

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

**ANÁLISES NUMÉRICAS DE PRISMAS E DE PEQUENAS PAREDES
DE ALVENARIA ESTRUTURAL CONSTITUÍDOS POR BLOCOS
CERÂMICOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Letícia Vinhal Pereira Freitas

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

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LETÍCIA VINHAL PEREIRA FREITAS

**Análises numéricas de prismas e de pequenas paredes de alvenaria estrutural
constituídos por blocos cerâmicos em situação de incêndio**

SÃO CARLOS

2024

LETÍCIA VINHAL PEREIRA FREITAS

**Análises numéricas de prismas e de pequenas paredes de alvenaria estrutural
constituídos por blocos cerâmicos em situação de incêndio**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Civil (Estruturas).

Orientador: Prof. Dr. Jorge Munaiar Neto.

VERSÃO CORRIGIDA

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

SÃO CARLOS

2024

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

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

F862a Freitas, Leticia Vinhal Pereira
Análises numéricas de prismas e de pequenas
paredes de alvenaria estrutural constituídos por blocos
cerâmicos em situação de incêndio / Leticia Vinhal
Pereira Freitas; orientador Jorge Munaiar Neto. São
Carlos, 2024.

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

1. alvenaria estrutural cerâmica. 2. incêndio. 3.
método dos elementos finitos. 4. análise
termoestrutural. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheiro **LETICIA VINHAL PEREIRA FREITAS**.

Título da dissertação: "Análises numéricas de prismas e de pequenas paredes de alvenaria estrutural constituídos por blocos cerâmicos em situação de incêndio".

Data da defesa: 30/07/2024.

Comissão Julgadora

Prof. Associado Jorge Munaiar Neto

(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Prof. Dr. Fábio Martin Rocha

(Universidade Federal do Triângulo Mineiro/UFTM)

Prof. Leonardo Carvalho Mesquita

(Universidade Federal de Viçosa/UFV)

Resultado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

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

Prof Associado **Ricardo Carrazedo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

*Porque o Senhor é bom; a sua misericórdia dura para sempre,
e a sua fidelidade estende-se de geração em geração.*

Salmos 100:5

AGRADECIMENTOS

A Deus, cuja graça e misericórdia me sustentam em todos os momentos. A Ele toda glória.

À minha mãe, Lourdes, por seu amor incondicional e apoio constante, por ser minha fonte de encorajamento e força.

Ao meu marido, Isaac, por seu amor, paciência e compreensão, ao longo de todos os caminhos que trilhamos juntos.

Ao meu irmão Lucas, pelo seu incentivo e suporte, tornando meus desafios mais leves e atingíveis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Munaiar Neto, pela confiança, sabedoria e empatia, em todos os momentos desta pós-graduação.

Aos docentes da Universidade Federal de Viçosa (UFV-CRP) e da Universidade de São Paulo - Departamento de Estruturas (SET/USP), pelos ensinamentos e incentivos, durante o meu período acadêmico.

Ao Paulo, José Anchieta, Francielle e Davi, pela grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho, compartilhando experiências, conhecimentos e grande auxílio no uso das ferramentas do software ABAQUS.

Aos demais colegas do Departamento de Estruturas (SET/USP), pelo companheirismo e amizade, que permanecem na minha vida.

A toda a minha família, por serem minha base e alegria em todos os momentos.

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

RESUMO

FREITAS, L. V. P. **Análises numéricas de prismas e de pequenas paredes de alvenaria estrutural constituídos por blocos cerâmicos em situação de incêndio.** 2024. 252 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

No Brasil, verifica-se o uso extensivo da alvenaria estrutural, porém há poucas pesquisas sobre seu comportamento em situações de incêndio, além da ausência de normas específicas para seu dimensionamento nessas condições. À vista disso, este estudo objetivou validar numericamente o comportamento estrutural e térmico de prismas e de pequenas paredes de blocos cerâmicos. Explorou-se qualitativamente o comportamento termoestrutural, em virtude da carência de dados experimentais dessas estruturas sob altas temperaturas. As simulações de compressão à temperatura ambiente demonstraram consistência com os resultados experimentais, especialmente nas interfaces bloco-argamassa. A simulação térmica dos elementos estruturais foi representativa, principalmente nas espessuras mais próximas à fonte de calor, embora haja exiguidade na consideração da abertura de fissuras e da convecção nos vazados. A metodologia empregada mostrou-se adequada para a calibração do material e para a realização de análises de sensibilidade, permitindo a investigação de diferentes configurações de ensaios. A simulação termoestrutural revelou concentrações de tensões nas interfaces bloco-argamassa e maiores deslocamentos na parte superior das pequenas paredes isoladas e aquecidas em suas quatro faces, e na parte central das pequenas paredes carregadas e com aquecimento em uma face, em consonância com os comportamentos experimentais. Nessa análise, observou-se a boa representatividade do comportamento da cerâmica, evidenciando o aumento de resistência com a elevação da temperatura, corroborando com descobertas experimentais recentes. O modelo representou satisfatoriamente o comportamento esperado de distribuição de tensões e deformações plásticas.

Palavras-chave: alvenaria estrutural cerâmica; incêndio; método dos elementos finitos; análise termoestrutural.

ABSTRACT

FREITAS, L. V. P. **Numerical analysis of prisms and small structural masonry walls with ceramic blocks in fire situation.** 2024. 252 p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structures)) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2024.

In Brazil, despite the extensive use of structural masonry, research on its behavior in fire situations remains limited, and the country lacks specific standards for its design under such conditions. This study aimed to numerically validate the structural and thermal behavior of prisms and masonry walls made of ceramic blocks. The thermomechanical behavior was qualitatively explored due to the lack of experimental data on these structures at high temperatures. Compression simulations at ambient temperature were consistent with experimental results, particularly at the block-mortar interfaces. The thermal simulation of the structural elements was representative, especially in the regions closest to the heat source, despite limited consideration of crack openings and convection in hollow spaces. The employed methodology proved suitable for material calibration and sensitivity analysis, allowing for the investigation of different test configurations. The thermomechanical simulation revealed stress concentrations at the block-mortar interfaces and larger displacements in the upper portion of isolated walls heated on all four sides, and in the central part of loaded walls with heating on one side, aligning with experimental behavior. The analysis showed good representation of the ceramic material's behavior, demonstrating increased strength with rising temperatures, corroborating recent experimental findings. The model effectively captured the expected distribution of stresses and plastic deformations, although it did not directly account for all experimentally observed cracks.

Keywords: ceramic structural masonry; fire; finite element method; thermostructural analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Hotel Excalibur, em Las Vegas, EUA.	24
Figura 1.2 – Edifício Fit Terra, em Londrina-PR.	25
Figura 1.3 – Incêndio no Museu Nacional do Rio de Janeiro.	26
Figura 1.4 – Esquemático da metodologia adotada.	30
Figura 2.1 – Alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.	33
Figura 2.2 – Geometria de blocos cerâmicos.	35
Figura 2.3 – Tipologia para blocos de cerâmica.	36
Figura 2.4 – Definição das áreas dos blocos.	36
Figura 2.5 – Exemplo de aplicação de argamassa de assentamento.	38
Figura 2.6 – Tipos de argamassamento.	40
Figura 2.7 – Exemplo de aplicação de graute.	42
Figura 2.8 – Exemplo de armaduras em alvenaria estrutural.	44
Figura 2.9 – Relação entre a resistência da alvenaria e a resistência da unidade.	46
Figura 2.10 - Relação entre o traço da argamassa e a resistência da alvenaria.	47
Figura 2.11 – Gráfico tensão-deformação típico de materiais semifrágéis.	52
Figura 2.12 – Módulos de elasticidade estáticos do concreto.	53
Figura 2.13 – Curvas de força <i>versus</i> deslocamento para cubos de alvenaria de tijolo de argila.	54
Figura 2.14 – Comportamento tensão x deformação da unidade, argamassa e parede de alvenaria.	56
Figura 2.15 – Mecanismo de ruptura de prisma sob compressão.	59
Figura 3.1 – Representação Curva ISO 834-1.	65
Figura 3.2 – Transferência de calor em um sólido.	65
Figura 3.3 – Transferência de calor em bloco vazado submetido a incêndio compartimentado.	69
Figura 3.4 – Propriedades térmicas de unidades cerâmicas europeias com aumento da temperatura.	74
Figura 3.5 – Valores de cálculo dos diagramas tensão-deformação com aumento da temperatura.	75
Figura 3.6 – Comparativo da resistência à compressão residual de blocos de argila e de silicato de cálcio sob altas temperaturas.	78
Figura 3.7 – Exemplos de vinculação de paredes de alvenaria.	85

Figura 3.8 –Vinculação de paredes de alvenaria adotadas por Carvalho (2019).	85
Figura 3.9 – Diagramas tensão-deformação para dois tipos de argamassa.....	87
Figura 3.10 – Parede analisada e seção transversal do bloco cerâmico.....	88
Figura 3.11 – Resultados do comportamento térmico do bloco vazado.	89
Figura 3.12 – Paredes ensaiadas por Rosemann (2011).	90
Figura 3.13 – Temperatura da face não exposta dos blocos obtida pelas análises experimentais por Rosemann (2011).....	92
Figura 3.14 – Temperatura da face não exposta dos blocos obtida pelo MEF por Rosemann (2011).	93
Figura 3.15 – Análises e propriedades mecânicas adotadas por Russo e Sciarretta (2015).	94
Figura 3.16 – Gráficos de tensão-deformação obtidos em Russo e Sciarretta (2015) para cada espessura experimentada.....	95
Figura 3.17 – Esquema de modelagem térmica de prisma de bloco de concreto. ...	97
Figura 3.18 – Diagramas tensão-deformação numéricos dos prismas constituídos por blocos de concreto.....	98
Figura 3.19 – Elevação de temperatura média nas faces não expostas ao fogo do prisma com revestimento por Rodvalho (2018).	99
Figura 3.20 – Elevação de temperatura em diversos pontos do prisma de concreto sem revestimento.	100
Figura 3.21 – Campos térmicos desenvolvidos no prisma sem revestimento e uma face exposta ao incêndio (°C).....	100
Figura 3.22 – Esquema de modelagem térmica de bloco cerâmico.	101
Figura 3.23 – Elevação de temperatura nas faces não expostas ao fogo das paredes cerâmicas por Rodvalho (2018).....	102
Figura 3.24 – Campos térmicos das paredes cerâmicas sem revestimento obtidos por Rodvalho (2018).	102
Figura 3.25 – Resumo dos resultados das simulações termomecânicas por Rodvalho (2018).	104
Figura 3.26 – Blocos cerâmicos usados nos ensaios de Lima et al. (2018).	105
Figura 3.27 – Padrões de fissuração presentes nos ensaios de Lima <i>et al.</i> (2018) para cada tipo de bloco.....	106
Figura 3.28 – Características e disposição dos corpos de prova da 1ª fornada.	107
Figura 3.29 – Isolamento com manta cerâmica nos elementos analisados.....	107

Figura 3.30 – Gráfico das curvas de temperatura em função do tempo para os trios de paredes ensaiados.	108
Figura 3.31 – Gráficos das curvas de temperatura em função do tempo para os corpos de prova ensaiados.	109
Figura 3.32 – Comparação da curva tensão-deformação entre os valores experimentais e numérico.	112
Figura 3.33 – Condições de contorno adotadas por Carvalho (2019).	114
Figura 3.34 – Evolução da temperatura em função da espessura da parede de acordo com os tempos de incêndio indicados.	115
Figura 3.35 – Blocos cerâmicos utilizados por Fernandes Neto (2020).	117
Figura 3.36 – Prismas e pequenas paredes cerâmicos ensaiados por Fernandes Neto (2020).	119
Figura 3.37 – Configuração do ensaio térmico de Fernandes Neto (2020).	121
Figura 3.38 – Elevação de temperatura nos prismas de alvenaria cerâmica de Fernandes Neto (2020).	122
Figura 3.39 – Elevação de temperatura nas pequenas paredes isoladas de alvenaria cerâmica de Fernandes Neto (2020).	123
Figura 3.40 – Aspecto superficial dos elementos isolados de alvenaria após simulação de situação de incêndio.	125
Figura 4.1 – Configuração dos elementos finitos C3D8R e DC3D8.	130
Figura 4.2 – Dimensões dos blocos, meios-blocos, prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural a serem modelados.	132
Figura 4.3 – Geometria dos componentes e elementos de alvenaria estrutural modelados.	133
Figura 4.4 – Dimensões do bloco de terracota ensaiado por Nguyen et al. (2009).	135
Figura 4.5 – Componentes modelados baseados em Nguyen et al. (2009).	135
Figura 4.6 – Geometria proposta por Rodovalho (2018).	136
Figura 4.7 – Geometria adotada no presente trabalho baseada em Rosemann (2011) e Rodovalho (2018).	137
Figura 4.8 – Configuração dos Blocos A e B ensaiados em Lima <i>et al.</i> (2018).	138
Figura 4.9 – Elementos modelados baseados em Lima <i>et al.</i> (2018).	138
Figura 4.10 – Comparativo quanto à variação da discretização da malha para o prisma vazado.	140

Figura 4.11 – Respostas do modelo aos carregamentos uniaxiais de tração e de compressão.	143
Figura 4.12 – Variação do parâmetro α_d	145
Figura 4.13 – Ângulo de dilatância e excentricidade.	147
Figura 4.14 – Parâmetro K_c e respectivas superfícies de escoamento.	147
Figura 4.15 – Superfície de escoamento no estado plano de tensões.	148
Figura 5.1 – Esquemática das condições de contorno e de carregamento adotadas.	150
Figura 5.2 – Condições de contorno e de carregamento aplicadas nos modelos mecânicos no presente trabalho.	150
Figura 5.3 – Diagramas tensão-deformação das unidades de parede vazada.	152
Figura 5.4 – Diagramas tensão-deformação das unidades de parede maciça.	153
Figura 5.5 – Diagramas tensão-deformação da argamassa de assentamento.	154
Figura 5.6 – Exemplo de ruptura experimental de prisma com blocos cerâmicos. .	156
Figura 5.7 – Tensões principais dos prismas de blocos de paredes vazadas no momento da ruptura.	156
Figura 5.8 – Tensões principais dos prismas de blocos de paredes maciças no momento da ruptura.	157
Figura 5.9 – Deformações plásticas principais absolutas dos prismas de blocos de paredes vazadas no momento da ruptura.	158
Figura 5.10 – Deformações plásticas principais absolutas dos prismas de blocos de paredes maciças no momento da ruptura.	159
Figura 5.11 – Resultados dos modelos mecânicos para os prismas de blocos de paredes maciças.	159
Figura 5.12 – Resultados dos modelos mecânicos para os prismas de blocos de paredes vazadas.	160
Figura 5.13 – Exemplo de ruptura experimental de pequena parede com blocos cerâmicos.	161
Figura 5.14 – Tensões principais da pequena parede de blocos de paredes maciças no momento da ruptura.	161
Figura 5.15 – Tensões principais da pequena parede de blocos de paredes vazadas no momento da ruptura.	163
Figura 5.16 – Deformações plásticas principais da pequena parede de blocos de paredes maciças no momento da ruptura.	165

Figura 5.17 – Deformações plásticas principais da pequena parede de blocos de paredes vazadas no momento da ruptura.	166
Figura 5.18 – Resultados dos modelos mecânicos para as pequenas paredes de blocos de paredes maciças.	166
Figura 5.19 – Resultados dos modelos mecânicos para pequena parede de blocos de paredes vazadas.	167
Figura 6.1 – Exemplo de superfícies definidas para utilização da interação <i>cavity radiation</i>	171
Figura 6.2 – Condições de contorno adotadas para modelagem térmica em elementos cerâmicos.	171
Figura 6.3 – Pontos instrumentados por Fernandes Neto (2020).	172
Figura 6.4 – Instrumentação utilizada por Nguyen <i>et al.</i> (2009) em bloco cerâmico de terracota.	173
Figura 6.5 – Pontos instrumentados por Rosemann (2011).	173
Figura 6.6 – Valores de referência para a condutividade térmica de materiais cerâmicos.	175
Figura 6.7 – Modelo de curva calor específico x temperatura proposto em Nguyen <i>et al.</i> (2009).	176
Figura 6.8 – Valores de referência avaliados para o calor específico de materiais cerâmicos.	177
Figura 6.9 – Comportamento térmico prismas de blocos de paredes maciças.	178
Figura 6.10 – Comportamento térmico prismas de blocos de paredes vazadas.	180
Figura 6.11 – Comportamento térmico pequenas paredes de blocos de paredes maciças.	181
Figura 6.12 – Comportamento térmico pequenas paredes de blocos de paredes vazadas.	182
Figura 6.13 – Comportamento térmico bloco vazado de terracota.	185
Figura 6.14 – Comportamento térmico parede de blocos cerâmicos aquecida em uma face.	186
Figura 6.15 – Resultados da análise térmica para pequenas paredes de blocos cerâmicos.	190
Figura 6.16 – Resultados da análise térmica para prismas de blocos cerâmicos. ..	191
Figura 6.17 – Resultados da análise térmica para elementos de blocos de paredes vazadas.	194

Figura 6.18 – Resultados da análise térmica para elementos de blocos de paredes maciças.....	194
Figura 7.1 – Condições de contorno propostas no presente trabalho para os modelos baseados em Fernandes Neto (2020).	197
Figura 7.2 – Condições de contorno propostas no presente trabalho para os modelos baseados em Lima <i>et al.</i> (2018).	198
Figura 7.3 – Coeficientes para o comportamento de unidades cerâmicas sob altas temperaturas.....	199
Figura 7.4 – Diagramas tensão-deformação das unidades de parede maciça.	200
Figura 7.5 – Diagramas tensão-deformação dos blocos de parede vazada.	200
Figura 7.6 – Diagramas tensão-deformação da argamassa de assentamento.....	201
Figura 7.7 – Tensões principais absolutas nas unidades e argamassa da pequena parede blocos de parede maciça, após 120min, a 900°C.	203
Figura 7.8 – Deslocamentos da pequena parede de blocos de parede maciça, após 120min, a 900°C.	204
Figura 7.9 – Tensões principais absolutas nas unidades e argamassa da pequena parede de blocos de parede vazada, após 120min, a 900°C.	205
Figura 7.10 – Deslocamentos da pequena parede de blocos de parede vazada, após 120min, a 900°C.....	206
Figura 7.11 – Valores de temperaturas máximas obtidas na face exposta e na face oposta ao incêndio.....	208
Figura 7.12 – Campo de temperaturas máximas obtidas na face exposta e na face oposta ao incêndio da pequena parede com bloco A, após 4h de aquecimento. ...	208
Figura 7.13 – Valores de temperaturas máximas obtidas na face exposta e na face oposta ao incêndio, após 2h30 de aquecimento constante.	209
Figura 7.14 – Valores de temperaturas máximas obtidas na face exposta e na face oposta ao incêndio, após 3h de aquecimento constante.	210
Figura 7.15 – Valores de temperaturas máximas obtidas na face exposta e na face oposta ao incêndio.....	210
Figura 7.16 – Tensões principais absolutas nas unidades e face oposta da pequena parede de blocos de parede maciça, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C.....	211
Figura 7.17 – Tensões principais absolutas na argamassa da pequena parede de blocos de parede maciça, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C. ...	211

Figura 7.18 – Deslocamentos da pequena parede de blocos de parede maciça, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C.	212
Figura 7.19 – Tensões principais absolutas nas unidades da pequena parede de blocos de parede vazada, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C. ..	213
Figura 7.20 – Tensões principais absolutas na argamassa da pequena parede de blocos de parede vazada, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C. ..	213
Figura 7.21 – Deslocamentos da pequena parede de blocos de parede vazada, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C.	214
Figura 7.22 – Deformações plásticas principais máximas, após 4h de aquecimento constante.	216
Figura 7.23 – Padrões de fissuração presentes nas pequenas paredes dos ensaios de Lima et al. (2018).	216
Figura A.1 – Comparativo quanto à variação do ângulo de dilatância.	238
Figura A.2 – Comparativo quanto à variação do parâmetro σ_{b0}/σ_{c0}	242
Figura A.3 – Comparativo quanto à variação do módulo de elasticidade da placa de aplicação.	245
Figura A.4 – Comparativo quanto à consideração da propriedade dos meio blocos para a pequena parede.	247
Figura A.5 – Comparativo de evolução de temperatura quanto à variação da emissividade e coeficiente de convecção.	249
Figura A.6 – Comparativo da consideração de radiação nos vazados dos blocos..	250

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Objetivos	27
1.2 Justificativa	28
1.3 Metodologia.....	29
2 ALVENARIA ESTRUTURAL: COMPONENTES E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL.....	33
2.1 Componentes da alvenaria estrutural.....	34
2.1.1 Unidades Cerâmicas.....	34
2.1.2 Argamassa de assentamento	37
2.1.3 Graute.....	41
2.1.4 Armaduras	43
2.2 Fatores que influenciam a resistência da alvenaria	44
2.2.1 Resistência à compressão dos materiais.....	45
2.2.2 Curva tensão-deformação específica e módulo de elasticidade.....	51
2.2.3 Envoltória de ruptura da alvenaria	58
3 ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	63
3.1 O Incêndio - algumas definições e modelos utilizados.....	64
3.2 Critérios normativos para alvenaria em situação de incêndio	69
3.3 Fatores que influenciam o desempenho da alvenaria em elevadas temperaturas	75
3.3.1 Material do bloco	77
3.3.2 Geometria dos elementos.....	80
3.3.3 Processo construtivo.....	81
3.3.4 Estabilidade estrutural	83
3.4 Estudo da arte.....	86

3.4.1	<i>Em Gomes (2001):</i>	86
3.4.2	<i>Em Nguyen et al. (2009):</i>	88
3.4.3	<i>Em Rosemann (2011):</i>	90
3.4.4	<i>Em Russo e Sciarretta (2015):</i>	93
3.4.5	<i>Em Rodovalho (2018):</i>	96
3.4.6	<i>Em Lima et al. (2018):</i>	104
3.4.7	<i>Em Dupim (2019):</i>	106
3.4.8	<i>Em Carvalho (2019):</i>	111
3.4.9	<i>Em Fernandes Neto (2020):</i>	117
4	CONSIDERAÇÕES REFERENTES ÀS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PROPOSTAS	129
4.1	Elementos finitos utilizados	129
4.2	Geometria dos modelos	130
4.2.1	<i>Para os modelos baseados em Fernandes Neto (2020):</i>	131
4.2.2	<i>Para os modelos baseados em Nguyen et al. (2009):</i>	135
4.2.3	<i>Para os modelos baseados em Rosemann (2011):</i>	136
4.2.4	<i>Para os modelos baseados em Lima et al. (2018):</i>	137
4.3	Discretização da malha	139
4.4	Mecanismos de contato	141
4.5	Modelo de plasticidade dos materiais	142
5	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS REFERENTES À ANÁLISE MECÂNICA	149
5.1	Condições de contorno e carregamento	149
5.2	Propriedades mecânicas dos materiais	151
5.3	Resultados e discussões	156
6	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS REFERENTES À ANÁLISE TÉRMICA	169
6.1	Condições de contorno e carregamento	169
6.2	Pontos analisados	172

6.3	Validação do comportamento térmico dos materiais	174
6.3.1	<i>Prismas de blocos cerâmicos submetidos a aquecimento em suas faces externas</i>	178
6.3.2	<i>Pequenas paredes de blocos cerâmicos submetidas a aquecimento em suas faces externas</i>	181
6.3.3	<i>Bloco cerâmico de terracota submetido a aquecimento em uma face</i>	183
6.3.4	<i>Paredes com blocos cerâmicos submetidas a aquecimento em sua face interna</i>	186
6.3.5	<i>Propriedades térmicas adotadas</i>	188
6.4	Resultados e Discussões	189
7	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM CONTEXTO DE COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO	195
7.1	Estratégias adotadas para implementação das condições de contorno e carregamento	196
7.2	Propriedades mecânicas dos materiais em elevadas temperaturas	198
7.3	Resultados e discussões	202
8	CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES	219
	REFERÊNCIAS	225
	APÊNDICE A ANÁLISES COMPLEMENTARES PARA OS MODELOS MECÂNICO E TÉRMICO	237
A.1	Análise de sensibilidade quanto ao ângulo de dilatância	238
A.2	Análise de sensibilidade do parâmetro σ_{b0}/σ_{c0} para a cerâmica	241
A.3	Análise do módulo de elasticidade da placa	244
A.4	Análise da consideração de modelo constitutivo para meio bloco	247
A.5	Análise da emissividade e constante de convecção	249
A.6	Análise da consideração de radiação nos vazados dos blocos	250

1 INTRODUÇÃO

Entre os sistemas construtivos adotados pela humanidade ao longo do tempo, encontra-se a alvenaria estrutural. Seus principais componentes, conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a Norma Brasileira Registrada (NBR) 15812-1 (ABNT, 2010a), são blocos, argamassas, grautes e armaduras; cada material com características, comportamentos e funções diferentes na formação da alvenaria estrutural.

O bloco é considerado o principal elemento, responsável por resistir a esforços transversais e de compressão, sendo que também contribui para o isolamento térmico e acústico. Ao passo que a argamassa atua na conectividade entre os blocos, absorção de deformações, transmissão de esforços e contribuição à estanqueidade. Enquanto os grautes são responsáveis por unir e transmitir esforços entre bloco e armadura; contribuir para o aumento da massa, inércia e a área líquida resistente da parede. Por fim, as armaduras são utilizadas quando o rearranjo geométrico das demais partes não é o suficiente para promover resistência a esforços de tração na alvenaria, bem como para realizar a ligação entre paredes (Leão, 2008).

A alvenaria estrutural vem sendo utilizada desde a antiguidade, nas primeiras construções, como pirâmides, coliseus e catedrais. Importantes obras foram realizadas com esse sistema, ao longo dos séculos. Entre elas, o Parthenon, na Grécia, construído entre 480 a.C. e 323 a.C. e a Muralha da China, construída no período de 1368 a 1644 (Kalil; Leggerini; Bonacheski, 2006).

Ressaltando que as primeiras construções de alvenaria estrutural eram realizadas pelo simples empilhamento das unidades. Nos vãos, fazia-se o uso de peças auxiliares, como vigas de madeira ou pedra. As obras eram bem mais robustas, uma vez que não se realizavam cálculos, e os blocos apresentavam baixa resistência mecânica. Com o evoluir das formulações para projetos estruturais, técnicas construtivas e emprego de materiais de melhor resistência, bem como o desenvolvimento de pesquisas na área, percebe-se uma expansão no uso desse sistema construtivo (Feliciano; Ferreira; Ferreira, 2009).

De acordo com Kalil, Leggerini e Bonacheski (2006), o desenvolvimento da alvenaria estrutural no Brasil se deu em 1966, quando surgiram os primeiros prédios, no Conjunto Habitacional “Central Parque da Lapa”, com 4 pavimentos em alvenaria armada de blocos de concreto, e estimam que um total de dois milhões de unidades

habitacionais em alvenaria estrutural tenham sido executadas entre 1964 e 1966. Consequentemente, esse sistema construtivo atingiu o seu auge na década de 80, no Brasil, onde ficou conhecido como um sistema para baixa renda. Os autores ainda ressaltam que o potencial de redução de custos atraiu o interesse de construtores e produtores de blocos, porém a inexperiência de execução trouxe ineficiência para o sistema e acarretou patologias nas edificações, fazendo com que o processo da alvenaria estrutural desacelerasse novamente em nosso país. Contudo, os atrativos econômicos apresentados pela alvenaria estrutural, quando comparados com os dos sistemas construtivos tradicionais, foram os responsáveis por atrair investimentos para as buscas de soluções para as patologias apresentadas.

Nesse sistema, o edifício mais alto do mundo é o Hotel Excalibur, em Las Vegas, nos Estados Unidos (Figura 1.1), construído em 1990. Suas torres principais possuem 28 andares e as paredes estruturais foram construídas em alvenaria armada de blocos de concreto, tendo aproximadamente 28 MPa de resistência à compressão, especificada na base (Ramalho; Corrêa, 2003).

Figura 1.1 – Hotel Excalibur, em Las Vegas, EUA.



Fonte: LoBue (2016).

No Brasil, a mais recente edificação em alvenaria estrutural que ultrapassou os 10 andares foi construída em Londrina-PR (Itambé, 2016): o prédio Edifício Fit Terra (Figura 1.2), que atingiu 19 pavimentos.

Figura 1.2 – Edifício Fit Terra, em Londrina-PR.



Fonte: Achou Mudou (2021).

Atualmente, com o surgimento de novas fábricas de blocos e cimentícias, bem como parcerias dessas com instituições de pesquisa para o desenvolvimento de estudos na área, percebe-se o maior uso e interesse por esse sistema estrutural por parte dos construtores e projetistas (Parsekian; Soares, 2010).

Assim, entende-se o potencial desse sistema construtivo e se questiona sobre a resposta e a interação entre os componentes da alvenaria estrutural, quando solicitados aos variados estados de tensão, bem como a análise desse sistema sujeito às ações pertinentes ao seu uso, como em situação de incêndio.

Define-se incêndio como fogo não controlado (ABNT, 1997), o responsável por grandes acidentes ao longo da história, inclusive em contexto estrutural. Suas consequências, muitas vezes, levam a significativos prejuízos financeiros e até mesmo perdas humanas.

A título de exemplo, em 1666, o Grande Incêndio de Londres, segundo Rocha (2012), deixou mais de 100 mil desabrigados, destruindo mais de 13.200 casas, 87 igrejas, a Catedral de Saint Paul e construções das autoridades. Essa tragédia é considerada a responsável pelas primeiras exigências de proteção contra incêndio (Kirchhof *et al.*, 2005). Em 1974, no Edifício JOELMA (São Paulo - SP), 179 mortos e 300 feridos. No Japão, em 2011, ocorreu um desastre na usina de Fukushima Daiichi, um incêndio que durou vários dias (Rocha, 2012). Outra tragédia, em 2013, na cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, o incêndio na boate Kiss, que vitimou 242

pessoas e deixou 680 feridos (Santos, 2014). Em 2018, no Rio de Janeiro, acompanhou-se o incêndio no Museu Nacional (Figura 1.3), quando se perdeu tudo que estava no prédio principal, exceto meteoritos, o acervo mobiliário do 1º Reinado e peças herdadas da família imperial (G1, 2018). Mais recentemente, em 2019, um incêndio que durou mais de 12 horas, na Catedral de Notre-Dame, em Paris, Londres.

Figura 1.3 – Incêndio no Museu Nacional do Rio de Janeiro.



Fonte: G1 (2018).

O Brasil, segundo a Secretaria Nacional de Segurança Pública do Ministério da Justiça, tem uma média de 267 mil incêndios anualmente, incluindo ocorrências florestais e residenciais (*apud* ISB, 2015). Internacionalmente, de acordo com a *International Association of Fire and Rescue Service* (do francês, CTIF ou Associação Internacional de Bombeiros e Resgate, em tradução livre), responsável pela coleta de dados em 36 países em 2022, uma média de 30,7% dos casos de incêndio no mundo é em edificações (CTIF, 2024).

Com um número expressivo de casualidades causadas por incêndios, torna-se de suma importância a existência de normas técnicas que incidam sobre as diferentes possibilidades de solicitações das estruturas, visando a garantir segurança aos usuários e às equipes de resgate. Porém, no Brasil, ainda não há norma técnica específica para situações de incêndio em alvenaria estrutural, há um comitê formado em que se iniciou a discussão acerca do tema. Em virtude dessa lacuna, o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, por exemplo, recomenda a norma organizada pelo Comitê Europeu de Normatização (CEN - *European Committee for*

Standardization) conhecida como Eurocode 6 (CEN, 2005a, 2005b), ou as normas internacionais similares para o dimensionamento de alvenaria estrutural em situação de incêndio. Nesse ínterim, elucida-se a necessidade de estudos que contribuam para a extensão do conhecimento nessa área, utilizando, por exemplo, códigos computacionais.

Esses códigos são ferramentas comumente utilizadas para a resolução de diversos problemas de Engenharia, desde a mecânica dos sólidos até problemas de transferência de calor e suas inter-relações. Ao retratarem os problemas reais em modelos numéricos, os códigos apresentam limitações advindas da necessidade de simplificar parâmetros pertinentes a cada análise. Mesmo assim, por apresentarem resultados satisfatórios e representativos, vêm se tornando cada vez mais utilizados pela comunidade científica e por profissionais de diversas áreas (Carvalho, 2019).

Diante do exposto: a importância e o impacto da alvenaria estrutural como método construtivo amplamente utilizado; a ausência de normativas e poucos estudos desse sistema em situação de incêndio; também os benefícios do uso de simulações computacionais para contribuições ao conhecimento; encontra-se o interesse deste trabalho.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é desenvolver estratégias de modelagem numérica que simulem os comportamentos estrutural, térmico e termoestrutural de pequenas paredes de alvenaria estrutural não armada, composta por blocos cerâmicos de paredes externas vazadas e maciças.

Especificamente, associam-se a esse os objetivos seguintes:

- desenvolver estratégias de modelagem, a fim de criar modelos capazes de avaliar o comportamento de prismas e pequenas paredes de alvenaria à temperatura ambiente e elevada;
- comparar e validar quantitativamente os resultados obtidos pelos modelos estrutural e térmico, com base nos resultados experimentais e numéricos propostos por Fernandes Neto (2020), Nguyen *et al.* (2009) e Rosemann (2011);

- propor uma análise qualitativa do modelo termoestrutural, tendo como base os modelos estrutural e térmico, comparando com os resultados experimentais de Lima *et al.* (2018) e Fernandes Neto (2020).

1.2 Justificativa

A compreensão detalhada do comportamento estrutural de materiais utilizados em construções, como as paredes de alvenaria estrutural não armada, faz-se necessária, uma vez que se observa o aumento das exigências de segurança em edificações e uma significativa evolução das técnicas de construção civil. Tradicionalmente, esses elementos são amplamente empregados devido à sua economia, simplicidade construtiva e capacidade de resistência. No entanto, a compreensão de seu desempenho sob condições adversas, como variações de temperatura durante incêndios, é crucial para garantir a segurança das estruturas e a integridade dos ocupantes.

Contudo, poucas pesquisas nacionais foram realizadas para o comportamento da alvenaria estrutural sob as suas solicitações de uso e em situação de incêndio (Carvalho, 2019; Leite; Moreno Jr.; Torres, 2016; Moreno Jr.; Molina, 2012). Assim, o desenvolvimento de estratégias de modelagem numérica que simulem esses comportamentos se torna indispensável para a análise precisa e confiável desses elementos construtivos.

O uso de ferramentas de simulação numérica permite que engenheiros e pesquisadores explorem uma gama mais ampla de cenários do que seria possível apenas com testes experimentais. A modelagem numérica oferece a capacidade de prever o comportamento de prismas e das pequenas paredes de alvenaria sob diferentes condições de carregamento e temperatura, permitindo a análise de fatores que seriam difíceis de replicar em experimentos físicos. Isso inclui a simulação de incêndios padrão e a deformação dos materiais devido ao aquecimento, proporcionando uma visão mais abrangente e detalhada das respostas estruturais e térmicas das construções.

Além disso, a validação dos modelos numéricos por meio da comparação com resultados experimentais e estudos prévios é essencial para garantir a precisão e a confiabilidade das simulações. Referenciar estudos como os de Fernandes Neto (2020), Nguyen *et al.* (2009) e Rosemann (2011) permite verificar a eficácia da

modelagem desenvolvida, reforçando a sua aplicabilidade em contextos reais. A correlação entre dados experimentais e numéricos possibilita ajustes finos nas simulações, tornando-as uma ferramenta robusta para a previsão do comportamento de estruturas em situações de risco, como incêndios.

A proposta de uma análise qualitativa do modelo termoestrutural também se justifica pela necessidade de entender como as interações entre os efeitos térmicos e mecânicos influenciam o desempenho global de prismas e pequenas paredes de alvenaria. Esse tipo de análise permite identificar possíveis falhas ou pontos de vulnerabilidade na estrutura, fornecendo informações valiosas para a melhoria de normas de segurança e procedimentos de construção. Além disso, ao comparar esses resultados com experimentos existentes, como os realizados por Lima *et al.* (2018) e Fernandes Neto (2020), o estudo ganha profundidade e relevância, contribuindo para o avanço do conhecimento na área.

Em síntese, este estudo se justifica pela necessidade de desenvolver e validar estratégias de modelagem que possam ser aplicadas na engenharia de estruturas para prever com maior precisão o comportamento de prismas e paredes de alvenaria cerâmica em situações adversas. A segurança das edificações é uma preocupação crescente, e a capacidade de prever o desempenho dos materiais frente a incêndios e outros fatores críticos é um passo fundamental para a construção de edificações mais seguras e duradouras.

Portanto, em se tratando da importância de estudos sobre a alvenaria em situação de incêndio e da necessidade de minimizar as perdas de vidas e de materiais envolvidos nesse fenômeno, destaca-se a necessidade e a relevância da proposta apresentada no presente trabalho.

1.3 Metodologia

Realizou-se um levantamento bibliográfico na área de modelagem numérica, alvenaria estrutural, incêndio, propriedades termofísicas dos materiais sob elevadas temperaturas e verificação das normas relativas aos assuntos estudados. Seguido da realização de análises numéricas em consonância com a seguinte sequência: análise preliminar do modelo, análise estrutural, análise térmica e análise termoestrutural das pequenas paredes de blocos cerâmicos. Na Figura 1.4 apresenta-se o esquemático da estratégia adotada.

Figura 1.4 – Esquemático da metodologia adotada.



Fonte: Elaborada pela autora.

O levantamento bibliográfico foi realizado em fluxo contínuo, por sua importância tanto inicial, para compreensão do tema e coleta de parâmetros em referências anteriores, quanto na parte final da pesquisa, a fim de se manter um trabalho relevante, atual e para melhor avaliação dos resultados obtidos.

Nos estudos para modelagens numéricas são analisados os comportamentos descritos a seguir.

- Comportamento estrutural: resposta mecânica da estrutura em temperatura ambiente submetida ao carregamento de compressão uniformemente distribuído em seu topo, conforme ensaio experimental.
- Comportamento térmico: gradiente de temperatura ao longo da seção transversal da estrutura submetida à variação de temperatura regida pelo ensaio experimental.
- Comportamento termomecânico: resposta termomecânica da estrutura submetida ao campo de temperatura obtido no estudo térmico e ao carregamento de compressão uniformemente distribuído em seu topo, com estudo qualitativo quanto às tensões, deformações e deslocamentos obtidos nos modelos.

As análises numéricas foram realizadas com o software Abaqus versão 2021, através do Método de Elementos Finitos (MEF). Na análise preliminar, em virtude do menor tempo de processamento, foram modelados prismas cerâmicos de dois blocos para calibração do modelo estrutural, baseando-se no trabalho experimental de Fernandes Neto (2020) e nas simulações dos autores Rosemann (2011), Rodovalho (2018) e Carvalho (2019). Nessa etapa, definiram-se os parâmetros gerais do modelo

numérico que também foram aplicados à modelagem das pequenas paredes, são eles:

- geometria dos elementos constituintes;
- tipo de elemento finito;
- refinamento da malha;
- interações/contato entre as partes do modelo;
- condições de contorno e carregamento.

Em seguida, realizou-se a estruturação dos **modelos mecânicos** de prismas e pequenas paredes à temperatura ambiente, permitindo o deslocamento vertical na superfície superior da parede e considerando o aumento de carga na estrutura pelo incremento de deslocamento, buscando simular as condições de contorno do ensaio e calibrar alguns parâmetros do modelo, de acordo com as propriedades dos materiais inicialmente estudadas na revisão bibliográfica e com os ensaios de caracterização dos materiais.

Para os **modelos térmicos**, aplicaram-se condições de contorno térmicas, a saber, condução e radiação; para representar o gradiente de temperatura ao longo da seção transversal da parede, calibrando as propriedades térmicas dos materiais, em virtude das poucas referências e análises dos blocos cerâmicos brasileiros. Vale destacar que os resultados das modelagens numéricas em contextos térmico e mecânico foram validados por meio de comparações com os resultados apresentados em Fernandes Neto (2020), Nguyen *et al.* (2009) e Rosemann (2011).

Por fim, propôs-se a elaboração de **modelos termoestruturais**, unindo as propriedades mecânicas e térmicas definidas e calibradas nos modelos anteriormente estudados, alteradas em função da temperatura, bem como a expansão térmica dos materiais, baseando-se em normas e estudos internacionais. A análise qualitativa deste modelo foi baseada em resultados obtidos sem carregamento por Fernandes Neto (2020) e com carregamento por Lima *et al.* (2018).

Além disso, analisou-se qualitativamente o comportamento termoestrutural das pequenas paredes de alvenaria com blocos cerâmicos, uma vez que os trabalhos de referência não apresentaram instrumentação de carga e nem de deslocamento nos ensaios desses modelos submetidos a altas temperaturas com aplicação simultânea de carregamento.

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada para garantir uma análise abrangente e precisa do comportamento de pequenas paredes de blocos cerâmicos sob condições de temperatura elevada e carregamento. O levantamento bibliográfico contínuo, o uso de ferramentas de simulação numérica e a aplicação do Método de Elementos Finitos permitiram a definição de parâmetros relevantes e a calibração dos modelos. A sequência de análises preliminares, estruturais, térmicas e termoestruturais proporcionou uma abordagem sistemática, promovendo a consistência dos dados obtidos.

2 ALVENARIA ESTRUTURAL: COMPONENTES E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

Em Roman, Mutti e Araújo (1999), percebe-se que o destaque do uso da alvenaria estrutural é a habilidade desse sistema de facilmente incorporar conceitos de racionalização, produtividade e qualidade, resultando em obras com grande desempenho tecnológico e baixos custos. Sobressai-se também por ser dimensionada para suportar cargas que superam o seu peso próprio.

Segundo a ABNT NBR 15812-1 (ABNT, 2010a), entende-se por componente da alvenaria uma entidade básica, ou seja, algo que compõe os elementos. Os elementos, por sua vez, irão compor a estrutura. Os componentes usuais da alvenaria estrutural são os blocos (de concreto ou cerâmicos), a argamassa, o graute e a armadura. Existem outros elementos como, por exemplo, prismas, paredes, cintas, vergas e contravergas. Na Figura 2.1, apresenta-se um exemplo de construção com o uso desse sistema, adotando-se blocos cerâmicos, sendo esse tipo de componente, enquanto material, o foco do presente trabalho.

Figura 2.1 – Alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.



Fonte: Gomes (2004).

Esse sistema construtivo apresenta um comportamento mecânico bastante complexo, pois é formado a partir da associação de componentes, portanto, para

entender seu comportamento, é necessário estudar cada componente e, posteriormente, a forma como esses trabalham em conjunto nos elementos.

2.1 Componentes da alvenaria estrutural

Por desempenharem papéis fundamentais na constituição e desempenho da alvenaria estrutural, consideram-se, para esse sistema, quatro componentes-chave: unidades, argamassa, graute e armadura.

As unidades cerâmicas são objeto de estudo deste trabalho. Presumindo que os blocos individuais compõem as paredes, é substancial destacar suas propriedades, tipos e influência na resistência estrutural, examinar a argamassa e o material de ligação que une as unidades cerâmicas, compreendendo suas composições, características e importância na integridade da alvenaria.

Já que a armadura é um elemento que confere reforço estrutural à alvenaria e o graute é um material usualmente utilizado para preencher as juntas e proporcionar estabilidade estrutural, cita-se cada um desses quatro componentes, a seguir.

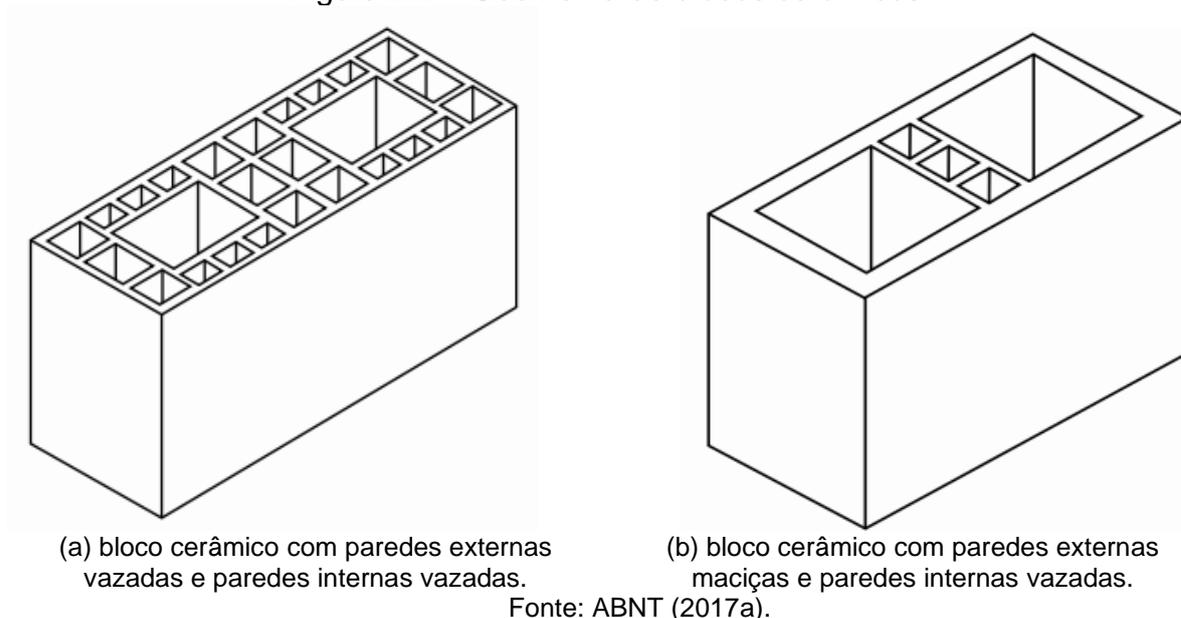
2.1.1 Unidades Cerâmicas

A ABNT NBR 15270-1 (ABNT, 2017a) define o bloco estrutural como componente de alvenaria que possui furos ou vazados prismáticos, perpendiculares às faces que os contêm, produzido para ser assentado com furos ou vazados na vertical, com características e propriedades específicas para alvenaria estrutural.

As unidades cerâmicas são produzidas por conformação plástica de matéria-prima argilosa, contendo ou não aditivos e queimadas a elevadas temperaturas. A norma ainda as classifica como blocos (ou tijolos) de vedação ou estrutural, com base na geometria, resistência característica mínima e absorção d'água.

Quanto à geometria, o bloco cerâmico de paredes vazadas é o componente de alvenaria cujas paredes externas e internas são vazadas, e o bloco cerâmico com paredes externas maciças é o componente cujas paredes externas são maciças e as internas podem ser maciças ou vazadas. Neste trabalho, foram utilizados o bloco cerâmico de paredes vazadas (Figura 2.2a) e o bloco cerâmico de paredes externas maciças e paredes internas vazadas (Figura 2.2b).

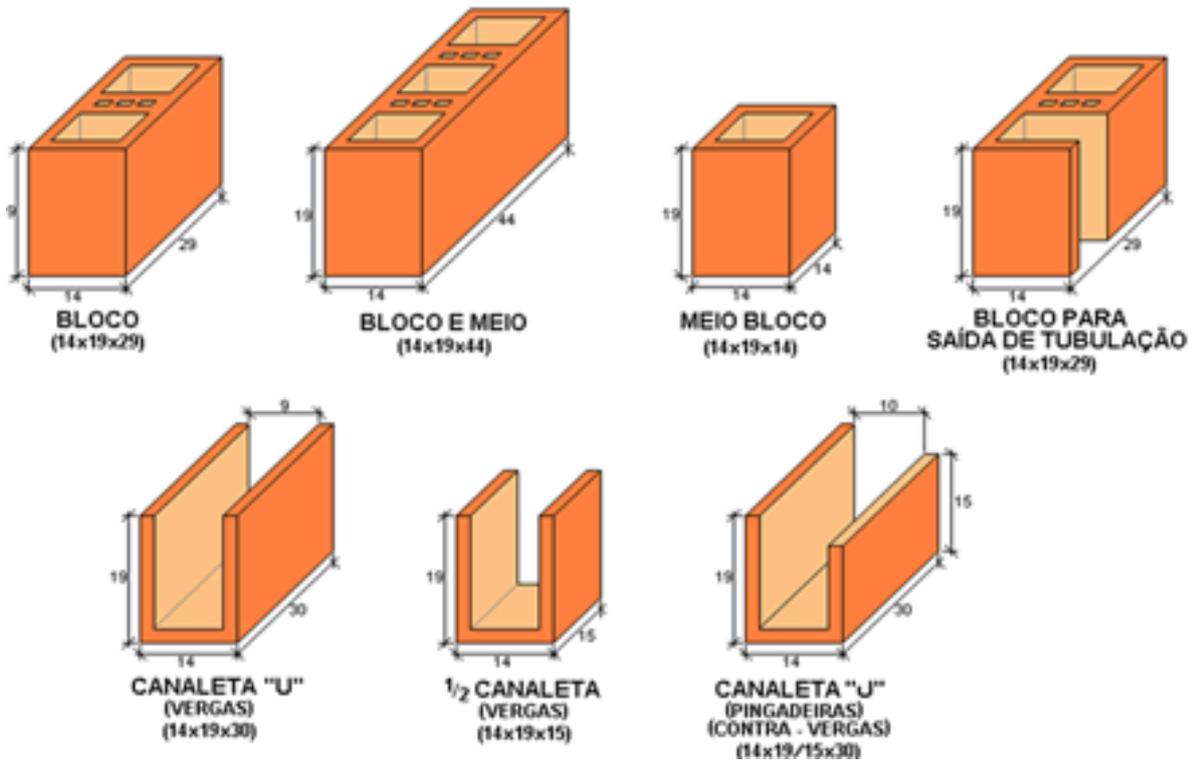
Figura 2.2 – Geometria de blocos cerâmicos.



Em um projeto de alvenaria estrutural, a escolha das dimensões dos blocos de concreto que serão utilizados ocorre quando da determinação do grupo de blocos com dimensões variadas, chamada família de blocos. A norma NBR 15270-1 (ABNT, 2017a) prescreve que a família de blocos é “o conjunto de componentes necessários para a construção das alvenarias e suas amarrações, que tem como característica comum a mesma largura”. Os blocos que compõem a família, segundo suas dimensões, são designados como bloco inteiro (bloco principal) e os blocos de amarração, blocos complementares e blocos tipo canaleta. Na Figura 2.3, são mostradas as tipologias para alguns blocos de cerâmica utilizados no mercado.

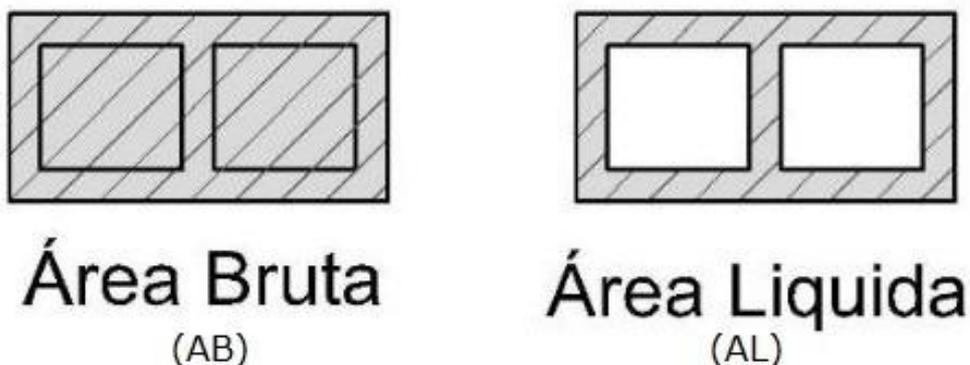
Para a classificação dos blocos e obtenção de suas resistências, faz-se necessário conhecer a área bruta e a área líquida desses componentes, conforme Figura 2.4. A área bruta (A_b) é a área da seção de assentamento delimitada pelas arestas do bloco, sem desconto das áreas dos furos, quando houver. Já a área líquida (A_{liq}) é a área da seção de assentamento, delimitada pelas arestas do bloco, com desconto das áreas dos furos, quando houver (ABNT, 2017a).

Figura 2.3 – Tipologia para blocos de cerâmica.



Fonte: Novaes (2020).

Figura 2.4 – Definição das áreas dos blocos



Fonte: NBR 15961-1 (ABNT, 2011).

Conforme Soares (2010), para os blocos desejam-se as seguintes propriedades:

- resistência à compressão adequada: capacidade de resistir aos esforços de compressão aplicados;
- aderência: capacidade de aderir (transferir tensões normais e de cisalhamento) à argamassa, tornando a parede homogênea;
- durabilidade frente aos agentes agressivos (umidade, variação de temperatura e ataque por agentes químicos): capacidade de um material

em preservar as suas características funcionais sem necessitar de manutenção ou reparações excessivas;

- dimensões uniformes: apresentar geometria respeitando as prescrições normativas e uniformes;
- resistência ao fogo: capacidade dos elementos construtivos de suportar a ação do incêndio, impedindo, por determinado período, sua propagação e preservando a estabilidade estrutural da edificação (Carvalho, 2019).

Dada a grande importância das unidades para a resistência da alvenaria, condições rígidas de controle devem ser adotadas na sua fabricação, para que apresentem propriedades uniformes. Infelizmente, no Brasil, quando se trata de blocos cerâmicos estruturais, esses são produzidos em condições extremamente diversas. Encontram-se, desde fábricas modernizadas e tecnológicas, que produzem blocos de alta qualidade, com propriedades uniformes e respeitando todas as especificações de norma, até olarias precárias, muitas vezes temporárias, produzindo blocos sem nenhum tipo de controle de qualidade (Villar, 2005).

2.1.2 Argamassa de assentamento

A norma ABNT NBR 13281 (ABNT, 2005b) define a argamassa de assentamento em alvenaria estrutural como uma argamassa indicada para ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função estrutural.

As primeiras argamassas registradas foram feitas por algumas civilizações antigas (como os persas e os egípcios) e possuíam variações na constituição do material, podendo ser feita de gesso, cal, argila, betume, entre outros materiais. Segundo Freitas (2008), houve um aperfeiçoamento relevante das argamassas, no império Romano, pois foi nesse período que se descobriu que a mistura de cinzas vulcânicas (pozolanas) com a cal poderia produzir o que, no futuro, seria chamado de cimento pozolana, ou seja, a base das argamassas de pozolana.

Durante muitos anos a argamassa tinha como função única juntar elementos e acomodar deformações. Por esse motivo, a resistência da argamassa era considerada um requisito secundário pelo meio técnico e isso se manteve até meados da década

de 70, quando Khoo e Hendry (1973) analisaram o comportamento triaxial que explicava os mecanismos de ruptura das alvenarias à compressão.

Geralmente as argamassas de assentamento são constituídas por cimento, areia e água, podendo também conter adições ou aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento e ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada) (ABNT, 2005b). E se possuem cimento e cal como aglomerantes são denominadas argamassas mistas. Apresenta-se, na Figura 2.5, um exemplo de aplicação do referido componente.

Figura 2.5 – Exemplo de aplicação de argamassa de assentamento.



Fonte: Carvalho (2021).

Durante anos, caracterizam a argamassa segundo diversas percepções. Segundo Roman (1996) a principal função da argamassa, do ponto de vista estrutural, é a possibilidade de transferência uniforme das tensões entre as unidades de alvenaria, incluindo unir solidamente as unidades e ajudá-las a resistir aos esforços laterais.

Segundo Santos (2014), as funções principais da argamassa são: unir as unidades da alvenaria, transmitir e uniformizar as tensões atuantes ao longo das seções dos blocos, acomodar as pequenas deformações provenientes de carregamentos externos e promover ajustes das tolerâncias geométricas dos blocos.

A norma brasileira ABNT - NBR 13281 (ABNT, 2005b) classifica as argamassas quanto às seguintes propriedades e características: resistência à compressão (conforme Quadro 2.1), densidade de massa aparente no estado endurecido, resistência à tração na flexão, coeficiente de capilaridade, densidade de massa no estado fresco, retenção de água e resistência potencial de aderência à tração. Características importantes, pois a argamassa é utilizada para solidarizar e permitir a aderência entre os blocos, uniformizar e transmitir as tensões atuantes nos elementos de alvenaria (Fernandes Neto, 2020).

Quadro 2.1 – Classificação de argamassa de assentamento quanto à resistência à compressão.

Classe	Resistência à compressão MPa	Método de ensaio
P1	≤ 2,0	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8,0	

Fonte: ABNT (2005b).

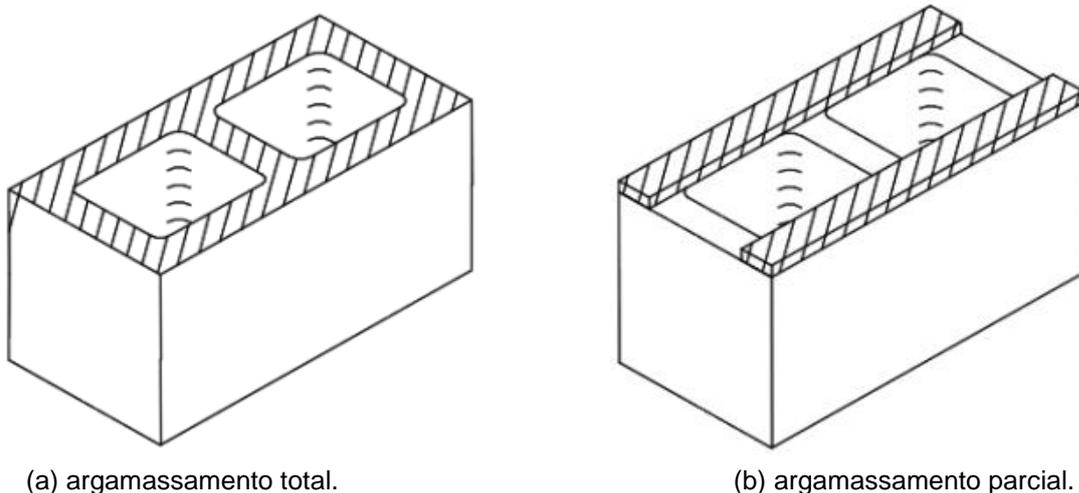
As juntas de argamassa, de acordo com Ramalho e Corrêa (2003), absorvem pequenas deformações e resistem às condições ambientais ao longo do tempo, impedindo a entrada de água e vento nas estruturas. Para melhor aproveitamento do material, este deve apresentar boas características, que, segundo afirmam Bastos (2013) e Oliveira (2014), são trabalhabilidade, aderência, resistência, plasticidade, durabilidade e capacidade de retenção de água.

- Trabalhabilidade: facilidade e homogeneidade com que a argamassa pode ser misturada, lançada, adensada e acabada, avaliada através do índice de consistência (Carasek, 2007).
- Aderência: capacidade de transferir tensões de tração e de cisalhamento na interface entre o bloco e a junta de argamassa, sem que haja a separação entre os componentes (Oliveira, 2014).
- Resistência: capacidade de resistir aos esforços mecânicos aplicados.

- Plasticidade: propriedade de deformação de um corpo de modo irreversível, ao ser submetido a uma tensão.
- Durabilidade: capacidade de um material em preservar as suas características funcionais sem necessitar de manutenção ou reparações excessivas.
- Capacidade de retenção de água: propriedade que está associada à capacidade da argamassa fresca de manter a sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água de amassamento, seja por evaporação, seja pela absorção de água da base (Carasek, 2007).

Em Haach, Vasconcelos e Lourenço (2011) e em Oliveira (2014), menciona-se que a argamassa é responsável por criar uma distribuição uniforme de tensão na alvenaria, corrigindo irregularidades dos blocos, acomodando deformações associadas às expansões térmicas e retração. Além dessas características, durante o dimensionamento, é importante definir o tipo de assentamento da argamassa, ou seja, a forma de preenchimento da superfície das paredes dos blocos pela argamassa, que pode ser parcial ou total, conforme retratado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Tipos de argamassamento.



(a) argamassamento total.

(b) argamassamento parcial.

Fonte: Oliveira (2014).

O argamassamento total é dado pelo preenchimento por argamassa de todos os septos dos blocos, já no parcial apenas os septos longitudinais dos blocos recebem o preenchimento. No processo de construção, essa definição pode ser determinante na produção e no rendimento da obra (Oliveira, 2014).

Destaca-se que em Colville e Wolde-Tinsae (1991) foram ensaiados 224 prismas (115 com assentamento parcial e 109 com assentamento total), com o foco no efeito do tipo de assentamento da argamassa e na resistência à compressão de alvenaria de blocos de concreto. Esses autores concluíram que a resistência à compressão dos prismas vazados deve ser calculada de acordo com a área de assentamento e que a resistência à compressão em prismas executados com argamassamento parcial é cerca de 8% inferior aos executados com argamassamento total. Portanto sugerem que os ensaios de prismas sejam sempre executados com argamassamento total, uma vez que o valor de resistência à compressão pode ser extrapolado para o caso de assentamento parcial, a partir da área de assentamento.

Em Pasquali (2007), observa-se que, em seus estudos sobre paredes de blocos cerâmicos maciços e vazados para três tipos de argamassa e variando o tipo de assentamento, os elementos de alvenaria com assentamento lateral apresentaram menor resistência em relação aos elementos com assentamento total.

À medida que, em Izquierdo (2011), referente aos ensaios de compressão em prismas e pequenas paredes de alvenaria de blocos de concreto com ambos os argamassamentos, considera-se que os prismas feitos com argamassamento parcial apresentaram menor resistência que os prismas com argamassamento total, sendo a diferença média de 36%. Tendência repetida para as pequenas paredes com diferença média de 14%. E, quanto à ruptura, verifica-se a ocorrência de fissuras verticais ao longo dos septos transversais, sendo de forma mais acentuada para as situações com argamassamento parcial.

2.1.3 Graute

No presente trabalho não são abordadas análises com alvenarias grauteadas e, conseqüentemente, as propriedades do graute não são discutidas, contudo se vê a importância de conceituá-lo.

O graute é uma mistura de água, areia, cimento e brita, semelhantemente ao concreto, com as diferenças de que, os agregados são mais finos, com 100% passando na peneira 12,5 mm e cuja relação água/cimento é mais alta, conferindo fluidez ao material com abatimento de 20 a 28 cm (Carvalho, 2019).

Ele é usado para preencher espaços vazios de blocos e canaletas, conforme Figura 2.7, com o objetivo de aumentar a capacidade portante. Sua consistência mais

fluida permite atingir uma alta resistência e expansão controlada, o que o torna um produto altamente indicado para o preenchimento de alvenaria estrutural, cintas, vergas e contravergas (Orguel, 2017).

Figura 2.7 – Exemplo de aplicação de graute.



Fonte: Posenato (2020).

A fluidez do graute permite fazer o total preenchimento da seção, sem existir a necessidade de adensamento. A alta resistência no início permite a rápida liberação das fôrmas e da estrutura grauteada, com isso permitindo maior agilidade para fixação de equipamentos, também a rápida colocação da estrutura que foi reparada ou reforçada.

De acordo com Dupim (2019), o graute tem a função de melhorar a resistência à compressão das paredes por aumentar a área líquida dos elementos estruturais e por solidarizar as armaduras aos blocos, preenchendo os furos onde elas se encontram.

Em Parsekian e Soares (2010) e em Bastos (2013), reforça-se que o uso deste material tem como objetivos proporcionar a integração da armadura com a alvenaria, de forma a constituir um sistema monolítico e aumentar a resistência aos esforços mecânicos, à propagação do som e ao fogo da parede.

2.1.4 Armaduras

Similarmente ao graute, não são abordados estudos com alvenarias armadas neste trabalho, razão pela qual as propriedades das armaduras não são discorridas, porém se vê também a importância de conceituá-las.

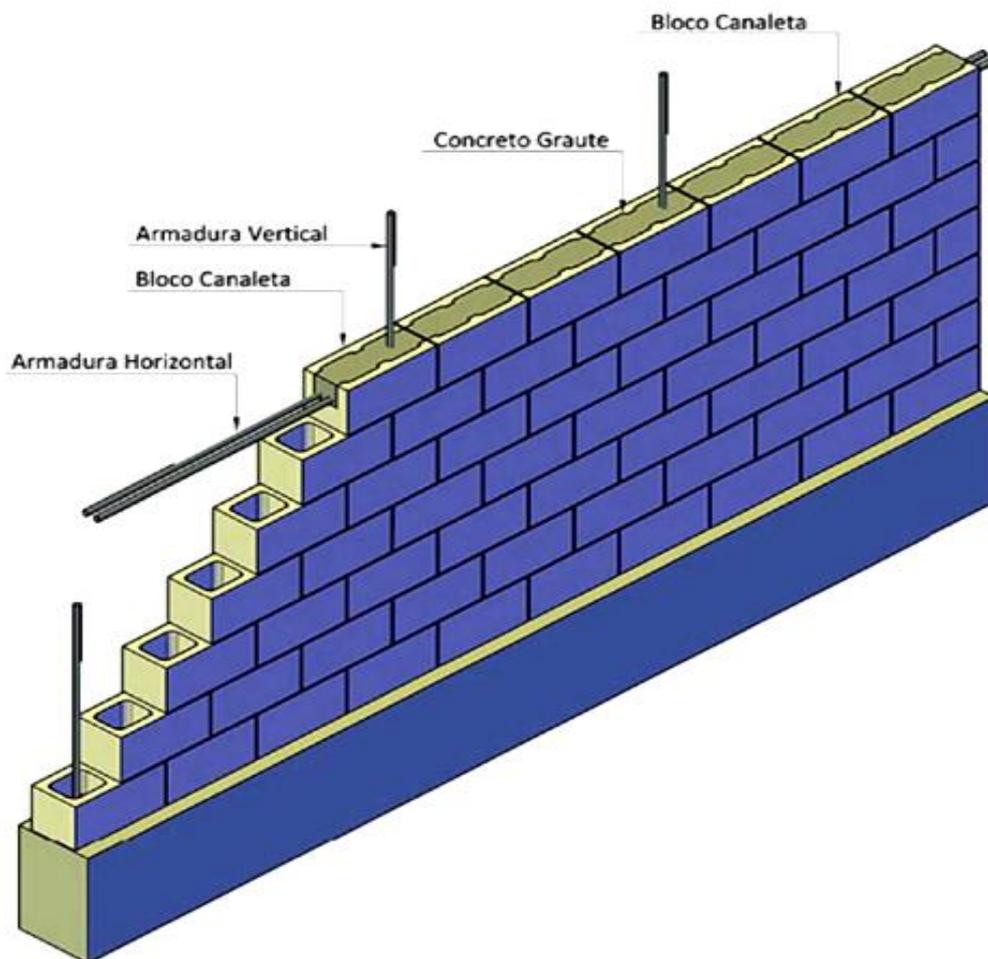
As armaduras são as mesmas utilizadas no concreto armado, ou seja, CA-25, CA-50 e CA-60, que são aços com resistência característica de 250MPa, 500MPa e 600MPa, respectivamente. O uso dessas armaduras gera classificações à alvenaria (Ramalho; Corrêa, 2003; Carvalho, 2019), tais como:

- alvenaria estrutural não-armada: a armadura, sem função estrutural, tem finalidade construtiva ou de amarração e busca reduzir patologias nas condições de serviço, como trincas por acomodação da estrutura e por efeito térmico, vento e concentração de tensões;
- alvenaria estrutural armada: além das armaduras construtivas e de amarração, existem armaduras passivas que atendem às solicitações estruturais, são posicionadas nas cavidades dos blocos e estes são posteriormente preenchidos por grautes, para garantir o trabalho em conjunto dos elementos;
- alvenaria estrutural parcialmente armada: a estrutura apresenta elementos armados e não armados, definição adotada apenas no Brasil;
- alvenaria estrutural protendida: a estrutura possui, além das armaduras construtivas e de amarração, armaduras ativas (armaduras protendidas) que atendem às solicitações estruturais contidas no elemento resistente.

Ao serem projetadas na estrutura, as armaduras são responsáveis por absorver esforços de tração e/ou compressão e atender às necessidades construtivas (por exemplo, travamento das alvenarias), bem como, por proporcionar mais capacidade de deformação e também por combater os esforços de flexão nos elementos, tais como vigas, vergas, contravergas, cintas.

Na Figura 2.8, além do graute e do bloco canaleta, exemplificam-se dois tipos de armaduras: vertical e horizontal.

Figura 2.8 – Exemplo de armaduras em alvenaria estrutural.



Fonte: Guerra (2015).

2.2 Fatores que influenciam a resistência da alvenaria

O dimensionamento de uma estrutura em alvenaria requer o conhecimento claro do comportamento do conjunto de elementos a ser dimensionado sob diferentes condições de carregamento (Curtin; Shaw; Beck, 1988). A combinação de blocos e argamassas com propriedades diferentes altera significativamente o comportamento dos elementos estruturais de alvenaria.

De acordo com Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), a resistência à compressão da alvenaria depende, majoritariamente, do tipo de bloco, depois da mão de obra, e por último, do tipo de argamassa. Já em Curtin, Shaw e Beck (1988), destaca-se que a resistência característica da alvenaria à compressão depende da resistência característica da unidade, da argamassa especificada (se a alvenaria é

argamassada), da forma das unidades, da espessura das juntas de argamassa e do padrão de acabamento.

Em Fortes *et al.* (2017), relata-se que a resistência à compressão da alvenaria é um fator chave do projeto estrutural desse sistema e é dependente de vários fatores como: a resistência da argamassa e das unidades; valores relativos entre resistência da argamassa e unidades; relação entre a altura da unidade e a menor dimensão horizontal da unidade; orientação da unidade em relação à direção da aplicação da carga e a espessura da junta de argamassa.

Em Hendry, Sinha e Davies (2004), são discutidos os fatores que consideram importantes na determinação da resistência à compressão da alvenaria, de acordo com os elementos a seguir e suas respectivas características:

- blocos: resistência à compressão, tipo e geometria, relação altura/espessura e características de absorção;
- argamassas: resistência à compressão, traço, relação água/cimento, retentividade de água e deformação relativa ao bloco;
- alvenaria: ligação entre elementos, direção das tensões e tensões concentradas localmente.

Portanto a dependência dos vários fatores relacionados indica uma complexidade, no que se refere à avaliação precisa da resistência da alvenaria estrutural. Assim, faz-se necessário realçar a importância do conhecimento das propriedades individuais dos componentes das estruturas, bem como o comportamento desses em conjunto.

Dessa forma, considerando os importantes fatores de influência abordados na literatura, destacamos: resistência à compressão, curva tensão-deformação específica e módulo de elasticidade, envoltória de ruptura da alvenaria; conforme são detalhados a seguir.

2.2.1 Resistência à compressão dos materiais

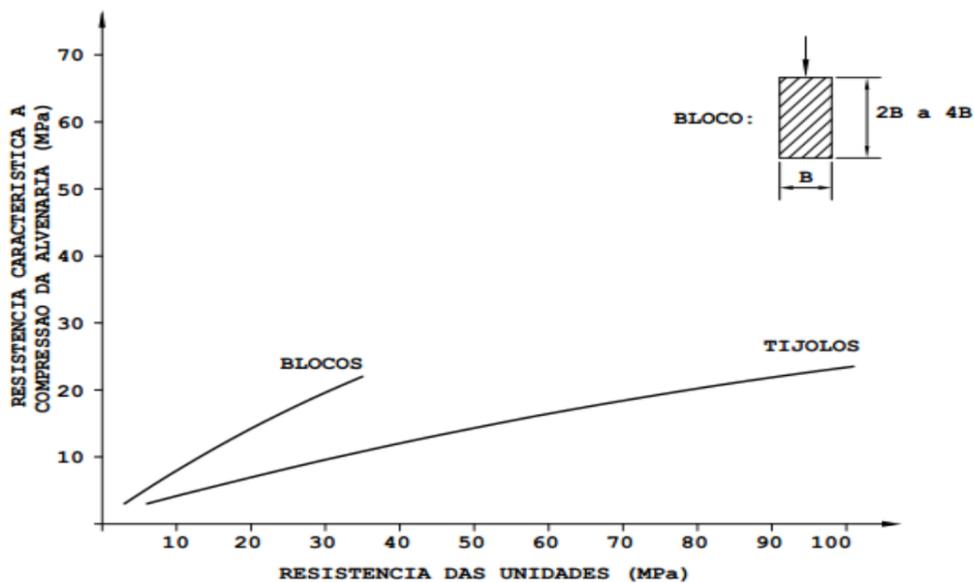
Dentre os fatores que mais modificam a resistência das paredes e prismas, distingue-se a relevância do bloco cerâmico, uma vez que sua resistência influi significativamente no comportamento e modo de falha da estrutura. À vista disso, o bloco cerâmico é o principal e mais resistente componente das paredes e prismas. Visto que a resistência à compressão é a principal propriedade mecânica dos blocos,

em conformidade com o que cita Hendry (2001), conseqüentemente essa propriedade é a base para o controle de qualidade de estruturas.

Ao considerar que o bloco é de grande importância para a resistência da parede, entende-se que é essencial caracterizar a unidade. Para tal, encontra-se a resistência do material, por meio de ensaios de compressão realizados em unidades, e os resultados obtidos auxiliam no controle de qualidade de produção, nas pesquisas e em projetos estruturais (Roman, 1996).

Em Camacho (2006), foi apresentada a relação entre a resistência da alvenaria e a resistência da unidade, mostrada, genericamente, pela Figura 2.9.

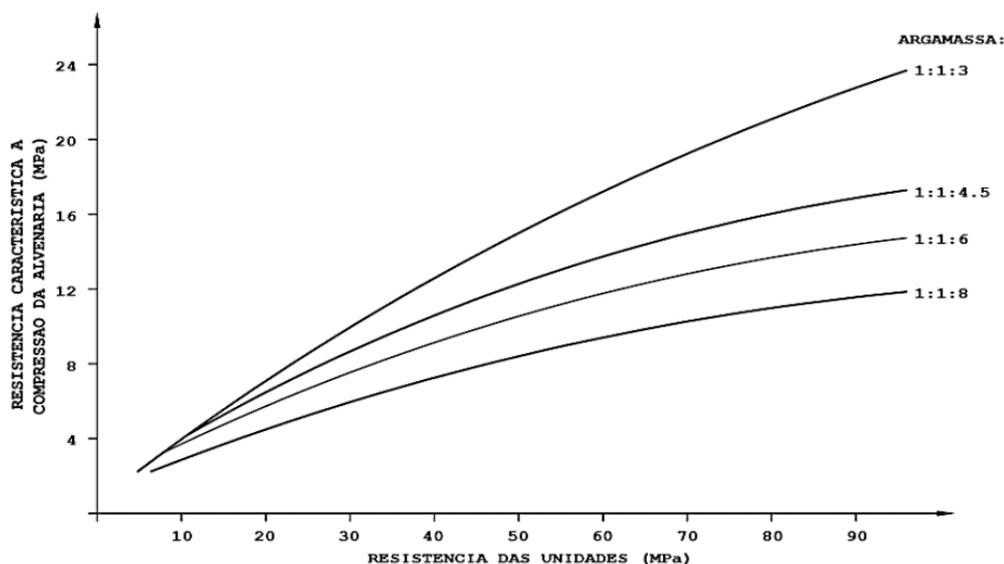
Figura 2.9 – Relação entre a resistência da alvenaria e a resistência da unidade.



Fonte: Camacho (2006).

Considera-se que, com o crescimento da resistência das unidades, há um crescimento da resistência característica das paredes, contudo, a relação não é linear: com o aumento da resistência das unidades, há uma queda na eficiência da resistência do elemento estrutural, mais significativa em unidades de tijolos do que em blocos estruturais. Ainda, em Camacho (2006), apresenta-se, conforme as resistências das unidades utilizadas, a influência do traço da argamassa para uma estrutura em alvenaria (Figura 2.10). Observa-se que, com o aumento da resistência da argamassa, há o aumento da resistência à compressão da alvenaria, para a mesma unidade utilizada.

Figura 2.10 - Relação entre o traço da argamassa e a resistência da alvenaria.



Fonte: Camacho (2006).

Esse impacto é mais perceptível conforme se aumenta a resistência das unidades, o que também é corroborado pelo autor Bastos (2013), ao afirmar que, quando a resistência da argamassa passa a exercer uma influência mais significativa na estrutura, ela atinge valores inferiores a 40% da resistência das unidades. É importante salientar que as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios padronizados variam em relação às propriedades efetivas da junta, sendo influenciadas, por exemplo, pelo processo de absorção e do efeito de confinamento exercido pelo bloco.

Porém o uso de argamassas com resistência superior à necessária não é aconselhado, pois compromete a absorção de pequenos deslocamentos diferenciais, bem como, pode reduzir a resistência final da parede, uma vez que um acréscimo de 100% na resistência à compressão da argamassa resultaria em um aumento de apenas 10% na resistência à compressão da parede (Drysdale; Hamid; Baker, 1994; Ramalho; Corrêa, 2003)). Em consonância, a ABNT NBR 15812-1 (ABNT, 2010a) estabelece limites para a resistência à compressão da argamassa, com um valor mínimo de 1,5 MPa e um máximo de 70% da resistência característica do bloco em relação à área líquida.

Assim, uma vez que a resistência dos materiais influi diretamente na resistência dos prismas, em especial a do bloco, faz-se necessário avaliar o fator de eficiência, que é a relação entre a resistência do bloco e a do prisma ou parede. Para calculá-lo,

divide-se o valor da resistência à compressão do prisma pela resistência do bloco, em conformidade com a Equação 1, em que η é o fator de eficiência, f_p é a resistência à compressão do prisma ou da parede e f_b é a resistência à compressão do bloco estrutural.

$$\eta = \frac{f_p}{f_b} \quad (1)$$

A resistência do bloco será sempre maior que a do prisma, que por sua vez será sempre maior que a da parede (relações representadas pela eficiência - η), pois a adição de juntas tende a reduzir a sua resistência, de acordo com Rodvalho (2018). Além disso, a eficiência é influenciada pela forma e material constituinte do bloco. Na Tabela 2.1, constam-se as eficiências parede-bloco (f_{par}/f_b) e prisma-bloco (f_p/f_b) cerâmicos.

Tabela 2.1 – Eficiência de materiais cerâmicos.

Eficiência	Valor mínimo	Valor máximo
$\frac{f_{par}}{f_b}$	0,2	0,5
$\frac{f_p}{f_b}$	0,3	0,6

f_{par} = resistência à compressão de paredes de alvenaria.

f_p = resistência à compressão de prismas.

f_b = resistência à compressão de blocos

Fonte: Ramalho e Corrêa (2003).

Paredes constituídas por blocos de concreto possuem eficiência parede-bloco superior àquelas formadas por blocos cerâmicos e quanto maior for a resistência do bloco, maior será a resistência da alvenaria, contudo, a eficiência permanece menor, segundo Ramalho e Corrêa (2003). E, no que tange à alvenaria com blocos de concreto, em Medeiros e Sabbatini (1994), entende-se que o valor do fator de eficiência pode variar entre 0,25 e 0,7 entre blocos e parede. Já em Ramalho e Corrêa (2003), o fator de eficiência prisma-bloco pode variar entre 0,5 e 0,8.

A norma ABNT NBR 15812-1 (ABNT, 2010a) permite a estimativa da resistência à compressão de uma parede por meio de testes de compressão axial realizados em prismas ou pequenas paredes, desde que estas sejam construídas sob as mesmas condições da parede original. Contudo, valores de fator de eficiência prisma/bloco ainda não são apresentados em caráter normativo, por isso são adotados valores obtidos experimentalmente e/ou por formulações matemáticas.

Dessa forma, em Portella (2015), realizou-se um estudo com prismas de blocos estruturais cerâmicos de paredes vazadas com diferentes resistências à compressão, objetivando encontrar um valor usual, ao correlacionar um fator de eficiência prisma/bloco. Na Tabela 2.2, apresentam-se os valores de fator de eficiência média e característica dos prismas que foram ensaiados experimentalmente aos 28 dias e os valores sugeridos pelo autor.

Tabela 2.2 – Fator de eficiência de ensaios aos 28 dias encontrados por Portella (2015).

Faixa de resistência dos prismas (MPa)	Fator de Eficiência		
	Médio	Característico	Sugerido pelo autor
6,0 - 8,5	54,7%	47,7%	50,0%
8,5 – 10,0	44,0%	36,7%	40,0%
10,0 – 12,0	45,8%	37,9%	40,0%
12,0 – 15,0	41,0%	33,2%	35,0%
Acima de 15,0	39,3%	31,1%	35,0%

Fonte: Adaptada de Portella (2015).

Na Tabela 2.3, constam-se as eficiências experimentais prisma-bloco (f_p/f_b), pequena parede-bloco (f_{pp}/f_b) e pequena parede-prisma (f_{pp}/f_p), para o material cerâmico nos ensaios realizados e apresentados por Fernandes Neto (2020), referências para as modelagens do presente trabalho.

Tabela 2.3 – Eficiência experimental dos materiais cerâmicos.

Tipo de bloco	f_p/f_b	f_{pp}/f_b	f_{pp}/f_p
Unidades com paredes vazadas	0,58	0,32	0,54
Unidades com paredes maciças	0,82	0,37	0,45

f_{pp} = resistência à compressão de pequenas paredes de alvenaria.

f_p = resistência à compressão de prismas.

f_b = resistência à compressão de blocos

Fonte: Fernandes Neto (2020).

Internacionalmente, as normas vigentes estimam a resistência da alvenaria através de tabelas, ábacos e/ou equações que consideram as propriedades do bloco e da argamassa. Já no Brasil, são consideradas apenas as deformações últimas e a carga de ruptura, adotando coeficientes de minoração da resistência e coeficientes de majoração das ações solicitantes. Por exemplo, a ABNT NBR 15812-2 (ABNT, 2010b) define que a resistência característica à compressão simples da alvenaria constituída por blocos cerâmicos é cerca de 70% da resistência característica à compressão simples de prisma e 85% de pequena parede.

Apesar das normatizações, a ideia básica de um ensaio de compressão é a relação de quanto maior a altura do bloco em relação à espessura de junta, maior a resistência da parede, pois os blocos de menor altura permitem maior influência do confinamento produzido pelos pratos da máquina de ensaio (Nessralla, 2013).

Ademais, nas pesquisas de Santos (2008), observa-se que, em decorrência dos tipos de blocos aplicados na construção das paredes, a estrutura se comporta de maneira diferente quando submetida à compressão, pois cada unidade é diferente em forma, tamanho e material utilizado. Assim, a escolha do tipo de bloco e de sua geometria é de suma importância para a construção estrutural, justificando a necessidade de padronização desse elemento.

Para garantir que seja alcançada a resistência adequada para cada tipo de projeto, bem como a geometria do bloco, deve-se realizar um rígido controle de fabricação. Considerando que quanto à forma do bloco, este deve ser um prisma reto, conforme preconização da NBR 15270-2 (ABNT, 2005b), também outras normas definem ensaios específicos para blocos cerâmicos, os quais têm por objetivo determinar as características críticas da padronização.

Cada país possui uma extensa variedade de unidades e práticas de construção, segundo Page e Shrive (1988). Devido à variação em cada país, os métodos de ensaios variam conforme a norma a ser utilizada. Existem normas modernas que apresentam um detalhamento extenso, incluindo outras propriedades do bloco, como a norma britânica BS EN 771-1 (BSI, 2011), que detalha, por exemplo, a resistência à compressão e ao frio, a absorção de umidade, o conteúdo de sais solúveis e o grau de eflorescência, além do tipo de bloco. Sendo que o ensaio de resistência à compressão em estruturas possibilita o fornecimento da curva tensão-deformação específica.

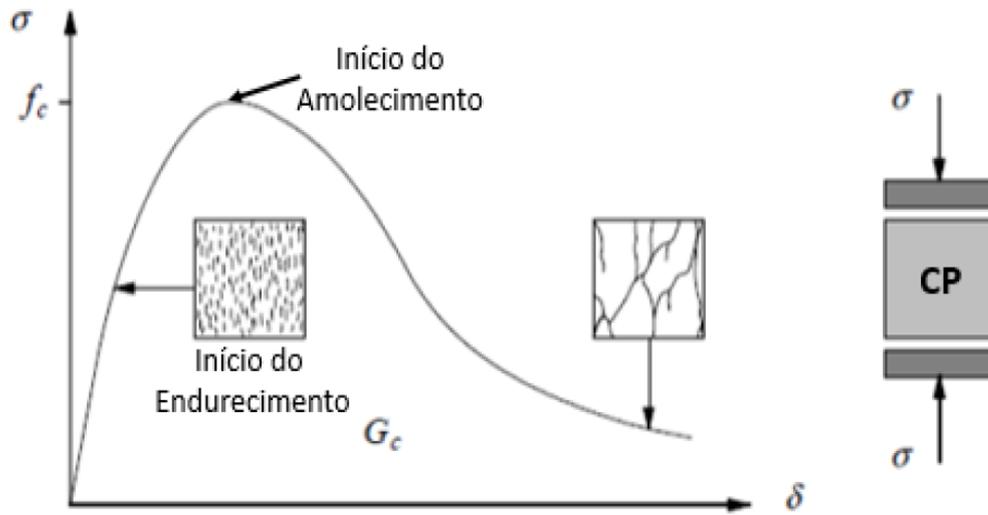
2.2.2 Curva tensão-deformação específica e módulo de elasticidade

Em termos de comportamento, um material é considerado frágil, quando há pouca ou nenhuma deformação até o momento em que ocorre a ruptura; ao passo que um material é visto como dúctil, quando há maiores deformações antes do rompimento. A representação gráfica do comportamento dúctil ou frágil do material submetido a um carregamento é a curva tensão-deformação específica (MACHADO, 2019).

Materiais que apresentam características intermediárias àquelas identificadas nas fraturas dúctil e frágil são denominados semifrágeis que, nos estudos apresentados em Lourenço (1996), referem-se à unidade e à argamassa. O gráfico de tensão-deformação (Figura 2.11) contribui para a visualização do comportamento característico desses materiais sob compressão.

Inicialmente, quando esses materiais são submetidos à tensão de compressão axial, verifica-se um comportamento elástico-linear, que é observado até o surgimento das primeiras microfissuras. Em seguida, ocorre o fenômeno do endurecimento (*hardening*), caracterizado pelo acréscimo da resistência com aumento contínuo das deformações, até a tensão limite de compressão do material (f_c) ser atingida. Nesse ponto, inicia-se o fenômeno de amolecimento (*softening*) do material, havendo o aumento do tamanho e do número de fissuras no material.

Figura 2.11 – Gráfico tensão-deformação típico de materiais semifrágéis.



Fonte: Ferreira (2017).

