

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO
DE BLOCOS EXTRUDADOS, PENSADOS E QUEIMADOS DE
CERÂMICA VERMELHA SOB AÇÕES TERMOESTRUTURAIS**

JONATHAN DE ANDRADE PAULA MADALENA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
FEVEREIRO DE 2025**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO
DE BLOCOS EXTRUDADOS, PENSADOS E QUEIMADOS DE
CERÂMICA VERMELHA SOB AÇÕES TERMOESTRUTURAIS**

JONATHAN DE ANDRADE PAULA MADALENA

Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro, como parte das exigências para
a obtenção de título de Mestre em
Engenharia Civil.

ORIENTADOR: D.Sc. NIANDER AGUIAR CERQUEIRA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO – UENF**

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

FEVEREIRO DE 2025

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE
BLOCOS EXTRUDADOS, PENSADOS E QUEIMADOS DE
CERÂMICA VERMELHA SOB AÇÕES TERMOESTRUTURAIS

JONATHAN DE ANDRADE PAULA MADALENA

Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro, como parte das exigências para
a obtenção de título de Mestre em
Engenharia Civil.

Aprovado em 27 de fevereiro de 2025.

Comissão Examinadora:

Prof. Leonardo Gonçalves Pedroti (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) – UFV

Prof. Vânia José Karam (D.Sc., Engenharia Civil) – UENF

Prof. Afonso Rangel Garcez de Azevedo (D.Sc., Engenharia Civil) – UENF

Prof. Niander Aguiar Cerqueira (D.Sc., Engenharia Civil) – UENF
Orientador

*Dedico esta vitória a Deus, aos meus pais e à
minha esposa que sempre me apoiaram.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, saúde e discernimento para superar os desafios ao longo desta jornada.

Aos meus pais, pelo ensino, dedicação e amor incondicional, que foram fundamentais para minha formação pessoal e acadêmica.

Aos meus irmãos, pelo apoio e incentivo constantes, que me deram forças para seguir adiante.

À cerâmica Artecerâmica Sardinha, pela valiosa doação de materiais, tornando possível a realização dos ensaios experimentais desta pesquisa.

Aos técnicos e bolsistas do LECIV/UENF, pelo suporte e dedicação durante as etapas experimentais.

Aos técnicos do LAMAV/UENF, pelo auxílio prestado nas análises e discussões técnicas que enriqueceram esta pesquisa.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), em especial ao amigo D.Sc. Leonardo Gonçalves Pedroti, cujo apoio foi fundamental na realização dos ensaios térmicos. Ao D.Sc. Gustavo Lima, da UFV, pelo suporte técnico e científico durante os ensaios.

Aos alunos de Pós-Graduação e técnicos da UFV, pela ajuda fundamental na operação e uso dos equipamentos da universidade, contribuindo significativamente para os resultados obtidos.

Ao meu amigo e orientador D.Sc. Niander Cerqueira Aguiar por todo apoio e dedicação à concretização deste trabalho.

Ao Alessandro Rolin pelo suporte técnico na modelagem numérica no *software ANSYS*.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, possibilitando a realização desta pesquisa.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), por meio do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV), pela estrutura e recursos disponibilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, meu agradecimento especial à minha esposa – Daiara Caetano Alves Madalena – que esteve ao meu lado em todos os momentos, oferecendo amor, apoio emocional e compartilhando comigo todas as dificuldades e alegrias desta caminhada. Sua presença e apoio foram essenciais para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVOS.....	21
1.1.1 Objetivo Geral.....	21
1.1.2 Objetivos Específicos.....	21
1.2 JUSTIFICATIVAS.....	22
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 CERÂMICA VERMELHA.....	25
2.2. ALVENARIA ESTRUTURAL.....	28
2.2.1 Componentes Empregados na Alvenaria Estrutural.....	30
2.2.2 Prismas e Pequenas Paredes.....	31
2.2.3 Deformação e Fratura em Alvenaria Estrutural.....	33
2.3 INCÊNDIO.....	35
2.3.1 Modos de Propagação ou Transferência de calor.....	38
2.3.1.1 Condução.....	39
2.3.1.2 Convecção.....	41
2.3.1.3 Radiação.....	42
2.3.2 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).....	45
2.4 ANÁLISE TERMOESTRUTURAL.....	46
2.5 ANÁLISE TÉRMICA.....	50
2.6 MODELAGEM NUMÉRICA.....	51

3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1 ASPECTOS GERAIS.....	59
3.1.1 Preparo da Matéria-prima.....	60
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	62
3.2.1 Caracterização física.....	62
3.2.2 Análise Química.....	63
3.2.3 Análise Mineralógica.....	64
3.2.3 Quantitativo de corpos de prova.....	65
3.2.4 Análise Térmica.....	66
3.2.5 Análise Termoestrutural.....	68
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS.....	70
3.3.1 Propriedades Geométricas dos Blocos.....	70
3.3.2 Propriedades Tecnológicas dos Blocos.....	71
3.3.2.1 Absorção de Água (AA).....	71
3.3.2.2 Massa Específica Aparente (MEA).....	72
3.3.2.4 Resistência Característica à Compressão de Bloco (f_{bk}).....	72
3.3.2.5 Módulo de Deformação dos Blocos.....	74
3.4 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PRISMAS.....	74
3.4.1 Resistência à Compressão de Prismas (f_{pk}).....	75
3.4.2 Módulo de Deformação e o Coeficiente de <i>Poisson</i> dos Prismas	76
3.5 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PEQUENAS PAREDES.....	76
3.5.1 Resistência à Compressão de Pequenas Paredes (f_{ppk}).....	76
3.5.2 Módulo de Deformação e Coeficiente de <i>Poisson</i> de Pequenas Paredes.....	77
3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	78
3.7 SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	78

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
4.1 MATÉRIA-PRIMA – ARGILA.....	81
4.1.1 Caracterização física.....	82
4.1.2 Compactação Proctor Normal.....	83
4.1.3 Análise Química.....	85
4.1.4 Análise Mineralógica.....	91
4.1.4 Análise Térmica.....	94
4.1.4.1 Condutividade e Efusividade Térmica.....	97
4.1.5 Análise Termoestrutural.....	98
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS.....	101
4.2.1 Dimensões dos blocos.....	101
4.2.2 Propriedades Tecnológicas dos Blocos.....	102
4.2.3 Resistência à Compressão dos Blocos.....	103
4.2.4 Parâmetros de Elasticidade dos Blocos.....	103
4.3 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS PRISMAS.....	104
4.3.1 Resistência à Compressão de Prismas (f_{pk}).....	104
4.3.2 Parâmetros de Elasticidade dos Prismas.....	104
4.3.3 Fator de eficiência dos Prismas (η_p).....	105
4.4 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DAS PEQUENAS PAREDES.....	105
4.4.1 Resistência à Compressão das Pequenas Paredes (f_{ppk}).....	105
4.4.2 Parâmetros de Elasticidade das Pequenas Paredes.....	106
4.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	106
4.5.1 Propriedades Mecânicas e Térmicas.....	107
4.5.2 Modelagem Numérica dos Prismas.....	107
4.5.3 Condição de Contorno dos Prismas.....	108

4.6 DISCUSSÃO COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS.....	114
5. CONCLUSÃO.....	116
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
APÊNDICE.....	129
Apêndice 1 – BLOCOS CERÂMICOS.....	129
1.1 Características Geométricas dos Blocos.....	129
1.2 – Absorção de Água dos Blocos.....	129
1.3 – Massa Específica Aparente dos Blocos.....	130
1.4 – Resistência à Compressão dos Blocos.....	130
Apêndice 2 – ANÁLISE TERMOESTRUTURAL DOS PRISMAS DE 5 FIADAS.....	131
Apêndice 3 – COMPRESSÃO DOS PRISMAS EM TEMPERATURA AMBIENTE.....	135
Apêndice 4 – PEQUENAS PAREDES.....	136
Apêndice 5 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	138
5.1 – Contato entre os Blocos.....	138
5.2 – Deformação dos Prismas.....	144
Apêndice 6 – CONDUTIVIDADE E EFUSIVIDADE TÉRMICA.....	146
6.1 – Resultados dos Ensaios.....	146

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AA	Absorção de Água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Termogravimétrica
BCEPQ	Bloco Cerâmico Extrudados, Prensados e Queimados
CBMERJ	Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro
CPV/ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DRX	Difração de Raios X
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICTAC	International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry
ISO	International Organization for Standardization
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançado
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
MEA	Massa Específica Aparente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NFPA	National Fire Protection Association
NT	Nota Técnica
PIA	Pesquisa Industrial Anual
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
UFV	Universidade Federal de Viçosa

