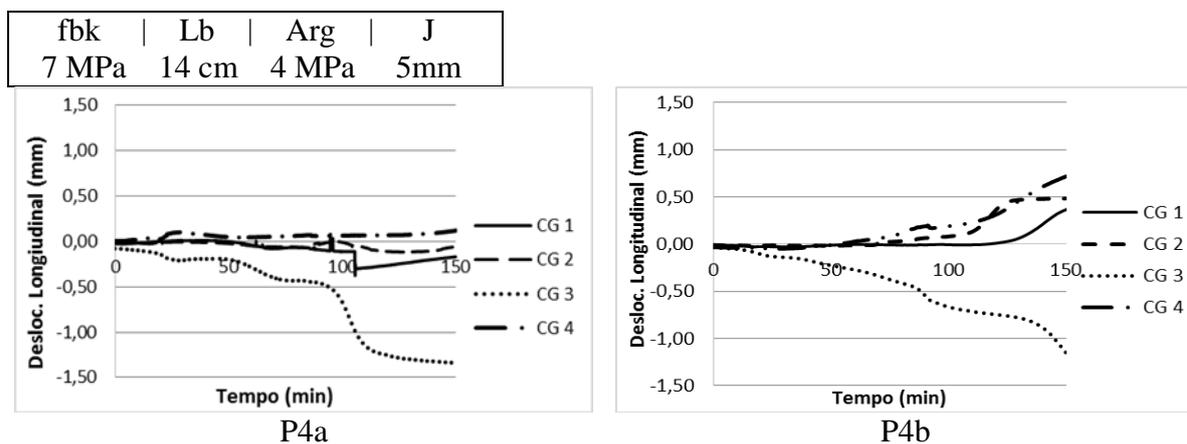


Figura 73 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 5 mm.

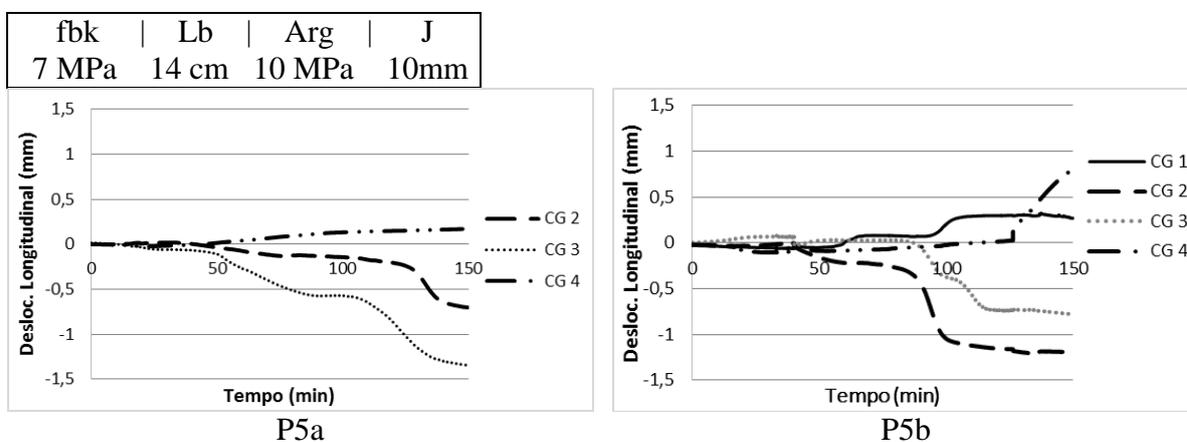


Figura 74 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B1, argamassa 10 MPa e junta 10 mm.

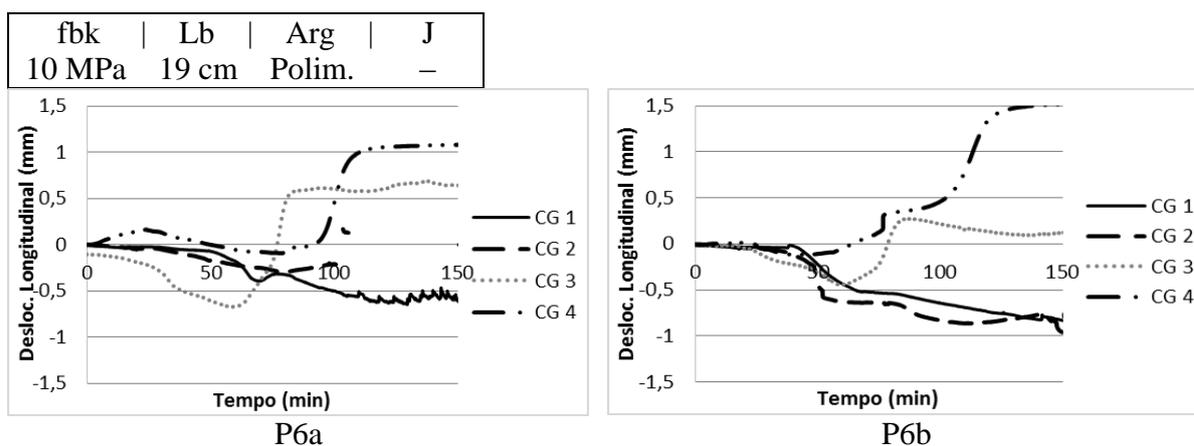


Figura 75 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B2 e junta de argamassa polimérica.

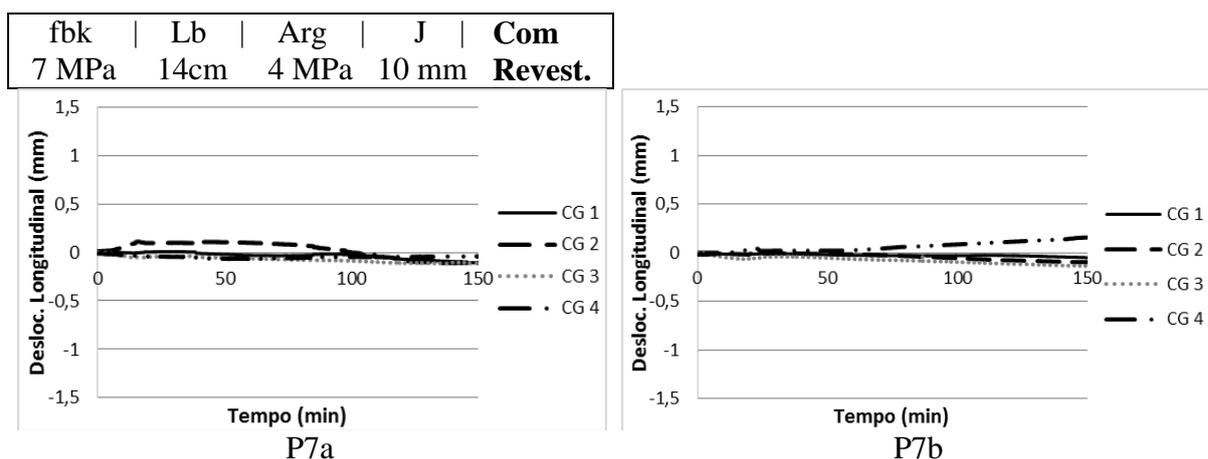


Figura 76 – Deslocamento longitudinal das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa, junta 10 mm e revestimento de argamassa na face exposta.

5.2.6. Carregamento das amostras

O carregamento, conforme exposto no capítulo anterior, foi aplicado verticalmente nas amostras, enquanto a lateral apenas foi restringida a fim de evitar a dilatação térmica das paredes. Nas figuras 77 a 83, são mostrados os dados registrados pelas células de cargas acopladas aos macacos hidráulicos, responsáveis pela aplicação de carga e restrição das miniparedes, indicando o comportamento ao longo do tempo de ensaio.