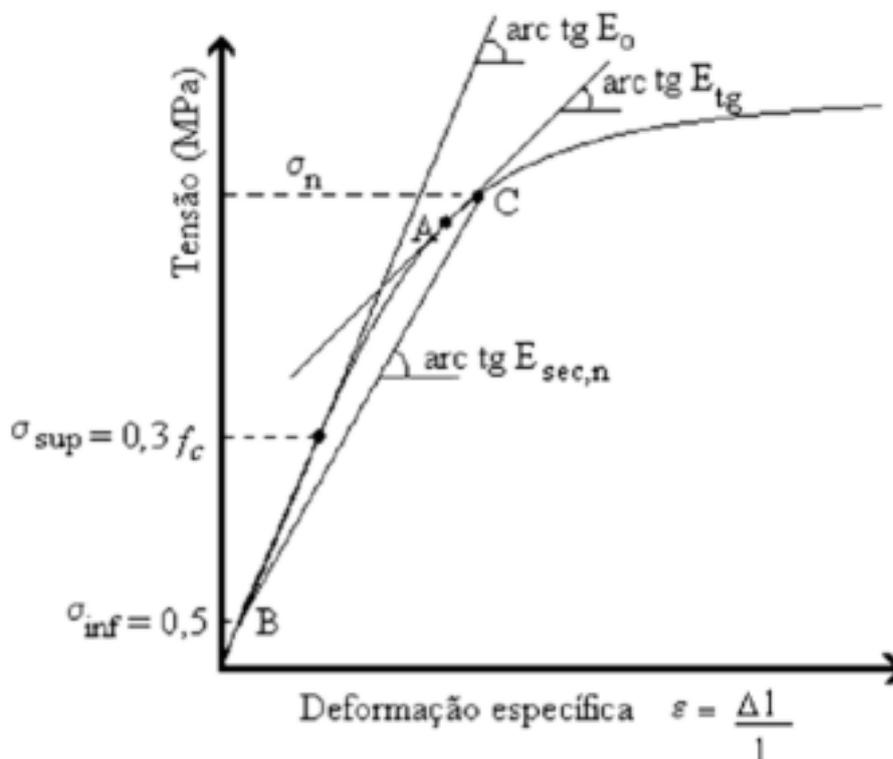
Esse fenômeno de amolecimento é caracterizado pelo decréscimo da resistência com aumento significativo das deformações. Sucede-se que a energia de fratura na compressão (G_c) pode ser obtida através do diagrama tensão-deformação em compressão por integração da curva do diagrama.

A ABNT NBR 8522-1 (ABNT, 2021), que rege o procedimento experimental da determinação do módulo de elasticidade do concreto, estabelece que, a partir de ensaios estáticos, é possível obter o módulo de elasticidade de deformação tangente inicial e de deformação secante, sendo que ambos podem variar de acordo com os locais da curva tensão-deformação considerados para sua determinação (Figura 2.12).

Segundo a norma, classificam-se os módulos de elasticidade em inicial, secante e tangente.

- Módulo de elasticidade inicial (E_0) é a inclinação da reta que passa pelo ponto com tensão igual a 0,5 MPa (σ_{inf}) e uma tensão correspondente a 0,3 da tensão de ruptura (σ_{sup}).
- Módulo de elasticidade secante (E_{sec}) é a declividade de uma reta traçada de um nível de tensão de 0,5 MPa e uma tensão qualquer (σ_n) entre 0,4 e 0,8 da tensão de ruptura.
- Módulo de elasticidade tangente (E_{tg}) é a declividade de uma reta tangente à curva em relação a qualquer ponto da mesma.

Figura 2.12 – Módulos de elasticidade estáticos do concreto.



Fonte: ABNT NBR 8522-1 (ABNT, 2021).

Em Cheema e Klingner (1986), verifica-se a estimativa de que o módulo de elasticidade secante da argamassa ($E_{a,s}$) e o módulo de elasticidade tangente da argamassa ($E_{a,tg}$) resultam, respectivamente, em 500 vezes e 1000 vezes a resistência à compressão da argamassa. Ao passo que, em Khalaf, Hendry e Fairbairn (1992), o módulo de elasticidade secante e o módulo de elasticidade tangente são, respectivamente, 340 vezes e 600 vezes a resistência à compressão da argamassa. As relações obtidas entre esses dois trabalhos não mostraram uma aproximação, pois Khalaf, Hendry e Fairbairn (1992) obtiveram valores de módulos de elasticidade cerca de 40% menores que Cheema e Klingner (1986).

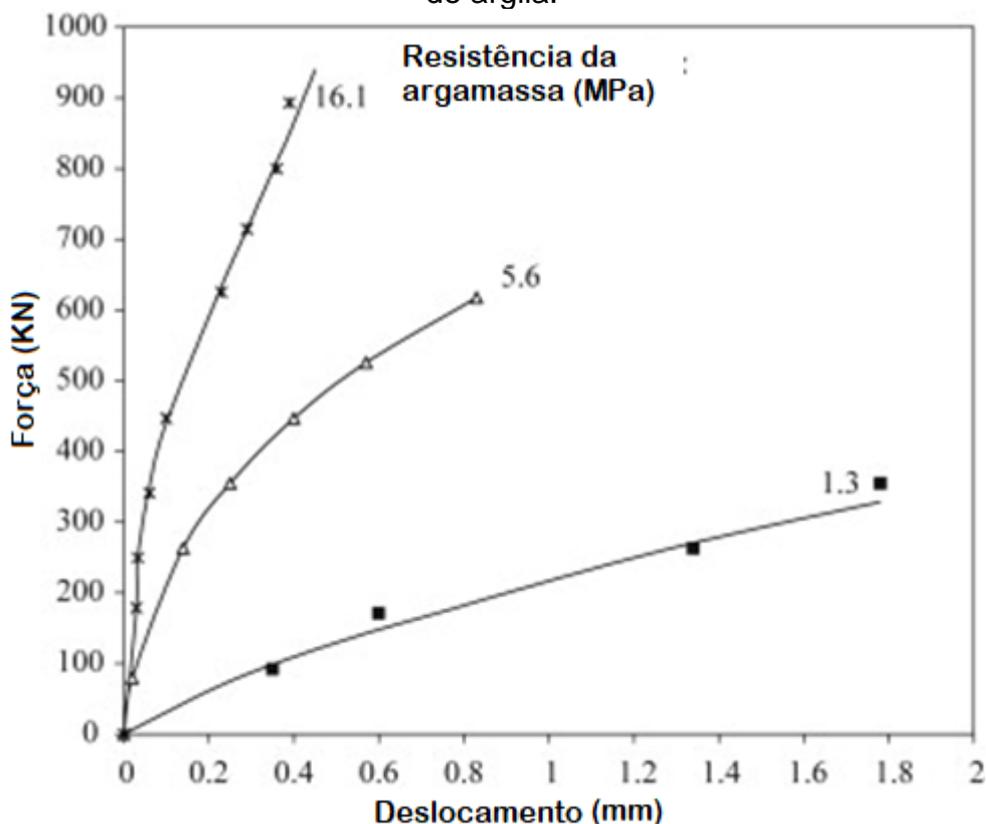
Para atender às especificações de serviço, o projetista de estruturas de alvenaria precisa conhecer o módulo de elasticidade, fluência, contração (ou expansão de umidade) e movimento térmico, de modo a estimar o movimento total dependente do tempo da alvenaria. O módulo de elasticidade, além de ser necessário para calcular a deformação elástica devido à primeira aplicação de carga, é utilizado para estimar a fluência decorrente de carga sustentada, uma vez que é expresso em guias de projeto em termos do coeficiente de fluência (razão de fluência para deformação elástica) ou um módulo efetivo (reduzido).

A relação entre o módulo de elasticidade e a resistência característica da alvenaria, que depende da resistência das unidades e da resistência da argamassa, tem sido estudada por diversos pesquisadores da área. No entanto, há pouca informação e orientação quanto à precisão do módulo de elasticidade estimado pelas normativas de projeto (Brooks, 2015).

Ao calcular o módulo de elasticidade da alvenaria, em Allen (1965,1966), encontram-se relações lineares de tensão-deformação para paredes, prismas e pilares, com relatos de linearidade até 17% da tensão última para prismas e pilares, mas até 50% para paredes.

Em Lenczner (1966), foram obtidas curvas “força *versus* deslocamento” para cubos de alvenaria, construídos com diferentes argamassas, e as curvas mostraram comportamento não linear inicialmente, seguido por comportamento linear até aproximadamente 50-80% da carga de falha (Figura 2.13). Justifica-se que parte da deformação era verdadeiramente elástica, pois era recuperável, e o restante sendo inelástico, devido ao fluxo viscoso da argamassa e os efeitos de assentamento.

Figura 2.13 – Curvas de força *versus* deslocamento para cubos de alvenaria de tijolo de argila.



Fonte: Adaptada de Lenczner (1966).

Em Fattal e Cattaneo (1976), também é descrita linearidade até 50% da carga última para pilares e paredes. Em Yokel, Mathey e Dikkers (1978), constatou-se que paredes vazadas de alvenaria de concreto exibiam comportamento linear até 80% da tensão de falha.

Após uma revisão abrangente da alvenaria em relação a espécimes robustos e esbeltos, e a partir de testes laboratoriais, em Edgell (1980), concluiu-se que toda alvenaria exibia um módulo de elasticidade continuamente decrescente até a tensão última.

Nos estudos de vários outros pesquisadores, distinguem-se formas lineares-parabólicas da curva de tensão-deformação ao investigar a influência de vários fatores na elasticidade da alvenaria, como

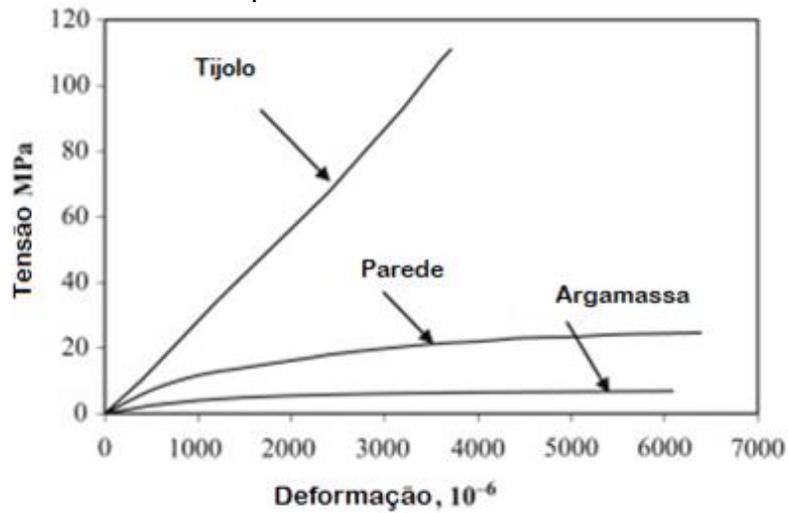
- tamanho da unidade (Base; Baker, 1973);
- resistência da unidade (Fisher, 1973);
- carregamento biaxial (Dhanasekar; Kleeman; Page, 1985);
- tipo de argamassa (Ameny; Loov; Jessop, 1980) e
- tipo de unidade (Ameny; Loov; Shrive, 1983).

Em Fortes *et al.* (2017), foram testadas diferentes configurações de paredes e prismas de blocos de concreto de alta resistência à compressão, variando a resistência dos blocos e da argamassa. Através dos gráficos tensão-deformação, aponta-se que houve falha rúptil de todas as paredes com deformações de ruptura incluindo valores entre 0,10 e 0,15% em compressão simples.

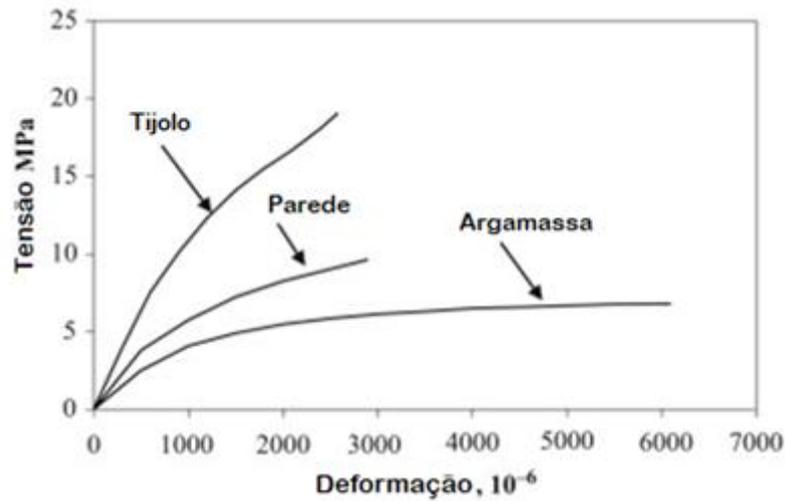
Em Mohamad *et al.* (2017), foi desenvolvido um procedimento experimental que combinava blocos estruturais de alta resistência e três traços de argamassa. O estudo mostrou que o comportamento não linear da curva tensão-deformação para prismas feitos com argamassas de menor resistência parte de um limite muito inferior ao de prismas feitos com argamassas de maior resistência.

Na Figura 2.14, apresenta-se o comportamento típico de tensão-deformação até a falha de três tipos de alvenaria, juntamente com o comportamento correspondente de amostras desvinculadas da unidade e argamassa, a partir das quais a parede de alvenaria foi construída.

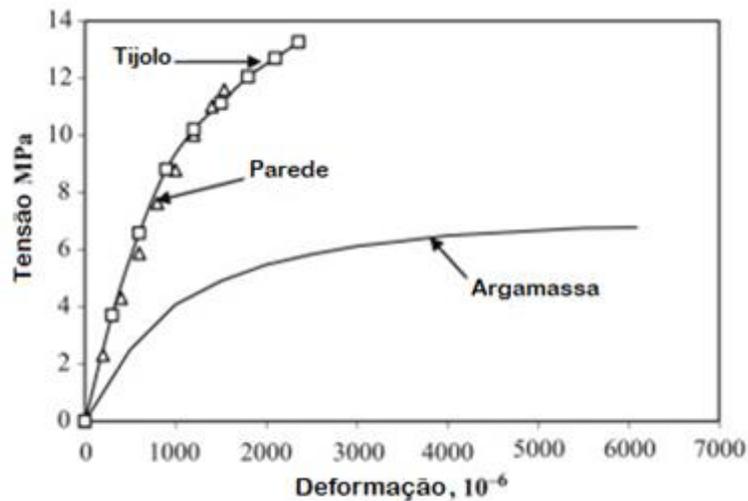
Figura 2.14 – Comportamento tensão x deformação da unidade, argamassa e parede de alvenaria.



(a) Tijolo de cerâmica.



(b) Tijolo de silicato de cálcio.



(c) Bloco de concreto.

Fonte: Adaptada de Amjad (1990).

Em todos os casos, as curvas de tensão-deformação da alvenaria são não lineares, mesmo para alvenaria cerâmica, construída a partir de tijolos, que por si só exibe linearidade de tensão-deformação até a falha (Figura 2.14a). Em Brooks (2015), entende-se que o comportamento não linear de tensão-deformação da alvenaria resulta do comportamento correspondente da argamassa.

Nos casos de alvenaria de tijolo de silicato de cálcio (Figura 2.14b) e alvenaria de blocos de concreto (Figura 2.14c), as características não lineares de tensão-deformação, tanto das unidades quanto da argamassa, contribuem para a não linearidade de tensão e deformação da alvenaria.

Além disso, em Brooks (2015), propõe-se que outra possível fonte de não linearidade seja a presença de interfaces ou zona de transição na ligação unidade/argamassa, em que material fraco e microfissuras existem como resultado da transferência de umidade da argamassa para a unidade e vice-versa. Sob compressão, o material fraco e as microfissuras contraem mais do que o material circundante mais rígido, causando um aumento maior na deformação do que na tensão.

Observa-se também que, enquanto o comportamento de tensão-deformação da alvenaria de tijolo de argila e silicato de cálcio está entre as curvas para a unidade e a argamassa, a curva de tensão-deformação da parede de alvenaria (Figura 2.14c) praticamente coincide com a do bloco de concreto, pois cerca de 95% da parede avaliada consiste em blocos e há apenas uma pequena contribuição da junta de argamassa (Brooks, 2015).

Assim, compreende-se que a alvenaria pode ser classificada na mesma categoria que o concreto em relação ao comportamento tensão-deformação, ou seja, uma relação não linear e não elástica. Portanto, o parâmetro apropriado para expressar o quociente de tensão e deformação é o módulo de elasticidade secante, que varia de acordo com o nível de estresse.

No entanto, no caso de níveis baixos de tensão, por exemplo, 1–3 MPa, esses se aplicam à parte inicial das curvas completas de tensão-deformação, em que a não linearidade é pequena, e há pouca diferença entre os módulos tangente inicial e secante.

Em Brooks (2015), também se conclui que os dois dos principais fatores que influenciam o módulo de elasticidade da alvenaria são o tipo de argamassa e o tipo de unidade para os quais foram desenvolvidas relações lineares entre módulo e

resistência, embora haja uma dispersão apreciável nos dados de teste. Enquanto o módulo de elasticidade de tijolos de silicato de cálcio e blocos de concreto maciço é virtualmente isotrópico, o módulo de elasticidade de tijolos de argila pode ser significativamente anisotrópico, devido ao processo de fabricação e à presença de vazados e perfurações.

Portanto, esses estudos validam a importância e a necessidade de se parametrizar as características dos elementos para a melhor compreensão do comportamento da estrutura e possíveis relações entre elas. Importa notar também, conseqüentemente, o quanto esses elementos suportam tensões até a situação crítica de ruptura da alvenaria.

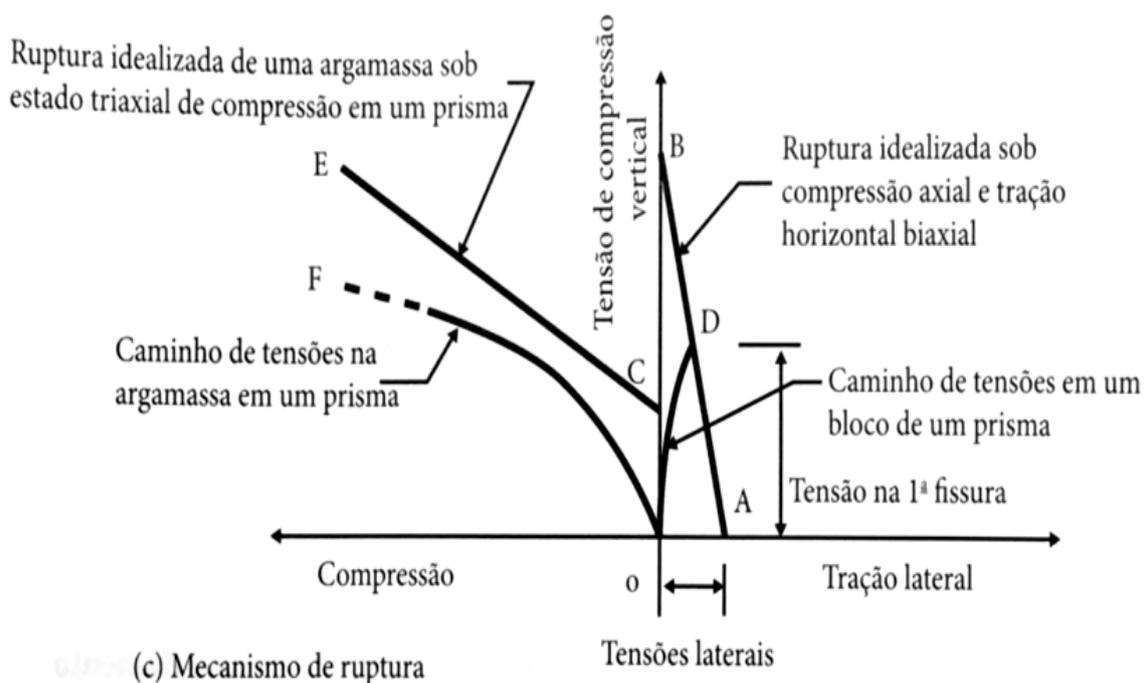
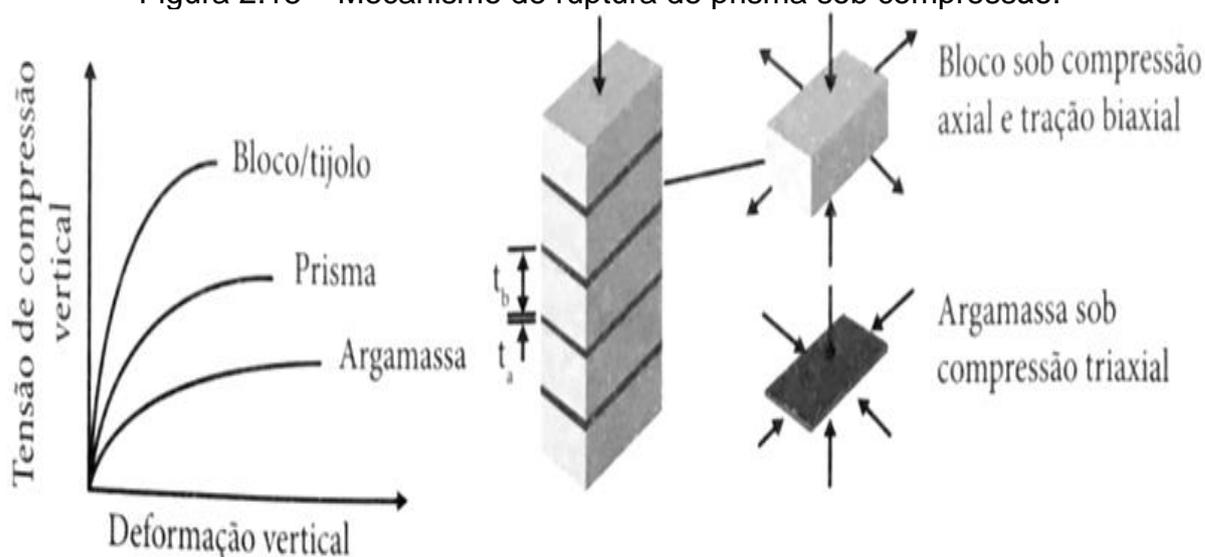
2.2.3 *Envoltória de ruptura da alvenaria*

Na tentativa de explicar o mecanismo de ruptura e prever a resistência à compressão da alvenaria, vários modelos foram apresentados, ao longo do tempo. O mais aceito, válido para os modelos em que a resistência da argamassa é inferior à dos blocos, a ruptura ocorre por tração próxima à junta (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014). Nos casos em que a resistência da argamassa é superior à dos blocos, temos formas de ruptura diferentes, por esmagamento à compressão do bloco, porém este uso não é recomendado (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014) e não é escrutinado neste trabalho.

Para prismas com argamassa em toda face de assentamento, sua resistência à compressão é maior que a da argamassa e menor que a do bloco, como é apresentado na Figura 2.15a. O que pode ser explicado pela variação das propriedades de cada material, uma vez que a argamassa sob compressão é mais deformável e/ou menos resistente que o bloco e tende a apresentar maior expansão lateral que o bloco sob as mesmas tensões.

Em consequência disso, conforme Figura 2.15b, sendo o bloco de elevado módulo de elasticidade quando comparado com a argamassa, há a restrição à expansão da massa de cimento, gerando um confinamento nesse material e um estado triaxial de compressão. Conseqüentemente, a argamassa apresenta uma resistência superior àquela encontrada nos ensaios de caracterização.

Figura 2.15 – Mecanismo de ruptura de prisma sob compressão.



- A = Resistência de tração simples do bloco
- B = Resistência de compressão simples do bloco
- C = Resistência de compressão simples da argamassa
- D = Fissuração vertical no bloco

Fonte: Parsekian, Hamid e Drysdale (2014).

A curva CE, na Figura 2.15c, retrata que, na ruptura idealizada de uma argamassa sob estado triaxial de compressão em um prisma, esta suporta uma tensão de ruptura (E) bem maior que a obtida experimentalmente para compressão simples (C) do material isolado.

Para manter o equilíbrio, o bloco fica submetido a tensões horizontais de tração advindas do confinamento da argamassa próximo às juntas. A curva OD, na Figura 2.15c, mostra o aumento da tração horizontal biaxial no bloco. Quando a combinação compressão e tração no bloco atinge o limite de resistência apresentado pela curva AB, representado pelo ponto D, fissuras verticais surgem nos blocos. Destaca-se que, nesse momento, a argamassa não sofre ruptura, pois a curva de tensões a que é submetida (curva OF) não atingiu o limite de tensões estabelecido pela curva CE.

Alguns modelos matemáticos e opiniões divergem da teoria acerca da magnitude da influência advinda da tração horizontal, na junta de argamassa, na ruptura. Em Shrive (1983), por exemplo, faz-se conhecer que fissuras nos blocos podem ser iniciadas antes de atingir a curva de ruptura deste material, devido aos defeitos nos blocos. Contudo, independente do modelo adotado, o desenvolvimento de fissuras verticais é um fenômeno presente nesse tipo de estrutura.

A ocorrência de fissuras, em cargas significativamente abaixo da resistência esperada do prisma, sugere que cada segmento da coluna vertical formada pelas fissuras possui uma resistência própria. Para que ocorra a ruptura final do prisma, é necessário que se estabeleça uma combinação crítica dessas fissuras. A diferença na resistência entre o bloco e o prisma é particularmente acentuada em unidades maciças, como tijolos, e essa diferença tende a aumentar, conforme a relação entre a altura do bloco e a espessura da junta de argamassa diminui. Em outras palavras, a resistência do prisma diminui, à medida que a quantidade de argamassa do conjunto aumenta, seja pelo aumento da espessura da junta de argamassamento ou pelo uso de tijolos maciços (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014).

De acordo com Hendry, Sinha e Davies (2004), a partir de testes de compressão em alvenaria e testes padrão associados em seus componentes, três pontos importantes podem ser observados. O primeiro, a constatação de que a alvenaria carregada em compressão uniforme falha pelo desenvolvimento de rachaduras de tensão paralelas ao eixo de carga ou por um tipo de falha de cisalhamento ao longo de certas linhas de fraqueza. O modo de falha correlaciona-se com o fato de a argamassa ser mais fraca ou mais forte em relação às unidades.

O segundo ponto importante é a observação de que a resistência da alvenaria à compressão é menor do que a resistência nominal à compressão das unidades, conforme teste de compressão padrão. Por outro lado, a resistência da alvenaria pode

exceder em muito a resistência ao esmagamento (obtida pelo teste padrão britânico em corpos de prova cúbicos) da argamassa presente na estrutura.

Por fim, o terceiro, a demonstração de que a resistência à compressão da alvenaria varia aproximadamente como a raiz quadrada da resistência ao esmagamento da unidade nominal e como a terceira ou quarta raiz da resistência do cubo da argamassa.

A partir dessas observações, pode-se deduzir que

- as tensões de tração secundárias que causam o tipo de falha por rachadura resultam da deformação contida da argamassa nas juntas da alvenaria;
- a resistência aparente ao esmagamento da unidade em um teste padrão não é uma medida direta da resistência da unidade na alvenaria, pois o modo de falha é diferente nas duas situações;
- a argamassa suporta tensões compressivas mais altas em uma junta de alvenaria, devido à restrição lateral de sua deformação a partir da unidade.

Em consequência, várias teorias sobre a resistência à compressão da alvenaria foram propostas com base na equação das tensões laterais na unidade e na argamassa em sua interface e em uma tensão de tração limite assumida na unidade. Outras teorias foram baseadas na medição de testes de resistência biaxial e triaxial em materiais. Mas, em ambas as abordagens, as dificuldades de determinar as propriedades necessárias dos materiais impediram seu uso prático, e, para fins de projeto, a confiança continua a ser colocada em relações empíricas entre as resistências da unidade, da argamassa e da alvenaria.

Em modelos experimentais, de acordo com Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), prismas com baixa relação de altura/espessura (menor que 2:1) tendem a ter ruptura cônica de cisalhamento-compressão, podendo ser explicada dado o efeito de confinamento causado pelo atrito com as placas de aplicação de carregamento superior e inferior. Porém a ruptura é dada por fissuras verticais distribuídas nos blocos, em prismas com altura suficiente para reduzir o efeito das placas de extremidade, que é observado em prismas de baixa altura em que se elimina o efeito de confinamento (uso de placas tipo “escova de aço”, por exemplo), bem como em pequenas paredes e paredes em escala natural.

Assim, em Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), indica-se a configuração de prismas com pelo menos 4 fiadas para blocos e 5 fiadas para tijolos, no desenvolvimento de novos produtos ou pesquisa, uma vez que são elementos

suficientemente curtos para evitar o efeito da esbeltez, porém comprimidos o suficiente para não serem influenciados pelo efeito de confinamento das placas de aplicação de cargas em suas extremidades. No entanto, os autores afirmam que uma melhor obtenção de resultados se dá pelo ensaio de pequenas paredes de dois blocos de comprimento e cinco fiadas de altura, como prescrito na ABNT NBR 15812-2 (ABNT, 2010b).

3 ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A segurança estrutural em projetos de edificações é de extrema importância, não apenas para proteger a integridade física das pessoas, mas também para salvaguardar o patrimônio e promover a sustentabilidade. Quando se trata de segurança contra incêndios, é crucial que o projeto das edificações seja capaz de resistir a altas temperaturas.

No contexto das estruturas de alvenaria, a resistência ao fogo é influenciada por vários fatores interligados. O tipo de material utilizado, como tijolos cerâmicos ou blocos de concreto, determina a capacidade da estrutura de resistir a temperaturas elevadas. Materiais com alta resistência ao fogo ajudam a manter a integridade da estrutura durante um incêndio. Além disso, a espessura das paredes desempenha um papel significativo, oferecendo uma barreira mais robusta contra o calor (isolamento térmico) e contribuindo para a resistência geral ao fogo.

A qualidade e a espessura das juntas de argamassa entre os blocos ou tijolos também são fundamentais. Juntas bem executadas ajudam a prevenir a propagação do calor (estanqueidade) e protegem a estrutura de alvenaria contra o impacto térmico. Outro fator importante é a geometria da parede, incluindo sua forma e a presença de aberturas como janelas e portas, que afetam a maneira como a estrutura responde ao fogo. Um dimensionamento e detalhamento cuidadosos podem ajudar na dissipação eficiente do calor, enquanto a instalação adequada de elementos de vedação e o controle da ventilação são essenciais para minimizar os impactos do incêndio.

Além dos aspectos estruturais, a introdução de materiais isolantes térmicos, como lã de rocha ou lã de vidro, pode melhorar significativamente a resistência ao fogo. Revestimentos intumescentes, que se expandem com o calor, formam uma camada protetora que retarda a transferência de calor para a parede, fortalecendo a resistência ao fogo. Dessa forma, a resistência ao fogo de paredes de alvenaria resulta de uma combinação complexa de materiais, espessura das paredes, qualidade das juntas e estratégias de isolamento térmico e controle de ventilação. A integração desses fatores é fundamental para garantir a segurança e a integridade das estruturas em situações de incêndio.

3.1 O Incêndio - algumas definições e modelos utilizados

A norma brasileira ABNT NBR 13860 (ABNT, 1997) define o fogo como “processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz”. Assim, fogo é “uma reação química, denominada combustão, que é uma oxidação rápida entre o material combustível, sólido, líquido ou gasoso, e o oxigênio do ar, provocada por uma fonte de calor que gera luz e calor” (Brentano, 2004)

Uma estrutura em situação de incêndio gera o aumento de temperatura nos elementos estruturais, o que acarreta redução da capacidade resistente dos seus materiais constituintes e, se deformações térmicas são impedidas, causa-se, ainda, o aparecimento de esforços adicionais (Vargas; Silva, 2003).

Na análise de estruturas, em Silva (1997), o principal parâmetro de um incêndio é a curva, que apresenta a temperatura dos gases em função do tempo de incêndio, uma vez que possibilita a determinação da temperatura máxima das peças estruturais e, a partir dela, as variações das capacidades resistentes para cada temperatura. Na busca de uma representação do comportamento desse fenômeno, modelos de incêndio foram propostos.

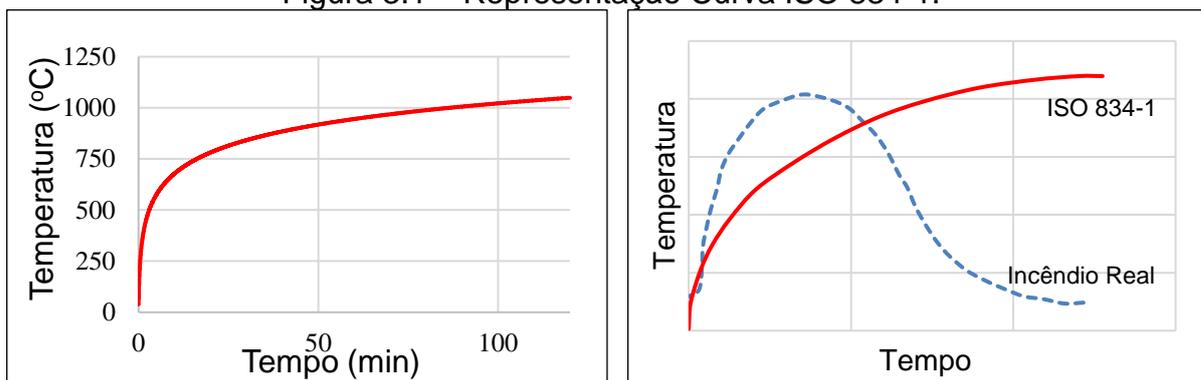
No presente trabalho, foca-se na análise por modelos de temperatura e calor, para a melhor compreensão do comportamento termomecânico das estruturas em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Nesta metodologia, o incêndio é modelado e caracterizado através de curvas que representam a variação de temperatura em função do tempo de duração do incêndio, permitindo, assim, estimar os valores máximos de temperatura dos gases no ambiente em chamas.

A curva-padrão da ISO 834-1 (ISO, 1999), apresentada na Figura 3.1a, é amplamente adotada pela comunidade científica e recomenda a relação temperatura-tempo conforme Equação 2. Uma comparação qualitativa entre as curvas temperatura-tempo do incêndio real e a ISO 834 é apresentada na Figura 3.1b.

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (2)$$

Em relação à Equação 2, θ_g é a temperatura dos gases no instante t (em °C), θ_0 é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento (tomada igual a 20°C) e t é o tempo, em minutos.

Figura 3.1 – Representação Curva ISO 834-1.



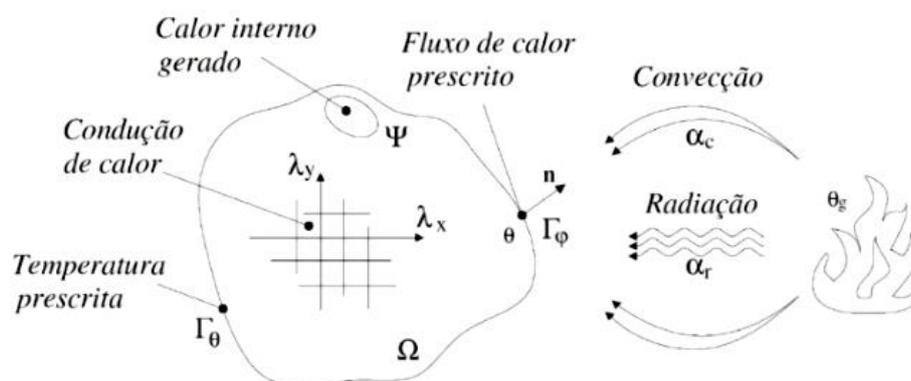
(a) Curva ISO 834-1 em °C.

(b) Comparação entre a curva ISO 834-1 e o modelo de incêndio real.

Fonte: Adaptada de ISO (1999) e Vargas e Silva (2003).

Assim, uma vez determinada a temperatura dos gases, parte-se para a determinação da transferência de calor para a estrutura analisada, que é dada por três mecanismos básicos: condução, convecção e radiação. De acordo com Caldas (2008), a transmissão de calor é dada por condução no interior de um sólido, por convecção e por radiação a partir de um sólido (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Transferência de calor em um sólido.



Fonte: Caldas (2008).

A condução, segundo Santos (2014), é “o processo de transferência de calor de regiões com maior energia cinética média molecular para regiões de menor energia por meio de colisões moleculares, sem movimento macroscópico de matéria”, gerando no material um fluxo de calor ao longo de sua espessura, no caso de paredes de alvenaria, que é constituída por camadas, o fluxo de calor atravessa da face mais aquecida para a de menor temperatura.

Uma vez que a condução é um mecanismo de transferência de calor dependente do meio sólido, a direção do fluxo de calor e a taxa de aquecimento são influenciadas pelas propriedades mecânicas e térmicas dos materiais constituintes da estrutura. Em destaque, temos as seguintes propriedades (Dupim, 2019):

- calor específico (c_p), que é variação térmica de determinada substância ao receber determinada quantidade de calor, medida como a quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura da unidade de massa do material;
- condutividade térmica (λ), que representa a habilidade dos materiais de conduzir energia térmica, quantificada como a taxa de calor transferido através da unidade de espessura do material para uma unidade de temperatura;
- densidade (ρ), que relaciona a quantidade de massa do material por unidade de volume.

No caso da alvenaria estrutural, como os blocos são vazados, a transferência de calor, além de passar ao longo da espessura, dá-se por convecção e radiação no interior dos vazados e nas superfícies expostas aos gases.

Em geral, é possível observar uma correlação significativa entre a massa específica dos materiais e sua condutividade térmica. A teoria proposta por Rigão (2012) sustenta que essa relação é intrinsecamente vinculada à compacidade da microestrutura do material em questão. À medida que a massa específica aumenta, a redução na presença de vazios na estrutura resulta em uma notável ampliação da capacidade de condução de calor do material.

Além disso, de acordo com as contribuições de Stancato (2000), a umidade emerge como outra variável preponderante na determinação da condutividade térmica. A presença de água nos poros do material desempenha um papel crucial, intensificando a capacidade intrínseca do material em conduzir calor. Isso se deve ao fato de que a condutividade térmica da água supera substancialmente a do ar, apresentando valores de 0,6 W/(m.K) e 0,025 W/(m.K), respectivamente.

A convecção, de acordo com Wang (2002) e Caldas (2008), representa a transferência de calor que ocorre na interface de um fluido e uma superfície sólida, devido ao movimento desse fluido. Em um compartimento incendiado, por exemplo, têm-se correntes de convecção de velocidades altas e direções aleatórias causadas pelo aumento de volume proporcionado pela combustão.

Assim, a transferência de calor por convecção se dá através dos gases presentes no entorno e nos vazados do bloco, podendo ser convecção forçada ou natural, relativas ao modo de movimentação do fluido. A convecção natural parte das diferenças de densidade nos gases ocorridas devido a gradientes de temperatura. Aquecendo-se uma porção do fluido, este sofre expansão e tem sua densidade diminuída, elevando-se e tendo sua posição ocupada por uma porção menos aquecida, a repetição desse processo gera as correntes convectivas. Por outro lado, a convecção forçada ocorre em razão da movimentação mecânica de origem externa ao fluido como, por exemplo, um ventilador ou um exaustor (Dupim, 2019).

A transferência de calor por convecção é um fenômeno complexo que é influenciado por vários fatores intrínsecos ao fluido e à superfície envolvida. Em Drysdale (1998), destaca-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção é suscetível a variações significativas, sendo influenciado por diversos fatores, tais como a condutividade térmica, viscosidade e densidade do fluido, a natureza do fluxo (convecção forçada ou natural) e a geometria da superfície em questão. Em situações de convecção natural, ressalta-se que o valor do coeficiente de transferência de calor (h) normalmente varia entre 5 e 25 W/(m².K).

A condutividade térmica do fluido desempenha um papel crucial, pois determina a eficiência global do processo. Fluidos com maior condutividade térmica tendem a transferir calor mais eficientemente, impactando diretamente na taxa de transferência de calor por convecção. A viscosidade do fluido, que se refere à sua resistência ao fluxo, também é um fator relevante. Fluidos mais viscosos podem apresentar uma camada limite térmica mais espessa ao redor de superfícies sólidas, influenciando a dinâmica do fluxo e, conseqüentemente, a eficiência da transferência de calor por convecção.

Além disso, a densidade do fluido desempenha um papel significativo. Mudanças na densidade podem alterar a circulação do fluido, impactando diretamente na transferência de calor. Fluidos menos densos podem favorecer movimentos ascendentes em convecção natural, enquanto fluidos mais densos podem induzir uma convecção mais forçada.

Bem como, a geometria da superfície exerce influência na distribuição do fluxo de calor. Superfícies com formas específicas podem favorecer a formação de regiões de recirculação, afetando a transferência de calor. Áreas de alta rugosidade também podem alterar a camada limite térmica e, conseqüentemente, a eficiência da

convecção. Em conjunto, esses fatores interagem de maneira intrincada, exigindo estudos detalhados para compreender e otimizar os processos de transferência de calor por convecção em diferentes contextos.

Por fim, pela radiação, a energia térmica é transmitida por ondas eletromagnéticas, como a luz solar, que podem ser absorvidas, transmitidas ou refletidas pelas superfícies (Caldas, 2008). E, em oposição ao funcionamento dos mecanismos da condução e da convecção, a radiação não necessita da existência de um meio condutor entre a fonte de calor e o receptor.

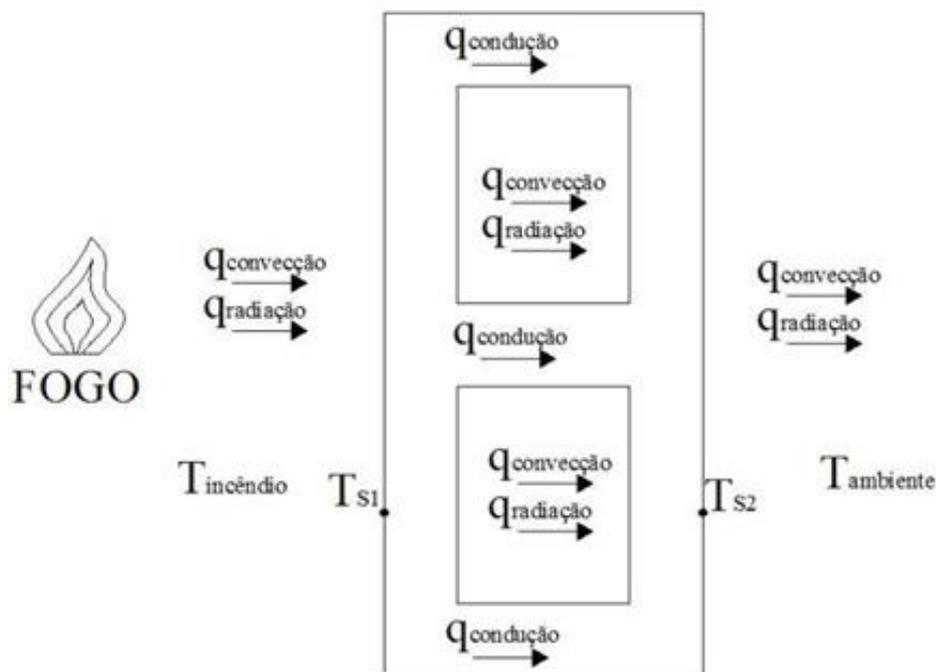
Na situação de incêndio, a radiação pode ser destacada na transferência de calor das chamas para as superfícies combustíveis, nos vazados das estruturas, de um edifício em chamas para construções adjacentes, bem como, da fumaça quente para os elementos da edificação (Buchanan, 2002).

De acordo com Dupim (2019), investigações científicas destacam que, dentro da faixa de temperaturas compreendida entre 150 e 200°C, a convecção assume um papel predominante na dinâmica térmica de um corpo. Entretanto, à medida que a temperatura transcende a marca de 400°C, a radiação emerge como o mecanismo preponderante de transferência de calor, consolidando-se como o principal condutor térmico. É notável observar que a partir dos 550°C, o corpo passa a emitir radiação em uma quantidade suficiente para resultar em um brilho avermelhado visível, marcando um ponto de transição significativo no comportamento térmico do material.

No decorrer do processo de aquecimento de um corpo, é importante notar que uma parcela do calor é dissipada tanto por convecção, quando em contato com um fluido circundante, quanto por radiação. A magnitude dessas perdas térmicas é regida pelo coeficiente de transferência de calor por convecção, que descreve a eficiência da transferência de calor para o fluido circundante e pelo valor da emissividade. Este último é um parâmetro intrinsecamente associado à capacidade do corpo em irradiar energia térmica, sendo determinante na quantidade de radiação térmica emitida, indicando a eficiência que uma superfície emite radiação, com valores variando entre zero e um. De acordo com Buchanan (2002), na situação de incêndio, a maioria das superfícies aquecidas, chamas e partículas de fumaça, possuem emissividade entre 0,7 e 1,0.

Na Figura 3.3, apresenta-se um esquema dos mecanismos de transferência de calor em um bloco vazado, com apenas uma face submetida à variação de temperatura advinda de um incêndio compartimentado.

Figura 3.3 – Transferência de calor em bloco vazado submetido a incêndio compartimentado.



Fonte: Adaptada de Rosemann (2011).

Assim, a compreensão aprofundada desses fenômenos torna-se essencial para a análise precisa e a previsão do comportamento térmico de materiais em diferentes condições de temperatura. Ademais, conforme afirmado por Wang (2002) e corroborado por Caldas (2008), a aplicação de soluções analíticas para problemas de transferência de calor frequentemente encontra sua aplicabilidade restrita a casos mais simplificados. Dessa forma, em contextos que envolvem a análise de cenários de incêndio em estruturas, a abordagem experimental ou numérica emerge como a escolha predominante. Dada a natureza custosa e altamente específica dos experimentos, a análise numérica emerge como a metodologia predominantemente adotada, destacando-se como o método escolhido para este estudo.

3.2 Critérios normativos para alvenaria em situação de incêndio

Hoje, a ABNT conta com diversas normas relacionadas à segurança estrutural em incêndio, algumas elencadas a seguir:

- ABNT NBR 15200:2024 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio;

- ABNT NBR 10636-2:2023 – Componentes construtivos não estruturais - Ensaio de resistência ao fogo - Parte 2: Forros;
- ABNT NBR 10636-1:2022 – Componentes construtivos não estruturais - Ensaio de resistência ao fogo - Parte 1: Paredes e divisórias de compartimentação;
- ABNT NBR 5628:2022 – Componentes construtivos estruturais - Ensaio de resistência ao fogo;
- ABNT NBR 16945:2021 – Classificação da resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações;
- ABNT NBR 14323:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio;
- ABNT NBR 14432:2001 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento.

Um parâmetro essencial para o dimensionamento é a resistência ao fogo de uma estrutura, que se refere ao tempo em que a estrutura é capaz de oferecer resistência adequada às solicitações para as quais ela foi projetada na situação de incêndio. A norma nacional de segurança contra incêndio ABNT NBR 14432 (ABNT, 2001) define o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) das paredes e elementos de vedação, tendo como parâmetros o tipo de edificação, área, altura, profundidade do subsolo e facilidade de acesso para combate ao fogo.

O TRRF é definido para garantir a fuga dos ocupantes em segurança, bem como a segurança das equipes de combate ao incêndio e minimizar danos às edificações adjacentes.

Edificações que não se enquadram nas condições de isenção estabelecidas pela ABNT NBR 14432 (ABNT, 2001) necessitam de verificação quanto aos requisitos de resistência ao fogo. Em geral, essas atendem a pelo menos uma das seguintes condições:

- área total superior a 750 m², pois a isenção se aplica apenas para áreas menores ou iguais a esse valor;
- possuem até dois pavimentos com área total superior a 1.500 m² e/ou carga de incêndio específica maior que 1.000 MJ/m²;
- fora das divisões F-3, F-4 e F-7 das classes P₁ a P₃ ou G-1 e G-2 das classes P₁ a P₄, a menos que se enquadrem nas condições específicas

mencionadas na norma. Ou fora das divisões J1 das classes P₁ a P₄ com estrutura diferente das especificadas (concreto armado, protendido ou aço);

- térreas que possuem coberturas que funcionam como piso; que têm estruturas essenciais para a estabilidade de elementos de compartimentação; que não são utilizadas para fins industriais, mas têm carga de incêndio específica superior a 500 MJ/m² (exceto depósitos); ou que são utilizadas para fins industriais e têm carga de incêndio específica superior a 1.200 MJ/m². Também se incluem aquelas utilizadas como depósitos, com carga de incêndio específica superior a 2.000 MJ/m². Nos últimos três casos mencionados, podem ser aplicadas condições adicionais de isenção, como a instalação de chuveiros automáticos ou a presença de uma área total superior a 5.000 m², quando não houver fachadas de aproximação apropriadas.

Portanto, qualquer edificação que não se encaixe em um dos critérios de isenção definidos pela norma, além das especificações regionais do corpo de bombeiros, deve passar por uma análise detalhada dos requisitos de resistência ao fogo para garantir a segurança adequada.

Mesmo possuindo uma norma que estabelece critérios para o tempo requerido de resistência ao fogo, o Brasil não possui uma regulamentação nacional que determina o dimensionamento de estruturas de alvenaria estrutural em situação de incêndio, contudo, um comitê foi criado para atender à demanda, destacando a importância do tema.

Uma referência nacional para a normatização de estruturas em elevadas temperaturas é a Instrução Técnica 08/2018 (IT-08) do Corpo de Bombeiros de São Paulo (São Paulo, 2018), a qual utiliza o TRRF para a definição dos níveis de proteção dos elementos estruturais, de vedação e de compartimentação das edificações. Em seu anexo B, têm-se os resultados de alguns ensaios realizados com diferentes alvenarias não estruturais, mostrando a resistência destas pelos critérios de integridade (mecânica), estanqueidade e isolamento térmico, bem como sua resistência ao fogo, como mostrado no Quadro 3.1.

Observa-se que para o material cerâmico sem função estrutural não houve falha em nenhum dos quesitos analisados durante o ensaio e obteve resistência ao fogo superior a 4 horas.

Quadro 3.1 – Resultados de ensaios de alvenaria IT 08/2018.

Paredes ensaiadas (*)		Resultado dos ensaios				
		Duração do ensaio (min)	Tempo de atendimento aos critérios de avaliação (horas)			Resistência ao fogo (horas)
			Integridade	Estanqueidade	Isolação térmica	
Parede de blocos vazados de concreto (2 furos) blocos com dimensões nominais: 14 cm x 19 cm x 39 cm e 19 cm x 19 cm x 39 cm; e massas de 13 kg e 17 kg respectivamente	Bloco de 14 cm sem revestimento	100	≥ 1½	≥ 1½	1½	1½
	Bloco de 19 cm sem revestimento	120	≥ 2	≥ 2	1½	1½
	Bloco de 14 cm com revestimento	150	≥ 2	≥ 2	2	2
	Bloco de 19 cm com revestimento	185	≥ 3	≥ 3	3	3
Paredes de tijolos cerâmicos de 8 furos (dimensões nominais dos tijolos 10 cm x 20 cm x 20 cm (massa 2,9 Kg)	Meio tijolo com revestimento	150	≥ 2	≥ 2	2	2
	Um tijolo com revestimento	300 (**)	≥ 4	≥ 4	≥ 4	> 4

(*) Paredes sem função estrutural ensaiadas totalmente vinculadas dentro da estrutura de concreto armado, com dimensões 2,8m x 2,8m totalmente expostas ao fogo (em uma face);

(**) Ensaio encerrado sem ocorrência de falência em nenhum dos 3 critérios de avaliação.

Fonte: Adaptada de São Paulo (2018).

Internacionalmente, no caso da alvenaria estrutural, o Eurocode 6 (CEN, 2005b) define alguns critérios de resistência de acordo com a sua finalidade.

- Isolamento térmico (I): é atendido quando, em qualquer ponto da superfície não exposta ao fogo, a variação de temperatura não exceda 180°C e a variação de temperatura média nesta mesma superfície não exceda 140°C.
- Resistência mecânica (R): é satisfeito quando a função de suporte de carga é mantida na exposição ao fogo durante um determinado intervalo de tempo.

- Estanqueidade (E): é atingido quando não ocorrem rachaduras ou aberturas que permitam a passagem de chamas e gases através do elemento.
- Impacto mecânico (M): é respeitado quando um elemento de separação vertical resiste a uma carga concentrada horizontal de características especificadas em EN 1363-2 (CEN, 1999).

Algumas normas internacionais contam com procedimentos para dimensionamento de estruturas de alvenaria estrutural em situação de incêndio, mas há uma grande variabilidade dos materiais utilizados na construção, devido ao local em que se executa a edificação (Izquierdo, 2015), o que demanda cautela por parte dos projetistas.

Diante do exposto, uma vez que a eficácia da resistência ao fogo na alvenaria estrutural está intrinsecamente vinculada ao desempenho singular e coletivo de seus diversos componentes, torna-se imperativo aprofundar a investigação e compreensão das propriedades térmicas e mecânicas dos materiais brasileiros, levando em consideração a extensa faixa de temperaturas envolvidas e os efeitos resultantes da aplicação de carregamentos sob tais condições (Leite, 2018).

No domínio das propriedades térmicas, destaca-se a relevância da análise de características como a massa específica, calor específico, condutividade térmica e expansão térmica. A variação volumétrica resultante da expansão térmica, em resposta às oscilações de temperatura, impacta diretamente a massa específica, delineando a relação massa/volume do material (Carvalho, 2019). Esse fenômeno assume particular importância em análises de efeitos de 2ª ordem, impondo restrições à dilatação térmica.

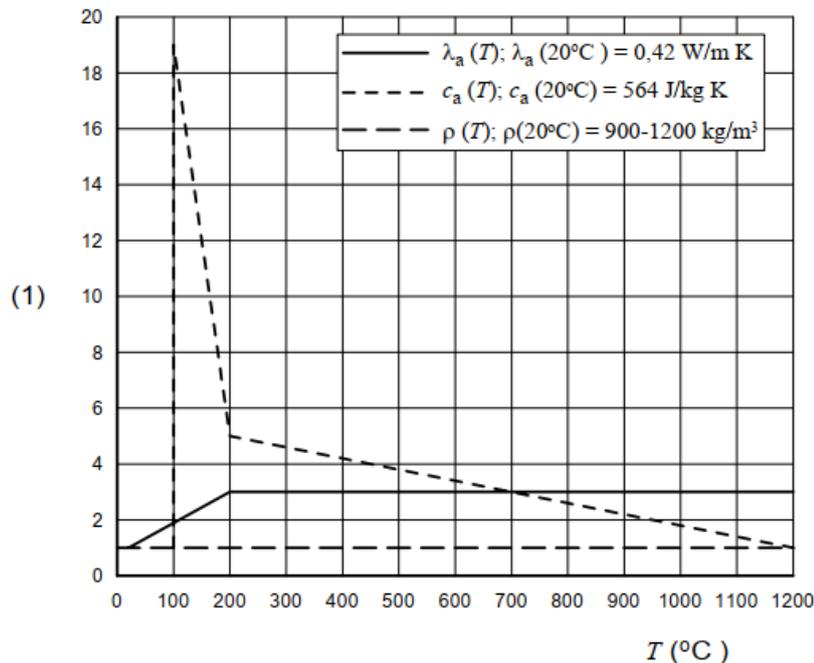
O calor específico constitui uma medida crucial da capacidade de um material absorver calor, influenciando diretamente sua suscetibilidade a variações térmicas. Quanto menor o calor específico, maior a predisposição do material a oscilações de temperatura (Rosemann, 2011).

Por sua vez, a condutividade térmica reflete a habilidade de um material conduzir calor, molécula a molécula (Leite, 2018). Em materiais porosos, como cerâmica e produtos de cimento, a condutividade térmica é também sensível ao teor de umidade nos poros, aumentando proporcionalmente ao aumento da umidade (Rosemann, 2011). Tais propriedades têm implicações diretas no comportamento dos

materiais sujeitos a gradientes de temperatura, refletindo na capacidade da estrutura de atender aos requisitos de isolamento térmico.

O Eurocode 6 (CEN, 2005b) define valores de cálculo das propriedades térmicas de unidades cerâmicas com uma faixa de massa específica de 900 a 1.200 kg/m³, como apresentado na Figura 3.4. Nessa normativa, baseia-se a variação em comparativo com o valor de cada propriedade a 20°C.

Figura 3.4 – Propriedades térmicas de unidades cerâmicas europeias com aumento da temperatura.

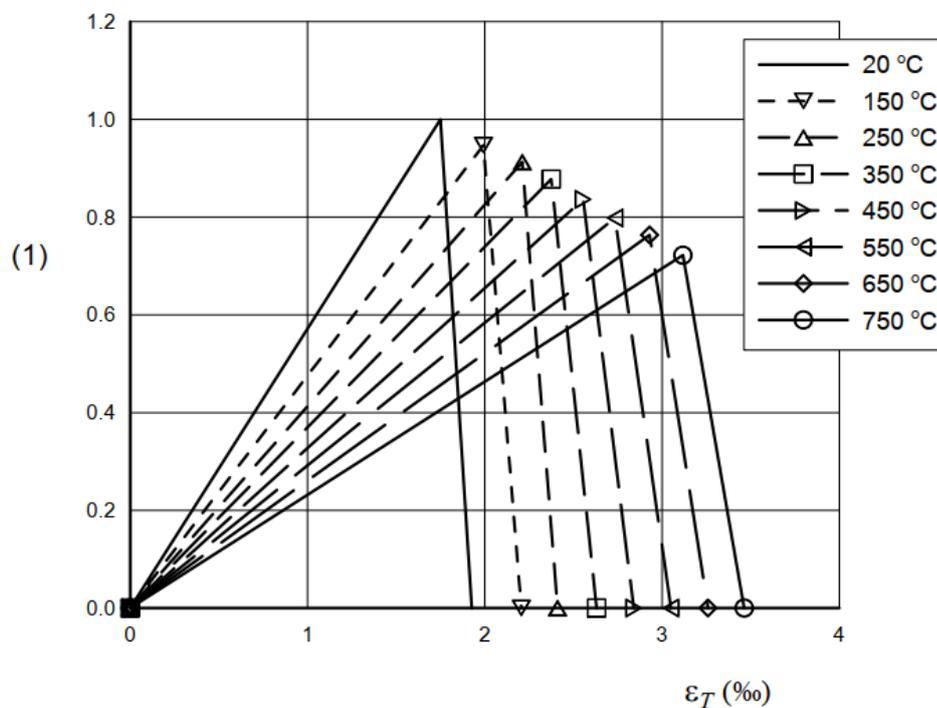


Entende-se λ_a : condutividade térmica; c_a : calor específico, ρ : massa específica e T : temperatura.
Fonte: Eurocode 6 (CEN, 2005b).

No âmbito das propriedades mecânicas preeminentes, como resistências à compressão e tração, módulo de elasticidade, e relações tensão-deformação, observa-se uma variação concomitante à temperatura de exposição, impactando diretamente a habilidade estrutural de atender a requisitos de resistência mecânica, estanqueidade e impacto mecânico.

O Eurocode 6 (CEN, 2005b) define valores de cálculo dos diagramas tensão-deformação dependentes da temperatura de unidades de argila (grupo 1) com resistência da unidade de 12 a 20 N/mm² e com uma faixa de massa específica de 900 a 1.200 kg/m³, como apresentado na Figura 3.5. Baseia-se a variação em relação aos valores de tensão e deformação na temperatura ambiente de 20°C.

Figura 3.5 – Valores de cálculo dos diagramas tensão-deformação com aumento da temperatura.



ϵ_T é a deformação térmica.
Tensão é dada em relação ao valor em 20°C.
Fonte: Eurocode 6 (CEN, 2005b).

Para a formulação de modelos matemáticos capazes de representar de maneira satisfatória as propriedades mecânicas em função das variações de temperatura, a prática comum envolve validações fundamentadas em análises experimentais ou modelagens numéricas presentes na literatura (Carvalho, 2019). Essa abordagem metódica visa a garantir uma representação precisa e confiável do comportamento dos materiais frente a diferentes condições térmicas e foi a adotada no presente trabalho.

3.3 Fatores que influenciam o desempenho da alvenaria em elevadas temperaturas

A alvenaria, enquanto sistema construtivo e como já mencionado anteriormente, é comumente constituída por blocos cerâmicos ou de concreto assentados sobre juntas de argamassa, desempenhando um papel crucial na absorção e distribuição dos esforços de compressão, cisalhamento e pequenas tensões de tração, referentes às cargas usuais às quais é projetada para suportar. Em

Nguyen *et al.* (2009), destaca-se que, para as estruturas constituídas utilizando blocos cerâmicos, a queima durante a fabricação estabelece uma conexão robusta entre os poros, prevenindo poro-pressões em cenários de incêndio e promovendo a estabilidade estrutural desses blocos.

Em Thomaz e Helene (2000) e em Meyer (2006), no que concerne às paredes de alvenaria, diversos fatores desempenham um papel preponderante na determinação da resistência ao fogo, destacando-se, em especial, os tipos de blocos empregados. Tanto as propriedades dos materiais constituintes quanto a geometria desses blocos exercem influência direta nesse contexto. Outro elemento crucial apresentado pelos autores é a seleção dos tipos de juntas de assentamento, revestimentos e preenchimento dos septos dos blocos. As juntas de assentamento, por exemplo, desempenham um papel fundamental na prevenção da propagação do fogo, enquanto os revestimentos podem conferir uma camada adicional de proteção térmica. O preenchimento adequado dos septos dos blocos é essencial para otimizar a resistência ao fogo, uma vez que pode influenciar na transferência de calor e na propagação do fogo, através da espessura da parede de alvenaria.

Consoante a análise apresentada em Andreini *et al.* (2014), evidencia-se também que uma gama diversificada de fatores exerce influência significativa no comportamento da alvenaria diante de situações de incêndio. Aspectos como geometria, forma e dimensão dos elementos, restrições impostas ao conjunto, textura dos blocos, teor de umidade dos componentes, espessura das juntas de argamassa e a maneira como o sistema é exposto ao fogo emergem como elementos fundamentais nesse contexto.

De acordo com Meyer (2006), fatores ligados à estabilidade estrutural dos elementos de alvenaria também influenciam no desempenho do fogo na estrutura, são eles: o arqueamento por dilatação diferencial, o índice de esbeltez da parede e o carregamento. Para Dupim (2019), são cruciais fatores: materiais utilizados na execução, características geométricas dos blocos, disposições construtivas e arqueamento, vinculação e esbeltez das paredes.

Além desse conjunto de variáveis, a contribuição de Bonitese (2007) amplia a perspectiva, ao destacar as alterações nas propriedades físico-químicas dos materiais de construção, quando sujeitos a situações de elevado calor. Nesse sentido, a consideração não apenas das propriedades térmicas e mecânicas, mas também da

composição química dos materiais, emerge como um fator crucial na compreensão do comportamento da alvenaria durante incêndios.

O estudo apresentado em Rosemann (2011) acrescenta um viés importante, ao abordar as mudanças nos mecanismos de transferência de calor em elementos estruturais sob ação do fogo. Destaca-se, em particular, a influência da mudança de umidade nos materiais, que propicia o transporte de massa pelo meio poroso e resulta em variações ao longo da espessura, durante o processo de transferência de calor.

Essa variedade de elementos evidencia a complexidade intrínseca ao entendimento da resposta da alvenaria sob condições térmicas elevadas. Entretanto, diante da falta de estudos específicos centrados nos elementos constituintes e sua resposta às variações de temperatura, tornam-se essenciais pesquisas que permitam a previsão do comportamento global da alvenaria em situações de incêndio de maneira precisa e viável.

Essa compreensão mais aprofundada é crucial para orientar práticas construtivas mais seguras e eficientes em termos de resistência ao fogo. Portanto, dentre os vários fatores pertinentes, destacam-se a seguir: o material e a geometria do bloco, o processo construtivo e a estabilidade estrutural do sistema construtivo analisado.

3.3.1 Material do bloco

A influência do material dos blocos na alvenaria estrutural, em situações de elevadas temperaturas, representa um fator de extrema importância para o desempenho e a segurança da estrutura. A análise da condutividade térmica destaca que materiais com menor condutividade térmica conferem maior eficiência ao isolamento térmico. Da mesma maneira, materiais com maior calor específico, demandando uma absorção mais substancial de calor para a transferência ao longo da espessura, revelam um desempenho superior em termos de isolamento térmico. A combinação dessas características em uma parede contribui para uma eficácia aprimorada, considerando a difusividade térmica do material.

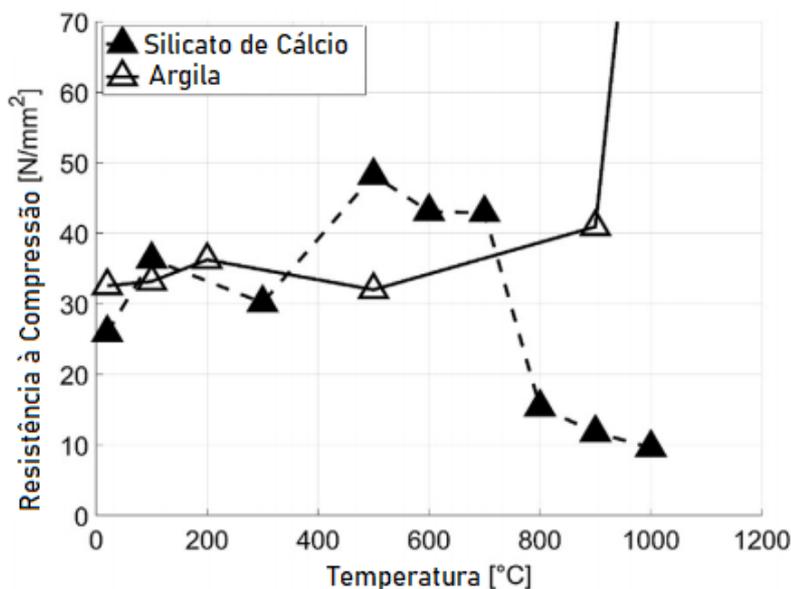
Os materiais empregados na fabricação dos blocos exercem uma influência preponderante no comportamento da estrutura diante das variações térmicas, determinando propriedades termofísicas, como porosidade, resistência mecânica e densidade. Exemplifica-se essa importância através da umidade que, presente nos

poros, consome o calor que atravessa a espessura do material, atingindo o seu ponto de ebulição, e, conseqüentemente, interferindo, de forma significativa, na eficiência do sistema (Meyer, 2006; Al Nahhas *et al.*, 2007).

Diferentes materiais, a exemplo de blocos cerâmicos e blocos de concreto, manifestam características singulares, quando expostos a altas temperaturas, impactando diretamente na resposta ao fogo. No que tange aos blocos cerâmicos, a queima durante o processo de fabricação engendra uma matriz sólida e robusta, promovendo uma ligação eficiente entre os poros. Essa particularidade confere notável resistência ao calor nos blocos cerâmicos, reduzindo consideravelmente o risco de colapso em situações de incêndio. A estrutura interna desses blocos assume papel primordial ao prevenir poro-pressões, assegurando a estabilidade estrutural, mesmo sob condições térmicas extremas.

Em Bošnjak *et al.* (2020), em seus ensaios experimentais com tijolos de cerâmica vermelha, constatou-se que estes demonstraram uma notável resistência a temperaturas elevadas (Figura 3.6). Até 500 °C, observou-se uma baixa sensibilidade, com pouca mudança significativa na resistência à compressão (próximas a 30 MPa). A partir dessa temperatura, a resistência começou a aumentar, próxima a 40MPa a 900°C e atingindo valores consideráveis em torno de 188 MPa a 1100 °C. Nas exposições a temperaturas tão elevadas, houve uma transformação na estrutura dos tijolos para clínquer, evidenciando mudanças visíveis no volume e na cor desses.

Figura 3.6 – Comparativo da resistência à compressão residual de blocos de argila e de silicato de cálcio sob altas temperaturas.



Fonte: Bošnjak *et al.* (2020).

Defeitos significativos foram observados nas amostras expostas a 1100 °C, provavelmente induzidos pela contração decorrente da mudança de fase nos constituintes do tijolo, como a evaporação da água quimicamente ligada. Adicionalmente, os autores presumiram que tenha ocorrido uma vitrificação parcial a 1100 °C, resultando em um aumento substancial da resistência residual. O comportamento tornou-se extremamente frágil, com as amostras aquecidas a 1100°C quase explodindo instantaneamente ao atingir a carga máxima. No entanto, é notável que, mesmo em temperaturas elevadas, o comportamento residual dos tijolos foi mais favorável do que quando ainda aquecidos. Em estados quentes, a resistência à compressão reduziu quase linearmente com a temperatura, alcançando cerca de 70% da resistência inicial a 750°C, enquanto a resistência residual permaneceu praticamente inalterada em relação à temperatura.

Quanto aos blocos de concreto, embora também apresentem resistência ao fogo, seus comportamentos podem variar em função da composição específica do concreto. O desempenho em elevadas temperaturas está diretamente correlacionado com a qualidade dos agregados e a proporção dos materiais presentes na mistura do concreto. Determinados tipos de agregados podem expandir-se ou sofrer alterações em altas temperaturas, impactando a integridade da estrutura.

Os experimentos apresentados em Chichierchio (1990), e corroborados em Thomaz e Helene (2000), em Al-Hadhrami e Ahmad (2009), em Dupim (2019) e em Rosemann (2011), revelam que, quanto ao isolamento térmico e à estanqueidade, as paredes construídas com blocos cerâmicos superam as paredes de blocos de concreto.

A saber, em Chichierchio (1990), foram realizados testes em paredes de blocos de cerâmica e concreto, com uma espessura de 14 cm, obtendo 90 minutos para o bloco cerâmico e 60 minutos para o bloco de concreto. Em Thomaz e Helene (2000), foram alcançados resultados de 100 minutos e 80 minutos para blocos de cerâmica e concreto, respectivamente, ambos com espessura de 14 cm.

Em Dupim (2019), analisou-se a resistência ao isolamento térmico de blocos de concreto, encontrando um tempo médio de 62 minutos para elementos de 14 cm sem revestimento. Em Rosemann (2011), indicou-se que paredes de blocos cerâmicos de 14 cm sem preenchimento e sem revestimento têm resistência ao fogo de 106 minutos.

Em Fernandes Neto (2020), estudaram-se pequenas paredes de blocos cerâmicos de paredes maciças, com 14 cm de espessura, sem preenchimento e sem revestimento, encontrando tempos médios de resistência ao fogo de 42 minutos. Para pequenas paredes de blocos cerâmicos de paredes vazadas com 14 cm de espessura e com revestimento em argamassas de cimento, encontrou tempos médios de resistência ao fogo de 67 minutos, com revestimento em gesso de 51 minutos e de 33 minutos para blocos sem revestimento. No entanto, destacou que o isolamento foi prejudicado devido a alto grau de deterioração dos elementos, resultando em trincas que permitiram maior transferência de calor, afetando significativamente a resistência ao isolamento térmico.

E, em Al-Hadhrami e Ahmad (2009), para tijolo vazado de argila vermelha (20cm de espessura) com argamassa de cimento, foi obtida a resistência térmica superficial equivalente de $0.524 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Já, para bloco vazado de concreto (20cm de espessura) com argamassa de cimento, obteve-se a resistência térmica superficial equivalente de $0.205 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Em síntese, a seleção do material dos blocos é essencial na concepção de estruturas de alvenaria que demandam resistência a elevadas temperaturas e o material cerâmico tem mostrado bons resultados quando submetido à condição de incêndio.

3.3.2 Geometria dos elementos

É importante considerar a geometria do bloco de alvenaria no desenvolvimento de estruturas que visam à resistência a elevadas temperaturas, como em situações de incêndio. A configuração física dos blocos, compreendendo fatores como área superficial, forma, dimensões, porosidade, densidade, condutividade térmica, presença de cavidades, material constituinte, encaixe e junções, desempenha um papel determinante no comportamento térmico da alvenaria.

Quanto maior a espessura dos blocos, maior a resistência em relação ao isolamento térmico, visto que maior área terá que ser percorrida na troca de calor por condução. Já em relação aos blocos vazados, tem-se uma modificação na forma com que o bloco realiza as transferências de calor, à medida que, nos pontos vazados, a troca ocorre também por convecção e radiação, o que resulta em uma diminuição da

condutividade térmica efetiva e, conseqüentemente, do calor total absorvido pela parede, afetando os padrões de aquecimento e resfriamento ao longo do tempo.

Em ensaios realizados por Al-Hadhrami e Ahmad (2009), foi verificado que a variação da forma e distribuição dos pontos vazados internos ao bloco também exercem forte impacto no isolamento térmico para blocos de mesma dimensão. Verificou-se que, em blocos com dois vazados, houve um aumento significativo do isolamento térmico, se comparado a blocos que possuíam um único ponto vazado.

Em Fernandes Neto (2020), verificou-se também variação nos comportamentos mecânicos e térmicos para elementos estruturais de blocos vazados cerâmicos, com paredes vazadas e paredes maciças, submetidos às mesmas condições de incêndio e carregamento, em que os elementos constituídos de blocos vazados de paredes maciças apresentaram desempenhos superiores, tanto o comportamento mecânico quanto o térmico, em relação aos elementos constituídos de blocos vazados de paredes vazadas.

Blocos com maior área exposta têm uma propensão aumentada para a condução de calor, o que pode afetar significativamente a resposta térmica da estrutura. A quantidade de juntas de argamassa e de assentamento necessária está ligada à dimensão externa dos blocos, sendo outro fator de influência, à medida que as propriedades termofísicas dos materiais junta e bloco são diferentes (Rosemann, 2011). Portanto a área superficial exposta de um bloco influencia diretamente sua capacidade de absorver e transmitir calor.

3.3.3 *Processo construtivo*

Os processos construtivos compreendem a aplicação de metodologias e técnicas desde o planejamento até a entrega final de uma obra. Incluem fases como projeto, preparação do terreno, construção de fundações e estrutura, seguidas por etapas de alvenaria, instalações, acabamentos, e, por fim, a entrega da obra ao cliente.

Conforme Meyer (2006), é imperativo considerar, no âmbito dos processos construtivos de alvenaria estrutural, elementos que impactam diretamente na resistência ao fogo. Dentre esses fatores, destaca-se o tipo de argamassa empregada no assentamento dos blocos, o modelo e a espessura das juntas de ligação, a

presença de revestimento nas paredes e a realização de preenchimento nos vazados dos blocos.

Considerando a execução das juntas entre os blocos, estas desempenham um papel essencial na gestão eficiente da transferência de calor dentro da estrutura. Projetadas para acomodar deformações resultantes de cargas externas, como ventos laterais e sismos, elas minimizam os riscos de fissuras, ao mesmo tempo em que proporcionam espaço para acomodar deformações térmicas e higroscópicas dos materiais, evitando rachaduras decorrentes de variações de temperatura e umidade.

A impermeabilização eficiente das juntas atua como uma barreira contra a entrada de água, prevenindo problemas como eflorescência, deterioração e formação de mofo, todos os quais podem contribuir para o aumento da transferência de calor na estrutura. Além disso, as características das juntas influenciam diretamente o desempenho térmico da estrutura, sendo que mais largas ou preenchidas com materiais isolantes podem aprimorar significativamente essas propriedades.

Em termos de segurança contra incêndios, a qualidade das juntas, quando bem seladas, não apenas ajuda a prevenir a propagação de chamas e gases quentes, mas também desempenha um papel crucial na gestão do calor gerado durante um incêndio (Meyer, 2006).

A aplicação de revestimentos nas faces das paredes também é parte integrante dos processos construtivos que podem intensificar o isolamento térmico; experimentalmente o uso de gesso, argamassa, poliestireno expandido e perlita proporcionou melhor desempenho térmico para os elementos analisados (Oliveira, 1998; Al-Hadhrami; Ahmad, 2009; Rosemann, 2011; Dupim, 2019; Fernandes Neto, 2020). Contudo, é essencial considerar que o ganho de isolamento está intrinsecamente vinculado à integridade do revestimento, conforme alertado em Oliveira (1998) e em Fernandes Neto (2020).

Adicionalmente, em Dupim (2019), analisou-se a resistência ao isolamento térmico de blocos de concreto, encontrando um tempo médio de 62 minutos para elementos de 14 cm sem revestimento. Já para os elementos de mesma dimensão revestidos com uma camada de gesso, acredita-se que o gesso tenha oferecido certa resistência à transferência de calor, nos minutos iniciais, enquanto o mesmo estava íntegro, visto que, para um tempo de 70 minutos de ensaio, as temperaturas encontradas foram em torno de 10% menores, quando comparadas ao sistema sem revestimento.

Em Rosemann (2011), foi indicado que paredes de blocos cerâmicos de 14 cm sem preenchimento e sem revestimento têm resistência ao fogo de 106 minutos, aumentando para 196 minutos com revestimento de argamassa (aumento de cerca de 85%); paredes com preenchimento de areia alcançaram 243 minutos, aumento de 129%, uma vez que a umidade da areia contribuiu para o aumento da resistência ao fogo, devido à absorção de calor para sua evaporação; paredes com preenchimento de areia e com revestimento de argamassa atingiram 405 minutos, um aumento de 282%.

Em Al-Hadhrami e Ahmad (2009), foi analisado o impacto da adição de material isolante aos blocos em sua resistência térmica. Os resultados mostram que a resistência térmica dos blocos de cerâmica com isolamento aumentou entre 9,7% e 15,6% em comparação com os blocos não protegidos. Da mesma forma, os blocos de concreto com adição de poliestireno apresentaram um aumento de cerca de 99,5% na resistência térmica. Preencher os furos dos blocos com perlita-cimento resultou em um aumento de cerca de 10%, enquanto o uso de material isolante de lã mineral levou a um aumento de cerca de 32% na resistência térmica, em comparação com os blocos sem preenchimento.

Portanto, a definição precisa e a execução cuidadosa desses processos construtivos não só contribuem para a estabilidade estrutural da alvenaria, mas também é fundamental no desempenho da estrutura em condições adversas, como as de um incêndio.

3.3.4 Estabilidade estrutural

A degradação de materiais em temperaturas elevadas, restrições estruturais, encurvamento devido à dilatação térmica, geometria da parede e presença de excentricidades são fatores determinantes que exercem influência substancial na resistência da alvenaria em contextos de incêndio, conforme delineado em Meyer (2006). Ao explorar esses elementos, é possível obter uma compreensão mais aprofundada de como cada um contribui para a complexidade do comportamento estrutural durante eventos de incêndio.

No que concerne à degradação dos materiais, é estabelecido que o aumento da temperatura resulta em perdas na resistência mecânica dos blocos, ocasionando a formação de fissuras e, eventualmente, rupturas tanto nos blocos quanto na

argamassa. Tal fenômeno compromete diretamente a integridade estrutural da alvenaria.

Em Nadjai *et al.* (2006), ressalta-se que, em cenários em que o incêndio afeta unicamente uma das faces da parede, a excentricidade das cargas aplicadas aumenta, gerando momentos de segunda ordem que sobrecarregam as paredes. O gradiente térmico resultante provoca uma dilatação mais acentuada nas áreas aquecidas, resultando em um arqueamento da parede na direção do foco de incêndio.

Em Carvalho (2019), enfatizam-se as variáveis determinantes para o encurvamento das paredes, como o coeficiente de dilatação, a presença de carregamento vertical e a condutividade térmica do material. O carregamento vertical inicialmente reduz a deflexão, mas, ao longo da exposição ao fogo, a deformação lateral gera momentos que propiciam instabilidade lateral, devido às elevadas tensões. Restrições e vinculações, ao impedirem os deslocamentos causados pela expansão térmica, podem gerar esforços internos adicionais.

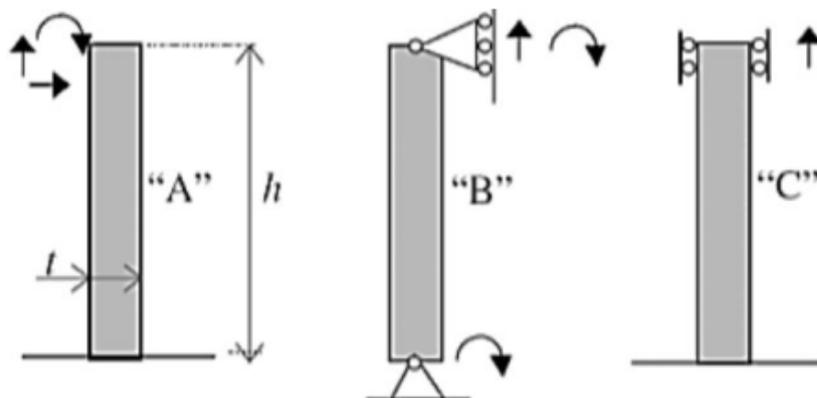
Quanto à esbeltez da estrutura, entendida como a relação entre a altura e a espessura das paredes, em Oliveira (1998), sugere-se a redução da esbeltez, seja por meio do aumento da espessura das paredes ou pela incorporação de suportes ao longo dos bordos das paredes. Essa abordagem coaduna com as recomendações de Rosemann (2011), nas quais se propõe a diminuição da esbeltez das paredes como medida para aumentar a segurança contra o colapso em situações de incêndio, reduzindo os efeitos de segunda ordem.

Em Nadjai, O'Garra e Ali (2003), um modelo foi desenvolvido para avaliar a influência da variação da esbeltez da parede, excentricidade da carga e tipo de vinculação. Verificou-se que o aumento da esbeltez resulta em uma menor temperatura de falha das paredes. Em relação ao carregamento excêntrico, observou-se um aumento na deflexão e uma diminuição na temperatura de falha nas paredes com vínculos (Figura 3.7) dos tipos A e B, enquanto na parede com o tipo C não foram identificadas mudanças significativas nesses parâmetros.

Essas considerações destacam a importância de abordagens integradas no projeto e na análise estrutural para garantir a segurança e a resistência da alvenaria em situações de incêndio, levando em consideração a interação complexa entre os diversos fatores estruturais mencionados. Para mais, em Carvalho (2019), apresenta-se a comparação numérica do comportamento termoestrutural de trios de pequenas paredes de blocos de concreto, considerando carregamento de 30% de suas cargas

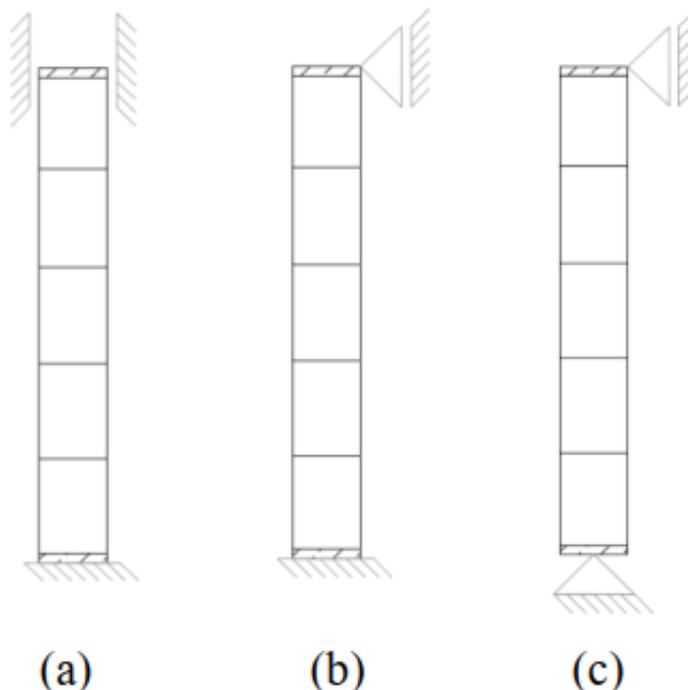
de ruptura e variando as condições de contorno de deslocamento, conforme as vinculações tipo CC1, CC2 e CC3, detalhadas na Figura 3.8.

Figura 3.7 – Exemplos de vinculação de paredes de alvenaria.



Fonte: Nadjai, O'Garra e Ali (2003).

Figura 3.8 – Vinculação de paredes de alvenaria adotadas por Carvalho (2019).



- (a) CC1: deslocamento inferior engastado e deslocamento superior vertical livre.
 (b) CC2: deslocamento inferior engastado; deslocamento superior vertical e giro perpendicular ao plano da parede livres.
 (c) CC3: deslocamento inferior com giro perpendicular ao plano da parede livre; deslocamento superior vertical e giro perpendicular ao plano da parede livres.

Fonte: Carvalho (2019).

A ausência de restrição ao giro, inicialmente na superfície superior (CC2) e, posteriormente, também na superfície inferior (CC3), resultou em uma redução no tempo de resistência ao incêndio até o pico de deformações. Isso ocorreu devido à

maior curvatura na estrutura, gerando maiores tensões de tração na parede e, possivelmente, acelerando a deterioração dos materiais durante o incêndio.

Foi constatado um significativo aumento no período de resistência mecânica sob a condição de contorno CC1, em virtude das restrições adicionais nos graus de liberdade. Essas restrições resultaram em uma diminuição no deslocamento lateral, devido ao bloqueio dos giros superior e inferior, o que reduziu a curvatura da parede e, potencialmente, as tensões de tração nos blocos. Como consequência, o tempo de resistência ao fogo foi prolongado até a inversão das deformações.

Por outro lado, a ausência de restrição ao giro, inicialmente na superfície superior (CC2) e, posteriormente, também na superfície inferior (CC3), resultou em uma redução no tempo de resistência ao incêndio até o pico de deformações. Isso ocorreu devido à maior curvatura na estrutura, gerando maiores tensões de tração na parede e, possivelmente, acelerando a deterioração dos materiais durante o incêndio.

Portanto, destaca-se a importância de se também considerar as condições de contorno, que se referem às restrições impostas à estrutura, durante as etapas de projeto e pesquisas relacionadas. Uma vez que, restrições e vinculações, por impedirem os deslocamentos causados pela expansão térmica, podem gerar esforços internos adicionais, contribuindo para a complexidade do comportamento estrutural em situações de incêndio. Em se tratando de alvenaria estrutural em situação de incêndio, estudos já foram realizados, portanto segue um breve levantamento de alguns trabalhos.

3.4 Estudo da arte

No estudo da arte de alvenaria estrutural em situação de incêndio, destacam-se os trabalhos de Gomes (2001); Nguyen *et al.* (2009); Rosemann (2011); Russo e Sciarretta (2015); Rodovalho (2018); Lima *et al.* (2018); Dupim (2019); Carvalho (2019) e Fernandes Neto (2020), relatados a seguir.

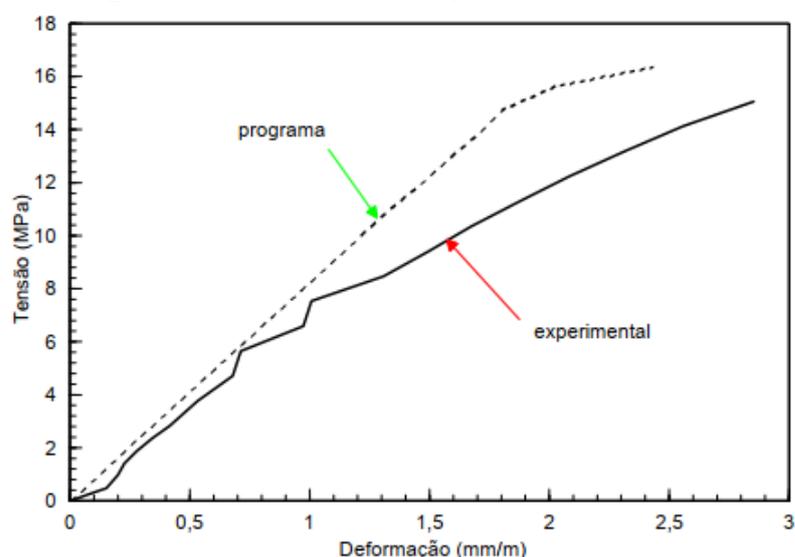
3.4.1 Em Gomes (2001):

Estudou-se a resposta estrutural, por meio do método de elementos finitos, de paredes de alvenaria estrutural com ênfase na análise do comportamento das interfaces, através do software DIANA.