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bloco cerâmico de vedação com furos na vertical e horizontal NBR 15.270-1 (ABNT, 2023).....	27
Figura 2 – Bloco cerâmico estrutural: NBR 15.270-1 (ABNT, 2023).....	27
Figura 3 – Pirâmides de Guizé (Portugal Mundial, 2016).....	28
Figura 4 – Modelos de prismas empregados (Santos, 2008).....	31
Figura 5 – Modelo de pequena parede (Cerqueira, 2017).....	32
Figura 6 – Modelo adotado por Hilsdorf (Nessralla, 2013).....	33
Figura 7 – Tetraedro do fogo (Seito <i>et al.</i> , 2008).....	35
Figura 8 – Fases de um incêndio real (Seito <i>et al.</i> , 2008).....	36
Figura 9 – Mecanismos de transferência de calor durante o incêndio.....	38
Figura 10 – Mecanismos de transferência de calor durante o incêndio (Rodvalho, 2018).....	38
Figura 11 – Fluxo de calor radiante (Seito <i>et al.</i> , 2008).....	41
Figura 12 – Faixas de radiações eletromagnéticas (Araújo, 2013).....	42
Figura 13 – Radiação incidente sobre uma superfície (Drysdale, 1998, apud Rodvalho, 2018).....	43
Figura 14 – Conceito de Tempo Equivalente ou TRRF (Seito <i>et al.</i> , 2008).....	45
Figura 15 – Deslocamentos e Deformações em Y – Parede 1 (Garcia, 2000).....	54
Figura 16 – Tensões em Y e Tensões Principais S3 – Parede 1 (Garcia, 2000)....	54
Figura 17 – Deslocamentos e Deformações em Y – Parede 2 (Garcia, 2000).....	55
Figura 18 – Tensões em Y e Tensões Principais S3 – Parede 2 (Garcia, 2000)....	55

Figura 19 – Deslocamentos e Deformações – Parede 3 (Garcia, 2000).....	56
Figura 20 – Tensões em Y e Tensões Principais S3 – Parede 3 (Garcia, 2000)....	56
Figura 21 – Deslocamentos e Deformações – Parede 4 (Garcia, 2000).....	57
Figura 22 – Tensões em Y e Tensões Principais S3 – Parede 4 (Garcia, 2000)....	57
Figura 23 – Fluxograma do Preparo da Matéria-prima (Autoria própria, 2025).....	58
Figura 24 – Secagem das Amostras (Autoria própria, 2024).....	60
Figura 25 – Equipamento <i>TESCAN MIRA</i> do LAMAV/UENF.....	63
Figura 26 – Equipamento <i>AXRD BENCHTOP</i> (LAMAV/UENF, 2025).....	64
Figura 27 – Equipamento <i>C-THERM</i> do Laboratório de Física do CCT/UENF (Autoria própria, 2024).....	66
Figura 28 – Esquema do Forno Elétrico Utilizado na Pesquisa (UFV, 2024).....	68
Figura 29 – Forno Elétrico <i>ALDIEN</i> da UFV (Autoria própria, 2024).....	68
Figura 30 – Dimensões dos Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2024).....	70
Figura 31 – Blocos capeados (Autoria própria, 2024).....	72
Figura 32 – Prensa <i>SOLOTEST</i> (Autoria própria, 2024).....	72
Figura 33 – Montagem dos prismas (Autoria própria, 2024).....	74
Figura 34 – Pequenas Paredes (Autoria própria, 2024).....	76
Figura 35 – Limite de Liquidez (Autoria própria, 2025).....	81
Figura 36 – Gráfico do Ensaio de Compactação (Autoria própria, 2025).....	83
Figura 37 – Mapa <i>Spectron</i> da Temperatura de 30°C (Autoria própria, 2025).....	84
Figura 38 – Mapa <i>Spectron</i> da Temperatura de 600°C (Autoria própria, 2025).....	85
Figura 39 – Mapa <i>Spectron</i> da Temperatura de 800°C (Autoria própria, 2025).....	86

Figura 40 – Mapa <i>Spectron</i> da Temperatura de 1000°C (Autoria própria, 2025)....	88
Figura 41 – Difratomogramas das Amostras (Autoria própria, 2025).....	90
Figura 42 – Curva Massa Residual x Taxa de Perda de Massa (Autoria própria, 2025).....	94
Figura 43 – Resultados do Ensaio de Condutividade e Efusividade Térmica (Autoria própria, 2024).....	96
Figura 44 – Ruptura do Prisma 1 na Temperatura de 30°C (Autoria própria, 2024).	97
Figura 45 – Ruptura do Prisma 2 na Temperatura de 600°C (Autoria própria, 2024).	98
Figura 46 – Ruptura do Prisma 3 na Temperatura de 800°C (Autoria própria, 2024).	98
Figura 47 – Ruptura do Prisma 4 na Temperatura de 1000°C (Autoria própria, 2024).....	98
Figura 48 – Disposição da Malha dos Prismas 1, 2, 3 e 4 (Autoria própria, 2025).	107
Figura 49 – Condição de Contorno (<i>No Separation</i>) a 30°C (Autoria própria, 2025).	109
Figura 50 – Condição de Contorno (<i>No Separation</i>) a 600°C (Autoria própria, 2025).	109
Figura 51 – Condição de Contorno (<i>No Separation</i>) a 800°C (Autoria própria, 2025).	110
Figura 52 – Condição de Contorno (<i>No Separation</i>) a 1000°C (Autoria própria, 2025).....	110
Figura 53 – Condição de Contorno <i>Frictional Contact</i> (Autoria própria, 2025).....	110
Figura 54 – Temperatura do Prisma 2: 600°C (Autoria própria, 2025).....	111

Figura 55 – Temperatura do Prisma 3: 800°C (Autoria própria, 2025).....	111
Figura 56 – Temperatura do Prisma 4: 1000°C (Autoria própria, 2025).....	112
Figura 57 – Ruptura do Prisma 1 na UFV – Temperatura de 30°C (Autoria própria, 2024).....	130
Figura 58 – Ruptura do Prisma 2 na UFV – Temperatura de 600°C (Autoria própria, 2024).....	131
Figura 59 – Ruptura do Prisma 3 na UFV – Temperatura de 800°C (Autoria própria, 2024).....	132
Figura 60 – Ruptura do Prisma 4 na UFV – Temperatura de 1000°C (Autoria própria, 2024).....	133
Figura 61 – Ruptura dos Prismas no LECIV/UENF (Autoria própria, 2024).....	134
Figura 62 – Ruptura das Pequenas Paredes LECIV/UENF (Autoria própria, 2024).	135
Figura 63 – Ruptura das Pequenas Paredes LECIV/UENF (Autoria própria, 2024).	136
Figura 64 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).....	137
Figura 65 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).....	138
Figura 66 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).....	139
Figura 67 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).....	140
Figura 68 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).....	141
Figura 69 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).....	142
Figura 70 – Deformação do Prisma 1: 30°C (Autoria própria, 2025).....	143
Figura 71 – Deformação do Prisma 2: 600°C (Autoria própria, 2025).....	143
Figura 72 – Deformação do Prisma 3: 800°C (Autoria própria, 2025).....	143

Figura 73 – Deformação do Prisma 4: 1000°C (Autoria própria, 2025).....144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes das Atividades Industriais e Produtos – Prodlis 2016 a 2019 (IBGE – Pesquisa Industrial Anual – Produto).....	25
Tabela 2 – Valores de eficiência para o material cerâmico (Ramalho e Corrêa, 2003).....	32
Tabela 3 – Tonalidades visíveis de objetos aquecidos (Drysdale, 1998).....	43
Tabela 4 – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF): NBR 14432 (ABNT, 2000).....	45
Tabela 5 – Dados do Modelo da Parede 1 (Garcia, 2000).....	54
Tabela 6 – Dados do Modelo da Parede 2 (Garcia, 2000).....	55
Tabela 7 – Dados do Modelo da Parede 3 (Garcia, 2000).....	56
Tabela 8 – Dados do Modelo da Parede 4 (Garcia, 2000).....	57
Tabela 9 – Quantitativo de Amostras Utilizadas na Pesquisa.....	66
Tabela 10 – Índices de Consistência.....	83
Tabela 11 – Resumo dos Principais Minerais (Autor, 2025).....	94
Tabela 12 – Comparação entre os Resultados Experimentais e a Literatura.....	96
Tabela 13 – Resultados de Resistência à Compressão dos Prismas.....	100
Tabela 14 – Características Geométricas dos Blocos Cerâmicos.....	101
Tabela 15 – Resultados do ensaio de Absorção de Água (AA).....	102
Tabela 16 – Área Bruta e Líquida dos Blocos Cerâmicos.....	103
Tabela 17 – Resistência Média dos Blocos Cerâmicos.....	103

Tabela 18 – Resistência à Compressão de Prismas (f_{pk}) em Temperatura Ambiente.....	104
Tabela 19 – Módulo de Elasticidade e Coeficiente de <i>Poisson</i>	104
Tabela 20 – Fator de Eficiência: Prisma/bloco – Resistência Média.....	105
Tabela 21 – Resistência à Compressão de Pequenas Paredes (f_{ppk}).....	105
Tabela 22 – Módulo de Elasticidade e Coeficiente de <i>Poisson</i>	106
Tabela 23 – Propriedades Mecânicas dos Materiais Utilizados na Simulação.....	107
Tabela 24 – Propriedades Térmicas dos Materiais Utilizados na Simulação.....	107
Tabela 25 – Comparação entre os Contatos <i>Frictional Contact</i> e <i>No Separation</i> .	110
Tabela 26 – Correlação entre os Resultados Experimentais e Numéricos.....	114
Tabela 27 – Análise Dimensional NBR15270-2: Anexo A (ABNT, 2023).....	129
Tabela 28 – Índice de Absorção de Água NBR15270-2 (ABNT, 2023).....	129
Tabela 29 – Resultados Obtidos no Ensaio de MEA NBR 15270-2 (ABNT, 2023).	130
Tabela 30 – Resultados dos Ensaio de Resistência à Compressão NBR15270-2 (ABNT, 2023).....	130
Tabela 31 – Resultados dos Ensaio de Condutividade e Efusividade Térmica... .	146