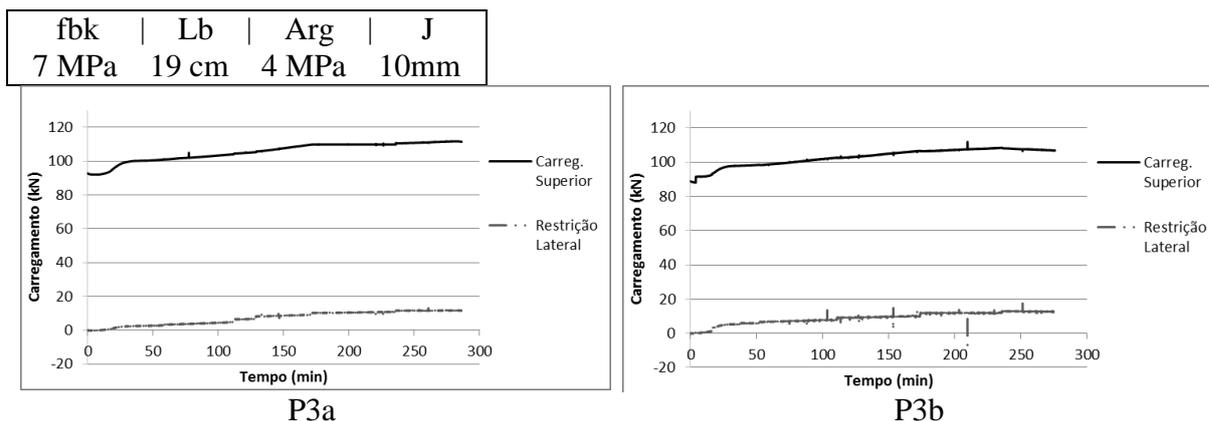


Figura 79 – Carregamento das amostras de bloco B3, argamassa 4 MPa e junta 10 mm.

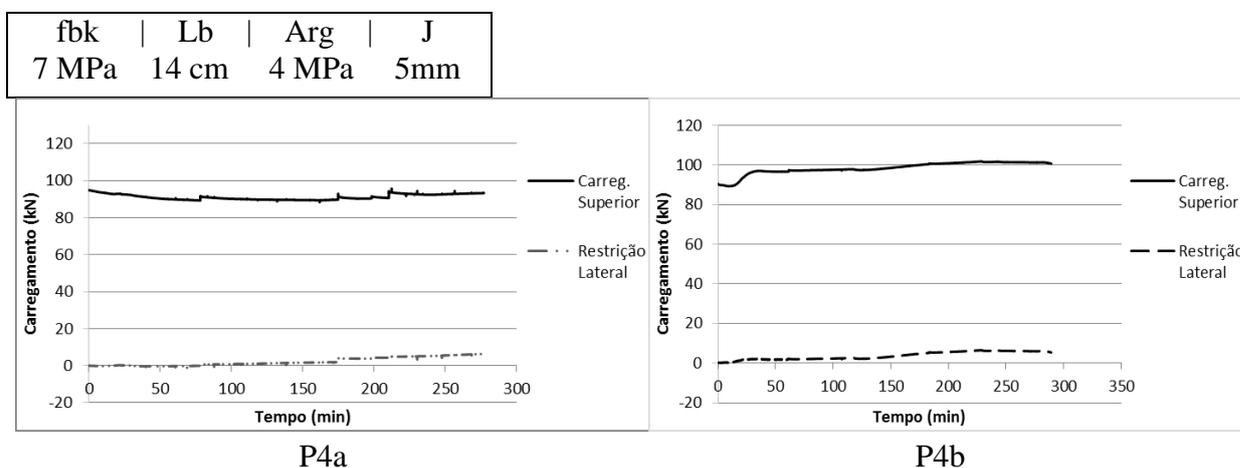


Figura 80 – Carregamento das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa e junta 5 mm.

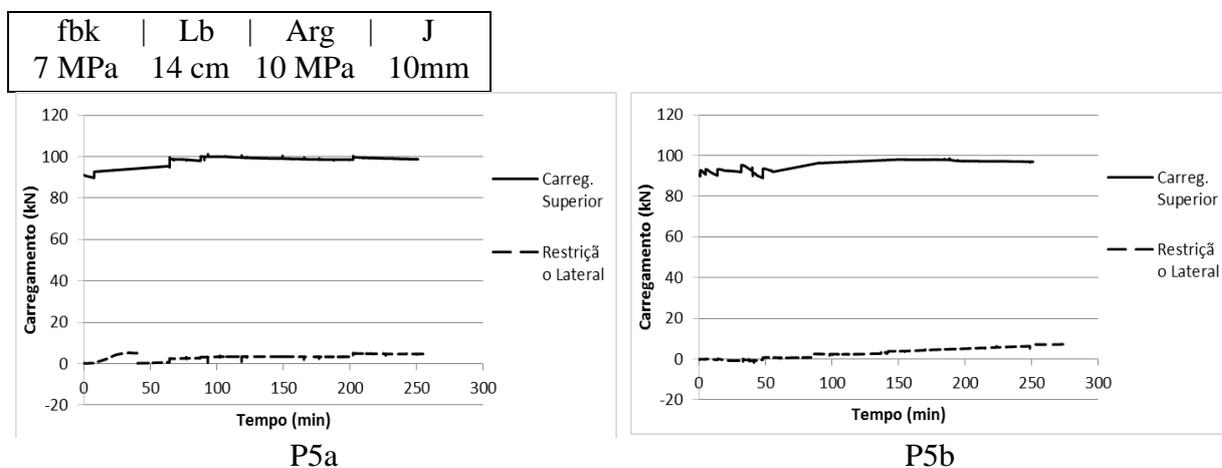


Figura 81 – Carregamento das amostras de bloco B1, argamassa 10 MPa e junta 10 mm.

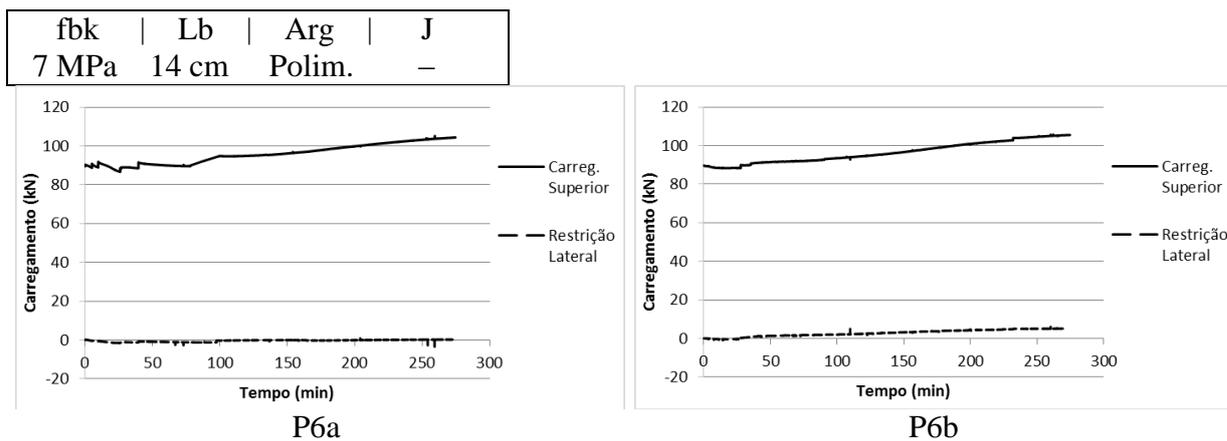


Figura 82 – Carregamento das amostras de bloco B2 e junta de argamassa polimérica.

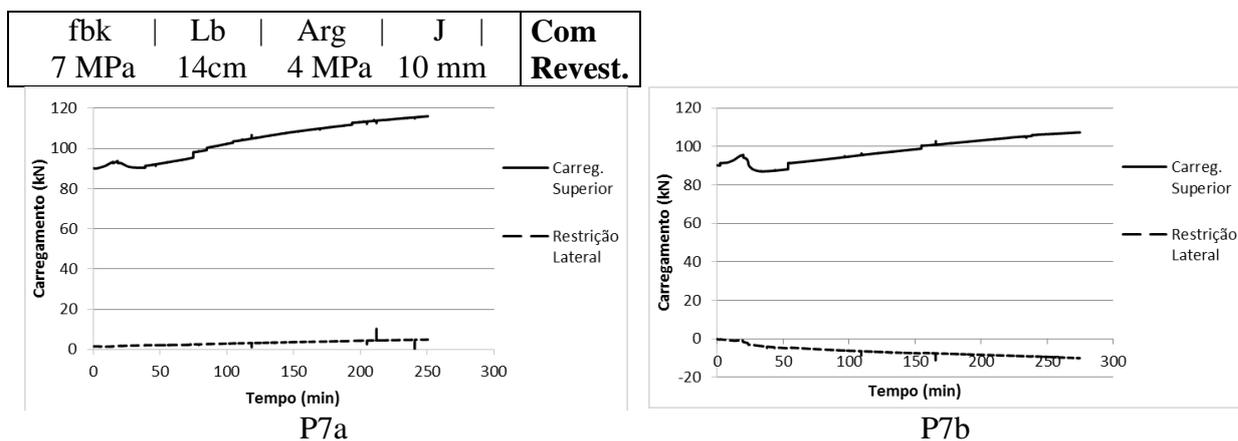


Figura 83 – Carregamento das amostras de bloco B1, argamassa 4 MPa, junta 10 mm e revestimento de argamassa na face exposta.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e considerações acerca do comportamento das miniparedes de alvenaria estrutural submetidas ao programa experimental proposto pelo presente trabalho, assim como sugestões para trabalhos a serem realizados no futuro.