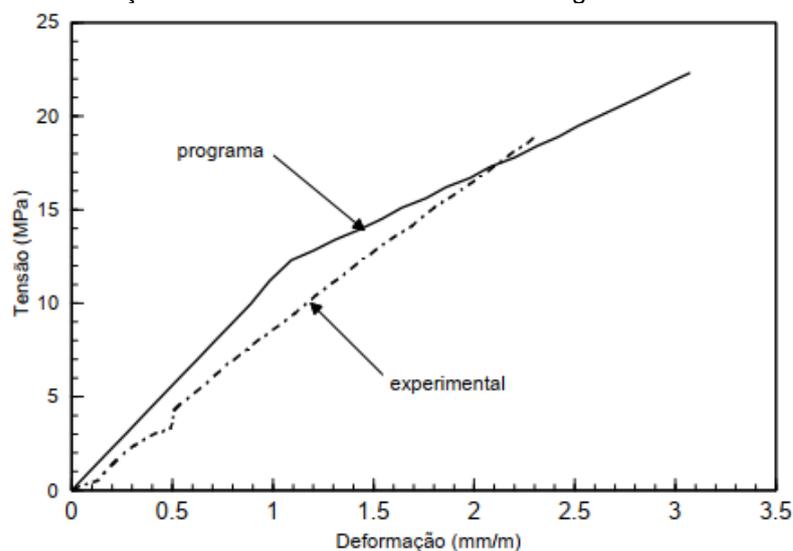
Para os blocos, adotou-se o critério de plastificação de Drucker-Prager com endurecimento isotrópico para a compressão e, para a tração, o modelo de fissuração distribuída. A interface foi incluída no modelo com o intuito de representar os planos de menor resistência entre o bloco e a argamassa e seu comportamento não-linear foi descrito por meio do critério de atrito de Coulomb.

Como resultados, obteve-se boa concordância com os valores experimentais, havendo um distanciamento, a partir do momento em que o modelo entra em plastificação. Na Figura 3.9, são mostrados os gráficos comparativos para dois tipos de argamassas utilizadas nos prismas cerâmicos sem graute.

Figura 3.9 – Diagramas tensão-deformação para dois tipos de argamassa.



(a) Para prisma com relação entre o módulo de elasticidade argamassa/bloco cerâmico de 0,92.



(b) Para prisma com relação entre o módulo de elasticidade argamassa/bloco cerâmico de 1,87.

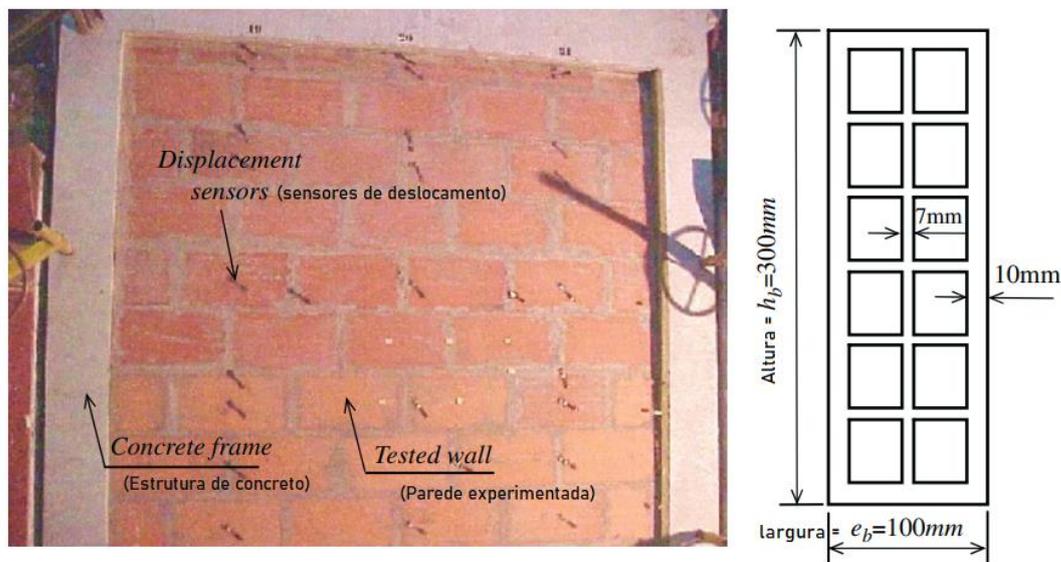
Fonte: Gomes (2001).

Concluiu-se que os prismas de blocos de concreto apresentaram a melhor resposta em relação ao módulo de elasticidade, bem como as resistências dos prismas cerâmicos foram obtidas com boa precisão. Destacou que o programa DIANA tem vários métodos de controle da análise não linear, o que permitiu uma simulação mais flexível e robusta. Além disso, concluiu-se que o modelo de fissuração distribuída admite que não há interação entre as fissuras do corpo, o que pode ter reduzido a precisão das repostas, visto que a maioria dos prismas estava bastante fissurada, bem como, que o modelo não foi capaz de representar a ruptura por esmagamento da argamassa, ou a combinação dessa ruptura com o fendilhamento do bloco.

3.4.2 Em Nguyen et al. (2009):

Abordaram-se ensaios e análises numéricas sobre o comportamento termomecânico de paredes com blocos cerâmicos sem aplicação de cargas mecânicas. A parede estudada por eles foi construída dentro de um pórtico de concreto (Figura 3.10). E, para as análises numéricas, utilizou-se o software CAST3M, baseado no método dos elementos finitos. Na análise térmica foram consideradas transferências de calor por condução, convecção e radiação, o consumo de energia pela água livre existente nos poros dos blocos e o incêndio em uma das faces da parede, de acordo com a ISO 834-1 (ISO, 1999).

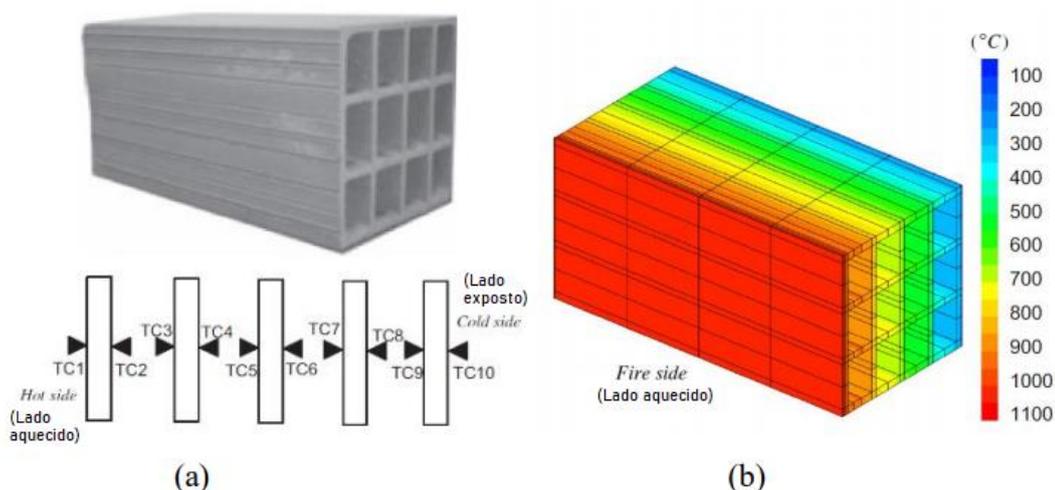
Figura 3.10 – Parede analisada e seção transversal do bloco cerâmico.



Fonte: Adaptada de Nguyen et al. (2009).

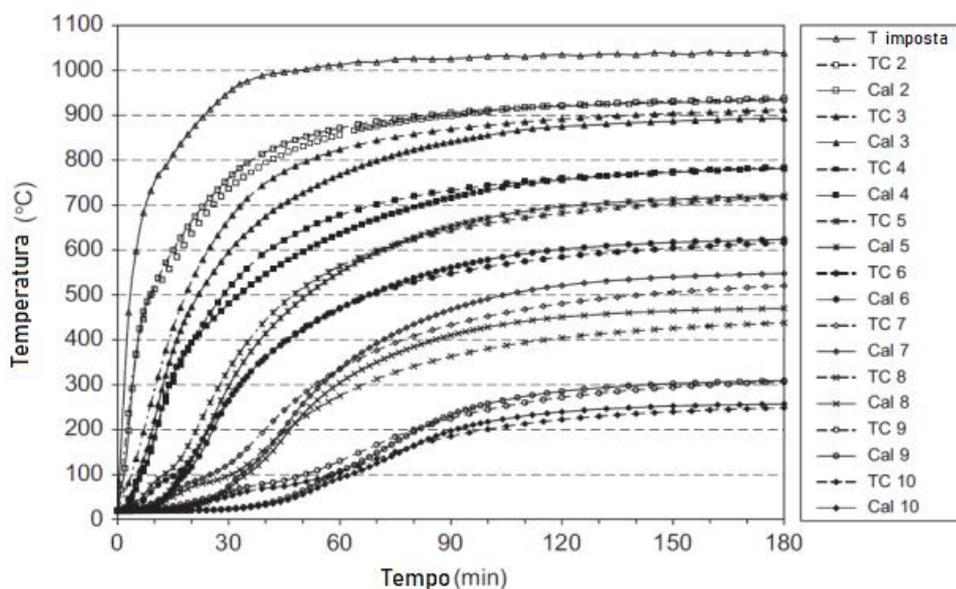
Para a validação do modelo numérico, em Nguyen *et al* (2009), analisaram-se os comportamentos térmico, experimental e numérico de um bloco vazado, cujos resultados são mostrados na Figura 3.11. Observou-se também a presença de um patamar próximo aos 100 °C para todos os pontos, acarretado pela evaporação da água (Figura 3.11c).

Figura 3.11 – Resultados do comportamento térmico do bloco vazado.



(a) Posicionamento dos termopares.

(b) Distribuição de temperatura no bloco analisado.



(c)

(c) Evolução da temperatura nas posições dos termopares comparando os valores experimentais e numéricos.

Fonte: Adaptada de Nguyen *et al.* (2009).

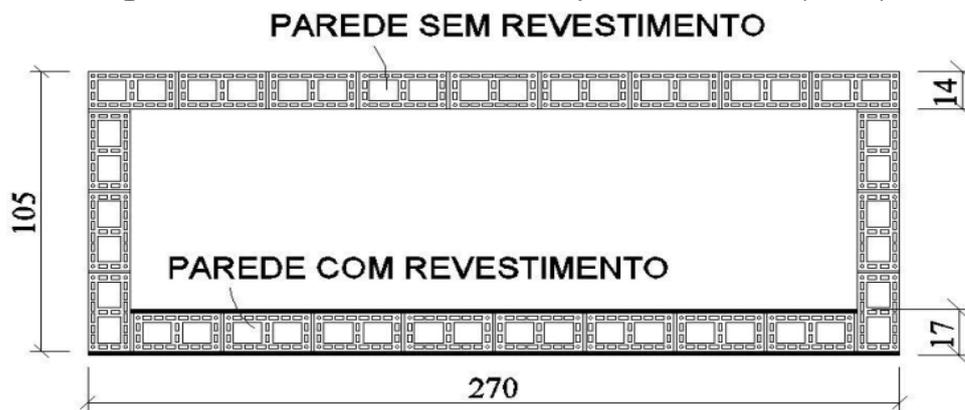
Para a modelagem termomecânica da parede, Nguyen *et al.* (2009) calibraram o modelo dos resultados de deslocamentos laterais com os valores experimentais. Ademais, os autores realizaram, numericamente, análises paramétricas com o coeficiente de condutividade térmica, o módulo de elasticidade do bloco e o coeficiente de expansão térmico.

Concluiu-se que a modelagem termoelástica combinada com modelo tridimensional de transferência de calor apresenta uma boa representatividade para esse tipo de parede fina em situação de incêndio, pois seu comportamento é influenciado principalmente pelo decréscimo do módulo de elasticidade com a elevação de temperatura, o que não ocorre em paredes carregadas.

3.4.3 Em Rosemann (2011):

Estudaram-se paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos por meio de métodos experimentais e analítico-numéricos, considerando a resistência ao fogo pelo critério do isolamento térmico. O aumento de temperatura no forno seguiu a curva de incêndio-padrão da ISO 834-1 (ISO, 1999) em uma das faces. A representação em planta das paredes em análise se encontra na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Paredes ensaiadas por Rosemann (2011).



(a) Corpos-de-prova ensaiados sem preenchimento dos vazados.



(b) Corpos-de-prova ensaiados com preenchimento de areia dos vazados.
Fonte: Rosemann (2011).

As paredes sem revestimento e sem preenchimento nos vazados apresentaram resistência ao fogo de 106 minutos; já as paredes com revestimento, de 196 minutos; obtendo-se aumento de 80% na resistência.

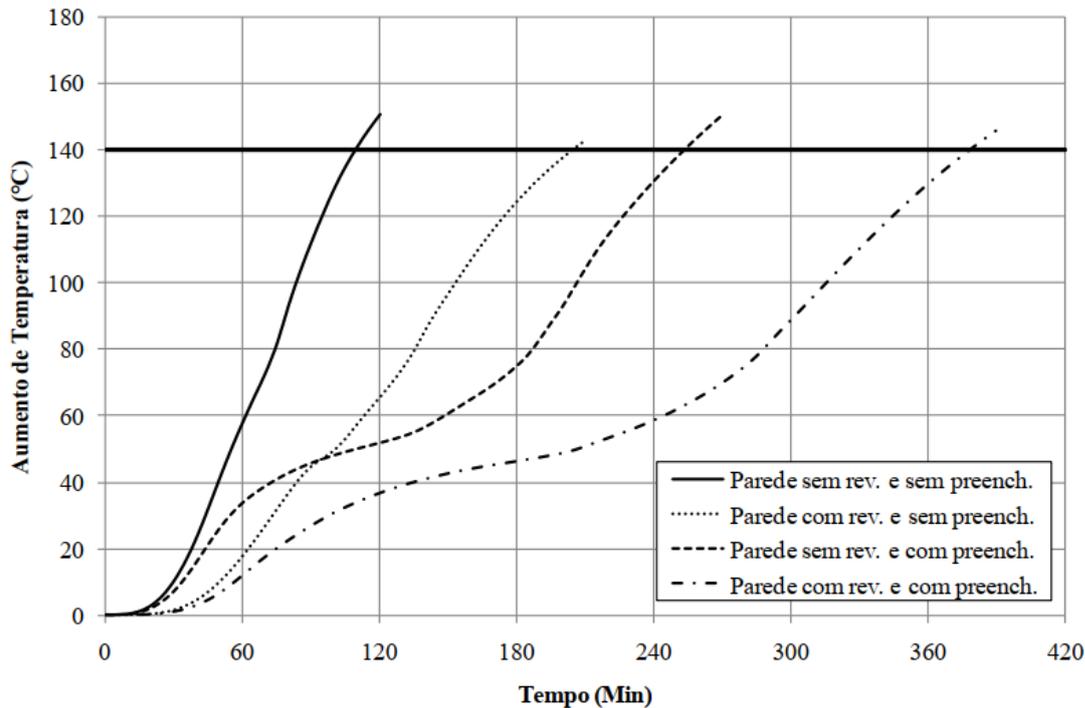
As amostras com preenchimento dos vazados com areia sem revestimento suportaram por 243 minutos, enquanto que a parede revestida resistiu por 405 minutos, um aumento de 67%. Assim, o preenchimento com areia nos vazados principais dos blocos acarretou o acréscimo de 100% na resistência ao fogo em relação aos corpos de prova sem preenchimento.

Os resultados obtidos nos ensaios comprovaram o bom desempenho ao fogo das paredes de alvenaria com blocos cerâmicos, bem como mostraram que o emprego de revestimentos nas faces e o preenchimento dos vazados representam boas alternativas para aumentar a resistência ao fogo, a um custo relativamente baixo (Figura 3.13).

Em sequência, o estudo propôs uma análise analítico-numérica e uma análise numérica validada com os dados experimentais obtidos inicialmente. Na parte analítico-numérica, foram utilizados 2 métodos para a determinação da resistência ao fogo: analítico e dos elementos finitos.

O método analítico da Associação da Indústria Brick - Brick Industry Association (BIA), baseado na espessura equivalente da parede, apresentou valores, em média, 25% inferiores aos resultados experimentais. No entanto, dada a sua simplicidade, o autor concluiu que a resposta se mostrou adequada para uma estimativa da resistência ao fogo de uma parede.

Figura 3.13 – Temperatura da face não exposta dos blocos obtida pelas análises experimentais por Rosemann (2011).

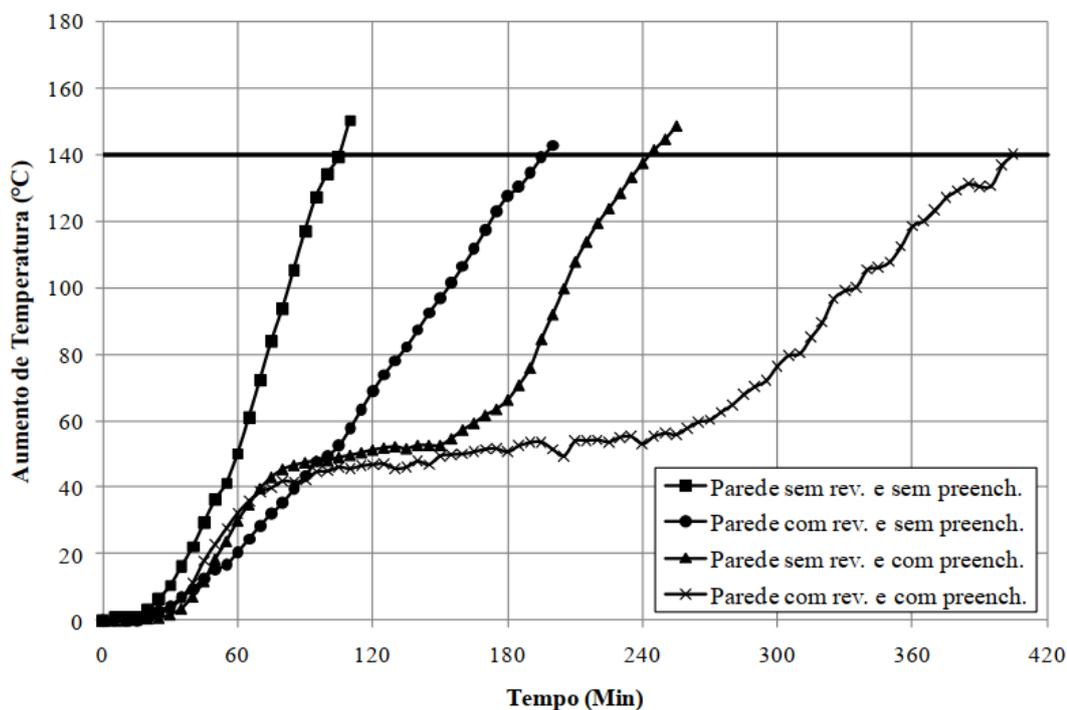


Fonte: Rosemann (2011).

Já o método dos elementos finitos, obtido pelo programa CAST3M, utilizando um modelo calibrado, desprezando a convecção e a radiação no interior dos vazados dos blocos e, considerando uma condutividade efetiva no material, conseguiu reproduzir a transferência de calor através das paredes, mediante a calibração de um modelo, o qual forneceu resultados com erro máximo de 6,4% comparado aos experimentais, mostrando ser uma boa alternativa em substituição aos ensaios (Figura 3.14). Destaca-se que os elementos escolhidos para a modelagem numérica foram bidimensionais.

Esses resultados demonstram a eficácia do uso de revestimentos e do preenchimento com areia nos vazados para melhorar a resistência ao fogo das paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. A análise comparativa entre os métodos experimentais e analíticos revelou que, embora o método da Brick Industry Association (BIA) apresente resultados inferiores em média, ele é útil para estimativas iniciais de resistência. Por outro lado, o método de elementos finitos, calibrado de acordo com os dados experimentais, foi mais representativo, com um erro máximo de apenas 6,4%, mostrando a confiabilidade do modelo computacional proposto.

Figura 3.14 – Temperatura da face não exposta dos blocos obtida pelo MEF por Rosemann (2011).



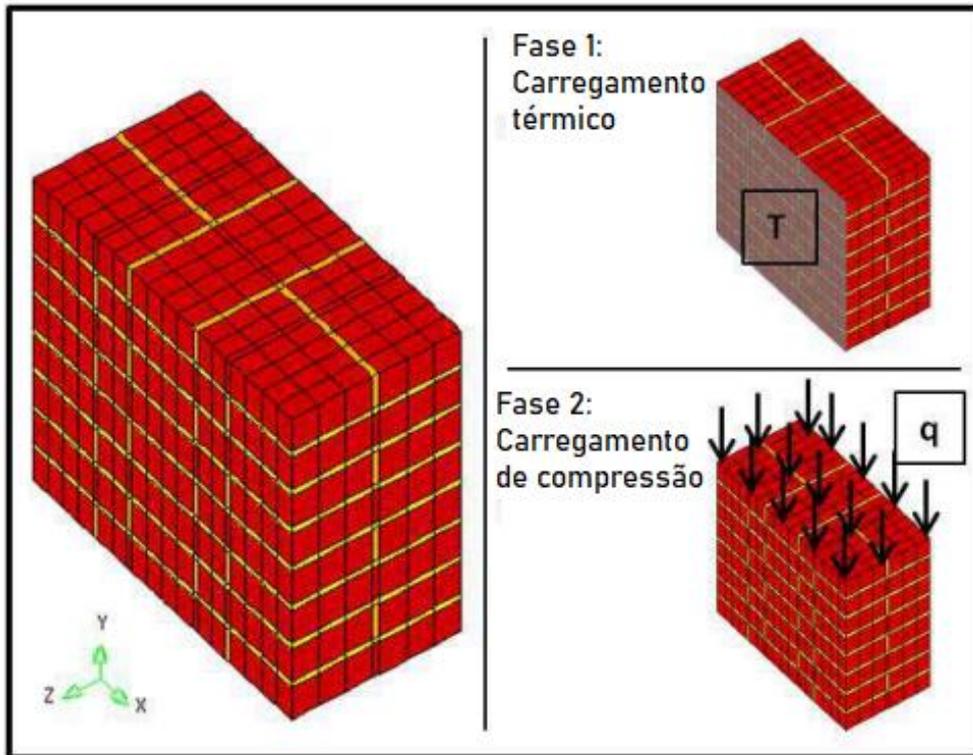
Fonte: Rosemann (2011).

3.4.4 Em Russo e Sciarretta (2015):

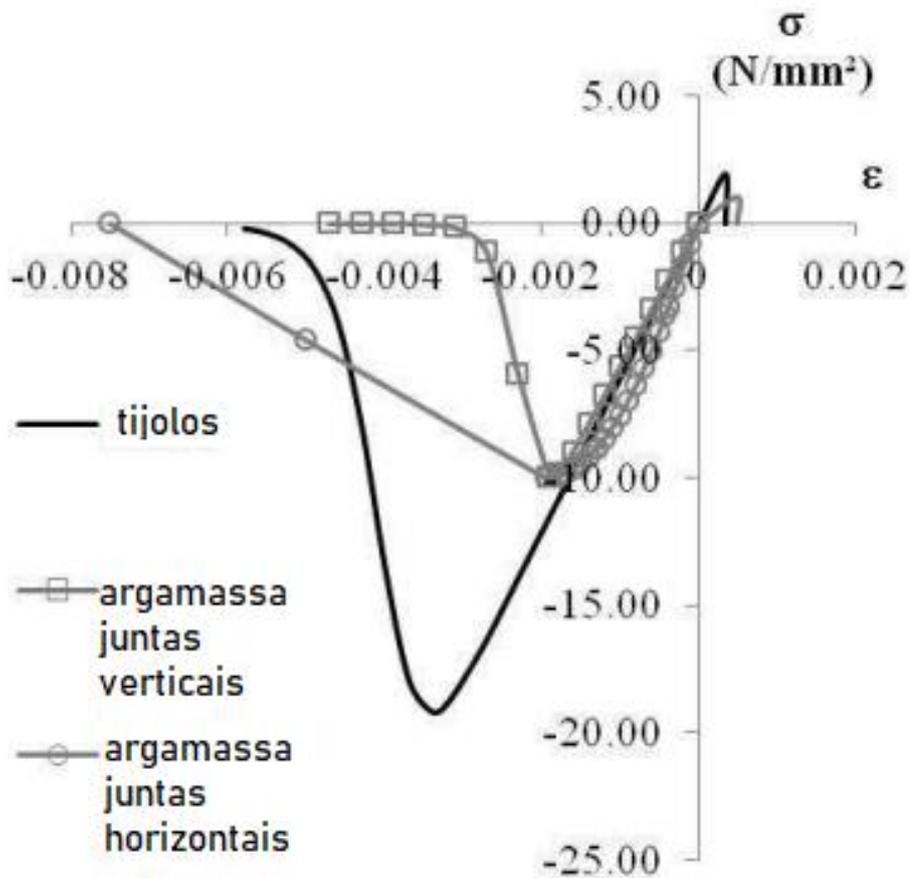
Realizaram-se estudos numéricos sobre as propriedades mecânicas da alvenaria estrutural durante e após a situação de incêndio. Nos ensaios experimentais de referência, em que as amostras foram expostas a altas temperaturas e depois testadas em compressão após resfriamento, observou-se que, em geral, os resultados apontaram uma clara deterioração na resistência à compressão, menor diminuição do módulo de elasticidade e uma ligeira diminuição no pico de deformação.

O modelo foi realizado com o auxílio do pacote computacional DIANA, com análise em duas fases, primeiramente uma análise de fluxo-tensão com calor escalonado para calcular a deformação térmica, contabilizando fissuras; e em seguida, para uma estrutura 'fria', aplica-se um carregamento de compressão no modelo termicamente deformado após o resfriamento. Na Figura 3.15, apresenta-se o esquema das análises realizadas e das propriedades mecânicas dos materiais, adotadas pelos autores em todos os modelos.

Figura 3.15 – Análises e propriedades mecânicas adotadas por Russo e Sciarretta (2015).



(a) Configuração das análises realizadas para todas as amostras.



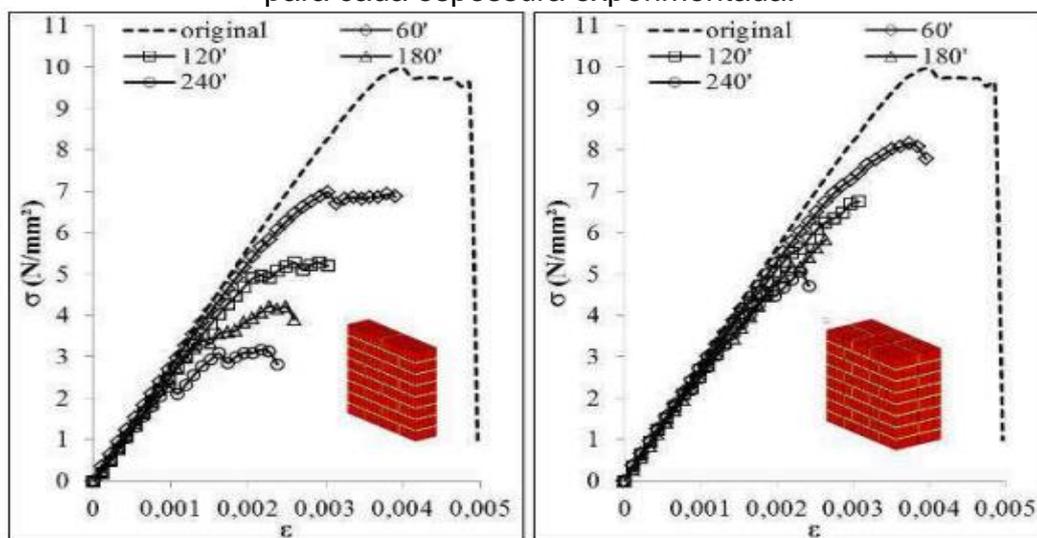
(b) Propriedades mecânicas adotadas para os materiais em todos os modelos.
Fonte: Russo e Sciarretta (2015).

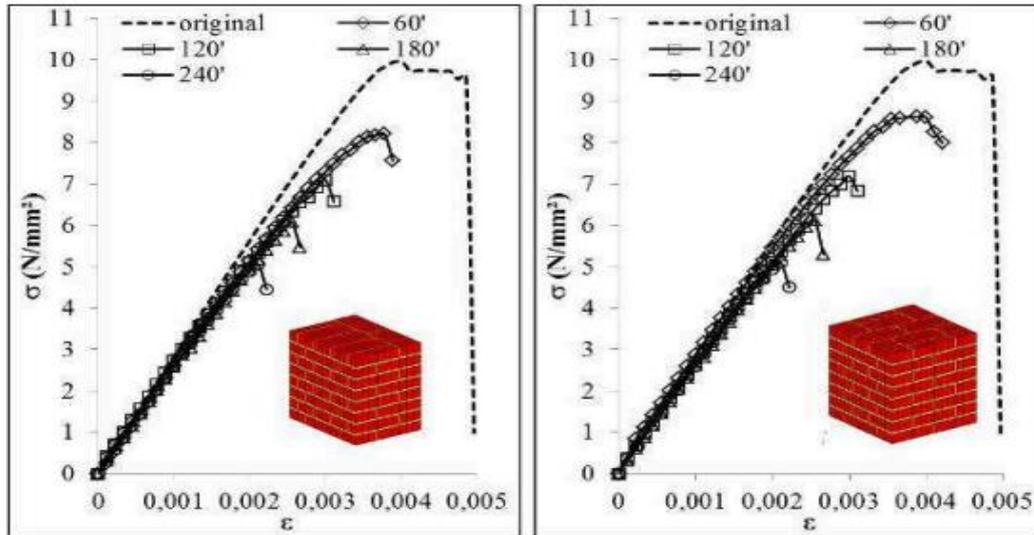
Os autores concluíram que a modelagem da falha compressiva dos prismas de alvenaria foi representativa, mostrando a concentração de danos com rachaduras no lado exposto. O efeito de diferentes durações de exposição às temperaturas prescritas pela curva ISO 834 (ISO, 1999) foi investigado através de dezesseis análises, o que significa quatro valores de espessura (t) por quatro durações (T), ou seja, 60, 120, 180 e 240 minutos.

Os gráficos de tensão-deformação dos modelos são reproduzidos na Figura 3.16; para cada espessura, o gráfico do teste de compressão simulado, após cada duração, é comparado ao material não exposto ao comportamento (linha pontilhada).

Observa-se que houve maior sensibilidade da tensão de pico ao tempo de exposição para menores espessuras e maior similaridade de comportamento quanto à pouca perda de rigidez das estruturas para maiores espessuras. Os autores ressaltaram que a distribuição das fissuras por esforços de tração, relativos à carga de pico, após 120 minutos de exposição, confirmam o bom desempenho da abordagem de modelagem, pois condisseram com o comportamento de falha observado durante os testes.

Figura 3.16 – Gráficos de tensão-deformação obtidos em Russo e Sciarretta (2015) para cada espessura experimentada.





Fonte: Russo e Sciarretta (2015).

3.4.5 Em Rodvalho (2018):

Analisou-se numericamente o comportamento termoestrutural de blocos e prismas de concreto com e sem revestimento (espessura de 1,5 cm) e o comportamento térmico de prismas cerâmicos com e sem revestimento (espessura de 1,5 cm).

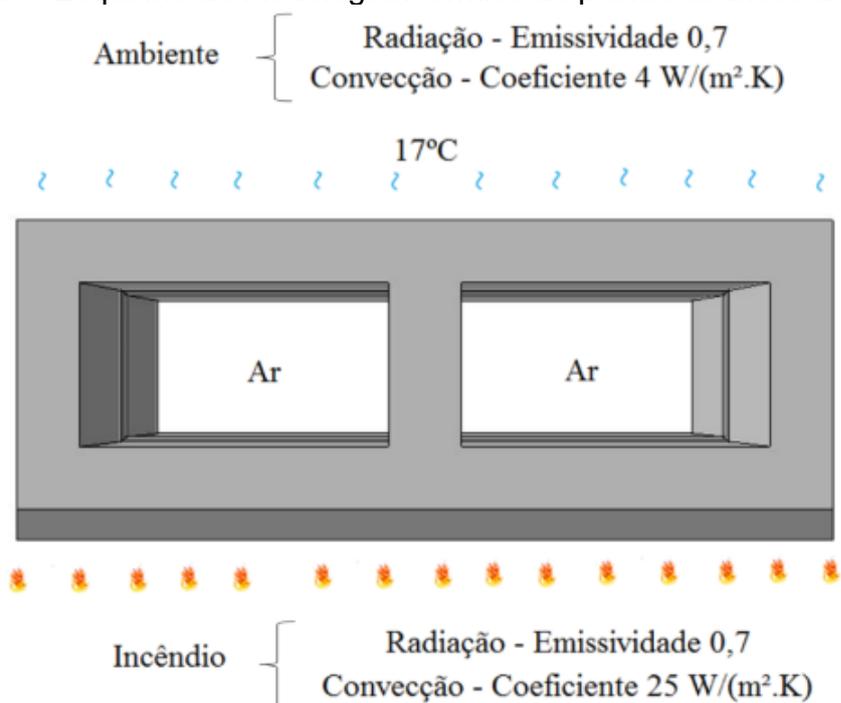
Para os elementos de concreto, adotaram-se modelos de plasticidade e dano para representar o comportamento não linear dos blocos e das juntas de argamassa. Na análise proposta, não houve consideração quanto a deslocamento relativo entre argamassa e bloco. A malha utilizada foi de 1 cm.

Nos modelos estruturais, utilizaram-se elementos tridimensionais contínuos com integração reduzida (C3D8R). Inseriu-se o carregamento através de controle de deslocamentos com o objetivo de simular os ensaios realizados por Oliveira (2014), utilizando-os como parâmetro para calibração dos modelos. Para a modelagem térmica dos prismas de concreto, em todos os componentes também se utilizou a malha de 1 cm.

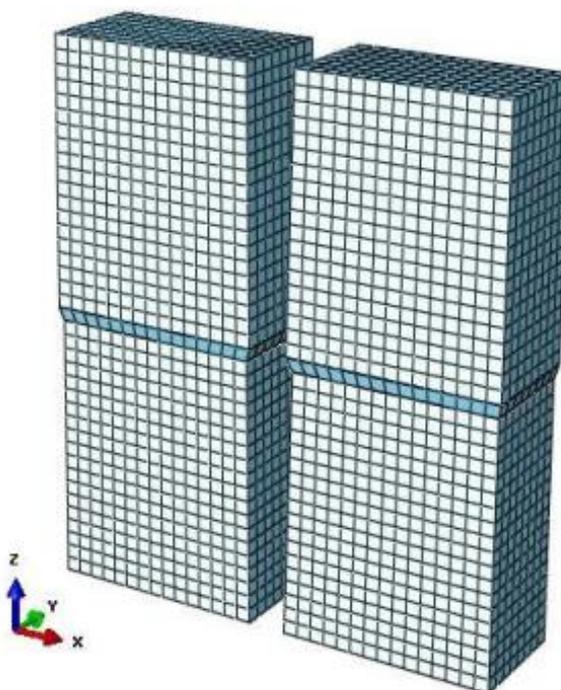
Os elementos relacionados à transferência de calor dos blocos e argamassa foram o DC3D8. Para a massa de ar interna, utilizaram-se elementos do tipo FC3D8, através da interação fluido-estrutura, em que a transferência de calor ocorre por meio da condução e da convecção. O aquecimento adotado foi respeitando a curva ISO 834 (ISO, 1999), aplicado em uma das faces.

A transferência de calor considerada para o meio sólido foi a condução e, entre o ar e o material do bloco, a convecção e a radiação; com representação do ar nos vazados do bloco. O esquema de modelagem e a representação da massa de ar adotados são apresentados na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Esquema de modelagem térmica de prisma de bloco de concreto.



(a) Esquema de modelagem adotado.

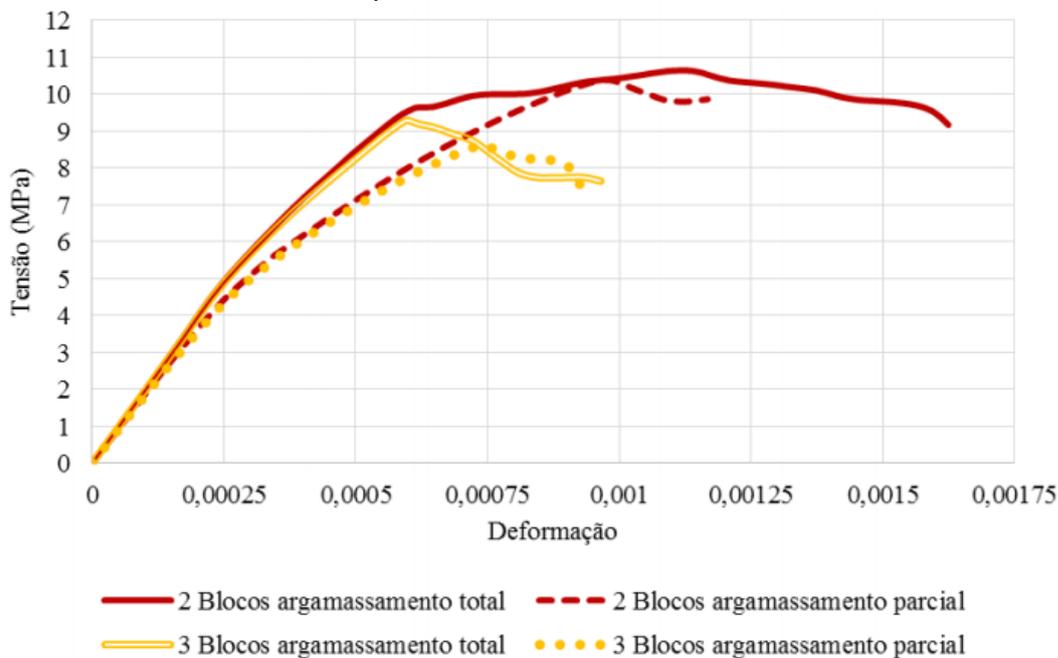


(b) Geometria e malha adotada para a massa de ar.
 Fonte: Rodvalho (2018).

A autora simulou um prisma com revestimento na face exposta ao fogo; um prisma sem revestimento na face exposta ao incêndio; e um prisma com revestimento em argamassa nas duas faces, sendo uma exposta ao incêndio.

Quanto aos resultados obtidos, para as modelagens de prismas de dois e três blocos, verificou numericamente que prismas de dois blocos apresentaram resistências maiores que prismas de três blocos, o que pode ser observado na Figura 3.18. Ademais, através de análises paramétricas numéricas, a autora constatou que prismas executados com argamassamento total apresentam rigidezes mais elevadas que no caso de argamassamento parcial.

Figura 3.18 – Diagramas tensão-deformação numéricos dos prismas constituídos por blocos de concreto.

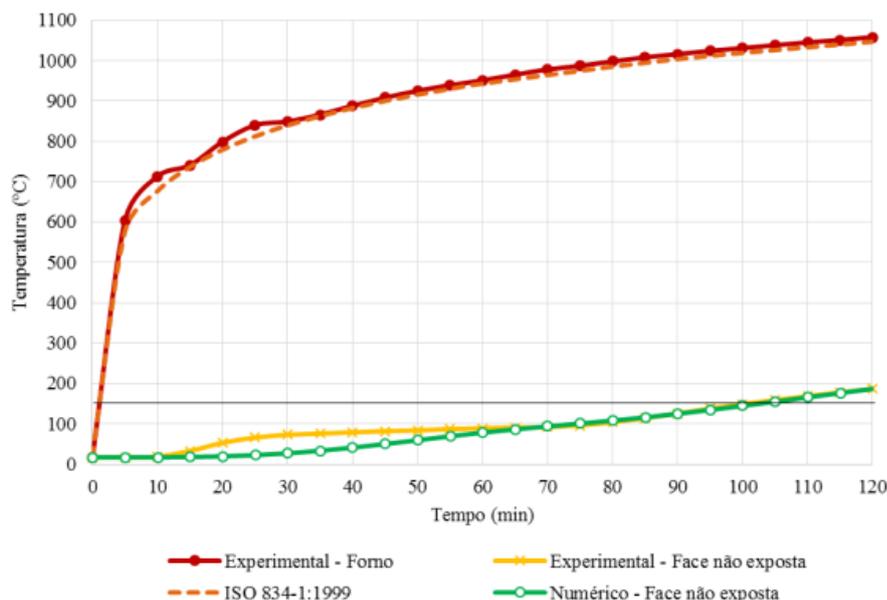


Fonte: Rodvalho (2018).

Na Figura 3.19, são apresentados os resultados numérico e experimental da média de elevação de temperatura nas faces não expostas ao fogo do prisma com um revestimento. Observa-se a boa concordância dos resultados, com apenas a não representação de um patamar, no início do aquecimento, no resultado experimental.

Para os prismas de blocos de concreto com revestimento, atingiu-se o critério de isolamento aos 86 min; com revestimento em uma das faces, aos 106 min; com revestimento em ambas as faces, 137 min.

Figura 3.19 – Elevação de temperatura média nas faces não expostas ao fogo do prisma com revestimento por Rodovalho (2018).



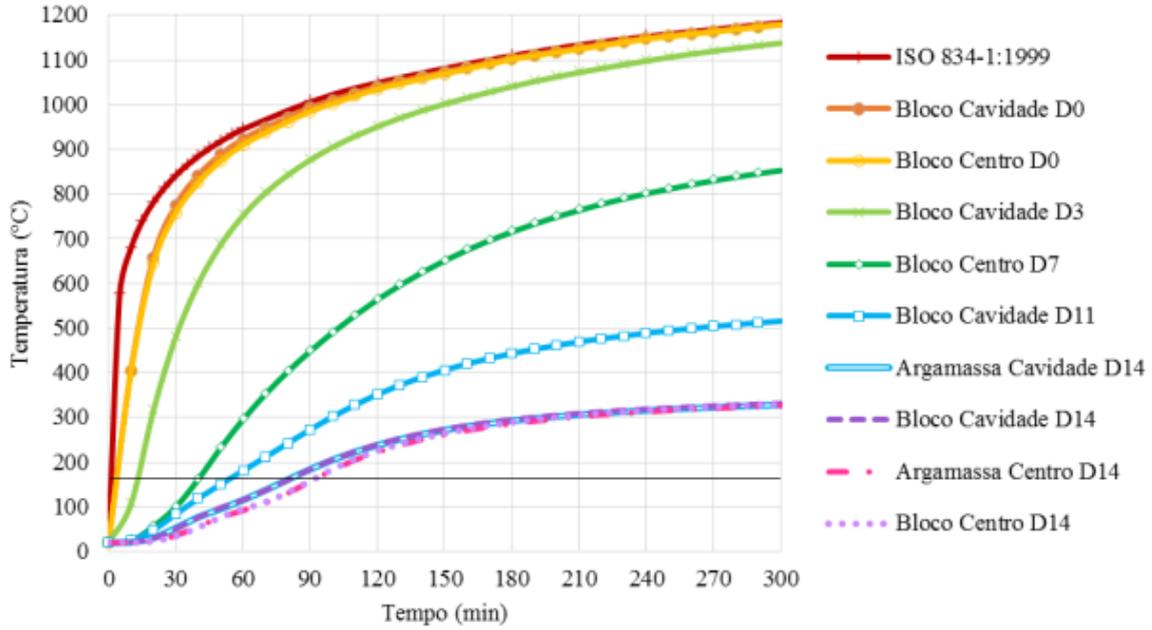
Fonte: Rodovalho (2018).

Uma vez que a autora considerou as propriedades dos materiais validadas, a modelagem do prisma sem revestimento na face exposta ao incêndio foi realizada adotando a mesma malha, porém se utilizou da simetria do modelo para representar apenas metade do problema. O prisma sem revestimento atingiu a temperatura limite do critério de isolamento térmico numericamente em 86 minutos.

Ainda, foram feitas medidas de temperatura em diversos pontos do prisma sem revestimento, sendo esses posicionados no bloco e na junta de argamassa, na projeção da cavidade e centro para diferentes espessuras. A nomeação dos pontos segue as dimensões aproximadas da lateral do bloco em centímetros, sendo que D0 é a face mais próxima do incêndio e D14, a face exposta ao ambiente. A elevação de temperatura desses diferentes pontos está presente na Figura 3.20.

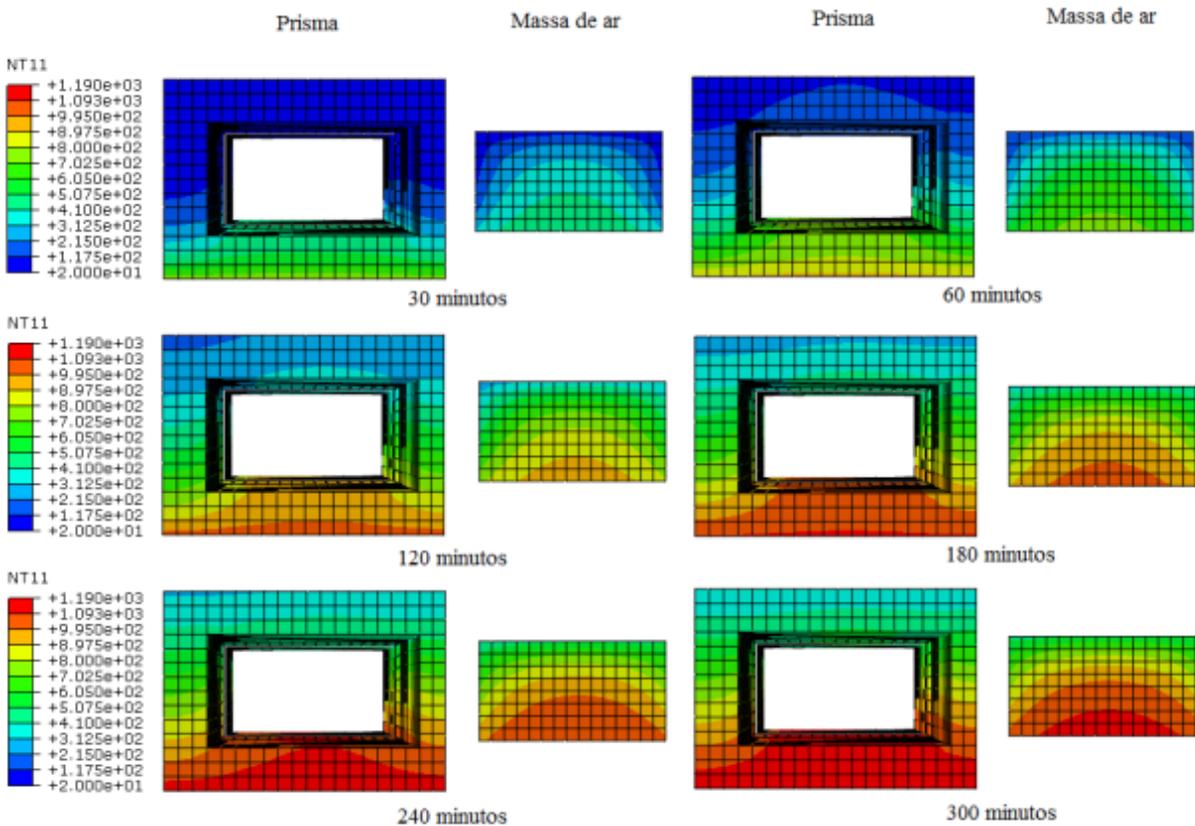
É importante ressaltar que os resultados numéricos para pontos situados na mesma distância da face exposta ao fogo, projetados na cavidade, possuem temperatura ligeiramente superior àqueles projetados no centro do prisma, mostrando a influência da representação do ar nas cavidades. Na Figura 3.21, estão disponíveis os campos térmicos identificados no prisma com revestimento em apenas uma face e, na massa de ar, em intervalos de 30 minutos.

Figura 3.20 – Elevação de temperatura em diversos pontos do prisma de concreto sem revestimento.



Fonte: Rodvalho (2018).

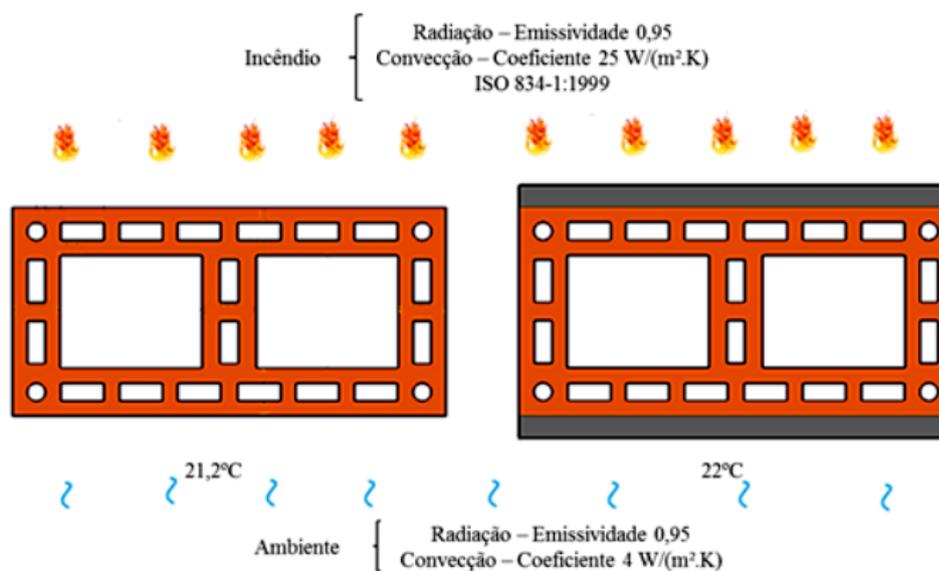
Figura 3.21 – Campos térmicos desenvolvidos no prisma sem revestimento e uma face exposta ao incêndio (°C).



Fonte: Rodvalho (2018).

Ainda, em Rodvalho (2018), foram realizadas modelagens térmicas de blocos cerâmicos sujeitos ao fogo em uma das faces, respeitando a curva ISO 834 (ISO, 1999), para verificação com os resultados experimentais obtidos por Rosemann (2011). A malha utilizada teve dimensões aproximadas de 3 mm na seção transversal e 30 mm na altura. A transferência de calor considerada para o meio sólido e entre o ar e o material do bloco foi análoga ao modelo dos prismas de concreto, contudo não houve representação do ar nos vazados do bloco, adotando-se uma condutividade efetiva para representar os efeitos da convecção e da radiação nesses espaços, metodologia similar à adotada por Rosemann (2011). O esquema de modelagem adotado pela autora é apresentado na Figura 3.22.

Figura 3.22 – Esquema de modelagem térmica de bloco cerâmico.



Fonte: Rodvalho (2018).

Os resultados obtidos para blocos cerâmicos estão mostrados na Figura 3.23, comparando com os resultados experimentais obtidos por Rosemann (2011). As temperaturas limites de isolamento térmico, 161,2°C e 162,0°C, das paredes sem revestimento e com revestimento foram alcançadas experimentalmente aos 106 e 196 minutos de ensaio respectivamente. Nas modelagens numéricas obtiveram-se 105 e 199 minutos, correspondentes a erros de 0,94 e 1,53%.

Na Figura 3.24, apresentam-se os campos térmicos obtidos na simulação da parede sem revestimento, em intervalos de 30 minutos e no instante em que se atinge a temperatura limite do isolamento térmico.

Figura 3.23 – Elevação de temperatura nas faces não expostas ao fogo das paredes cerâmicas por Rodovalho (2018).

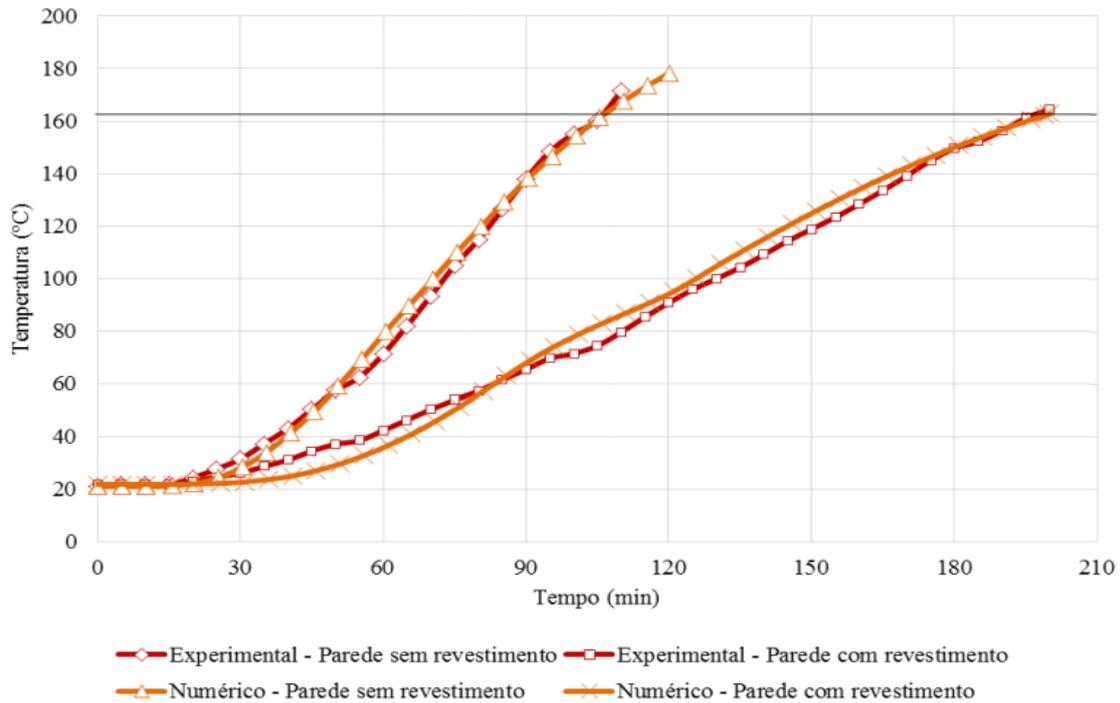
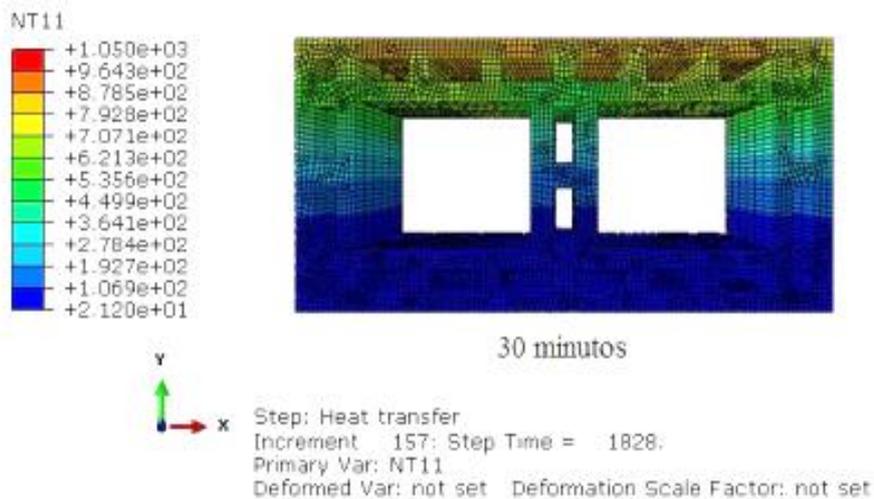
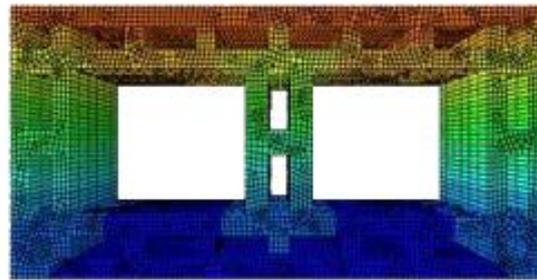


Figura 3.24 – Campos térmicos das paredes cerâmicas sem revestimento obtidos por Rodovalho (2018).



(a) Após 30 minutos.

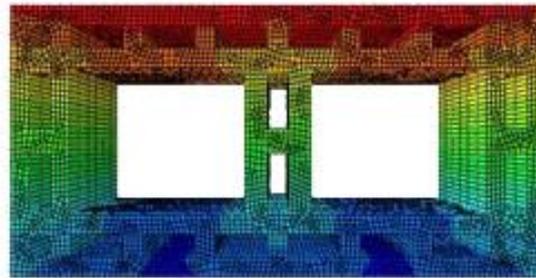
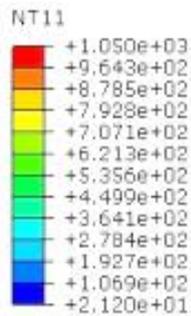


60 minutos



Step: Heat transfer
 Increment 175; Step Time = 3628.
 Primary Var: NT11
 Deformed Var: not set Deformation Scale Factor: not set

(b) Após 60 minutos.

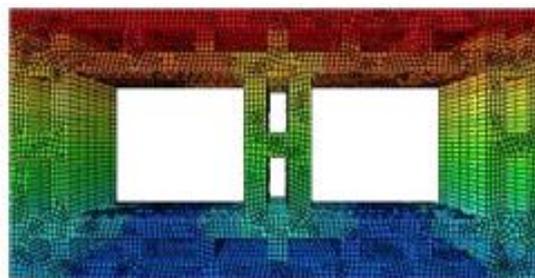


90 minutos



Step: Heat transfer
 Increment 193; Step Time = 5428.
 Primary Var: NT11
 Deformed Var: not set Deformation Scale Factor: not set

(c) Após 90 minutos.



105 minutos



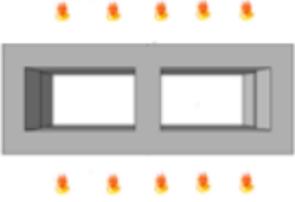
Step: Heat transfer
 Increment 202; Step Time = 6328.
 Primary Var: NT11
 Deformed Var: not set Deformation Scale Factor: not set

(d) Após 105 minutos.

Fonte: Rodvalho (2018).

As simulações termomecânicas foram feitas para prismas de blocos de concreto sem revestimento. Foram considerados dois tipos de carregamentos, com 20 e 35% da resistência característica dos prismas. Para cada carregamento, considerou-se, ainda, a variação das condições de contorno, sendo elas: casos sem restrição de deslocamento vertical (S.R.D.V.), com restrição de deslocamento vertical (C.R.D.V.), com restrição rotacional (C.R.R.) e sem restrição rotacional (S.R.R.). O resumo dos resultados obtidos para as simulações termomecânicas está mostrado na Figura 3.25, de acordo com o critério de resistência mecânica.

Figura 3.25 – Resumo dos resultados das simulações termomecânicas por Rodovalho (2018).

Esquema da simulação	Carregamento	S.R.D.V. (min)	C.R.D.V. (min)	
	20% <i>f_{pk}</i>	73	60	
	35% <i>f_{pk}</i>	52	40	
	20% <i>f_{pk}</i>	300	105	-
	35% <i>f_{pk}</i>	208	81	148
			C.R.R.	S.R.R.
			C.R.R.	S.R.R.

Casos sem restrição de deslocamento vertical (S.R.D.V.), com restrição de deslocamento vertical (C.R.D.V.), com restrição rotacional (C.R.R.) e sem restrição rotacional (S.R.R.).

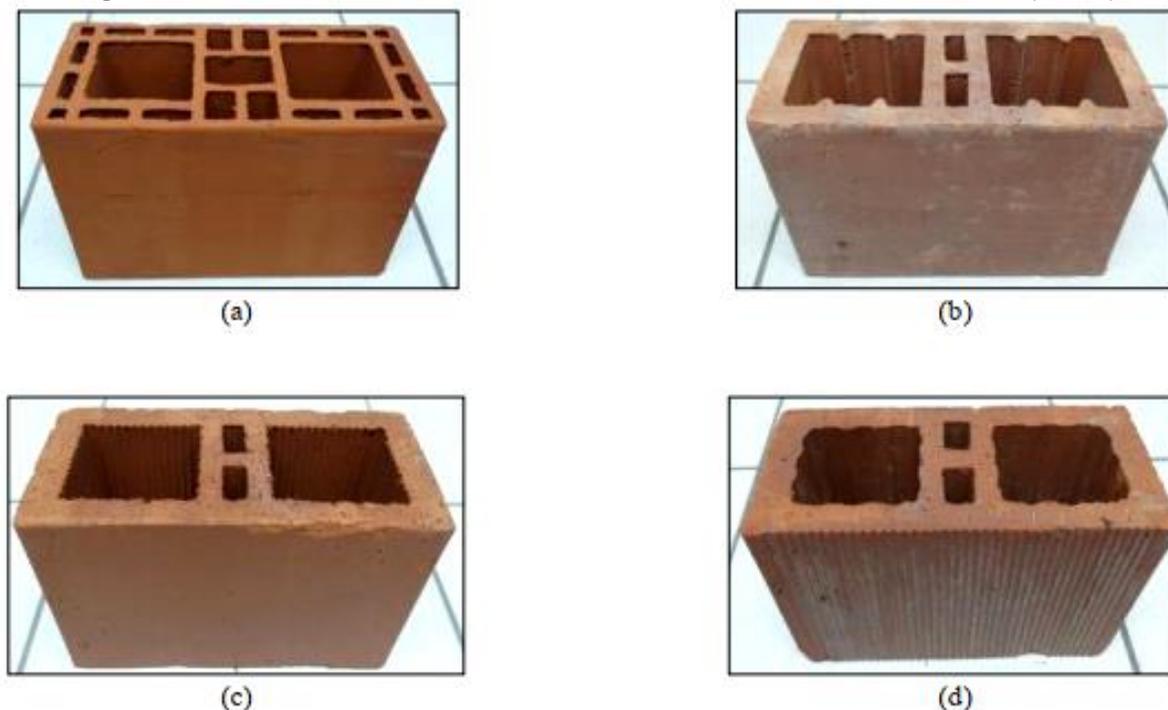
Fonte: Rodovalho (2018).

3.4.6 Em Lima et al. (2018):

Estudou-se a avaliação comportamental a altas temperaturas de pequenas paredes de alvenaria construídas com geometrias diferentes de blocos cerâmicos vazados. No total, quatro tipos de corpos de prova foram construídos, usando blocos com dimensões nominais de 15x20x30cm (largura x altura x comprimento) e resistência à compressão de 7, 10, 15 e 18 MPa, utilizando argamassa de assentamento com resistência à compressão de 6, 8, 10 e 12 MPa, respectivamente. As paredes possuíam 75 cm de comprimento e 80 cm de altura.

As paredes foram submetidas a uma temperatura constante de 900°C, por até 4 horas, simultaneamente, elas foram sujeitas à aplicação de um carregamento em serviço de 85, 120, 185 e 220kN para os blocos a, b, c e d (apresentados na Figura 3.26), respectivamente, enquanto os critérios de estanqueidade, o isolamento térmico e a resistência mecânica foram avaliados.

Figura 3.26 – Blocos cerâmicos usados nos ensaios de Lima et al. (2018).

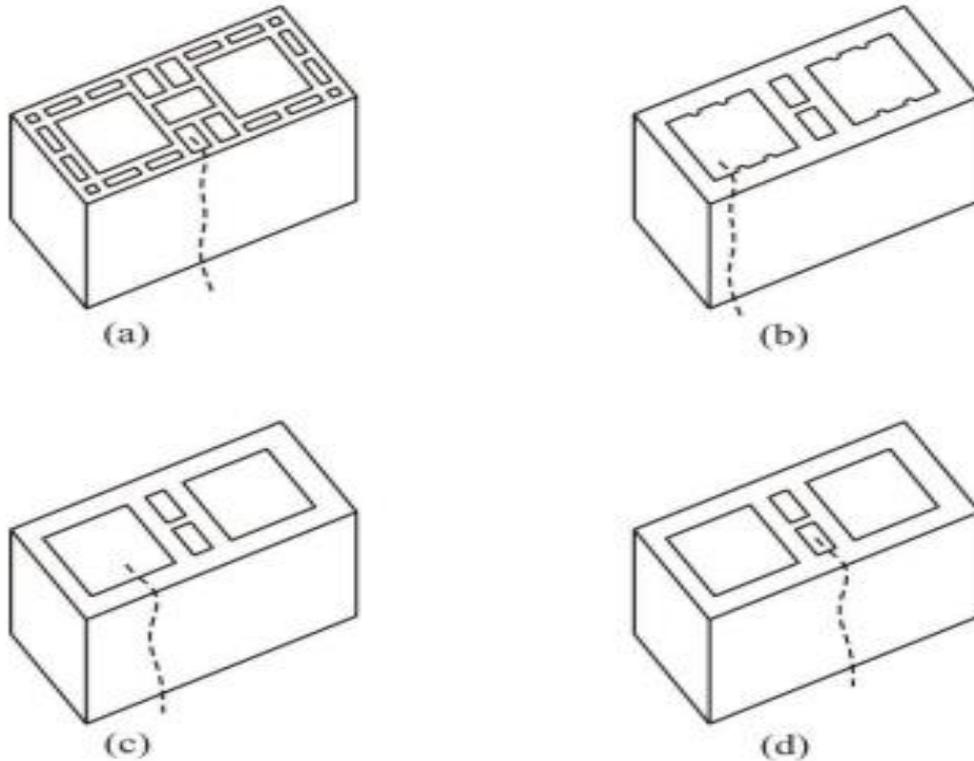


Fonte: Lima *et al.* (2018).

De acordo com os resultados obtidos, todos os corpos de prova atenderam aos critérios analisados. Os autores destacam maior capacidade isolante no bloco com paredes vazadas (bloco tipo a), creditada à presença de vazios nas suas paredes e septos transversais que reduzem a transmissão térmica de calor. Além disso, concluíram que os resultados sugerem que os blocos de maior resistência mecânica proporcionaram maior isolamento térmico, uma vez que os blocos tipo b, c e d possuem a mesma geometria, apenas com variação da classe de resistência e o bloco tipo b apresentou o pior desempenho quanto ao isolamento.

Observou-se, também, que nenhuma pequena parede apresentou deslocamentos excessivos que pudessem causar o colapso estrutural e que, em todos os testes realizados, percebeu-se um destacamento do revestimento interno aplicado na face exposta ao fogo, grande deterioração da argamassa de assentamento e fissuração nos blocos das pequenas paredes, aspectos representados na Figura 3.27.

Figura 3.27 – Padrões de fissuração presentes nos ensaios de Lima *et al.* (2018) para cada tipo de bloco.



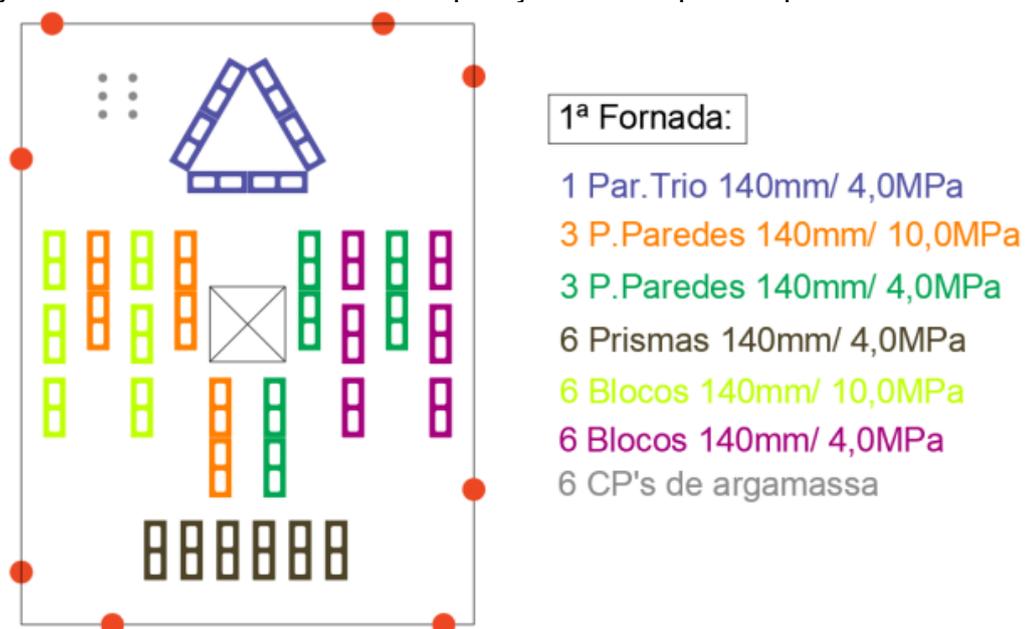
Fonte: Lima *et al.* (2018).

3.4.7 Em Dupim (2019):

Ensaíram-se blocos, prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto em situação de incêndio, com o intuito de avaliar a resistência residual de compressão desses elementos, em forno horizontal. Os blocos de concreto utilizados possuíam resistências características de 4,0 e 10,0 MPa e espessura de 14 cm. Em temperatura ambiente, ensaiou paredes com espessura de 19 cm.

Inicialmente, realizou-se a caracterização de blocos, meios-blocos, prismas e pequenas paredes, em temperatura ambiente. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos a uma simulação de incêndio-padrão normalizado pela ISO 834-1 (ISO, 1999); na primeira fornada (Figura 3.28), foram avaliados os elementos de 140 mm sem revestimento submetidos à ação do fogo por 70 minutos, chegando à temperatura máxima de 980°C e, na segunda fornada, todos os elementos revestidos com uma camada de 5 mm de gesso.

Figura 3.28 – Características e disposição dos corpos de prova da 1ª fornada.



Fonte: Dupim (2019).

Para evitar a entrada de calor no trio, Dupim (2019) inseriu, lateralmente, manta cerâmica nos encontros entre as paredes, bem como, cobriu com placa de gesso e manta cerâmica, a superfície superior de todos os elementos. O esquema é apresentado na Figura 3.29.

Figura 3.29 – Isolamento com manta cerâmica nos elementos analisados.

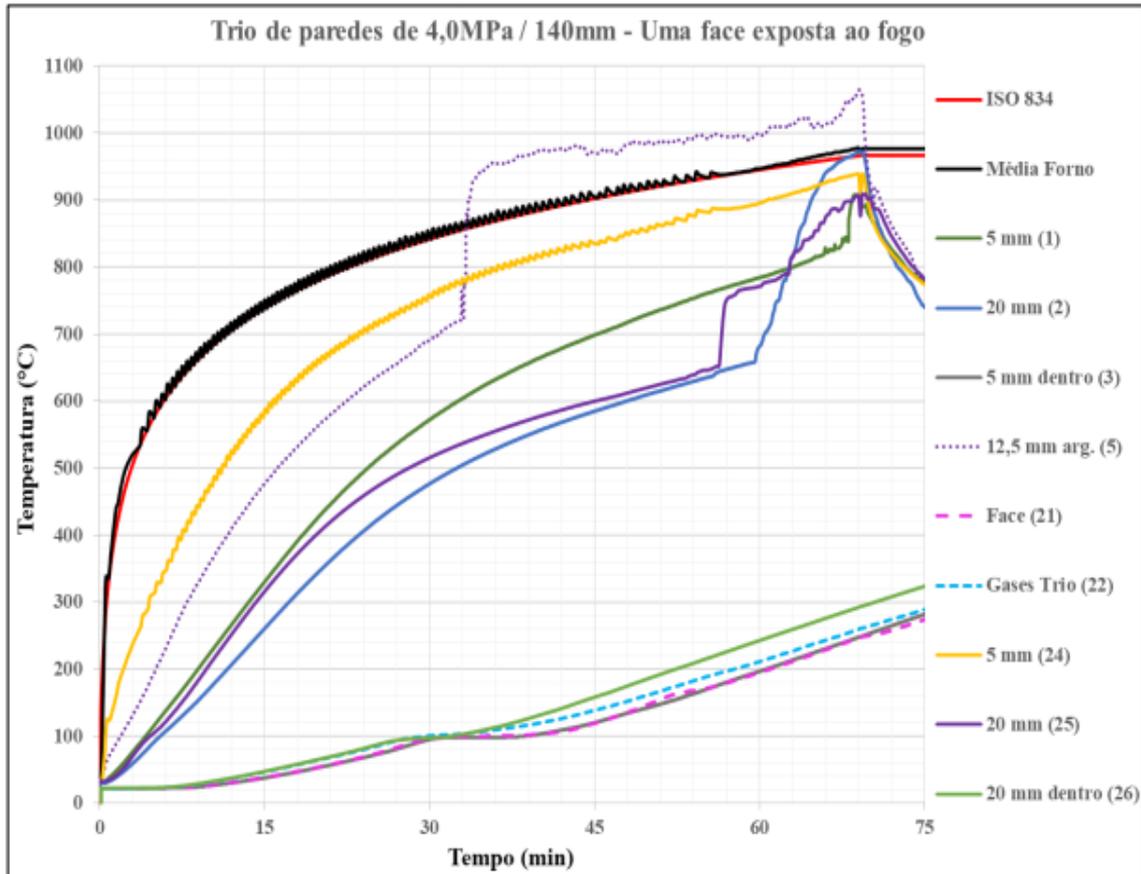


Fonte: Dupim (2019).

A eficiência desse esquema é demonstrada com temperaturas mais elevadas nos pontos mais externos do trio de pequenas paredes e com temperaturas menores

nos pontos do lado interno (dentro), evidenciando que, durante os 70 minutos de execução da simulação e incêndio-padrão, não houve entrada de gases quentes pelas frestas (Figura 3.30).

Figura 3.30 – Gráfico das curvas de temperatura em função do tempo para os trios de paredes ensaiados.

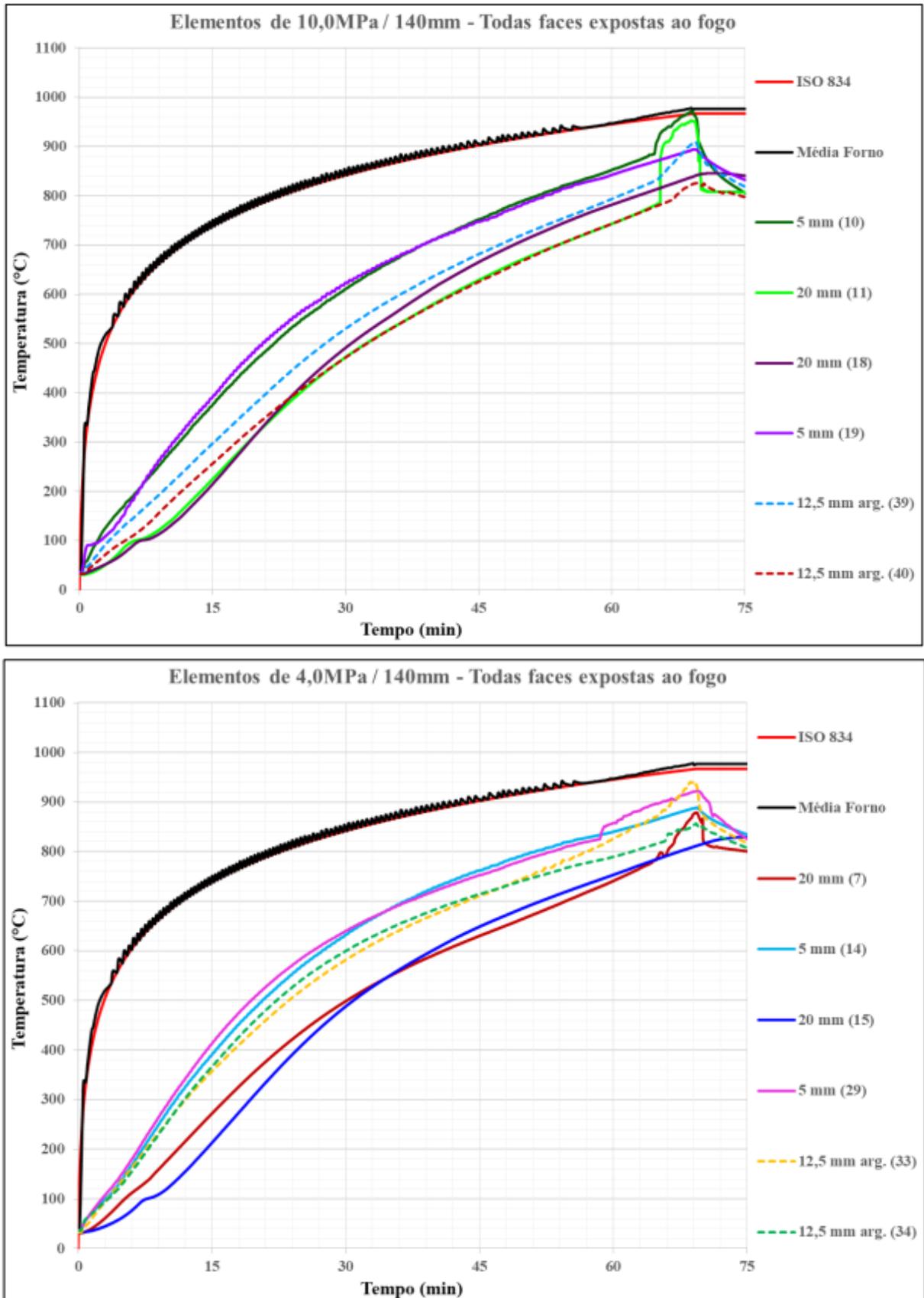


Fonte: Dupim (2019).

Para a apresentação de todos os resultados, foram selecionadas as curvas com resultados mais condizentes com o tipo de comportamento esperado para inserção nesses gráficos. Os desvios, supõe Dupim (2019), são em virtude do possível contato da instrumentação com os gases quentes do forno, bem como por alguns termopares terem perdido suas medições após o início do ensaio.

Na Figura 3.31, apresentam-se as curvas de temperatura dos termopares obtidos em Dupim (2019).

Figura 3.31 – Gráficos das curvas de temperatura em função do tempo para os corpos de prova ensaiados.



Fonte: Dupim (2019).

Observa-se que, para uma mesma profundidade de colocação dos termopares, os resultados entre pequenas paredes e as unidades foram muito próximos, refletindo o bom posicionamento dos corpos de prova e a distribuição satisfatoriamente homogênea do calor no forno do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).

Os trios de paredes atingiram o critério de isolamento térmico com o tempo de 61 minutos, porém, não atingiram o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) máximo que é de 120 minutos. Uma vez que os trios não foram submetidos a carregamentos mecânicos durante o aquecimento, o comportamento da alvenaria se torna mais crítico do que aquele encontrado nas edificações. Isso ocorre, pois o concreto estrutural, sob altas temperaturas e sem restrições de deslocamentos causadas pelas ligações das estruturas, tem suas propriedades resistentes comprometidas (Mehta; Monteiro, 1997).

Ressalta-se que, na disposição realizada por Dupim (2019), apesar de não haver exposição ao fogo na face protegida, ocorre o confinamento de gases quentes no interior do trio de paredes, em virtude da própria transferência de calor ao longo da seção transversal, tornando a situação mais crítica do que com paredes com apenas uma face exposta (como é feito em alguns ensaios com fornos verticais), pois a troca de calor diretamente com o ambiente reduziria a temperatura nessa face.

Na sequência, após resfriamento lento até a temperatura ambiente, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples para avaliar a relação entre a resistência pós-fogo e à temperatura ambiente (resistência residual) de compressão dos blocos, prismas e pequenas paredes.

As pequenas paredes sem revestimento e com resistência característica de 4,0 MPa, para a situação com exposição ao fogo, em todas as faces, durante 7 minutos, obtiveram resistência residual de 14%; enquanto que, com exposição em uma única face, foi de 46%. Para paredes com resistência característica de 10,0 MPa, o valor obtido, considerando fogo em ambas as faces, foi de 13%.

Na segunda fornada, Dupim (2019) ensaiou elementos com revestimento de 5 mm de gesso de ambas as classes de resistência estudadas, 4,0 e 10,0 MPa, com espessura de 140 mm. Os corpos de prova foram submetidos à ação do fogo por 120 minutos, contudo, sem a presença de trio de paredes. As pequenas paredes com resistência característica de 4,0 MPa obtiveram resistência residual de 11%, enquanto

as paredes com resistência característica de 10 MPa obtiveram resistência residual de 4%.

3.4.8 Em Carvalho (2019):

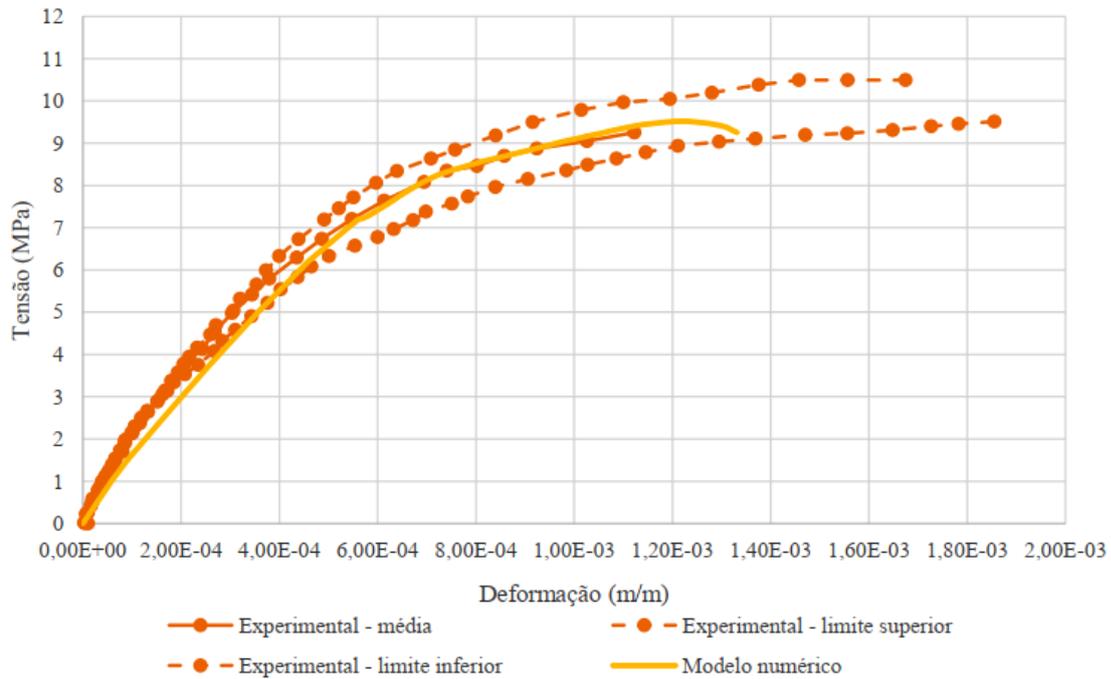
Propõem-se e analisam-se modelos numéricos estruturais e térmicos de pequenas paredes de blocos de concreto, validados com base em trabalhos experimentais. A partir dos resultados, foi feita uma análise qualitativa do comportamento termoestrutural das paredes sob diferentes condições de contorno e níveis de carregamento.

Inicialmente, para definir as estratégias de modelagem para as pequenas paredes, foram modelados prismas de três blocos de concreto, conforme Rodovalho (2018), reduzindo o esforço computacional e permitindo um maior número de análises. Utilizou-se micromodelagem, separando bloco, junta de argamassa e placas, com elementos finitos tridimensionais C3D8R do software ABAQUS. Malhas de 1,0 cm foram usadas nos modelos estruturais e térmicos, e de 1,5 cm nos modelos termoestruturais, devido ao maior custo computacional. Placas de reação superior e inferior de 2 cm foram adotadas para simular os ensaios e permitir deslizamentos entre as superfícies conectadas.

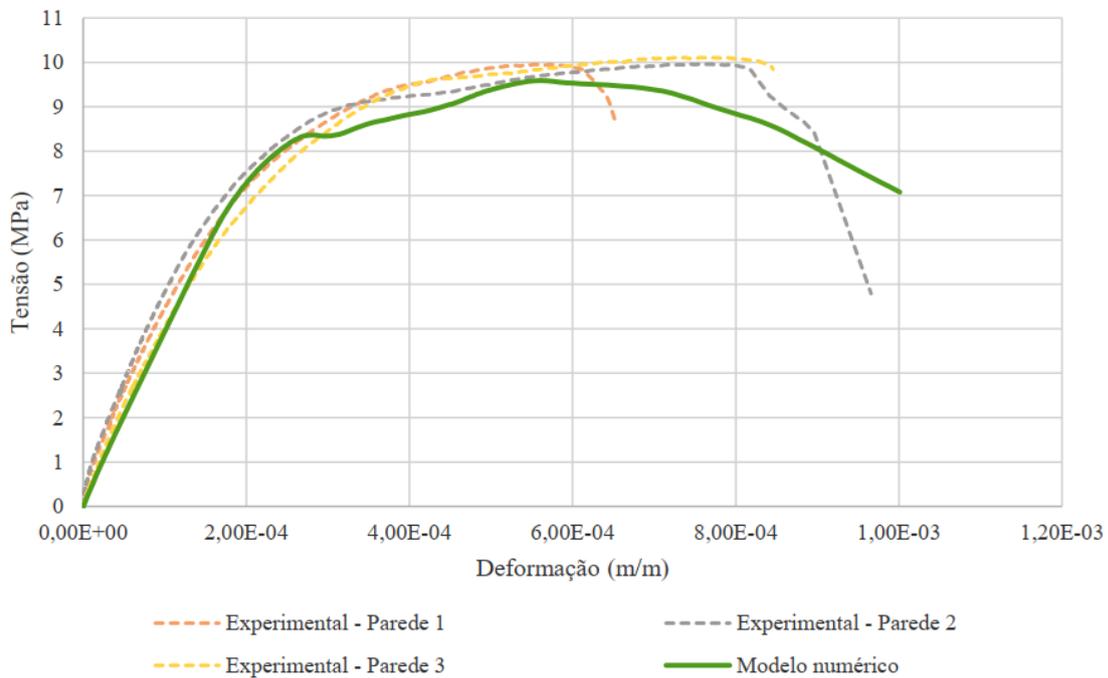
A validação dos modelos foi baseada nos trabalhos experimentais de Oliveira (2014), Izquierdo (2015) e Dupim (2019). As propriedades mecânicas da argamassa e dos blocos foram extraídas desses ensaios. O modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) foi usado no *software* ABAQUS para inserir dados de compressão e tração, com deformações inelásticas calculadas conforme Guo (2014).

O modelo numérico baseado nos ensaios de Oliveira (2014) apresentou diferenças inferiores a 10% em relação ao valor médio experimental de tensão e deformação, demonstrando um bom comportamento numérico dentro dos limites experimentais (Figura 3.32a).

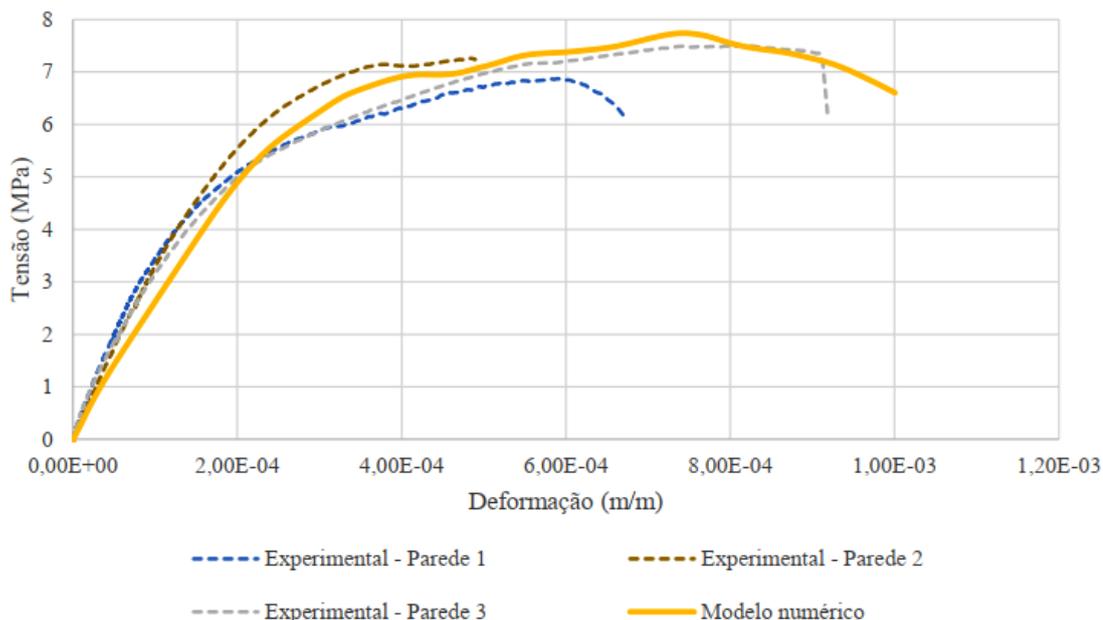
Figura 3.32 – Comparação da curva tensão-deformação entre os valores experimentais e numérico.