RESUMO

A busca por materiais de construção que conciliem eficiência estrutural, resistência térmica e sustentabilidade tem impulsionado, nos últimos anos, diversas pesquisas na área da cerâmica vermelha. Neste contexto, os Blocos Cerâmicos Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ) surgem como uma alternativa promissora para alvenaria estrutural, sobretudo em aplicações que demandam desempenho sob condições extremas de temperatura. Este estudo tem como objetivo principal caracterizar o comportamento termoestrutural dos BCEPQ por meio de análises experimentais e modelagem numérica. O trabalho abrangeu desde o preparo da matéria-prima — com seleção, homogeneização e controle da umidade da argila — até o processo de conformação, secagem e queima dos blocos. Essa etapa inicial foi fundamental para garantir a reprodutibilidade dos resultados e a qualidade dos corpos de prova. Foram investigadas propriedades físicas, mecânicas e térmicas de blocos cerâmicos individuais, prismas compostos por cinco fiadas e pequenas paredes de alvenaria. Ensaios laboratoriais permitiram avaliar parâmetros como forma de ruptura, absorção de água (22,83%) e resistência à compressão. Os blocos atenderam, em geral, aos requisitos da NBR 15270-1 (ABNT, 2023), embora a absorção de água tenha superado o limite normativo de 21% para blocos com furos verticais. Os valores médios de resistência à compressão obtidos foram de 8,30 MPa para blocos individuais, 1,67 MPa para prismas em temperatura ambiente, 1,75 MPa após exposição térmica e 0,86 MPa para pequenas paredes. Na etapa térmica, os prismas foram expostos a temperaturas de 30°C, 600°C, 800°C e 1000°C. Observou-se que até 800°C houve manutenção da integridade mecânica, com leve aumento de resistência a 1000°C (1,60 MPa), possivelmente associado à formação de mulita — fase mineral que melhora a estabilidade térmica do material cerâmico. A etapa de modelagem numérica foi realizada utilizando o método dos elementos finitos, com o objetivo de simular, em ambiente computacional, o comportamento observado nos ensaios laboratoriais. O modelo apresentou boa correspondência com os dados experimentais (aproximadamente 82%), demonstrando potencial para análises preditivas mais avançadas, apesar da necessidade de calibração adicional com base em ensaios térmicos específicos. Os resultados obtidos indicam que os BCEPQ possuem desempenho adequado sob condições termoestruturais severas, mostrando-se tecnicamente viáveis para aplicações em sistemas construtivos que exigem resistência ao fogo e estabilidade dimensional. Além disso, o estudo oferece subsídios relevantes para o aprimoramento de diretrizes normativas e para o desenvolvimento de componentes cerâmicos com melhor desempenho e menor impacto ambiental, promovendo avanços na racionalização e sustentabilidade da construção civil.

Palavras-chave: BCEPQ, Modelagem Numérica e Experimental, Análise Termoestrutural.

ABSTRACT

The search for building materials that combine structural efficiency, thermal resistance, and sustainability has driven numerous studies in the field of red ceramics in recent years. In this context, Extruded, Pressed, and Fired Ceramic Blocks (EPFCB) emerge as a promising alternative for structural masonry, especially in applications that require performance under extreme temperature conditions. This study aims to characterize the thermostructural behavior of EPFCB through experimental analyses and numerical modeling. The research encompassed the preparation of the raw material—including selection, homogenization, and moisture control of the clay—as well as the shaping, drying, and firing processes of the blocks. This initial phase was essential to ensure reproducibility of the results and the quality of the test specimens. Physical, mechanical, and thermal properties were investigated in individual ceramic blocks, prisms composed of five courses, and small masonry walls. Laboratory tests enabled the evaluation of parameters such as failure mode, water absorption (22.83%), and compressive strength. The blocks generally met the requirements of NBR 15270-1 (ABNT, 2023), although the water absorption slightly exceeded the normative limit of 21% for vertically perforated blocks. The average compressive strength values obtained were 8.30 MPa for individual blocks, 1.67 MPa for prisms at room temperature, 1.75 MPa after thermal exposure, and 0.86 MPa for small walls. In the thermal stage, the prisms were exposed to temperatures of 30°C, 600°C, 800°C, and 1000°C. It was observed that up to 800°C, mechanical integrity was maintained, with a slight increase in strength at 1000°C (1.60 MPa), possibly associated with the formation of mullite – a mineral phase that enhances the thermal stability of ceramic materials. The numerical modeling stage was carried out using the finite element method to simulate, in a computational environment, the behavior observed in laboratory tests. The model showed good agreement with the experimental data (approximately 82%), demonstrating potential for more advanced predictive analyses, although further calibration is needed based on specific thermal tests. The results indicate that EPFCBs perform adequately under severe thermostructural conditions, proving to be technically viable for use in construction systems that require fire resistance and dimensional stability. Furthermore, the study provides valuable input for improving regulatory guidelines and developing ceramic components with better performance and lower environmental impact, thus contributing to the rationalization and sustainability of the construction industry.

Keywords: BCEPQ, Numerical and Experimental Modeling, Thermo-structural Analysis.

1. INTRODUÇÃO

A indústria cerâmica de Campos dos Goytacazes – RJ tem sido amplamente estudada sob diferentes perspectivas disciplinares, especialmente nas áreas de engenharia e administração. Pesquisas anteriores destacam aspectos como a transformação tecnológica na competitividade da concentração industrial (Souza *et al.*, 2003), a formação de parcerias colaborativas entre empresas de pequeno e médio porte (Pithon *et al.*, 2006) e a governança no fortalecimento do setor produtivo, evidenciando as interconexões entre empresas e sua relação com entidades públicas, privadas e mistas (Azevedo Filho *et al.*, 2011).

A riqueza dos solos argilosos da Baixada Campista impulsionou a consolidação dessa indústria, fornecendo matéria-prima abundante e de alta qualidade para a produção de cerâmica vermelha. Esse fator, aliado à disponibilidade de mão de obra acessível, oriunda majoritariamente das usinas de açúcar, permitiu a geração de aproximadamente 6.000 empregos diretos e indiretos, principalmente na fabricação de telhas, tijolos e outros elementos construtivos. O desenvolvimento desse polo produtivo reflete tanto a vocação natural da região para a extração de argila quanto a necessidade de diversificação econômica e aprimoramento das práticas industriais.

No contexto da construção civil, a busca por eficiência, qualidade e redução de desperdícios tem impulsionado a adoção de sistemas construtivos racionais, como a alvenaria estrutural, que se apresenta como uma alternativa viável ao concreto armado. Esse sistema, além de desempenhar a função de vedação, também assume papel estrutural, desde que projetado e executado adequadamente. Sua aplicação promove economia de material, menor geração de resíduos e melhor acabamento, fatores essenciais para uma construção mais sustentável e eficiente.

Os Blocos Cerâmicos Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ) têm se consolidado como uma inovação promissora para a racionalização da alvenaria estrutural. Seu sistema de encaixe macho e fêmea possibilita uma modulação precisa, otimizando a execução da obra e reduzindo o consumo de argamassa, ao mesmo tempo em que melhora a estanqueidade das edificações. Esse avanço não

apenas fortalece a competitividade da indústria cerâmica local, mas também impulsiona a valorização dos seus produtos no mercado da construção civil.

Entretanto, a relevância desse setor vai além do impacto econômico. Diante da finitude das jazidas de argila na região, torna-se fundamental agregar valor aos produtos cerâmicos por meio do aprimoramento contínuo dos processos de fabricação. A substituição da extrusão pela prensagem na produção dos BCEPQ, conforme sugerido por Pedroti (2007), demonstra o potencial de inovação da indústria cerâmica na busca por materiais mais resistentes e duráveis, garantindo sua competitividade a longo prazo.

Com o aumento da demanda por soluções construtivas que conciliem resistência estrutural e segurança contra incêndios, torna-se fundamental aprofundar a investigação sobre o comportamento desses blocos quando submetidos a condições extremas de temperatura e carga.

O desempenho dos BCEPQ em situações de sobrecarga térmica ainda é um campo pouco explorado na literatura. Considerando que edifícios estão sujeitos a eventos de incêndio e que a resistência ao fogo de elementos estruturais é um critério fundamental em normas de segurança, este estudo busca contribuir para o avanço do conhecimento nessa área. Para isso, foi realizada uma análise experimental e numérica do comportamento de blocos cerâmicos, prismas e pequenas paredes sob diferentes temperaturas e condições de carregamento.