6.1. CONCLUSÕES

Com a intensificação da preocupação acerca da segurança contra incêndio das edificações nos últimos anos em nosso estado, o presente trabalho objetivou ampliar o entendimento com relação ao comportamento de paredes de alvenaria com função estrutural frente a ação de altas temperaturas. Com os dados obtidos foi possível extrair algumas informações acerca desse comportamento, que estão listadas a seguir.

Quanto ao comportamento, de forma geral, das amostras pode se dizer que:

- i. As miniparedes ensaiadas apresentaram bom desempenho frente à ação das altas temperaturas;
- ii. As alvenarias, após a exposição, apresentaram fissuras, especialmente na face exposta ao calor. As fissuras observadas foram predominantemente verticais;
- iii. As amostras mantiveram-se estanques à passagem de gases quentes durante todo o período de ensaio;
- iv. Nenhuma das amostras falhou em algum dos requisitos para determinação do Tempo de Resistência ao Fogo durante as 4 horas de ensaio. No entanto, não se pode assumir que as alvenarias estudadas tenham atingido a resistência exigida por norma, já que os dados devem ser obtidos a partir de amostras em tamanho real para que tenham tal validade;
- v. A argamassa de assentamento das alvenarias sofre forte deterioração com a exposição à temperatura atingida durante o ensaio, perdendo significativamente sua

resistência, o que compromete o desempenho da alvenaria após um eventual sinistro.

- vi. A restrição lateral aplicada às amostras não gerou forças internas suficientes nos blocos para causar deslocamento dos mesmos, inclusive nos casos mais desfavoráveis.
- vii. Nas amostras revestidas, a argamassa de revestimento despreendeu-se completamente do substrato com a elevação da temperatura, afetando os resultados obtidos para o deslocamento transversal. Mesmo assim, o revestimento garantiu melhor desempenho ao elemento para os demais aspectos analisados.
- viii. As alvenarias do grupo 3, executadas com blocos de 19 cm de espessura e resistência de 7 MPa, mostraram-se mais seguras em relação às demais amostras executadas sem revestimento. Isso porque para essas alvenarias o isolamento térmico foi melhor, ao mesmo tempo em que houve redução dos deslocamentos transversais, sem que se observassem transferências de tensão para os blocos.

No que tange a temperatura das amostras, conclui-se que:

- i. A elevação de temperatura a qual as amostras foram submetidas seguiu aproximadamente a curva de aquecimento padrão, até o máximo estabelecido para a pesquisa, de 950°C;
- ii. No interior dos blocos, a temperatura máxima atingida girou em torno dos 600°C, exceto para as alvenarias de 19 cm de espessura e, principalmente, para aquelas com revestimento argamassado, que tiveram esse valor atenuado. Essa atenuação para essas tipologias foi confirmada pelas imagens termográficas capturadas durante o ensaio;
- iii. Na face oposta à exposição, a temperatura máxima registrada pelos termopares manteve-se entre 120 e 150°C, não ultrapassando, no entanto, 90°C para as amostras com revestimento, o que evidencia a importância do mesmo para o isolamento térmico;
- iv. A resistência do bloco e o tipo de junta não exercem influência significativa no isolamento térmico da alvenaria. Porém, conforme citado, o aumento da espessura

do bloco e a utilização de revestimento argamassado, sobretudo esse último, atenuam a passagem de calor para a face não exposta;

- v. Observou-se pelas imagens termográficas que para as amostras executadas com blocos do tipo B2, de resistência 10 MPa, a temperatura se propaga essencialmente pelas cavidades dos mesmos, em virtude de as paredes dessas unidades serem maciças. Isso se deve ao fato de que a propagação de calor é maior por convecção e irradiação do que por condução, mecanismo predominante em materiais maciços;

Os resultados obtidos para os deslocamentos transversais nos permitem tirar as seguintes conclusões:

- i. Todas as miniparedes não dotadas de revestimento apresentaram o fenômeno de reversão da deflexão transversal (*Reverse Bowing*), exibindo deslocamentos transversais em direção à fonte de calor nos minutos iniciais, que, posteriormente, se estabilizam e revertem seu sentido, em alguns casos retornando aproximadamente à sua posição original. As alvenarias com uma face revestida não puderam ser avaliadas nesse quesito devido ao destacamento do revestimento;
- ii. A reversão dos deslocamentos transversais foi atribuída à degradação da junta de argamassa, que ocasiona excentricidade de carregamento, contrabalanceando a deflexão;
- iii. No geral, o deslocamento transversal tem valores maiores registrados no centro, e mínimos na região inferior. Tal comportamento foi atribuído às condições de contorno às quais as amostras estão submetidas e a maior temperatura na porção superior da alvenaria, já que gases mais aquecidos tendem a subir;
- iv. A redução da espessura das juntas, o uso de argamassa de assentamento mais resistente ou polimérica e o aumento da resistência ou da espessura do bloco atenuam os deslocamentos transversais da alvenaria quando submetida a altas temperaturas. Isso porque tais fatores conferem maior rigidez às paredes;

A análise dos dados obtidos para os deslocamentos longitudinais conduziu às conclusões descritas abaixo.

- i. Após os primeiros 150 minutos, os resultados obtidos passaram a sofrer influência do aquecimento da instrumentação posicionada na face não exposta ao fogo;
- ii. Juntas mais flexíveis, ou seja, de 10 mm e elaboradas com argamassas de menor resistência, formam um sistema mais deformável em comparação aos demais, permitindo a dilatação do bloco em ambas as direções no plano;
- iii. A elevação da resistência da argamassa de assentamento, de forma que essa iguale ou ultrapasse a resistência das unidades da alvenaria, pode representar risco ao elemento, já que a absorção de tensões pelas juntas é reduzida, de modo a transferir esforços para o bloco. O mesmo se aplica à argamassa polimérica, por sua baixa deformabilidade;
- iv. A junta horizontal, monitorada pelo CG 3, em quase todas as tipologias apresentou movimento de fechamento, indicando estar sofrendo compressão. Isso foi atribuído à dilatação dos blocos adjacentes a ela, combinada à ação do carregamento vertical;
- v. As alvenarias executadas com argamassa polimérica excetuam o padrão supracitado, apresentando para a junta horizontal inicialmente compressão e, posteriormente, movimento de abertura, explicado pela ocorrência do fenômeno de reversão da deflexão;
- vi. Os grupos que apresentaram melhor isolamento térmico, conforme esperado, indicaram pouca dilatação dos blocos, pois a temperatura na face externa manteve-se inferior às demais.

Para os resultados de carregamento das miniparedes, pode-se inferir que:

- i. Ocorre, em geral, elevação do carregamento durante o decorrer do ensaio, induzido pela tentativa da alvenaria de dilatar-se em ambas as direções na presença de calor;
- ii. Há um comportamento peculiar nos primeiros 50 minutos de ensaio, já que nesse período ocorre o aquecimento da amostra e as acomodações da alvenaria frente às solicitações a que está exposta;

- iii. Pela análise dos resultados coletados pelas células de carga durante o ensaio, a restrição lateral pode não ter sido eficiente em alguns casos. Atribuiu-se essa ineficiência à deformabilidade da argamassa utilizada para o capeamento das amostras.

Com os dados obtidos é possível observar o grande número de variáveis que podem influenciar no comportamento de elementos de alvenaria, sendo, dessa forma, um método construtivo com propriedades de difícil compreensão em situação de incêndio. Porém, mostrou-se possível, através de uma instrumentação adequada, observar padrões e identificar tendências, que podem e devem ser mais bem exploradas em pesquisas futuras com diferentes combinações de blocos, argamassas e condições de contorno.

Não foi possível na presente pesquisa observar a ocorrência de *spalling*. No entanto, começa-se a compreender melhor os mecanismos que poderiam desencadeá-lo. Salienta-se que as dimensões das amostras estudadas, por serem reduzidas em relação à realidade, atribuem maior rigidez a elas, o que certamente influencia no comportamento mecânico dos elementos. Dessa forma, paredes mais esbeltas podem estar mais suscetíveis aos danos causados pela exposição térmica.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, são listadas sugestões de temas a serem abordados em pesquisas futuras a fim de garantir a continuidade e a complementação da presente pesquisa.