(a) Para os modelos baseados em Oliveira (2014) de paredes de 14 cm e argamassamento parcial.



(b) Para os modelos baseados em Dupim (2019) de paredes de 14 cm e argamassamento total.



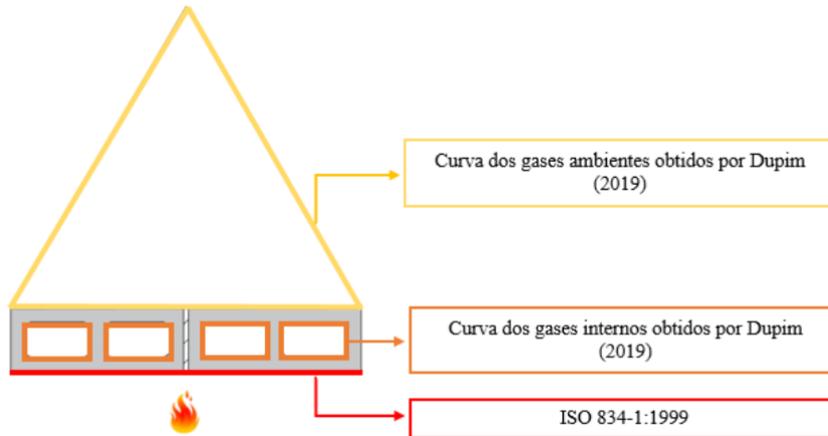
(c) Para os ensaios de Dupim (2019) de paredes de 19 cm e argamassamento total.
Fonte: Carvalho (2019).

O modelo baseado nos ensaios de Dupim (2019), com paredes de 14 cm de espessura, apresentou diferenças inferiores a 10% em relação ao valor médio de tensão no pico e a deformação ficou entre os três resultados experimentais obtidos. Graficamente (Figura 3.32b), o modelo seguiu a tendência experimental até a ruptura, mantendo-se, na maior parte da deformação, dentro dos limites experimentais, indicando um bom comportamento numérico.

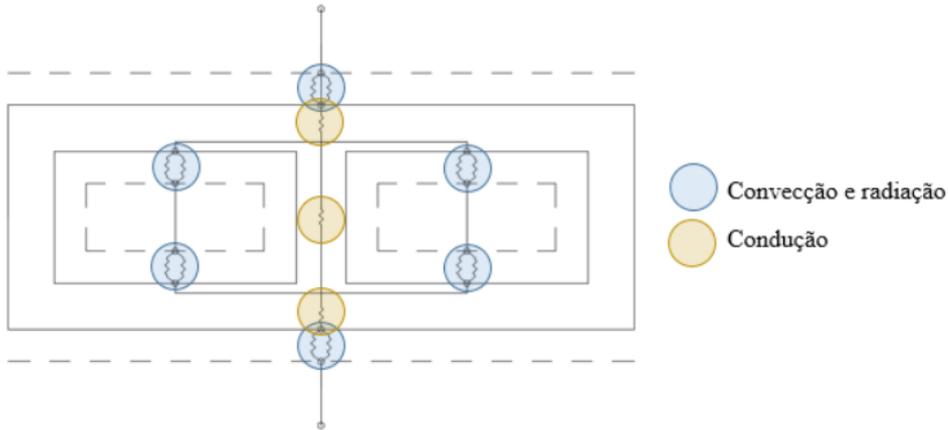
Para as paredes de 19 cm de espessura, o modelo também se aproximou dos valores experimentais de pico de tensão, e a deformação ficou intermediária entre os resultados, com maior proximidade à Parede 3. Graficamente (Figura 3.32c), o comportamento foi similar, com o modelo seguindo a tendência até a ruptura e permanecendo, na maior parte da deformação, dentro dos limites dos ensaios, sugerindo novamente um bom desempenho numérico.

Em seguida, foram realizadas modelagens numéricas para análise térmica, utilizando os mesmos elementos finitos do modelo estrutural, com o elemento C3D8 sendo renomeado como DC3D8 para a análise térmica, que considera a difusão de calor. As condições de contorno adotadas são apresentadas na Figura 3.33 e as propriedades térmicas dos materiais seguiram as proposições de Rosemann (2011), Oliveira (2014), Dupim (2019), Eurocode 2 e 6 (CEN 1999, 2005a, 2005b).

Figura 3.33 – Condições de contorno adotadas por Carvalho (2019).



(a) Consideração quanto à contribuição para o aumento de temperatura dos gases.



(b) Considerações acerca da transferência de calor.

Nomenclatura	Condição de contorno	
	Superior	Inferior
CD1	Liberado deslocamento vertical e lateral na direção do fogo e giro perpendicular ao plano da parede	Engastado
CD2	Liberado deslocamento vertical e giro perpendicular ao plano da parede	Liberado giro perpendicular ao plano da parede

(c) Restrições para os modelos baseados em Dupim (2019).

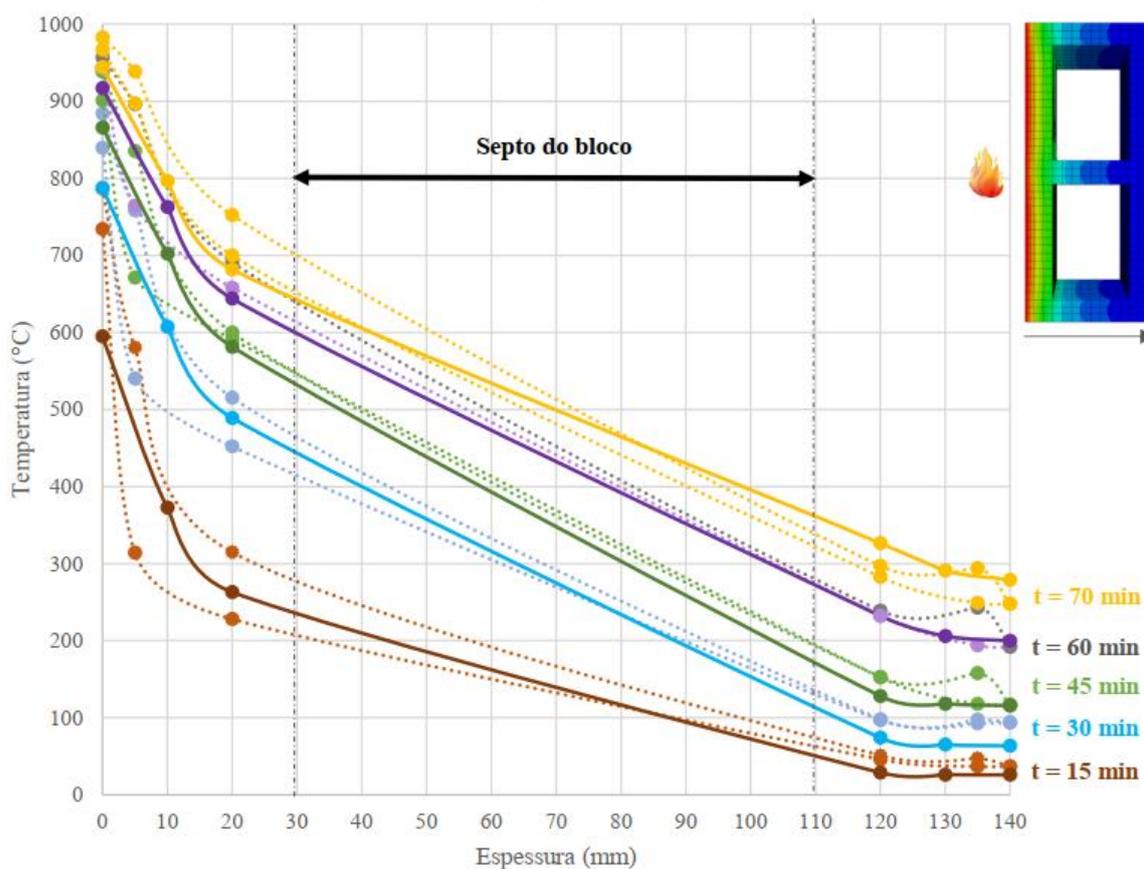
Nomenclatura	Condição de contorno	
	Superior	Inferior
CC1	Liberado deslocamento vertical	Engastado
CC2	Liberado deslocamento vertical e giro perpendicular ao plano da parede	Engastado
CC3	Liberado deslocamento vertical e giro perpendicular ao plano da parede	Liberado giro perpendicular ao plano da parede

(d) Restrições para os modelos baseados em Lopes *et al.* (2018).

Fonte: Carvalho (2019).

Os resultados apresentados na Figura 3.34, mostram que as linhas tracejadas correspondem aos valores experimentais, enquanto as linhas cheias referem-se aos valores numéricos para os tempos de incêndio indicados. Nos ensaios de Dupim (2019), as medições experimentais foram feitas a 5, 20, 120 e 135 mm da face exposta ao fogo, em blocos de 140 mm de espessura. O modelo numérico apresentou melhor desempenho nas espessuras próximas à fonte de calor. Divergências observadas podem ser atribuídas a fatores como fissuras nos ensaios, incertezas experimentais, detalhamento insuficiente do modelo e a adoção de curvas normativas para propriedades dos materiais, que podem não ser representativas.

Figura 3.34 – Evolução da temperatura em função da espessura da parede de acordo com os tempos de incêndio indicados.



Fonte: Carvalho (2019).

Por fim, em Carvalho (2019), realizou-se uma análise qualitativa de um modelo termoestrutural, com base nos ensaios de Dupim (2019), para paredes sem carregamento e, em Lopes *et al.* (2018), para paredes com carregamento. O modelo termoestrutural consistiu nos campos de temperaturas obtidos no modelo térmico, inseridos no modelo estrutural, com a inclusão da propriedade da expansão térmica

dos materiais e da variação das propriedades mecânicas, em função da temperatura do material. As propriedades plásticas e de interface do modelo numérico permaneceram constantes, a redução da resistência das pequenas paredes foi baseada nas normas americana e europeia, as quais informam, para o concreto, coeficientes de minoração da resistência em função da temperatura. Já as propriedades termomecânicas dos materiais foram adotadas seguindo o descrito por Lopes *et al.* (2018), ACI/TMS 216-1-14 (ACI; TMS, 2014) e Oliveira (2014).

Para o modelo com base no trabalho de Dupim (2019), as tensões de compressão não superaram os valores de ruptura, mas as tensões de tração se aproximaram dos valores de ruptura em algumas áreas. Houve curvatura das paredes na direção do fogo, semelhante ao observado experimentalmente. As condições de contorno nos modelos CD1 e CD2 pouco alteraram a distribuição das tensões, mas as tensões máximas aproximaram-se dos valores de ruptura, sugerindo possíveis fissuras.

Diferente das análises estruturais, o modelo termoestrutural não apresentou simetria nos deslocamentos, provavelmente devido à variação de temperatura ao longo da seção transversal, causando degradação diferencial dos materiais e expansão térmica. Qualitativamente, verificou-se um acréscimo da altura da parede, conforme esperado, devido aos efeitos da expansão térmica e inexistência de restrições nessa direção.

Quanto aos resultados baseados nos ensaios de Lopes *et al.* (2018), notou-se um aumento das deformações axiais, indicando que a condição de contorno da superfície superior experimental restringe o giro, mas não é totalmente engastada. A condição de contorno CC3 mostrou-se menos alinhada com os resultados experimentais. O autor destacou que os tempos de resistência ao fogo obtidos foram relativamente baixos em comparação com o TRRF para edificações no Brasil, ressaltando a necessidade de mais estudos sobre as propriedades dos materiais nacionais e ensaios de paredes carregadas para futuras conclusões sobre o comportamento termoestrutural da alvenaria.

Discrepâncias nos resultados foram atribuídas a fatores como umidade inadequada, efeitos da escala reduzida nos agregados, espessura diferente da parede ensaiada e uso de propriedades mecânicas distintas das empregadas por Lopes *et al.* (2018), gerando incertezas no modelo numérico.

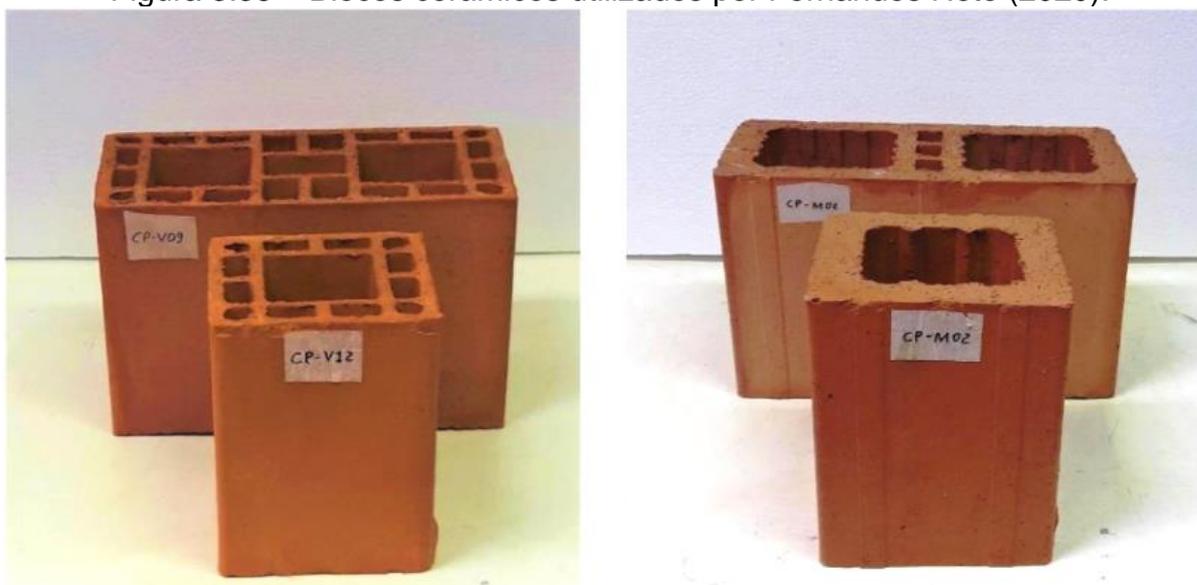
3.4.9 Em Fernandes Neto (2020):

Realizaram-se ensaios experimentais de caracterização mecânica, térmica e residual dos principais componentes, materiais e elementos da alvenaria estrutural cerâmica. Tais ensaios iniciaram com a obtenção das propriedades geométricas, físicas e mecânicas das argamassas de assentamento e revestimento, unidades cerâmicas, prismas e pequenas paredes. Em sequência, realizou-se a análise desses componentes quando submetidos à situação de incêndio, através da obtenção das curvas de elevação de temperatura ao longo da seção transversal dos elementos.

Por fim, todos os corpos de prova sujeitos à situação de incêndio na fase anterior foram submetidos a ensaios para avaliação das suas propriedades mecânicas residuais. Ademais, o autor realizou ensaios de resistência à compressão e determinação do módulo de elasticidade nos materiais e elementos estruturais, possibilitando a sua avaliação residual.

Para as unidades, foram utilizados blocos inteiros e meios-blocos de material cerâmico. Os blocos de paredes vazadas possuíam resistência nominal de 8 MPa, já os blocos com paredes externas maciças e paredes internas vazadas possuíam resistência nominal 14 MPa, ambos com dimensões nominais de 14x19x29 cm (largura x altura x comprimento), e são apresentados na Figura 3.35.

Figura 3.35 – Blocos cerâmicos utilizados por Fernandes Neto (2020).



(a) Bloco e meio bloco com paredes e septos vazados.

(b) Bloco e meio bloco com paredes maciças e septos vazados.

Fonte: Fernandes Neto (2020).

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos blocos e meio blocos, além de seus módulos de elasticidade são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade das cerâmicos em temperatura ambiente.

	Força (kN)	Resistência na A_{bruta} (MPa)	Resistência na A_{liq} (MPa)	E na A_{bruta} (GPa)	E na A_{liq} (GPa)
Blocos cerâmicos com paredes vazadas					
Média	417,35	10,26	27,92	5,76	15,68
DP	81,54	2,03	5,52	0,80	2,17
CV (%)	19,54	19,76	19,76	13,90	13,90
f_{bk}	-	6,39	17,39	-	-
Blocos cerâmicos com paredes maciças					
Média	491,12	11,90	24,34	6,62	13,54
DP	69,62	1,70	3,48	0,85	1,74
CV (%)	14,18	14,33	14,33	12,79	12,79
f_{bk}	-	8,28	16,93	-	-
(a) Blocos cerâmicos.					
	Força (kN)	Resistência na A_{bruta} (MPa)	Resistência na A_{liq} (MPa)	E na A_{bruta} (GPa)	E na A_{liq} (GPa)
Meio-blocos cerâmicos com paredes vazadas					
Média	207,17	10,60	25,64	5,07	12,26
DP	32,18	1,68	4,06	0,51	1,23
CV (%)	15,53	15,85	15,85	10,07	10,07
f_{bk}	-	8,88	21,48	-	-
Meio-blocos cerâmicos com paredes maciças					
Média	346,50	17,80	30,62	8,77	15,08
DP	39,68	2,03	3,49	0,77	1,32
CV (%)	11,45	11,42	11,42	8,73	8,73
f_{bk}	-	14,40	24,77	-	-

(b) Meios-blocos cerâmicos.
Fonte: Fernandes Neto (2020).

Relatou-se que, predominantemente, a ruptura das unidades ocorreu de maneira brusca e explosiva (devido ao comportamento frágil da cerâmica), caracterizada pelo estilhaçamento do material e formação de fissuras características, devido ao elevado confinamento provocado pela prensa hidráulica. Os prismas de dois blocos com 29 x 39 cm e pequenas paredes de cinco fiadas com 59 x 99 cm foram executados com argamassa de assentamento de traço 1:0,5:4,5 (cimento, cal e areia fina) e com juntas de argamassamento total de espessura de 10mm na horizontal e na vertical, como apresentado na Figura 3.36.

Figura 3.36 – Prismas e pequenas paredes cerâmicos ensaiados por Fernandes Neto (2020).



(a) Detalhe da junta de argamassamento total.

(b) Prismas cerâmicos de 2 blocos.



(c) Pequenas paredes cerâmicas de 5 fiadas.

Fonte: Fernandes Neto (2020).

Um resumo da resistência à compressão dos prismas e pequenas paredes, além de seus módulos de elasticidade são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos elementos de alvenaria em temperatura ambiente.

	Força (kN)	Resistência na A_{bruta} (MPa)	Resistência na A_{liq} (MPa)	E na A_{bruta} (GPa)	E na A_{liq} (GPa)
Prismas cerâmicos com blocos de paredes vazadas					
Média	244,00	6,00	16,33	5,90	16,06
DP	61,12	1,50	4,08	0,57	1,55
CV (%)	25,05	25,05	25,05	9,73	9,73
f_{pk}	-	3,18	8,66	-	-
Prismas cerâmicos com blocos de paredes maciças					
Média	404,68	9,80	20,04	6,08	12,44
DP	26,47	0,64	1,31	0,53	1,08
CV (%)	6,54	6,54	6,54	8,79	8,79
f_{pk}	-	8,39	17,16	-	-

(a) Prismas cerâmicos.

	Força (kN)	Resistência na A_{bruta} (MPa)	Resistência na A_{liq} (MPa)	E na A_{bruta} (GPa)	E na A_{liq} (GPa)
Pequenas paredes com blocos de paredes vazadas					
Média	268,70	3,25	8,86	4,71	12,46
DP	34,03	0,41	1,08	0,53	1,40
CV (%)	12,66	12,66	12,66	11,16	11,16
f_{ppk}	-	2,38	6,29	-	-
Pequenas paredes com blocos de paredes maciças					
Média	373,56	4,45	8,94	6,32	12,70
DP	17,47	0,21	0,42	1,36	2,73
CV (%)	4,68	4,68	4,68	21,45	21,45
f_{ppk}	-	3,44	6,91	-	-

(b) Pequenas paredes.

Fonte: Fernandes Neto (2020).

O modo de ruptura dos prismas foi governado principalmente pelo esmagamento da junta de argamassa de assentamento, com posterior fendilhamento dos blocos na região da interface, ocorrendo de maneira brusca em alguns prismas com blocos de paredes maciças. O autor, Fernandes Neto (2020), baseado em Mohamad (1998), justificou que a baixa resistência e a maior deformabilidade da argamassa em relação aos blocos foram responsáveis por provocar uma expansão lateral da junta, ocasionando o surgimento de tensões de tração em alguns pontos dos blocos próximos à interface, provocando o esfacelamento dos blocos e aparecimento de fissuras.

Já para as pequenas paredes, o início da ruptura foi caracterizado pelo surgimento de fissuras nas juntas vertical e horizontal da última fiada, que se propagaram ao longo da parede, interceptando os blocos. Em poucos casos, também

a presença de fissuras verticais devido às tensões de tração, nas faces laterais dos elementos, foi verificada.

Os ensaios de simulação de incêndio foram realizados seguindo a curva de incêndio-padrão proposta pela ISO 834-1 (ISO, 1999), para a avaliação do comportamento térmico dos elementos estruturais de alvenaria, são eles: argamassas de assentamento e revestimento, unidades cerâmicas, prismas e pequenas paredes isoladas e em trios. Os elementos tiveram suas faces superior e inferior isoladas com uma camada de manta térmica de fibra cerâmica para impedir a passagem de gases para o interior dos blocos, como é apresentado na Figura 3.37.

A elevação de temperatura nos prismas de alvenaria com blocos vazados de paredes externas vazadas e maciças é apresentada na Figura 3.38, já a das pequenas paredes isoladas é apresentada na Figura 3.39.

Figura 3.37 – Configuração do ensaio térmico de Fernandes Neto (2020).

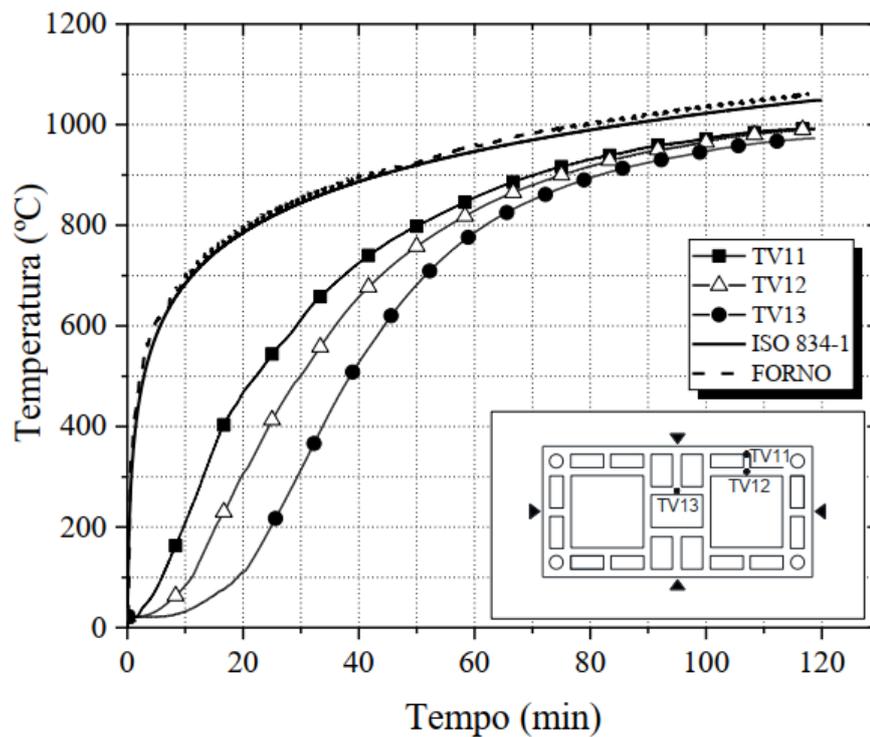


(a) Disposição dos componentes de alvenaria para ensaio térmico.

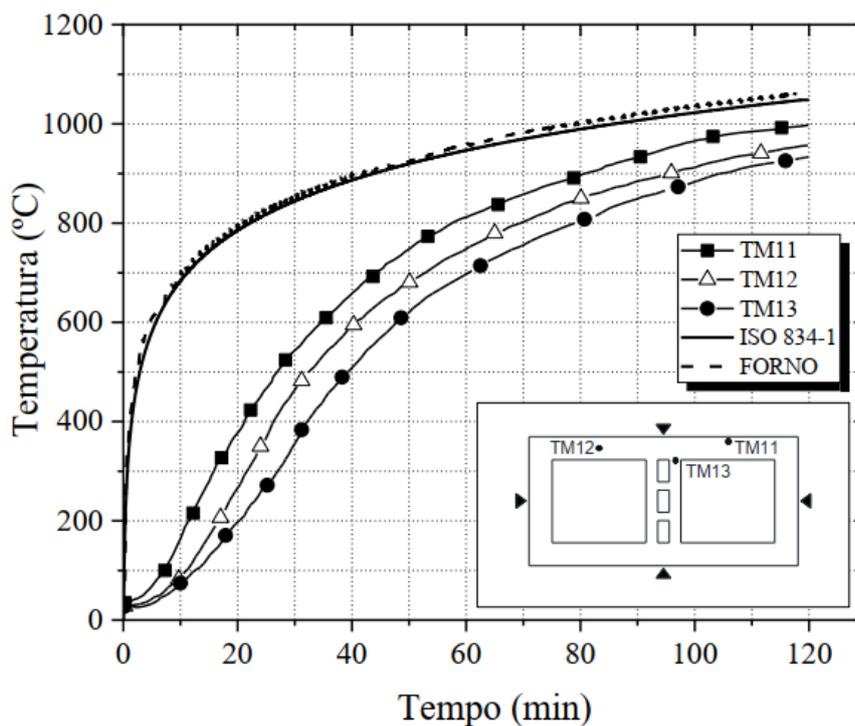


(b) Configuração das pequenas paredes isoladas e em trios para ensaio térmico.
Fonte: Fernandes Neto (2020).

Figura 3.38 – Elevação de temperatura nos prismas de alvenaria cerâmica de Fernandes Neto (2020).

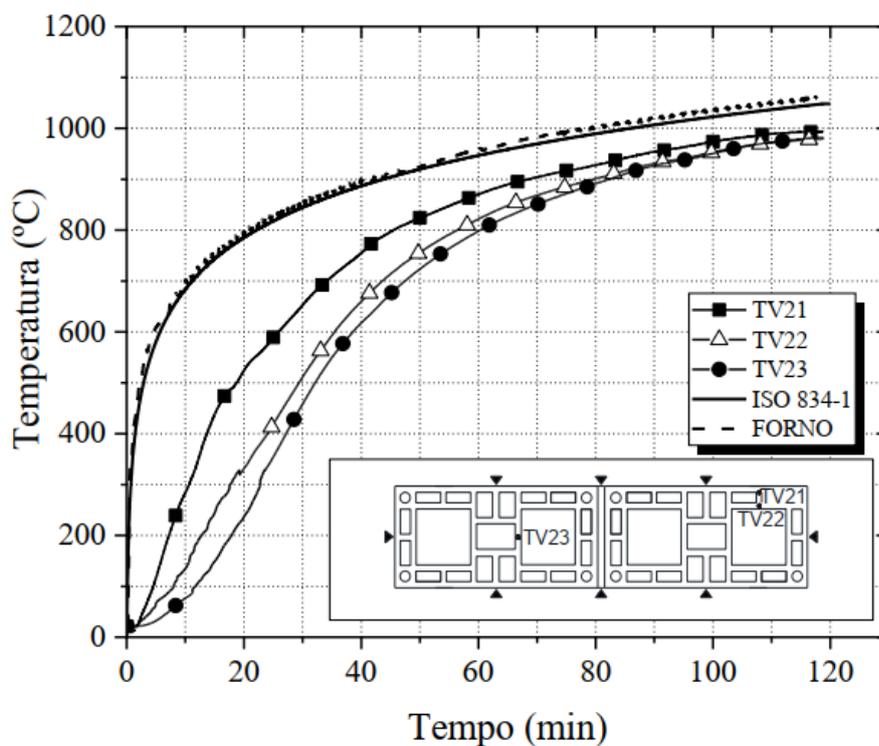


(a) Prismas de blocos vazados de paredes externas vazadas.

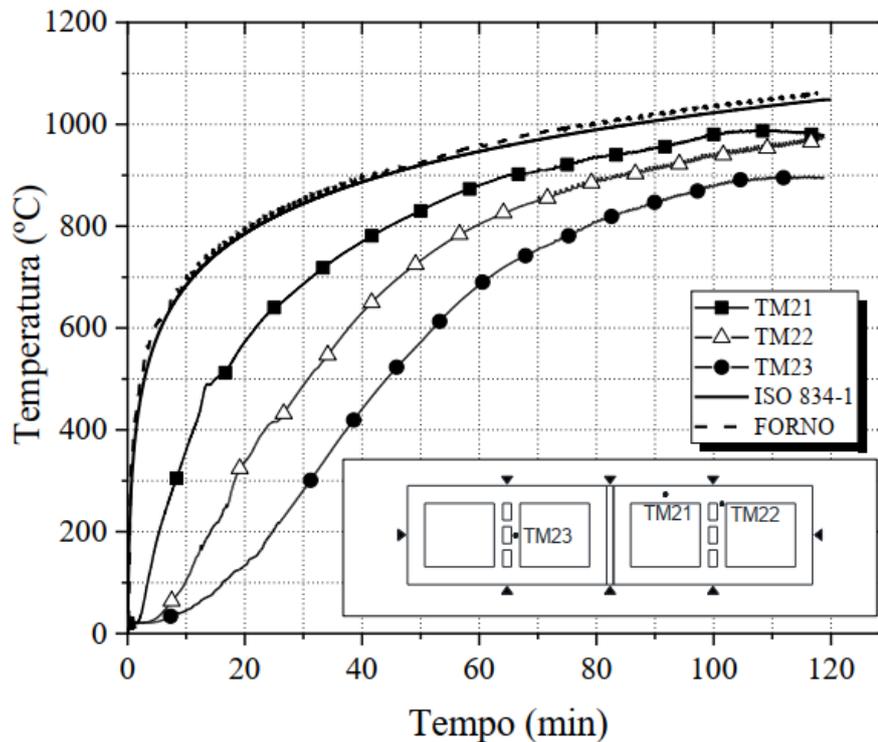


(b) Prismas de blocos vazados de paredes externas maciças.
 Fonte: Fernandes Neto (2020).

Figura 3.39 – Elevação de temperatura nas pequenas paredes isoladas de alvenaria cerâmica de Fernandes Neto (2020).



(a) Pequenas paredes de blocos vazados de paredes externas vazadas.



(b) Pequenas paredes de blocos vazados de paredes externas maciças.
Fonte: Fernandes Neto (2020).

Observou-se que, devido às pequenas dimensões de ambos os blocos isolados e prismas, a área de atuação do calor é reduzida nesses elementos, proporcionando um comportamento térmico e evolução de temperatura ao longo da seção transversal muito semelhante entre si. Todavia, notou-se que as pequenas paredes isoladas de alvenaria estrutural, em geral, apresentaram temperaturas superiores em relação aos blocos e prismas, considerando-se os mesmos pontos de instrumentação e tempo de análise. Propôs-se a justificativa de que as pequenas paredes possuem maiores dimensões e número de juntas do que os blocos e prismas, e assim sofrem a maior ação de chamas e calor, gerando uma variação de temperatura superior em suas seções transversais.

Quanto aos ensaios dos trios compartimentados, esses confirmaram de maneira qualitativa o maior grau de compartimentação e isolamento dos elementos de alvenaria constituídos por blocos de paredes maciças.

É importante destacar que, durante o ensaio, foi possível constatar alto grau de deterioração dos materiais avaliados, ocasionado pela elevação rápida de temperatura. Fissuras desenvolveram-se predominantemente na direção da altura do bloco, de forma distribuída em todas as faces de ambos os tipos de blocos. Contudo, não foram observados indícios de degradação no material cerâmico, que permaneceu

rígido e com alta dureza. Nos elementos isolados de alvenaria estrutural, a magnitude das fissuras permaneceu a mesma, adicionando-se o acréscimo da degradação das juntas de argamassa de assentamento, como mostrado na Figura 3.40.

Figura 3.40 – Aspecto superficial dos elementos isolados de alvenaria após simulação de situação de incêndio.



(a) Prismas cerâmicos.



(b) Pequenas paredes isoladas.
Fonte: Fernandes Neto (2020).

Por fim, realizaram-se ensaios mecânicos de compressão simples e módulo de elasticidade para avaliação do comportamento mecânico residual dos elementos de alvenaria com blocos cerâmicos e identificação da influência da elevação de temperatura nas propriedades residuais nesses materiais. O completo resfriamento

dos materiais foi obtido por meio da sujeição dos corpos de prova à temperatura e umidade ambientes por sete dias (até a idade dos ensaios), após a realização da respectiva simulação de incêndio-padrão (com exceção das argamassas de assentamento que foram avaliadas em três idades diferentes).

Na Tabela 3.3a, são apresentados os resultados médios e característicos referentes à caracterização mecânica dos blocos cerâmicos, após a situação de incêndio, com a resistência característica calculada, a partir das recomendações da ABNT NBR 15270-1 (ABNT, 2017a). Na Tabela 3.3b, são apresentados os resultados referentes aos prismas. E na Tabela 3.3c, são apresentados os resultados referentes às pequenas paredes.

Tabela 3.3 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade pós-incêndio.

	Força (kN)	Resistência na A_{bruta} (MPa)	Resistência na A_{liq} (MPa)	E na A_{bruta} (GPa)	E na A_{liq} (GPa)
Blocos cerâmicos com paredes vazadas					
Média	420,55	10,34	28,14	5,17	14,07
DP	73,68	1,81	4,93	1,68	4,57
CV (%)	17,52	17,52	17,52	32,53	32,53
f_{bk}	-	7,29	19,84	-	-
Blocos cerâmicos com paredes maciças					
Média	450,25	10,90	22,29	4,90	10,02
DP	95,63	2,32	4,74	1,80	3,68
CV (%)	21,24	21,24	21,24	36,69	36,69
f_{bk}	-	6,86	14,03	-	-

(a) Blocos Cerâmicos.

	Força (kN)	Resistência na A_{bruta} (MPa)	Resistência na A_{liq} (MPa)	E na A_{bruta} (GPa)	E na A_{liq} (GPa)
Pequenas paredes com blocos de paredes vazadas					
Média	268,70	3,25	8,86	4,71	12,46
DP	34,03	0,41	1,08	0,53	1,40
CV (%)	12,66	12,66	12,66	11,16	11,16
f_{ppk}	-	2,38	6,29	-	-
Pequenas paredes com blocos de paredes maciças					
Média	373,56	4,45	8,94	6,32	12,70
DP	17,47	0,21	0,42	1,36	2,73
CV (%)	4,68	4,68	4,68	21,45	21,45
f_{ppk}	-	3,44	6,91	-	-

(b) Prismas Cerâmicos.

	Força (kN)	Resistência na A_{bruta} (MPa)	Resistência na A_{liq} (MPa)	E na A_{bruta} (GPa)	E na A_{liq} (GPa)
Pequenas paredes com blocos de paredes vazadas					
Média	268,70	3,25	8,86	4,71	12,46
DP	34,03	0,41	1,08	0,53	1,40
CV (%)	12,66	12,66	12,66	11,16	11,16
f_{ppk}	-	2,38	6,29	-	-
Pequenas paredes com blocos de paredes maciças					
Média	373,56	4,45	8,94	6,32	12,70
DP	17,47	0,21	0,42	1,36	2,73
CV (%)	4,68	4,68	4,68	21,45	21,45
f_{ppk}	-	3,44	6,91	-	-

(c) Pequenas paredes isoladas.
Fonte: Fernandes Neto (2020).

As unidades cerâmicas apresentaram elevada resistência à compressão residual, mesmo após sujeitarem-se aos ensaios térmicos. Notou-se que as fissuras principais ao longo da altura dos blocos possuíram pouca influência na resistência mecânica dos mesmos, porém as horizontais geraram uma acomodação inicial do corpo de prova. Embora com a presença das aberturas de fissuras, que desmembraram por completo as unidades, acreditou-se que, devido ao nível de carregamento aplicado durante o ensaio, as placas de apoio proporcionaram um elevado confinamento aos corpos de prova, minorando a influência das fissuras.

Após discorrer sobre essas referências, salienta-se o bom comportamento mecânico e térmico da cerâmica em altas temperaturas, que, em alguns casos, é superior ao do concreto. A cerâmica, devido à sua estrutura densa e propriedades intrínsecas, apresentou uma notável resistência à deformação sob calor intenso, o que a torna uma opção viável para aplicações em ambientes com risco de incêndio. Esse desempenho superior pode ser atribuído à sua baixa condutividade térmica e à capacidade de manter a integridade estrutural em temperaturas elevadas, características que favorecem sua utilização em projetos nos quais a segurança contra incêndios é uma preocupação primordial. Além disso, o entendimento dessas propriedades pode levar à inovação na concepção de elementos estruturais que maximizam a segurança e a durabilidade das edificações.

A utilização de abordagens numéricas nos estudos apresentados é fundamental para aperfeiçoar processos e testar diferentes condições e cenários, visando à eficiência e ao melhor desempenho das estruturas analisadas. Métodos numéricos, como o Método de Elementos Finitos (MEF), permitiram simular de

maneira detalhada o comportamento das estruturas sob condições de incêndio, possibilitando uma análise mais discretizada dos efeitos térmicos e mecânicos. Com essas simulações, foi possível explorar variáveis que seriam inexequíveis ou com alto custo em ensaios experimentais, como a variação de temperaturas extremas e a aplicação de diferentes tipos de carga. A crescente presença de estudos brasileiros sobre a alvenaria estrutural em situação de incêndio reforça a relevância do tema e destaca a demanda por investigações mais abrangentes acerca das propriedades em altas temperaturas dos materiais que compõem as estruturas de alvenaria. Esse aumento na produção científica não apenas contribui para a literatura acadêmica, mas também auxilia na formulação de normas e diretrizes para a garantia de segurança e a eficiência das edificações.

4 CONSIDERAÇÕES REFERENTES ÀS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PROPOSTAS

A modelagem numérica é uma ferramenta que permite simular o comportamento de sistemas físicos complexos, através de métodos matemáticos e computacionais. Essa prática envolve a criação de equações que representam o comportamento dos sistemas ou processos em estudo, seguidas pela aplicação de técnicas numéricas para resolver essas equações de forma eficiente. A principal vantagem dessa abordagem é a capacidade de prever como sistemas complexos se comportarão em diferentes cenários, sem a necessidade de realizar experimentos físicos que podem ser custosos ou inviáveis.

Para realizar modelagens numéricas eficazes, é necessário definir parâmetros essenciais, como as equações matemáticas que descrevem o sistema, a representação da geometria do modelo analisado, as condições de contorno que estabelecem os limites do modelo, e a malha numérica que discretiza o espaço para os cálculos.

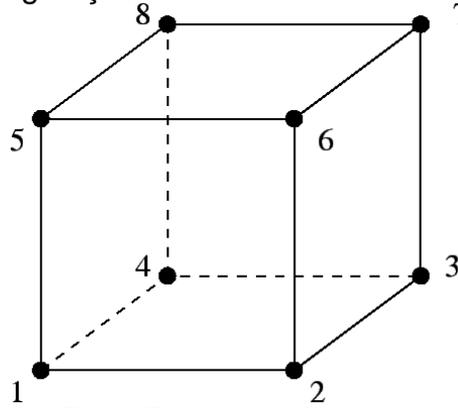
Neste capítulo, serão abordadas as considerações gerais sobre as simulações numéricas realizadas no presente estudo de prismas e de pequenas paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, incluindo os elementos finitos utilizados, a geometria dos modelos propostos, a discretização da malha adotada, os mecanismos de contato entre elementos e o modelo de plasticidade dos materiais.

Os estudos preliminares realizados para a definição dos principais parâmetros dos modelos térmicos e mecânicos são apresentados no APÊNDICE A.

4.1 Elementos finitos utilizados

Considerando a micromodelagem dos elementos analisados (modelagem individual de cada componente da alvenaria), com respeito à geometria das estruturas ensaiadas no trabalho de referência, optou-se, no modelo estrutural e termoestrutural, pelo uso do elemento finito C3D8R, disponibilizado na biblioteca interna do ABAQUS. Trata-se de elemento Sólido (Contínuo), com 3 dimensões (3D), 8 nós (aproximação linear) e Integração Reduzida, sua configuração é apresentada na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Configuração dos elementos finitos C3D8R e DC3D8.



Fonte: Elaborada pela autora.

A integração reduzida foi adotada por diminuir consideravelmente o tempo de execução, sobretudo em problemas tridimensionais (Carvalho, 2019), não comprometendo a precisão dos resultados. E elementos finitos tridimensionais lineares para obter uma análise detalhada dos estados de tensões e deformações, essencial para validar os modelos.

Analogamente, no modelo térmico, optou-se pelo uso do elemento finito DC3D8, disponibilizado na biblioteca interna do ABAQUS e voltado exclusivamente para a análise térmica e de configuração similar ao C3D8R. E o DC3D8, que é um elemento de Difusão de calor, sólido (Contínuo), com 3 dimensões (3D) e 8 nós (aproximação linear). Escolhas de elementos corroboradas nos estudos em Carvalho (2019), em Rodovalho (2018), em Santos *et al.* (2017), em Mohamad e Chen (2016) e em Ayala (2010).

4.2 Geometria dos modelos

A técnica de modelagem prevista para uso é a micromodelagem simplificada, considerando separadamente bloco, junta de argamassa e placa de aplicação de carga, para melhor compreender e representar o comportamento de cada unidade.

Para todos os modelos, a placa de aplicação de carga (placa de reação) foi adotada com a espessura de 2 cm e com largura e comprimento das mesmas dimensões externas da seção transversal do topo e base de cada modelo. Essas simplificações foram utilizadas com base nas conclusões apresentadas em Carvalho (2019), que constatou que a espessura e a presença de bordas adicionais nas placas

exerciam uma influência mínima no comportamento dos elementos. Portanto, adotar tais medidas propostas visou à otimização no tempo de processamento.

Destaca-se que a placa foi representada nos modelos térmicos, para viabilizar o fechamento dos vazados internos das estruturas, simulando as mantas térmicas ou estruturas de fechamento utilizadas nos ensaios de referência.

Para as simulações numéricas de comportamento mecânico, baseou-se na geometria proposta em Fernandes Neto (2020). Já para as simulações numéricas de comportamento térmico, além de Fernandes Neto (2020), analisaram-se também as geometrias estudadas em Nguyen *et al.* (2009) e em Rosemann (2011). Por fim, para a análise do comportamento termomecânico, além de Fernandes Neto (2020), verificou-se também a geometria dos ensaios apresentados em Lopes *et al.* (2018).

4.2.1 Para os modelos baseados em Fernandes Neto (2020):

Com base nas aferições médias da geometria dos blocos e das áreas líquidas apresentadas em Fernandes Neto (2020), os blocos de paredes externas maciças foram modelados com espessuras de 22 cm para as paredes externas, 14 cm para as paredes internas e 9 cm para os septos. Por outro lado, os blocos de paredes vazadas foram representados com espessura igual a 9 cm para as paredes externas e igual a 7 cm para os septos.

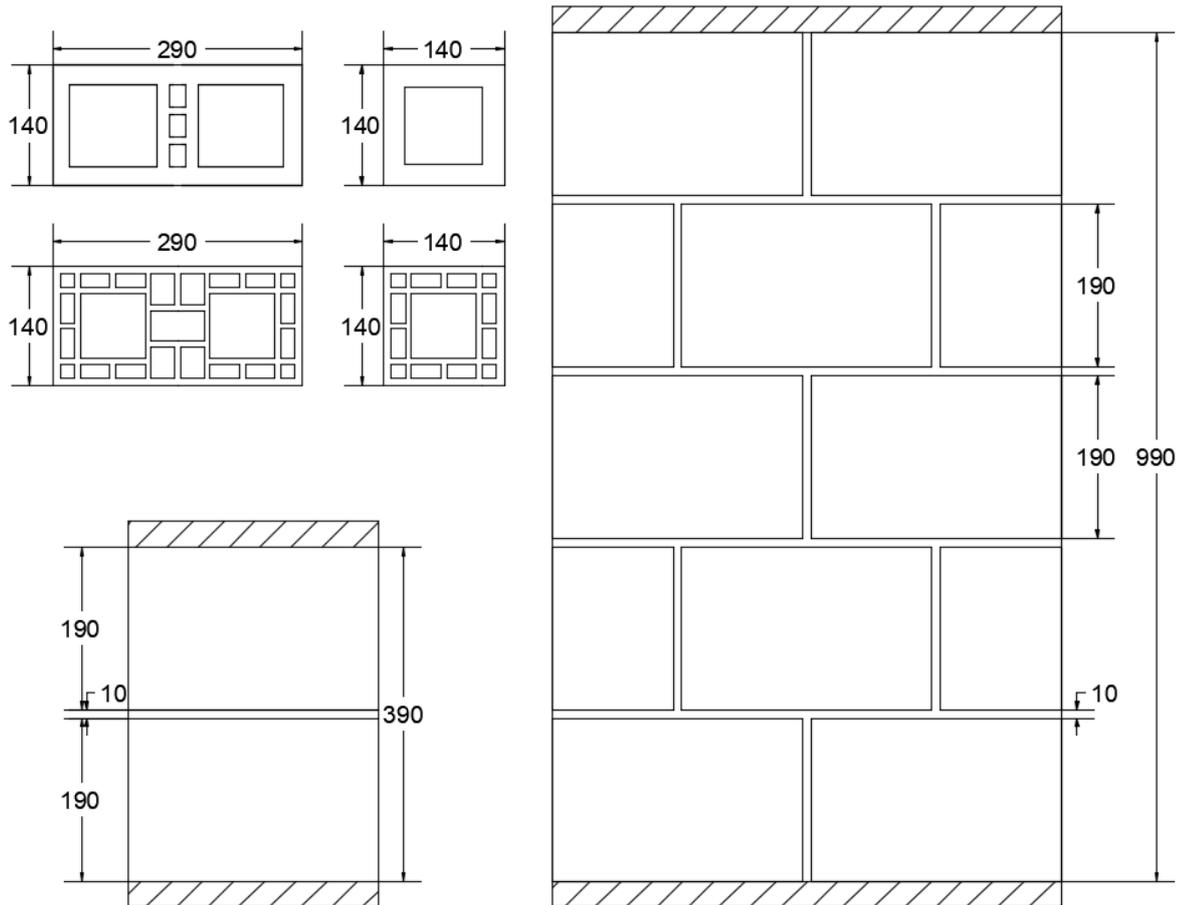
Além disso, todos os componentes foram modelados com suas dimensões nominais, uma vez que foram caracterizados experimentalmente com valores bastante próximos dos nominais, com uma diferença da ordem de 1 mm, e apresentaram um baixo desvio de esquadro, em torno de 1,5 mm (Fernandes Neto, 2020). Essa conformidade pode ser atribuída ao processo de fabricação dos blocos cerâmicos, que ocorre por extrusão em uma matriz, resultando em unidades bastante homogêneas. Ao contrário dos blocos de concreto, que frequentemente possuem um formato tronco-cônico e menor uniformidade.

Uma outra consideração importante foi a adoção de vazados com formato retangular, nas quatro extremidades dos blocos vazados, em contraposição ao formato circular, presente nos modelos experimentais. No entanto, considerando que as dimensões desses vazados são reduzidas e que os modos de falha típicos dos elementos ensaiados não ocorrem nessas regiões, além do fato de que o formato retangular permite uma malha mais regular, e que as respostas de tensão-deformação

para os modelos preliminares foram consistentes para ambas as configurações, essa adaptação foi considerada representativa dos ensaios.

As dimensões dos elementos analisados são apresentadas na Figura 4.2 e foram obtidas conforme ensaios experimentais de Fernandes Neto (2020).

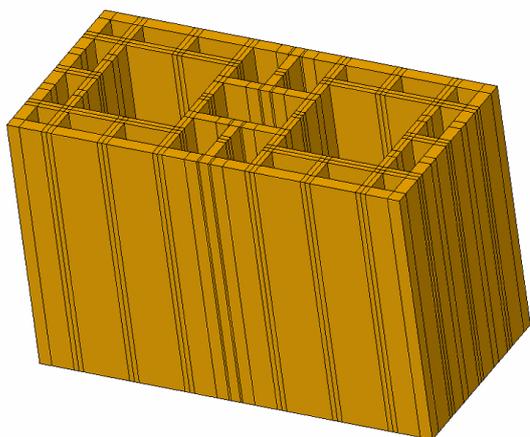
Figura 4.2 – Dimensões dos blocos, meios-blocos, prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural a serem modelados.



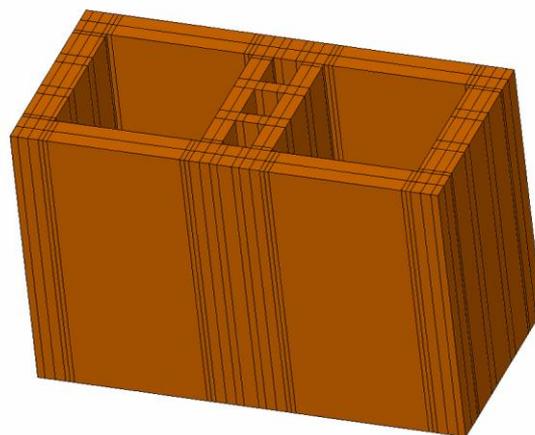
Unidades em milímetros.
Fonte: Elaborada pela autora.

Os elementos modelados são apresentados na Figura 4.3. Adicionalmente, visando a economizar tempo de processamento, optou-se por incorporar, em suas quatro faces laterais, dois planos de simetria nos modelos aquecidos, e, em apenas uma face, um plano de simetria nos modelos aquecidos. Essa adaptação também foi aceita como representativa dos ensaios, uma vez que apresentaram respostas de tensão-deformação e campo térmico consistentes para ambas as configurações com e sem simetria.

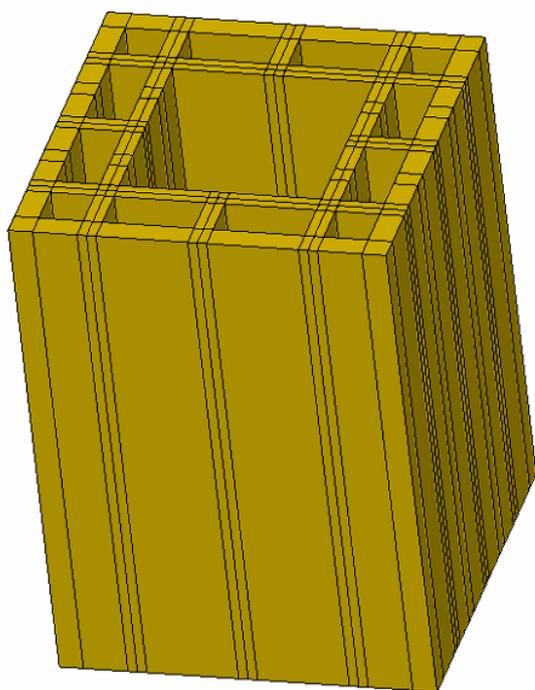
Figura 4.3 – Geometria dos componentes e elementos de alvenaria estrutural modelados.



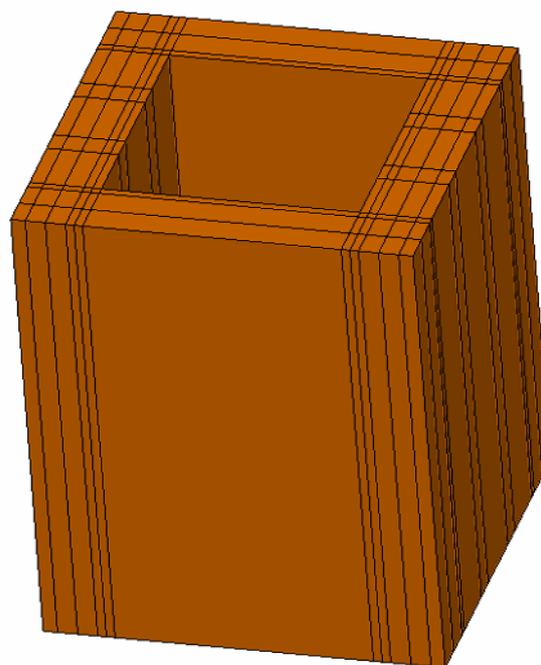
(a) Bloco de parede vazada.



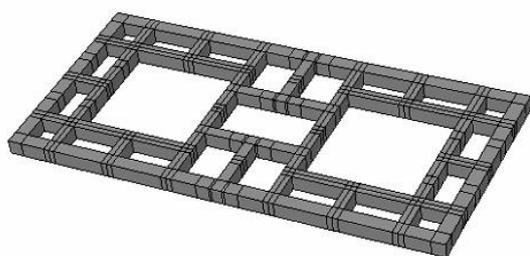
(b) Bloco de parede maciça.



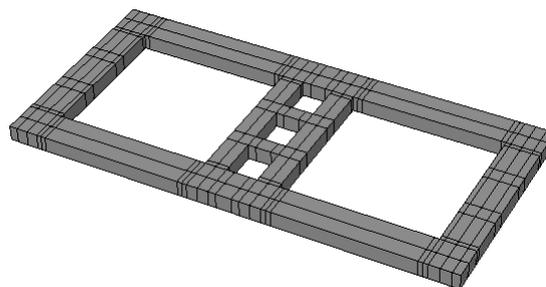
(c) Meio bloco de parede vazada.



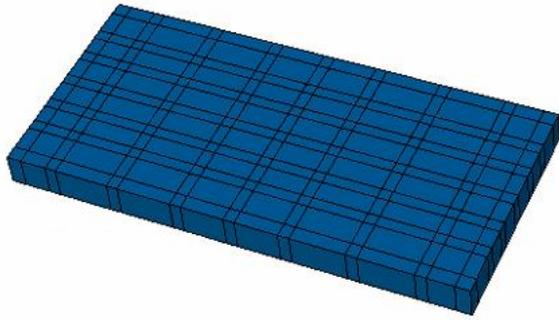
(d) Meio bloco de parede maciça.



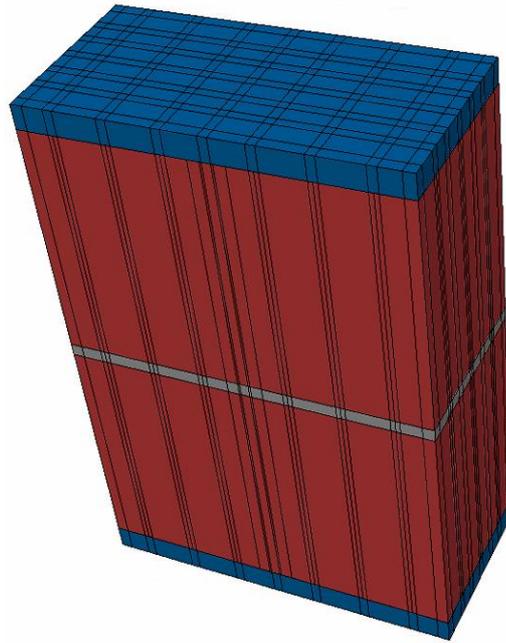
(e) Argamassa para bloco de parede vazada.



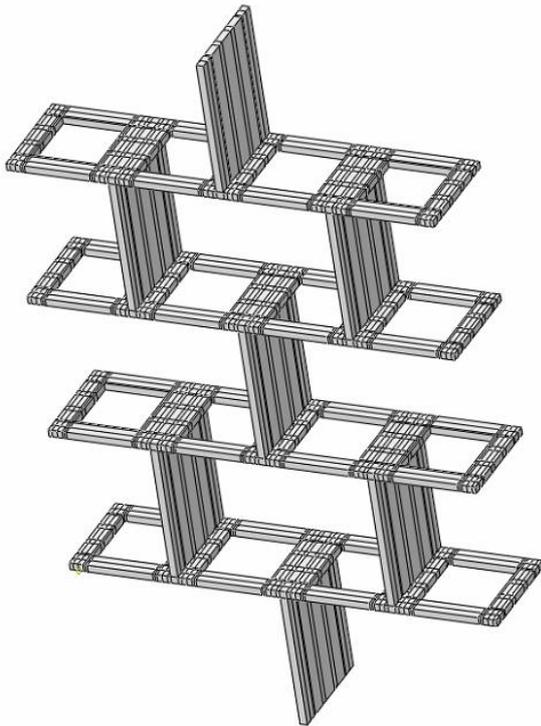
(f) Argamassa para bloco de parede maciça.



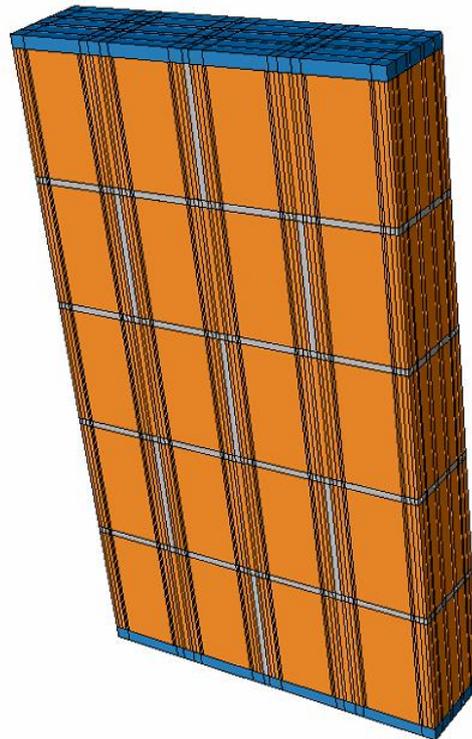
(g) Placa de reação.



(h) Prismas.



(i) Argamassa para pequenas paredes de blocos de parede maciça.



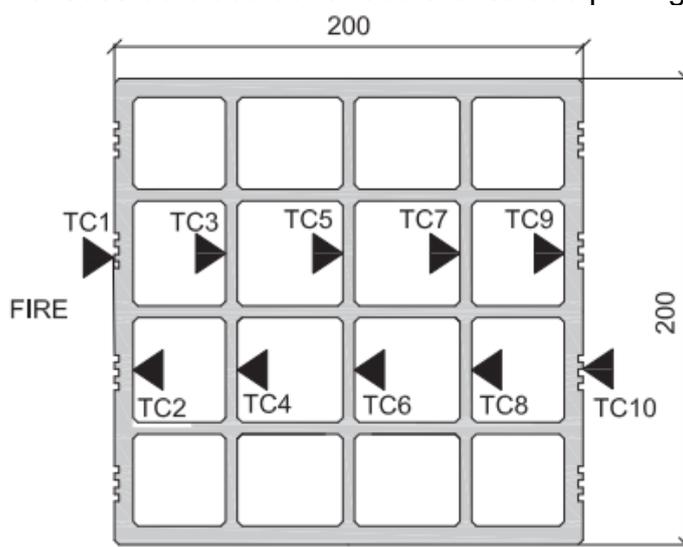
(j) Pequenas paredes.

Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.2 Para os modelos baseados em Nguyen et al. (2009):

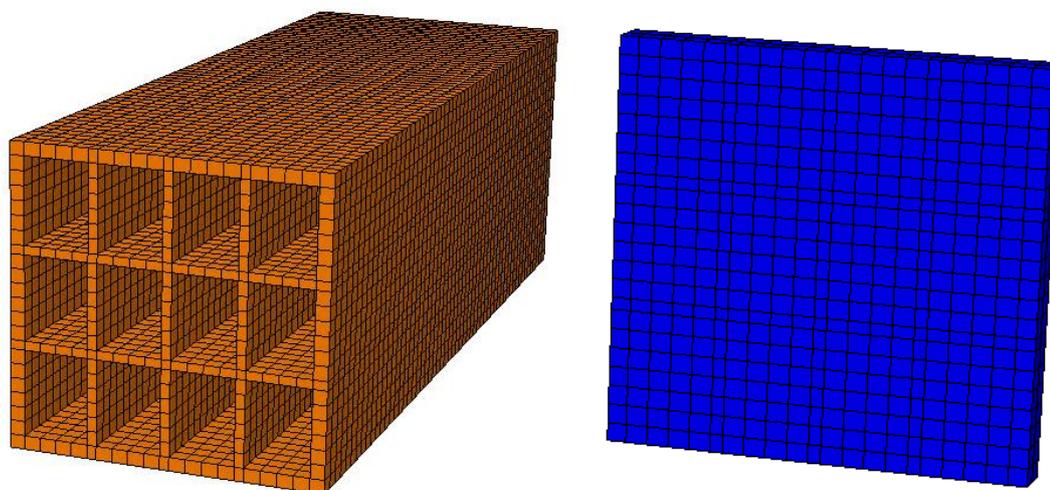
O bloco cerâmico de terracota submetido a análises experimentais por Nguyen et al. (2009) possui três fileiras e quatro colunas de células horizontais. As dimensões do bloco são 200 mm x 200 mm x 570 mm, com partições externas de 9 mm de espessura e partições internas de 6 mm de espessura. A geometria é apresentada na Figura 4.4. O elemento modelado é apresentado na Figura 4.5.

Figura 4.4 – Dimensões do bloco de terracota ensaiado por Nguyen et al. (2009).



Unidades em milímetros.
Fonte: Nguyen e Meftah (2012).

Figura 4.5 – Componentes modelados baseados em Nguyen et al. (2009).



(a) Bloco.

(b) Placa para fechamento dos vazados.

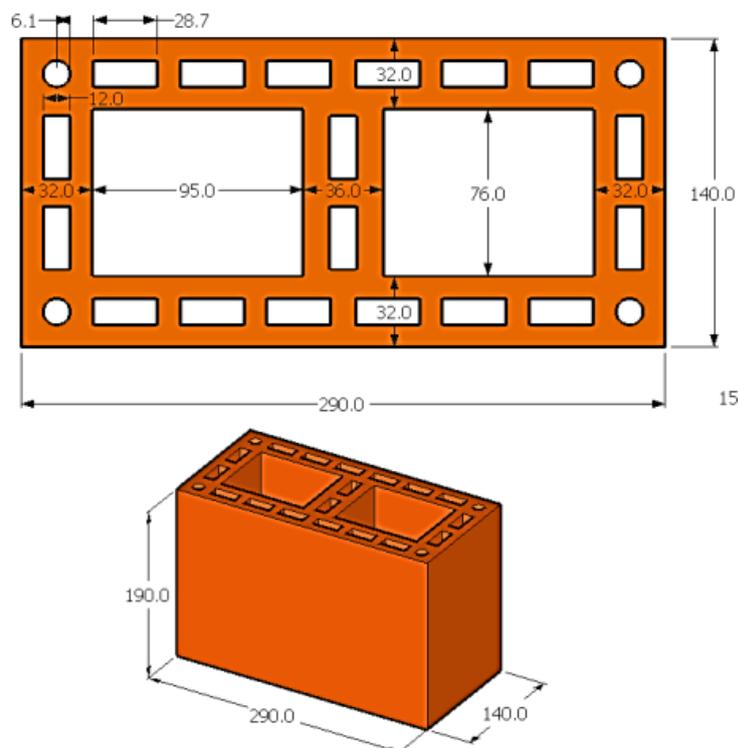
Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.3 Para os modelos baseados em Rosemann (2011):

O campo térmico desenvolvido nas paredes foi representado por meio de um bloco, pois o fluxo de calor medido experimentalmente ocorreu na direção transversal da amostra; não foram representadas as juntas de argamassa; e as dimensões dos pequenos vazados foram estimadas conforme o percentual total de vazios, de 52%, seguindo a metodologia adotada nos estudos de Rodovalho (2018), que também analisou os experimentos de Rosemann (2011).

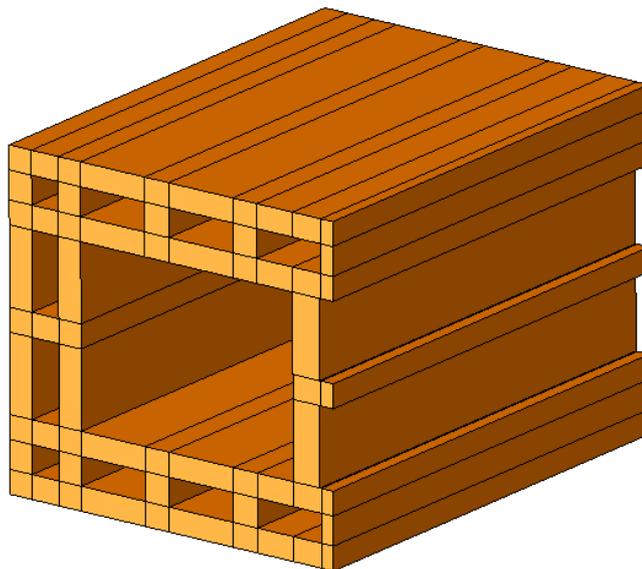
A geometria e as dimensões do bloco cerâmico utilizados nas simulações de Rodovalho (2018) são apresentados na Figura 4.6. Adotou-se a simplificação de modelagem de representação do vazado circular, em formato quadrado, com a dimensão de lado igual ao diâmetro do vazado circular; bem como, optou-se pela modelagem de apenas metade do bloco, com aplicação da simetria na direção transversal (Figura 4.7), em atenção à economia de tempo de processamento.

Figura 4.6 – Geometria proposta por Rodovalho (2018).



Fonte: Adaptada de Rodovalho (2018).

Figura 4.7 – Geometria adotada no presente trabalho baseada em Rosemann (2011) e Rodvalho (2018).

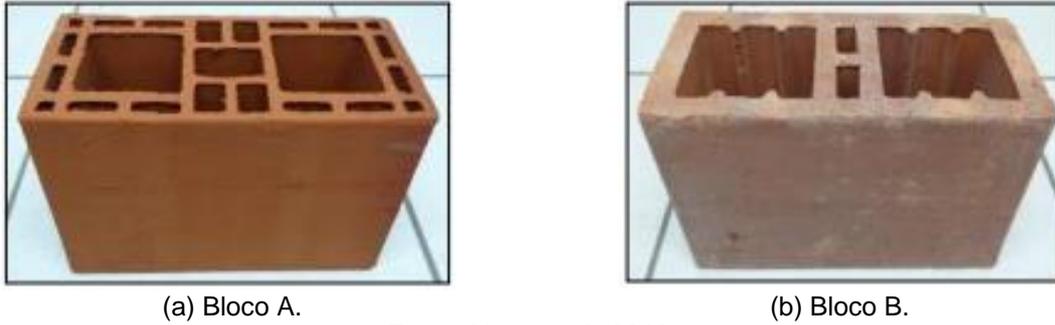


Fonte: Elaborada pela autora.

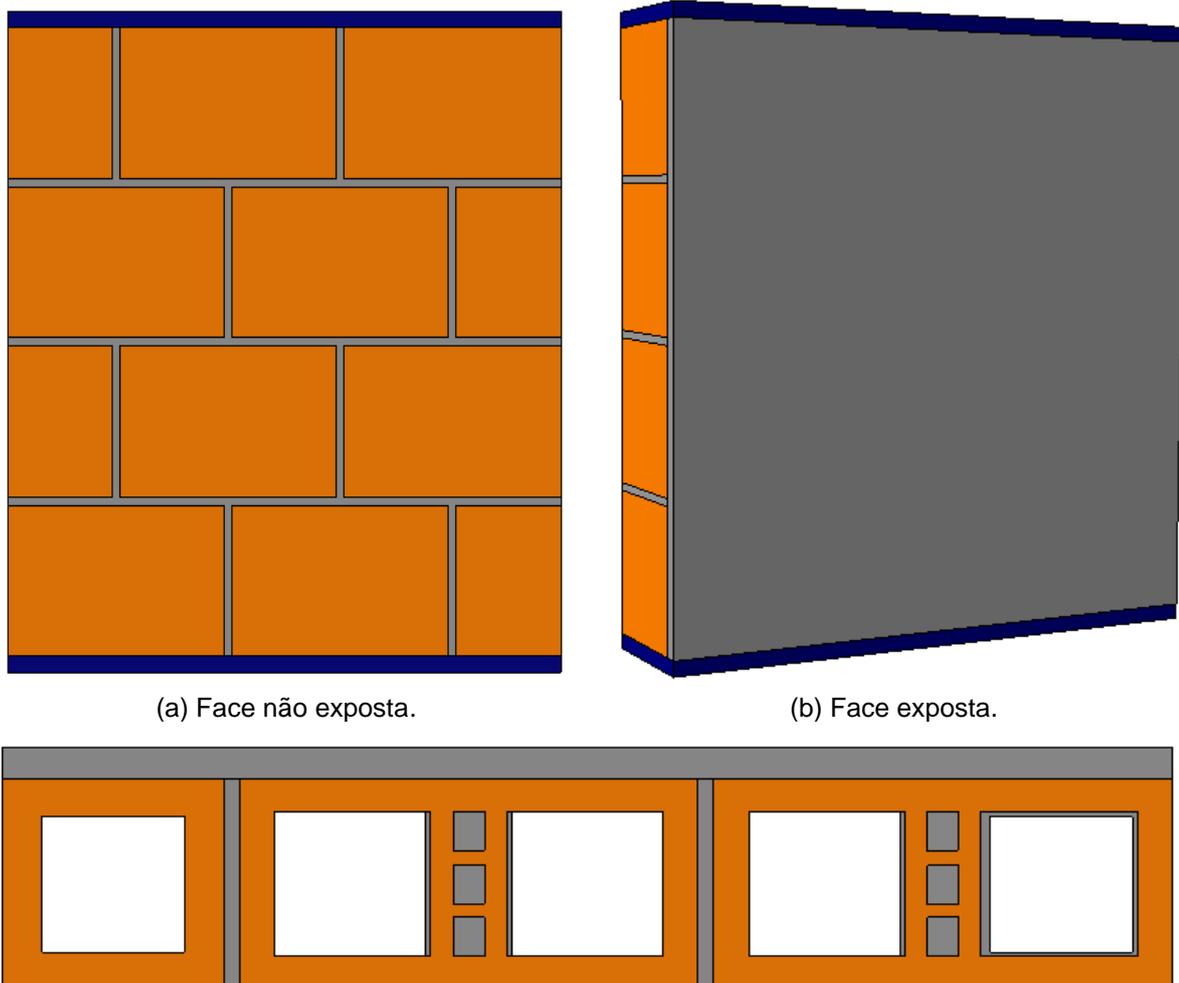
4.2.4 Para os modelos baseados em Lima *et al.* (2018):

Os blocos utilizados nos painéis de alvenaria possuem dimensões de 150 mm x 200 mm x 300 mm (largura x altura x comprimento). Os painéis foram construídos com dois blocos e meio de comprimento e quatro blocos de altura, resultando em dimensões finais de 75 cm (comprimento) e 80 cm (altura). A espessura das juntas de assentamento é de 1,0 cm, e a superfície externa dos painéis foi revestida com uma camada de acabamento de 2,0 cm de espessura sobre uma camada de chapisco, enquanto a superfície interna recebeu uma camada de acabamento de 1,0 cm diretamente sobre os blocos.

Entre as configurações propostas em Lima *et al.* (2018), considerou-se para o presente trabalho os blocos denominados “A” e “B” pelos autores (Figura 4.8). O bloco A apresenta paredes longitudinais e transversais vazadas, com um septo central duplo também vazado. As superfícies internas e externas do bloco são lisas. Já o bloco B possui paredes longitudinais e transversais maciças, com um septo central duplo vazado, cuja espessura é equivalente à das demais paredes do bloco. O bloco B, diferentemente do bloco A, apresenta sulcos nas superfícies internas e cavidades. Para o presente trabalho, por simplificação, adotou-se a mesma configuração dos blocos baseados em Fernandes Neto (2020), apresentados na Figura 4.2 e na Figura 4.3.

Figura 4.8 – Configuração dos Blocos A e B ensaiados em Lima *et al.* (2018).Fonte: Lima *et al.* (2018).

Apresentam-se, na Figura 4.9, os elementos modelados no presente trabalho baseados em Lima *et al.* (2018).

Figura 4.9 – Elementos modelados baseados em Lima *et al.* (2018).

(c) Seção transversal pequena parede com blocos maciços – vista superior com placas de reação suprimidas.

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3 Discretização da malha

Para a definição das malhas a serem utilizadas nas estruturas de alvenaria com blocos cerâmicos, foram realizadas análises iniciais nos prismas de dois blocos e 1cm de argamassamento total, devido ao menor esforço computacional, o que permitiu análises preliminares com maior velocidade e assertividade. Assim, entende-se que as definições subsequentes podem ser estendidas às pequenas paredes, uma vez que não estão diretamente relacionadas ao comportamento específico das paredes, mas sim à definição de parâmetros para a modelagem numérica.

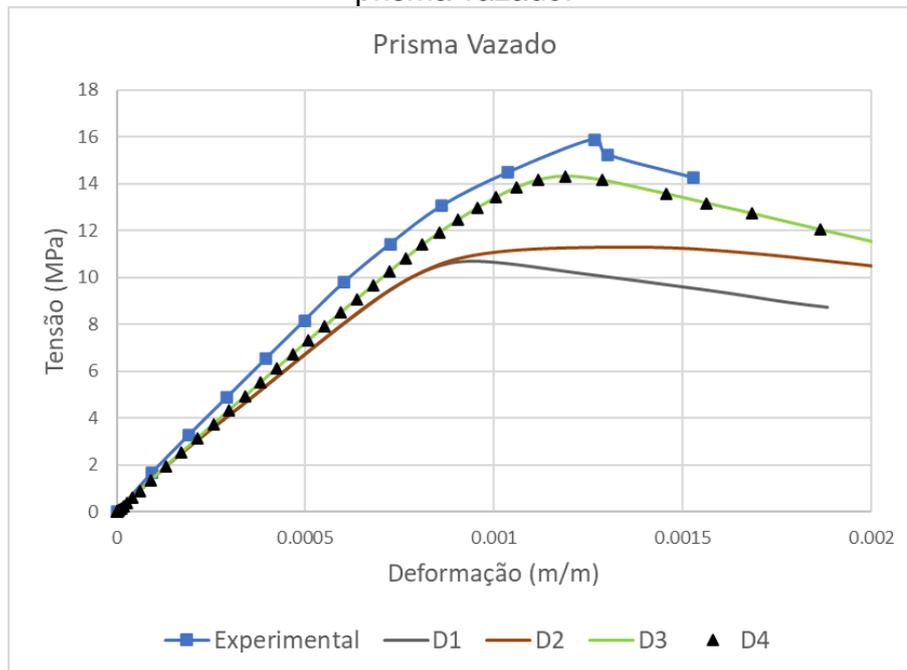
Foi priorizada a análise da discretização da malha, a partir da modelagem do comportamento mecânico dos prismas de paredes vazadas, considerando que estes possuem paredes mais finas e um maior número de vazados, o que ressalta a necessidade de equilibrar uma malha regular com o custo computacional necessário para uma boa representatividade dos elementos. Os resultados dos ensaios experimentais de prismas cerâmicos submetidos à compressão simples, em temperatura ambiente, apresentados por Fernandes Neto (2020), foram comparados com os modelos numéricos, considerando a variação da discretização da malha. Os resultados dessas comparações são apresentados na Tabela 4.1 e na Figura 4.10, considerando processador Intel® Core™ i5-8400; CPU 2,80Hz; Memória RAM 8,0 GB e Sistema Operacional de 64 bits.

Tabela 4.1 – Comparativo de tempo de processamento e variação da tensão e da deformação na ruptura do prisma, devido à variação da malha de elementos finitos.

Análise	Malha (m)	Total de elementos	Tempo de processamento (min)	Variação quanto à tensão (%)	Variação quanto à deformação (%)
D1	0,005	106812	120	-32,7	-26,2
D2	0,010 (blocos, placa); 0,005 (juntas)	29.588	40	-29	-8,9
D3	0,010	16836	35	-9,9	-6,2
D4	0,010 (blocos, juntas); 0,015 (placa)	15574	30	-9,9	-6,2

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.10 – Comparativo quanto à variação da discretização da malha para o prisma vazado.



Nas modelagens, em que a argamassa foi discretizada ao longo de sua altura (malhas de 0,005), obteve-se uma concentração de tensões nas interfaces bloco-argamassa, bem como excesso de deformação nos dois materiais; contudo, entre as análises D1 e D2, a com a maior discretização do bloco se aproximou mais da tendência de comportamento esperado, uma vez que a compatibilização entre as malhas na interface gerou menor concentração de tensões.

Por outro lado, na análise D3, comparada com a D2, notou-se que o modelo representa um comportamento próximo ao experimental, mesmo com elementos maiores, acredita-se que essa ocorrência seja justificada pela menor concentração de tensões nas interfaces bloco-argamassa. Por fim, notou-se que uma malha menos refinada para a placa (análise D4) não provocou alteração na resposta da estrutura.

Como o objetivo deste trabalho é a análise termoestrutural de pequenas paredes, a escolha de uma malha com elevada discretização resultaria em um tempo de processamento excessivamente longo, comprometendo a eficiência computacional. Dessa forma, optou-se por utilizar uma malha de menor densidade e elementos de tamanho uniforme (modelo D3), em todos os modelos analisados. Tal escolha deve-se ao fato de que o contato entre os elementos desempenha um papel crucial na representação do comportamento de elementos de alvenaria estrutural.

A adoção de elementos de tamanho uniforme, com menor propensão à concentração de esforços, simplifica o processamento e a compatibilização entre os modelos mecânicos, térmicos e termomecânicos. Portanto, adotou-se para todas as simulações a malha de 10mm, tanto para blocos, quanto para argamassas e placa de reação.

4.4 Mecanismos de contato

Para a representação da transferência de esforços, deformações e campos de temperatura, o acoplamento entre as superfícies dos blocos, juntas e placa de reação pode ser feito de diversas formas, dependendo das restrições e propriedades de interface impostas. O software Abaqus, utilizado no presente trabalho, oferece dois principais mecanismos de contato para simular interações entre superfícies: *tie* e *surface-to-surface contact*.

O mecanismo *tie* é empregado para estabelecer uma conexão entre as superfícies e impede qualquer movimento relativo entre elas. Nesse contexto, as superfícies são consideradas como rigidamente acopladas, resultando em uma aderência total, sem permitir deslizamento. Esse mecanismo restringe cada um dos nós das superfícies a ter o mesmo valor de deslocamento, temperatura, pressão poros ou potencial elétrico dos nós acoplados no contato.

Por outro lado, o mecanismo *surface-to-surface contact* permite a modelagem de interações mais complexas entre as superfícies, permitindo deslizamento, tensões e temperaturas relativas entre elas. Isso implica que as superfícies em contato podem se mover uma em relação à outra, levando em consideração as diferenças de comportamento entre elas.

Assim, considerando os prismas de alvenaria estrutural, utilizou-se como mecanismo de contato entre os blocos e as juntas a ferramenta *tie*, a qual não permite deslocamento diferencial entre as superfícies dos materiais distintos, considerando sua menor dimensão e não observação de deslocamentos relativos no comportamento experimental relatado por Fernandes Neto (2020). Porém, para as pequenas paredes, devido principalmente à maior esbeltez para a análise estrutural, à expansão térmica na análise termoestrutural e modos de ruptura apresentados em Fernandes Neto (2020), utilizou-se do mecanismo *surface-to-surface contact*, o qual possibilita tais deslocamentos. Portanto, conforme proposto em Rodovalho (2018) e

em Carvalho (2019), considerou-se a existência de interação de contato normal e tangencial, sendo o primeiro do tipo *hard contact*, para que um elemento não permeie o outro, e tendo o último um coeficiente de atrito de 0,6.

4.5 Modelo de plasticidade dos materiais

O Abaqus, software utilizado para as modelagens do presente trabalho, apresenta ao usuário a possibilidade de adotar diversos modelos de plasticidade que permitem simular o comportamento de estruturas, de acordo com as propriedades de seus componentes. Para materiais quasi-frágeis, como a argamassa e a cerâmica, existem dois modelos principais (Simulia, 2013): o *Concrete Smearred Cracking (CSC)* e o *Concrete Damaged Plasticity (CDP)*.

O CDP é um modelo de dano contínuo, baseado em plasticidade, para concreto. Ele pressupõe que os dois principais mecanismos de falha são trincas por tração e esmagamento por compressão do material de concreto (Simulia, 2013). Ele permite tanto carregamento monotônico quanto cíclico ou dinâmico, em baixas pressões de confinamento, bem como, tem a capacidade para rastrear o progresso da fissuração ocorrente, através de todo o histórico de carregamento, o que não é possível com CSC.

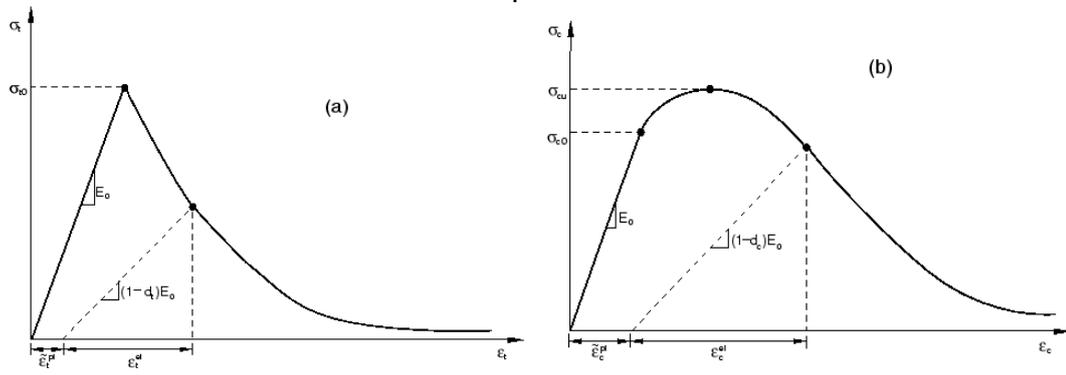
O comportamento inelástico dos materiais é representado pelo CDP, através de conceitos de elasticidade isotrópica, com dano no material em combinação com tensões de tração e de compressão isotrópicas na plasticidade. As respostas do modelo aos carregamentos uniaxiais de tração e compressão são detalhadas na Figura 4.11

Na tração, a relação tensão-deformação pós-falha é definida em função da deformação de fissuração (ε_t^{ck}), representada na Equação 3.

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (3)$$

Sendo ε_t a deformação total à tração; ε_{0t}^{el} a deformação elástica à tração correspondente ao material não danificado; σ_t a tensão de tração e E_0 o módulo elástico inicial do material à compressão.

Figura 4.11 – Respostas do modelo aos carregamentos uniaxiais de tração e de compressão.



(a) Tração. (b) Compressão.
Fonte: Simulia (2013).

A conversão dos valores de deformação de fissuração em deformação plástica é feita através da Equação 4:

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \cdot \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (4)$$

Sendo ε_t^{pl} a deformação plástica; ε_t^{ck} a deformação de fissuração; d_t o dano à tração; σ_t a tensão de tração; E_0 o módulo elástico inicial do material à compressão.

Analogamente à tração, os valores da deformação inelástica para a compressão podem ser obtidos através da Equação 5.

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (5)$$

Sendo ε_c^{in} a deformação inelástica de esmagamento; ε_c a deformação total à compressão; ε_{0c}^{el} a deformação elástica à compressão correspondente ao material não danificado; σ_c a tensão de compressão; E_0 o módulo elástico inicial do material à compressão.

A conversão dos valores de deformação de esmagamento em deformação plástica é feita através da Equação 6:

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \cdot \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (6)$$

Sendo ε_c^{pl} a deformação plástica; ε_t^{in} a deformação inelástica de esmagamento; d_c o dano à compressão; σ_t a tensão de compressão; E_0 o módulo elástico inicial do material à compressão.

Para a o cálculo dos parâmetros do dano, usando como referência os trabalhos de Santos (2014), Rodovalho (2018) e Carvalho (2019), adotou-se o modelo apresentado por Guo (2014), equacionado na sequência das Equações 9 a 16.

Considerando:

f_{bm}, f_{btm} : tensões de ruptura na compressão e tração, respectivamente;

E_{cm} : módulo de elasticidade inicial (correspondente a uma tensão de $0,3 \cdot f_{bm}$);

E_{c1} : módulo de elasticidade secante (considerando a tensão máxima);

ε_{c1} : deformação relativa à tensão de ruptura;

d_c, d_t : danos à compressão e à tração, respectivamente.

$\alpha_a, \alpha_d, \alpha_t$: constantes.

Tem-se para compressão, no trecho elástico, a Equação 7:

$$\sigma_c = E_{cm} \cdot \varepsilon \quad (7)$$

Já para o trecho inelástico, as Equações 8 a 10:

$$\sigma_c = f_{bm} \cdot [\alpha_a \cdot x + (3 - 2 \cdot \alpha_a) \cdot x^2 + (\alpha_a - 2) \cdot x^3]; x \leq 1 \quad (8)$$

$$\sigma_c = \frac{f_{bm} \cdot x}{\alpha_d \cdot (x - 1)^2 + x}; x > 1 \quad (9)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_{bm}} \quad (10)$$

Sendo:

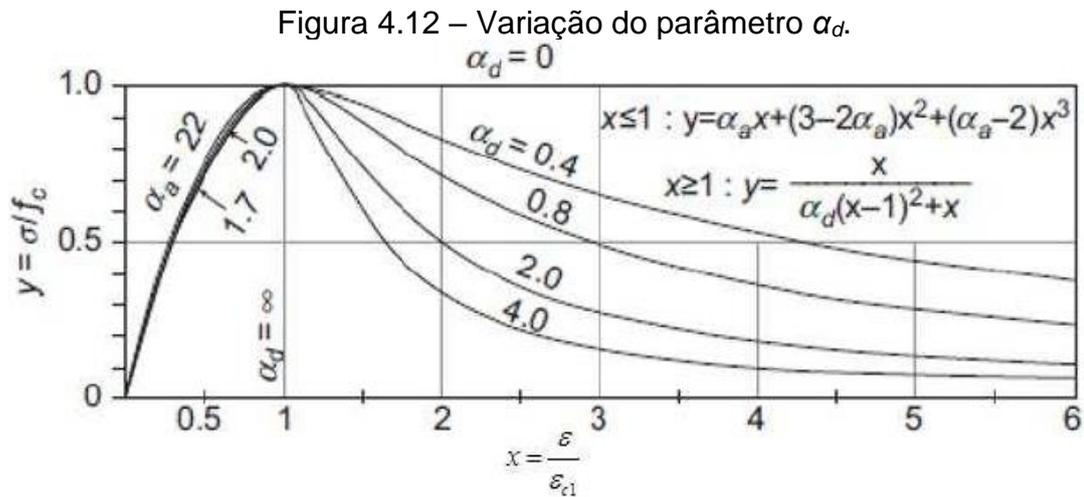
$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}}$$

$$\alpha_a = \frac{E_{cm}}{E_{c1}}$$

$$1,5 \leq \alpha_d \leq 3,0$$

$$\varepsilon_{inel} = \varepsilon - \frac{\sigma_c}{E_{cm}}$$

A influência do parâmetro α_d é apresentada na Figura 4.12.