O objetivo principal do estudo foi investigar o comportamento termoestrutural dos BCEPQ, aferindo sua resistência mecânica, capacidade de deformabilidade e modos de ruptura em temperaturas elevadas que variam da temperatura ambiente, aproximadamente 30°C até 1000°C. Especificamente, buscou-se avaliar parâmetros de qualidade dos blocos (geometria, absorção de água e massa específica seca), estimar mecanismos de falhas e modos de ruptura de blocos, prismas e pequenas paredes, e comparar os resultados experimentais com simulações numéricas. A abordagem adotada incluiu ensaios laboratoriais normatizados e modelagem computacional, permitindo prever o desempenho dos blocos em diferentes cenários de exposição térmica.

A metodologia adotada baseou-se na caracterização física e mecânica dos materiais, com análises de absorção de água, resistência à compressão e módulo

de elasticidade por estimativa. Ensaios termoestruturais foram realizados para avaliar a resposta dos prismas a diferentes temperaturas, permitindo a identificação de alterações na capacidade de resistência mecânica com o aumento da temperatura. Além disso, foi empregada modelagem numérica utilizando o *software* de elementos finitos (ANSYS, 2024), possibilitando a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e as previsões computacionais.

Os resultados indicam que os BCEPQ apresentam resistência mecânica compatível com os requisitos normativos e um desempenho termoestrutural satisfatório em altas temperaturas. A análise termomecânica demonstrou que os blocos e prismas mantêm estabilidade estrutural até um determinado limite térmico, reforçando seu potencial para aplicações em edificações sujeitas a incêndios. A modelagem numérica, por sua vez, revelou-se eficiente na previsão do comportamento dos BCEPQ, fornecendo informações essenciais para aprimorar sua aplicação na construção civil.

Desta forma, este trabalho contribui significativamente para a literatura ao fornecer dados detalhados sobre o comportamento dos BCEPQ sob ações termoestruturais, possibilitando sua incorporação em projetos estruturais com maior segurança e confiabilidade. Além disso, os resultados reforçam o potencial desses blocos como uma alternativa sustentável e eficiente para edificações, auxiliando no avanço de normativas e diretrizes técnicas para o setor.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar experimental e numericamente o comportamento dos Blocos Cerâmicos Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ) sob condições de sobrecarga térmica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar fisicamente os BCEPQ, analisando suas propriedades geométricas, massa específica seca e absorção de água;

- Determinar as propriedades mecânicas dos BCEPQ, avaliando a resistência mecânica à compressão de blocos, prismas e pequenas paredes, sem juntas argamassadas, investigando os mecanismos de deformação e ruptura;
- Avaliar o comportamento termoestrutural dos BCEPQ, determinando variações na resistência mecânica de prismas submetidos a temperaturas de 30°C a 1000°C, identificando as alterações estruturais e modos de falha;
- Avaliar a microestrutura das amostras por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios X (DRX);
- Implementar a modelagem numérica dos BCEPQ, utilizando o *software* ANSYS 2024, para simular seu comportamento estrutural em diferentes condições térmicas e validar os resultados experimentais obtidos;
- Comparar os dados experimentais e numéricos, verificando a adequação dos modelos computacionais na predição do comportamento termoestrutural dos BCEPQ.

1.2 JUSTIFICATIVAS

A crescente demanda por materiais de construção mais eficientes, sustentáveis e resistentes tem impulsionado pesquisas na área da Engenharia Civil, com foco no desenvolvimento de elementos estruturais que aliem desempenho mecânico, segurança contra incêndios, conforto térmico e viabilidade econômica. Nesse contexto, os Blocos Cerâmicos Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ) têm se destacado como alternativa inovadora e promissora para sistemas de alvenaria estrutural e de vedação. Estes blocos, por possuírem melhor uniformidade dimensional, maior densidade e menores porosidades, oferecem vantagens significativas, como a redução no consumo de argamassa, melhoria na resistência mecânica e maior precisão na execução das alvenarias (CERQUEIRA *et al.*, 2021; ARAÚJO *et al.*, 2020).

Contudo, apesar dessas vantagens, a aplicação segura e eficiente dos BCEPQ em ambientes sujeitos a elevadas temperaturas ainda representa um desafio técnico. Situações de incêndio são eventos críticos que impõem severas exigências aos materiais de vedação e estruturais. Nestes cenários, a resposta dos

blocos cerâmicos a altas temperaturas — especialmente no que diz respeito à perda de resistência, deformações térmicas, fissuração e alterações microestruturais — precisa ser compreendida de forma mais aprofundada. Pesquisadores como Jonas Alexandre, Niander Aguiar Cerqueira e Tiago Barros (2021) têm investigado o comportamento de blocos cerâmicos em situações de incêndio, destacando a importância de estudos voltados à resistência residual e à integridade estrutural dos blocos pós-aquecimento.

Além disso, há uma lacuna significativa nas normas técnicas brasileiras com relação ao desempenho de blocos cerâmicos estruturais sob ação do fogo. Normativas como a NBR 15270 (ABNT, 2023) tratam da caracterização de blocos cerâmicos de vedação, mas não contemplam de forma específica o comportamento desses elementos em cenários de incêndio. Isso evidencia a necessidade de pesquisas que forneçam subsídios técnicos para o aperfeiçoamento de diretrizes normativas, especialmente no que se refere à segurança estrutural e ao dimensionamento de elementos construtivos submetidos a temperaturas elevadas (FREITAS *et al.*, 2019; SOUSA *et al.*, 2020).

Em paralelo aos ensaios laboratoriais, a modelagem numérica vem se consolidando como ferramenta essencial para a predição do comportamento de materiais sob condições extremas. O uso do método dos elementos finitos (FEM), por meio de *softwares* como o ANSYS 2024 R1, permite simular o comportamento termoestrutural de blocos cerâmicos com alto grau de confiabilidade, contribuindo para a validação de dados experimentais e a extrapolação de cenários não ensaiados. Pesquisas recentes, como as de Ribeiro *et al.* (2022) e Silva & Melo (2023), demonstram a eficácia da modelagem numérica em investigações envolvendo alvenarias submetidas a calor, reforçando o papel da simulação computacional como aliada no desenvolvimento de materiais mais resilientes e no aprimoramento do projeto estrutural.

Diante desse cenário, esta pesquisa preenche uma lacuna relevante ao propor uma abordagem integrada entre ensaios experimentais e simulações computacionais para avaliar o comportamento termoestrutural dos BCEPQ. Ao investigar a resistência mecânica residual, a deformabilidade e a integridade estrutural de blocos expostos a temperaturas elevadas, o estudo fornece dados inéditos que podem contribuir para a qualificação técnica do uso desses materiais

em edificações. Além disso, os resultados obtidos podem subsidiar melhorias no processo de fabricação, bem como influenciar o desenvolvimento de normativas específicas para esse tipo de material. Assim, a presente pesquisa não apenas contribui para o avanço do conhecimento científico na área de materiais cerâmicos, como também apresenta implicações práticas diretas para a construção civil, promovendo a segurança, eficiência e durabilidade das edificações.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Após a introdução desta dissertação, na qual são apresentados o tema, os objetivos e as justificativas, a estrutura do texto segue o seguinte formato:

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica, abordando os principais conceitos e o estado da arte dos temas tratados neste estudo.

No terceiro capítulo, detalha-se a metodologia adotada para atingir os objetivos gerais e específicos da dissertação, incluindo a descrição dos materiais utilizados para obtenção dos resultados esperados.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados experimentais, organizados nos seguintes subitens: caracterização da massa argilosa utilizada na produção dos blocos, ensaios para determinação de parâmetros de qualidade, ensaios em prismas e pequenas paredes, e análise termoestrutural de prismas sem juntas argamassadas. Também são discutidos os resultados das simulações térmicas realizadas em prismas de cinco fiadas utilizando o *software ANSYS 2024*.

Por fim, no quinto capítulo, apresentam-se as conclusões do estudo, juntamente com sugestões para pesquisas futuras.

Adicionalmente, como complemento, análises detalhadas dos resultados obtidos nesta pesquisa podem ser consultadas nos Apêndices 1 a 6.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta a revisão da literatura que fundamenta esta pesquisa, abordando os principais conceitos e estudos relacionados ao comportamento termoestructural dos Blocos Cerâmicos Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ). A revisão foi estruturada de forma a fornecer um panorama detalhado sobre a aplicação da cerâmica vermelha na construção civil, o comportamento de materiais cerâmicos em altas temperaturas, os mecanismos de propagação de incêndios em edificações e o uso da modelagem numérica para prever o desempenho estrutural dos blocos sob condições extremas.

2.1 CERÂMICA VERMELHA

Com base nos dados fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), o Brasil abriga uma quantidade de 6.903 estabelecimentos de produção cerâmica. É importante ressaltar que a indústria ceramista desempenha um papel de extrema relevância tanto no cenário da construção civil quanto na economia do país, sendo que aproximadamente 90% das estruturas de alvenaria e coberturas presentes no território brasileiro têm como base a utilização da cerâmica vermelha, conforme destacado pela Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER, 2023).

A Tabela 1 mostra outros dados fornecidos pela ANICER, que tem como base elementos fornecidos pelo IBGE.