- i. Realizar ensaios com restrição da expansão térmica lateral em amostras de alvenaria de dimensões em verdadeira grandeza, a fim de considerar a esbeltez real das paredes das edificações;
- ii. Repetir os ensaios implementando um método mais eficaz de restrição lateral, que não absorva as deformações causadas na alvenaria. Sugere-se a construção das amostras já inseridas em um quadro rígido, capaz de suportar as tensões a que será submetido;
- iii. Aprimorar a instrumentação das amostras, de modo que as mesmas não tenham seu desempenho e os resultados influenciados pelo aumento de temperatura proveniente da exposição térmica;

- iv. Avaliar outras configurações de paredes, com diferentes tipos de blocos, argamassas e juntas de assentamento, variando o tipo de revestimento, o nível de aplicação de carga e as condições de contorno das mesmas, a fim de compreender com maior precisão os fatores determinantes para o aumento dos danos pela exposição ao fogo;
- v. Realizar simulação computacional da exposição à qual as amostras foram submetidas, visando comparar os resultados da análise numérica com os dados obtidos experimentalmente.

REFERÊNCIAS

AL-SIBAHY, A.; EDWARDS, R. **Behaviour of masonry wallettes made from a new concrete formulation under combination of axial compression load and heat exposure: Experimental approach.** Engineering Structures, v. 48, p. 193–204, 2013.

ANDREINI, M.; CACIOLAI, M.; MENDOLA, S. LA; MAZZIOTTI, L.; SASSU, M. **Mechanical behavior of masonry materials at high temperatures.** Fire and Materials, v. 39, n. 1, p. 41–57, 2015.

ANDREINI, M.; SASSU, M. **Mechanical behaviour of full unit masonry panels under fire action.** Fire Safety Journal, v. 46, n. 7, p. 440–450, 2011. Elsevier.

ARANTES C. A. **Influência do graute na alvenaria estrutural cerâmica.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, PPGEC/UFSM. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

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

_____. **NBR 6120** - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 8522** - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 13276** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 13279** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **NBR 13281** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **NBR 14432:** exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001b.

_____. **NBR 15270-2** - Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005c.

_____. **NBR 15270-3** - Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2005d.

_____. **NBR 15812-1** - Alvenaria estrutural blocos cerâmicos - projetos. Rio de Janeiro,

2010.

AYALA, F. R. R. **Mechanical properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures**. Tese (Doutorado) - University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2010. 294 f

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**, p. 317, 2003.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 476: fire tests on building materials and structures**. London, 1987.

BYRNE, S. M. **Fire resistance of load-bearing masonry walls**. Fire Technology, v. 15, n. 3, p. 180–188, 1979.

COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT. **Structural Design of Tall Concrete and Masonry Buildings**. New York: American Society of Civil Engineers, 1978. 938f.

CUNHA, J. DE C.; REGINATO, L. A.; CHIES, J. A.; ADAMATTI, D. S.; SILVA FILHO, L. C. **Análise da eficiência dos elementos/sistemas de compartimentação vertical com função estrutural submetidos à elevadas temperaturas**. Congresso Brasileiro de Patologia das Construções. Anais... , 2014.

DUTRA, V. F. P. **Um modelo constitutivo para concreto reforçado com fibras de aço via teoria da homogeneização**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2012. 247p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures**. Brussels, 2005, 123p. Pr EN 1996-1-1:2005.

FU, Y.; LI, L. **Study on mechanism of thermal spalling in concrete exposed to elevated temperatures**. Materials and Structures, v. 44, n. 1, p. 361–376, 2010.

HENDRY, A. W. **Structural Masonry**. London: Macmillan, 1990. 284f

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834: fire-resistance tests - Elements of building construction**. Genève, 1994.

KALIFA, P.; MENNETEAU, F. D.; QUENARD, D. **Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures**. Cement and Concrete Research, v. 30, n. 12, p. 1915–1927, 2000.

KARAHAN, O. **Residual compressive strength of fire-damaged mortar after post-fire-air-curing**. Fire and Materials, v. 35, n. 8, p. 561–567, 2011.

LI, Y.; LU, X.; GUAN, H.; YING, M.; YAN, W. **A Case Study on a Fire-Induced Collapse Accident of a Reinforced Concrete Frame-Supported Masonry Structure.** Fire Technology, 2015.

MARINO, L. F. B.; BOSCHI, A. O. **A Expansão Térmica de Materiais Cerâmicos Parte I: Introdução, Aplicações e Composição da Massa.** Cerâmica Industrial, 1998.

MENDES R. J. K. **Resistência à compressão de alvenaria de blocos cerâmicos estruturais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, PPGEC/UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MOHAMAD, G.; NETO, A. B. S. S. DA; PELISSER, F.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R. **Caracterização mecânica das argamassas de assentamento para alvenaria estrutural - Previsão e modo de ruptura.** Revista Materia, v. 14, n. 2, p. 824–844, 2009.

NADJAI, A.; O'GARRA, M.; A. ALI, F.; LAVERTY, D. **A numerical model for the behaviour of masonry under elevated temperatures.** Fire and Materials, v. 27, n. 4, p. 163–182, 2003.

NAHHAS, F. AL; AMI SAADA, R.; BONNET, G.; DELMOTTE, P. **Resistance to fire of walls constituted by hollow blocks: Experiments and thermal modeling.** Applied Thermal Engineering, v. 27, p. 258–267, 2007.

NAVARRO, M. C.; AYALA, F. R. R. **Degradación de Materiales de la Construcción Ante la Acción de Altas Temperaturas.** Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería, 2., 2015. Los Mochis. **Anais...** Los Mochis, 2015.

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.

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.

PASQUALI, I. **Influência do tipo de argamassamento na resistência à compressão de pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica,** 2007. 138p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2007.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural.** 1^a ed. São Paulo: Pini, 2003. 174 p.

RAMM, W. **Design of Masonry Structures According Eurocode 6.** Apostila. Masonry

Structure. (Wieland Ramm). Technical University of Kaiserslautern.

RIGÃO, A. O. **Comportamento de pequenas paredes de alvenaria estrutural frente a altas temperaturas**, 2012. 142p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2012.

RIZZATTI, E.; ROMAN, H. R.; MOHAMAD, G.; NAKANISHI, E. Y. **Análise do comportamento mecânico das alvenarias estruturais de blocos cerâmicos utilizando modelos físicos reduzidos – Efeito da geometria**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 5, n. 5, p. 702–736, 2012.

ROMAN, H. R.; MUTTI, C. DO N.; ARAÚJO, H. N. DE. **Construindo em alvenaria estrutural**. Florianópolis: Ed. UFSC, 1999.

ROMAN, H. R.; SIGNOR, R.; RAMOS, A. DA S.; MOHAMAD, G. **Análise de Alvenaria Estrutural**. Apostila. Análise de Alvenaria Estrutural. Universidade Federal de Santa Maria, 2011. Impresso.

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

SAHLIN, S. **Structural Masonry**. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 1971.

SANJAYAN, G.; STOCKS, L. J. **Spalling of High-Strength Silica Fume Concrete in Fire**. ACI Materials Journal, v. 90, n. 2, p. 170–173, 1993.

SANTOS, M. J. F. DOS. **Análise da resistência de prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica para diferentes tipos de argamassas**, 2008. 136p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2008.

SCHUBERT, P.; WESCHE, K. **Deformation and cracking characteristics of masonry**. Mauerwerk-Kalender, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 1977.

SHIELDS, T. J.; CONNOR, D. J. O.; SILCOCK, G. W. H.; DONEGAN, H. A. **Thermal bowing of a model brickwork panel**. International brick/block masonry conference, 8., 1988. Dublin. **Anais...** Dublin: Elsevier Applied Science, v. 2. p.846–856, 1988.

SILVA, B. DO V.; ALMEIDA, J. M. A.; DÉsir, J. M.; SILVA FILHO, L. C. P. **Análise experimental de elementos e sistemas de alvenaria estrutural de bloco cerâmico**. Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** p.1–12, 2015. Bonito.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**, 1997. 188 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 1997

SOUZA, R. P. DE. Avaliação da influência da espessura do revestimento argamassado e do carregamento no comportamento de alvenaria frente a altas temperaturas, 2017. 138p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Vale dos Sinos. São Leopoldo. 2017.