Similarmente, para a tração, na sequência das equações 11 a 14, tem-se para o trecho elástico:

$$\sigma_t = E_{cm} \cdot \varepsilon \quad (11)$$

Por fim, para o trecho inelástico, tem-se:

$$\sigma_t = f_{btm} \cdot \frac{x}{\alpha_t \cdot [x - 1]^{1,7} + x} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{inel} = \varepsilon - \frac{\sigma_t}{E_{c0}} \quad (13)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_{ctm}} \quad (14)$$

Sendo:

$$\alpha_t = 0,312 \cdot f_{bm}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ct}}$$

$$\varepsilon_{ct} = \frac{f_{btm}}{E_{cm}}$$

$$f_{btm} = 0,3 \cdot f_{bm}^{2/3}$$

Além da resposta mecânica dos materiais, o CDP é baseado no fornecimento de 5 parâmetros de plasticidade para levar em consideração a não linearidade do material: ângulo de dilatância, parâmetro de excentricidade, parâmetro de viscosidade, K_c e σ_{b0}/σ_{c0} . Eles estão ligados aos critérios de plastificação e à definição da superfície de ruptura do modelo.

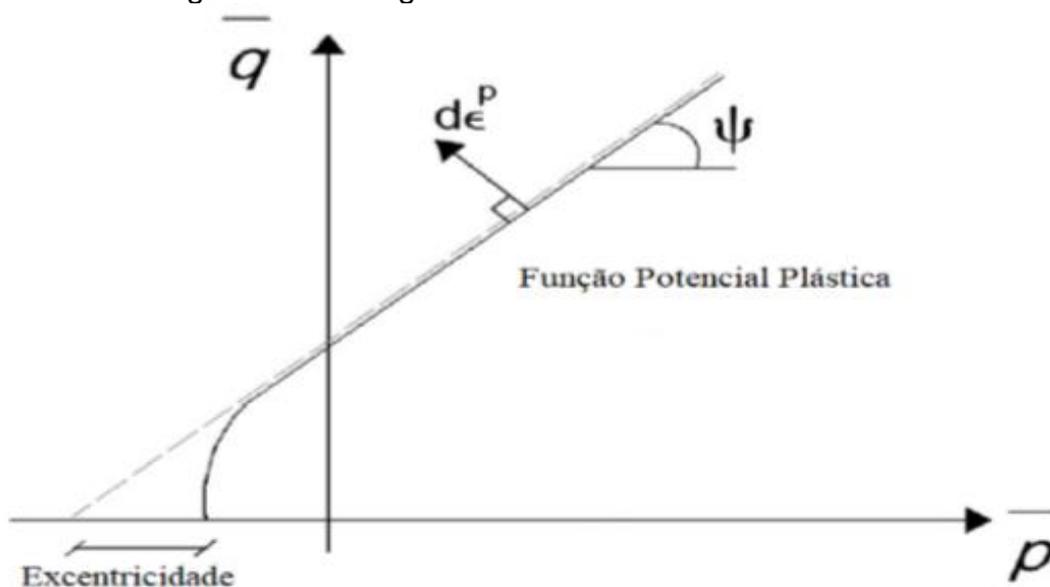
O ângulo de dilatância (Ψ), segundo Cardoso (2014), está relacionado à inclinação que o potencial plástico alcança para altas tensões de confinamento. Para valores baixos de Ψ , o material apresenta comportamento frágil e, para valores mais elevados, apresenta comportamento dúctil. O significado físico do ângulo de dilatância, conforme Kmiecik e Kaminski (2011), é definido como sendo o ângulo de atrito interno do material.

Em relação ao parâmetro de excentricidade (ρ), de acordo com a teoria de Drucker-Prager, a superfície de escoamento, no plano dos meridianos, apresenta a forma de uma reta, entretanto, ensaios experimentais indicam que essa superfície assume a forma de uma hipérbole. A excentricidade é determinada como a distância entre o vértice da hipérbole e a interseção da assíntota dessa hipérbole, como o eixo hidrostático (Figura 4.13). A literatura se divide em relação à adoção de ρ igual a 0,1 para acompanhar a forma da hipérbole, e ρ igual a 0 para acompanhar a forma da reta de Drucker Prager.

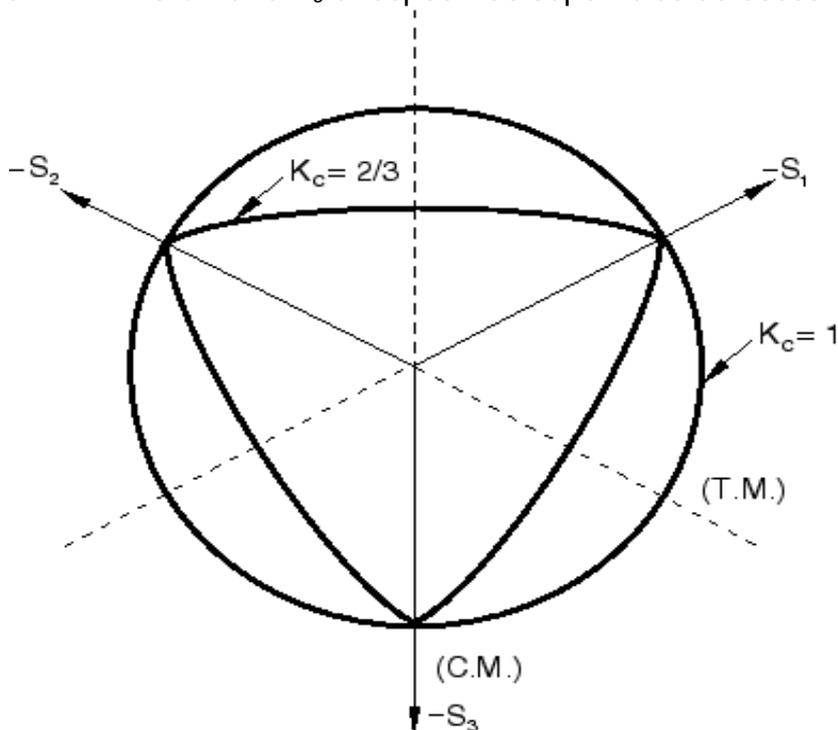
O parâmetro de viscosidade (μ) visa a facilitar o processo de convergência dos modelos numéricos, regularizando as equações constitutivas, utilizando a viscoplasticidade, permitindo que as tensões tenham valores externos à superfície de escoamento.

K_c , proposto por Lubliner *et al.* (1989), é o que modifica a equação de Drucker-Prager. Segundo Chen e Andrawes (2012), esse parâmetro pode ser definido como a razão entre o segundo invariante de tensão no meridiano de tração e o segundo invariante de tensão no meridiano de compressão. O manual do Abaqus (Simulia, 2013) recomenda que, para materiais frágeis, o valor de K_c seja igual a 2/3. A Figura 4.14 mostra como esse parâmetro afeta a forma da superfície de escoamento.

Figura 4.13 – Ângulo de dilatância e excentricidade.



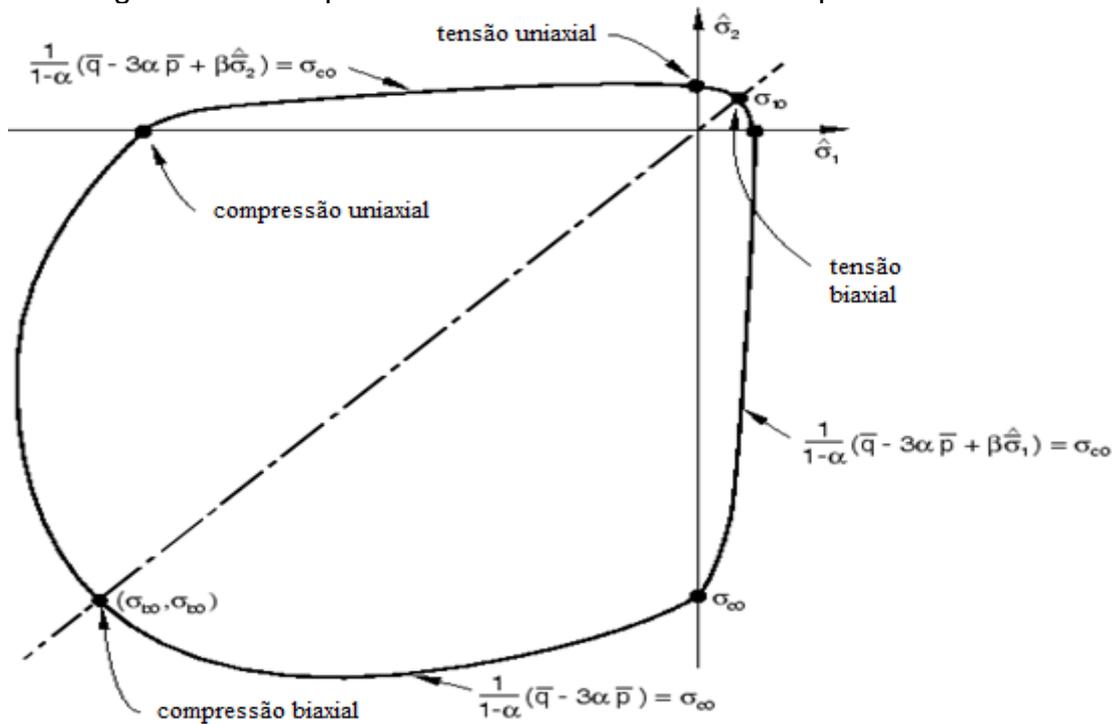
Fonte: Cardoso (2014).

Figura 4.14 – Parâmetro K_c e respectivas superfícies de escoamento.

Fonte: Simulia (2013).

Por fim, σ_{b0}/σ_{c0} é o parâmetro que descreve a razão entre as tensões de escoamento no estado biaxial e uniaxial, definindo o ponto em que o material falha sob compressão biaxial (Figura 4.15).

Figura 4.15 – Superfície de escoamento no estado plano de tensões.



Fonte: Adaptada de Simulia (2013).

Destaca-se que, ao contrário do concreto, os parâmetros e o comportamento da cerâmica para a modelagem da plasticidade ainda são pouco explorados na literatura e softwares estruturais disponíveis. Por essa razão, para os modelos do presente trabalho, considerou-se o modelo para concreto *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), pois seus parâmetros permitem calibração e análise de sensibilidade, em vias de se aproximar da representação do comportamento frágil da cerâmica. É imperativo que novos estudos sejam realizados, com foco no comportamento desse material, tanto em temperatura ambiente quanto em altas temperaturas, especialmente da cerâmica brasileira, para avançar nas propostas de representação do comportamento desse material, que vem ganhando destaque no mercado da construção civil.

5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS REFERENTES À ANÁLISE MECÂNICA

A análise detalhada de elementos de alvenaria estrutural, esta, especialmente construída com blocos cerâmicos, sob compressão simples em temperatura ambiente, é fundamental para compreender o comportamento mecânico dessa estrutura; determinar propriedades mecânicas essenciais, como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade; avaliar a capacidade de carga; bem como identificar mecanismos de falha, como fissuração e esmagamento.

Além disso, fornece dados essenciais para validar modelos numéricos e simulações computacionais; contribui para o estabelecimento de normas e padrões de construção; permite a previsão do desempenho das estruturas a longo prazo; e também é responsável por impulsionar inovações em materiais e técnicas de construção, contribuindo para que as estruturas de alvenaria sejam seguras, eficientes e duráveis.

Neste capítulo, as simulações numéricas se concentram na análise do comportamento de prismas e pequenas paredes de blocos cerâmicos sob compressão simples em temperatura ambiente. Utilizam-se os dados experimentais apresentados nos trabalhos de Fernandes Neto (2020), para a validação dos modelos numéricos propostos. Apresentam-se as metodologias empregadas nessas simulações, destacando os parâmetros específicos considerados, como as condições de contorno, propriedades dos materiais e os critérios de falha adotados, atendendo à geometria descrita para os modelos propostos, em conformidade com o item 4.2 do presente trabalho.

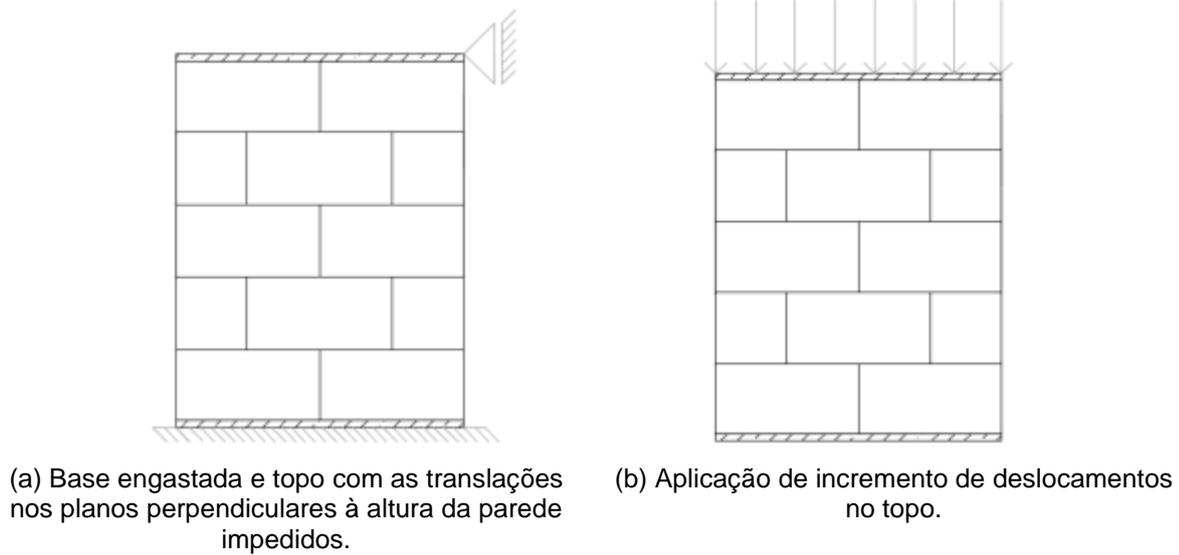
5.1 Condições de contorno e carregamento

As condições de contorno utilizadas nos modelos propostos foram aplicadas nas placas de reação, sendo centralizadas num único ponto de referência para cada placa, com o intuito de facilitar a obtenção dos resultados pertinentes.

A aplicação do carregamento foi feita por incrementos de deslocamento, com deslocamento prescrito total superior ao obtido nos ensaios no topo da placa superior, os quais foram convertidos em força para a análise até a ruptura. Adotou-se a base da placa inferior totalmente engastada, ou seja, com os graus de liberdade de translação e rotação totalmente impedidos; e a placa superior com as translações

impedidas nos planos perpendiculares à altura da parede em sua face superior. A representação dessas considerações é apresentada na Figura 5.1 e na Figura 5.2.

Figura 5.1 – Esquematização das condições de contorno e de carregamento adotadas.



Fonte: Carvalho (2019).

Figura 5.2 – Condições de contorno e de carregamento aplicadas nos modelos mecânicos no presente trabalho.



Fonte: Elaborada pela autora.

Os materiais foram conectados por meio do acoplamento tipo *tie* para os prismas e *surface-to-surface contact* para as pequenas paredes, como discutido no item 4.4 do presente trabalho.

5.2 Propriedades mecânicas dos materiais

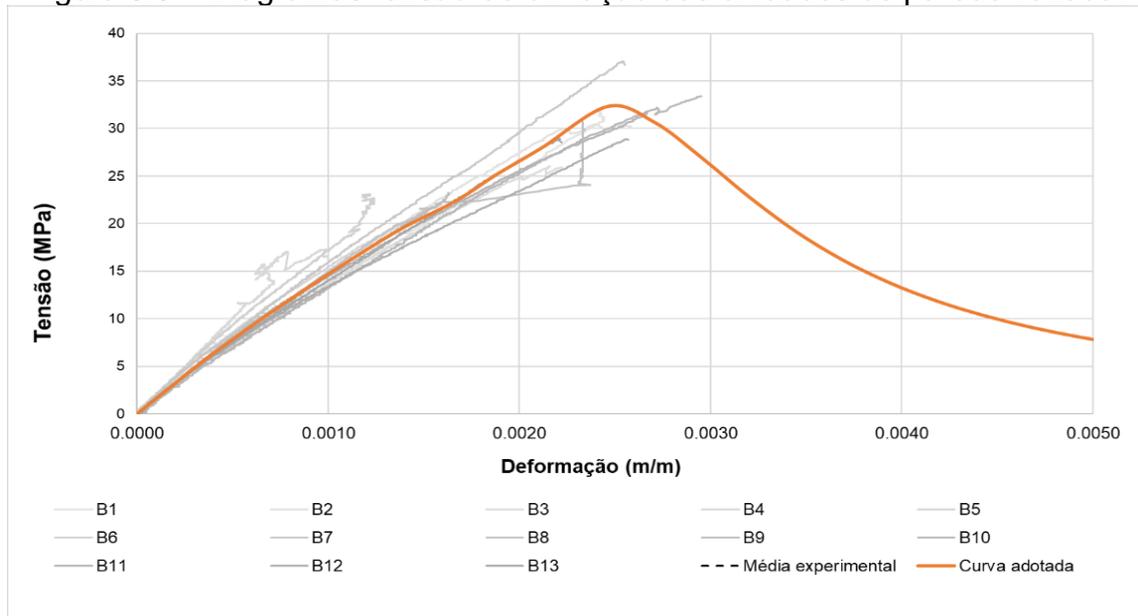
Para o comportamento mecânico dos materiais, as curvas propostas foram construídas utilizando a média dos resultados experimentais de Fernandes Neto (2020) até o pico de resistência última, a fim de uma representação mais próxima dos ensaios realizados. Já para o comportamento pós-pico, não captado experimentalmente no trabalho de referência, foi admitido o modelo não linear representado pelo modelo CDP, bem como, consideração de dano pelo modelo de Guo (2014), detalhados no item 4.5.

Para isso, foram utilizados os valores de tensão, deformação e módulo de elasticidade da área líquida da curva média de resistência dos elementos analisados por Fernandes Neto (2020). Em todos os elementos, o módulo de elasticidade foi calculado a partir da curva tensão-deformação em compressão, traçando-se uma linha de tendência no regime linear, entre 5% e 33% da tensão de ruptura. Excetuando-se a argamassa, cujos valores necessários para a formulação foram estimados de acordo com Guo (2014), devido à variabilidade observada nos resultados experimentais sob compressão, o que influenciou o comportamento da média calculada e a ausência do ensaio de seu comportamento sob tração no estudo experimental de referência.

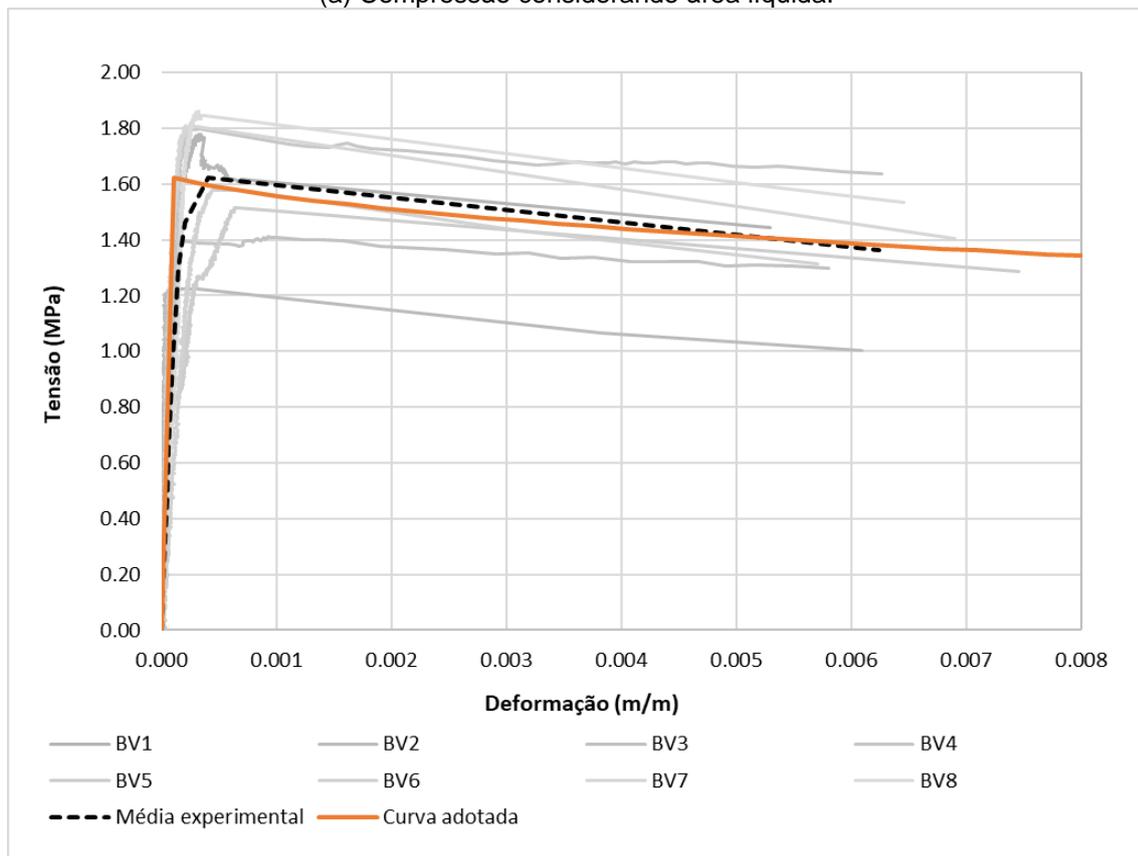
As curvas obtidas são apresentadas na Figura 5.3, na Figura 5.4 e na Figura 5.5, comparadas com os valores obtidos experimentalmente (em cinza) por Fernandes Neto (2020).

Vale acentuar que foi adotado o coeficiente de Poisson de 0,15 para elementos da alvenaria cerâmica, de acordo com a ABNT NBR 15812 (ABNT, 2010a). Para a representação da rigidez das placas de reação, adotou-se um módulo de elasticidade 10 vezes maior que o dos blocos, baseado no trabalho de Carvalho (2019), com um coeficiente de Poisson nulo.

Figura 5.3 – Diagramas tensão-deformação das unidades de parede vazada.



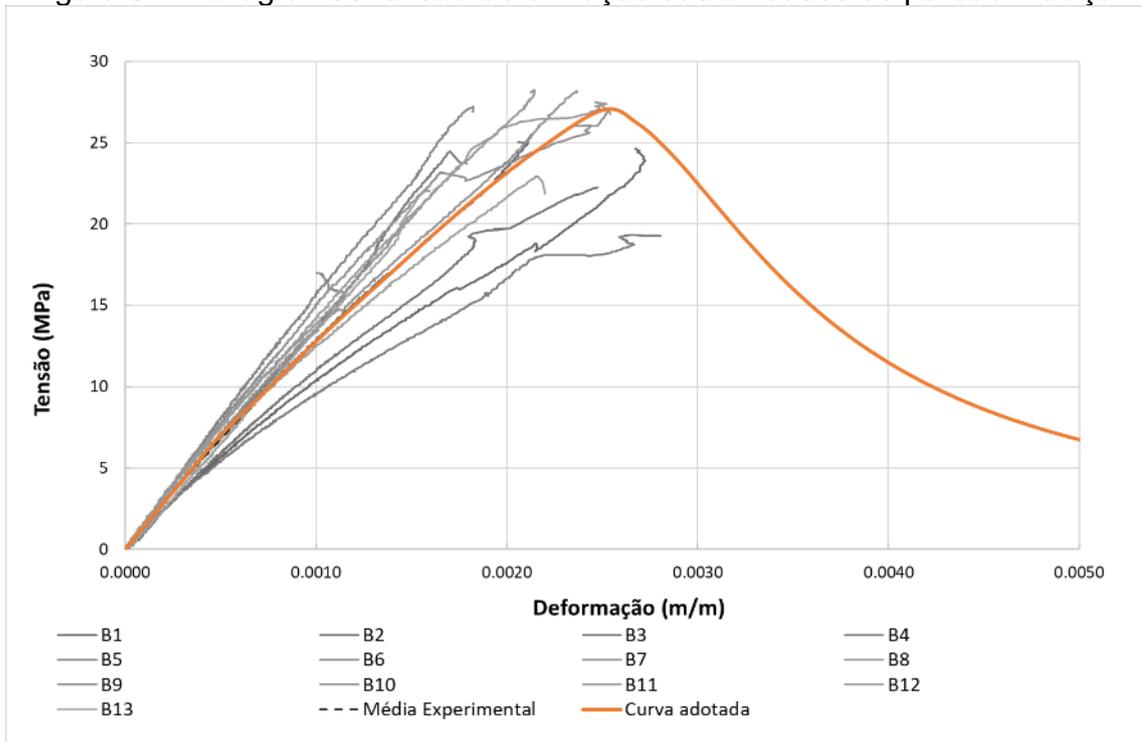
(a) Compressão considerando área líquida.



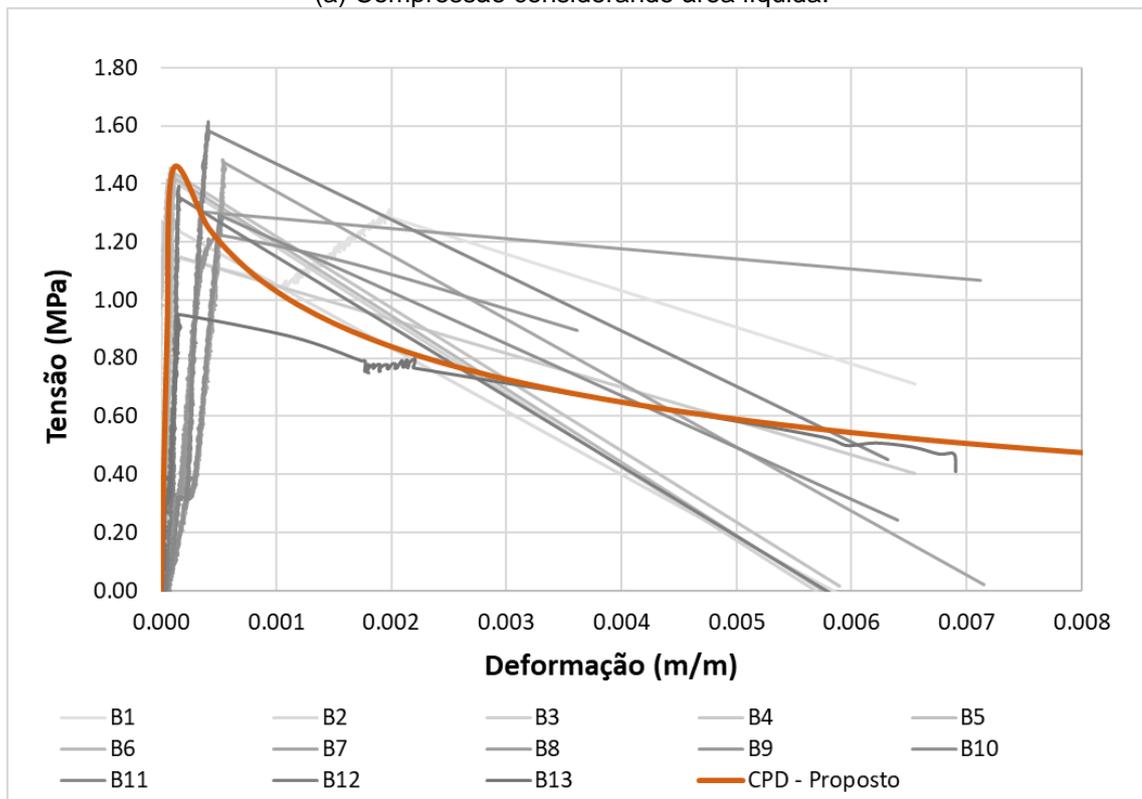
(b) Tração considerando área líquida.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.4 – Diagramas tensão-deformação das unidades de parede maciça.



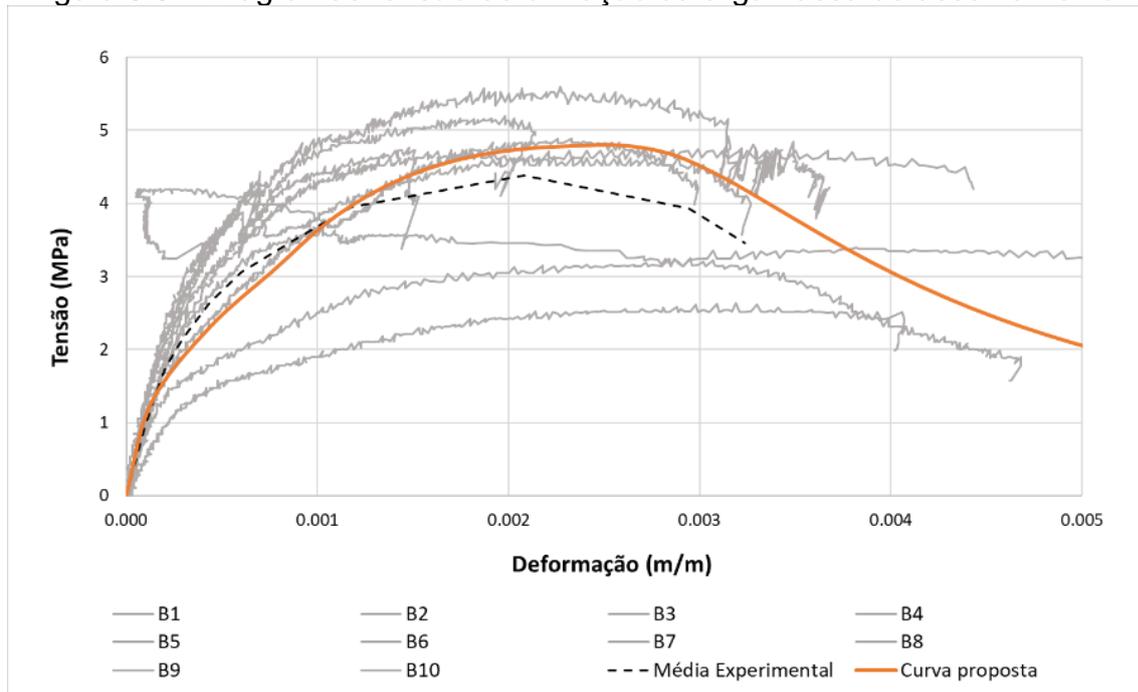
(a) Compressão considerando área líquida.



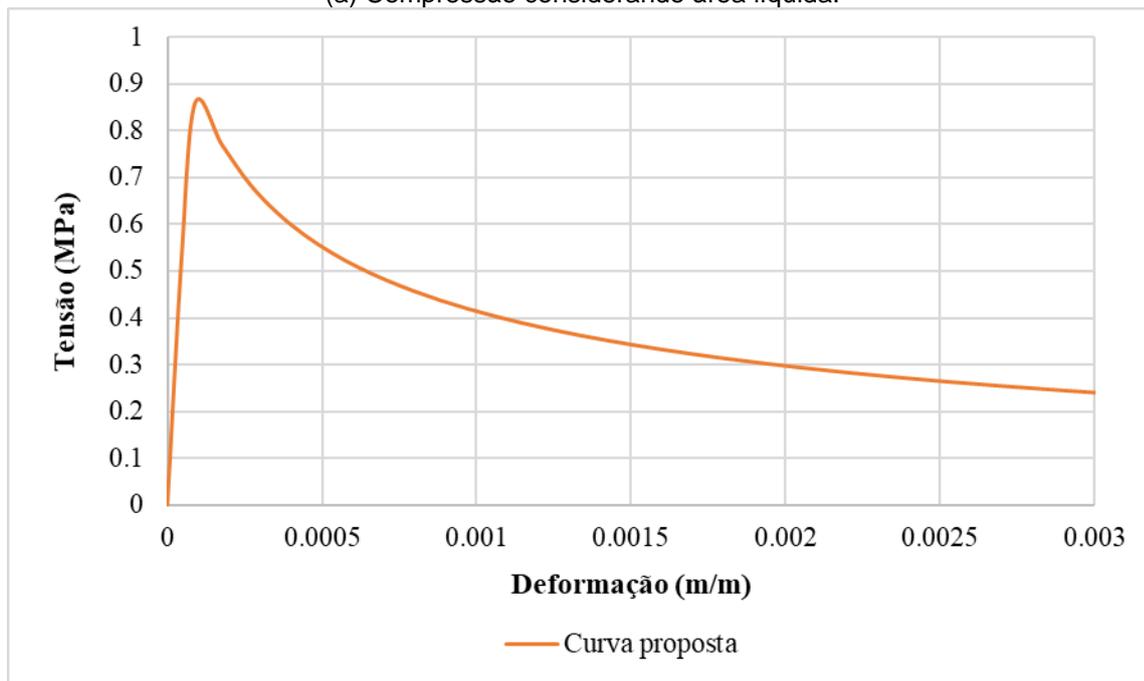
(b) Tração considerando área líquida.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.5 – Diagramas tensão-deformação da argamassa de assentamento.



(a) Compressão considerando área líquida.



(b) Tração considerando área líquida.

Fonte: Elaborada pela autora.

Quanto às propriedades plásticas adotadas nas simulações numéricas, baseando-se no proposto para o concreto em Rodvalho (2018) e Carvalho (2019), adotou-se similarmente para argamassa de assentamento e cerâmica o valor de 0,1 para o parâmetro de excentricidade (ρ); 1,4 para a razão entre as tensões de escoamento no estado biaxial e uniaxial (σ_{b0}/σ_{c0}) e 0,0001 para a viscosidade. Para o

parâmetro K_c , considerou-se o valor de 0,667, conforme recomendação do manual do Abaqus (Simulia, 2013) para materiais frágeis.

Quanto ao ângulo de dilatância (ψ), considerando-se as diferenças de modo de ruptura, distribuição de carregamento e influência do contato e número de elementos associados, adotaram-se os valores do ângulo de dilatância de 56° para cerâmica e argamassa nos modelos dos prismas, de 25° para cerâmica e de 35° para a argamassa, calibrando-se conforme resultados experimentais de Fernandes Neto (2020).

Em Pina-Henriques e Lourenço (2006), Malm (2009) e Oliveira e Carrazedo (2019), aponta-se que, em simulações numéricas, associada às condições de contorno de simetria e de confinamento e condições de carregamento elevado, a dilatância pode induzir tensões normais elevadas e travamento das partículas, resultando em aumento da resistência. O que pode justificar a adoção de ângulo de dilatância maiores para elementos submetidos a efeitos de confinamento.

Vale salientar que o ângulo de dilatância representa a tendência de um material granular ou fragmentar, aumentando de volume quando submetido à deformação, por conseguinte é um parâmetro crucial para entender o comportamento mecânico dos materiais cerâmicos.

A variação desse parâmetro em materiais cerâmicos é influenciada por vários fatores. A composição do material, que pode incluir diferentes tipos de argilas, feldspatos e sílica, afeta significativamente as propriedades mecânicas. Processos de fabricação, como a temperatura de sinterização, a pressão de compactação e o tempo de cura, também alteram a microestrutura da cerâmica, influenciando sua porosidade e densidade. O condicionamento de carga, incluindo condições de confinamento e taxas de carregamento, é outro fator importante, pois diferentes condições podem produzir resultados variados. Além disso, a estrutura interna, como a distribuição e tamanho dos grãos e a porosidade, impacta diretamente o ângulo de dilatância, com materiais mais porosos exibindo maior dilatância. (Malm, 2006).

Assim, a literatura revela uma ampla variação nos valores de ψ atribuídos a esses materiais, destacando e confirmando a complexidade de fatores que influenciam esse parâmetro (Malm, 2009; Forquin, 2024).

5.3 Resultados e discussões

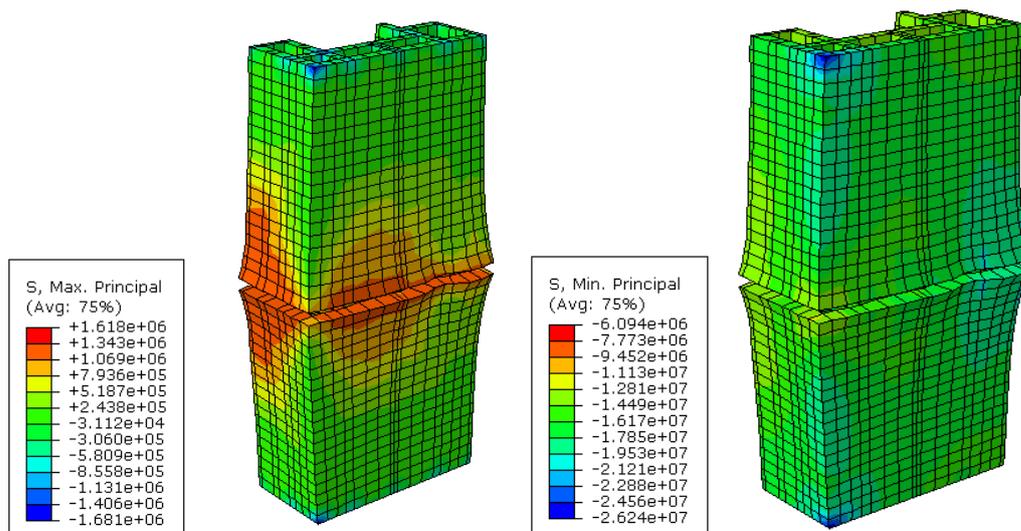
Considerando os prismas sob análise, inicialmente, são ilustrados os padrões de ruptura obtidos por Fernandes Neto (2020), conforme Figura 5.6; a seguir, são comparados com as tensões máximas e mínimas numéricas identificadas no instante da ruptura do modelo numérico e com o comportamento tensão deformação obtido, conforme é apresentado na Figura 5.7 e na Figura 5.8.

Figura 5.6 – Exemplo de ruptura experimental de prisma com blocos cerâmicos.



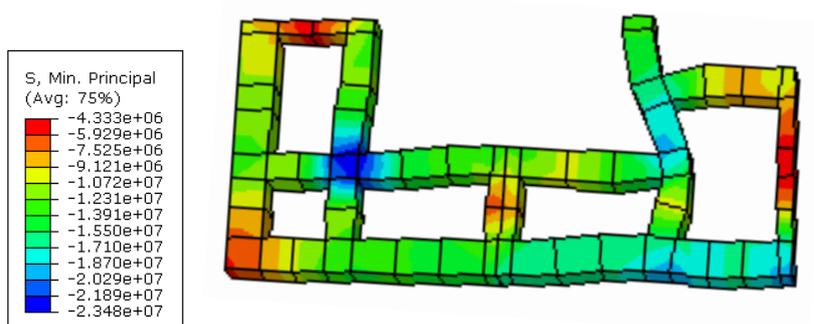
Fonte: Fernandes Neto (2020).

Figura 5.7 – Tensões principais dos prismas de blocos de paredes vazadas no momento da ruptura.



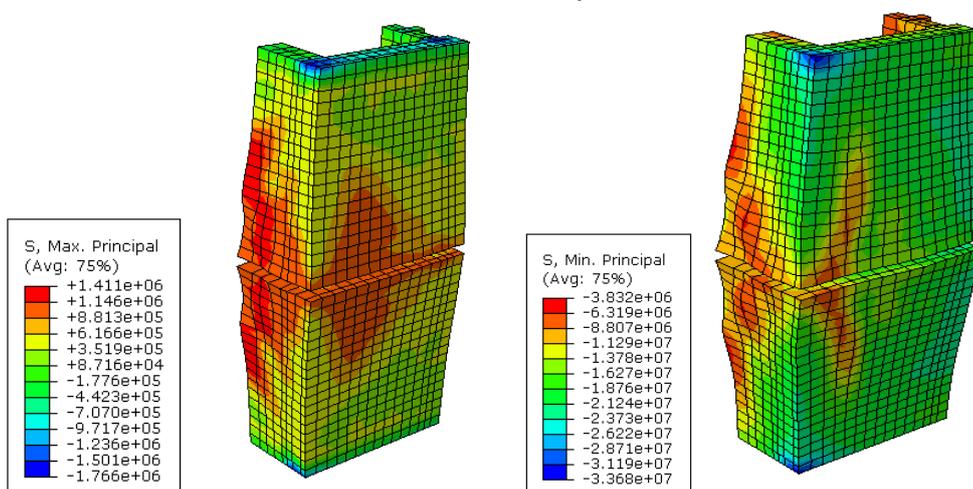
(a) Tensão principal máxima - bloco.

(b) Tensão principal mínima - bloco.



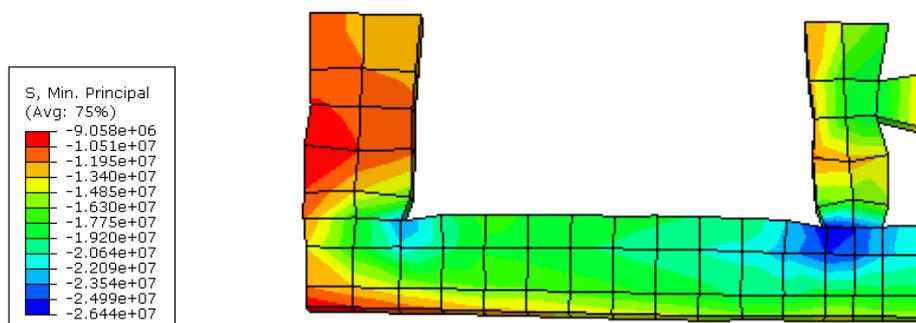
(c) Tensão principal mínima - argamassa.
Unidades em Pascal
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.8 – Tensões principais dos prismas de blocos de paredes maciças no momento da ruptura.



(a) Tensão principal máxima - bloco.

(b) Tensão principal mínima - bloco.



(c) Tensão principal mínima na argamassa.
Unidades em Pascal.

Fonte: Elaborada pela autora.

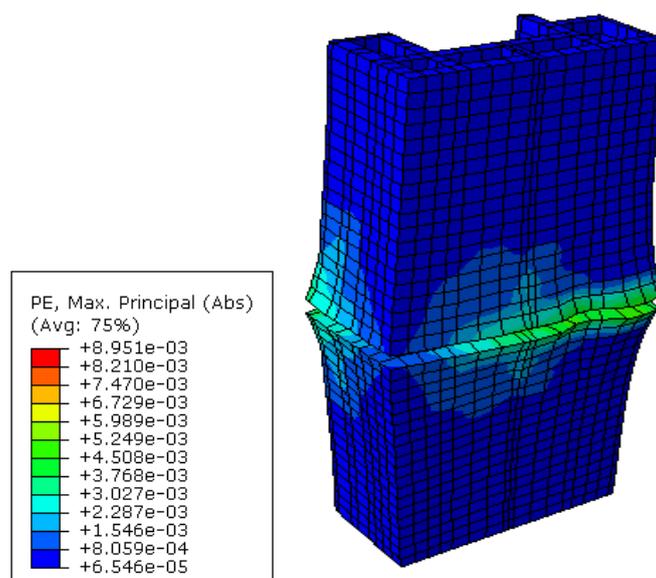
Em Fernandes Neto (2020), encontra-se o relato de que o modo de ruptura dos prismas foi governado principalmente pelo esmagamento da junta de argamassa de assentamento e posterior fendilhamento dos blocos, na região da interface. Em alguns prismas com blocos de paredes maciças, a falha ocorreu de maneira brusca.

No presente trabalho, para os modelos numéricos de prismas de blocos de parede vazada, no instante da ruptura, observa-se o acúmulo de tensões de tração nas laterais, com valores muito próximos aos de ruptura por tração do bloco, isto é, 1,61 MPa. Isso sugere o aparecimento de trincas, conforme nos modos de ruptura experimentais. As tensões mínimas apresentam valores máximos próximos a 29 MPa junto à placa de reação e 26 MPa junto à interface com a argamassa, na região central dos blocos; valores que se aproximam dos máximos experimentais.

De modo similar, nas faces laterais do prisma de blocos de parede maciça, no instante da ruptura, o modelo apresenta tensões de tração de 1,41 MPa, muito próximas aos de ruptura por tração do bloco, assemelhando ao modo de ruptura experimental. Já para as tensões mínimas, verificam-se valores máximos próximos a 33,6 MPa junto à placa de reação e 27 MPa junto à interface com a argamassa, na região central dos blocos; ultrapassando ao máximo experimental da unidade. Supõe-se que, em condição de confinamento, o modelo suportou cargas acima da máxima experimental, mas, com ruptura, ao atingir tensões de tração significativas.

Observa-se que as deformações plásticas máximas principais absolutas, para os dois modelos propostos, estão localizadas junto à interface da argamassa e parte lateral dos blocos condizentes com o modo de ruptura (Figura 5.9 e Figura 5.10).

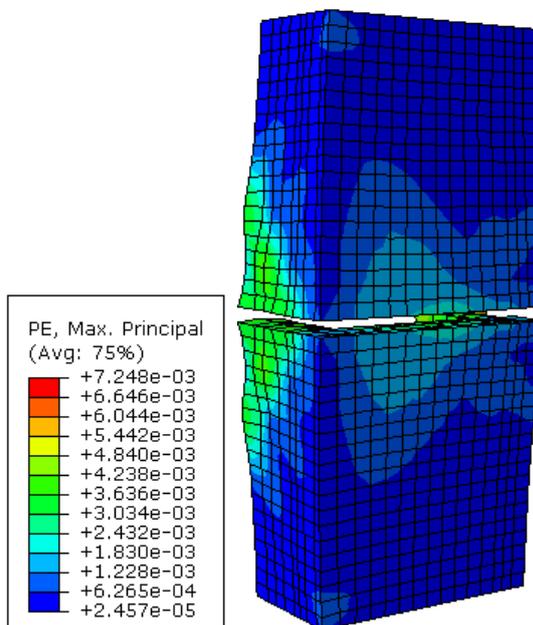
Figura 5.9 – Deformações plásticas principais absolutas dos prismas de blocos de paredes vazadas no momento da ruptura.



Unidades em m.

Fonte: Elaborada pela autora.

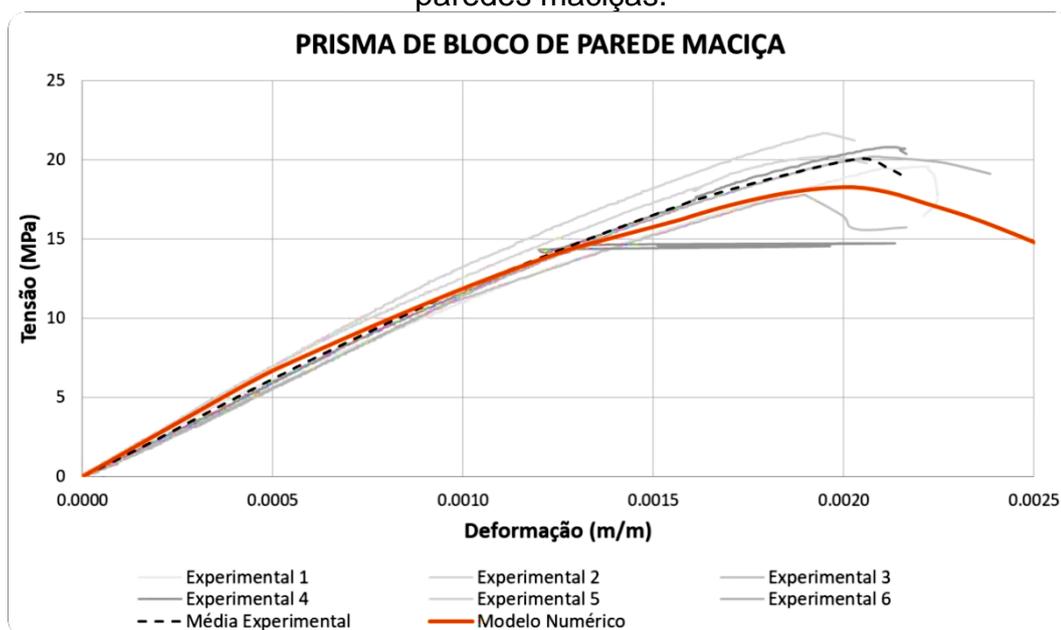
Figura 5.10 – Deformações plásticas principais absolutas dos prismas de blocos de paredes maciças no momento da ruptura.



Unidades em metros.
 Fonte: Elaborada pela autora.

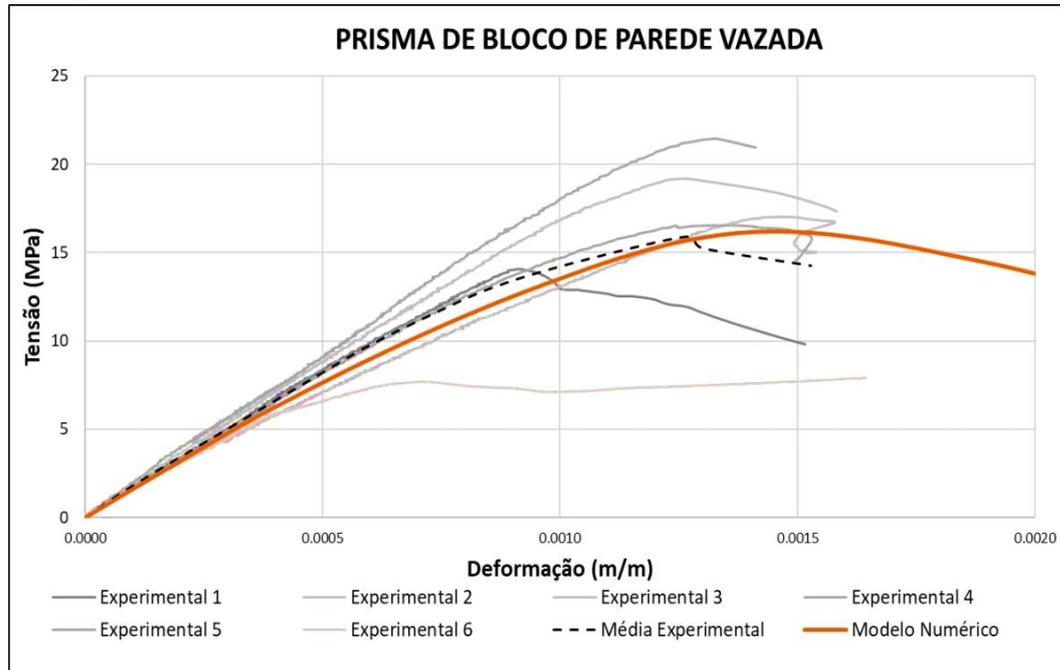
Quanto ao comportamento de tensão-deformação, obtido na modelagem proposta, ele é apresentado na Figura 5.11 e na Figura 5.12.

Figura 5.11 – Resultados dos modelos mecânicos para os prismas de blocos de paredes maciças.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.12 – Resultados dos modelos mecânicos para os prismas de blocos de paredes vazadas.

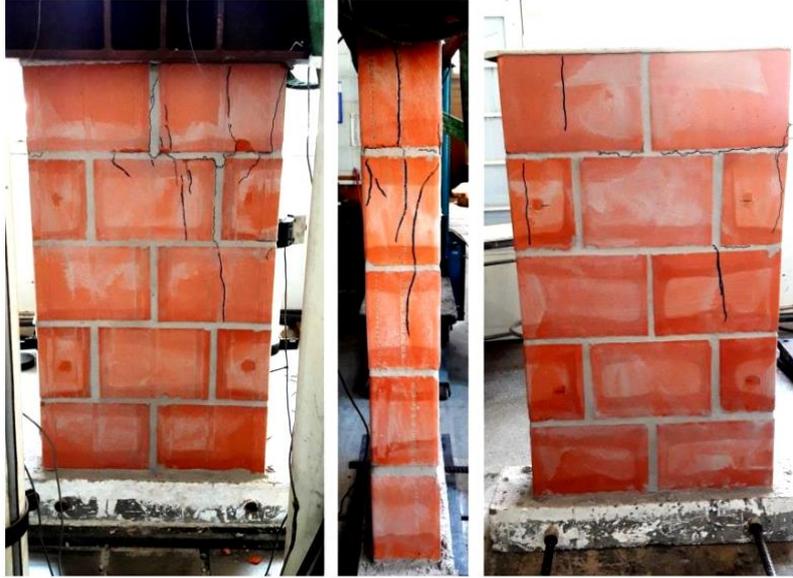


Fonte: Elaborada pela autora.

Assim, notam-se, para os prismas de bloco de parede vazada, as diferenças de -1,9% da carga de ruptura e 14% para a deformação de ruptura, comparadas com os modelos experimentais; já para o prisma de bloco de parede maciça, obtiveram-se as diferenças de -9,8% da carga de ruptura e 0,6% para a deformação de ruptura, comparadas com os modelos experimentais. Observa-se que, nos dois modelos, o comportamento deles se assimilou mais ao limite inferior dos valores experimentais. Embora existam pequenas divergências entre os resultados numéricos e experimentais, os modelos numéricos apresentaram uma boa representatividade do estado experimental, permanecendo dentro dos limites máximos e mínimos dos dados obtidos. A análise sugere que os modelos são eficazes para prever o comportamento estrutural dos prismas de blocos sob carga, especialmente considerando o impacto das condições de confinamento e a distribuição das tensões de tração.

A seguir, considerando as pequenas paredes de 5 fiadas, ilustram-se (Figura 5.13) os padrões de ruptura obtidos por Fernandes Neto (2020). As pequenas paredes tiveram, nas juntas vertical e horizontal dos elementos, o início da ruptura caracterizado pelo surgimento de fissuras, que se propagaram ao longo da parede, interceptando os blocos. Em alguns casos, nas faces laterais dos elementos, também se observou a presença de fissuras verticais, devido às tensões de tração.

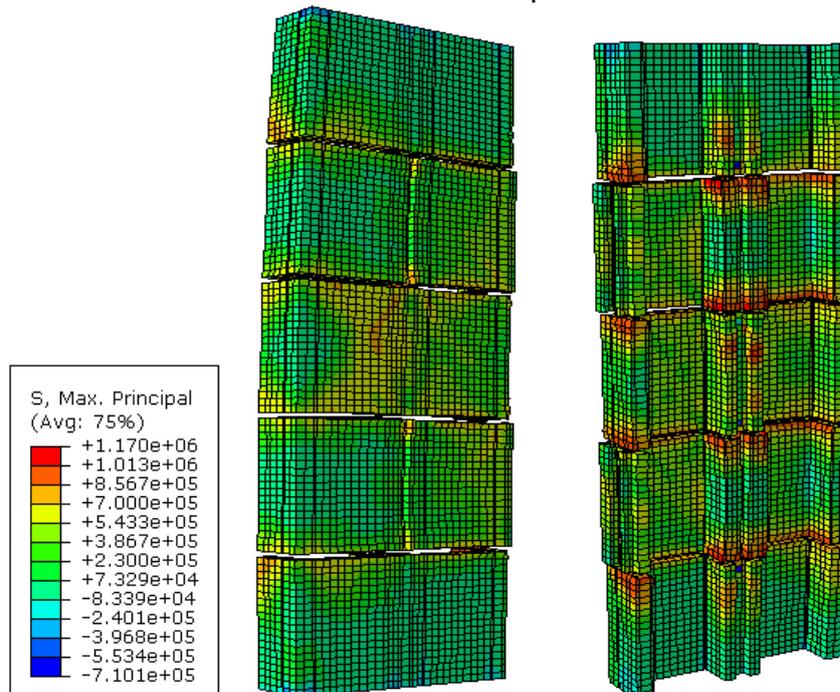
Figura 5.13 – Exemplo de ruptura experimental de pequena parede com blocos cerâmicos.



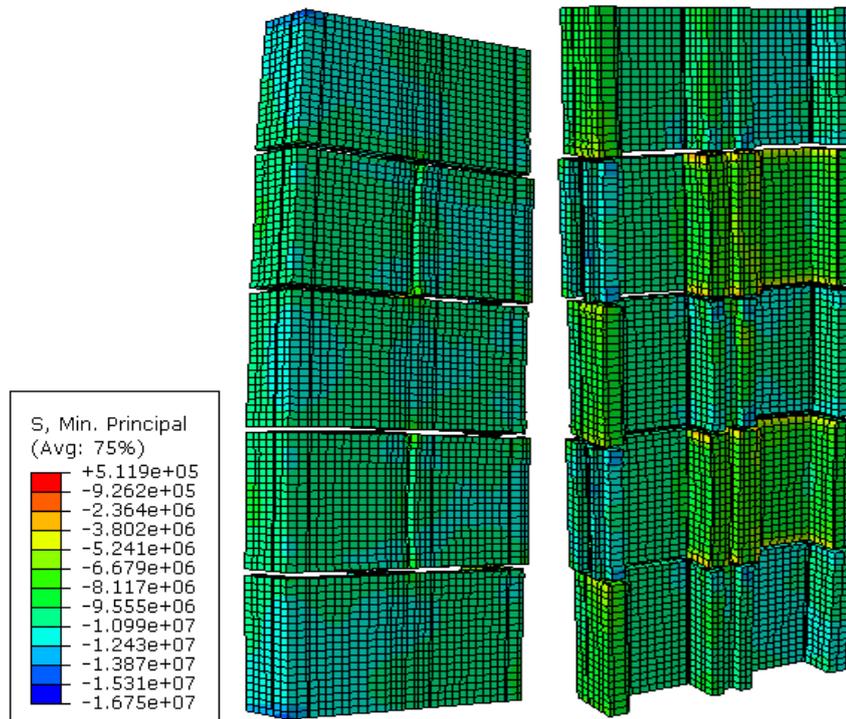
Fonte: Fernandes Neto (2020).

Comparativamente, as tensões máximas e mínimas numéricas, identificadas no instante da ruptura do modelo numérico, são apresentadas na Figura 5.14 e na Figura 5.15.

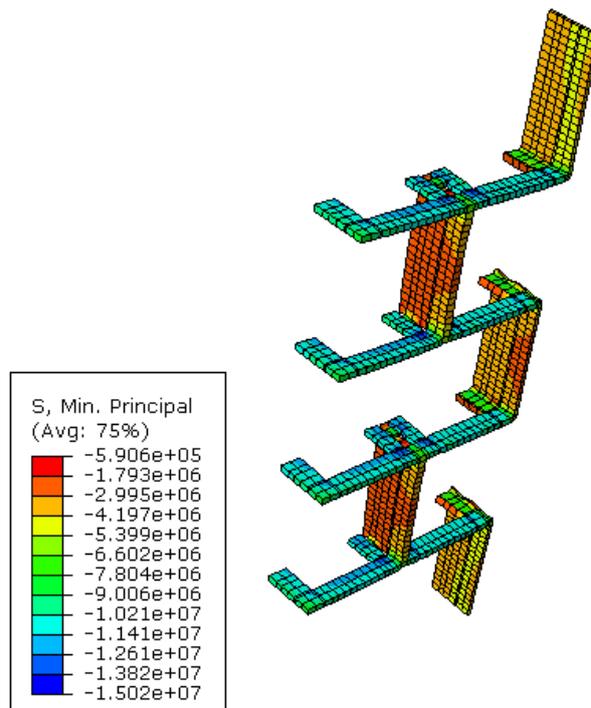
Figura 5.14 – Tensões principais da pequena parede de blocos de paredes maciças no momento da ruptura.



(a) Tensão principal máxima - bloco.

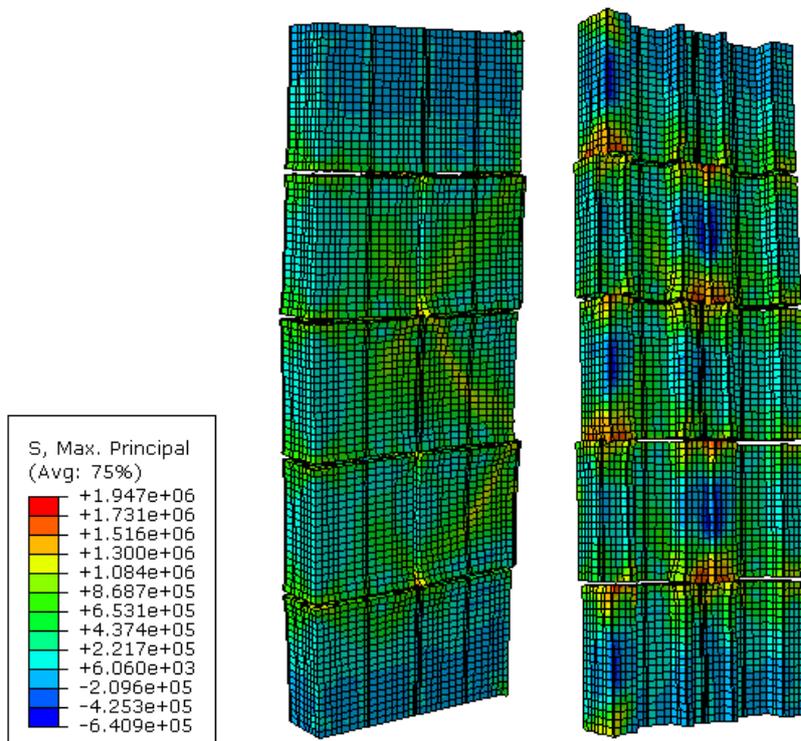


(b) Tensão principal mínima - bloco.

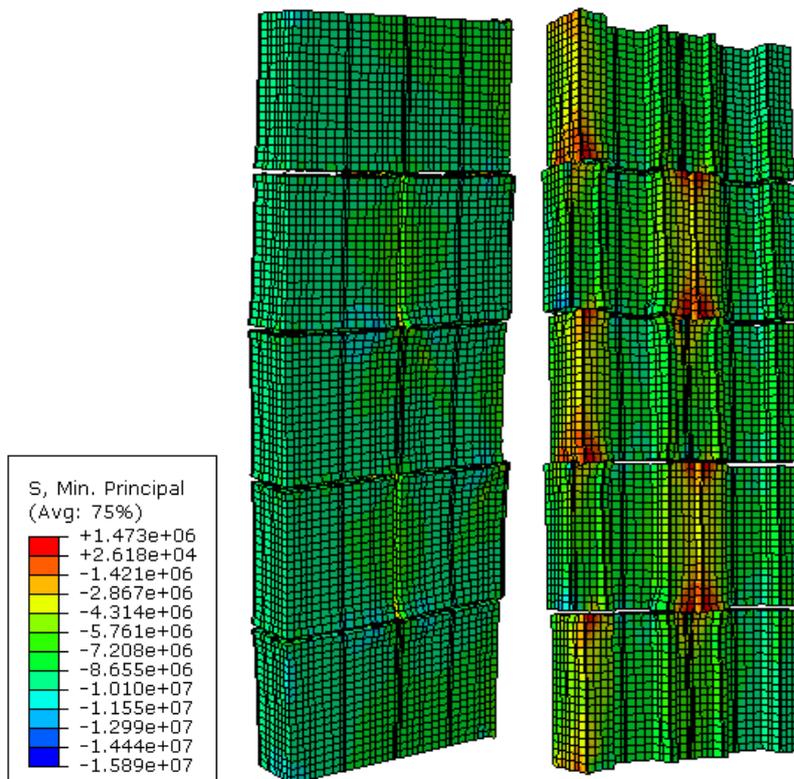
(c) Tensão principal mínima - argamassa.
Unidades em Pascal.

Fonte: Elaborada pela autora.

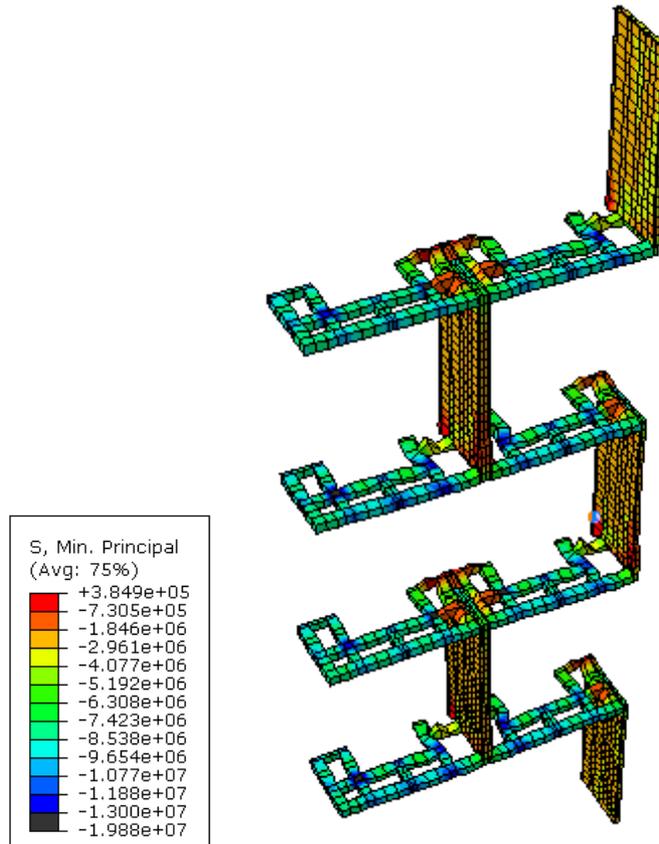
Figura 5.15 – Tensões principais da pequena parede de blocos de paredes vazadas no momento da ruptura.



(a) Tensão principal máxima no bloco.



(b) Tensão principal mínima no bloco.



(c) Tensão principal mínima na argamassa.
Unidades em Pascal.

Fonte: Elaborada pela autora.

Nos modelos numéricos propostos, no instante da ruptura, para a parede de blocos de parede maciça, verifica-se o acúmulo de tensões nas unidades próximo às juntas de assentamento, com valores próximos aos de ruptura por tração do bloco, isto é, 1,17 MPa. Isso ocorre especialmente na parte interna dos blocos, nas espessuras de suas paredes internas, junto à interface com a argamassa. Infere-se que, nessas regiões, ocorre o aparecimento de trincas e maiores deformações, devido a sua menor largura (comparada às paredes externas maciças) e ao movimento de expansão característico desse tipo de estrutura, também observado no resultado experimental. Já para as tensões mínimas, verificam-se valores máximos próximos a 16,7 MPa junto à placa de reação e 13 MPa junto à interface com a argamassa. Por sua vez, a argamassa apresentou tensão mínima principal de 15 MPa, bem acima de sua resistência experimental, o que também é típico nesse tipo de estrutura.

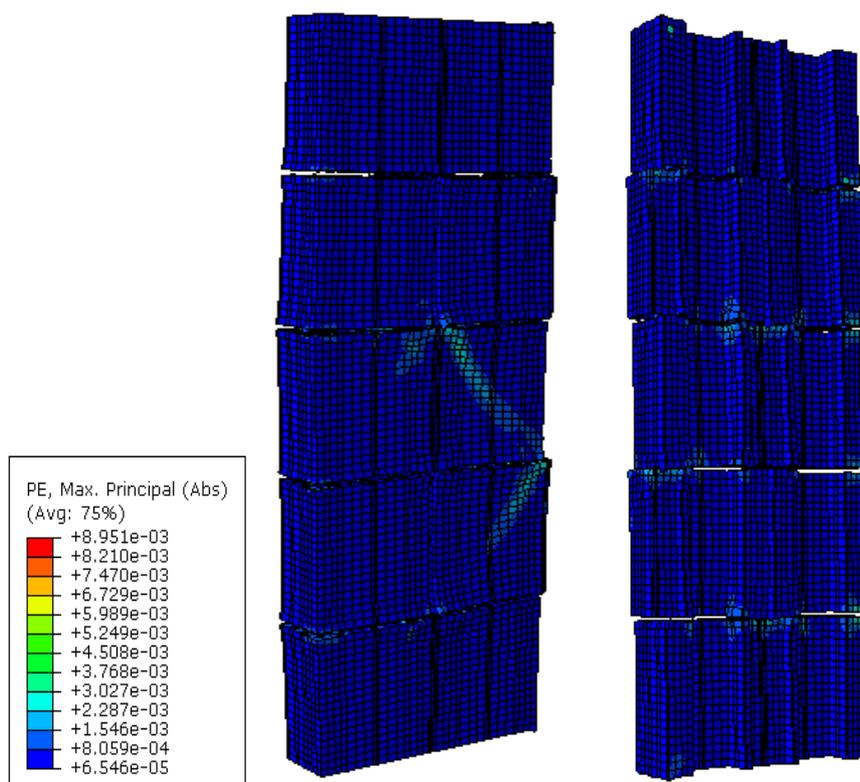
Bem como, para as paredes de blocos de parede vazada, no instante da ruptura, o modelo apresenta tensões de tração de 1,94 MPa, um pouco acima da ruptura por tração do bloco, corroborando para o tipo de ruptura observado em

Fernandes Neto (2020). Já para as tensões mínimas, verificam-se valores máximos próximos a 15,9 MPa junto à placa de reação e 8 MPa na região central da pequena parede; valores menores que o máximo obtido experimentalmente para a unidade. Supõe-se que a redução das espessuras dos elementos acarrete conexões menos rígidas, passíveis de concentração de tensões e maiores deformações pela tração, já esperado no modelo.

Quanto às deformações plásticas máximas principais absolutas, para os dois modelos propostos, observa-se que elas estão localizadas junto à interface da argamassa e na parte lateral dos blocos condizentes com o modo de ruptura, conforme apresentado na Figura 5.16 e na Figura 5.17.

Quanto ao comportamento de tensão-deformação obtido na modelagem proposta, ele é apresentado na Figura 5.18 e na Figura 5.19.

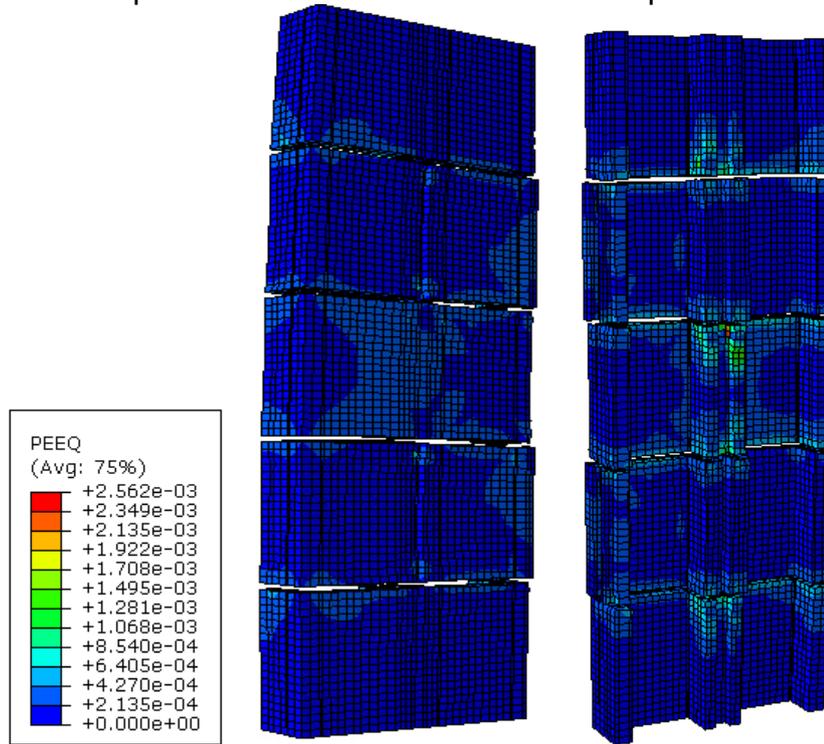
Figura 5.16 – Deformações plásticas principais da pequena parede de blocos de paredes maciças no momento da ruptura.



Unidades em metros.

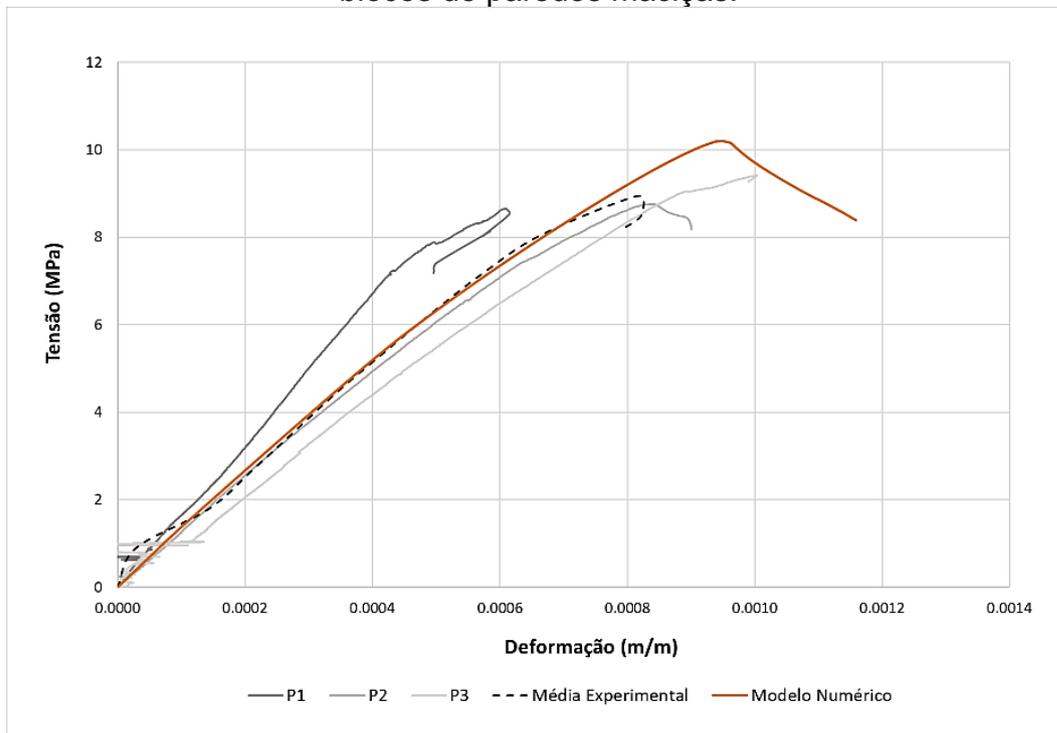
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.17 – Deformações plásticas principais da pequena parede de blocos de paredes vazadas no momento da ruptura.



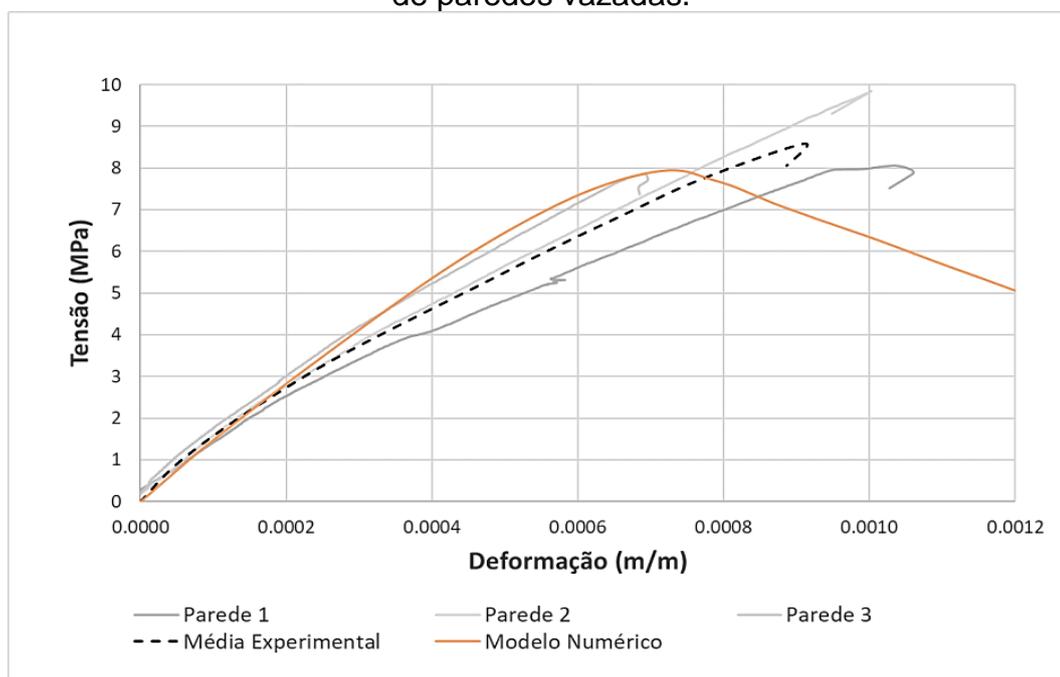
Unidades em metros.
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.18 – Resultados dos modelos mecânicos para as pequenas paredes de blocos de paredes maciças.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.19 – Resultados dos modelos mecânicos para pequena parede de blocos de paredes vazadas.



Fonte: Elaborada pela autora.

Assim, têm-se, para a pequena parede de blocos de parede maciça, as diferenças de -14,1% da carga de ruptura e 16,2% para a deformação de ruptura, comparadas com a média dos modelos experimentais, contudo apenas 8,3% da carga de ruptura e -5,3% para a deformação de ruptura, comparadas com o valor experimental P3.

Já para a pequena parede de bloco de parede vazada, obtiveram-se as diferenças de -7,3 da carga de ruptura e 21,3% para a deformação de ruptura, comparadas com a média dos modelos experimentais, contudo apenas 1,3% da carga de ruptura e -7,8% para a deformação de ruptura, comparadas com o valor experimental "Parede 3".

Esses resultados destacam a grande influência do contato dos materiais e das características mecânicas da ligação entre os elementos de alvenaria, especialmente a argamassa de assentamento, que regeu grande parte da elasticidade e da tensão de pico obtidas. Ambas as configurações de paredes apresentaram modos de ruptura e tensões de tração similares, além de representar a rigidez linear inicial dos modelos experimentais de forma consistente. No entanto, observa-se um distanciamento entre as curvas, no comportamento da parte inelástica, indicando que os modelos numéricos, embora precisos em alguns aspectos, ainda possuem limitações, quando se trata da fase pós-elástica.

Fatores que podem ter influenciado esses resultados incluem a escolha dos modelos *Concrete Damage Plasticity* (CDP) e de Guo (2014) para representar o dano e o comportamento inelástico dos materiais. O modelo CDP, frequentemente utilizado em simulações de comportamento de materiais de construção, conhecido por sua capacidade de representar a degradação da rigidez e a plasticidade dos materiais. No entanto, sua precisão depende da calibração adequada dos parâmetros de dano e plasticidade, que podem variar significativamente com base nas propriedades específicas dos materiais utilizados. Da mesma forma, o modelo de Guo (2014) também requer uma parametrização precisa para refletir fielmente o comportamento observado experimentalmente. Ambos idealizados, considerando o concreto e não o material cerâmico. Bem como, não se obteve experimentalmente o comportamento da cerâmica pós-pico, para melhor calibração dos parâmetros presentes nos modelos adotados.

Além disso, as restrições decorrentes do uso da simetria dupla nas simulações numéricas podem introduzir simplificações não presentes nos testes experimentais. A simetria dupla pode limitar a capacidade do modelo de capturar comportamentos assimétricos ou efeitos localizados de tensão e deformação que ocorrem na prática. Essa limitação pode resultar em uma representação incompleta dos modos de falha e das distribuições de tensão, particularmente nas regiões críticas da estrutura. Outra consideração importante é a variação nas propriedades dos materiais de construção utilizados experimentalmente, como blocos de alvenaria e argamassa, que podem apresentar variações significativas em suas propriedades mecânicas, devido a fatores como composição, método de fabricação e condições de cura. Essas variações podem afetar diretamente a resposta estrutural e a precisão dos modelos numéricos.

Em suma, para os elementos de prisma, as maiores tensões de compressão localizam-se nas faces laterais. Já nas pequenas paredes, concentram-se nas faces posterior e anterior, no encontro do bloco com as juntas de argamassa. Ambos os comportamentos estão de acordo com o modelo de ruptura encontrado pelo autor dos ensaios e apresentado na literatura, conforme discutido no item 2.2.3.

Portanto, o modelo numérico demonstrou uma boa correlação com as tendências observadas experimentalmente até o ponto de ruptura. Durante quase toda a fase de deformação, os resultados do modelo mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pelos ensaios, indicando que a simulação apresenta um bom comportamento numérico.

6 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS REFERENTES À ANÁLISE TÉRMICA

A análise pormenorizada de elementos de alvenaria estrutural, especialmente aqueles construídos com blocos cerâmicos, sob uma variedade de condições térmicas, proporciona uma compreensão mais aprofundada acerca da forma como essas estruturas respondem a variações de temperatura, simulando, assim, situações como incêndios.

Para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos nas simulações, utilizaram-se modelos previamente validados com base em referências experimentais, incluindo os trabalhos de Fernandes Neto (2020), Rosemann (2011) e Nguyen *et al.* (2009). A validação desses modelos constitui um componente essencial para assegurar que as simulações numéricas reproduzam satisfatoriamente o comportamento térmico observado nos modelos experimentais.

Ao adentrarmos nas simulações numéricas de comportamento térmico, a análise se concentra na investigação da influência das propriedades térmicas dos blocos cerâmicos. Este escopo engloba a condução de calor, a distribuição de temperatura e serve de base para análise das implicações potenciais para a integridade estrutural desses elementos de alvenaria, nos próximos itens deste trabalho. O capítulo também aborda a metodologia empregada nessas simulações, destacando os parâmetros específicos considerados, proporcionando assim uma compreensão abrangente do comportamento térmico dessas estruturas.

6.1 Condições de contorno e carregamento

Com o intuito de representar os experimentos de referência, os modelos dos blocos, prismas e pequenas paredes possuem suas quatro faces externas ou uma única face (nos casos das paredes e pequenas paredes isoladas) submetidas às temperaturas do incêndio simulado. O aquecimento foi definido conforme a curva padrão ISO 834-1 (ISO, 1999) ou curva específica de aquecimento aplicada pelo autor, em consonância com os dados experimentais. A temperatura ambiente aferida nos ensaios foi aplicada por meio de um passo inicial nas simulações.

O valor de emissividade empregado nas quatro faces externas foi de 0,95, de acordo com a ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005b), para tijolos cerâmicos, considerando os efeitos de radiação. Nas faces externas, a transferência de calor por meio da

convecção foi considerada, com coeficiente de $25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, conforme o Eurocode 1 (CEN, 2002), para estruturas submetidas a aquecimento, segundo curvas padrão de incêndio; e o coeficiente de $4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, também segundo o Eurocode 1 (CEN, 2002), para as faces expostas ao ambiente.

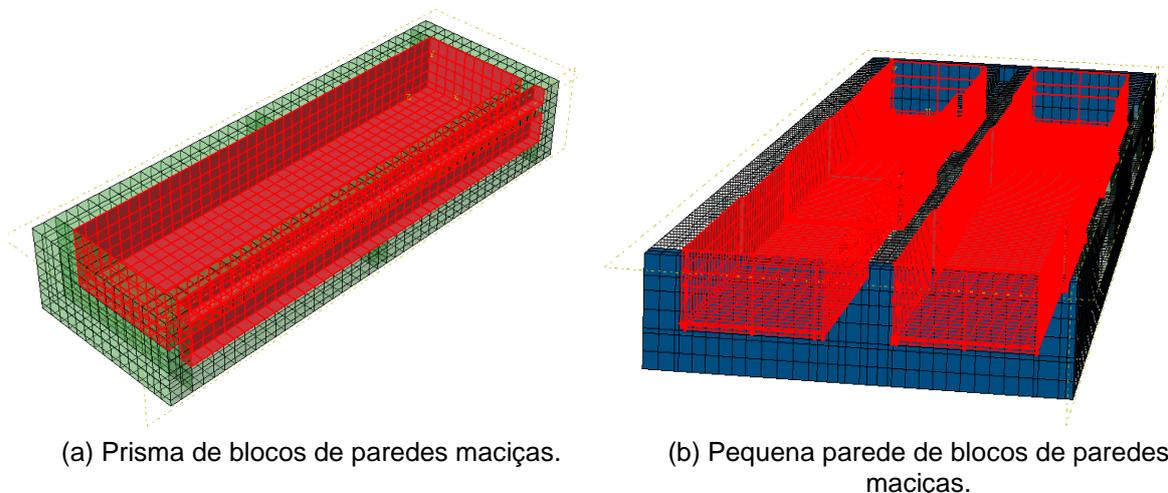
Nas cavidades que se mantiveram conectadas ao longo de toda a altura dos elementos estruturais, adotou-se a representação da radiação por meio da interação *cavity radiation*, disponível no software Abaqus. O valor de emissividade empregado nas faces dos vazados interligados foi de 0,95, o mesmo valor utilizado nas faces externas do bloco. A convecção não foi representada no interior dos blocos. Para considerar esses efeitos, a condutividade térmica e o calor específico da cerâmica foram calibrados com base no modelo experimental, seguindo abordagens semelhantes a trabalhos anteriores, como Assis (2021), Carvalho (2019), Rodovalho (2018), Rosemann (2011) e Nguyen *et al.* (2009).

Na metodologia dos ensaios de referência, foi incorporado material de isolamento térmico na base e no topo dos elementos analisados. Assim, no modelo proposto, foram empregados elementos sólidos, com área equivalente à seção transversal do elemento de alvenaria analisado, posicionados no topo e na base da geometria proposta.

Esses elementos sólidos não transferem calor para o elemento de alvenaria. Essa abordagem foi adotada para estabelecer a interação *cavity radiation*, utilizada para modelar o calor dentro dos vazados, que foram considerados fechados, devido ao uso do material isolante nos ensaios (Figura 6.1). Com o objetivo de simular um isolamento térmico nessas áreas, as faces desses elementos sólidos, que selam os vazados interligados, foram configuradas com emissividade igual a 0, indicando a ausência de absorção de calor.

Adotou-se também a conexão tipo *tie* entre blocos e argamassa, usada para igualar todos os outros graus de liberdade ativos para as superfícies conectadas, conforme detalhado no item 4.4. As propriedades adotadas para a modelagem térmica estão representadas na Figura 6.2, esquematizando o prisma de bloco de parede maciça, inclusive se destaca que as mesmas considerações foram adotadas para os outros elementos modelados.

Figura 6.1 – Exemplo de superfícies definidas para utilização da interação *cavity radiation*.

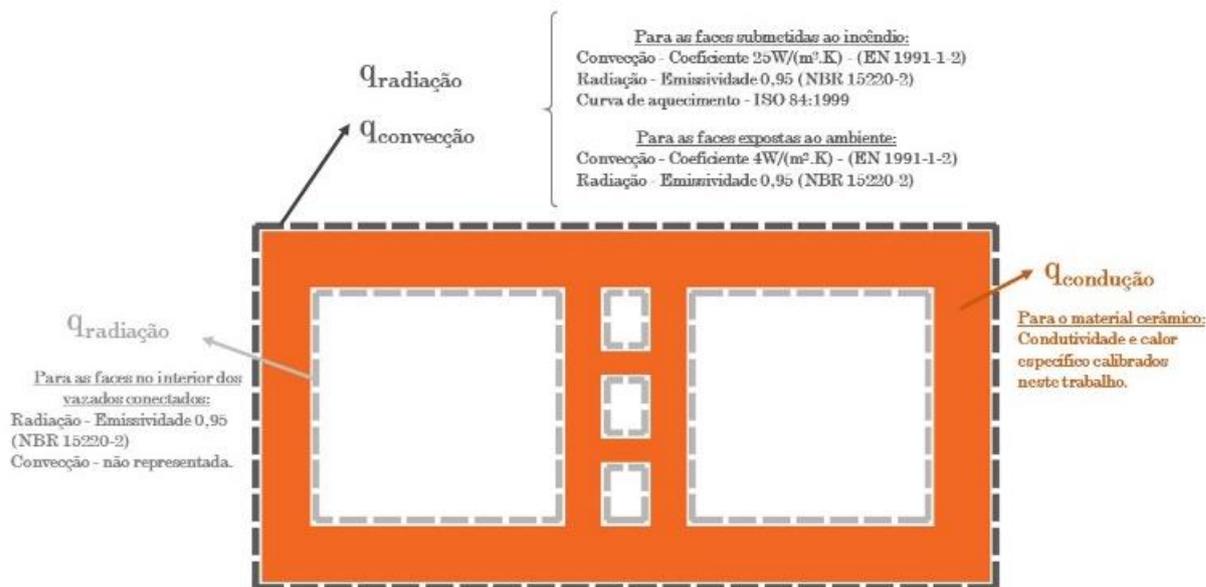


(a) Prisma de blocos de paredes maciças.