Tabela 1 – Classes das Atividades Industriais e Produtos – Prodlist 2016 a 2019 (IBGE – Pesquisa Industrial Anual – Produto).

Nº de Cerâmicas e Olarias no Brasil	5.578 estabelecimentos
Produção/ano de telhas cerâmicas	2.261.565.000 unidades
Produção/ano de blocos cerâmicos	5.896.037.000 unidades
Produção/ano de outros acessórios cerâmicos	470.550 toneladas
Total de produtos por ano (Blocos e Telhas)	8.157.602.000 unidades

Os materiais cerâmicos são compostos por elementos metálicos e não metálicos, formando predominantemente óxidos, nitretos e carbonetos, como

alumina (Al_2O_3), sílica (SiO_2), carbeto de silício (SiC) e nitreto de silício (Si_3N_4). Esses materiais apresentam elevada rigidez e resistência mecânica, comparáveis às ligas metálicas, além de possuírem alta dureza e estabilidade química. Apesar de sua natureza frágil, avanços tecnológicos vêm aprimorando sua resistência à fratura, ampliando suas aplicações estruturais. Outra característica marcante dos cerâmicos é sua excelente capacidade de isolamento térmico e elétrico, tornando-os superiores aos metais e polímeros em ambientes de altas temperaturas e condições agressivas (Callister e Rethwisch, 2016).

Segundo Callister e Rethwisch (2016), apesar dos avanços significativos na ciência e engenharia de materiais, ainda há desafios tecnológicos a serem superados. Entre eles, destaca-se a necessidade de desenvolver materiais altamente avançados e personalizados, que atendam a exigências específicas de desempenho mecânico, térmico e químico. Além disso, torna-se essencial avaliar e mitigar os impactos ambientais associados à produção desses materiais, considerando desde a extração de matérias-primas até o processamento industrial. Nesse contexto, os materiais argilosos merecem atenção especial, pois sua ampla utilização na indústria cerâmica exige estratégias sustentáveis de produção e reaproveitamento, minimizando os efeitos ambientais e garantindo maior eficiência no uso dos recursos naturais.

Alexandre (1997) conduziu uma pesquisa significativa para caracterizar as argilas do município de Campos dos Goytacazes. Das 21 amostras coletadas em jazidas, a caulinita foi identificada como o argilomineral dominante, apresentando quantidades substanciais de sílica e alumina, o que destaca a natureza típica do solo na região. A composição química do solo da presente pesquisa assemelha-se àquela encontrada nos solos da região de Campos dos Goytacazes, conforme evidenciado por Azevedo *et al.* (2019) em seu estudo sobre tijolo.

Devido às inúmeras reservas de argila em Campos dos Goytacazes, há um polo industrial de cerâmica vermelha no município, composto por 100 indústrias que produzem 90.000 peças por mês. A maioria dessas peças corresponde a tijolos cerâmicos, conforme mencionado por Xavier *et al.* (2019).

As argilas são moldadas plasticamente por meio do processo de extrusão para sua fabricação. Posteriormente, as peças são submetidas ao processo de

secagem para remover a água, prevenindo o surgimento de tensões e defeitos durante a queima. Finalmente, o corpo cerâmico é submetido à queima em fornos de altas temperaturas (Cerqueira, 2022).

Pedroti *et al.* (2011) propuseram a substituição do processo de extrusão na fabricação de blocos cerâmicos pela prensagem, um método similar ao utilizado na produção de tijolos de solo-cimento. Essa abordagem inovadora resultou no desenvolvimento dos Blocos Prensados e Queimados (BPQ), os quais, após a prensagem, passam por um processo de queima para estabilização de suas propriedades físicas e mecânicas.

Dentro desse contexto produtivo, foram realizadas análises detalhadas sobre as matérias-primas utilizadas e as características dos blocos cerâmicos resultantes, conforme discutido por Pedroti *et al.* (2011) e Alexandre e Silva (2012). Estudos mais recentes conduzidos por Cerqueira *et al.* (2018, 2020, 2022) aprofundaram a avaliação das propriedades físicas, mecânicas e elásticas dos blocos e prismas, incluindo investigações sobre o comportamento de deformação de elementos de alvenaria estrutural. Além disso, esses autores analisaram a resistência à compressão de blocos individuais, prismas e pequenas paredes, bem como os módulos de deformação e o coeficiente de *Poisson*, fornecendo subsídios técnicos para a aplicação dos BPQ em sistemas de alvenaria estrutural.

A NBR 15.270-1 (ABNT, 2017) classifica as unidades cerâmicas como blocos ou tijolos de vedação ou estrutural, conforme sua geometria e sua resistência característica mínima em quilograma-força por centímetro quadrado referente à área bruta. Para a categoria de blocos estruturais, a classe mínima aceitável é 40, o que equivale a uma resistência característica mínima de 40kgf/cm² ou 4MPa. Além disso, para todas as categorias de blocos estruturais, a absorção de água deve estar na faixa de 8% a 21%, seguindo a Tabela 2 (continuação) da norma. A norma menciona também que o bloco cerâmico de vedação é produzido por meio da conformação plástica de matéria-prima argilosa, podendo ou não incluir aditivos, e é submetido a altas temperaturas durante o processo de queima.

A NBR 15.270-3 (ABNT, 2017) aborda, nas notas 1, 2 e 4, que o bloco cerâmico para uso em vedação é fabricado com furos horizontais, conforme ilustrado na Figura 1a, mas também pode ser produzido com furos verticais,

conforme esquematizado na Figura 1b. Os blocos cerâmicos de vedação são utilizados na construção de paredes externas ou internas que não têm a função de suportar cargas verticais adicionais, além do próprio peso da alvenaria à qual pertencem.

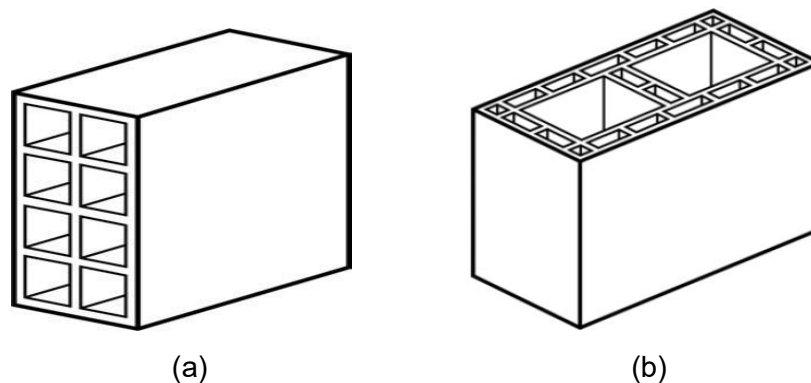


Figura 1 – Bloco cerâmico de vedação com furos na vertical e horizontal NBR 15.270-1 (ABNT, 2023).

Segundo as diretrizes estabelecidas pela NBR 15.270-1 (ABNT, 2023), o bloco cerâmico estrutural é caracterizado como um elemento da alvenaria estrutural que apresenta perfurações prismáticas perpendiculares às suas faces. Além disso, os blocos cerâmicos estruturais são produzidos para serem assentados com os furos na vertical. Estes blocos são utilizados na construção de alvenaria estrutural, seja ela não armada, armada ou protendida, conforme ilustrado na Figura 2.

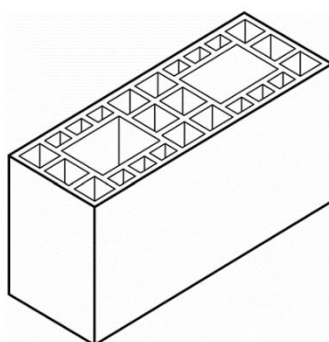


Figura 2 – Bloco cerâmico estrutural: NBR 15.270-1 (ABNT, 2023).

2.2. ALVENARIA ESTRUTURAL

Ao longo da história da engenharia civil e da arquitetura, a alvenaria estrutural desempenhou um papel fundamental na construção de edifícios

estruturais. Antigamente, antes do desenvolvimento de materiais modernos, como o concreto armado e o aço estrutural, civilizações antigas, como os egípcios, mesopotâmios e romanos já usavam esse sistema para construir edifícios robustos e duráveis.

Um exemplo notável são as três pirâmides de Guizé, no Egito, que datam de aproximadamente 2600 a.C. Essas pirâmides, conhecidas como Quéfrens, Queóps e Miquerinos (Figura 3), foram erguidas principalmente com a utilização de blocos de pedra. A pirâmide maior, Queóps, destaca-se com uma imponente altura de cerca de 147 metros, sendo composta por aproximadamente 2,3 milhões de blocos de pedra.



Figura 3 – Pirâmides de Guizé (Portugal Mundial, 2016).

Os materiais que esses povos utilizavam nas construções eram tijolos de barro cozido, adobe ou até mesmo pedras cortadas à mão, por serem abundantes nos locais em que viviam. O uso desses materiais nas construções apresentava algumas limitações, como por exemplo, o tamanho e a altura das estruturas que poderiam ser construídas. Havia a necessidade de grande habilidade artesanal, pois pedreiros e artesãos tinham que cortar e ajustar pedras ou tijolos com precisão para garantir a estabilidade estrutural.