APÊNDICE A

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A.1. ENSAIOS REALIZADOS NOS BLOCOS

| Índice de Absorção de Água dos Blocos | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|--------------|--------|---------------|------|--------|--------|---------------|--------|--------------|--------|
| Bloco | Mh (g) | Mh MÉDIA (g) | Ms (g) | | | | | | | Ms MÉDIA (g) | AA (%) |
| | | | Início | 1h | 2h | 3h | 4h | 5h | | | |
| B1 - I | 6583,3 | 6600,5 | 5844,0 | 5833,0 | - | - | - | - | 5837,5 | 13,07 | |
| B1 - II | 6617,7 | | 5853,5 | 5842,0 | - | - | - | - | | | |
| B2 - I | 7704,1 | 7681,2 | 7707,5 | 7499,0 | 7280 | 7177 | 7147,5 | 7144,5 | 7131 | 7,71 | |
| B2 - II | 7658,2 | | 7669,0 | 7536,5 | 7309 | 7148,5 | 7119,5 | 7117,5 | | | |
| B3 - I | 7586,4 | 7594,2 | 6732,5 | 6725,0 | - | - | - | - | 6727 | 12,89 | |
| B3 - II | 7601,9 | | 6734,5 | 6729,0 | - | - | - | - | | | |

| Determinação Área Líquida dos Blocos | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|--------|-------|--------------------------|-------------|-------------|--------------------------|
| | ma (g) | mu (g) | Aliq | MÉDIA (cm ²) | D.P | C.V | Abrut (cm ²) |
| B1 - I | 3430,0 | 6562,0 | 164,8 | 168,09 | 2,02 | 1,2% | 406,0 |
| B1 - II | 3448,0 | 6663,0 | 169,2 | | | | |
| B1 - III | 3490,0 | 6650 | 166,3 | | | | |
| B1 - IV | 3460,0 | 6686 | 169,8 | | | | |
| B1 - V | 3437,0 | 6656 | 169,4 | | | | |
| B1 - VI | 3480,0 | 6690 | 168,9 | | | | |
| B2 - I | 4086,0 | 7780 | 194,4 | 194,86 | 4,60 | 2,4% | 406,0 |
| B2 - II | 3987,0 | 7578 | 189,0 | | | | |
| B2 - III | 4003,0 | 7822 | 201,0 | | | | |
| B2 - IV | 4150,0 | 7927 | 198,8 | | | | |
| B2 - V | 4028,0 | 7650 | 190,6 | | | | |
| B2 - VI | 4129,0 | 7840 | 195,3 | | | | |
| B3 - I | 3974,0 | 7612 | 191,5 | 194,18 | 2,62 | 1,4% | 551,0 |
| B3 - II | 3970,0 | 7617 | 191,9 | | | | |
| B3 - III | 3880,0 | 7597 | 195,6 | | | | |
| B3 - IV | 3960,0 | 7610 | 192,1 | | | | |
| B3 - V | 3785,0 | 7535 | 197,4 | | | | |
| B3 - VI | 3855,0 | 7589 | 196,5 | | | | |

| Resistência à compressão dos blocos | | | | | | | |
|-------------------------------------|---------|---------|----------------------|----------|-------------|------|-----|
| | Amostra | Fc (kN) | A (cm ²) | Rc (MPa) | MÉDIA (MPa) | D.P | C.V |
| B1 | 1 | 307,5 | 406 | 7,6 | 10,45 | 1,94 | 19% |
| | 2 | 321,0 | 406 | 7,9 | | | |
| | 3 | 333,5 | 406 | 8,2 | | | |
| | 4 | 350,0 | 406 | 8,6 | | | |
| | 5 | 359,0 | 406 | 8,8 | | | |
| | 6 | 404,5 | 406 | 10,0 | | | |
| | 7 | 412,0 | 406 | 10,1 | | | |
| | 8 | 421,5 | 406 | 10,4 | | | |
| | 9 | 428,5 | 406 | 10,6 | | | |
| | 10 | 462,5 | 406 | 11,4 | | | |
| | 11 | 491,5 | 406 | 12,1 | | | |
| | 12 | 495 | 406 | 12,2 | | | |
| | 13 | 503,0 | 406 | 12,4 | | | |
| | 14 | 516,5 | 406 | 12,7 | | | |
| | 15 | 561,0 | 406 | 13,8 | | | |
| B2 | 1 | 507,5 | 406 | 12,5 | 16,92 | 2,96 | 17% |
| | 2 | 660,5 | 406 | 16,3 | | | |
| | 3 | 676,0 | 406 | 16,7 | | | |
| | 4 | 685,0 | 406 | 16,9 | | | |
| | 5 | 710,0 | 406 | 17,5 | | | |
| | 6 | 883,0 | 406 | 21,7 | | | |
| B3 | 1 | 347,5 | 551 | 6,3 | 7,96 | 1,80 | 23% |
| | 2 | 356,5 | 551 | 6,5 | | | |
| | 3 | 373,0 | 551 | 6,8 | | | |
| | 4 | 376,0 | 551 | 6,8 | | | |
| | 5 | 402,0 | 551 | 7,3 | | | |
| | 6 | 410,0 | 551 | 7,4 | | | |
| | 7 | 413,5 | 551 | 7,5 | | | |
| | 8 | 419,0 | 551 | 7,6 | | | |
| | 9 | 419,5 | 551 | 7,6 | | | |
| | 10 | 430,5 | 551 | 7,8 | | | |
| | 11 | 453,0 | 551 | 8,2 | | | |
| | 12 | 651,5 | 551 | 11,8 | | | |
| | 13,0 | 652,5 | 551 | 11,8 | | | |

| Módulo de Elasticidade (MPa) | | | |
|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | B1 | B2 | B3 |
| CP1 | 4181,1 | 3335 | 2510,7 |
| CP2 | 6798,3 | 6765,9 | 2742 |
| CP3 | 3125,6 | 4461,3 | 2815,8 |
| MÉDIA | 3653,4 | 4854,1 | 2689,5 |
| DP | 746,35 | 1748,85 | 159,18 |

A.2. ENSAIOS REALIZADOS NAS ARGAMASSAS

| Resistência à tração na flexão - 4MPa | | | | | | |
|--|------------------|---------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | 7 dias | | 14 dias | | 28 dias | |
| | Força (N) | Resist (MPa) | Força (N) | Resist. (MPa) | Força (N) | Resist. (MPa) |
| CP1 | 640 | 1,50 | 600 | 1,41 | 680 | 1,59 |
| CP2 | 600 | 1,41 | 660 | 1,55 | 740 | 1,73 |
| CP3 | 580 | 1,36 | 600 | 1,41 | 680 | 1,59 |
| MÉDIA | - | 1,42 | - | 1,45 | - | 1,64 |
| DP | - | 0,07 | - | 0,08 | - | 0,08 |

| Resistência à compressão - 4MPa | | | | | | |
|--|------------------|---------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | 7 dias | | 14 dias | | 28 dias | |
| | Força (N) | Resist (MPa) | Força (N) | Resist. (MPa) | Força (N) | Resist. (MPa) |
| CP1 | 3880* | 2,4* | 5140,0 | 3,2 | 6700,0 | 4,2 |
| CP2 | 3740* | 2,3* | 5020,0 | 3,1 | 6580,0 | 4,1 |
| CP3 | 5140 | 3,2 | 5560,0 | 3,5 | 6040,0 | 3,8 |
| CP4 | 5160 | 3,2 | 5040,0 | 3,2 | 6720,0 | 4,2 |
| CP5 | 5120 | 3,2 | 5240,0 | 3,3 | 6060,0 | 3,8 |
| CP6 | 5200 | 3,3 | 5220,0 | 3,3 | 5820,0 | 3,6 |
| MÉDIA | - | 3,22 | - | 3,25 | - | 3,95 |
| DP | - | 0,02 | - | 0,12 | - | 0,24 |

| Resistência à tração na flexão - 6MPa | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------|--------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| | 7 dias | | 14 dias | | 28 dias | |
| | Força (N) | Resist (MPa) | Força (N) | Resistência (MPa) | Força (N) | Resistência (MPa) |
| CP1 | 0* | 0,0* | 850* | 1,99* | 1100 | 2,58 |
| CP2 | 380 | 0,9 | 780 | 1,83 | 1160 | 2,72 |
| CP3 | 520 | 1,2 | 710 | 1,66 | 1460* | 3,42* |
| MÉDIA | - | 1,05 | - | 1,75 | - | 2,65 |
| DP | - | 0,63 | - | 0,89 | - | 0,45 |