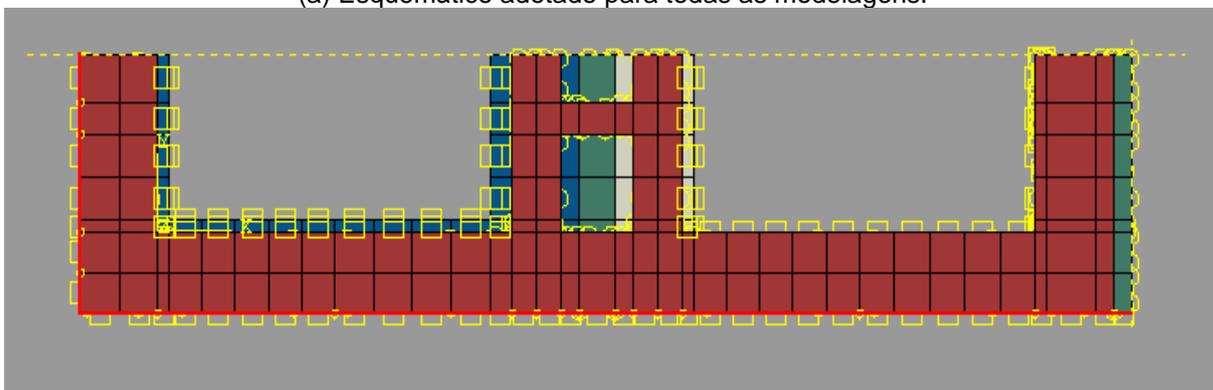
(b) Pequena parede de blocos de paredes maciças.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 6.2 – Condições de contorno adotadas para modelagem térmica em elementos cerâmicos.



(a) Esquemático adotado para todas as modelagens.



(b) Pequena parede modelada com simetria dupla (placas de reação ocultas para melhor visualização).

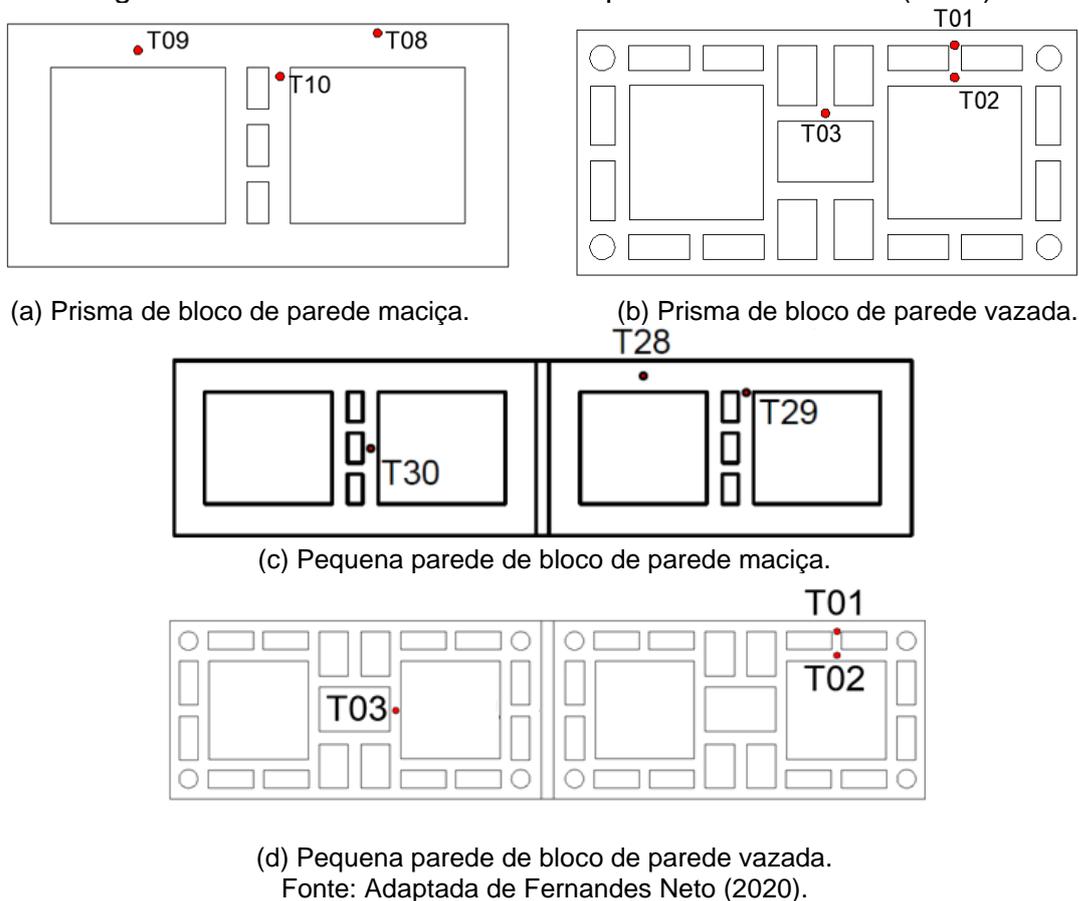
Fonte: Elaborada pela autora.

6.2 Pontos analisados

Para os prismas e as pequenas paredes estudados em Fernandes Neto (2020), o autor instrumentou 3 pontos para cada unidade de alvenaria submetida à situação de incêndio, em suas quatro faces externas. Esses pontos também foram utilizados para validação das análises deste trabalho.

O esquema detalhando a posição em que os pontos foram instrumentados é apresentado na Figura 6.3. Os termopares foram posicionados no topo das estruturas. A geometria desses elementos foi detalhada no item 4.2.1.

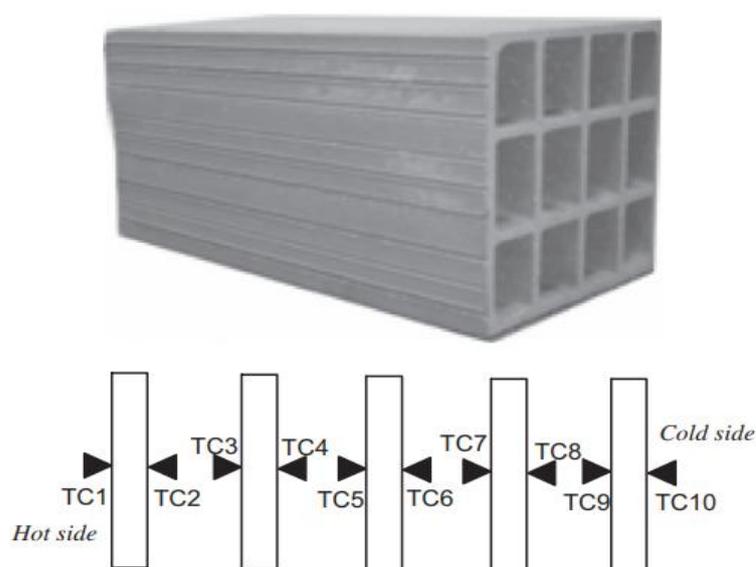
Figura 6.3 – Pontos instrumentados por Fernandes Neto (2020).



Já o bloco cerâmico de terracota submetido a análises experimentais por Nguyen *et al.* (2009) possui três fileiras e quatro colunas de células horizontais. O calor, conforme curva proposta pelos autores, é aplicado em um lado externo (face exposta – *hot side*), enquanto o lado oposto (face não exposta – *cold side*) é mantido à temperatura ambiente. As demais faces externas são adiabáticas. Os autores instrumentaram em ambos os lados das cinco partições verticais, para medir as

variações de temperatura das faces internas e externas do bloco (Figura 6.4). Utilizou-se dos valores obtidos pelos autores, numéricos e experimentais, para comparação com o modelo proposto por esse trabalho.

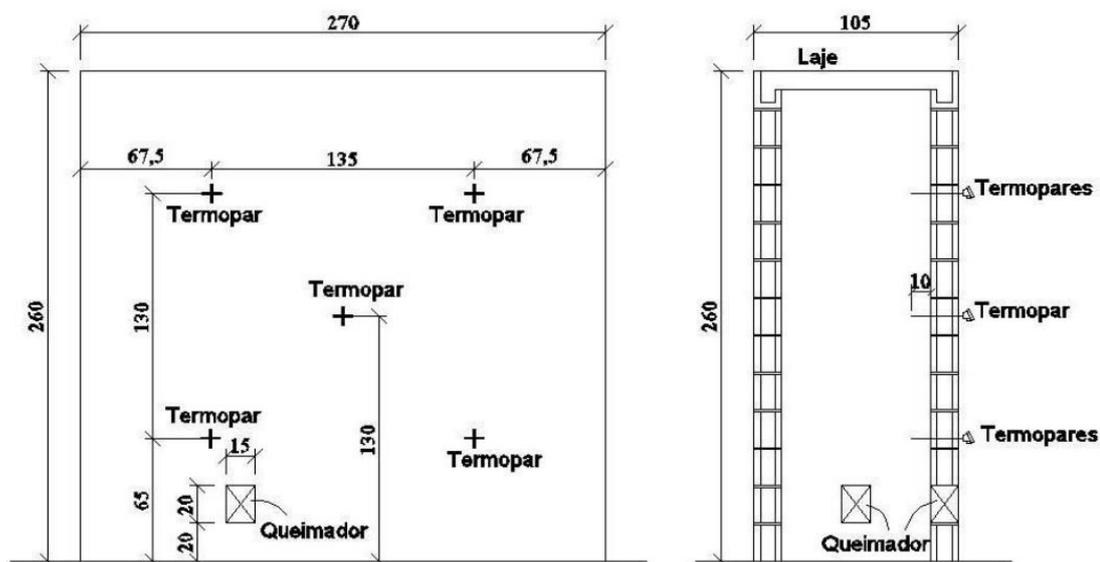
Figura 6.4 – Instrumentação utilizada por Nguyen *et al.* (2009) em bloco cerâmico de terracota.



Fonte: Nguyen *et al.* (2009).

Por fim, para os elementos dos experimentos de Rosemann (2011), o autor instrumentou a face externa de paredes com blocos cerâmicos submetidas a aquecimento em sua face interna (Figura 6.5).

Figura 6.5 – Pontos instrumentados por Rosemann (2011).



Vista frontal e corte transversal do forno, com unidades em cm.

Fonte: Rosemann (2011).

Seguindo a metodologia adotada nos estudos de Rodovalho (2018), que também analisou os experimentos de Rosemann (2011), o campo térmico desenvolvido nas paredes foi representado por meio de um bloco, pois o fluxo de calor medido experimentalmente ocorreu na direção transversal.

As temperaturas médias da face externa, da face interna e no ponto central foram o fator analisado neste trabalho, como pontos de validação para o modelo proposto.

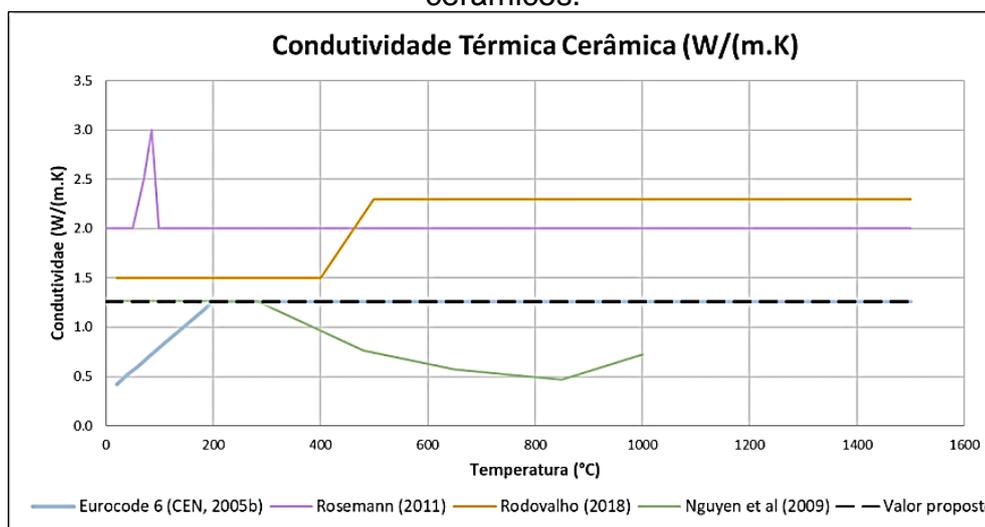
6.3 Validação do comportamento térmico dos materiais

Na ausência de norma brasileira que padronize as propriedades dos materiais de alvenaria estrutural sob a variação temperatura, optou-se, desta forma, em calibrar a condutividade térmica e o calor específico, a partir de modelagens similares presentes na literatura. O não uso de forma integral das curvas da norma europeia de alvenaria estrutural deve-se à variação construtiva dos blocos europeus em relação aos brasileiros.

Neste estudo, as propriedades térmicas do material cerâmico foram ajustadas usando os valores recomendados pelo Eurocode 6 (CEN, 2005b), além dos valores adotados por Nguyen *et al.* (2009), Rosemann (2011) e Rodovalho (2018). Levando em conta os efeitos da mudança de fase, devido à evaporação da umidade presente nos poros dos materiais cerâmicos (CEN, 2005b) e à predominância da transferência de calor por convecção entre 150 e 200°C (DUPIN, 2019). Esses fenômenos foram incorporados ao modelo proposto neste estudo, aumentando a condutividade térmica para 1.26 W/(m.K), também para temperaturas abaixo de 200°C (Figura 6.6), reduzindo o pico do calor específico, conforme previsto pela norma Eurocode 6 (CEN, 2005b).

De acordo com a referida norma, o calor específico permanece constante até aproximadamente 95°C, atinge o pico em 100°C e diminui linearmente até 200 °C, alcançando cerca de 25% do valor máximo. Após isso, o calor específico diminui linearmente, até retornar ao valor inicial em 1200 °C.

Figura 6.6 – Valores de referência para a condutividade térmica de materiais cerâmicos.



Fonte: Elaborada pela autora.

Em Nguyen *et al.* (2009), foi conduzida uma análise termogravimétrica (TGA - do inglês *thermogravimetric analysis*) para determinar o teor de água do material (ω). E, por meio de análises experimentais e bibliográficas de blocos e paredes de blocos cerâmicos em situações de incêndio, observou-se um platô de temperatura a 100°C correspondente ao pico da curva do calor específico, cuja duração depende da quantidade de água presente na amostra. Esse fenômeno foi observado por outros autores como Fernandes Neto (2020), Rodvalho (2018) e Rosemann (2011).

Também em Nguyen *et al.* (2009), foi proposta a variação do calor específico a 100°C, expressa pela Equação 15:

$$\Delta C_p^{peak} = \frac{\omega \times H_l}{2 \times \Delta T} \quad (15)$$

Na qual:

ΔC_p^{peak} é variação do calor específico a 100°C;

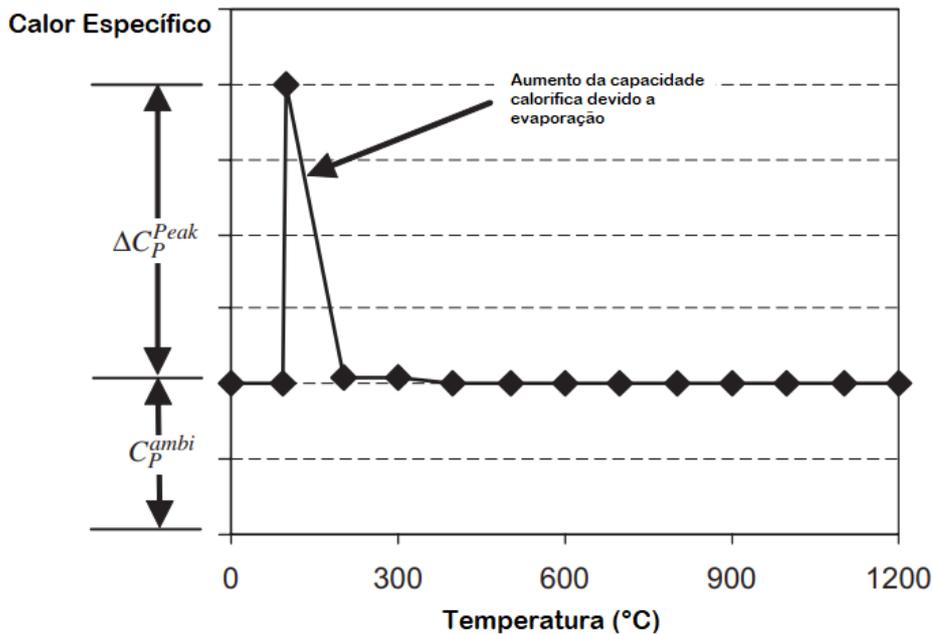
ω é a umidade presente no material;

H_l é calor latente de evaporação da água (2260×10^3 J/kg); e

ΔT é a metade do intervalo de evaporação (considerando que a água evapora quando a temperatura varia entre 95 °C e 105 °C, então $\Delta T = 5$ °C).

Portanto, foi apresentada a seguinte configuração para a curva do material cerâmico de terracota (Figura 6.7):

Figura 6.7 – Modelo de curva calor específico x temperatura proposto em Nguyen *et al.* (2009).

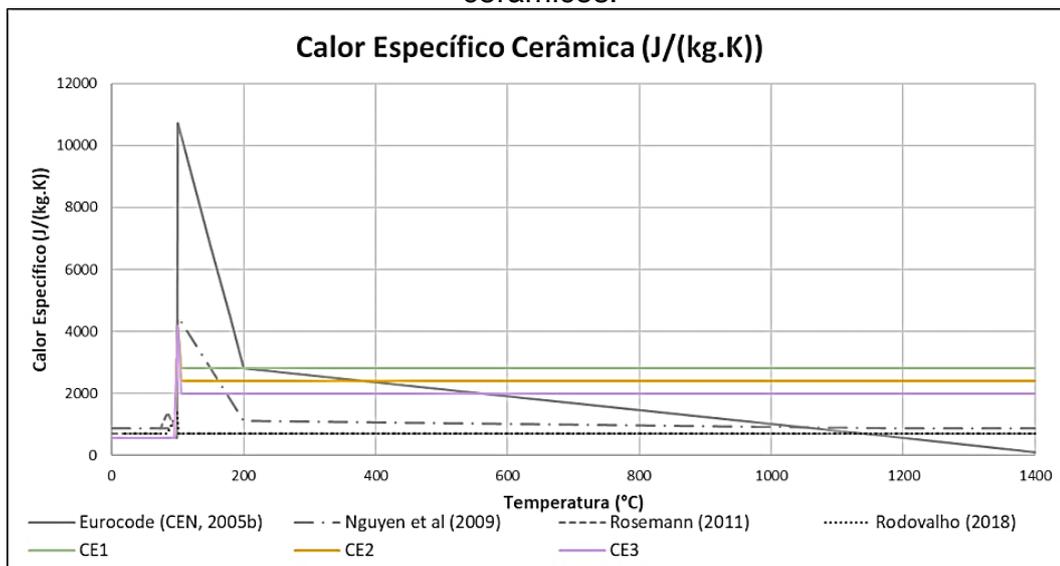


Fonte: Adaptada de Nguyen *et al.* (2009).

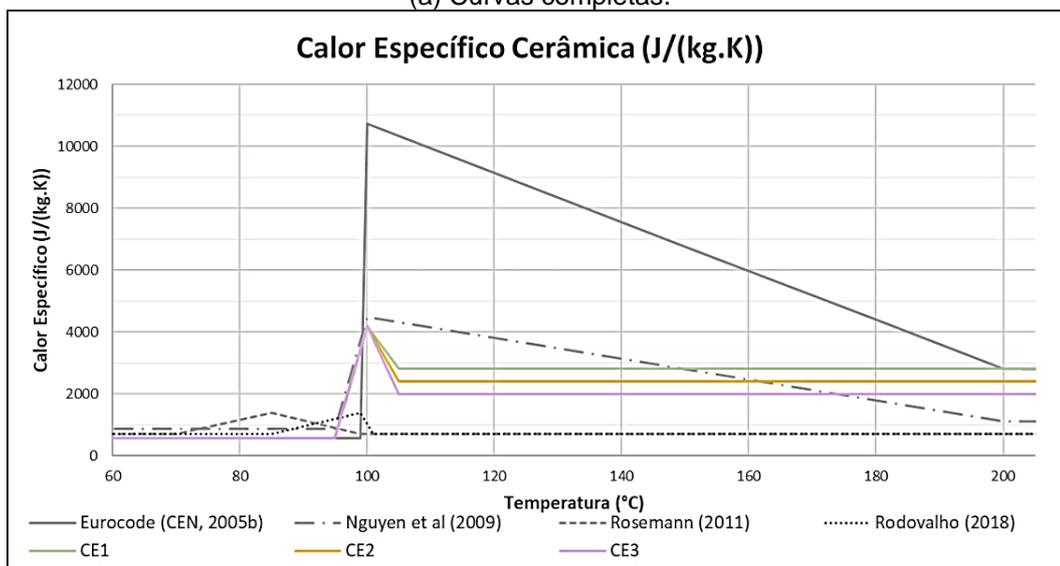
Em concordância com essa revisão bibliográfica, três curvas foram propostas neste estudo (CE1, CE2 e CE3), apresentando os melhores resultados nos comparativos com valores experimentais, conforme mostrado na Figura 6.8. Essas curvas:

- começam com o valor de 564 J/(kg.K), conforme previsto pelo Eurocode 6 (CEN, 2005b);
- têm o pico entre 95°C e 105°C (intervalo de evaporação), adicionando o valor calculado pela Equação 3, conforme proposto por Nguyen *et al.* (2009), e seguindo a linha dos trabalhos com blocos cerâmicos brasileiros (Rosemann (2011) e Rodvalho (2018)), que também reduziram o pico proposto pela normativa; e
- variam o pós-pico (entre 105°C e 1400°C), com os valores de 2820 J/(kg.K), conforme previsto pelo Eurocode 6 (CEN, 2005b), 2000 J/(kg.K) e o valor intermediário de 2400 J/(kg.K).

Figura 6.8 – Valores de referência avaliados para o calor específico de materiais cerâmicos.



(a) Curvas completas.



(b) Detalhe dos picos de referência e os propostos.

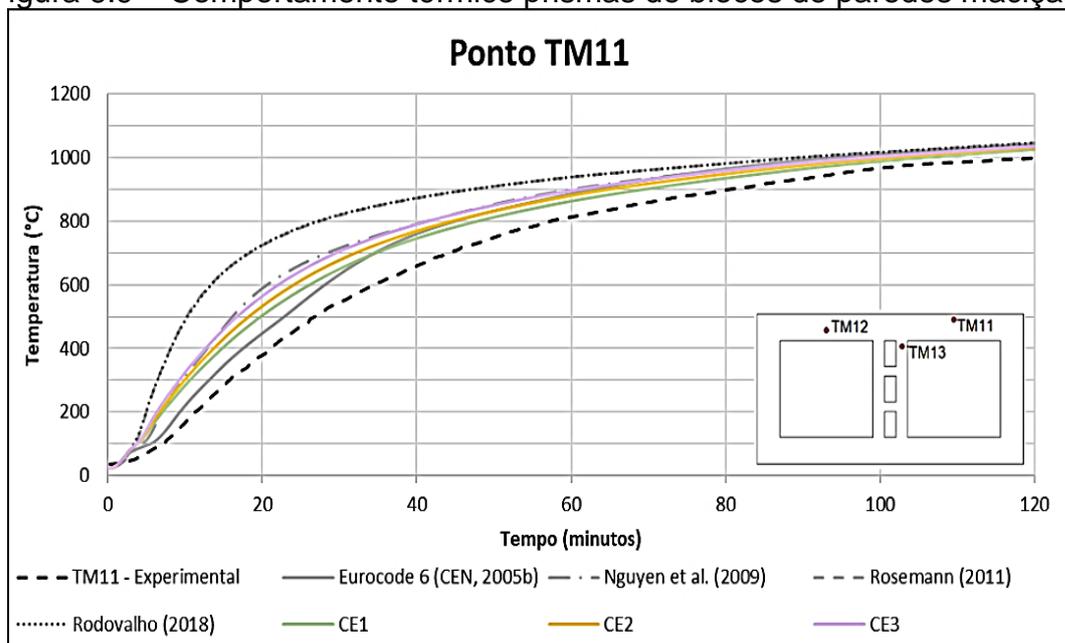
Fonte: Elaborada pela autora.

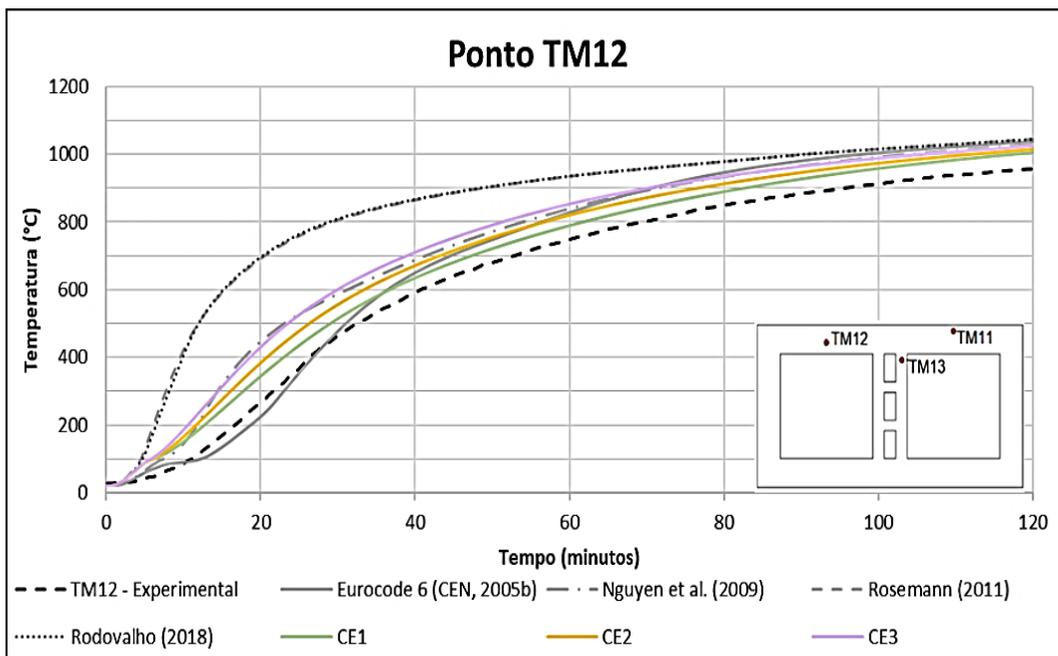
Os itens 6.3.1 a 6.3.4 apresentam as validações dos valores propostos com os campos de temperatura encontrados nos ensaios e modelagens de referência. No item 6.3.5, são apresentadas as propriedades térmicas e os campos de temperatura adotados para as análises termomecânicas subsequentes. As propriedades da argamassa foram obtidas do trabalho de Rosemann (2011).

6.3.1 Prismas de blocos cerâmicos submetidos a aquecimento em suas faces externas

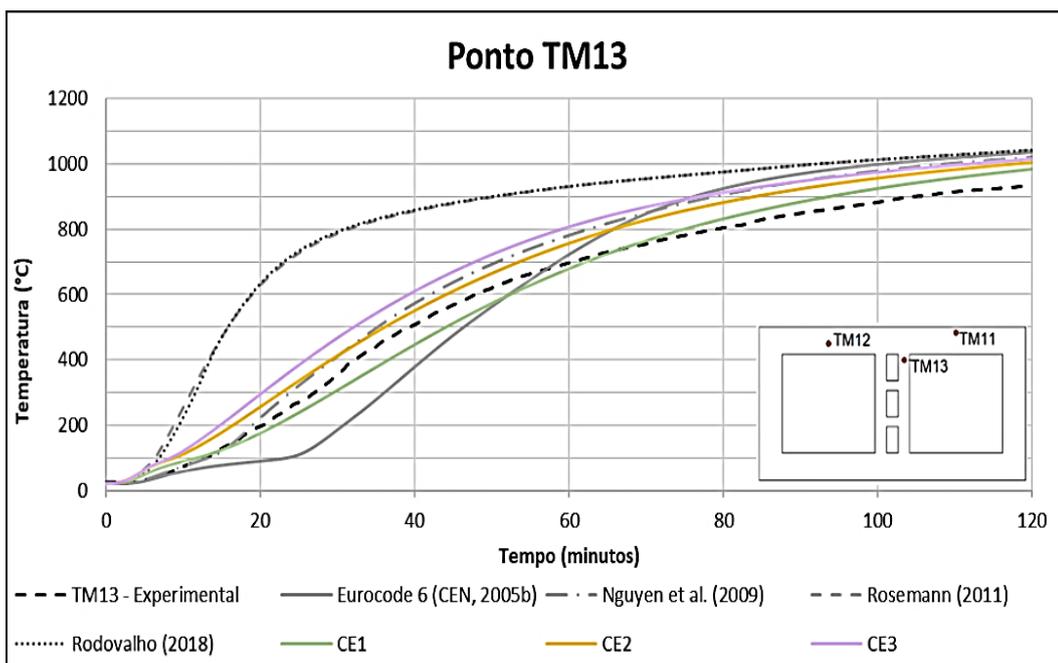
Em Fernandes Neto (2020), foram conduzidos experimentos em duas configurações de prismas de duas fiadas de blocos cerâmicos, os quais foram aquecidos em suas quatro faces externas. Essas configurações incluíram um prisma feito de blocos de parede maciça e outro de blocos de parede vazada. Seguindo a metodologia proposta no presente trabalho, que envolveu a simulação de aquecimento, conforme a norma ISO 834-1 (ISO, 1999), por 120 minutos, considerando as variações no comportamento térmico do material cerâmico (as curvas foram nomeadas conforme autor de referência para as propriedades adotadas), foram registradas as seguintes respostas térmicas das estruturas (Figura 6.9 e Figura 6.10), nos pontos instrumentados por Fernandes Neto (2020):

Figura 6.9 – Comportamento térmico prismas de blocos de paredes maciças.





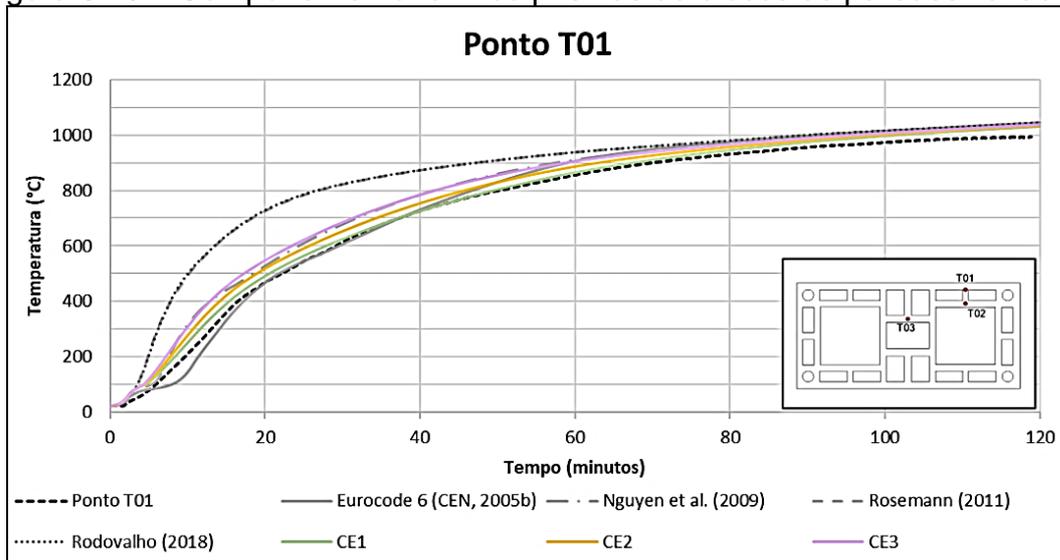
(b) Valores obtidos para o ponto TM12.



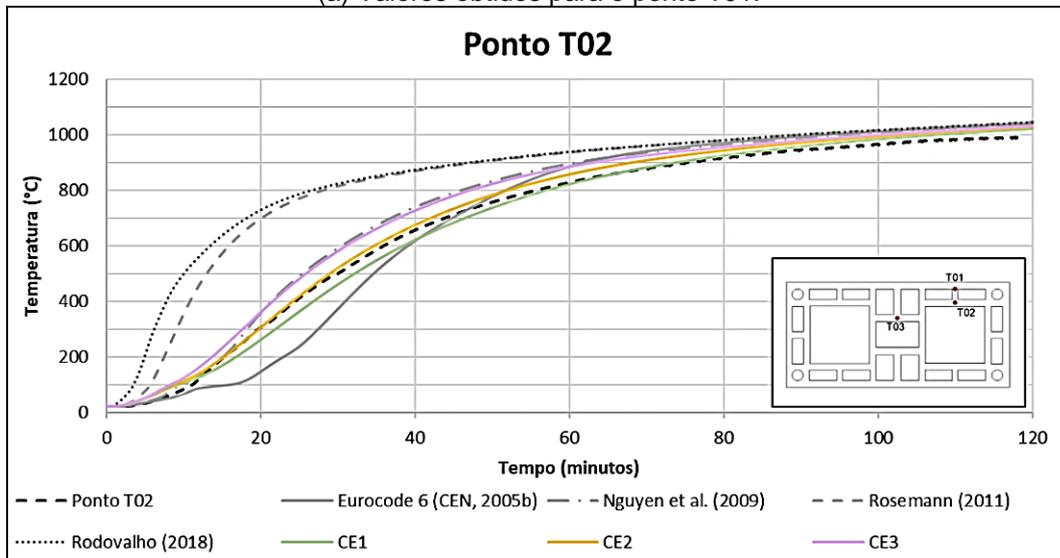
(c) Valores obtidos para o ponto TM13.

Fonte: Elaborada pela autora.

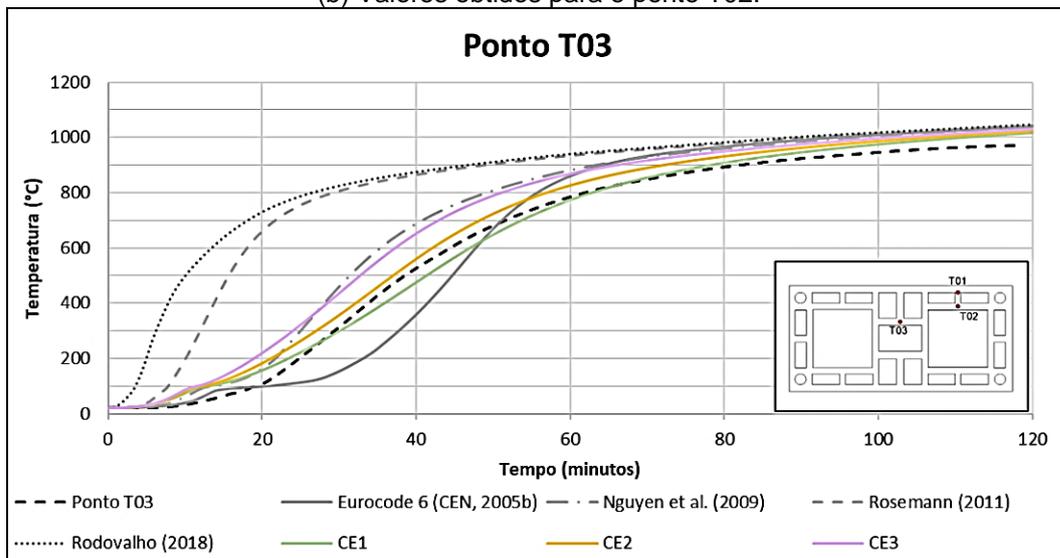
Figura 6.10 – Comportamento térmico prismas de blocos de paredes vazadas.



(a) Valores obtidos para o ponto T01.



(b) Valores obtidos para o ponto T02.



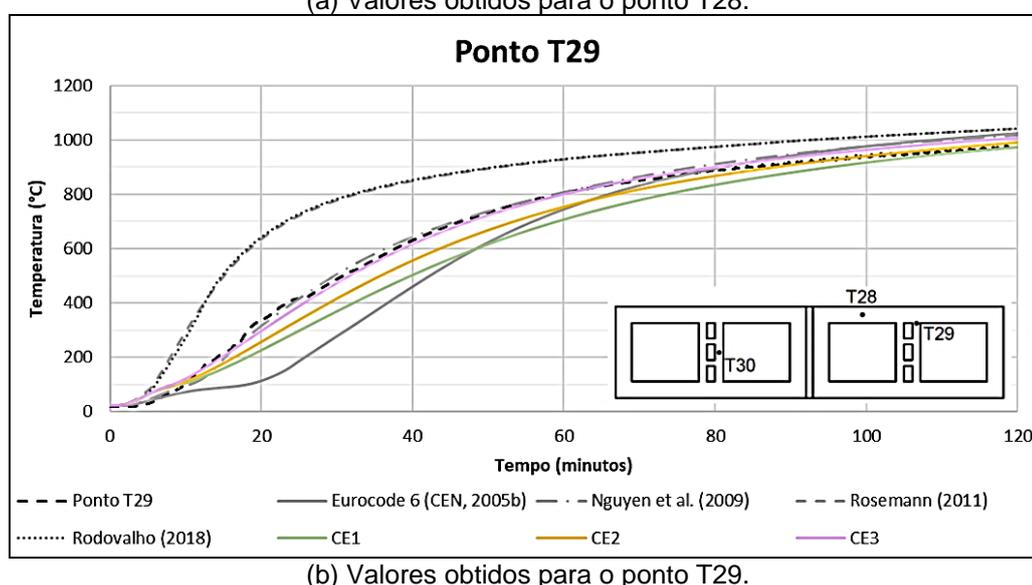
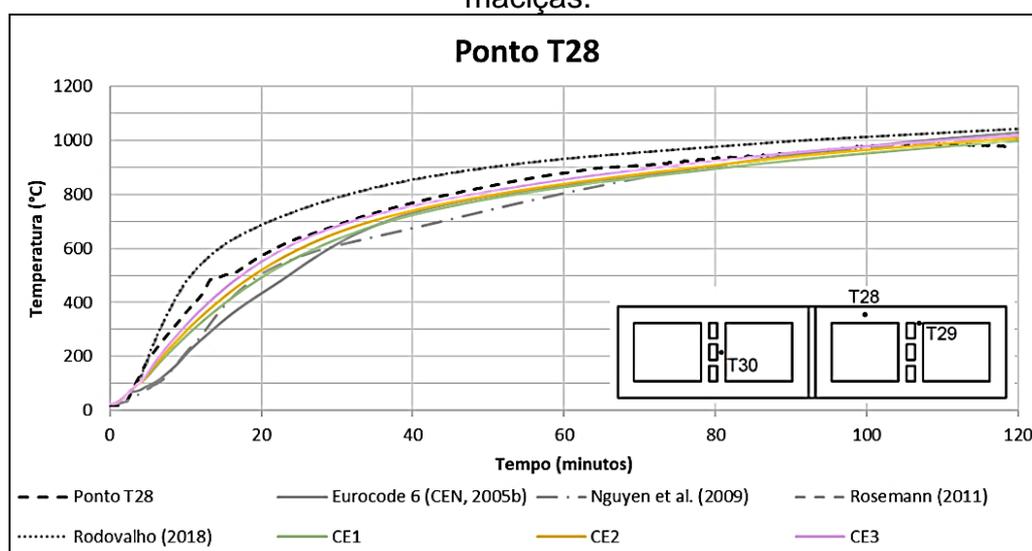
(c) Valores obtidos para o ponto T03.

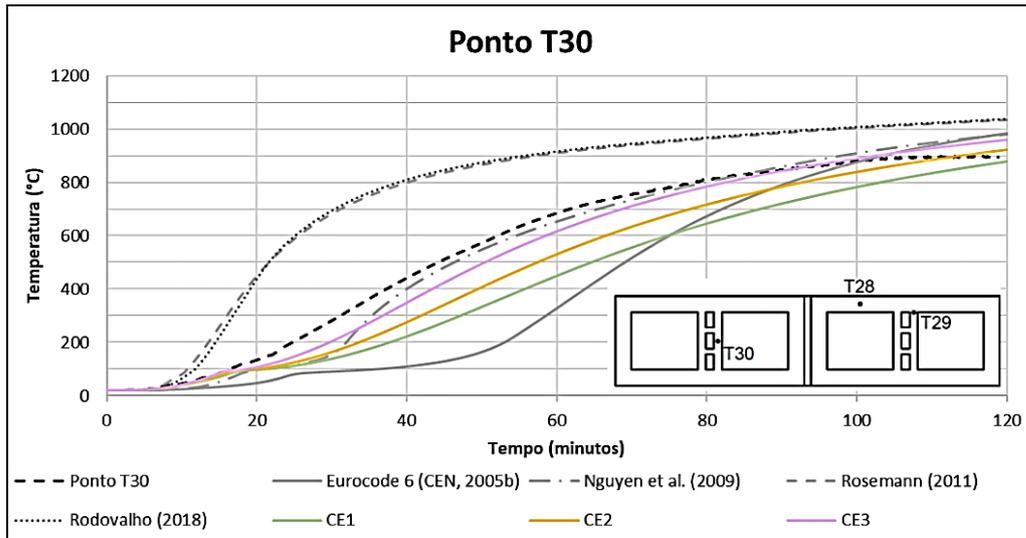
Fonte: Elaborada pela autora.

6.3.2 Pequenas paredes de blocos cerâmicos submetidas a aquecimento em suas faces externas

Analogamente ao item anterior, para as duas configurações de pequenas paredes compostas por 5 fiadas de blocos cerâmicos, conforme proposto por Fernandes Neto (2020) - pequena parede de bloco de parede maciça e pequena parede de bloco de parede vazada - e considerando as variações no comportamento térmico do material cerâmico, foram registradas as seguintes respostas térmicas das estruturas nos pontos instrumentados pelo autor supracitado (Figura 6.11 e Figura 6.12):

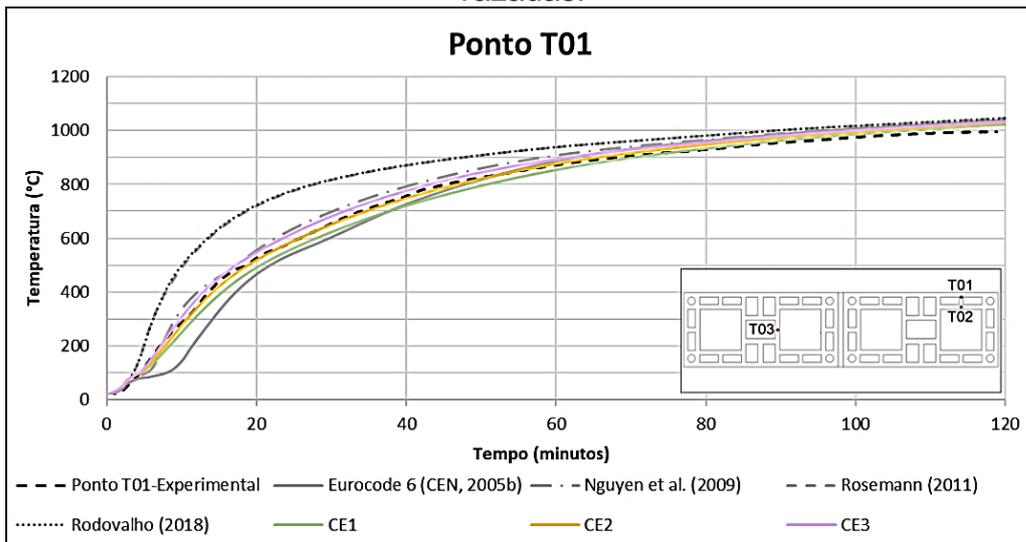
Figura 6.11 – Comportamento térmico pequenas paredes de blocos de paredes maciças.



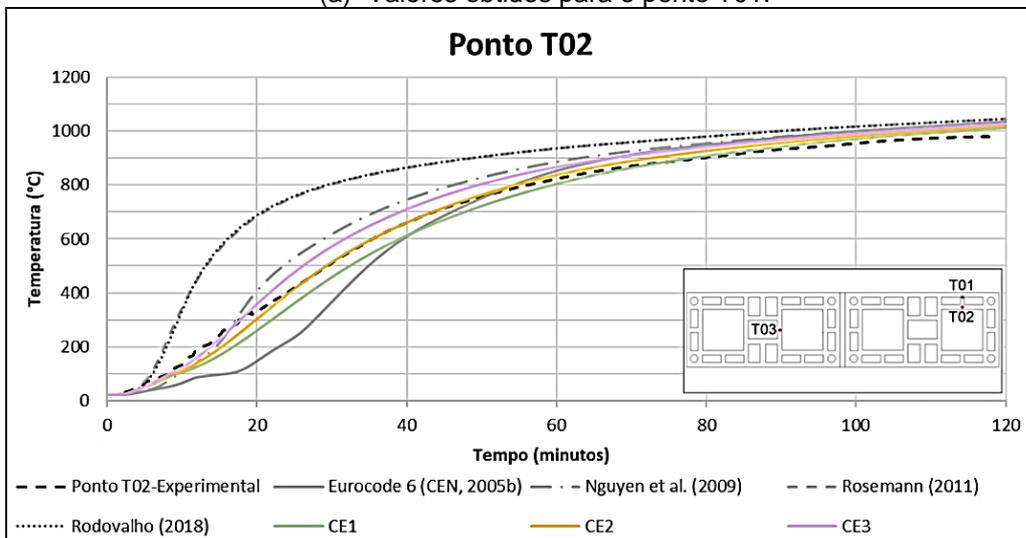


(c) Valores obtidos para o ponto T29.
 Fonte: Elaborada pela autora.

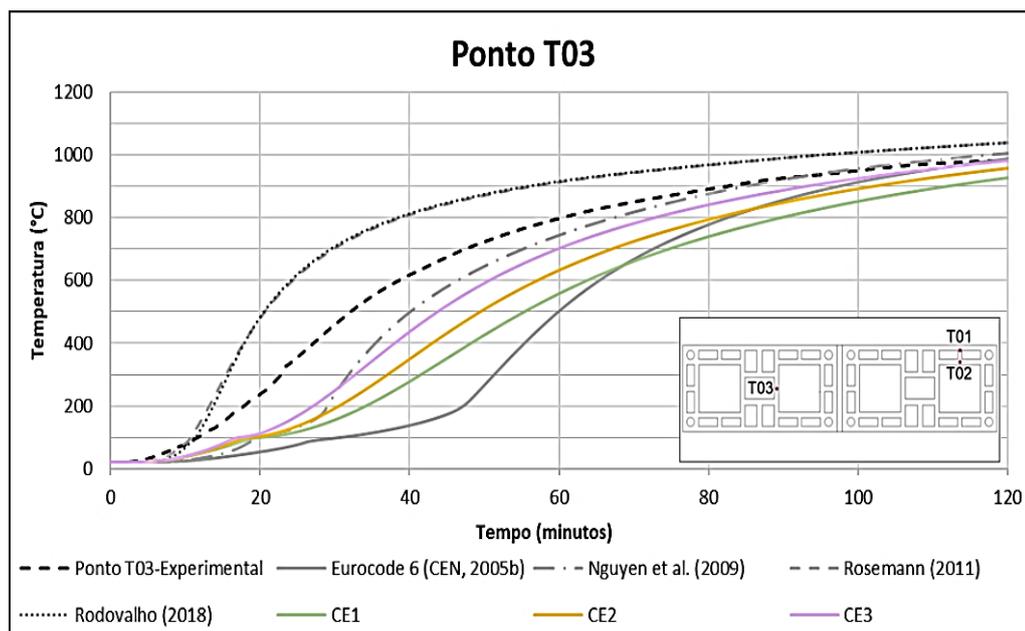
Figura 6.12 – Comportamento térmico pequenas paredes de blocos de paredes vazadas.



(a) Valores obtidos para o ponto T01.



(b) Valores obtidos para o ponto T02.



(c) Valores obtidos para o ponto T03.

Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se que as curvas CE2 e CE3 demonstram uma maior proximidade com os campos de temperatura obtidos experimentalmente, para a pequena parede feita de blocos de parede vazada (pontos T01 e T02) e para a parede composta por blocos de parede maciça (pontos T28 e T29).

No entanto, nos pontos T30 e T03, localizados mais próximos dos vazados internos dos elementos estruturais, é observada uma discrepância em relação à curva experimental. Para o modelo com blocos de parede maciça, após 40 minutos de aquecimento (ponto mais divergente), as diferenças são de 219°C, 161°C e 88°C para as curvas CE1, CE2 e CE3, respectivamente. Enquanto que, para o modelo composto por blocos de parede vazada, as diferenças são de 335°C, 270°C e 171°C para as curvas CE1, CE2 e CE3, respectivamente.

Por fim, a curva CE1 apresenta os pontos mais distantes das curvas de referência, resultando em um campo de temperatura consistentemente mais baixo do que o obtido experimentalmente, em especial para o modelo com blocos de parede maciça.

6.3.3 Bloco cerâmico de terracota submetido a aquecimento em uma face

Foi delineada por Nguyen *et al.* (2009) uma análise térmica de um bloco cerâmico de terracota submetido a aquecimento em uma face, com a face oposta

exposta ao ambiente e as demais faces consideradas adiabáticas. Adotando a metodologia proposta neste estudo, que consistiu na simulação de aquecimento sob a temperatura imposta no estudo experimental por 180 minutos, foram consideradas as variações no comportamento térmico do material cerâmico mediante a utilização das curvas propostas na literatura (as curvas foram nomeadas conforme autor de referência para as propriedades adotadas) e das três curvas sugeridas no presente trabalho (CE1, CE2 e CE3). As respostas térmicas do bloco nos pontos instrumentados são ilustradas na Figura 6.13.

Observa-se que os pontos mais distantes da fonte de calor (TC7 a TC10) tornam-se mais suscetíveis aos efeitos do pico do consumo energético, associado à evaporação da umidade, tal como representado pelas propriedades da cerâmica.

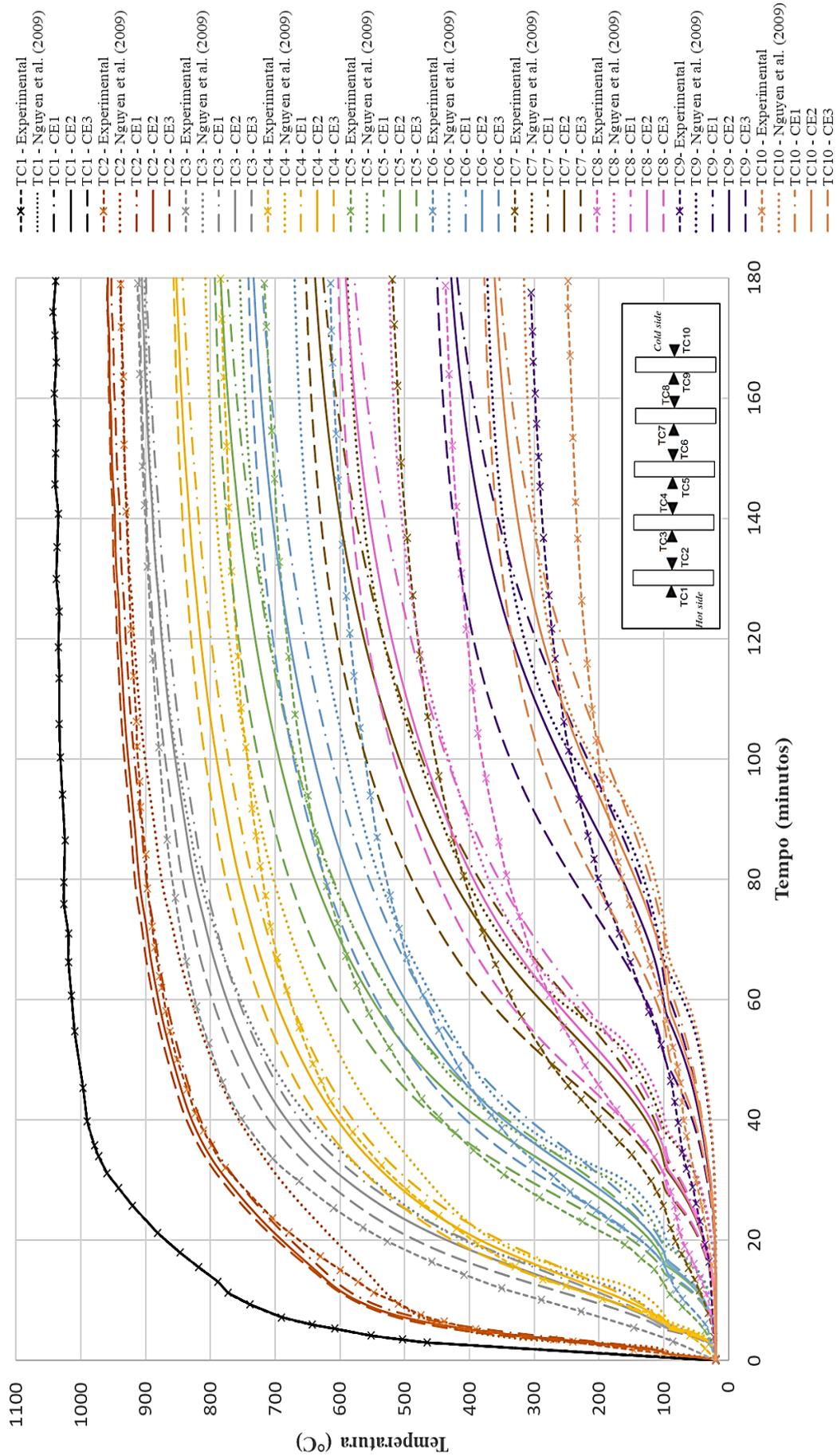
Além disso, quando o modelo atinge temperaturas elevadas, aproximadamente após 100 minutos, experimentalmente observa-se uma queda na taxa de aquecimento do material que não é refletida no modelo proposto. Possíveis explicações incluem a falta de representatividade do dano no material nessas temperaturas e a ausência da queda na condutividade prevista por Nguyen *et al.* (2009), que difere do comportamento proposto pela normativa do Eurocode (CEN, 2005b).

No entanto, essa redução na condutividade também influencia a transferência de calor no início do aquecimento, até a temperatura de 200°C, como evidenciado pela diferença de temperaturas obtida entre as curvas propostas e a de Nguyen *et al.* (2009).

É digno de nota que o modelo demonstra uma boa representatividade da transferência de calor dentro das paredes e através dos vazados do material, com destaque para as curvas CE2 e CE3, que mantêm as tendências de comportamento do material, ao longo da transferência de calor entre as faces. Entre elas, a curva CE2 apresentou uma melhor concordância com as curvas experimentais.

Ademais, o bloco utilizado por Nguyen *et al.* (2009), possui uma composição de cerâmica terracota que difere da cerâmica de argila utilizada nos blocos dos estudos experimentais de referência no Brasil. As propriedades propostas pelos autores foram desenvolvidas para um modelo numérico baseado em formulações de transferência de calor relativas ao seu estudo, as quais diferem das adotadas neste trabalho. No entanto, conclui-se que essas propriedades sugeridas pelos autores demonstram similaridades de comportamento com os blocos cerâmicos brasileiros e desempenharam um papel significativo na validação do modelo utilizado.

Figura 6.13 – Comportamento térmico bloco vazado de terracota.



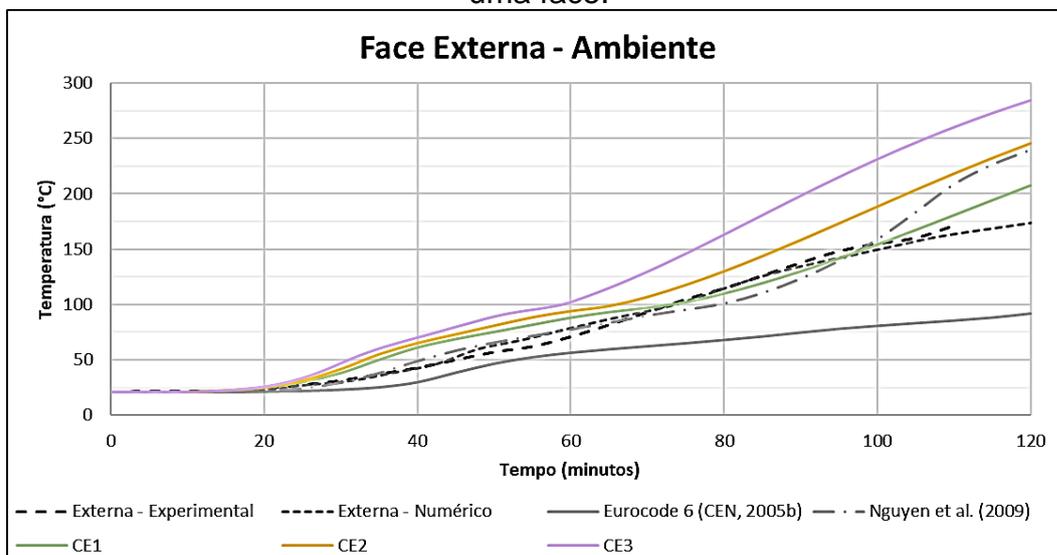
Fonte: Elaborada pela autora.

6.3.4 Paredes com blocos cerâmicos submetidas a aquecimento em sua face interna

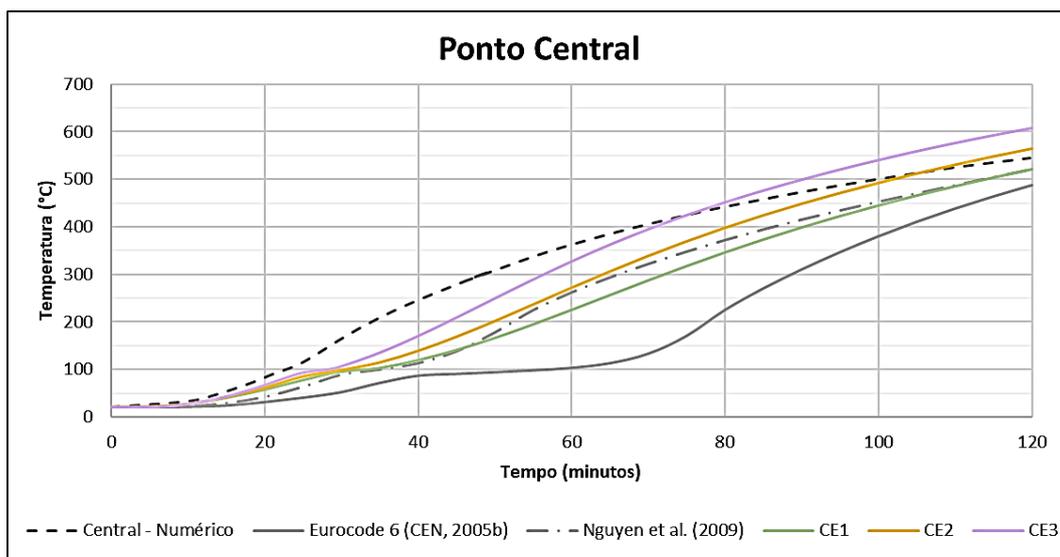
De maneira semelhante ao item anterior, porém contextualizados com materiais brasileiros, em Rosemann (2011), encontram-se experimentos em paredes, constituídas por blocos cerâmicos, sujeitas a aquecimento na face interna e mantidas à temperatura ambiente na face oposta. Levando em consideração as variações no comportamento térmico do material cerâmico, utilizando as curvas propostas na literatura (as curvas foram nomeadas conforme autor de referência para as propriedades adotadas) e as três curvas sugeridas neste trabalho (CE1, CE2 e CE3), empregou-se a metodologia proposta neste estudo, em que a simulação em altas temperaturas foi conduzida por 120 minutos. As respostas térmicas do bloco, no ponto instrumentado, são apresentadas na Figura 6.14a. Os outros dois pontos de interesse – junto à face interna aquecida e no meio do bloco - foram analisados em comparação com o modelo numérico proposto por Rosemann (2011) (Figura 6.14b e Figura 6.14c).

Para o ponto instrumentado, situado na face externa não exposta à situação de incêndio (Figura 6.14a), observa-se que o modelo que empregou as propriedades estabelecidas conforme a normativa europeia, em consonância com os itens 6.3.1, 6.3.2 e 6.3.3, demonstra um campo térmico inferior ao obtido experimentalmente ao longo de toda a simulação, atribuível à menor condutividade inicial e ao maior pico do calor específico.

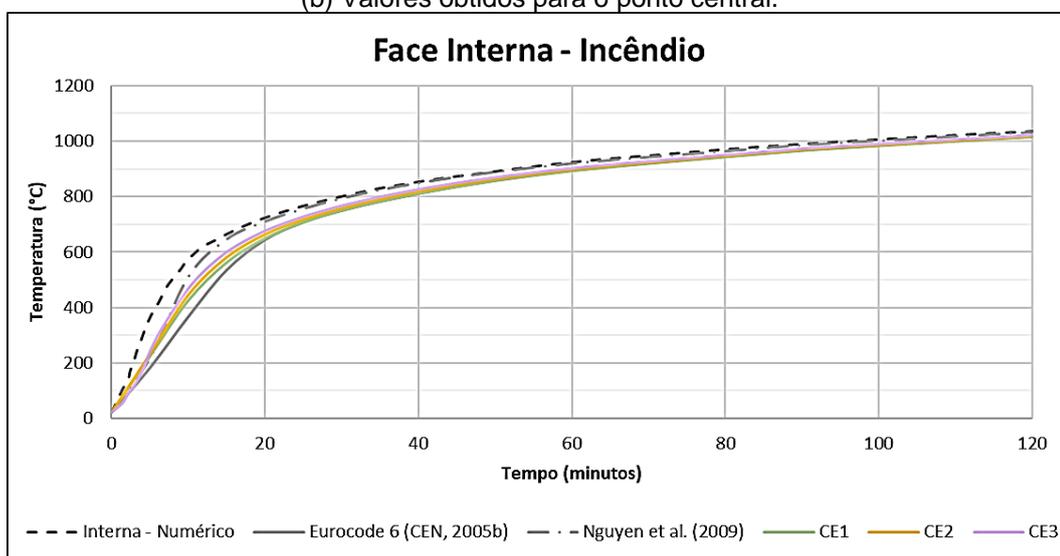
Figura 6.14 – Comportamento térmico parede de blocos cerâmicos aquecida em uma face.



(a) Valores obtidos para face externa - ambiente.



(b) Valores obtidos para o ponto central.



(c) Valores obtidos para a face interna – incêndio.

Fonte: Elaborada pela autora.

Ademais, nos modelos que incorporaram as curvas propostas neste estudo, constatou-se uma boa correlação com o modelo experimental, inclusive apresentando uma tendência de comportamento semelhante ao observado experimentalmente no ponto instrumentado aos 100°C. Destaca-se que obteve-se uma melhor representação dos resultados do que quando comparado com o calor específico prescrito pelo Eurocode 6 (CEN, 2005b).

Considera-se que as propriedades adotadas em CE2 representaram, com maior consistência, o modelo experimental, por apresentar, em todos os pontos analisados, a concordância com a curva de aquecimento do modelo de referência. Por fim, em todos os modelos simulados, foi constatada uma convergência das temperaturas, em cada ponto, para valores superiores a 700°C.

Quanto aos outros dois pontos de análise (Figura 6.14b e Figura 6.14c), mesmo sem a instrumentação experimental para validação, percebe-se a influência do pico do calor específico no comportamento das curvas. Nos modelos CE1, CE2, CE3 e de Rosemann (2011), nos quais os picos são atenuados e mais breves, os campos térmicos apresentaram patamares a 100°C menos expressivos. Nos modelos utilizando as curvas CE1, CE2 e CE3, nota-se que o valor do calor específico está indiretamente ligado à taxa de aquecimento após 100°C, uma vez que a condutividade é mantida constante. Para os modelos baseados em Nguyen *et al.* (2009), a diminuição da condutividade com o aumento da temperatura melhor representa o comportamento térmico inicial dos pontos mais distantes da fonte de calor. Por fim, nos modelos baseados no Eurocode 6 (CEN, 2005b), observou-se maior penalização no aquecimento, resultando no maior distanciamento das curvas de referência.

Tais considerações sobre a transferência de calor tornam-se mais significativas à medida que o ponto se distancia da fonte de calor, reforçando a importância da consideração da influência da evaporação da umidade presente em materiais cerâmicos e do maior entendimento do comportamento térmico de materiais brasileiros.

6.3.5 Propriedades térmicas adotadas

Considerando que o objetivo principal deste trabalho é simular os comportamentos estrutural, térmico e termoestrutural de elementos de alvenaria estrutural, em especial com base nos modelos experimentais das pequenas paredes, em Fernandes Neto (2020); adotaram-se as calibrações para a condutividade térmica e para o calor específico, a fim de obter os melhores resultados para a validação do modelo das duas configurações de pequenas paredes de referência (item 6.3.2): a curva CE2. Esse modelo também apresentou boa representação nos demais modelos analisados (itens 6.3.1, 6.3.3 e 6.3.4), inclusive quando comparado aos modelos baseados na normativa europeia Eurocode 6 (CEN, 2005b).

À vista disso, o comportamento térmico dos materiais, adotado no presente trabalho, é sintetizado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores adotados para o comportamento térmico dos materiais.

Material	Propriedade Térmica	Unidade	Valor Adotado	Temperatura (°C)	Referência	
Cerâmica	Densidade	kg/m ³	2100	Todas	Rosemann (2011)	
	Expansão	°C ⁻¹	6×10 ⁻⁶	Todas	ABNT NBR 15812 (ABNT, 2010a).	
	Condutividade	W/(m*K)	1.26	Todas	Adotado	
			564	0		
	Calor específico	J/(kg*K)	564	95	Adotado	
			4180	100		
			2400	105		
			2400	1400		
Argamassa	Densidade	kg/m ³	1750	Todas	Rosemann (2011)	
	Expansão	°C ⁻¹	9×10 ⁻⁶	Todas	ABNT NBR 15812 (ABNT, 2010a).	
	Condutividade	W/(m*K)	1.5	0	Rosemann (2011)	
			1.5	20		
			8	50		
			1	70		
				1	1500	
	Calor específico	J/(kg*K)	800	0	Rosemann (2011)	
			800	70		
			2400	85		
1200			99			
800			101			
			800	1500		

A densidade foi considerada constante ao longo da temperatura como recomenda o Eurocode 6 (CEN, 2005b).

Fonte: Elaborada pela autora.

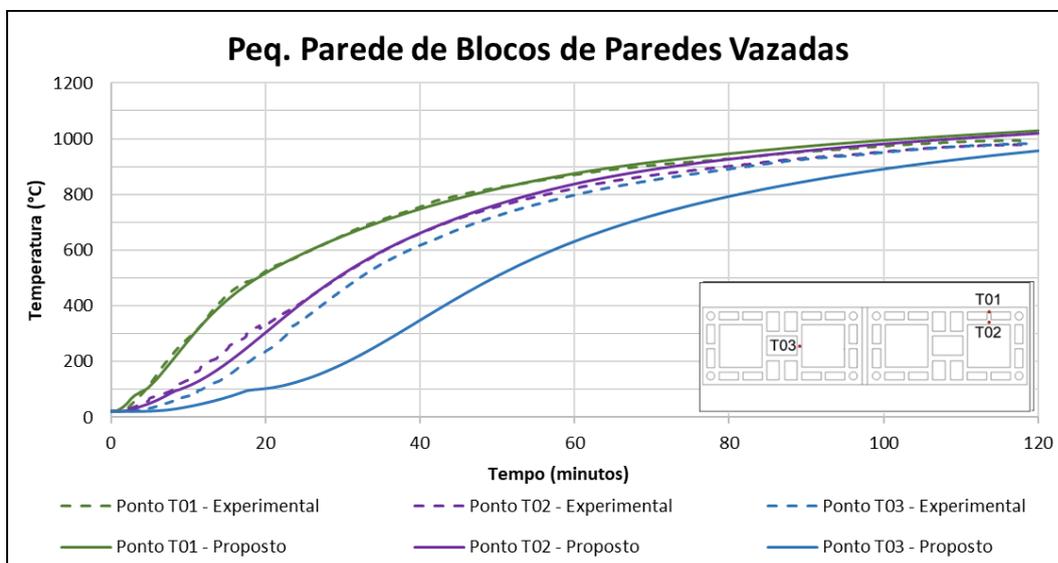
6.4 Resultados e Discussões

A calibração dos modelos numéricos para elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos em situação de incêndio, com foco em prismas e pequenas paredes, se deu pelo ajuste dos valores das propriedades da cerâmica. Abordagem adotada na tentativa de compensar a falta de representatividade da convecção nos vazados e das fissuras nos componentes, quando sujeitos a altas temperaturas.

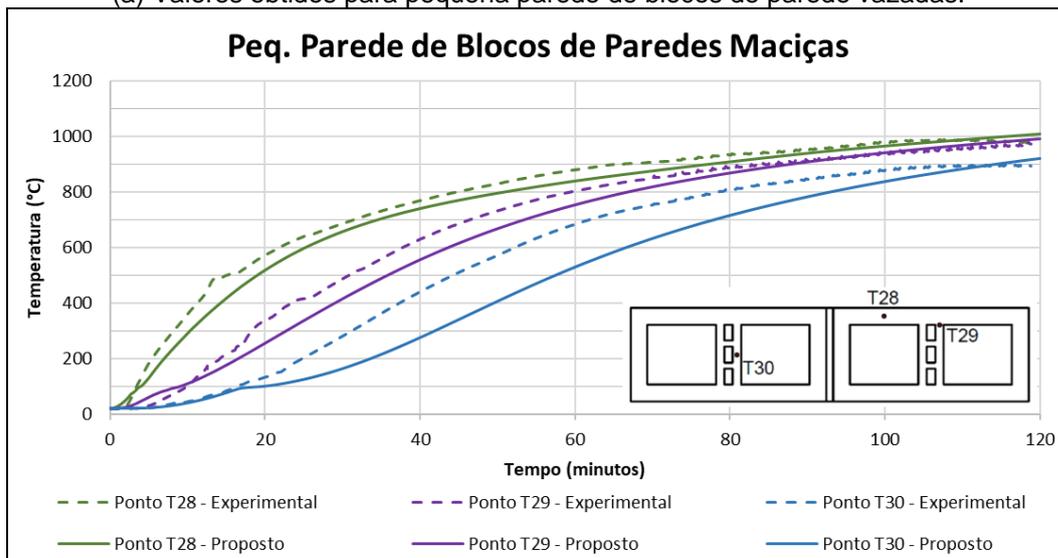
A escolha dos parâmetros utilizados nos modelos teve como limitante a convergência do modelo, mantendo-se alinhada aos conceitos das propriedades térmicas dos materiais. Nessa circunstância, as propriedades térmicas foram calibradas e validadas por meio de análise de sensibilidade, embasada em prescrições normativas e estudos experimentais anteriores, envolvendo materiais e geometrias similares.

Os resultados obtidos pela metodologia proposta, no presente trabalho, para pequenas paredes de alvenaria estrutural não armada - constituídas por 5 fiadas de blocos cerâmicos (uma configuração com blocos de paredes externas vazadas e outra com blocos de paredes externas maciças), com argamassamento total de 1 centímetro, sem revestimento e submetidas à situação de incêndio em suas quatro faces, conforme curva de aquecimento ISO 834-1 (ISO, 1999) - são apresentados na Figura 6.15.

Figura 6.15 – Resultados da análise térmica para pequenas paredes de blocos cerâmicos.



(a) Valores obtidos para pequena parede de blocos de parede vazadas.

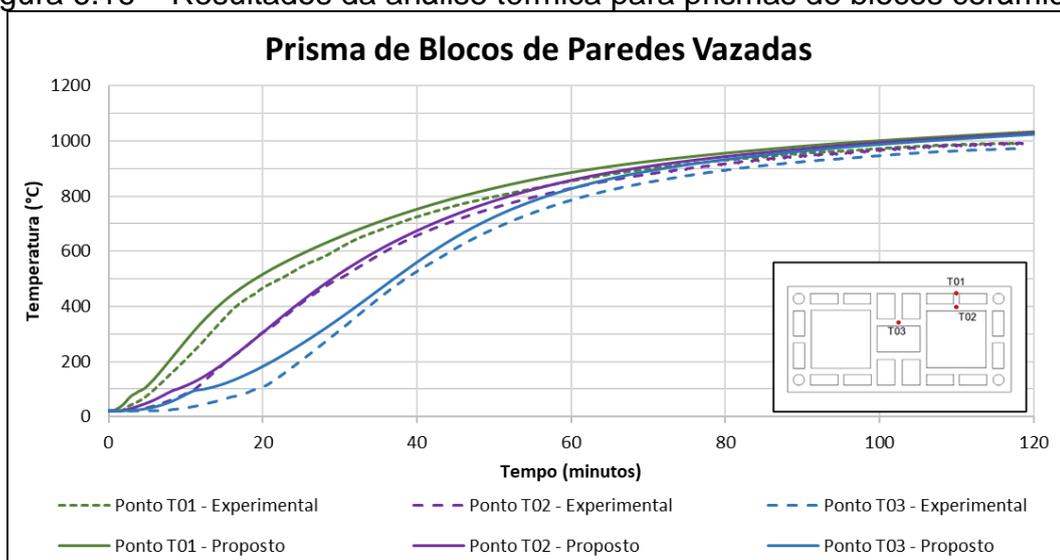


(b) Valores obtidos para pequena parede de blocos de parede maciças.

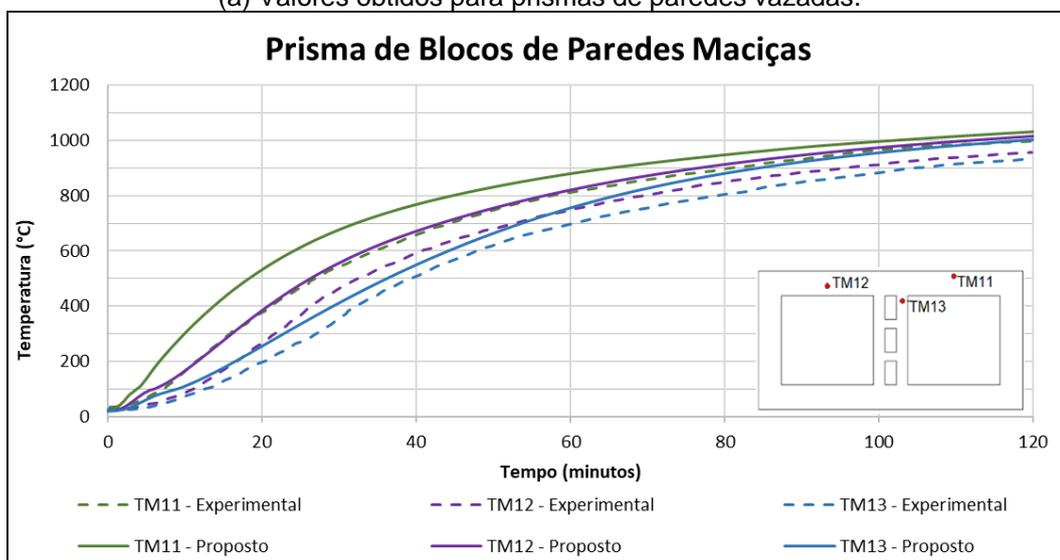
Fonte: Elaborada pela autora.

Para prismas de alvenaria estrutural não armada, compostos por 2 blocos cerâmicos (uma configuração com blocos de paredes externas vazadas e outra com blocos de paredes externas maciças), com argamassamento total de 1 centímetro, sem revestimento e submetidos à situação de incêndio em suas quatro faces, conforme curva de aquecimento ISO 834-1 (ISO, 1999), os resultados obtidos pela metodologia proposta no presente trabalho são apresentados na Figura 6.16.

Figura 6.16 – Resultados da análise térmica para prismas de blocos cerâmicos.



(a) Valores obtidos para prismas de paredes vazadas.



(b) Valores obtidos para prismas de paredes maciças.

Fonte: Elaborada pela autora.

Considerou-se que o modelo proposto demonstra uma representatividade satisfatória em relação aos resultados experimentais, especialmente para os elementos estruturais compostos por blocos de paredes vazadas. Todos os modelos

conseguiram reproduzir de forma coerente o patamar de temperatura próximo aos 100°C, atribuível ao calor latente de vaporização da umidade presente no material, alinhando-se com as informações disponíveis em literatura especializada. A aplicação de uma metodologia semelhante para as quatro configurações analisadas indicou uma adequada calibração do material, viabilizando análises de sensibilidade para outras configurações de materiais e geometrias similares, mantendo consistência com os resultados experimentais. A estratégia proposta obteve resultados mais representativos dos modelos experimentais quando comparados aos dos modelos baseados nas propriedades previstas pelo Eurocode 6 (CEN, 2005b).

Para as pequenas paredes, o modelo numérico apresenta um melhor comportamento quanto aos resultados experimentais nas espessuras mais próximas à face exposta. Essa observação pode ser atribuída a diversos fatores:

Primeiramente, a ocorrência de desprendimento de unidades durante o ensaio pode ter influenciado os resultados. O modelo não considera a abertura de fissuras e o desprendimento dos materiais, o que poderia permitir a entrada de ar mais quente e, conseqüentemente, um aumento mais rápido da temperatura nas paredes, especialmente a partir do septo e dos vazados internos. Os ensaios anteriores realizados por Fernandes Neto (2020) evidenciaram um alto grau de deterioração dos materiais, devido à elevação rápida de temperatura, com fissuras, desenvolvendo-se predominantemente na direção da altura do bloco, como mostrado na Figura 3.40. No entanto, não foram observados indícios de degradação no material cerâmico em si, que permaneceu rígido e com alta dureza, embora tenha sido notada a degradação das juntas de argamassa de assentamento.

Além disso, o detalhamento do modelo numérico também pode ter impactado nos resultados. As simplificações adotadas, como a falta de consideração de fissuração e de movimentos convectivos, bem como a representação da radiação apenas nos vazados conectados, ao longo de toda a altura do elemento, pode ter diminuído a precisão dos resultados. Especificamente, o ponto T03 da pequena parede de blocos de paredes vazadas apresentou maior discrepância, devido ao fato de que os vazados da parede interna não se conectam por toda a altura do elemento, impossibilitando a representação adequada da radiação nesse local, sem que se houvesse alto custo computacional, resultando em menor transferência de calor até o ponto em questão.

Outra questão relevante é a inexistência de curvas específicas para as propriedades dos materiais brasileiros. As curvas para o calor específico e para a condutividade térmica foram obtidas a partir da combinação de dados do Eurocode 6 (CEN, 2005b) e de ensaios anteriores, que podem não ser representativos para a estrutura de alvenaria analisada. A falta de curvas específicas para o material em uso reduz a precisão dos resultados numéricos.

Acredita-se que as incertezas nos ensaios também podem ter contribuído para as discrepâncias observadas. A dificuldade de instalação dos termopares e as variações nas distâncias podem ter afetado a precisão das medições. Além disso, o uso de uma mistura de argilas para inserir os termopares nos blocos, que constituía o mesmo material utilizado no processo de fabricação dos blocos, pode ter acelerado o desprendimento dos sensores, devido à formação de microfissuras, durante o processo de extrusão do material.

Também é importante ressaltar que o estudo de Fernandes Neto (2020) obteve resultados térmicos de apenas uma unidade de cada configuração estrutural, o que pode limitar a generalização dos resultados e justificar a complementação do presente estudo, com mais análises experimentais de referência utilizando metodologias similares.

E por fim, constatou-se que, para um mesmo período de aquecimento, os pontos de temperatura, nas pequenas paredes alcançam, valores mais elevados, em comparação com os prismas de blocos de mesma configuração, nos ensaios experimentais. Especificamente, os pontos T29 e TM13 (para prisma e pequena parede de blocos de paredes maciças, respectivamente) e os pontos T01 e T02 (das duas configurações de elementos com blocos de paredes vazadas) demonstraram essa diferença. De acordo com Fernandes Neto (2020), essa disparidade pode ser atribuída às dimensões e ao número de juntas superiores, nas pequenas paredes, em comparação com os prismas, tornando-as mais suscetíveis à ação intensificada de chamas e calor, resultando em uma variação de temperatura mais pronunciada, em suas seções transversais.

Destaca-se que essa observação experimental não é replicada nos modelos propostos. Nos pontos coincidentes T01 e T02, nos elementos de blocos de paredes vazadas, conforme ilustrado na Figura 6.17 e nos pontos coincidentes TM13 e T29 dos elementos de blocos de paredes maciças, os modelos propostos exibem curvas essencialmente coincidentes, como apresentado na Figura 6.18.

Figura 6.17 – Resultados da análise térmica para elementos de blocos de paredes vazadas.

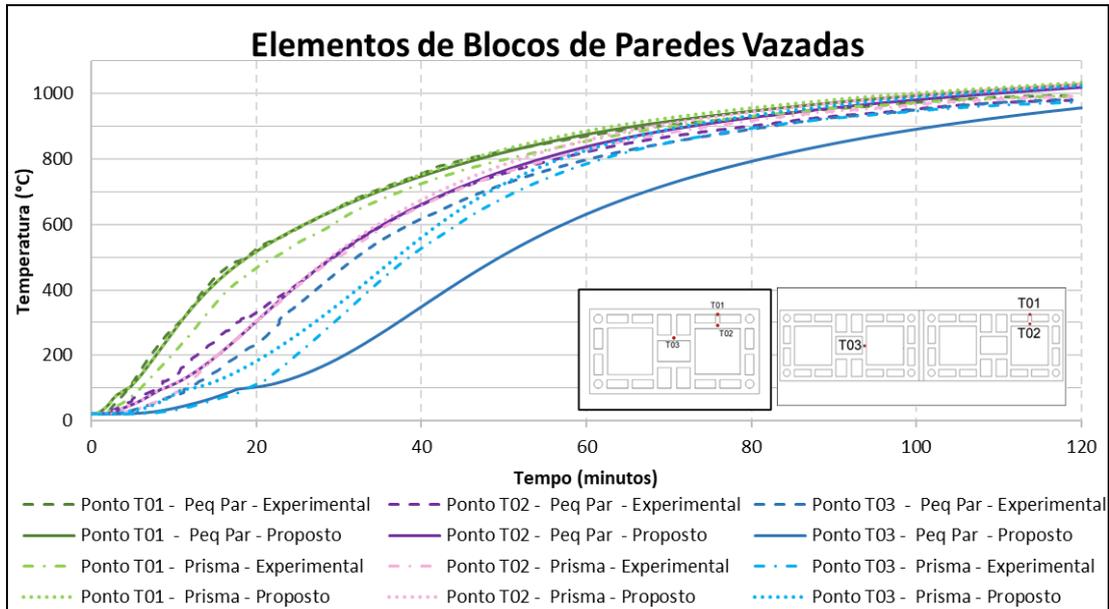
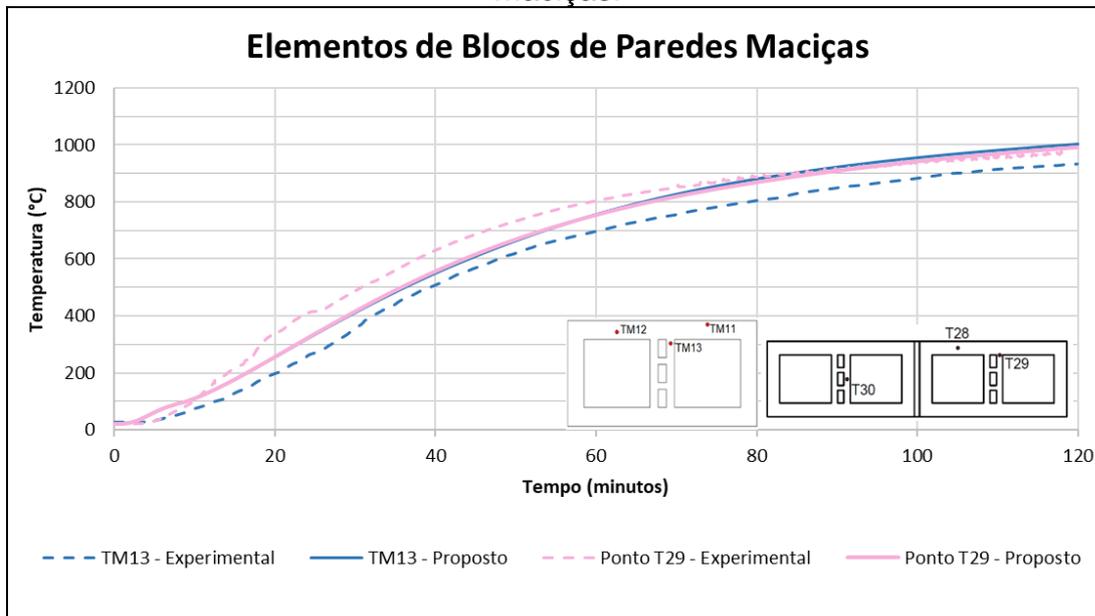


Figura 6.18 – Resultados da análise térmica para elementos de blocos de paredes maciças.



Esse fenômeno pode ser justificado pelos motivos anteriormente mencionados e se destaca a importância da consideração dos movimentos convectivos do ar nos modelos, especialmente nos modelos de blocos com paredes maciças, nos quais os pontos coincidentes seriam mais influenciados por tais fatores, e da validação com mais modelos experimentais, uma vez que na referência aferiu-se uma única unidade de cada configuração.

7 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM CONTEXTO DE COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO

Neste capítulo, propõe-se a combinação das estratégias numéricas adotadas e realizadas nos capítulos anteriores, ou seja, análises mecânicas em temperatura ambiente - capítulo 5, bem como análise térmica - capítulo 6, agora aplicadas simultaneamente. A análise termomecânica não apenas integra essas duas abordagens, mas também considera a expansão térmica dos materiais e a variação das propriedades mecânicas em função da temperatura.

Diferentemente dos modelos estruturais e térmicos, que foram validados qualitativo-quantitativamente, os modelos termoestruturais não tiveram validação quantitativa. Isso se deve à exiguidade de ensaios detalhados com paredes de alvenaria estrutural carregadas e com geometria e materiais próximos aos utilizados no presente trabalho. Destaca-se então que este capítulo se propõe a avaliar o comportamento do modelo adotado, apresentando comparações entre os fenômenos apontados pelos autores de referência e o desempenho obtido nas simulações numéricas efetuadas. Realizaram-se então duas análises qualitativas, descritas a seguir.

Na primeira, com base nos ensaios desenvolvidos e apresentados em Fernandes Neto (2020), em complemento às análises dos capítulos 5 e 6, os modelos foram comparados quanto ao comportamento experimental das pequenas paredes de geometria e características mecânicas estudadas e validadas nos capítulos anteriores, em configuração isolada e sem carregamento. O aquecimento foi definido conforme a curva de incêndio-padrão ISO 834-1 (ISO, 1999) e com tempo de ensaio de 120 minutos. As configurações das paredes após os experimentos são apresentadas na Figura 3.43b.

Na segunda análise, com base em Lima *et al* (2018), os modelos foram comparados quanto ao comportamento experimental de pequenas paredes de geometria e características similares às validadas neste trabalho, submetidas a uma carga axial constante equivalente à carga de serviço, aquecidas até 900°C, em uma de suas faces, mantendo-se sob essa temperatura por até 4 horas, ou até atingirem um dos critérios de falha (permeabilidade, isolamento térmico e/ou resistência mecânica). A área de aquecimento foi de 50 x 50 cm, referentes à dimensão do forno utilizado nos experimentos, em que, com o auxílio de uma câmera termográfica, com

sensor infravermelho, para cada pequena parede, criaram uma imagem com a aferição da temperatura na face não exposta e o esquemático da fissuração ocorrida nos elementos após o ensaio.