Com o advento de novos materiais e técnicas construtivas, a alvenaria estrutural nunca desapareceu completamente. Ela continuou sendo usada em edifícios residenciais, muros de contenção e estruturas menores, especialmente em áreas onde a pedra ou o tijolo eram abundantes, passando por melhorias constantes no decorrer dos anos.

A partir da década de 1950, começaram a surgir normas e métodos de cálculo mais racionais, baseados em experimentos laboratoriais e pesquisas da época. Isso tornou possível determinar com precisão a espessura e a resistência da alvenaria necessária para garantir a segurança estrutural das construções. Essas descobertas possibilitaram a retomada da utilização da alvenaria como sistema construtivo em novas edificações, especialmente na Europa.

No Brasil, como técnica de construção, a alvenaria estrutural surge como um método inovador para o setor da construção civil. De acordo com Zechmeister (2005), a alvenaria estrutural é definida como um sistema construtivo que implica na concepção de uma estrutura de alvenaria, sendo esta projetada por meio da aplicação de princípios de engenharia e análises estruturais fundamentadas em cálculos racionais. Essencial para compreender esse método construtivo é a sua característica distintiva, que se caracteriza pelo uso das paredes da edificação como elementos portadores de cargas, substituindo, assim, os convencionais pilares e vigas típicos dos sistemas construtivos em concreto armado, aço ou madeira.

Tauil e Nese (2010) abordam que a alvenaria é a combinação de elementos individuais, como tijolos, blocos ou mesmo pedras, que são dispostos verticalmente e conectados por meio de um agente ligante, como a argamassa, resultando na formação de uma estrutura vertical sólida.

2.2.1 Componentes Empregados na Alvenaria Estrutural

Os principais componentes são os blocos ou tijolos, a junta de argamassa, as armaduras e o reforço por graute.

Conforme Parsekian (2012), é possível categorizar os blocos ou tijolos com base no material utilizado, como cerâmica ou concreto, na função desempenhada, seja como elemento de vedação ou estrutural, e na configuração, sendo maciças ou vazadas. Ainda de acordo com este autor, a junta de argamassa é um componente utilizado na ligação entre os blocos, absorve pequenas deformações e impede a entrada de água e vento no edifício. A argamassa é constituída por areia, cimento, cal e água.

Segundo a NBR 16868-1 (ABNT, 2020), quando requerido, como no caso da alvenaria armada, são empregados reforços cuja principal finalidade é suportar cargas de tração e cisalhamento, contribuindo para o aumento da ductilidade. Esta NBR também define graute como um material cimentício fluido, utilizado para preencher vazios na alvenaria, com o intuito de solidificar as armaduras à estrutura ou aumentar a sua resistência.

2.2.2 Prismas e Pequenas Paredes

Os prismas de concreto, utilizados em testes de resistência à compressão conforme especificado na norma NBR 15812-2 (ABNT, 2010), desempenham um papel muito importante na avaliação da qualidade do material. Esses prismas podem apresentar juntas horizontais ou juntas horizontais e verticais, e diversos autores sugerem que a correlação mais próxima do ideal seria utilizar os dois tipos de juntas, garantindo maior resistência ao cisalhamento (Parseskian *et al.*, 2007; Miranda e Corrêa, 2012).

Além disso, a altura dos prismas é um fator crítico a ser considerado durante os testes, pois pode influenciar diretamente na resistência à compressão do sistema. Por um lado, prismas muito altos podem estar sujeitos ao efeito de esbeltez, enquanto, por outro lado, prismas muito curtos podem sofrer restrições nas extremidades devido à aplicação de cargas. Portanto, é essencial encontrar um equilíbrio na altura dos prismas para garantir resultados precisos e confiáveis nos testes de resistência à compressão.

A escolha adequada das juntas também é um fator a ser destacado na obtenção da eficiência do prisma/parede, influenciando diretamente na resistência estrutural. As juntas horizontais e verticais permitem uma distribuição mais uniforme das cargas aplicadas, minimizando o risco de falha prematura devido ao cisalhamento. Dessa forma, a consideração cuidadosa das características do prisma, incluindo altura e tipo de junta, é fundamental para garantir a precisão e confiabilidade dos testes de resistência à compressão dos prismas. A Figura 4 ilustra os modelos de prismas mais utilizados na obtenção dos resultados nas análises experimentais.

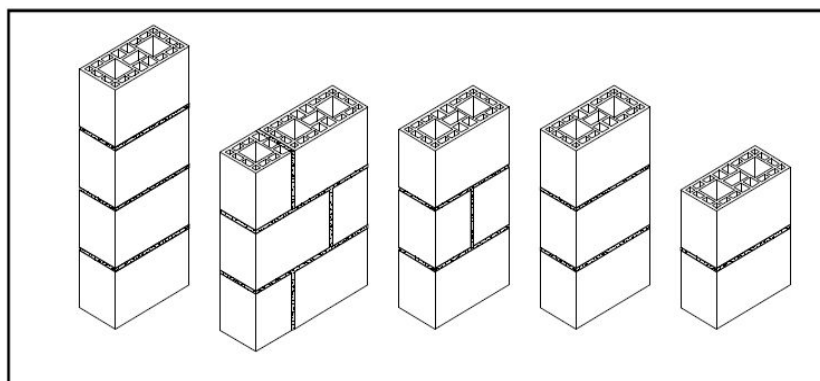


Figura 4 – Modelos de prismas empregados (Santos, 2008).

Conforme Ramalho e Correa (2003), as paredes feitas de blocos cerâmicos apresentam uma eficiência parede-bloco inferior àquelas compostas por blocos de concreto. Estes autores observam que, embora a resistência da alvenaria aumente com a resistência do bloco, a eficiência diminui. Além disso, a eficiência varia de acordo com a forma e o material constituinte do bloco. A Tabela 2 contém as eficiências parede-bloco (f_{par}/f_b) e prisma-bloco (f_p/f_b) para o material cerâmico.

Tabela 2 – Valores de eficiência para o material cerâmico (Ramalho e Corrêa, 2003).

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

De acordo a ANICER (2020a), uma parede é formada pela união de blocos com argamassa, representando o elemento principal na alvenaria estrutural. No entanto, devido a desafios como custo elevado, exigência de equipamentos específicos e dificuldades no controle da excentricidade, os testes envolvendo paredes são dispendiosos e complexos de serem realizados.

A opção preferencial recai sobre o uso de pequenas paredes (Figura 5) devido à sua capacidade de oferecer contrafiamento aos blocos, refletindo uma condição mais próxima da realidade das paredes completas. Essa escolha é

motivada pela complexidade e pelos custos elevados associados à construção e aos testes envolvendo paredes em sua totalidade, como destacado pela ANICER (2020b), parte superior do formulário.



Figura 5 – Modelo de pequena parede (Cerqueira, 2017).

Os testes com prismas oferecem uma vantagem em termos de eficiência e custo em comparação com os testes de paredes. Embora não exijam uma estrutura laboratorial tão complexa quanto esta última, esses não conseguem reproduzir totalmente o comportamento real da alvenaria.

Uma analogia pode ser feita com o concreto: assim como o cilindro é usado como corpo de prova para ensaios de compressão do concreto, o prisma desempenha um papel semelhante na avaliação da alvenaria em termos de resistência à compressão, como destacado pela ANICER (2020b).

2.2.3 Deformação e Fratura em Alvenaria Estrutural

Compreender a configuração e a magnitude das deformações em um componente estrutural é fundamental para avaliar sua resposta mecânica e prevenir a ocorrência de problemas patológicos. A análise detalhada do comportamento estrutural permite prever possíveis falhas e otimizar o desempenho de materiais utilizados na construção civil.

Dada a relevância desse tema, inúmeros pesquisadores têm realizado estudos ao longo das últimas décadas para investigar os mecanismos de falha, a capacidade de deformação e a resistência à compressão de diferentes elementos estruturais. Essas pesquisas abrangem ensaios em corpos de prova cilíndricos e prismáticos, além de avaliações em elementos individuais (blocos isolados) e

sistemas compostos (prismas, pequenas paredes e paredes em escala real). Essas análises são conduzidas tanto para blocos cerâmicos quanto para blocos de concreto, permitindo uma comparação detalhada entre os materiais e contribuindo para o desenvolvimento de soluções construtivas mais eficientes e seguras.

Uma prática comum envolve a análise do impacto do formato e das dimensões dos blocos na resistência e na capacidade de deformação Parsekian (2012). Conforme observado por Monk (1967), o índice de esbelteza (h/t) varia de acordo com as condições de suporte e a relação entre altura (h) e espessura (t) da parede, sendo um fator geométrico que exerce uma influência significativa na resistência da alvenaria.

Examinando os mecanismos de falha na alvenaria, Hilsdorf (1969) introduziu um modelo matemático que leva em consideração os elementos da alvenaria com comportamento elástico. Esse modelo foi adotado por diversos pesquisadores, como mencionado por Santos (2008) e Nessralla (2013).