| Resistência à compressão - 6MPa | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|--------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| | 7 dias | | 14 dias | | 28 dias | |
| | Força (N) | Resist (MPa) | Força (N) | Resistência (MPa) | Força (N) | Resistência (MPa) |
| CP1 | 3160 | 1,98 | 6780 | 4,2 | 9940 | 6,2 |
| CP2 | 3120 | 1,95 | 6760 | 4,2 | 10060 | 6,3 |
| CP3 | 3700 | 2,31 | 7160 | 4,5 | 7780* | 4,9* |
| CP4 | 3880 | 2,43 | 7000 | 4,4 | 8080* | 5,1* |
| CP5 | 3600 | 2,25 | 6560 | 4,1 | 10040 | 6,3 |
| CP6 | 3660 | 2,29 | 6780 | 4,2 | 9080 | 5,7 |
| MÉDIA | - | 2,20 | - | 4,28 | - | 6,11 |
| DP | - | 0,19 | - | 0,13 | - | 0,29 |

| Resistência à tração na flexão - 10MPa | | | | | | |
|--|-----------|--------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| | 7 dias | | 14 dias | | 28 dias | |
| | Força (N) | Resist (MPa) | Força (N) | Resistência (MPa) | Força (N) | Resistência (MPa) |
| CP1 | 980 | 2,30 | 1080 | 2,53 | 1320 | 3,09 |
| CP2 | 1000 | 2,34 | 1260* | 2,95* | 1280 | 3,00 |
| CP3 | 960 | 2,25 | 1000 | 2,34 | 1240 | 2,91 |
| MÉDIA | - | 2,30 | - | 2,44 | - | 3,00 |
| DP | - | 0,05 | - | 0,13 | - | 0,09 |

| Resistência à compressão - 10MPa | | | | | | |
|----------------------------------|-----------|--------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| | 7 dias | | 14 dias | | 28 dias | |
| | Força (N) | Resist (MPa) | Força (N) | Resistência (MPa) | Força (N) | Resistência (MPa) |
| CP1 | 8600* | 5,38* | 10740 | 6,71 | 14250 | 8,91 |
| CP2 | 8680* | 5,43* | 11260 | 7,04 | 14520 | 9,08 |
| CP3 | 6060 | 3,79 | 11800 | 7,38 | 14480 | 9,05 |
| CP4 | 6720 | 4,20 | 11400 | 7,13 | 15100 | 9,44 |
| CP5 | 6140 | 3,84 | 9340* | 5,84* | 15060 | 9,41 |
| CP6 | 6420 | 4,01 | 8890* | 5,56* | 15000 | 9,38 |
| MÉDIA | - | 3,96 | - | 7,06 | - | 9,21 |
| DP | - | 0,19 | - | 0,27 | - | 0,23 |

| Módulo de Elasticidade (MPa) | | | |
|------------------------------|---------------|---------------|----------------|
| | 4MPa | 6MPa | 10MPa |
| CP1 | 7492,9 | 11360 | 18641 |
| CP2 | 6936,1 | 9869,3 | 9817,3 |
| CP3 | 6897 | 9737,8 | 9813,3 |
| MÉDIA | 3435,0 | 6575,4 | 12757,2 |
| DP | 822,8 | 1361,2 | 5095,52 |

APÊNDICE B

IMAGENS TERMOGRÁFICAS

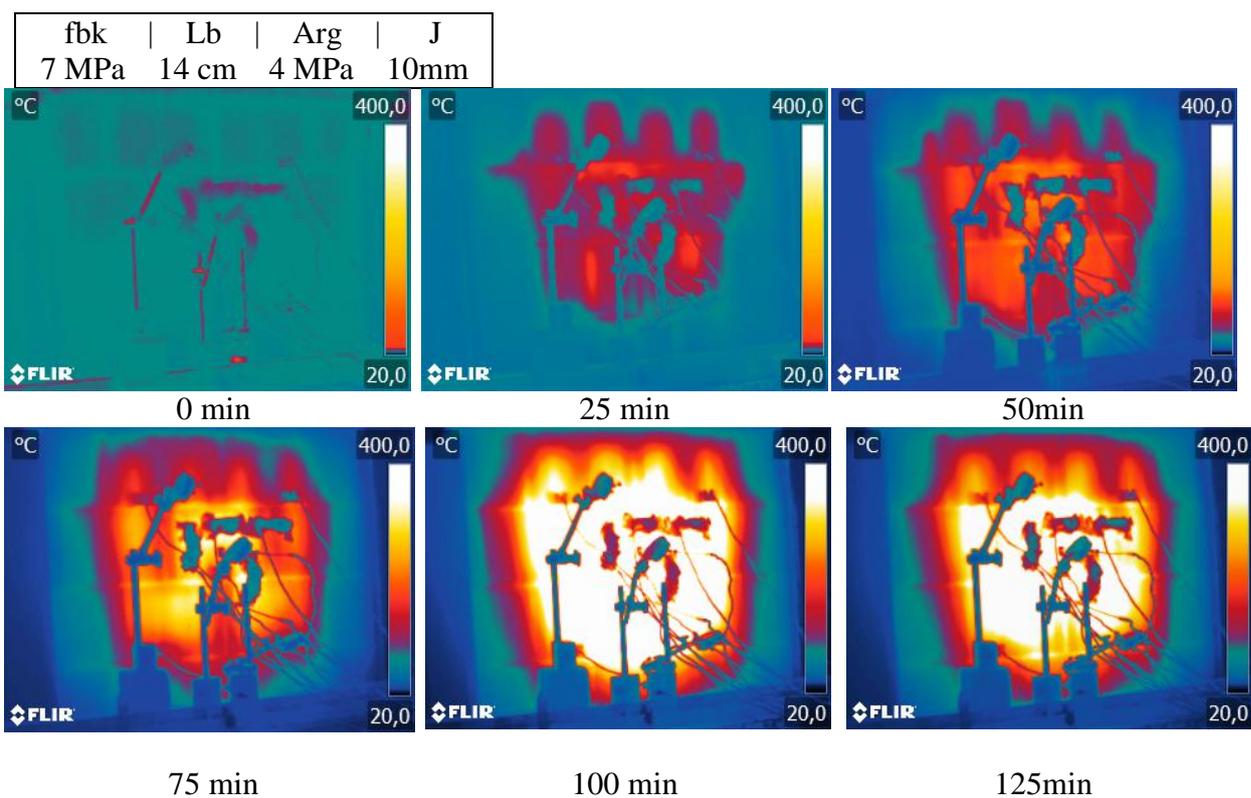
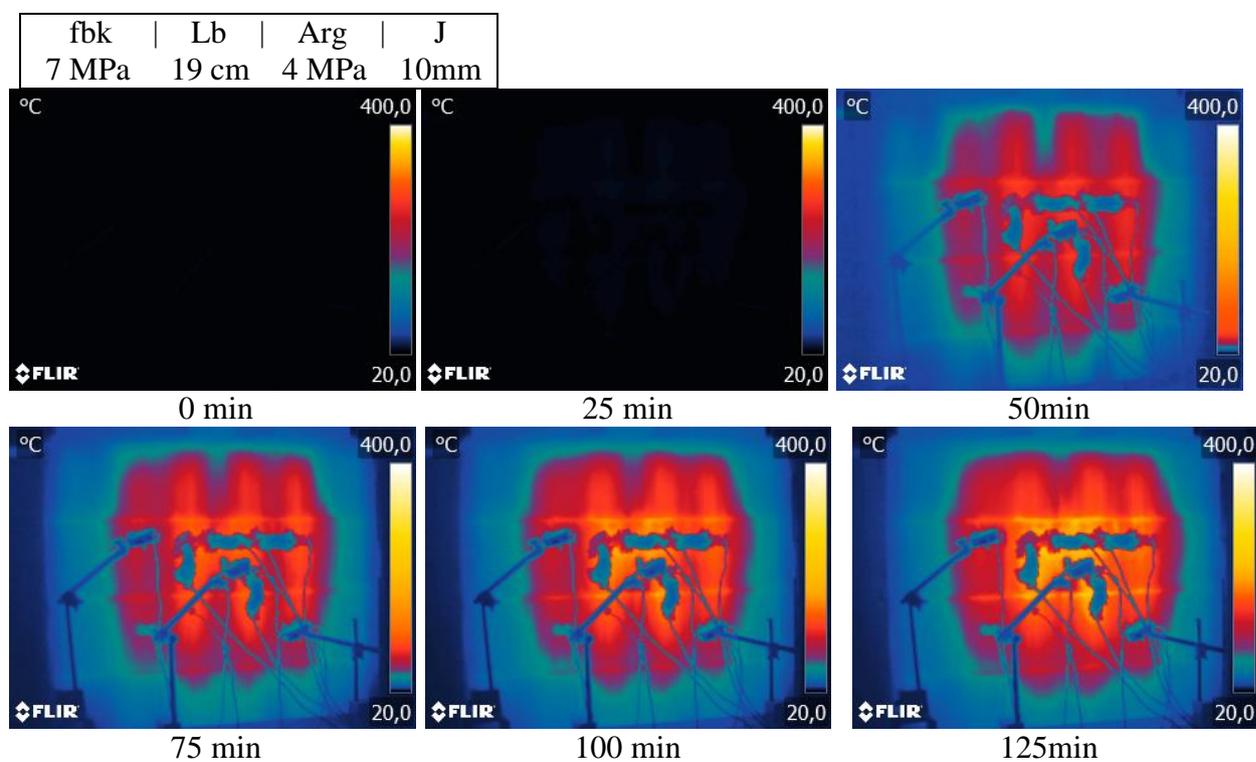


Figura 84 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P1a.