Em cada análise, não foram verificados valores de deslocamentos e tensão, em virtude da não medição dos dados experimentais dos trabalhos de referência. Portanto, este capítulo propõe uma metodologia exploratória que une análise térmica e mecânica propostas neste trabalho, incorporando a expansão térmica dos materiais e a variação de suas propriedades mecânicas com a temperatura.

7.1 Estratégias adotadas para implementação das condições de contorno e carregamento

Para os modelos das pequenas paredes isoladas, submetidas ao incêndio nas quatro faces laterais, ensaiadas em Fernandes Neto (2020), adotou-se a base da placa de reação engastada e topo livre, com contato entre blocos e argamassas com as mesmas características do modelo mecânico. Modelou-se, considerando um eixo de simetria para melhor compreensão do comportamento da estrutura com menor custo computacional, conforme detalhado no item 4.2.1.

Já para os modelos baseados no ensaio de isolamento térmico, conforme Lima *et al.* (2018), os blocos tipo A e B (Figura 3.27) resultam mais próximos da geometria e da resistência nominal avaliadas no presente trabalho. E, uma vez que se construíram fiadas de dois blocos e um meio bloco, sem simetria no sentido do comprimento. A geometria adotada é detalhada no item 4.2.4.

Considerou-se a representação do material do graute da face oposta ao incêndio, como similar ao da argamassa de assentamento, uma vez que não há informações detalhadas acerca do graute. Bem como, a camada interna de chapisco se despreendeu nos primeiros instantes dos ensaios, sendo assim proscrita no modelo proposto, que dissipou condições de fissuração e deslocamento dos materiais.

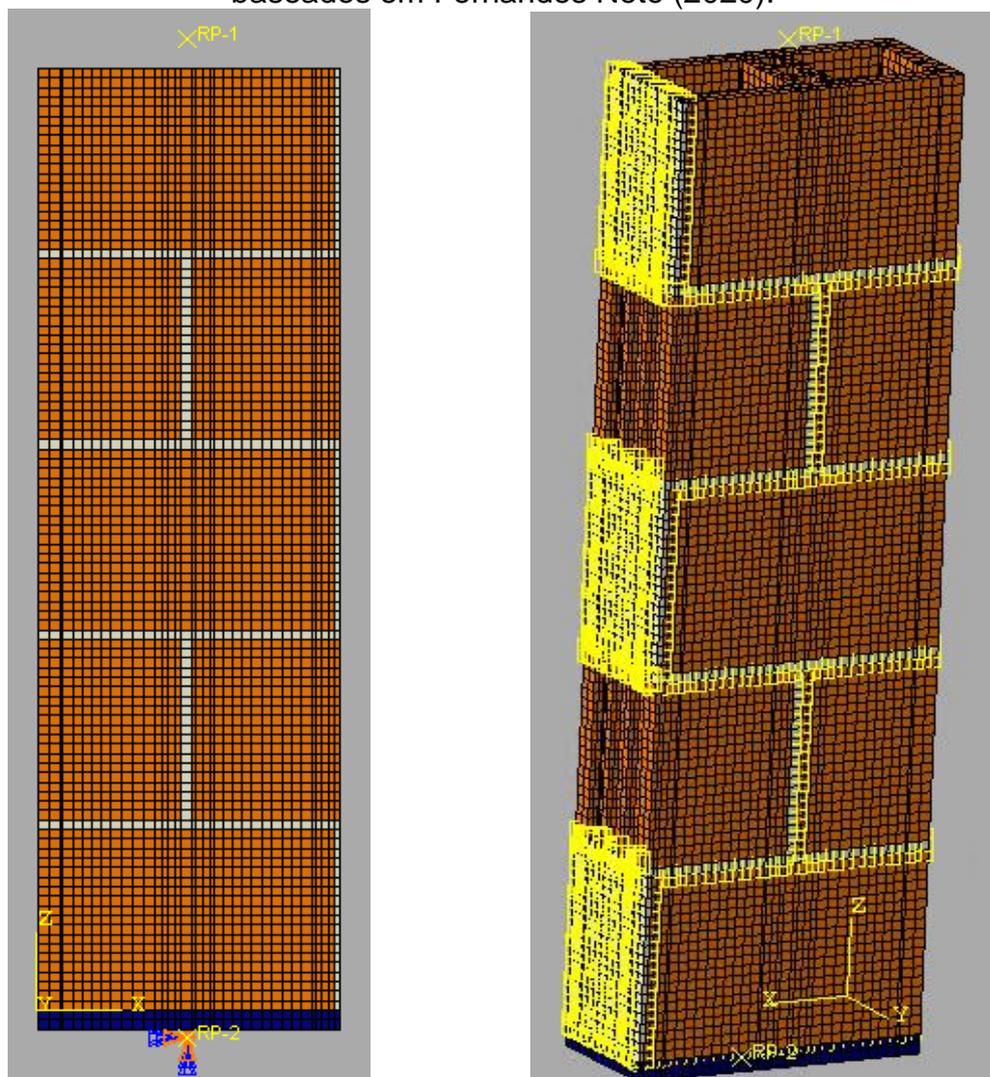
Portanto, modelaram-se as pequenas paredes, com base da placa de reação inferior engastada e o topo da placa superior com os deslocamentos perpendiculares à superfície da parede restritos. Também, no topo da placa superior, aplicou-se a força concentrada, referente à carga de serviço calculada em Lima *et al.* (2018). Em ambas as análises propostas, as propriedades e as estratégias de contato foram as mesmas

adotadas no modelo mecânico, sem variação com a temperatura, devido à ausência de dados sobre os mecanismos de contato entre os materiais avaliados.

Quanto aos passos de inserção do carregamento, inicialmente impuseram-se as condições de contorno, incluindo o carregamento para os modelos com carregamento, e, no seguinte, a variação de temperatura ao longo do tempo. Neste último passo, as propriedades mecânicas foram alteradas de acordo com os dados comentados a seguir.

As condições de contorno propostas, inseridas no software Abaqus, são apresentadas na Figura 7.1, para os modelos baseados em Fernandes Neto (2020), e na Figura 7.2, para os modelos baseados em Lima *et al.* (2018).

Figura 7.1 – Condições de contorno propostas no presente trabalho para os modelos baseados em Fernandes Neto (2020).

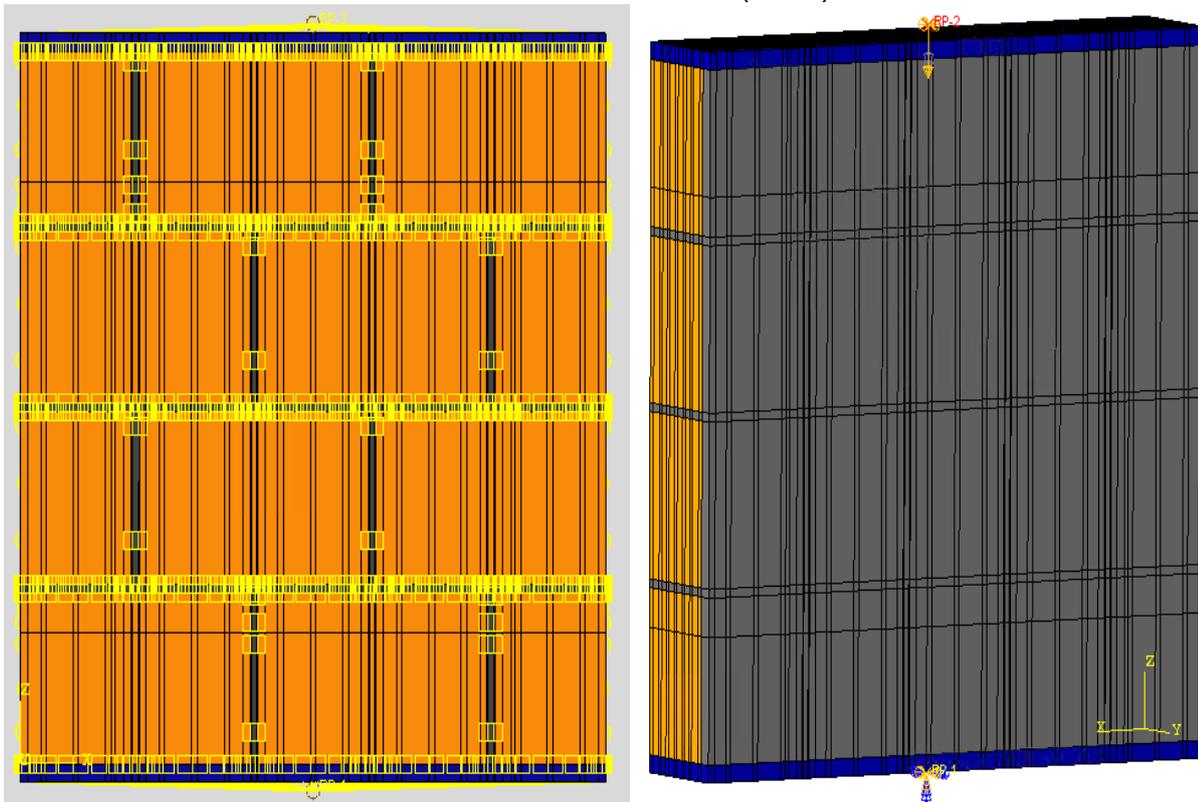


(a) Base engastada (condição aplicada por ponto de referência) e topo livre.

(b) Conexão entre componentes (*surface-to-surface contact*) e um eixo de simetria.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7.2 – Condições de contorno propostas no presente trabalho para os modelos baseados em Lima *et al.* (2018).



(a) Conexão entre componentes por *surface-to-surface contact* (vista pela face não exposta).

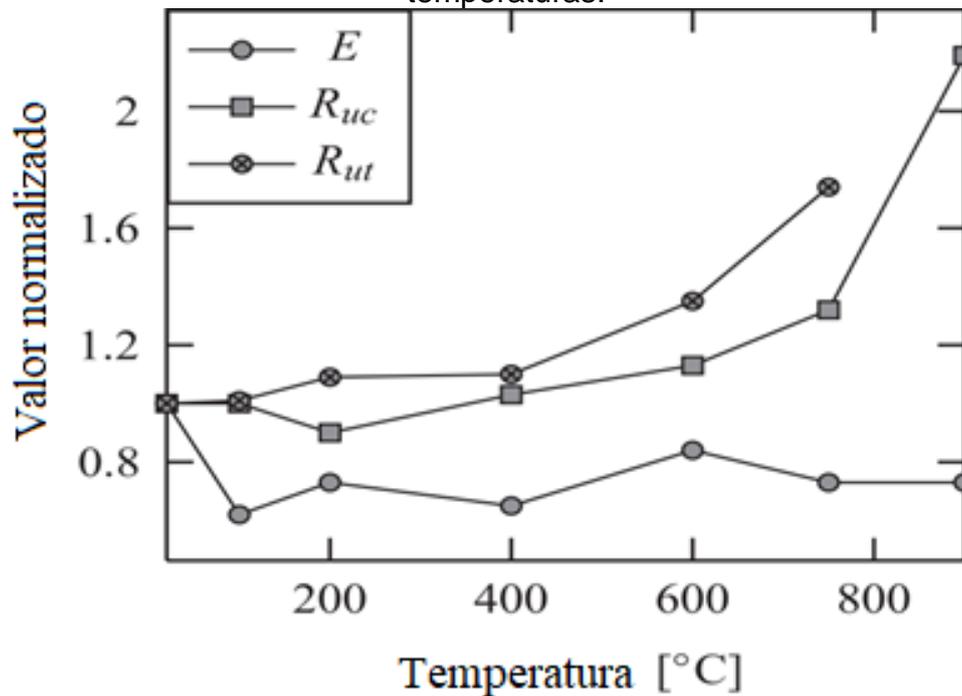
(b) Base engastada, topo com os deslocamentos perpendiculares à superfície da parede restritos, carga de serviço: condições aplicadas nas placas de reação por pontos de referência (vista pela face exposta, com perspectiva).

Fonte: Elaborada pela autora.

7.2 Propriedades mecânicas dos materiais em elevadas temperaturas.

Atualmente é reduzida a literatura de referência para a determinação das propriedades de elementos de alvenaria em altas temperaturas, em especial para materiais cerâmicos que possuem seu comportamento mecânico influenciado grandemente pelos seus componentes químicos que são regionais e variados (Monteiro; Vieira, 2004). Em Nguyen e Meftah (2014), após análise experimental com blocos cerâmicos, são propostas variações das propriedades mecânicas dos materiais, conforme Figura 7.3.

Figura 7.3 – Coeficientes para o comportamento de unidades cerâmicas sob altas temperaturas.

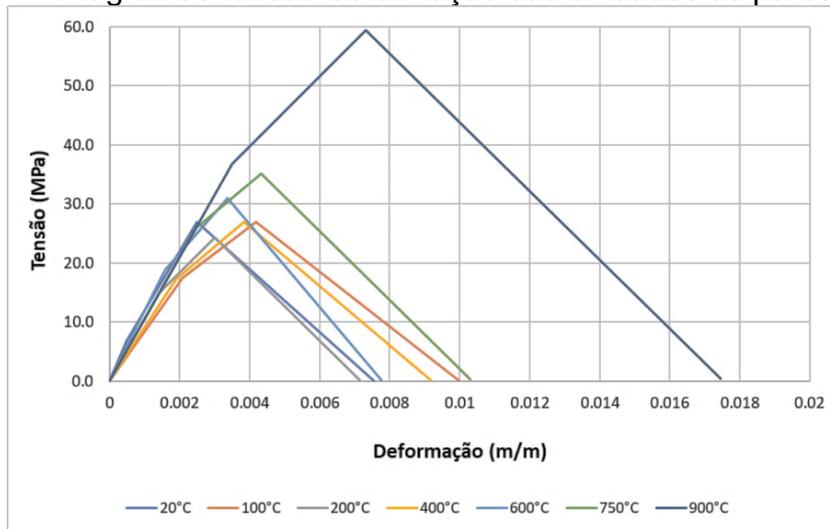


E = módulo de elasticidade
 R_{uc} = resistência última à compressão
 R_{ut} = resistência última à tração
 Fonte: Adaptada de Nguyen e Meftah (2014).

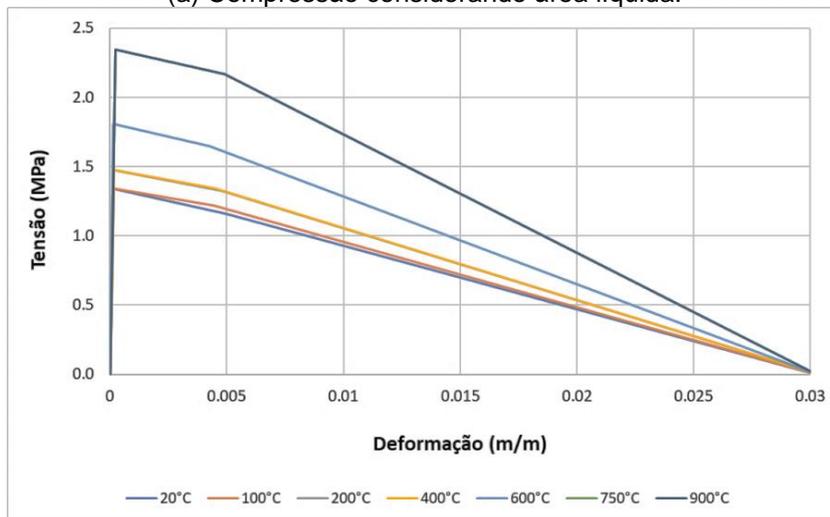
Também se verifica esse comportamento de aumento de resistência com o aumento da temperatura entre 500 a 900°C em Andreini *et al.* (2014), em Khaliq e Bashir (2016) e em Bošnjak *et al.* (2020).

Assim, para os modelos analisados, foram adotados os coeficientes propostos em Nguyen e Meftah (2014), aplicando-se os coeficientes nos valores calibrados para temperatura ambiente. Posteriormente, as curvas resultantes foram simplificadas, utilizando um comportamento bilinear pré-pico, conforme proposto em Khaliq e Bashir (2016) e comportamento linear pós-pico, conforme adotado em Carvalho (2019). Apresentam-se, a seguir (Figura 7.4, Figura 7.5 e Figura 7.6), as curvas adotadas nas modelagens.

Figura 7.4 – Diagramas tensão-deformação das unidades de parede maciça.



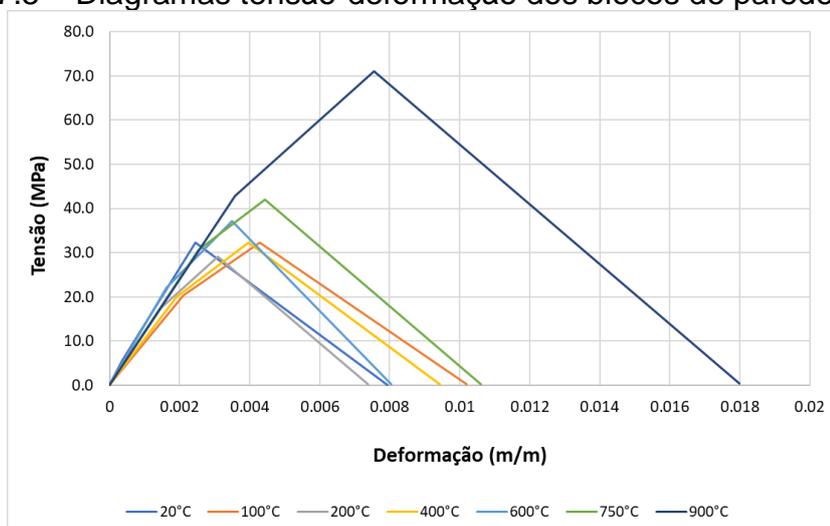
(a) Compressão considerando área líquida.



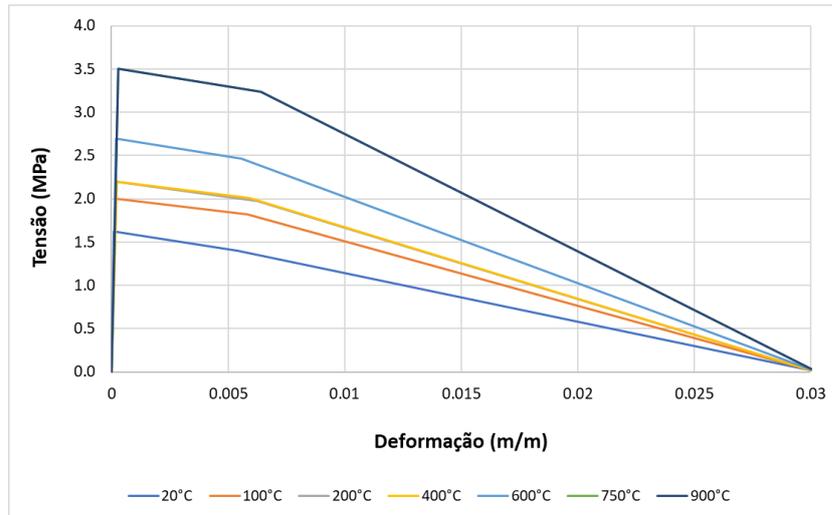
(b) Tração considerando área líquida.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7.5 – Diagramas tensão-deformação dos blocos de parede vazada.

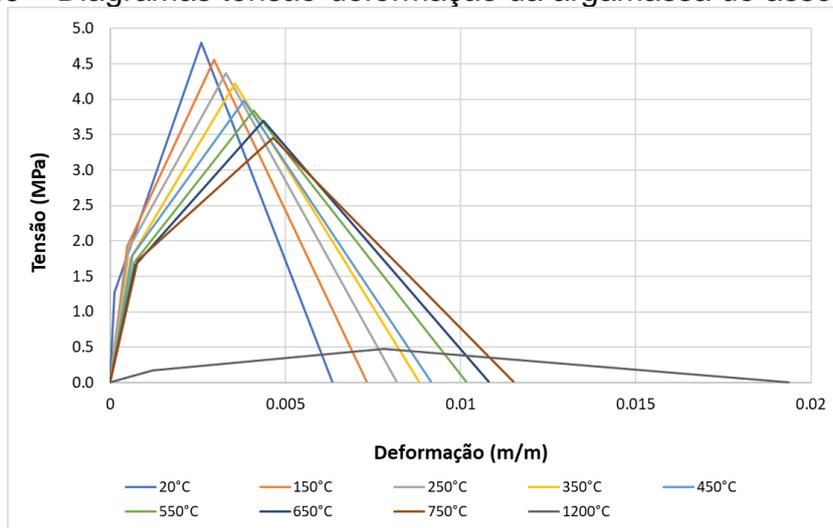


(a) Compressão considerando área líquida.

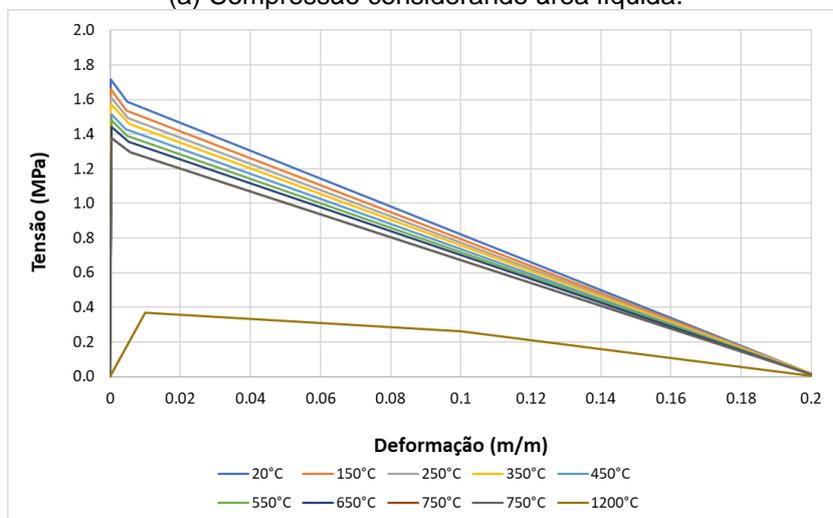


(b) Tração considerando área líquida.
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7.6 – Diagramas tensão-deformação da argamassa de assentamento.



(a) Compressão considerando área líquida.



(b) Tração considerando área líquida.
Fonte: Elaborada pela autora.

Essas estratégias foram adotadas buscando mitigar o esforço computacional dos modelos, uma vez que, ao incorporar todas as não linearidades do modelo constitutivo, identificou-se um processamento computacional elevado, resultando em suspensão dos modelos, durante as análises, devido à necessidade de incrementos de tempo muito pequenos (com ordem de grandeza de $1e^{-5}$ segundos, aplicados em sequência ao longo de 24 horas) e consequente uso de 100% da CPU do computador, por períodos elevados de tempo, podendo comprometer a integridade do equipamento com várias análises.

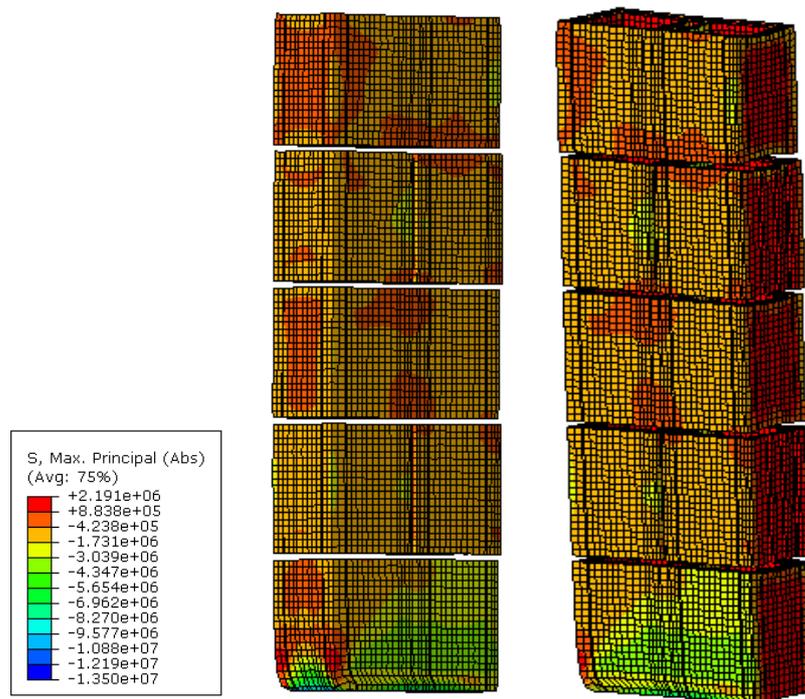
Em relação às propriedades plásticas e de interface do modelo numérico, a opção por mantê-las constantes foi motivada pela escassez de estudos experimentais específicos que investigassem suas variações com a temperatura, assentindo assim isolar os efeitos já conhecidos das variações térmicas e mecânicas, ao mesmo tempo em que abre espaço para futuras pesquisas que aprofundem o entendimento dessas variáveis e suas influências no comportamento estrutural dos elementos de alvenaria em situações de incêndio.

7.3 Resultados e discussões

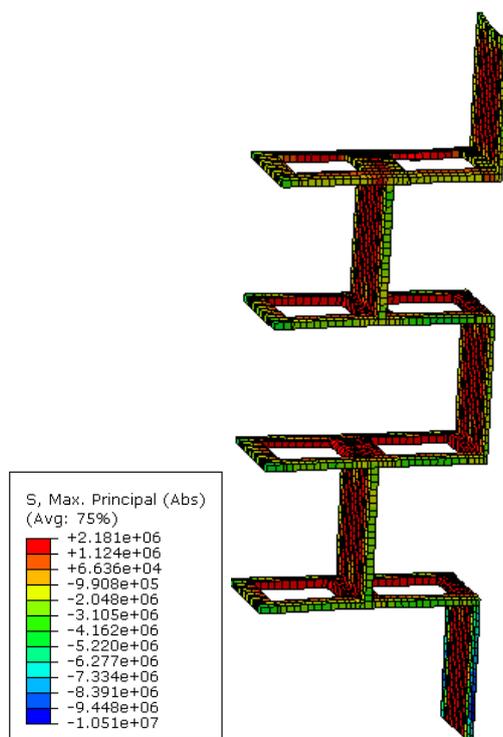
Considerando os 120 minutos de ensaio e as modelagens de pequenas paredes submetidas à situação de incêndio em suas quatro faces e sem carregamento (Fernandes Neto, 2020), são apresentadas, a seguir, as tensões principais máximas absolutas dos modelos e deslocamentos obtidos na Figura 7.7 à Figura 7.10.

Destaca-se que o sistema de coordenadas adotado tem sua origem no canto inferior esquerdo frontal; com o eixo z orientado verticalmente pela altura da parede; o eixo y, pela largura; o eixo x, pelo comprimento; além da presença de um eixo de simetria no meio da parede.

Figura 7.7 – Tensões principais absolutas nas unidades e argamassa da pequena parede blocos de parede maciça, após 120min, a 900°C.

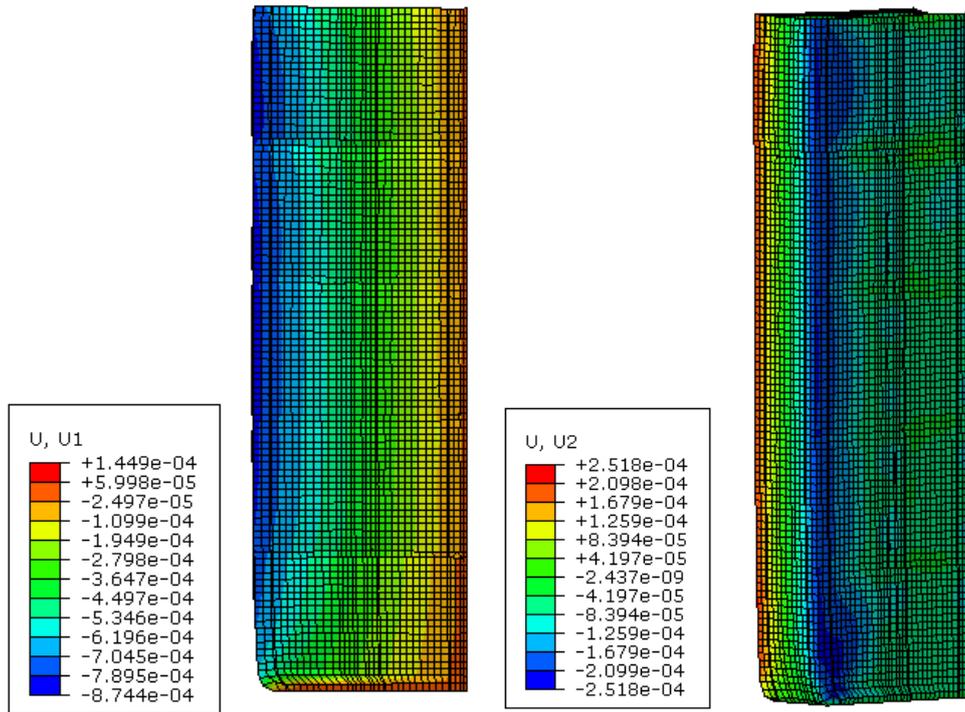


(a) Blocos.



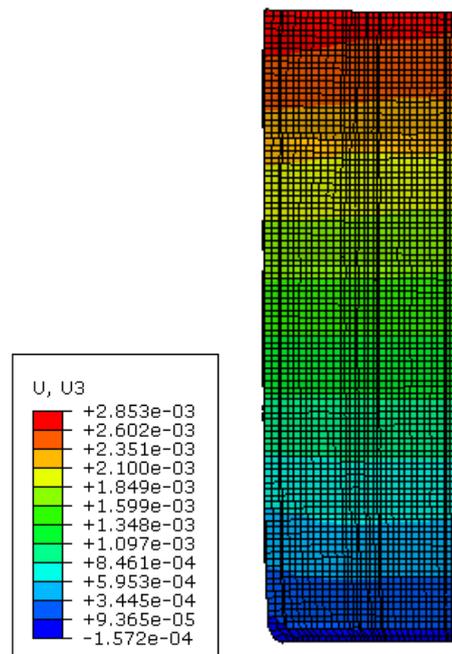
(b) Argamassa
Unidades em Pascal.
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7.8 – Deslocamentos da pequena parede de blocos de parede maciça, após 120min, a 900°C.



(a) Eixo x.

(b) Eixo y.

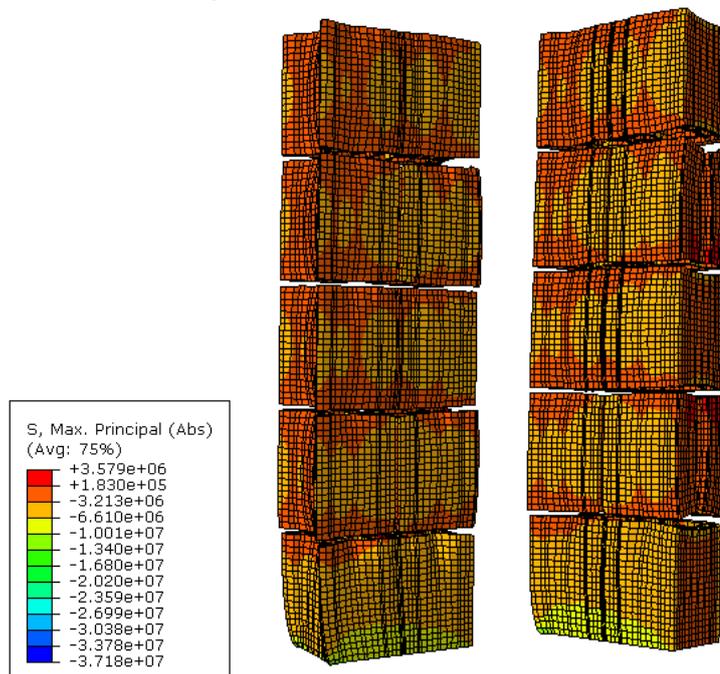


(c) Eixo z.

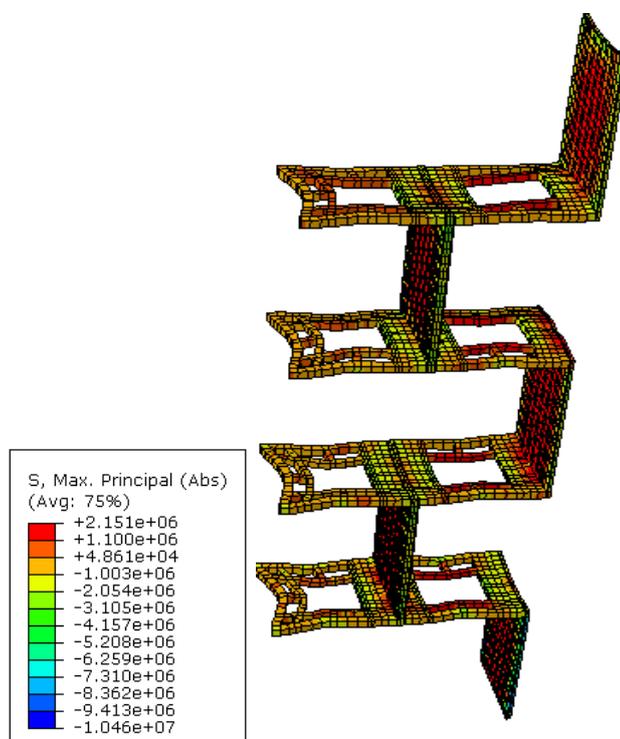
Unidades em metros.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7.9 – Tensões principais absolutas nas unidades e argamassa da pequena parede de blocos de parede vazada, após 120min, a 900°C.



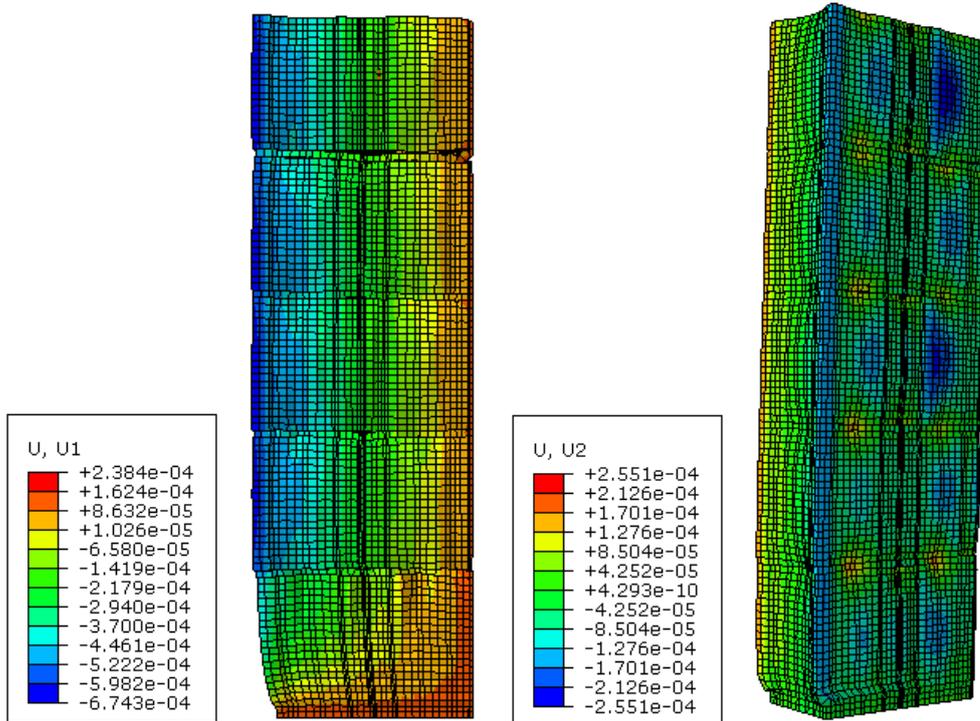
(a) Blocos.



(b) Argamassa.
Unidades em Pa.

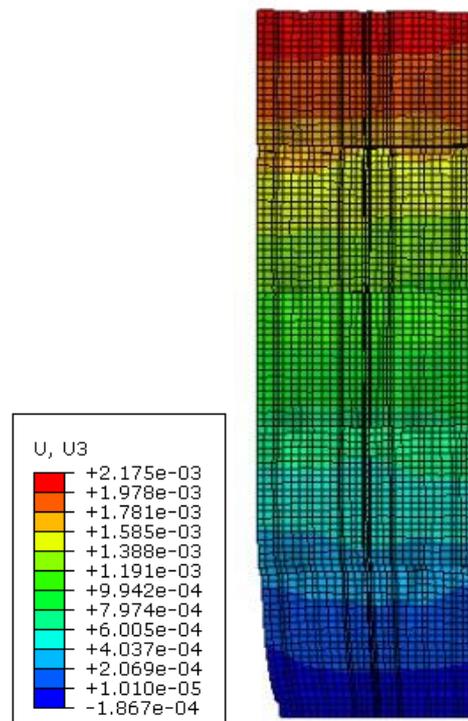
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7.10 – Deslocamentos da pequena parede de blocos de parede vazada, após 120min, a 900°C.



(a) Eixo x.

(b) Eixo y.



(c) Eixo z.

Unidades em metros.

Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se, nos modelos propostos, tanto para unidades com paredes vazadas quanto para o de paredes maciças, que as faces das unidades em contato com a argamassa e as faces internas atingiram valores próximos à tensão máxima à tração para a temperatura máxima atingida, com os maiores valores de tensão localizados na fiada superior. A parte superior do modelo se encontrava livre e obteve os maiores deslocamentos em todos os sentidos. A argamassa apresentou valores superiores aos máximos adotados (a 750°C), tanto para tração quanto para compressão, como esperado, uma vez que nos ensaios de referências acontece a maior degradação nesse material, confinado entre os blocos, ocasionando o descolamento entre os materiais.

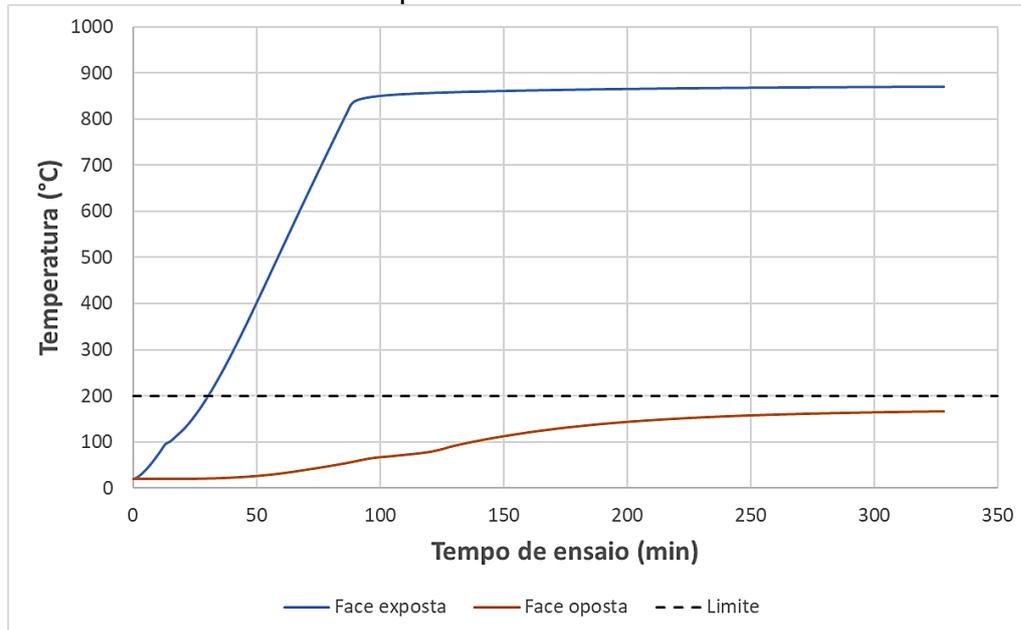
Experimentalmente, em Fernandes Neto (2020), relata-se que a deformação diferencial entre a junta de argamassa e a unidade cerâmica favoreceu a segregação dos dois na interface bloco/junta, principalmente nas últimas fiadas das pequenas paredes isoladas, tendo, inclusive, destacamento das unidades no decorrer do ensaio. Entende-se que o perfil de deslocamento obtido, alinhado com a concentração de tensões de tração no topo, sinaliza a tendência de comportamento da estrutura analisada.

Pontua-se, portanto, a importância de realizar estudos voltados à melhor caracterização dos materiais cerâmicos brasileiros, considerando que os modelos propostos, baseados em recentes estudos experimentais internacionais, indicam um aumento da resistência da cerâmica com a elevação da temperatura. Ressalta-se, ainda, a necessidade de análises experimentais com imposição de carga de serviço e instrumentação dos deslocamentos e forças exercidas, visando a uma calibração mais precisa dos modelos.

A seguir, são apresentadas modelagens numéricas buscando simular o ensaio de isolamento térmico realizado e apresentado em Lima *et al* (2018). Quanto ao modelo de componente de alvenaria, construído com bloco tipo A, após exposição das pequenas paredes a 900°C, por um período de 4 horas, resultou em uma temperatura máxima registrada na superfície não exposta igual a 163°C.

Para o modelo proposto (modelo de unidade com paredes vazadas), encontraram-se as temperaturas máximas na face exposta, em que se obteve o valor de 895,6°C e, na face oposta ao fogo, o valor de 168,8°C (Figura 7.11), apenas 3,6% de diferença.

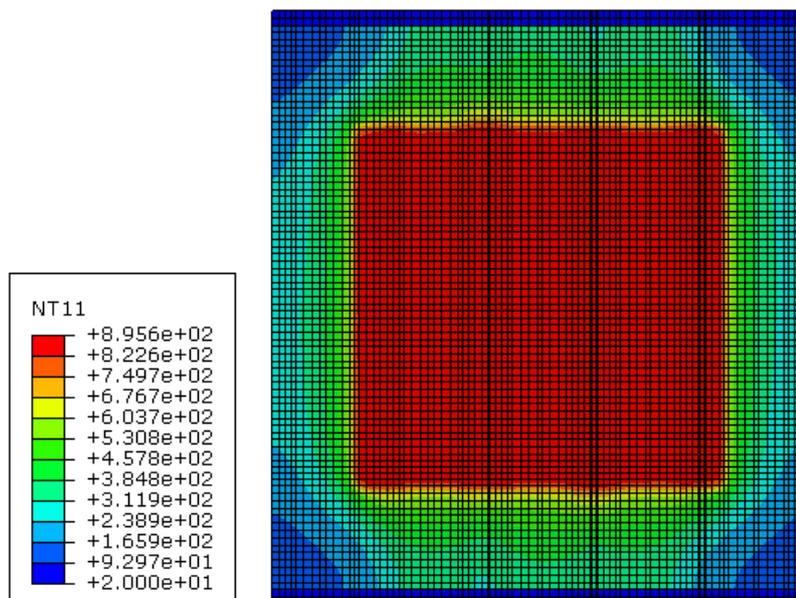
Figura 7.11 – Valores de temperaturas máximas obtidas na face exposta e na face oposta ao incêndio.



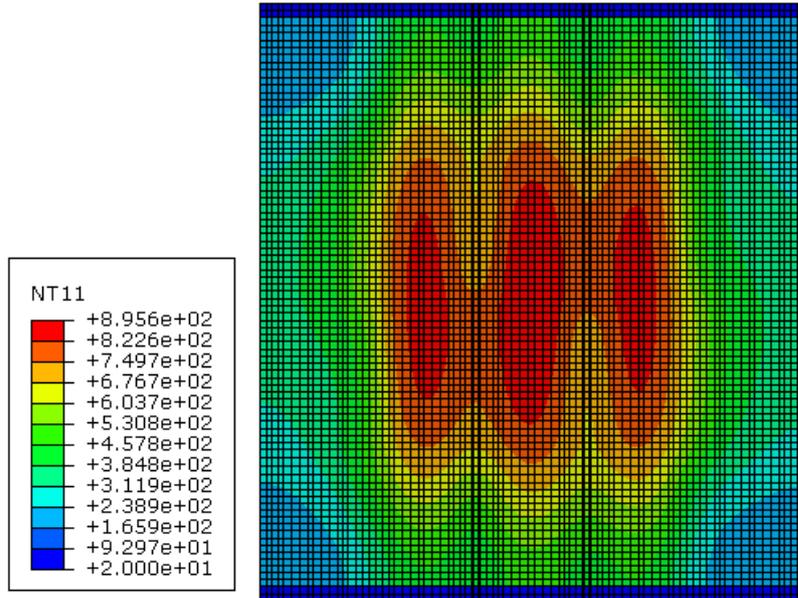
Fonte: Elaborada pela autora.

O campo de temperatura nas duas faces, ao término das 4 horas, é apresentado na Figura 7.12.

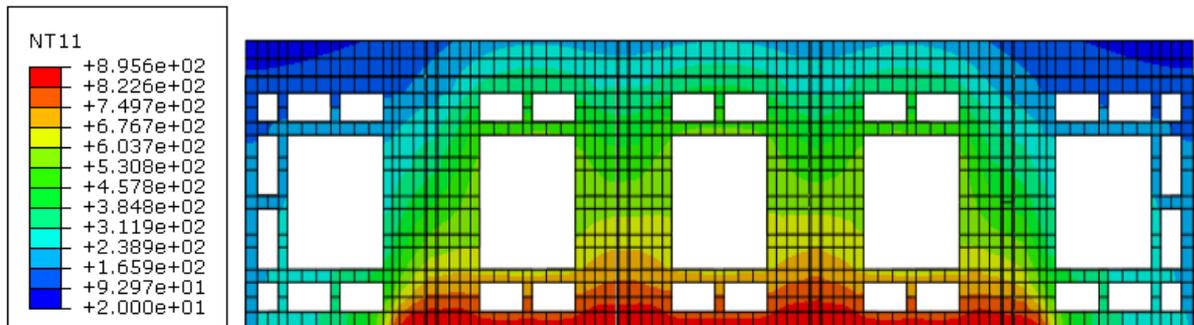
Figura 7.12 – Campo de temperaturas máximas obtidas na face exposta e na face oposta ao incêndio da pequena parede com bloco A, após 4h de aquecimento.



(a) Face exposta ao incêndio.



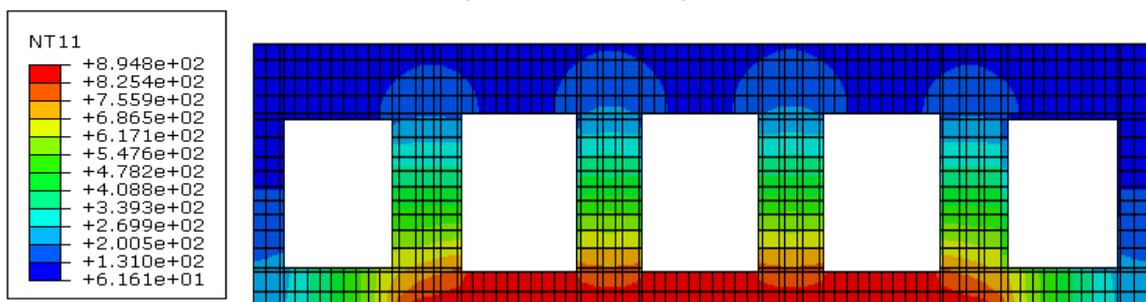
(b) Face oposta ao incêndio.



(c) Seção transversal média.
Fonte: Elaborada pela autora.

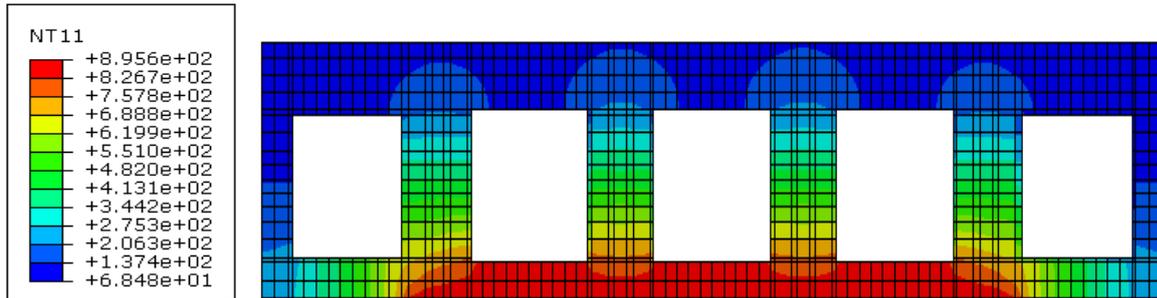
Para o modelo proposto com o bloco B (modelo de unidade com paredes maciças), nas faces exposta e oposta ao incêndio, com aquecimento constante, obteve-se a temperatura máxima de 161,3°, após 2h30 (Figura 7.13); 184,7°C, após 3h (Figura 7.14); as máximas de 223,4°C, na face oposta e de 898,6°C, na face exposta ao incêndio, após 4h (Figura 7.15).

Figura 7.13 – Valores de temperaturas máximas obtidas na face exposta e na face oposta ao incêndio, após 2h30 de aquecimento constante.



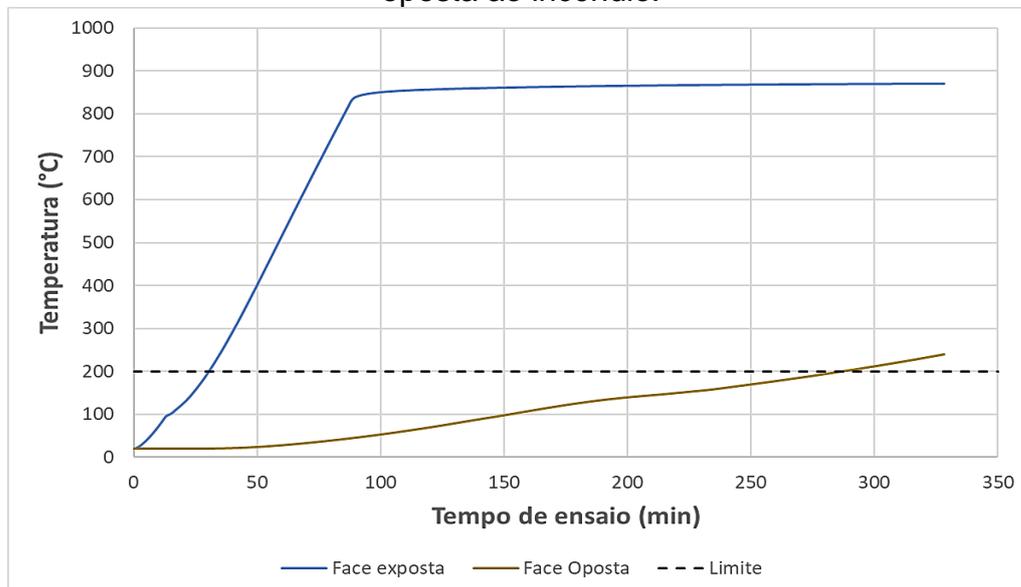
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7.14 – Valores de temperaturas máximas obtidas na face exposta e na face oposta ao incêndio, após 3h de aquecimento constante.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7.15 – Valores de temperaturas máximas obtidas na face exposta e na face oposta ao incêndio.

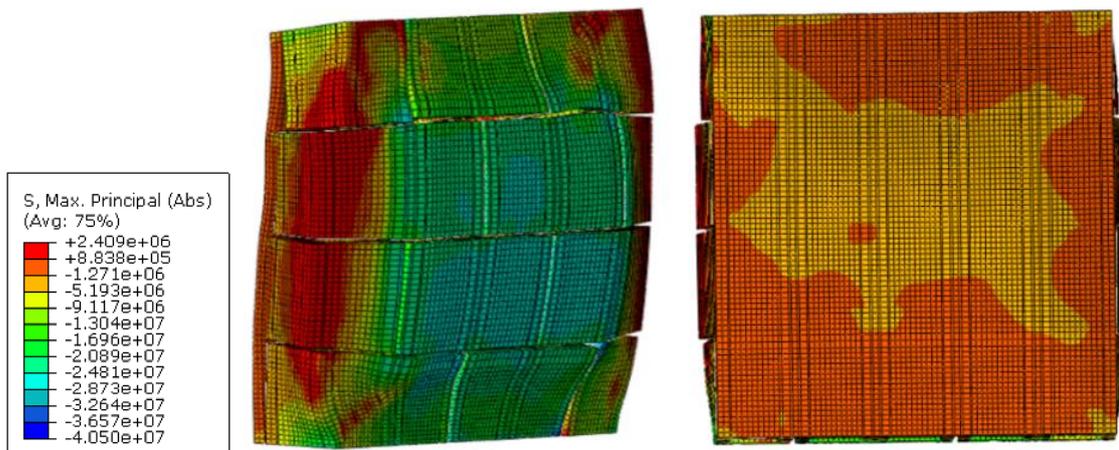


Fonte: Elaborada pela autora.

Sinalizando uma boa representatividade do modelo, uma vez que experimentalmente atingiram-se os valores de 162,3°C e 179.1°C para os mesmos tempos de ensaio: 2h30 e 3h, respectivamente. Infere-se que, para o modelo numérico, obteve uma taxa de aquecimento um pouco maior que o experimental para a face não exposta, contudo, entende-se como compreensível, uma vez que se adotaram propriedades similares à argamassa de assentamento para o material graute utilizado no experimento, devido ausência de informações no trabalho de referência; bem como as unidades com resistências características próximas, mas não idênticas; inclusive a geometria dos blocos difere quanto ao número de núcleos na parede interna do bloco, sendo dois para o ensaio e três para o modelo.

A partir desses campos de temperatura aplicados, evidencia-se, a seguir, da Figura 7.16 à Figura 7.21, o comportamento termomecânico obtido. Apresentam-se as tensões máximas e mínimas numéricas, identificadas nas pequenas paredes analisadas, após 4 horas, com uma das faces aquecida à 900°C.

Figura 7.16 – Tensões principais absolutas nas unidades e face oposta da pequena parede de blocos de parede maciça, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C.



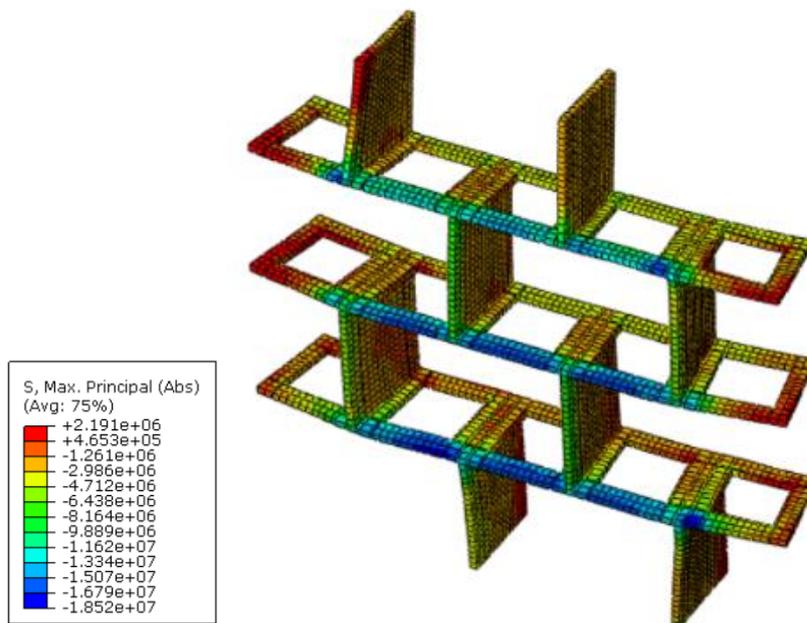
(a) Face exposta ao incêndio.

(b) Face oposta ao incêndio.

Unidades em Pascal.

Fonte: Elaborada pela autora.

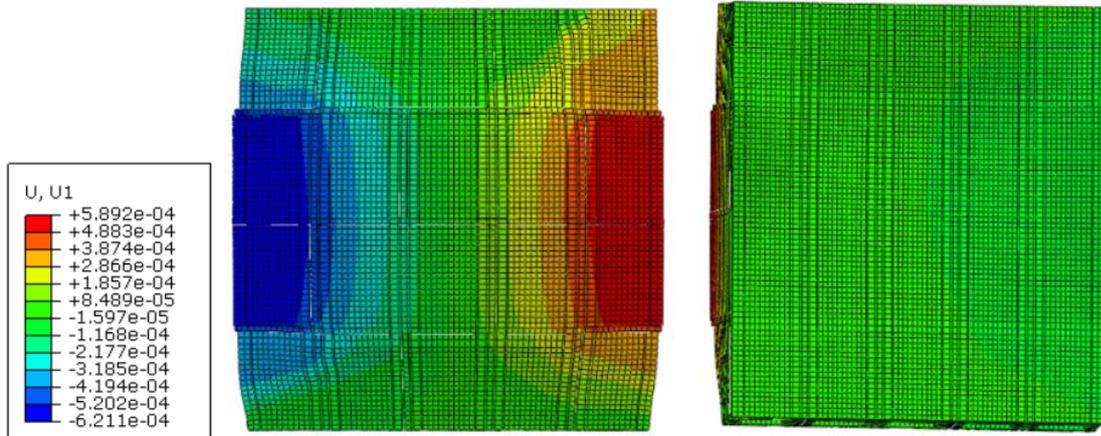
Figura 7.17 – Tensões principais absolutas na argamassa da pequena parede de blocos de parede maciça, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C.



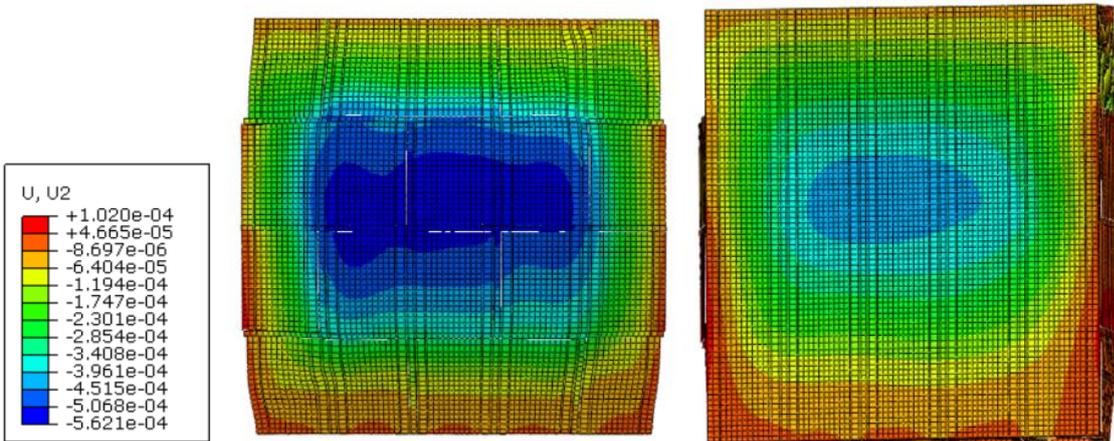
Unidades em Pascal.

Fonte: Elaborada pela autora.

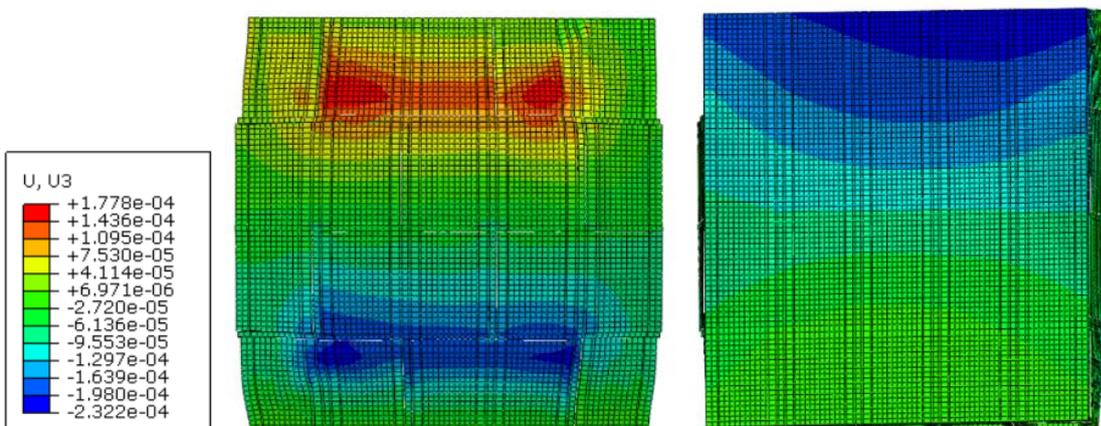
Figura 7.18 – Deslocamentos da pequena parede de blocos de parede maciça, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C.



(a) Deslocamentos, no sentido do eixo x, na face exposta (à esquerda) e na face oposta (à direita).



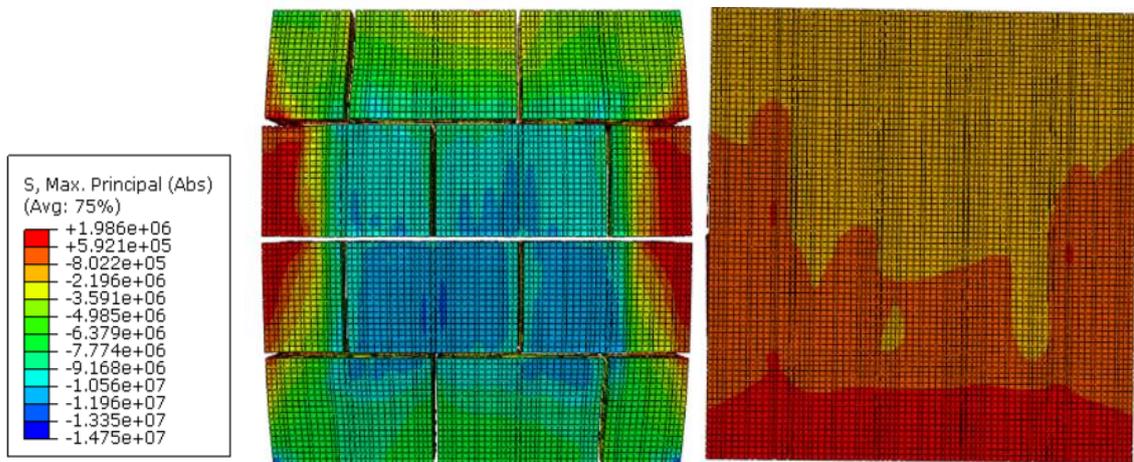
(b) Deslocamentos, no sentido do eixo y, na face exposta (à esquerda) e na face oposta (à direita).



(c) Deslocamentos, no sentido do eixo z, na face exposta (à esquerda) e na face oposta (à direita).
Unidades em metros.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7.19 – Tensões principais absolutas nas unidades da pequena parede de blocos de parede vazada, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C.



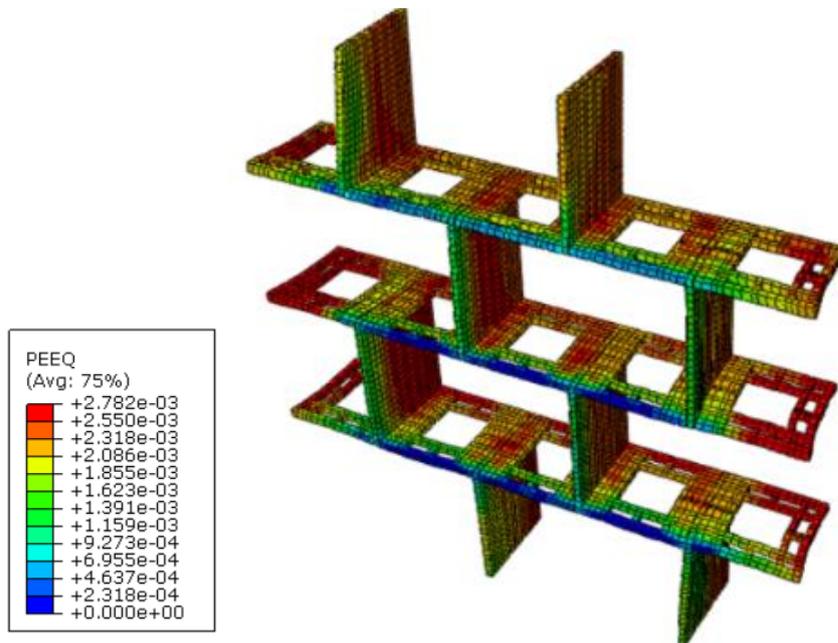
(a) Face exposta ao incêndio.

(b) Face oposta ao incêndio.

Unidades em Pascal.

Fonte: Elaborada pela autora.

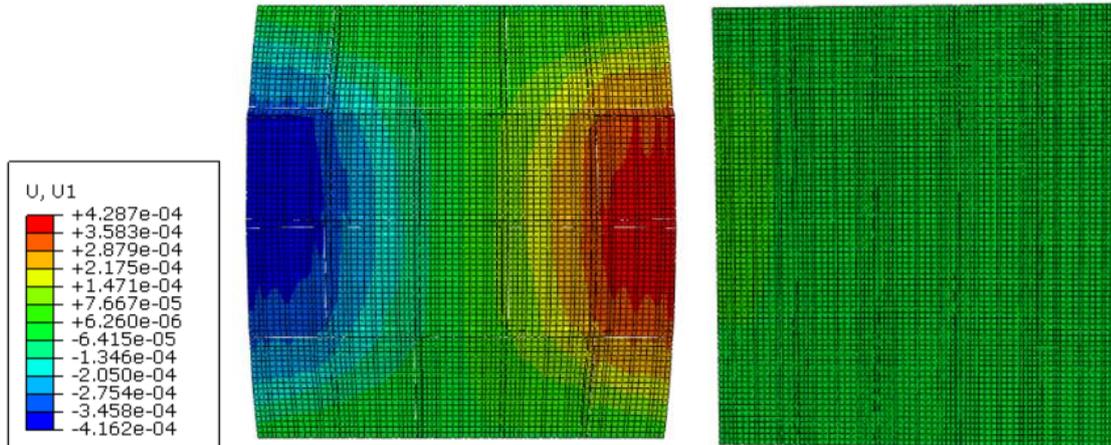
Figura 7.20 – Tensões principais absolutas na argamassa da pequena parede de blocos de parede vazada, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C.



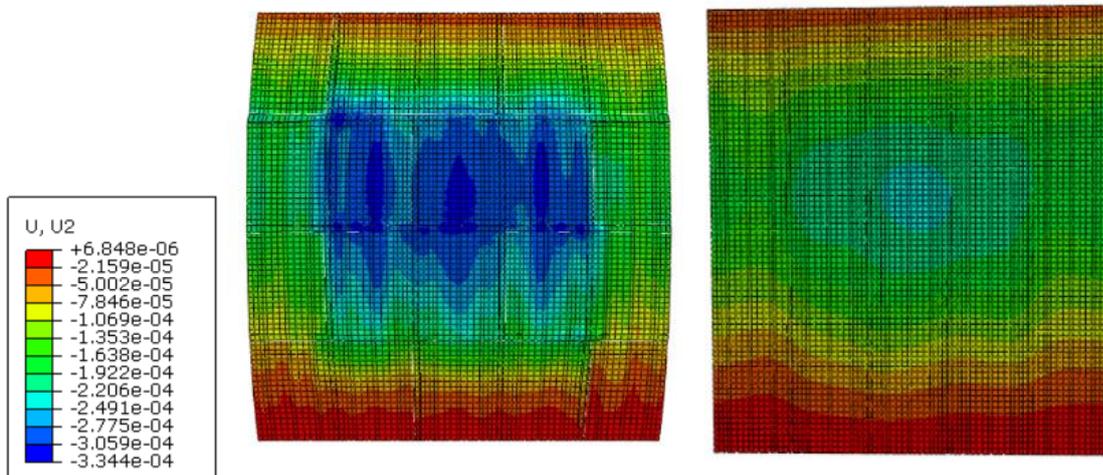
Unidades em Pascal.

Fonte: Elaborada pela autora.

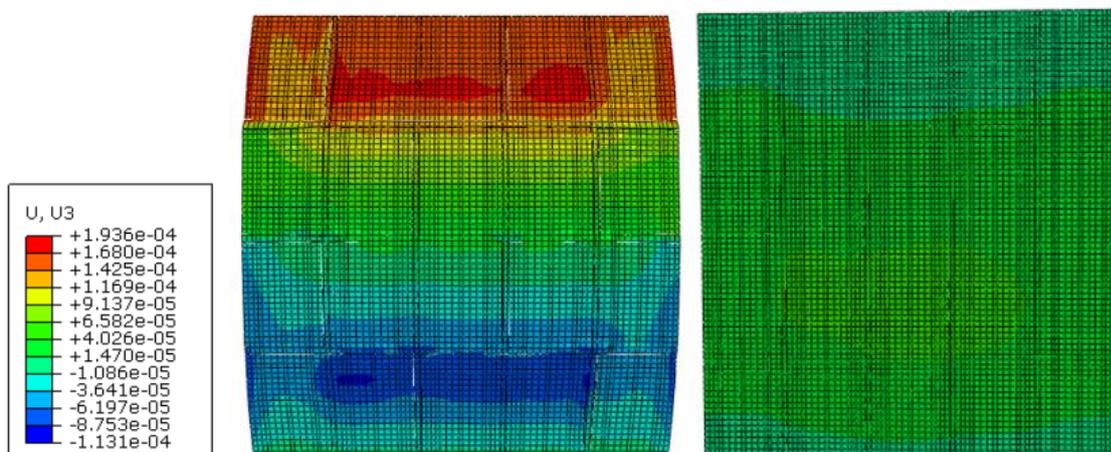
Figura 7.21 – Deslocamentos da pequena parede de blocos de parede vazada, após 4 horas, com a face exposta aquecida a 900°C.



(a) Deslocamentos, no sentido do eixo x, na face exposta (à esquerda) e na face oposta (à direita).



(b) Deslocamentos, no sentido do eixo y, na face exposta (à esquerda) e na face oposta (à direita).



(c) Deslocamentos, no sentido do eixo z, na face exposta (à esquerda) e na face oposta (à direita).

Unidades em metros.

Fonte: Elaborada pela autora.

Nos modelos numéricos propostos, considerando decorridos os 328 minutos de simulação, para ambas as configurações, verificou-se o acúmulo de tensões, tanto de compressão quanto de tração, próximo às placas de reação, o que era esperado, considerando as limitações aplicadas pelo pórtico utilizado como apoio para as pequenas paredes no ensaio experimental e representado pelas placas no modelo.

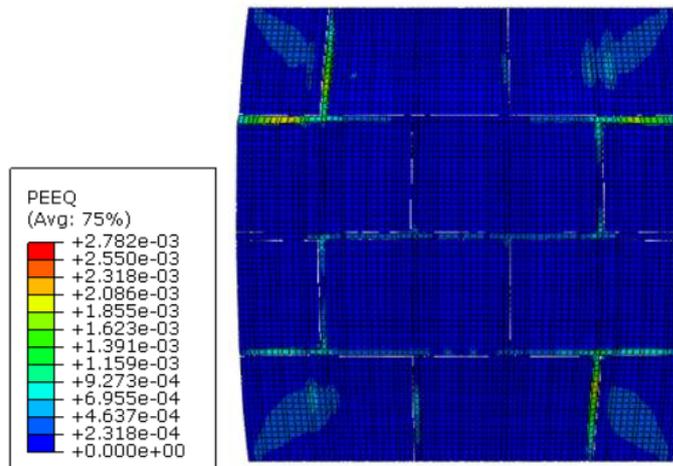
Em sequência, foram identificadas tensões de tração nas laterais das paredes e nas interfaces entre blocos e argamassas. Essas tensões resultam do movimento de curvatura da parede em direção ao fogo e da deformação diferencial entre a argamassa e a cerâmica. Embora não sejam suficientes para causar rupturas imediatas, essas tensões podem levar ao aparecimento de fissuras ao longo do tempo, especialmente nas interfaces críticas. Em especial, a pequena parede de blocos de paredes maciças atingiu o limite de isolamento térmico.

A análise dos resultados revelou que os valores de tensão e deslocamento obtidos apresentaram boa consistência entre os diferentes modelos, sem discrepâncias significativas. Essa uniformidade indica que a metodologia de simulação empregada é adequada para avaliar o comportamento térmico e estrutural das paredes de alvenaria em condições de incêndio. Além disso, a validação dos modelos numéricos facilita a compreensão das interações entre os materiais e suas respostas em situações de incêndio, enriquecendo a análise das propriedades das estruturas.

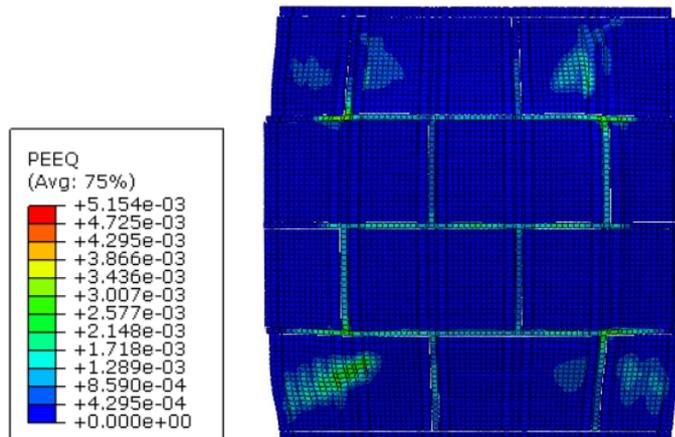
Quanto às deformações plásticas principais máximas absolutas, para os dois modelos propostos, após 4h de aquecimento constante (Figura 7.22), observa-se que elas estão majoritariamente localizadas junto à interface da argamassa com o bloco e próximas aos septos dos blocos localizados na primeira e última fiadas, sendo mais expressivas na pequena parede de blocos de parede maciça.

Quando comparadas aos esquemáticos de fissuras apresentados em Lima *et al* (2018), conforme Figura 7.23, percebe-se, no lado não exposto ao fogo, que, para a pequena parede de blocos de parede vazada, as fissurações ocorreram verticalmente e alinhadas às juntas de argamassa; para a pequena parede de blocos de parede maciça, a fissuração ocorreu verticalmente e entre juntas de argamassa, no centro das paredes das unidades.

Figura 7.22 – Deformações plásticas principais máximas, após 4h de aquecimento constante.



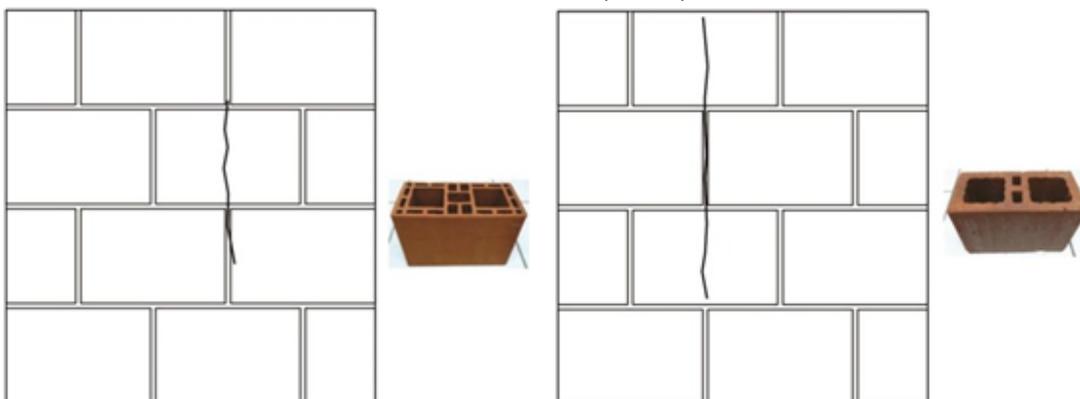
(a) Pequena parede de blocos de paredes vazadas.



(b) Pequena parede de blocos de paredes maciças.

Unidades em metros.
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7.23 – Padrões de fissuração presentes nas pequenas paredes dos ensaios de Lima et al. (2018).



(a) Bloco tipo A – lado não exposto.

(b) Bloco tipo B – lado não exposto.

Fonte: Adaptada de Lima *et al.* (2018).

Configurações não foram captadas pelo modelo numérico de forma direta, enumerando-se possíveis motivos. Primeiramente, a presença de umidade nos materiais, durante o ensaio experimental, pode ter desempenhado um papel significativo na formação e propagação das fissuras. A umidade, ao evaporar-se sob o calor do fogo, poderia induzir tensões adicionais e modificações nas propriedades mecânicas dos materiais, influenciando diretamente o comportamento das fissuras. Além disso, o efeito da dilatação diferencial entre os elementos constituintes da parede, poderia ter contribuído para variações nas tensões e, conseqüentemente, na formação das fissuras de maneira não prevista pelo modelo.

As propriedades de contato entre os elementos, assumidas como constantes ao longo da temperatura no modelo, podem ter capturado parcialmente os efeitos dinâmicos e não lineares da interação entre blocos e argamassa, durante o aquecimento e o resfriamento. Ademais, as variações nas propriedades geométricas e físicas dos materiais adotadas na modelagem podem ter introduzido simplificações que não representaram com precisão todas as complexidades observadas no ensaio experimental.

Por fim, a presença de incertezas nos ensaios experimentais, que não foi plenamente considerada na modelagem numérica, também pode ter contribuído para as disparidades observadas entre os resultados simulados e experimentais, quanto à configuração e distribuição das fissuras. Essas incertezas podem envolver fatores como variabilidade nas propriedades dos materiais, condições de contorno e precisão nos métodos de medição utilizados, que impactam diretamente a correspondência entre os modelos teóricos e os dados experimentais.

Em suma, ao analisar esses resultados com discussões que examinam as tendências do modelo numérico em relação aos resultados experimentais, enfatizou-se uma abordagem qualitativa, devido aos fatores mencionados anteriormente. A compreensão das propriedades dos materiais e das estratégias adotadas indica a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o comportamento específico dessas estruturas, especialmente no que diz respeito ao desempenho da cerâmica em altas temperaturas. Tanto os estudos experimentais quanto os numéricos (Andreini *et al.*, 2014; Nguyen; Meftah, 2014; Khaliq; Bashir, 2016; Bošnjak *et al.*, 2020), inclusive, no presente trabalho, têm demonstrado que a cerâmica possui capacidade significativa de resistir ao aumento simultâneo de temperatura e carregamento, em contraste com materiais convencionais da construção civil, como o

concreto. Levantamento que se difere das normativas existentes, como o Eurocode EN 1996-1-2 (CEN, 2005), que apresenta, para a cerâmica, apenas coeficientes de minoração de suas propriedades com o aumento da temperatura.

Adicionalmente, a integração de análises de sensibilidade e confiabilidade nos modelos numéricos pode reduzir as incertezas associadas aos parâmetros de entrada e, assim, aprimorar a previsão do comportamento estrutural das alvenarias cerâmicas. Métodos probabilísticos também podem ser utilizados para capturar variações nas propriedades térmicas e mecânicas do material, permitindo uma maior precisão na simulação.

Portanto, entende-se que os presentes modelos, mesmo sendo validados apenas em caráter qualitativo e exploratório, contribuem para a ampliação do conhecimento acerca da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos em situação de incêndio, cooperando para futuras pesquisas que visem a refinamento e validação quantitativa dos mesmos.

8 CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

O comportamento dos elementos de alvenaria estrutural sob condições de incêndio foi avaliado através de modelagem numérica que simulou os comportamentos estrutural, térmico e termoestrutural de prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural não armada. Esses elementos eram compostos por blocos cerâmicos de paredes vazadas e maciças, com argamassamento total de 1 centímetro e sem revestimento.

Inicialmente, em temperatura ambiente, foi simulado o comportamento de prismas e pequenas paredes sujeitos à compressão, conforme ensaios de Fernandes Neto (2020). Calibraram-se as propriedades necessárias ao modelo de plasticidade do software Abaqus, *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), para ajustar os resultados experimentais e numéricos. Alguns elementos apresentaram variabilidade, estando a curva tensão-deformação numérica majoritariamente dentro do intervalo experimental. A distribuição de tensões numéricas concordou com os resultados experimentais, especialmente no surgimento de fissuras nos blocos, junto às argamassas de assentamento e nas laterais dos modelos fissurados.

As duas configurações de pequenas paredes apresentaram modos de ruptura e tensões de tração similares, representando bem a rigidez linear inicial dos modelos experimentais. No entanto, na parte inelástica, o modelo não representou a mesma perda de rigidez encontrada experimentalmente. Os resultados podem ter sido influenciados pela escolha dos modelos CDP e de Guo (2014) para representar o comportamento inelástico dos materiais.

Como obter o comportamento pós-pico da cerâmica não foi obtido experimentalmente pelo trabalho de referência, isso limitou a calibração dos parâmetros nos modelos adotados. Uma vez que o modelo CDP, conhecido por sua capacidade de capturar a degradação da rigidez e a plasticidade dos materiais, requer uma calibração precisa dos parâmetros de dano e plasticidade, que podem variar conforme as propriedades específicas dos materiais utilizados. E que, similarmente, o modelo de Guo (2014) oferece uma abordagem para descrever o comportamento inelástico, mas também depende de uma parametrização adequada para refletir fielmente os resultados experimentais, embora tenha sido concebido inicialmente para o concreto e não para materiais cerâmicos.

Adicionalmente, em vias de reduzir o custo computacional, as restrições impostas pela simetria dupla nas simulações numéricas introduziram simplificações que podem não refletir completamente os testes experimentais. Essa abordagem limitada pode não capturar comportamentos assimétricos ou efeitos localizados de tensão e deformação que ocorrem na prática, podendo afetar a representação dos modos de falha e das distribuições de tensão, especialmente em áreas críticas da estrutura.

Outro aspecto relevante é a variabilidade nas propriedades dos materiais utilizados nos experimentos. Materiais de construção, como blocos de alvenaria e argamassa, podem apresentar variações significativas em suas propriedades mecânicas devido a fatores como composição, método de fabricação e condições de cura. Essas variações podem impactar diretamente na resposta estrutural e na precisão dos modelos numéricos adotados.

Nos prismas, as maiores tensões de compressão localizaram-se nas faces laterais; enquanto nas pequenas paredes, concentraram-se nas faces posterior e anterior, no encontro do bloco com as juntas de argamassa, ambos os comportamentos em concordância com Fernandes Neto (2020). Assim, os resultados dos modelos mecânicos destacaram a grande influência do contato dos materiais e das características mecânicas da ligação entre os elementos de alvenaria, especialmente a argamassa de assentamento, refletindo satisfatoriamente os ensaios de referência.

Posteriormente, nas simulações térmicas, o modelo proposto demonstrou representatividade satisfatória em relação aos resultados experimentais, especialmente para elementos estruturais compostos por blocos de paredes vazadas. Todos os modelos reproduziram coerentemente o patamar de temperatura próximo a 100°C, devido ao calor latente de vaporização da umidade presente no material, conforme a literatura especializada. A metodologia aplicada nas quatro configurações analisadas indicou uma adequada calibração do material, permitindo análises de sensibilidade para outras configurações de materiais e geometrias semelhantes, alinhando-se com os resultados experimentais. Inclusive, obteve-se boa representatividade em modelos com situações de aquecimento e com material cerâmico diferentes das configurações de referência deste trabalho. A calibração proposta apresentou resultados mais próximos dos valores experimentais quando

comparada às propriedades previstas pelo Eurocode 6 (CEN, 2005b) e com menor custo computacional.

Para pequenas paredes, o modelo numérico apresentou melhor correspondência com os resultados experimentais nas espessuras mais próximas à fonte de calor. Essa observação pode ser influenciada por vários fatores. Durante os ensaios, o desprendimento de unidades pode ter influenciado os resultados. O modelo não considera a abertura de fissuras e o desprendimento dos materiais, o que poderia aumentar rapidamente a temperatura nas paredes, devido à entrada de ar mais quente. Simplificações, como a falta de consideração de fissuração e movimentos convectivos, além da representação da radiação apenas nos vazados conectados ao longo de toda a altura do elemento, podem ter diminuído a precisão dos resultados. Além disso, os resultados térmicos obtidos por Fernandes Neto (2020) de apenas uma unidade de cada configuração estrutural limitaram a generalização dos resultados.

Em resumo, apesar das limitações e discrepâncias observadas, os modelos numéricos propostos mostraram-se eficazes na representação do comportamento térmico e estrutural dos elementos com blocos cerâmicos vazados, mas se destaca a necessidade de mais dados experimentais e refinamentos na modelagem, para melhorar a precisão e representatividade dos resultados, em especial, considerando os custos computacionais envolvidos.

Por fim, em caráter exploratório, simulações termomecânicas de pequenas paredes de blocos cerâmicos foram propostas, adotando-se a variação da resistência mecânica dos materiais, devido à elevação de temperatura, conforme os ensaios experimentais de Nguyen e Meftah (2014), com comportamento similar de aumento de resistência com aumento de temperatura, verificado também em Andreini *et al.* (2014), Khaliq e Bashir (2016) e Bošnjak *et al.* (2020). Já que a cerâmica passa por processo de queima na sua fabricação, justifica-se esse comportamento, por isso, notou-se experimentalmente, para materiais europeus, que há o aumento de sua resistência com o aumento da temperatura. Em Fernandes Neto (2020), obtiveram-se resistências residuais, superiores às iniciais, após o incêndio, o que corroborou para a adoção das considerações no modelo proposto.

Com base nos ensaios de Fernandes Neto (2020), os modelos foram comparados quanto ao comportamento experimental de pequenas paredes sem carregamento, aquecidas conforme a curva ISO 834-1 (ISO, 1999), em suas 4 faces externas, por 120 minutos. Nos modelos propostos, tanto para unidades com paredes

vazadas quanto para paredes maciças, as faces em contato com a argamassa e as faces internas atingiram valores próximos à tensão máxima de tração na temperatura máxima, com os maiores valores de tensão na fiada superior. A parte superior do modelo, estando livre, apresentou os maiores deslocamentos em todas as direções. A argamassa exibiu valores maiores que os máximos adotados para tração e compressão, refletindo a maior degradação observada nos ensaios, com a ocorrência de deslocamento entre os materiais. O perfil de deslocamento obtido e a concentração de tensões de tração no topo indicaram a tendência de comportamento da estrutura analisada nos ensaios.

Baseados no trabalho de Lima *et al.* (2018), os modelos foram comparados quanto ao comportamento de pequenas paredes sob carga axial constante e aquecidas até 900°C em uma face por até 4 horas ou até falha. A área de aquecimento foi de 50x50 cm, com temperaturas medidas na face não exposta, usando uma câmera termográfica, além de um esquema das fissuras ocorridas após o ensaio. Nos modelos numéricos propostos, após 328 minutos de simulação, houve um acúmulo de tensões próximas às placas de reação, seguido por tensões de tração nas laterais das paredes e nas interfaces entre blocos e argamassas. Essas tensões foram resultado do movimento de curvatura da parede em direção ao fogo e da deformação diferencial entre a argamassa e a cerâmica, indicando a possível formação de fissuras no modelo experimental.

As deformações plásticas máximas foram observadas principalmente na interface da argamassa com o bloco e próximas aos septos dos blocos, sendo mais expressivas na pequena parede de blocos de parede maciça. No entanto, o modelo numérico não capturou diretamente as configurações de fissuras observadas nos ensaios experimentais. A umidade presente nos materiais durante o ensaio experimental, provavelmente influenciou a formação e a propagação das fissuras ao evaporar-se sob o calor do fogo, induzindo tensões adicionais e modificando as propriedades mecânicas dos materiais. Além disso, a dilatação diferencial entre os elementos constituintes da parede, também pode ter contribuído para variações nas tensões e na formação das fissuras de maneira não prevista pelo modelo. A consideração das propriedades de contato entre os elementos como constantes ao longo da temperatura pode não ter capturado completamente os efeitos dinâmicos e não lineares da interação entre blocos e argamassa, durante o aquecimento e o resfriamento. Adicionalmente, as variações nas propriedades geométricas e físicas

dos materiais adotadas na modelagem podem ter introduzido simplificações que não representaram com precisão todas as complexidades observadas no ensaio experimental.