As suposições subjacentes ao modelo de Hilsdorf incluem a falha por cisalhamento (critério de Mohr), uma aderência perfeita entre bloco e argamassa, e uma distribuição uniforme de tensões laterais e verticais. A Figura 6 ilustra o estado de tensões observado em prismas de alvenaria, indicando as tensões nos blocos e na argamassa.

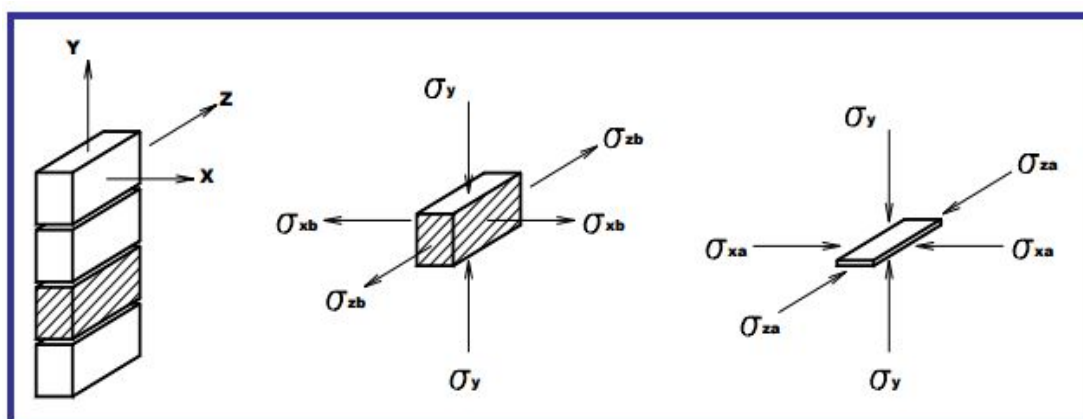


Figura 6 – Modelo adotado por Hilsdorf (Nessralla, 2013).

2.3 INCÊNDIO

Seito *et al.* (2008), destacam que, apesar dos notáveis progressos na ciência do fogo, ainda não existe um consenso global sobre a definição do fogo, como evidenciado pelas diferentes definições adotadas pelas normas de diversos países.

- A NBR 13860 (ABNT, 1997) define o termo "fogo" como o fenômeno de combustão, que se destaca pela liberação de calor e luz.
- De acordo com a ISO 8421-1:1987, o fogo é descrito como o processo de combustão que se caracteriza pela emissão de calor, podendo estar acompanhado por fumaça, chama ou ambos.

Como forma de padronizar um conceito, os autores Seito *et al.* (2008) afirmam que o incêndio é um evento de fogo não controlado que envolve a combustão de materiais, geralmente em um local não destinado para tal. Pode ser de natureza acidental ou intencional, representando um perigo significativo para a vida, propriedade e meio ambiente, e envolve a propagação rápida do fogo.

O avanço do incêndio é influenciado por diversos elementos, incluindo a configuração e as proporções do espaço, a quantidade e a disposição dos materiais inflamáveis presentes, as condições meteorológicas como temperatura e umidade relativa, as características arquitetônicas do ambiente e a implementação de medidas preventivas e de proteção contra incêndio na estrutura da edificação Seito *et al.* (2008).

A *National Fire Protection Association* (NFPA, 2016) define o fogo como uma reação química de oxidação, geralmente exotérmica, que produz luz e calor na forma de chamas, juntamente com outros produtos de combustão, como fumaça e gases.

Ainda de acordo com a NFPA, a continuidade do fogo requer combustível, oxigênio, calor e uma reação em cadeia. Essa reação permite o reaproveitamento do calor gerado durante a combustão, conforme representado na Figura 7, que destaca os elementos essenciais para a ocorrência do fogo.



Figura 7 – Tetraedro do fogo (Seito *et al.*, 2008).

Segundo Drysdale (1998), embora o fogo constitua uma reação química e sua existência esteja vinculada à presença dos quatro elementos mencionados anteriormente, a taxa de propagação é influenciada por diversos elementos, tais como as condições de abertura e ventilação em edifícios, a presença de compartimentos assegurados pelos elementos construtivos, o estado físico e a distribuição do combustível.

Conforme o Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ, 2024), o processo de incêndio é geralmente dividido em quatro fases principais, conhecidas como o ciclo do fogo.

- Pré-ignição: é o início do incêndio, onde uma fonte de calor, combustível e oxigênio se combinam para iniciar a reação em cadeia. O processo de ativação geralmente depende do fornecimento externo de calor, sendo esse um requisito quase constante, conforme observado por Buchanan e Abu (2017);
- Crescimento: o incêndio se desenvolve e se propaga rapidamente à medida que mais combustível é consumido e a temperatura aumenta. O oxigênio continua a alimentar a reação em cadeia;
- Maturidade ou Desenvolvido: é o estágio em que o incêndio atinge sua intensidade máxima. Nesta fase, o combustível está sendo consumido a uma taxa elevada, e o incêndio está liberando grande quantidade de calor, luz e produtos de combustão. Quando as temperaturas atingem cerca de 600 °C, a queima dos materiais acelera, resultando no *flashover*, fase em que as temperaturas ambientais ultrapassam 1100 °C. É durante essa fase

que o fogo exerce influência em elementos estruturais e em divisórias de compartimentos (Buchanan, 2002; Seito *et al.*, 2008);

- Decadência ou Extinção: a quantidade de combustível disponível diminui, e o incêndio começa a perder força. Se não houver mais combustível suficiente para sustentar a reação em cadeia, o incêndio se extinguirá.

Para ilustrar o processo destas fases, a Figura 8 apresenta esse sequenciamento, desde a pré-ignição até a extinção do incêndio.

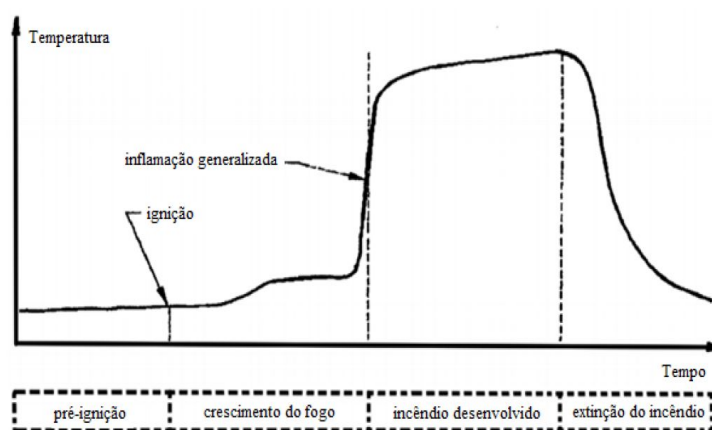


Figura 8 – Fases de um incêndio real (Seito *et al.*, 2008).

Conforme descrito por Buchanan e Abu (2017), a ocorrência de um incêndio se dá quando um objeto inflamável entra em contato com oxigênio na presença de calor, o incêndio tem início com a combustão de um item específico, espalhando-se aos poucos para outros objetos próximos, crescendo em dimensões e intensidade, caracterizando-se como um incêndio *pré-flashover*.

Estes autores destacam que, em espaços abertos, a intensidade máxima do incêndio é alcançada rapidamente, seguida por uma diminuição gradual na taxa de combustão até o esgotamento do combustível. Em ambientes fechados, o incêndio pode crescer em tamanho e intensidade até que todos os objetos estejam totalmente envolvidos em chamas no *flashover*. Durante esse período, a intensidade máxima é mantida, com a taxa de combustão controlada pela disponibilidade de oxigênio através de aberturas de ventilação. Após o consumo da maior parte do combustível, o incêndio se extingue gradualmente.

Para que ocorra o *flashover*, certas condições prévias são essenciais. É necessário haver quantidade suficiente de combustível e ventilação para permitir que um incêndio em crescimento atinja uma dimensão significativa. O teto deve reter os gases quentes, e a geometria da sala deve possibilitar que o fluxo de calor radiante atinja níveis críticos de ignição junto aos itens combustíveis. Segundo Walton e Thomas (1995, apud por COSTA; SILVA, 2006), a faixa de temperatura relacionada ao *flashover* varia entre 300°C a 650°C, sendo que a faixa mais comumente empregada abrange de 300°C a 600°C.

2.3.1 Modos de Propagação ou Transferência de calor

É fundamental possuir conhecimentos básicos sobre transferência de calor para compreender o comportamento do fogo. Esse processo ocorre por meio de três mecanismos: condução, convecção e radiação, os quais podem atuar de forma isolada ou combinada, dependendo das condições. Autores como Buchanan e Abu (2017) ressaltam a importância desse entendimento para analisar adequadamente o comportamento do fogo.

As Figuras 9 e 10 destacam a síntese dos três mecanismos de transferência de calor durante o incêndio, conforme apresentado por Seito *et al.* (2008) e Rodovalho (2018), respectivamente. Nas fases iniciais, a condução e a convecção surgem como os principais condutores de transferência de calor. De início, a estrutura absorve o calor originado pelo incêndio, primariamente por condução e convecção. À medida que o processo evolui, a transmissão térmica por radiação torna-se importante para redistribuir a temperatura entre todos os elementos constituintes da estrutura, assim como para os gases circundantes. A energia radiante desempenha um papel significativo no comprometimento estrutural de equipamentos e estruturas nas proximidades do ponto de origem do vazamento.