150 min

Figura 85 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P3a.

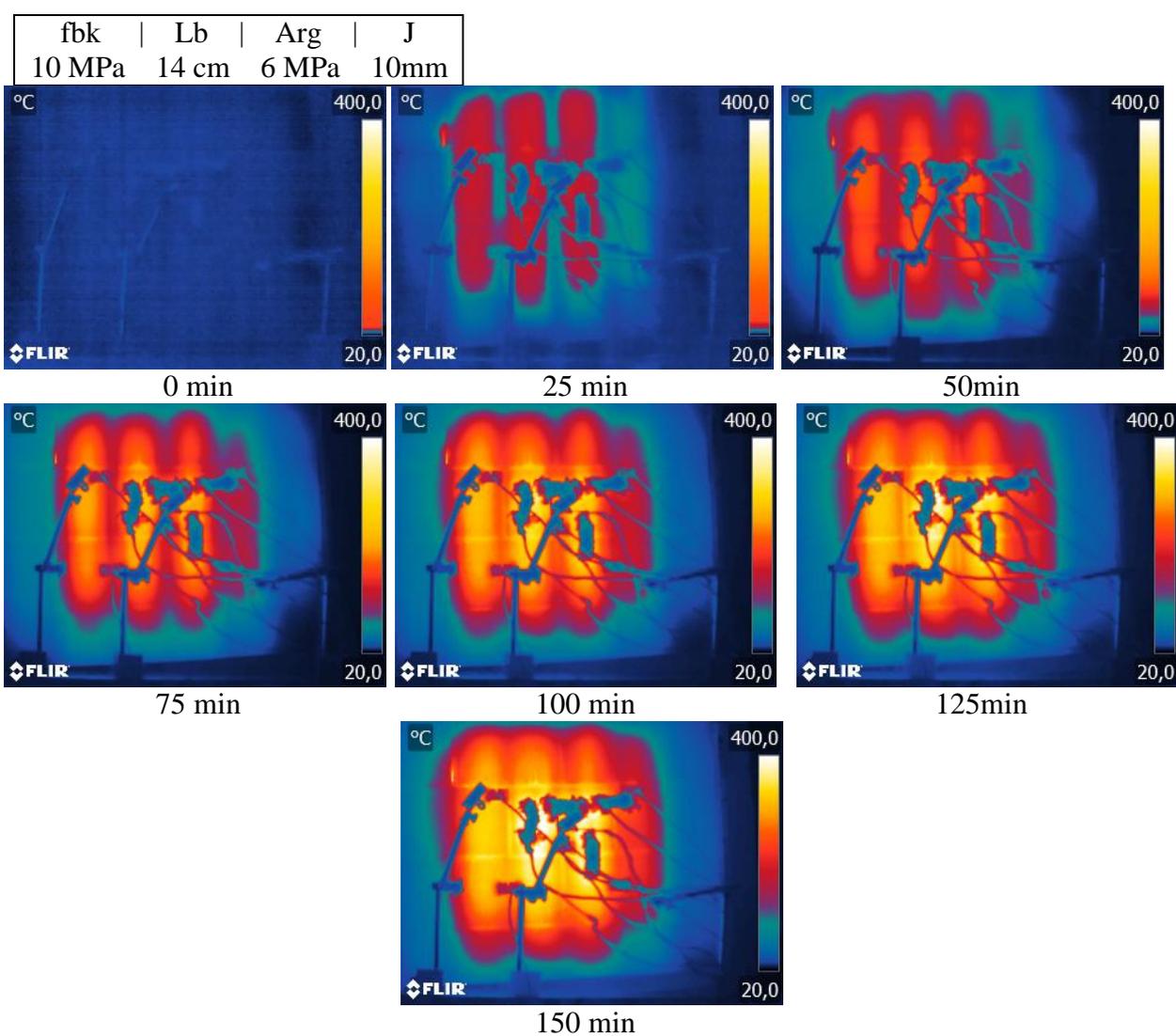


Figura 86 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P2a.

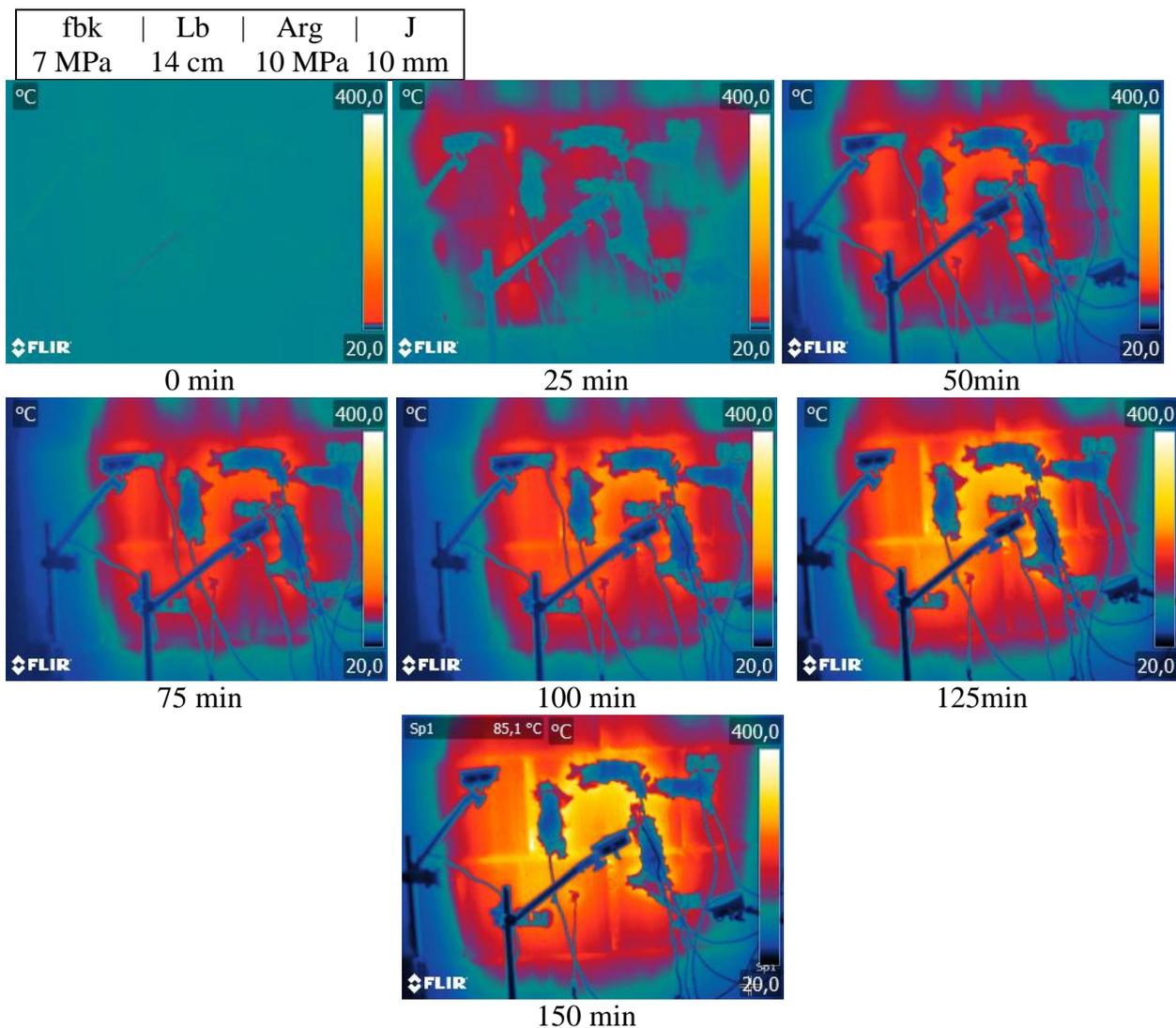


Figura 87 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P5b.