Contudo, mesmo com essas divergências, nenhum resultado numérico apresentou discrepância significativa em relação aos valores obtidos para tensão e deslocamentos e inferiu-se que esses campos de tensão e deslocamentos obtidos apresentaram boa representatividade com o comportamento esperado das estruturas modeladas.

Essas análises qualitativas ressaltam a importância de considerar uma variedade de fatores e incertezas ao interpretar os resultados de modelos numéricos e experimentais, destacando a necessidade de futuras pesquisas para aprimorar a representação e a compreensão do comportamento de paredes de alvenaria estrutural em situações de incêndio. Para avançar ainda mais na compreensão dessas estruturas, seria necessário realizar estudos futuros que busquem validar quantitativamente os modelos propostos, além de investigar mais detalhadamente como as propriedades específicas dos materiais cerâmicos variam com a temperatura e como essas variações influenciam o comportamento estrutural.

Diante dos resultados obtidos e estudo sobre o tema realizado no presente trabalho, apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

- Realizar experimentos quanto às propriedades térmicas da cerâmica brasileira e mecanismos de transferência de calor em seus vazados, para melhor compreensão do comportamento térmico de estruturas desse material.
- Efetuar uma análise de sensibilidade e influência do calor específico da cerâmica no comportamento térmico e mecânico de estruturas de alvenaria submetidas a altas temperaturas, variando-se sistematicamente o valor do calor específico em simulações numéricas e em ensaios experimentais, para avaliar o impacto desse parâmetro no desempenho térmico e estrutural das paredes de blocos cerâmicos.
- Conduzir ensaios laboratoriais, para avaliar a perda de resistência de blocos cerâmicos brasileiros com o aumento da temperatura, a fim de desenvolver coeficientes específicos e representativos do material estudado.

- Executar testes de resistência ao fogo em paredes carregadas, feitas de blocos cerâmicos, expondo uma face ao incêndio e monitorando os deslocamentos e tensões na estrutura.
- Simular o comportamento de paredes carregadas de blocos cerâmicos brasileiros em situação de incêndio e comparar os resultados de deslocamento vertical e lateral obtidos de forma numérica e experimentalmente. Variar as condições de simulação para coletar dados que possam contribuir para a futura normatização nacional do dimensionamento de alvenaria estrutural em condições de incêndio.
- Propor um estudo voltado à quantificação de incertezas nos resultados experimentais e numéricos relativos ao comportamento de estruturas de alvenaria cerâmica em condições de incêndio e temperatura elevada. Tal estudo seria focado na identificação e análise de incertezas provenientes de variáveis como as propriedades térmicas e mecânicas do material, variações nas condições de ensaio, e a heterogeneidade intrínseca dos blocos cerâmicos.

Recomendam-se esses estudos com o objetivo de desenvolver simulações numéricas e métodos estatísticos robustos que permitam quantificar a confiabilidade dos resultados e estabelecer margens de segurança adequadas para estruturas de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos em situação de incêndio.

REFERÊNCIAS

AL-HADHRAMI, L. M.; AHMAD, A. Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 1123-1130, 2009.

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

ALLEN, M. H. **Compressive, transverse and racking strength tests of 4-in brick walls**. Geneva: Structural Clay Products; 1965. Research Report n. 9.

ALLEN, M. H. **Compressive and transverse strengths of 8-in brick walls**. Geneva: Structural Clay Products; 1966. Research Report n. 10.

AMENY, P.; LOOV, R. E.; JESSOP, E. L. Strength, elastic, and creep properties of concrete masonry. **The International Journal of Masonry Construction**, v. 1, n. 1, p. 33-39; 1980.

AMENY, P.; LOOV, R. E.; SHRIVE, N. G. Prediction of elastic behaviour of masonry. **The International Journal of Masonry Construction**, v. 3, n.1, p. 1-9, 1983.

AMJAD, M. A. **Elasticity and strength of masonry, units and mortar**. 1990. p. Ph.D. (Thesis) - Department of Civil Engineering, University of Leeds, 1990.

ANDREINI, M.; CACIOLAI, M.; MENDOLA, S. L. A.; MAZZIOTTI, L.; SASSU, M. Mechanical behavior of masonry materials at high temperatures. **Fire and Materials**. John Wiley & Sons, LTD, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI/TMS 216.1-14**: Code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies. Detroit: Michigan, 2014.

ACHOU MUDOU. **Apartamento fit terra bonita, 3 quartos, suite, londrina pr**. 2021. Disponível em: <https://www.achoumudou.com.br/203693>. Acesso em: 15 jan. 2021.

ASSIS, E. B. de. **Análise numérica da fixação de escadas pré-moldadas leves em alvenaria estrutural sob incêndio**. 2021. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15812:** Alvenaria estrutural - Blocos cerâmicos - Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15961:** Alvenaria estrutural — Blocos de concreto - Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

AYALA, F. R. R. **Mechanical properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures.** Thesis - The University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, Manchester, 2010.

BASE, G. D.; BAKER, L. R. Fundamental properties of structural brickwork. **Journal of The Australian Ceramic Society**, n. 19, p. 16-23, 1973.

BASTOS, P. S. S. **Alvenaria estrutural:** notas de aula. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2013. (Disciplina Alvenaria Estrutural do Curso de Engenharia Civil).

BONITESE, K. V. **Segurança contra incêndio em edifício habitacional de baixo custo estruturado em aço.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

- BOŠNJAK, J.; GAMBARELLI, S.; SHARMA, A.; MEŠKOVIĆ, A. Experimental and numerical studies on masonry after exposure to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 1-11, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819323682>. Acesso em: 12 nov. 2023.
- BRADSHAW R. E.; HENDRY A. W. Further crushing tests on store-high walls 4.5-in thick. **Proceedings of British Ceramic Society**, n. 11, p. 25-53; 1968.
- BRENTANO, T. **Como elaborar um plano de proteção contra incêndio (PPCI)**. Porto Alegre: PUC/RS, 2004. Apostila (Curso de Extensão Universitária).
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 771-1**. Specification for masonry units: Clay masonry units. London: BSI, 2011.
- BROOKS, J. J. Elasticity of masonry. *In*: BROOKS, J. J. **Concrete and masonry movements**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. p. 95-136.
- BUCHANAN, A. H. **Structural design for fire safety**. Chichester: Wiley, 2002.
- CALDAS, R. B. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- CAMACHO, J. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2006.
- CARASEK, H. Argamassas. *In*: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Arte Interativa, 2007. cap. 26, p. 863-904.
- CARDOSO, H. S. **Estudo teórico-experimental de parafusos utilizados como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- CARVALHO, M. **Argamassa de assentamento: traço e consumo**. 2021. Disponível em: <https://casaeobra.com/argamassa-de-assentamento/>. Acesso em: 22 mar. 2022.
- CARVALHO, P. R. O. **Análise numérica de pequenas paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto em situação de incêndio: ênfase no comportamento térmico e termoestrutural**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- ÇENGEL, Y.; CIMBALA, J. **Fluid mechanics**. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- CHEEMA, T. S.; KLINGNER, R. E. Compressive strength of concrete masonry prisms. **ACI Journal**, v. 83, n. 1, p. 88-97, Jan./Feb., 1986.

CHEN, Q.; ANDRAWES, B. 3D Finite element modeling to study the behavior of shape memory alloy confined concrete. *In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING*, 15., 2012, Lisboa. **Proceedings** [...]. Lisboa: SPES, 2012. p. 1-10.

CHICHIERCHIO L. C. Conforto ambiental: desempenho térmico e acústico e proteção contra o fogo. *In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA. Manual técnico de alvenaria*. São Paulo: ABCI, 1990. p. 119-141.

COLVILLE, J.; WOLDE-TINSAE, A. M. Compressive strength of hollow concrete masonry. **The Masonry Society Journal**, v. 9, n. 2, p. 89-91, Feb. 1991.

COMITE TECHNIQUE INTERNATIONAL DE PREVENTION ET D'EXTINCTION DE FEU. **World fire statistics**. Ljubljana: Center for Fire Statistics, International Association of Fire and Rescue Services, 2024. Report n. 29. Disponível em: https://www.ctif.org/sites/default/files/2024-06/CTIF_Report29_ERG.pdf. Acesso em: 20 jul. 2024.

GUERRA, R. S. T. **Como fazer o pedido de blocos**. 2015. Disponível em: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2015/09/como-fazer-o-pedido-de-blocos-de.html>. Acesso em: 15 jun. 2022.

CURTIN, W. G.; SHAW, G.; BECK, J. K. **Design of reinforced and prestressed masonry**. London: Thomas Telford, 1988.

DHANASEKAR, M.; KLEEMAN P. W.; PAGE A.W. Biaxial stress-strain relations for brick masonry. **Journal of Structural Engineering**, v. 111, n. 5, p. 324-333, 1985.

DORAN, B.; KÖKSAL, H. O.; AKTAN, S.; JAFAROV, O.; KARAKOÇ, C. Constitutive modeling of masonry walls strengthened with fiber reinforced polymers. *In: YALÇINER, H.; FARSANGI, E. N. (eds.). New trends in structural engineering*. Rijeka: IntechOpen, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.77201>. Acesso em: 1 jun. 2023.

DRYSDALE, D. **An Introduction to fire dynamics**. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 1998.

DRYSDALE, R. G.; HAMID, A. A.; BAKER, L. R. **Masonry structures: behavior and design**. New Jersey: Prentice-Hall, 1994.

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

EDGEELL, G. J. **Stress-strain relationships for brickwork-their application in the theory of unreinforced slender members**. [S. l.]: British Ceramic Research Association, 1980. Technical Note, n. 313.

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-2**: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN, 2002.

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1996-1-2**: Eurocode 6: Design of masonry structures: Part 1-2: general rules: structural fire design. Brussels: CEN, 2005b.

FATTAL, S. G.; CATTANEO, L. E. **Structural performance of masonry walls under compression and flexure**. Washington: NBS, 1976. NBS Building Science Series, v. 73.

FISHER, K. The effect of low strength bricks in high strength brickwork. **Proceedings of British Ceramic Society**, n. 21, p. 79-97, 1973.

FELICIANO, F. M. H.; FERREIRA, L. T. S.; FERREIRA, K. I. I. Alvenaria estrutural através de uma analogia com o concreto armado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009, Curitiba. **Anais** [...]. Curitiba: IBRACON, 2009.

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

FERREIRA, A. A. **Modelagem computacional para avaliação do efeito do não preenchimento das juntas verticais na resistência da alvenaria estrutural**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

FILIPE, D. **Como foi possível a construção das pirâmides do Egito?** 2018. Disponível em: <https://realidades simulada.com/como-foi-possivel-a-construcao-das-piramides-do-egito/>. Acesso em: 9 out. 2019.

FORQUIN, P. A. Dynamic behavior of ceramic materials. *In*: HOKKA, M. **Dynamic behavior of materials: fundamentals, material models, and microstructure effects**. Amsterdam: Elsevier, 2024. p. 449-482.

FORTES, E. S.; PARSEKIAN, G. A.; CAMACHO, J. S.; FONSECA, F. S. Compressive strength of masonry constructed with high strength concrete blocks. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v.10, n. 6, p. 1273-1319, 2017.

FREITAS, A. A. **Análise numérica e experimental do comportamento de prismas e miniparedes submetidos à compressão**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia

de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

G1. O que se sabe sobre o incêndio no Museu Nacional, no Rio. **G1 Notícias**, Rio de Janeiro, 4 set. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2018/09/04/o-que-se-sabe-sobre-o-incendio-no-museu-nacional-no-rio.ghtml>. Acesso em: 7 set. 2019.

GOMES, I. R. **Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface**. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GOMES, N. S. G. **Adequação das normas de componentes cerâmicos às novas demandas da construção civil**. 2004. Disponível em: <http://acervir.com.br/adequacao-das-normas-de-componentes-ceramicos-as-novas-demandas-da-construcao-civil/>. Acesso em: 19 set. 2019.

GUO, Z. **Principles of reinforced concrete**. Oxford: Elsevier, 2014.

HAACH, V.G.; VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P. B. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2980-2987, 2011.

HENDRY, A. W. Masonry walls: materials and construction. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 8, p. 323-330, 2001.

HENDRY, A. W.; SINHA, B. P.; DAVIES, S. R. **Design of masonry structures**. London: E & FN Spon, 2004.

INSTITUTO SPRINKLER BRASIL. Brasil é o 3º país com o maior número de mortes por incêndio. 5 mar. 2015. Disponível em: <https://sprinklerbrasil.org.br/imprensa/brasil-e-o-3o-pais-com-o-maior-numero-de-mortes-por-incendio-newsletter-no-5/>. Acesso em: 7 set. 2019.

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

ITAMBÉ. **O que se sabe sobre o incêndio no Museu Nacional, no Rio**. 1 nov. 2016. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/norma-alvenaria-estrutural/>. Acesso em: 16 out. 2020.

IZQUIERDO, O. S. **Influência do tipo de argamassamento e da utilização de peças de ajuste dimensional na resistência à compressão da alvenaria de blocos de concreto**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

IZQUIERDO, O. S. **Estudo da interface bloco/graute em elementos de alvenaria estrutural**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

KALIL, S. M. B.; LEGGERINI, M. R.; BONACHESKI, V. **Alvenaria estrutural**. Porto Alegre: [s. n.], 2006. Disponível em: http://www.politecnica.pucrs.br/professores/soares/Topicos_Especiais-Estruturas_de_Madeira/Alvenaria. Acesso em: 7 set. 2019.

KHALAF, F. M.; HENDRY, A. W.; FAIRBAIRN, D. R. Mechanical properties of materials used in concrete blockwork construction. **Magazine of Concrete Research**, v. 44, n. 158, p.1-14, 1992.

KHALIQ, W.; BASHIR, M. F. High temperature mechanical and material properties of burnt masonry bricks. **Materials and Structures**, v. 49, p. 5195-5208, 2016.

KHOO, C. L.; HENDRY, A. W. A failure criterion for brickwork in axial compression. *In*: INTERNATIONAL BRICK MASONRY CONFERENCE, 3., 1973. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 1973. p. 139-145.

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

KIRCHHOF, L. D.; MUNAIAR NETO, J.; MALITE, M.; GONÇALVES, R. M. Análise numérica de viga mistas aço-concreto em temperatura ambiente e em situação de incêndio. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológica**, v. 26, n. 1, p. 69-82, 2005.

KMIECIK, P.; KAMIŃSKI, M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 11, n. 3, p. 623-636, 2011.

LEÃO, T.C. **Resistência de prismas de blocos estruturais cerâmicos submetidos à esforços de compressão e tração na flexão**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

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

LEITE, H. A. L. **Alvenaria estrutural em situação de incêndio – proposta de avaliação com vistas à normatização**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

LENCZNER, D. Strength and elastic properties of a 9-inch brickwork cube. **Proceedings of British Ceramic Society**, v. 65, n. 6, p. 363-282, 1966.

LIMA, B. A. Desempenho térmico e acústico na alvenaria estrutural e sua adaptação a outros sistemas construtivos. 6 abr. 2024. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/desempenho-t%C3%A9rmico-e-ac%C3%BAstico-na-alvenaria-estrutural-alves-de-lima-adg7f/>. Acesso em: 1 maio 2024.

LIMA, R. C. A; RIGÃO, A. O.; MOHAMAD, G.; KIRCHHOF, L. D.; SANTOS NETO, A. B. S. Assess of hollow clay block masonry wallets under high temperature. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, p. 1-12, 2018.

LOBUE, B. **Excalibur Hotel & Casino (Las Vegas, 1990)**. 2016. Disponível em: <https://structurae.net/fr/ouvrages/excalibur-hotel-casino>. Acesso em: 24 fev. 2022.

LOPES, R. F. R.; RODRIGUES, J. P. C.; PEREIRA, J. M.; LOURENÇO, P. B. Análise experimental de uma parede de alvenaria estrutural de blocos de concreto de três células em situação de incêndio. **Concreto e Construções**, ed. 89. p. 86-94, abr./jun. 2018.

LOURENÇO, P. B. **Computation strategies for masonry structures**. Thesis (PhD in Civil Engineering) - Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1996.

LUBLINER, J. *et al.* A plastic-damage model for concrete. **International Journal of Solids and Structures**, v. 25, n. 3, p. 299-326, 1989.

MALM, R. Shear cracks in concrete structures subjected to in-plane stresses. **TRITA-BKN**, n. 88, Nov. 2006. Licenciante Thesis.

MALM, R. Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method. **TRITA-BKN**, n. 97, Apr. 2009.

MACHADO, J. F. **Análise do modo de ruptura e previsão de resistência à compressão de prismas de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

MEDEIROS, J. S.; SABBATINI, F. H. Aderência bloco / argamassa: determinação da resistência à flexão de prismas. *In*: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 5., Florianópolis, 1994. **Anais** [...]. Florianópolis: UFSC, 1994. p. 270-277.

MEYER, U. Extended application rules for the fire performance of masonry walls. *In*: INTERNATIONAL MASONRY CONFERENCE, 7., London, 2006. **Proceedings** [...]. Stoke-on-Trent: British Masonry Society, 2006. p. 1-4. Disponível em: <http://www.masonry.org.uk/>. Acesso em: 26 jun. 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1997.

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MOHAMAD, A. A. E; CHEN, Z. Experimental and numerical analysis of the compressive and shear behavior for a new type of self-insulating concrete masonry system. **Applied Sciences Journal**, v. 6, n. 245, 2016.

MOHAMAD, G.; FONSECA, F.S.; VERMELTFOORT, A. T.; MARTENS, D.R. W.; LOURENÇO, P.B. Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths. **Construction and Building Materials**, n. 134, p. 489-496, 2017.

MONTEIRO, S., N.; VIEIRA, C. M. F. Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. **Applied Clay Science**, v. 27, p. 229– 234, 2004.

MORENO JÚNIOR, A. L.; MOLINA, J. C. Considerações de interesse sobre a avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio: contribuições à revisão da NBR 5628/2001. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 37-53, out./dez, 2012.

NADJAI, A.; O’GARRA, M.; ALI, F. A. Finite element modelling of compartment masonry walls in fire. **Computers and Structures**, n. 81, p. 1923-1930, 2003.

NADJAI, A.; O’GARRA, M.; ALI, F.; JURGEN, R. Compartment masonry walls in fire situations. **Fire Technology**, v. 42, p. 211-231, 2006.

NESSRALLA, M. A. **Resistência à compressão de paredes de alvenaria estrutural: bloco cerâmico de 44cm**. 2013, 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.

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 clay hollow-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 behavior 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.

NOVAES, C. Alvenaria: Entenda o que é, como fazer e quais tipos existem. **Educa Civil**. Disponível em: <<https://educacivil.com/alvenaria-entenda-o-que-e-como-fazer-e-quais-tipos-existem/>>. Acesso em: 22 mar. 2022.

OLIVEIRA, D. S. CARRAZEDO, R. Numerical modeling of circular, square and rectangular concrete columns wrapped with FRP under concentric and eccentric load. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12., n. 13, p. 518-550, 2019.

OLIVEIRA, L. A. P. de. Estimativa da resistência ao fogo de paredes de alvenaria pelo critério de isolamento térmico. **Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo**, n. 5, 1998. Disponível em: <http://http://bt.fatecsp.br/system/articles/26/original/02luizantonio.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2020.

- OLIVEIRA, L. M. F. **Estudo teórico e experimental do comportamento das interfaces verticais de paredes interconectadas de alvenaria estrutural**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- ORGUEL. Uso do graute na construção civil. 18 abr. 2017. Disponível em: <https://www.grupoorguel.com.br/blog/uso-graute-na-construcao-civil/>. Acesso em: 3 mar. 2020.
- PAGE, A. W.; SHRIVE. N. G. A critical assessment of compression tests for hollow block masonry. **Masonry International Journal**, v. 2, n. 2, p. 64-70, 1988.
- PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2. ed. rev. São Carlos: EduUFSCar, 2014.
- PARSEKIAN, G. A.; SOARES, M. M. **Alvenaria estrutural em bloco cerâmico: projeto, execução e controle**. São Paulo: O Nome da Rosa, 2010.
- PASQUALI, I. **Influência do tipo de argamassamento na resistência à compressão de pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica**. 2007. Dissertação - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- PINA-HENRIQUES, J.; LOURENÇO, P. B. Masonry compression: a numerical investigation at the meso-level. **Engineering Computations**, v. 23, p. 382-407, 2006.
- PORTELLA, R. P. **Fator de eficiência da resistência prisma/bloco cerâmico de paredes vazadas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- POSENATO. **Graute: o que é?** 18 jun. 2020. Disponível em: <https://decerei.org/construcao/graute/>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MARA, L. A. C. da. **Elementos das estruturas mistas aço - concreto**. Belo Horizonte: O Lutador, 2001.
- RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo: Pini, 2003.
- RIGÃO, A. O. **Comportamento de pequenas paredes de alvenaria estrutural frente a altas temperaturas**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- ROCHA, F. M. **Modelos numéricos de vigas mistas de aço e concreto pertencentes a sistemas de pisos mistos de pequena altura em situação de incêndio**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

- RODOVALHO, F. S. **Simulação numérica de blocos e prismas de alvenaria em situação de incêndio**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- ROMAN, H. R. Alvenaria estrutural (como construir). **Revista Técnica**, v. 24, 1996.
- ROMAN, H. R.; MUTTI, C. N.; ARAÚJO, H. N. **Construindo em alvenaria estrutural**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1999. v.1.
- ROSEMANN, F. **Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos pelo critério de isolamento térmico**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- RUSSO, S.; SCIARRETTA, F. Residual mechanical parameters of masonry exposed to fire: a new numerical approach. **Advanced Materials Research**, v. 1119, p. 700-705, 2015.
- SAHLIN, S. **Structural masonry**. New Jersey: Prentice-Hall, 1971.
- SANTOS, C. F. R.; SIMÕES, Y. S.; RODOVALHO, F. S.; NALON, G. H. Thermo-structural modeling of clay units masonry walls under fire conditions. *In*: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 38., Florianópolis, 2017. **Proceedings** [...]. Florianópolis: ABMEC, 2017. p. 1-16.
- SANTOS, D. B. R. **Modelagem numérica de lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- SANTOS, M. J. F. **Análise da resistência de prisma e pequena paredes de alvenaria estrutural cerâmica para diferentes tipos de argamassa**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública. Corpo de Bombeiros. **Instrução técnica nº 08/2018: resistência ao fogo dos elementos de construção**. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2018.
- SCHOSSLER, R. T. **Deformações e modo de ruptura em prismas de blocos de concreto: análise experimental com extensometria e correlação de imagem**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2019.
- SHRIVE, N.G. A fundamental approach to the fracture of masonry. *In*: CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM, 3., 1983, Edmonton. **Proceedings** [...]. University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canadá, p. 4.1-4.16, 1983.

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

SIMULIA. **Abaqus analysis user's manual 6.13**. Dassault Systems Providence: Waltham, 2013.

SOARES, S. M. B. **Alvenaria estrutural**: notas de aula. Porto Alegre: PUC/RS, 2010. (Curso de Alvenaria Estrutural).

STANCATO, A. C. **Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

STECKEL, A. L. P. A. **Proposta de adequação da NBR 9077 para locais de reunião de público**. 2004. Especialização (Monografia em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

THOMAZ, E.; HELENE, P. Qualidade no projeto e na execução de alvenaria estrutural e de alvenarias de vedação em edifícios. São Paulo: EPUSP, 2000. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP: BT/PCC/252.

VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. **Resistência ao fogo das estruturas de aço**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia; [S. l.]: Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2003.

VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. Resistência ao fogo das estruturas de aço. **Manual de Construção em Aço**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia; [S. l.]: Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2005.

VILLAR, C. E. **Caracterização e comportamento da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

WANG, Y. C. **Steel and composite structures**: behaviour and design for fire safety. London: Spon Press, 2002.

YOKEL, F. Y.; MATHEY, R. G.; DIKKERS, R. D. **Compressive strength of slender concrete masonry walls**. Washington: NBS, 1978. Building Science Series, n. 73.

APÊNDICE A ANÁLISES COMPLEMENTARES PARA OS MODELOS MECÂNICO E TÉRMICO

Apresentam-se, a seguir, as análises complementares realizadas para calibração e validação dos modelos térmico e mecânico desenvolvidos nos capítulos 5 e 6. Elas tiveram como objetivo: investigar as variáveis aplicáveis ao comportamento térmico e ao comportamento mecânico da alvenaria estrutural cerâmica, buscando ampliar o conhecimento na área; compreender melhor o comportamento desses modelos, em resposta à variação de determinados parâmetros; explorar um campo com ainda pouca literatura disponível e promover discussões acerca de variáveis importantes na representação de materiais cerâmicos.

Os parâmetros analisados foram:

- o ângulo de dilatância, associado à mudança de volume do material, causado pelas deformações plásticas que ocorrem, por exemplo, em cerâmica;
- o fator σ_{b0}/σ_{c0} , a razão entre a resistência do material à compressão biaxial (σ_{b0}) e a resistência à compressão uniaxial (σ_{c0});
- o módulo de elasticidade adotado para as placas de reação, utilizadas para incorporação das condições de contorno e carregamento nos modelos propostos;
- a influência da incorporação de modelo constitutivo para os meios-blocos das pequenas paredes, comparada com a adoção de modelo único para a família de blocos cerâmicos;
- o valor da emissividade e da constante de convecção para superfícies cerâmicas, considerando a transferência de calor dos elementos de alvenaria estrutural;
- a influência da consideração ou não de radiação nos vazados na transferência de calor dos elementos de alvenaria estrutural.

Considerou-se o estudo dessas variáveis, por se tratarem de variáveis solicitadas no modelo constitutivo adotado para os modelos propostos que possuem alta variabilidade de valores na literatura de referência, ou ainda são pouco explorados no estado da arte atual. As análises realizadas são detalhadas a seguir.

A.1 Análise de sensibilidade quanto ao ângulo de dilatância

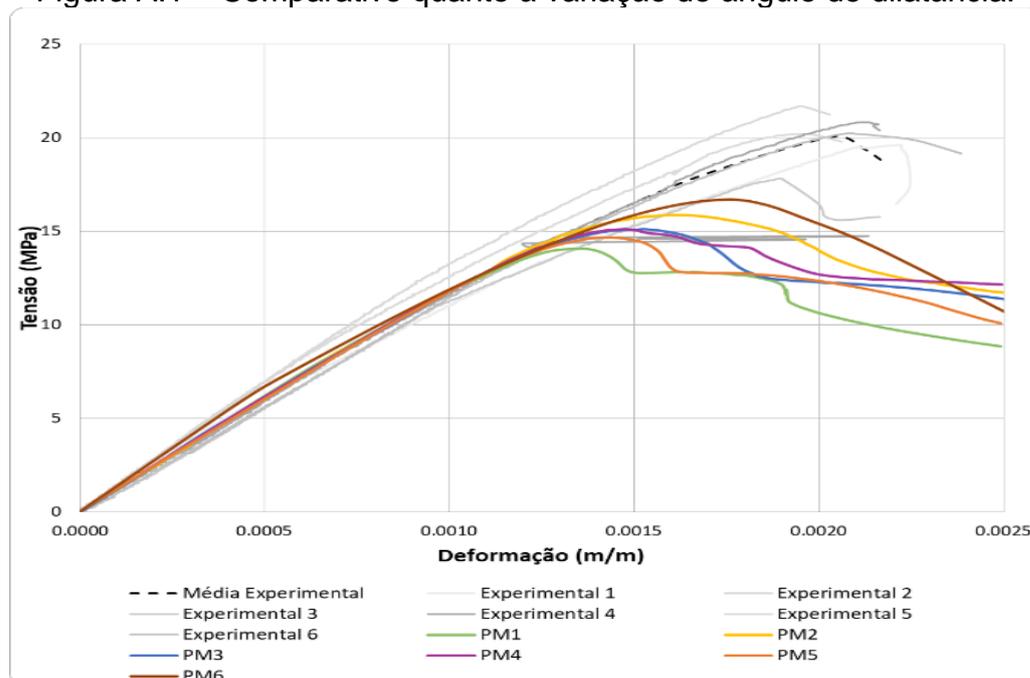
Inicialmente, para a definição dos parâmetros de plasticidade do CDP, empregados no modelo mecânico, analisou-se, qualitativamente, a variação do ângulo de dilatância para a cerâmica e para a argamassa, entre os valores de referência 25° e 56°, encontrados na literatura. Na Tabela A.1, apresentam-se as configurações simuladas e, na Figura A.1, o comportamento tensão x deformação obtido para cada elemento de alvenaria.

Tabela A.1 – Análises realizadas.

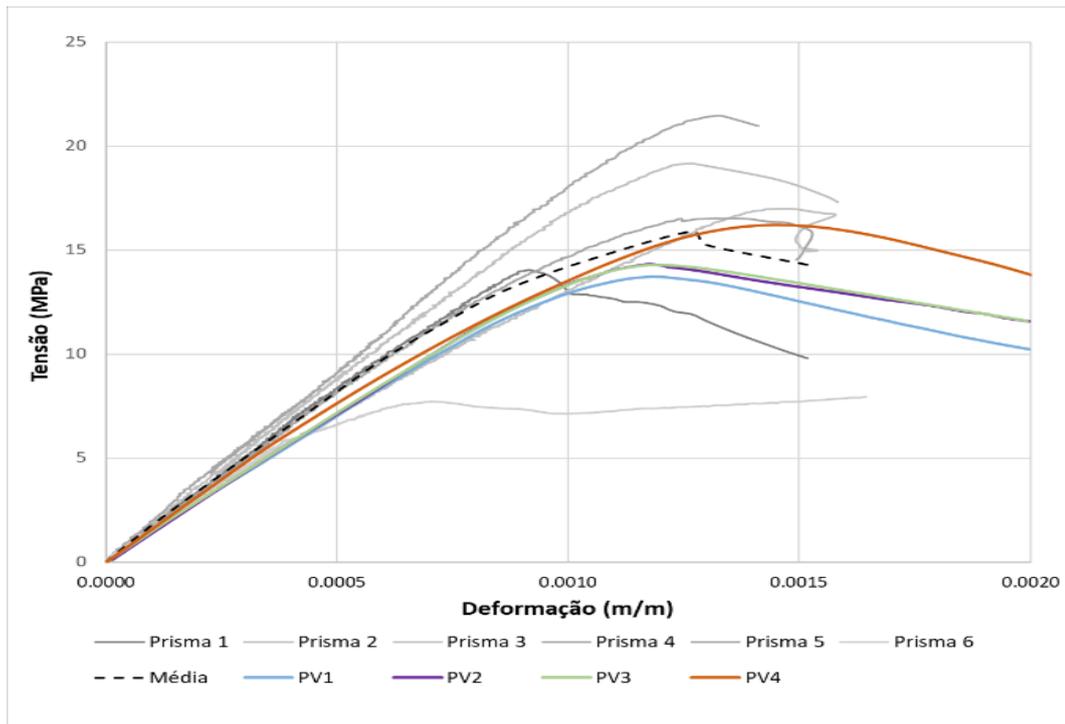
Análise Prismas	Ângulo de dilatância		Análise Paredes	Ângulo de dilatância	
	Cerâmica	Argamassa		Cerâmica	Argamassa
PM1	28°	35°	PPM1	56°	35°
PM2	48°	35°	PPM2	28°	35°
PM3	40°	35°	PPM3	25°	35°
PM4	48°	25°	PPV1	28°	35°
PM5	35°	35°	PPV2	25°	35°
PM6	56°	56°			
PV1	35°	35°			
PV2	48°	40°			
PV3	56°	35°			
PV4	56°	56°			

Fonte: Elaborada pela autora.

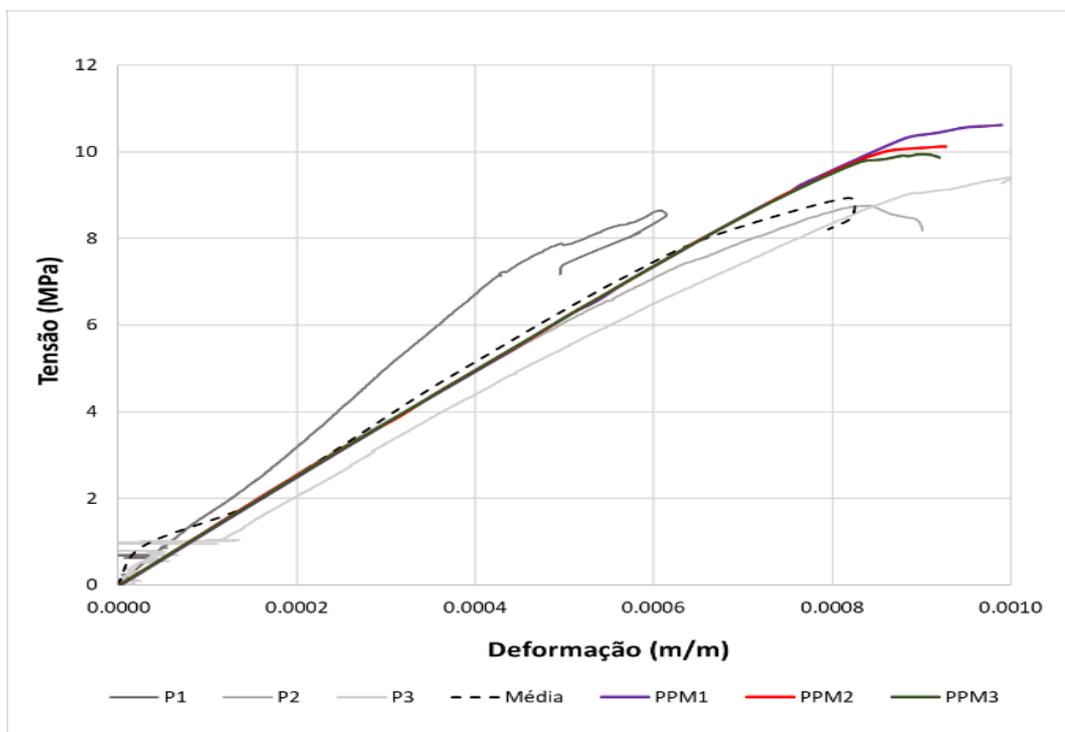
Figura A.1 – Comparativo quanto à variação do ângulo de dilatância.



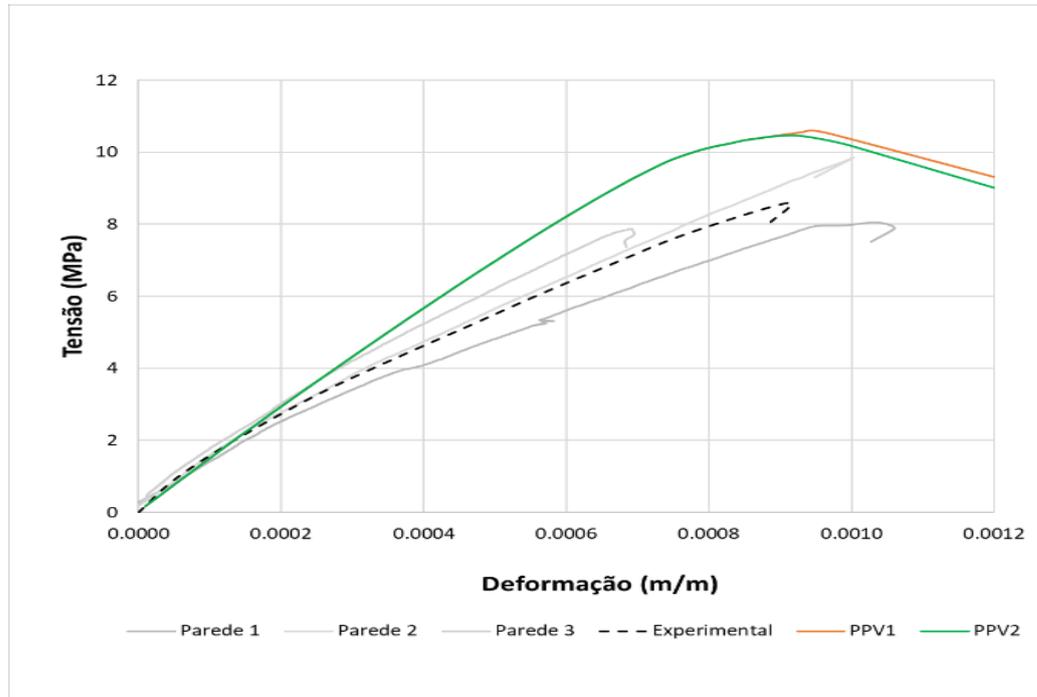
(a) Prisma com bloco de paredes maciças.



(b) Prisma com bloco de paredes vazadas.



(c) Pequena parede com bloco de paredes maciças.



(d) Pequena parede com bloco de paredes vazadas.
Fonte: Elaborada pela autora.

A melhor conjuntura para o prisma com bloco de parede maciça foi a análise PM6, com desvio de -16%, para a carga e os deslocamentos últimos, em relação à média experimental. Para o bloco de parede vazada, a melhor resposta foi da análise PV4, com desvio de -1,9% para carga e 14% para deslocamentos últimos.

A melhor condição para a pequena parede com bloco de parede maciça foi a análise PPM3, com desvio de 11% tanto para carga quanto para deslocamentos últimos, em relação ao experimental. Para a com bloco de parede vazada, a melhor resposta foi da análise PPV2, com desvio de -22% para carga e -0,2% para deslocamentos últimos.

Assim, observou-se que os modelos apresentam uma alta sensibilidade à definição do ângulo de dilatância, tendo para maiores valores do ângulo uma resistência última maior e maiores deformações. Ao analisar as curvas obtidas, comparando com o resultado experimental, entende-se que a configuração dos elementos e condição de carregamento influenciam na escolha do parâmetro avaliado, uma vez que os elementos de menores dimensões, ou seja, os prismas, apresentaram melhores representações com ângulos maiores, enquanto que para as pequenas paredes, que apresentaram curvas com comportamento de ruptura mais frágeis, foram melhores para os ângulos menores, que são mais associados a materiais frágeis, como a cerâmica.

Acredita-se que os prismas, por sofrerem maior confinamento no ensaio a compressão, são melhores representados pelo maior ângulo de dilatância, que reflete em maior atrito entre as partículas do material, maior confinamento da argamassa de ligação e aumento da resistência ao bloco e argamassa. Já as pequenas paredes, por possuírem maiores dimensões e maior número de conexão entre seus componentes, possui menor confinamento e um comportamento entre partículas dos elementos mais próximo ao natural de cada material. Assim, com base nesses resultados, os valores adotados do ângulo de dilatância, nos modelos dos prismas e das pequenas paredes, para o material cerâmico, foram 56° e 25°; para a argamassa, 56° e 35°, respectivamente.

A.2 Análise de sensibilidade do parâmetro σ_{b0}/σ_{c0} para a cerâmica

Variou-se, também, o fator σ_{b0}/σ_{c0} para a cerâmica, que é a razão entre a resistência do material à compressão biaxial (σ_{b0}) e a resistência à compressão uniaxial (σ_{c0}). Tomou-se como referência o valor de 1,14, adotado por Rodovalho (2018) e 1,4, adotado por Carvalho (2019), os resultados são apresentados na Tabela A.2, na Tabela A.3 e na Figura A.2.

Tabela A.2 – Comparativo quanto à variação de tensão e deformação devido à variação do σ_{b0}/σ_{c0} para os prismas.

Análise	fb0/fc0		Variação quanto à tensão (%)		Variação quanto à deformação (%)	
	Cer.	Arg.	Mac.	Vaz.	Mac.	Vaz.
TM1 e T1	1,4	1,4	-17,1	-9,9	-17,1	-6,2
TM2 e T2	1,14	1,4	-19,8	-10,8	-21,0	-8,1

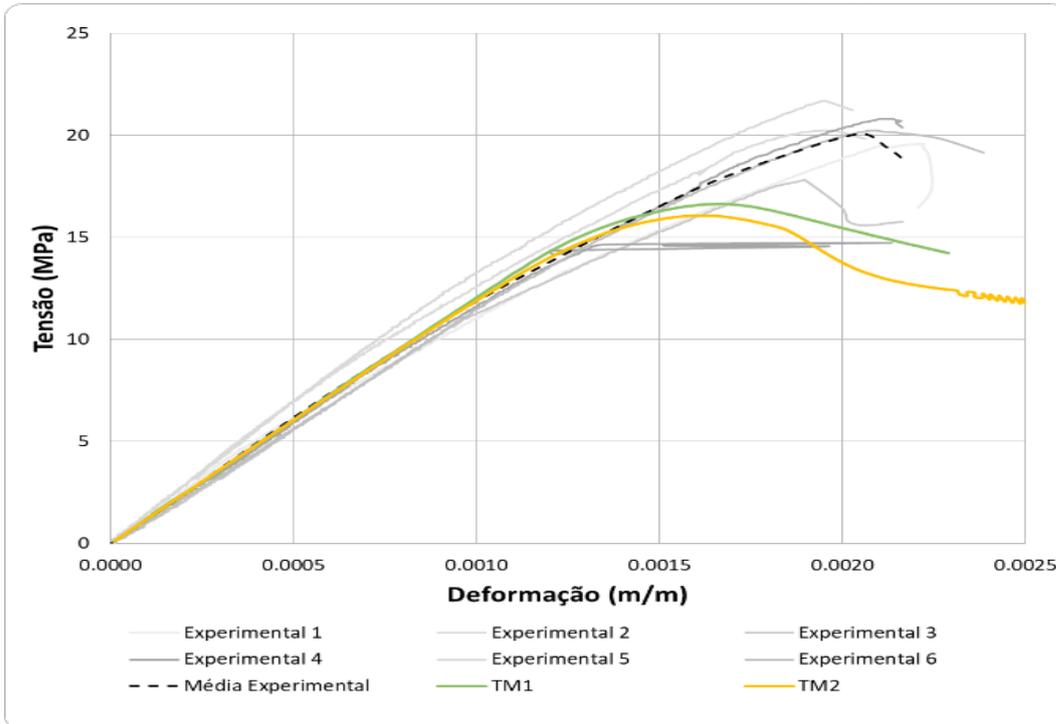
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela A.3 – Comparativo quanto à variação de tensão e deformação devido à variação do σ_{b0}/σ_{c0} para as pequenas paredes.

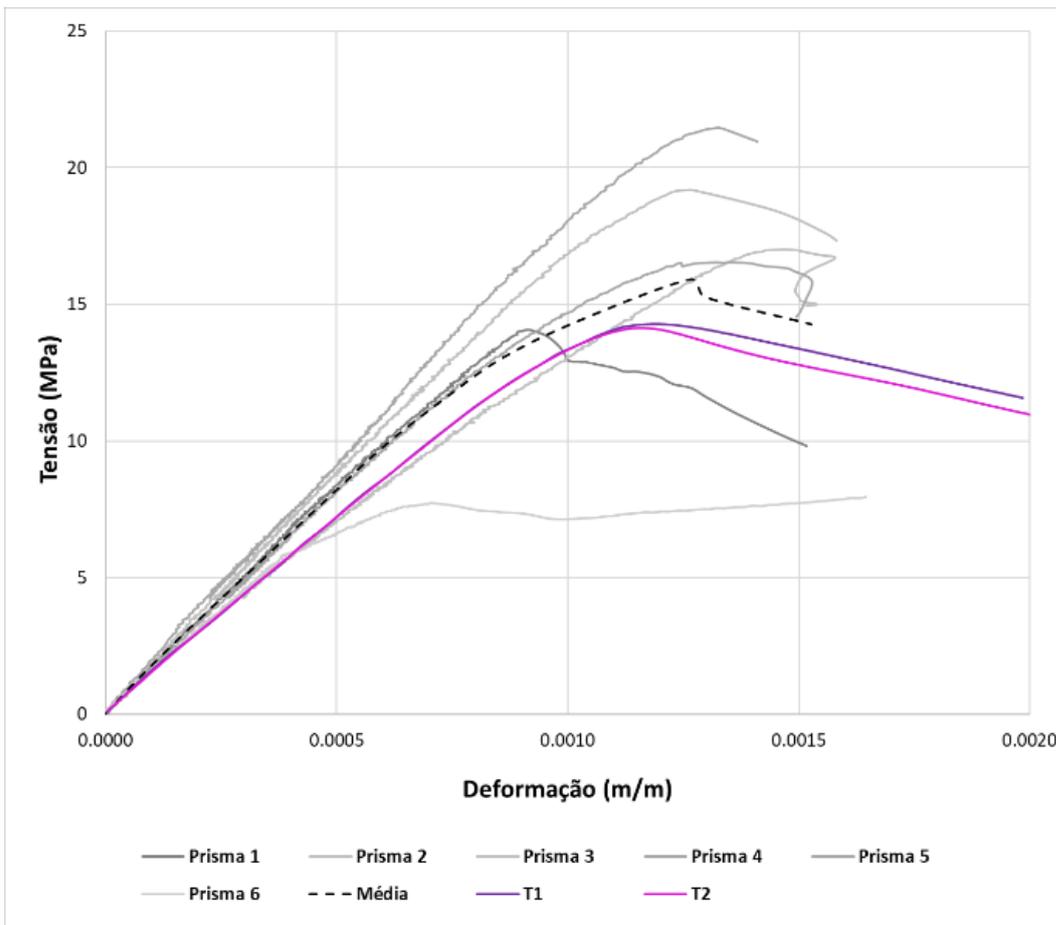
Análise	fb0/fc0		Variação quanto à tensão (%)		Variação quanto à deformação (%)	
	Cer.	Arg.	Mac.	Vaz.	Mac.	Vaz.
T1	1,4	1,4	11,1	-22,0	11,0	-0,2
T2	1,14	1,4	13,2	-22,0	11,4	-0,2

Fonte: Elaborada pela autora.

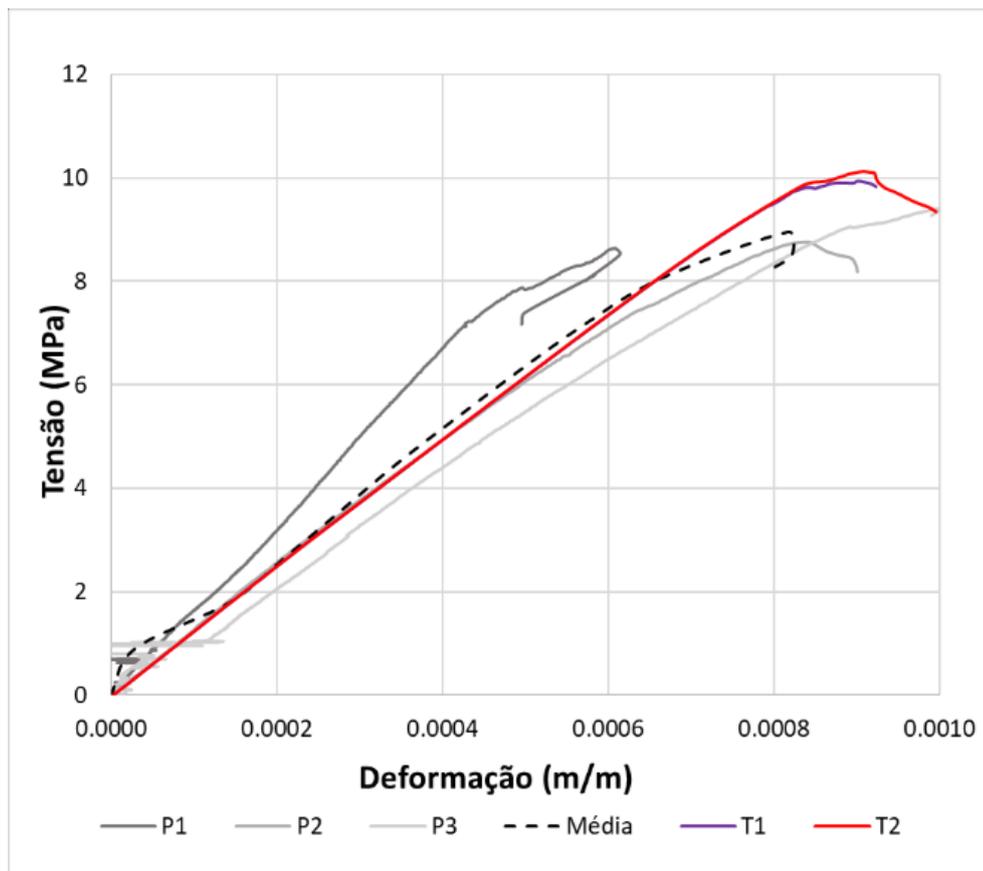
Figura A.2 – Comparativo quanto à variação do parâmetro σ_{b0}/σ_{c0} .



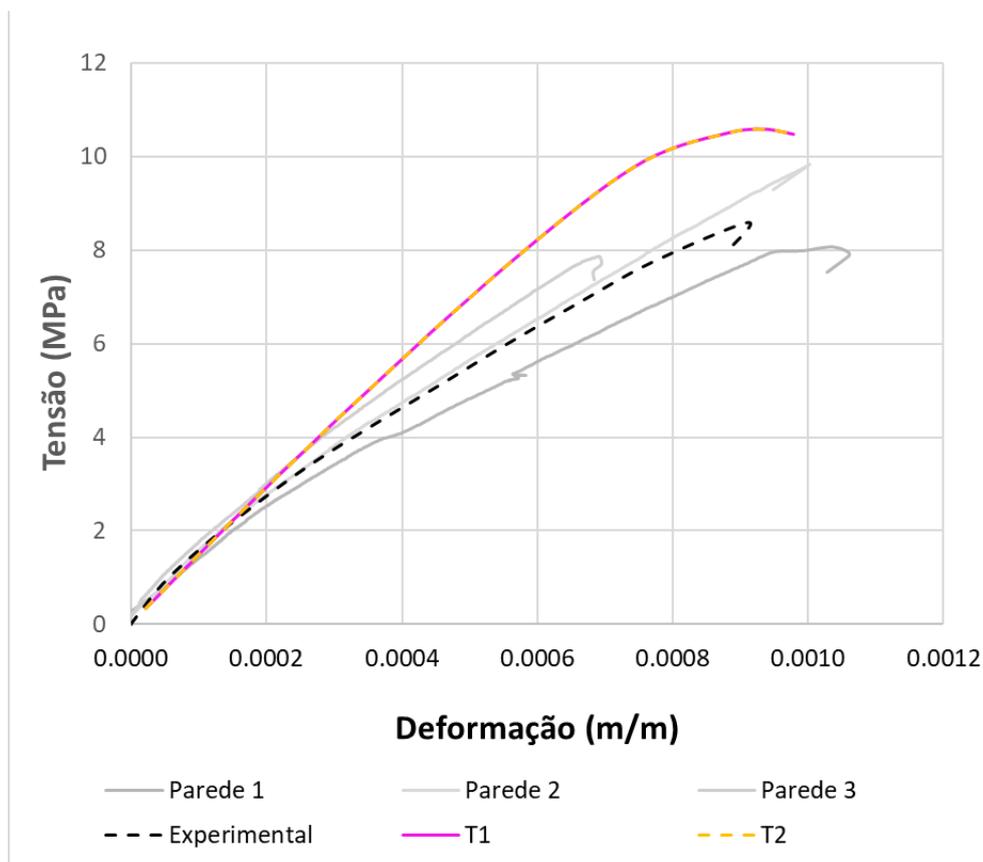
(a) Prisma com bloco de paredes maciças.



(b) Prisma com bloco de paredes vazadas.



(c) Pequena parede com bloco de paredes maciças.



(d) Pequena parede com bloco de paredes vazadas.
Fonte: Elaborada pela autora.

Observou-se que para os modelos com o valor de 1,4 para σ_{b0}/σ_{c0} , o comportamento da rigidez da estrutura ficou mais próximo ao experimental para os prismas, já para as pequenas paredes, o resultado não apresentou diferenças significativas. Adotou-se, assim, o valor de 1,4 para todas as modelagens deste trabalho.

Considerando os modos de ruptura dos elementos, em que para os prismas há maior confinamento entre os materiais, a cerâmica fica submetida a maiores tensões de compressão biaxiais (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014), e, portanto, nota-se uma influência maior desse parâmetro nos prismas, especialmente no com blocos de paredes maciças. Contudo, uma vez que o modo de ruptura da alvenaria estrutural se dá majoritariamente por tensões de tração nos blocos, infere-se que esse parâmetro possui menor representatividade na calibração dos modelos.

A.3 Análise do módulo de elasticidade da placa

Com o intuito de simular as condições de contorno e carregamento presentes nos ensaios experimentais, incorporaram-se placas de reação nos modelos. Para a definição da propriedade elástica desse componente, avaliou-se a variação do módulo de elasticidade das placas nas configurações simuladas.

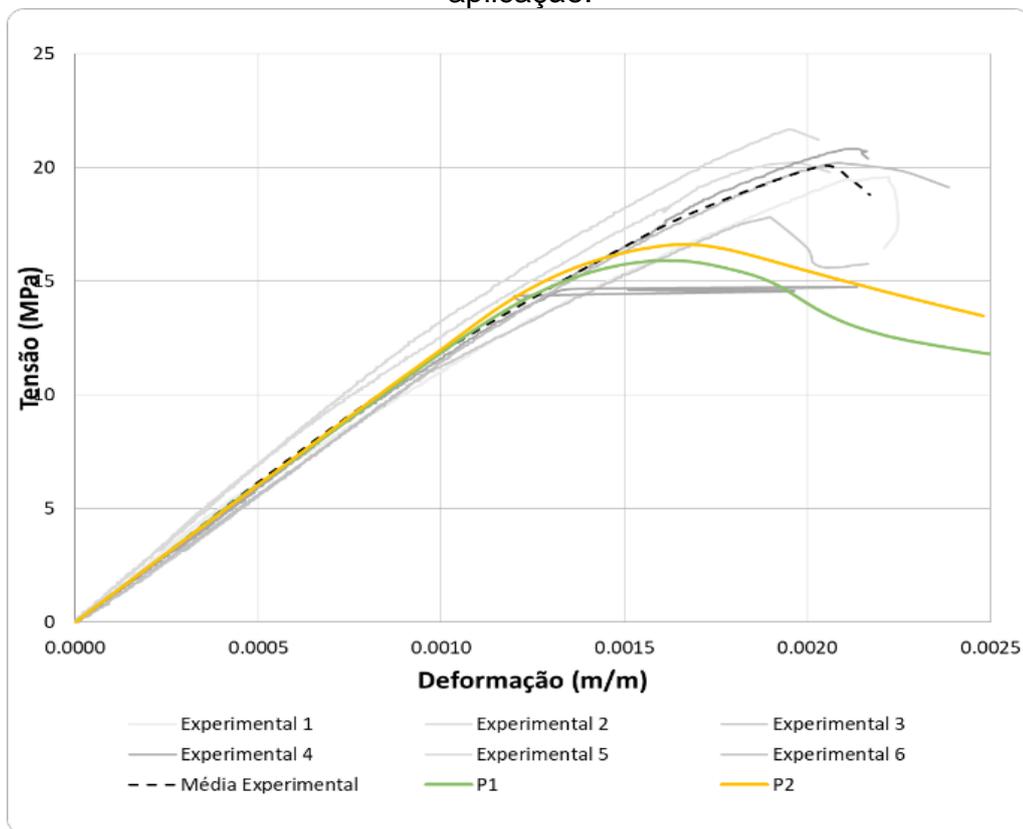
O valor inicial para a simulação foi de 210 GPa, representando uma chapa metálica, na ordem de 10 vezes o módulo de elasticidade dos blocos cerâmicos, simulando maior rigidez das placas do equipamento. Para a análise, o valor foi multiplicado por 100, para verificação da sua influência no comportamento das estruturas. Os resultados são apresentados na Tabela A.4 e na Figura A.3.

Tabela A.4 – Comparativo da variação da tensão e da deformação na ruptura, devido à variação do módulo de elasticidade da placa de aplicação de carga.

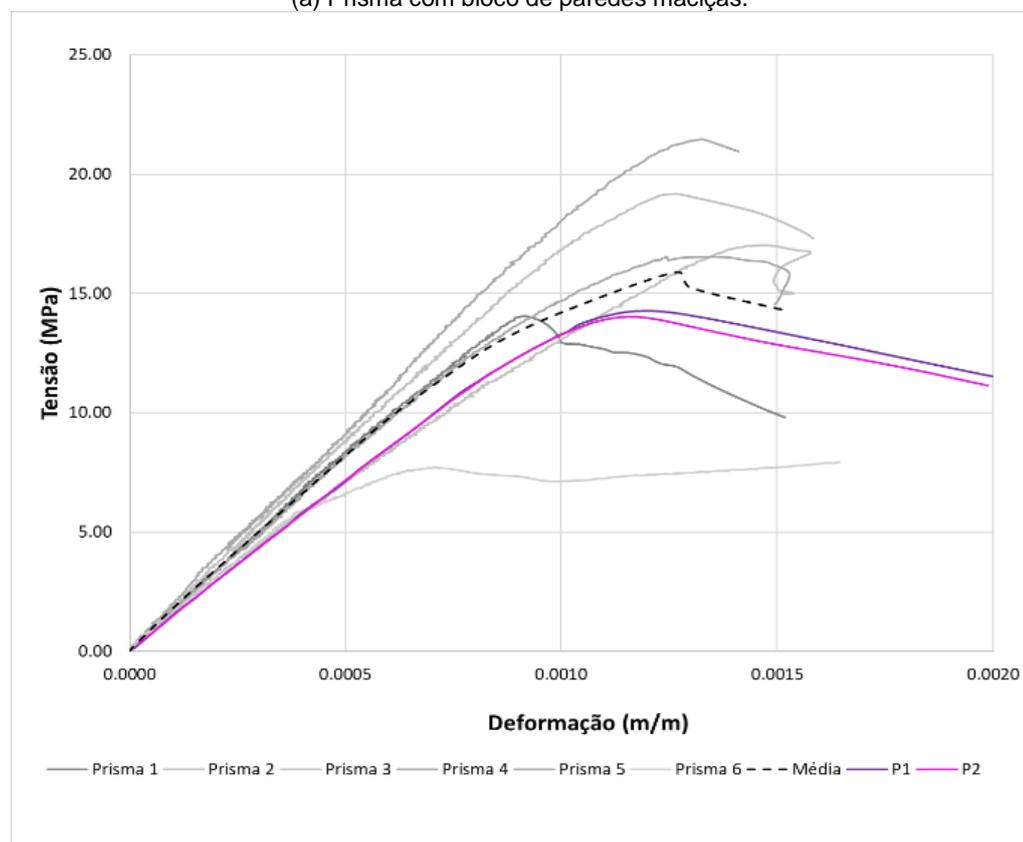
Análise	Elemento estrutural	Módulo de elasticidade (GPa)	Variação quanto à tensão (%)		Variação quanto à deformação (%)	
			Mac.	Vaz.	Mac.	Vaz.
P1	Prisma	210	-20,5	-9,9	-20,7	-6,2
P2	Prisma	21.000	-17,1	-11,4	-17,5	-9,4
PP1	P. Parede	210	11,1	22,0	11,0	0,2
PP2	P. Parede	21.000	-11,3	23,3	10,4	0,2

Fonte: Elaborada pela autora.

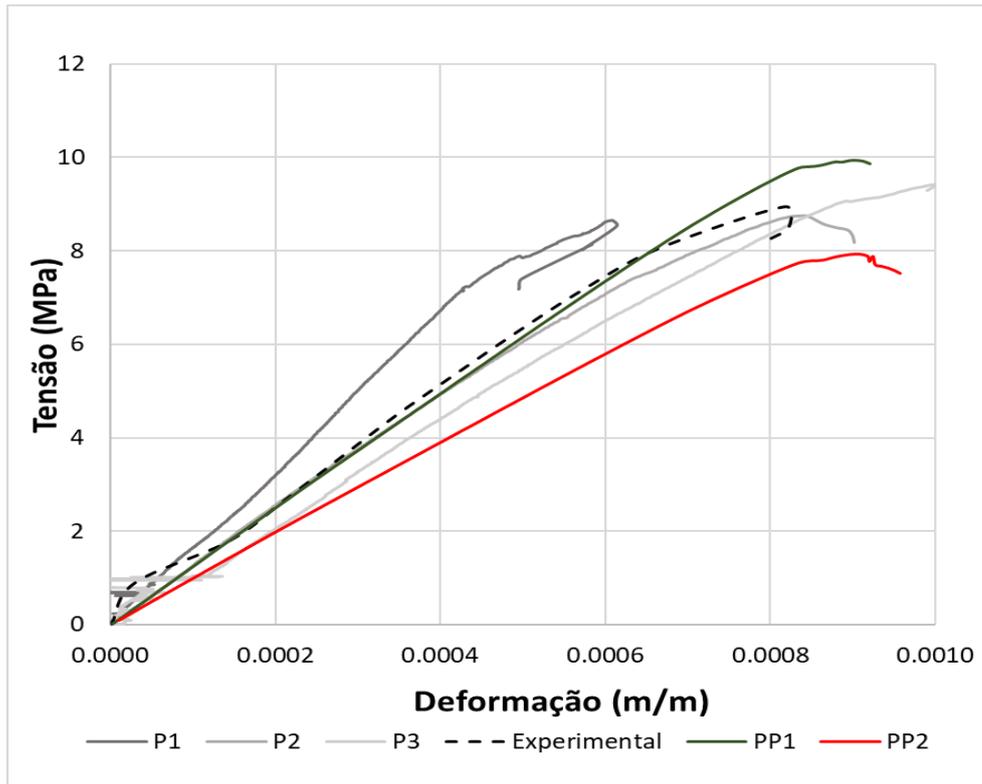
Figura A.3 – Comparativo quanto à variação do módulo de elasticidade da placa de aplicação.



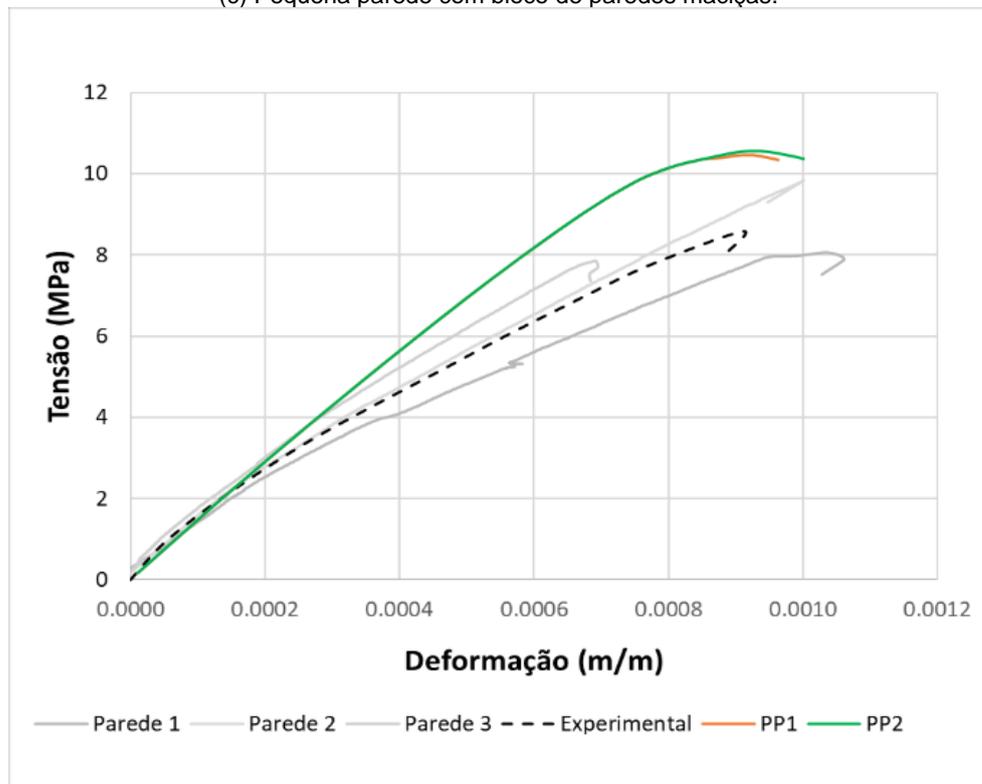
(a) Prisma com bloco de paredes maciças.



(b) Prisma com bloco de paredes vazadas.



(c) Pequena parede com bloco de paredes maciças.

(d) Pequena parede com bloco de paredes vazadas.
Fonte: Elaborada pela autora.

Para todos os casos, a placa com menor rigidez teve maior aproximação dos resultados experimentais, quanto ao módulo de elasticidade, à estrutura e ao comportamento pós-pico. Optou-se, então, por adotar 210GPa para o módulo de

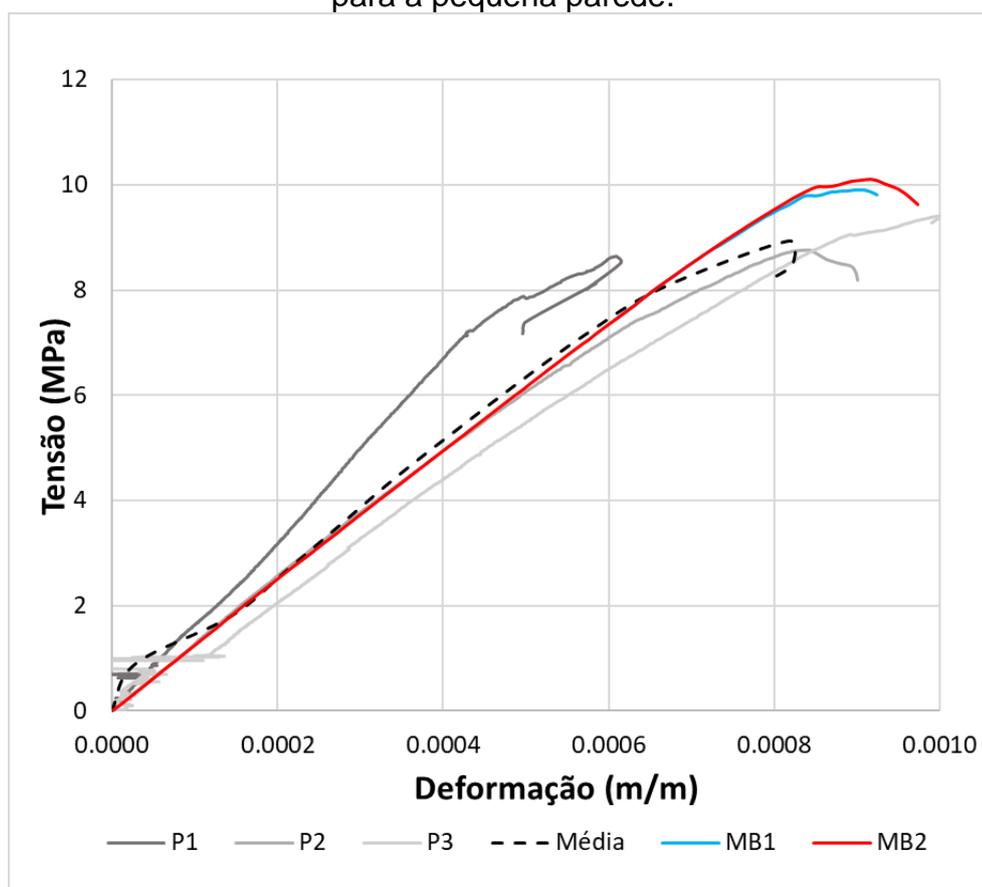
elasticidade da placa de aplicação de carga, por entender que possui maior proximidade à realidade do ensaio.

A.4 Análise da consideração de modelo constitutivo para meio bloco

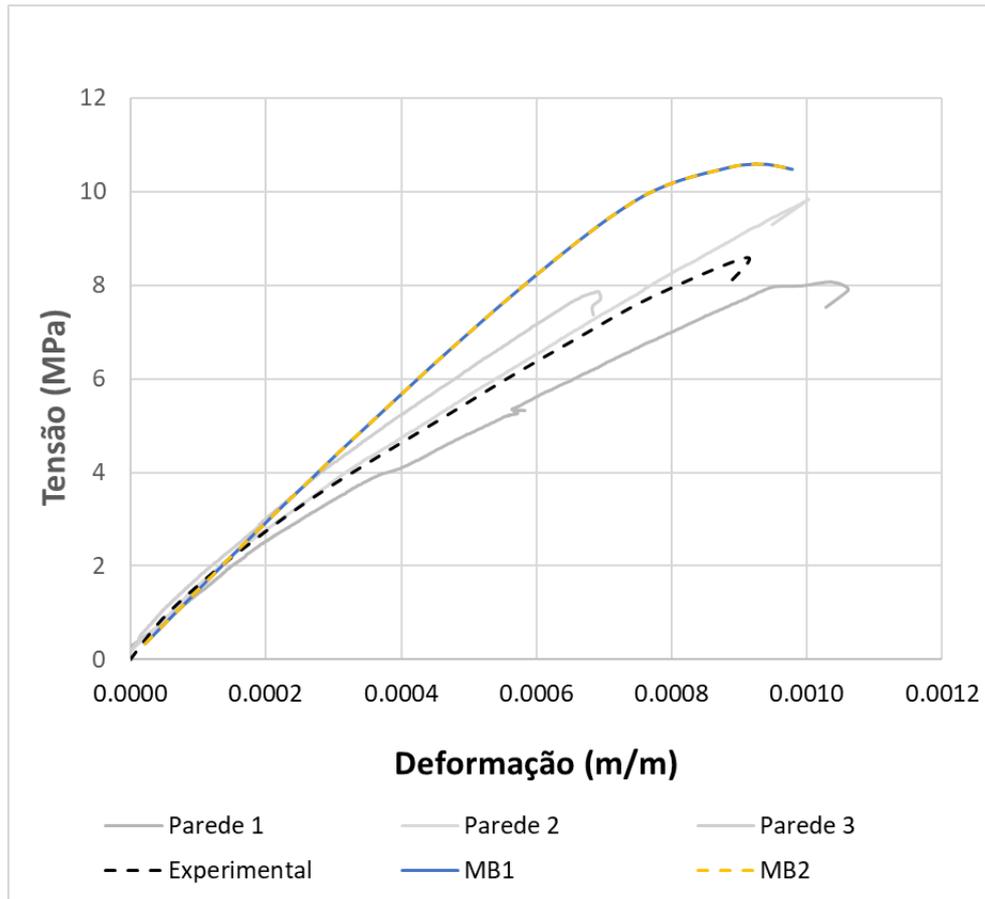
Uma vez que, no trabalho de referência para os modelos mecânicos, ensaiaram-se tanto os blocos como os meios-blocos sob tração e compressão, buscou-se comparar a variação do modelo de pequena parede, considerando a validação de um material único para o bloco e o meio-bloco versus cada unidade com sua propriedade experimental ajustada para modelo de plasticidade do Abaqus, conforme metodologia discutida no item 4.5.

Os resultados são apresentados na Figura A.4 e na Tabela A.5.

Figura A.4 – Comparativo quanto à consideração da propriedade dos meio blocos para a pequena parede.



(a) Pequena parede com bloco de paredes maciças.



(b) Pequena parede com bloco de paredes vazadas.
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela A.5 – Comparativo da variação da tensão e da deformação na ruptura da pequena parede, devido à consideração da propriedade do meio bloco.

Análise	Consideração das propriedades dos meio- blocos	Variação quanto à tensão (%)		Variação quanto à deformação (%)	
		Mac.	Vaz.	Mac.	Vaz.
MB1	Não	11,1	22,0	11,0	0,2
MB2	Sim	13,4	22,0	12,2	0,2

Fonte: Elaborada pela autora.

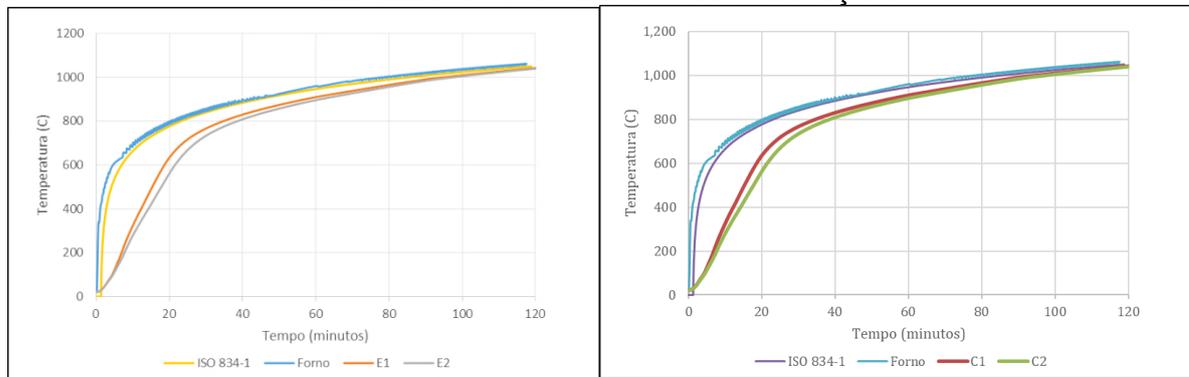
Observou-se grande proximidade entre os resultados com a variação da consideração analisada. Uma vez que o modelo CDP é configurado considerando o material e os blocos e meios-blocos pertenciam ao mesmo lote e fabricantes, com geometrias similares quanto ao tamanho dos septos e vazados, acredita-se que um modelo único do comportamento mecânico para a cerâmica por tipo de bloco é considerado representativo e simplifica o seu uso, especialmente considerando a análise de modelagens termomecânicas. Assim, optou-se pela não consideração de propriedades distintas para os blocos e meios-blocos.

A.5 Análise da emissividade e constante de convecção

Os valores de emissividade e constante de convecção foram variados com o intuito de verificar a coerência dos modelos inicialmente idealizados. Analisou-se o ponto centralizado no topo da face externa do bloco, onde houve a representação da radiação e convecção.

Na Figura A.5, vê-se a variação da temperatura, considerando a variação da emissividade e do coeficiente de convecção.

Figura A.5 – Comparativo de evolução de temperatura quanto à variação da emissividade e coeficiente de convecção.



(a) Variação da emissividade.

(b) Variação do coeficiente de convecção.

Fonte: Elaborada pela autora.

Na análise “E1” considerou-se a emissividade de 0,95, valor recomendado pela norma brasileira (ABNT, 2005b) para materiais cerâmicos, enquanto que na análise “E2” adotou-se 0,70, recomendação da mesma norma para o concreto. De forma coerente, com a redução da emissividade, ocorre menor absorção de calor, o que diminui a temperatura na face. Já quanto à convecção, a análise “C1” refere-se ao modelo com coeficiente de convecção de 25 W/(m².K), enquanto “C2” apresenta o valor de 4 W/(m².K). Com a diminuição do coeficiente, ocorre menor temperatura na face, o que é coerente, uma vez que o fluxo de calor é menor. Esses valores são recomendados, respectivamente, para superfícies em situação de incêndio e paredes expostas à temperatura ambiente.

Entende-se que o modelo comportou conforme o esperado e que, embora os resultados tenham sido bem próximos, observa-se que esses parâmetros influenciam a condução do calor em toda a estrutura, nota-se que a diferença principal ocorre após o modelo atingir 100°C, que é quando a cerâmica possui o pico de calor específico.

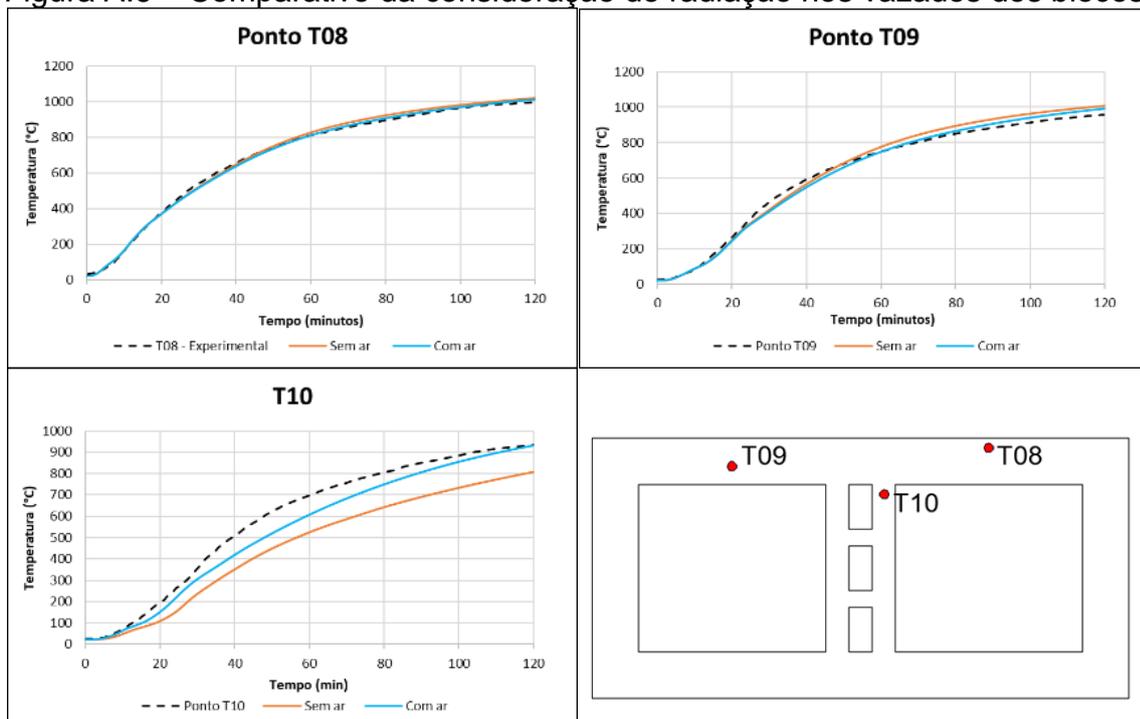
Logo se entende que menores coeficientes de convecção e emissividade significariam menor transferência de calor para a estrutura.

Portanto, adotaram-se os valores de 0,95 e 25 W/(m²K) para a emissividade e coeficiente de convecção, respectivamente, respeitando os valores sugeridos pela norma brasileira (ABNT, 2005b) e observando-se maior representatividade com os resultados experimentais das temperaturas medidas nas faces externas dos elementos.

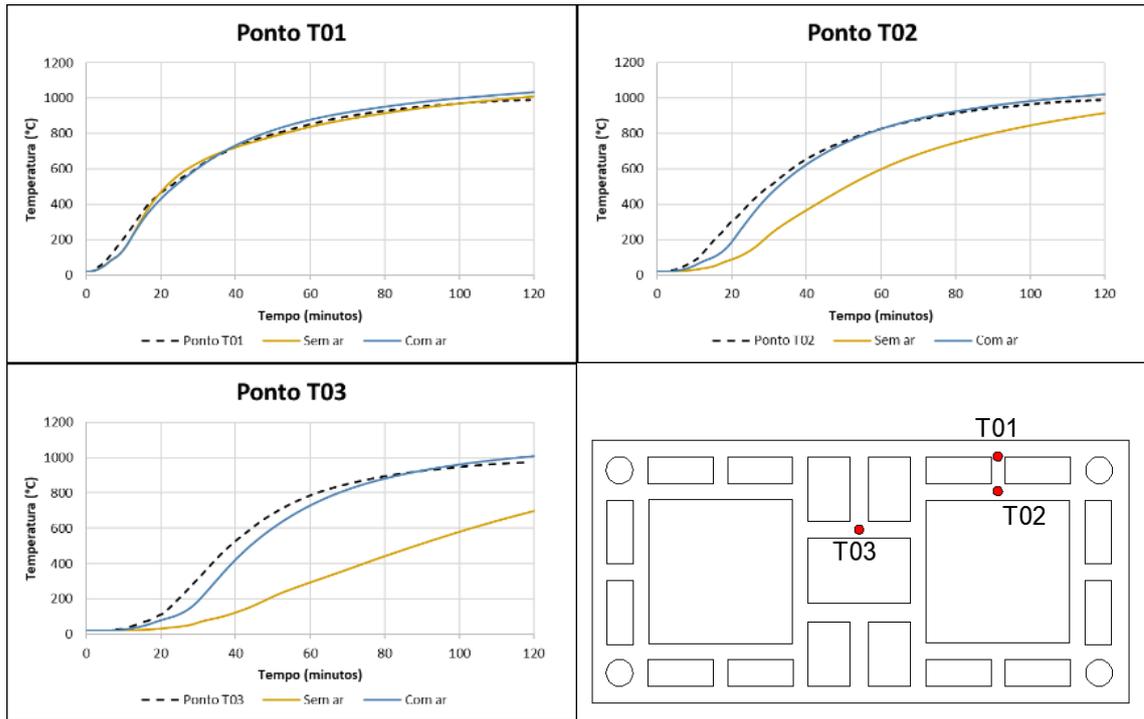
A.6 Análise da consideração de radiação nos vazados dos blocos

Considerando que, nos resultados experimentais, não foram medidos os valores de temperatura dos gases no interior dos vazados, propôs-se a representação da radiação por meio da interação *cavity radiation*, disponível no software Abaqus, que considera a emissividade entre as faces de vazados fechados. Na Figura A.6, apresenta-se a comparação da evolução de temperatura para os prismas e pequenas paredes avaliados, sendo que as curvas em laranja apresentam os modelos sem a consideração de radiação nos vazados (sem ar) e as curvas em azul com a consideração de radiação nos vazados (com ar).

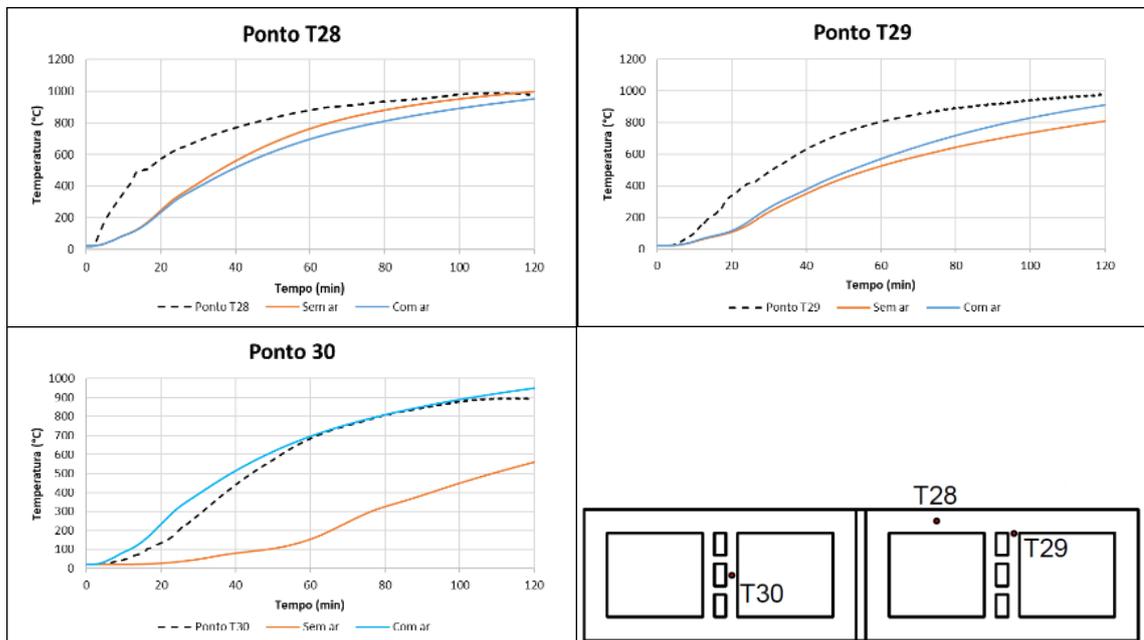
Figura A.6 – Comparativo da consideração de radiação nos vazados dos blocos.



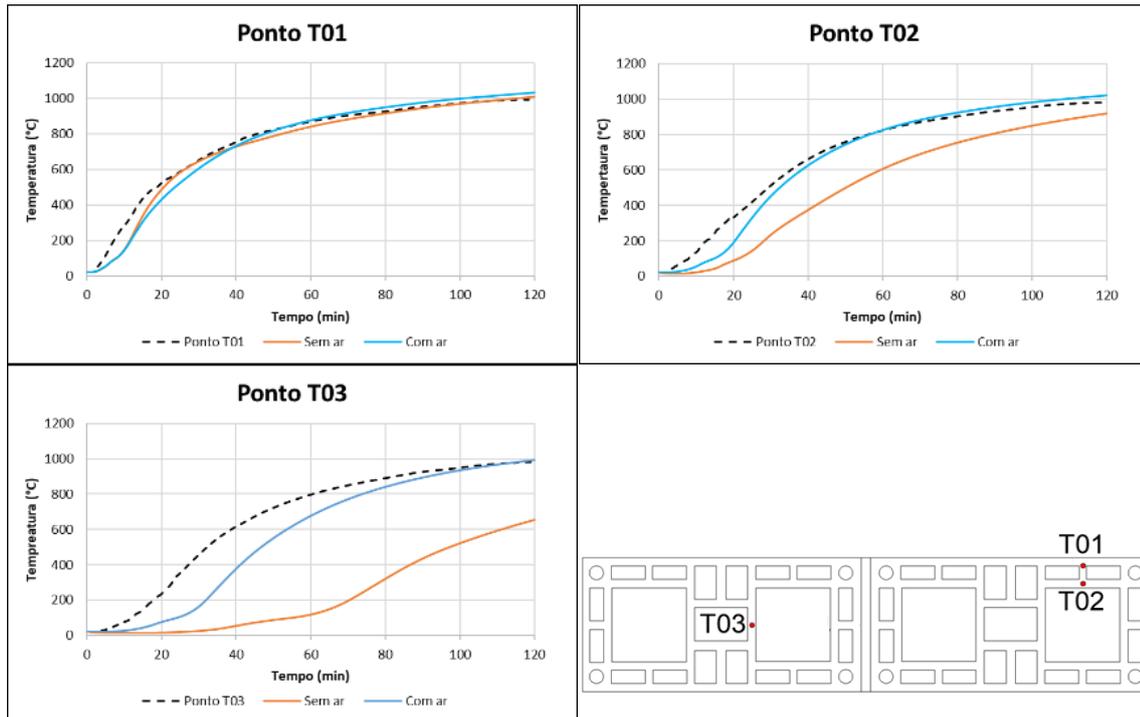
(a) Prisma de blocos de paredes maciças.



(b) Prisma de blocos de paredes vazadas.



(c) Pequenas paredes de blocos de paredes maciças.



(d) Pequenas paredes de blocos de paredes vazadas.
Fonte: Elaborada pela autora.

Percebe-se, assim, o aumento da temperatura nas cavidades dos blocos, quando incluída a radiação nos vazados, o que é coerente, pois, nos resultados, demonstra-se grande influência nos modelos para os pontos mais internos das estruturas. Bem como, os elementos de paredes vazadas, por possuírem maior número de aberturas, foram mais afetadas pela consideração ou não desse mecanismo de transferência de calor.

Com a inclusão da radiação nos vazados, obteve-se menor eficiência computacional, com o dobro de tempo de processamento. Para as pequenas paredes de bloco de paredes vazadas, aumentou-se 2,5 vezes o tempo de processamento. Contudo, percebeu-se a melhor representatividade das temperaturas nas paredes internas dos elementos, com o uso dessa interação, pela qual se optou, portanto, considerando-a na metodologia deste trabalho.