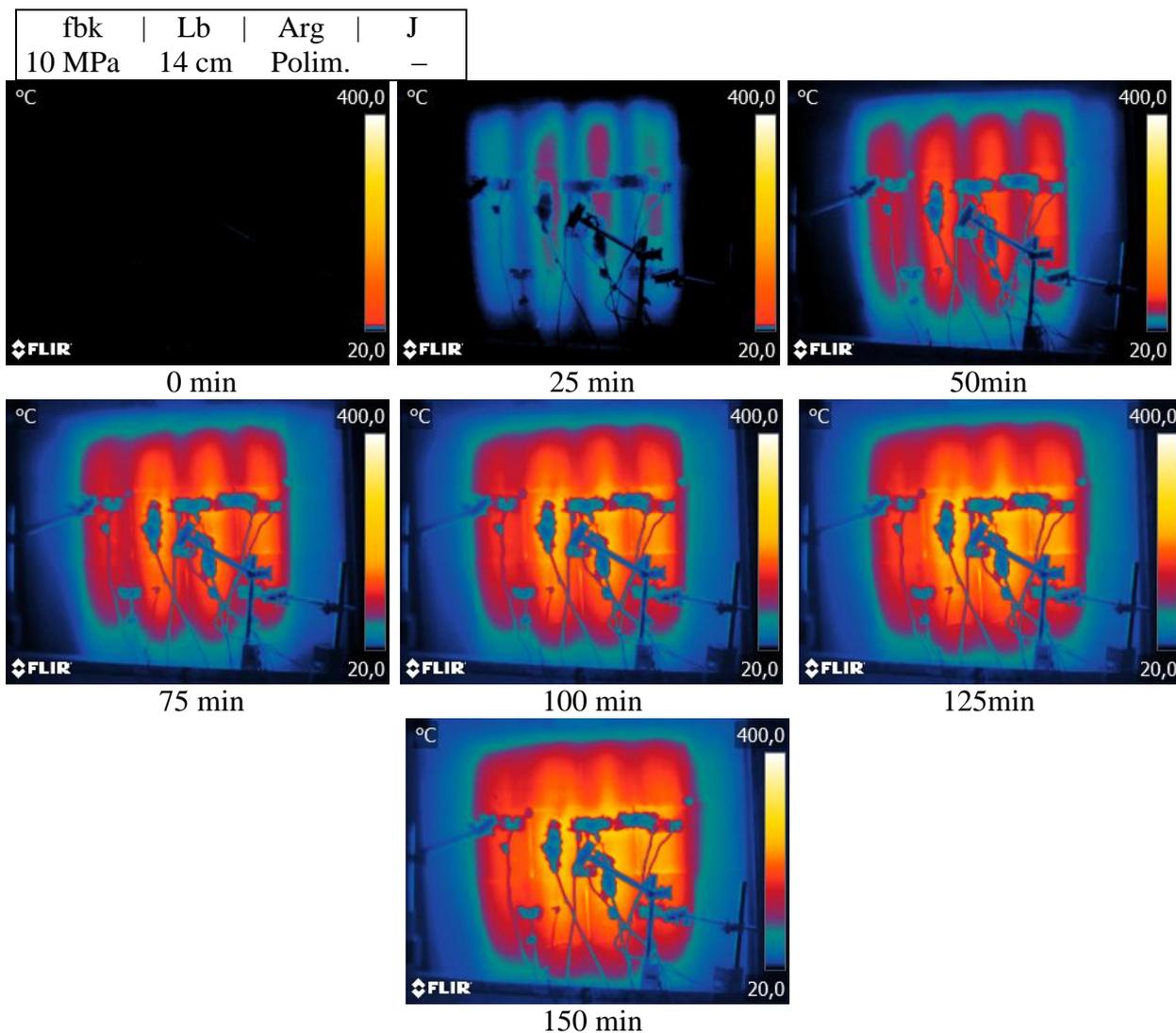
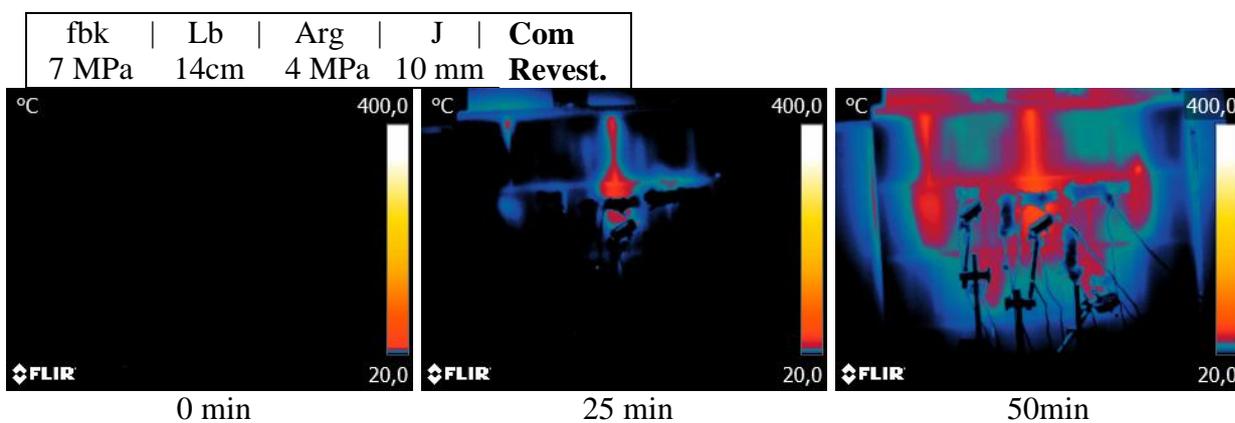


Figura 88 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P6b.



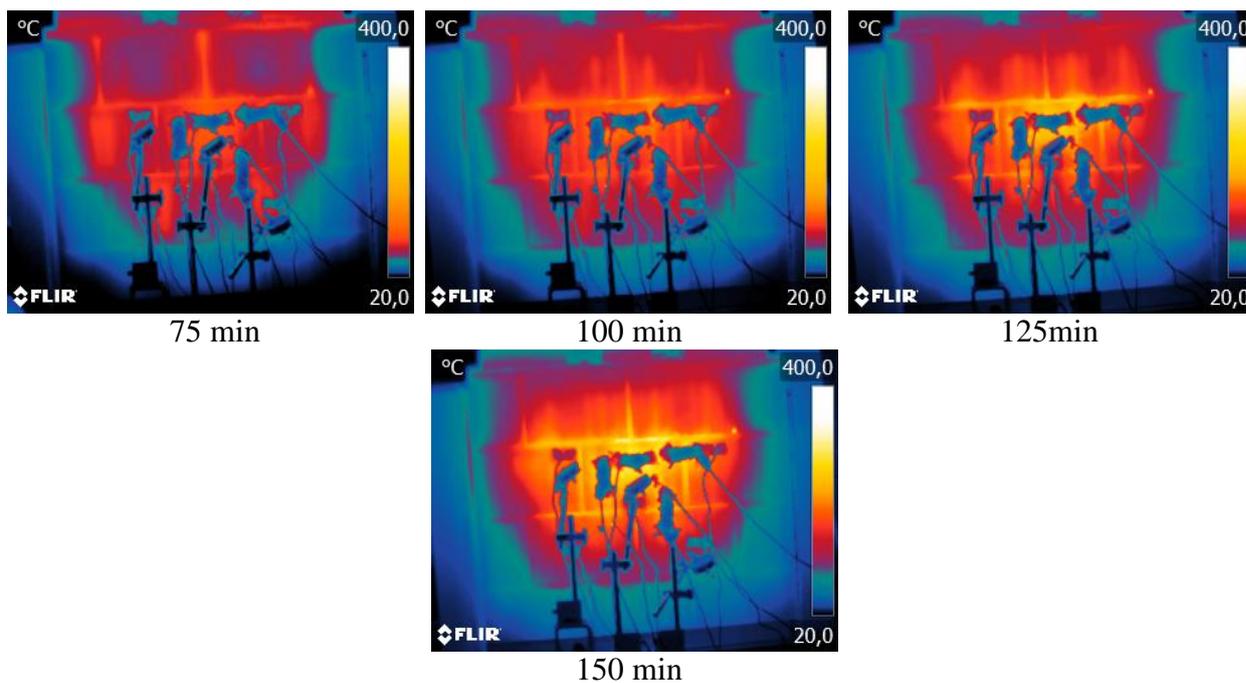


Figura 89 – Imagens termográficas da face não exposta ao fogo aos 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 minutos de ensaio – P7a.