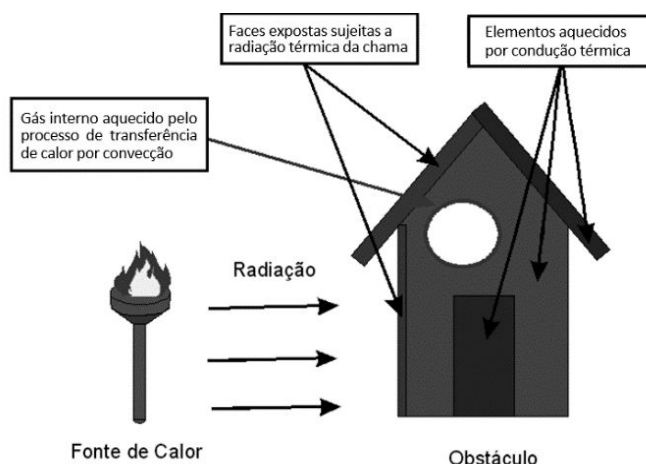


Figura 9 – Mecanismos de transferência de calor durante o incêndio (Seito *et al.*, 2008).

Halliday *et al.* (1996) explicam que calor é a energia que se move devido à disparidade de temperatura entre um objeto e seu entorno. A transferência de calor pode ocorrer por meio de três mecanismos distintos: condução, convecção e radiação. Esses modos de propagação podem operar de maneira isolada ou simultânea.



Figura 10 – Mecanismos de transferência de calor durante o incêndio (Rodvalho, 2018).

2.3.1.1 Condução

De acordo com Regobello (2007), o conceito fundamental na transferência de calor reside na disparidade de gradientes térmicos entre diversos pontos de uma estrutura. Desta forma, em regiões com variação de temperatura, o calor flui dos locais mais quentes para os mais frios.

Condução é o processo de transferência de calor em que a energia térmica é transmitida através de um material sólido, devido à interação de partículas, como elétrons ou vibrações moleculares, conforme Buchanan e Abu (2017).

A capacidade de condução de calor de um material tende a aumentar conforme sua densidade específica cresce, de acordo com a explicação de Rigão (2012). Isso se deve à compactação da microestrutura do material, resultando em uma redução na quantidade de espaços vazios à medida que a densidade aumenta.

Outra variável que impacta na condutividade, de acordo com Stancato (2000), é a umidade. A presença de água nos poros do material aumenta sua capacidade de condução térmica, pois a condutividade térmica da água (0,6 W/(m.K)) é superior à do ar (0,025 W/(m.K)).

Materiais eficientes como condutores elétricos geralmente também exibem boa condução térmica. Em contraste, em materiais com baixa condutividade, o calor é transmitido por vibrações moleculares. Autores como Buchanan e Abu (2017) destacam a importância da condução térmica, não apenas na ignição de superfícies sólidas, mas também na resistência ao fogo de barreiras e elementos estruturais.

Esses autores ainda relatam que a transferência de calor por condução é regida pela Lei da Condução Térmica, que é uma aplicação da Segunda Lei da Termodinâmica. A equação fundamental associada à condução térmica é conhecida como a Lei de Fourier, expressa pela Equação 2.1.

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

onde:

Q é a taxa de transferência de calor;

A é a área de seção transversal;

k é a condutividade térmica do material (W/mK);

$\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura ao longo da direção do fluxo de calor.

De acordo com Buchanan (2002), é possível resolver a equação de condução térmica utilizando métodos analíticos, numéricos ou gráficos. Essa equação pode ser ampliada para incluir duas ou três dimensões, conforme necessário.

2.3.1.2 Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre através do deslocamento de fluidos, que podem ser gases ou líquidos. Este processo desempenha um papel significativo na propagação das chamas e no deslocamento ascendente de fumaça e gases quentes durante um incêndio em um espaço confinado (Buchanan e Abu, 2017).

Conforme mencionado por Kimura (2009), esse processo de transferência térmica ocorre na superfície de contato entre dois materiais que estão em estados físicos distintos, sendo possível que os fluidos estejam no estado líquido ou gasoso.

A convecção é um processo de transferência de calor causado pelo movimento de fluidos, incluindo gases e líquidos. Este mecanismo é importante, pois, conforme observado por Drysdale (1998), a maior parte do calor liberado pela superfície em chamas é transportada inicialmente por movimentos convectivos durante o início de um incêndio, influenciando significativamente sua evolução. Além disso, a convecção é responsável por direcionar a fumaça e os gases quentes para o teto ou para fora de uma área em chamas.

Os cálculos de transferência de calor por convecção geralmente envolvem a transferência de calor entre a superfície de um sólido e um fluido circundante que aquece ou resfria o material sólido. Segundo Buchanan e Abu (2017), a taxa de aquecimento ou resfriamento depende de vários fatores, especialmente a velocidade do fluido na superfície. Para condições dadas, a transferência de calor é geralmente considerada diretamente proporcional à diferença de temperatura entre os dois materiais, de modo que o fluxo de calor por unidade de área q'' (W/m^2) é calculado pela Equação 2.2.

$$q = h_c \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

onde:

q é o fluxo de calor por unidade de área W/m^2 ;

h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \cdot K$);

ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície do sólido e o fluido ($^{\circ}C$ ou K).

A magnitude do coeficiente de transferência de calor por convecção (h_c) pode variar em função de diversos fatores, como a configuração da superfície, as características do fluxo de ar e a espessura da camada limite térmica. De acordo com o Eurocode 1 (CEN, 2002), recomenda-se adotar um valor de $25 W/m^2 \cdot K$ para o coeficiente h_c em condições de exposição ao fogo padrão. Em situações de incêndio envolvendo hidrocarbonetos, esse valor pode ser elevado para $50 W/m^2 \cdot K$, enquanto, para cenários de incêndio natural ou fogo paramétrico, também abordados no Eurocode 1, a recomendação é de $35 W/m^2 \cdot K$.

2.3.1.3 Radiação

Seito *et al.* (2008) relatam que no processo de radiação, como representado na Figura 11, ocorre a transferência de calor na forma de ondas, movendo-se de um corpo a alta temperatura em direção à superfície de outro corpo com temperatura mais baixa. Nesse contexto, a parte aquecida do componente estrutural induz um fluxo de calor que se dirige para o interior do elemento, promovendo seu aquecimento.

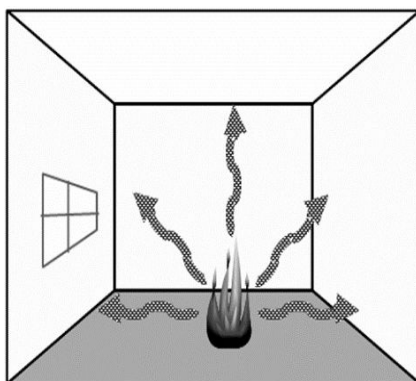


Figura 11 – Fluxo de calor radiante (Seito *et al.*, 2008).

A transferência de calor por radiação refere-se à propagação de energia térmica no espaço, na forma de ondas eletromagnéticas. Ao contrário da condução e convecção, que exigem um meio material para a transferência de calor, a radiação térmica pode ocorrer no vácuo, pois não necessita de um meio material para se propagar, conforme mencionado por Buchanan (2002). A Figura 12 mostra o processo de propagação por radiação.

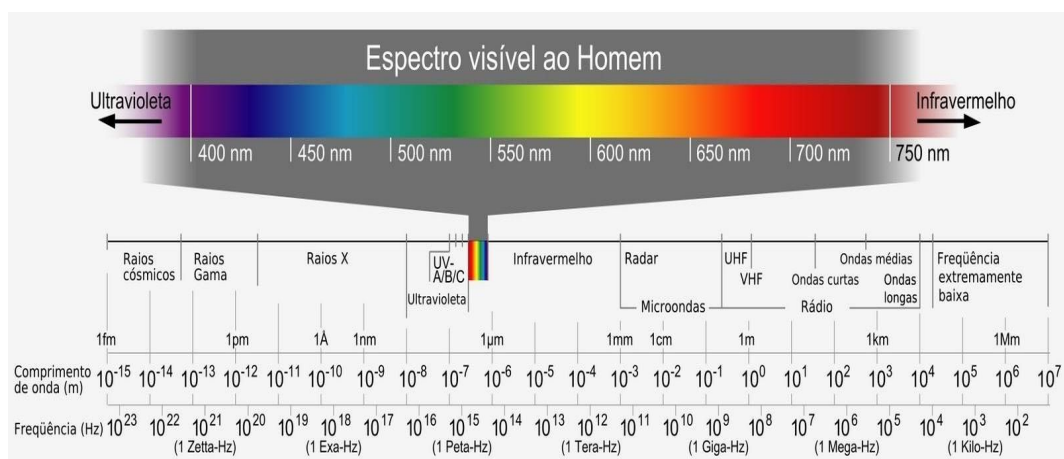


Figura 12 – Faixas de radiações eletromagnéticas (Araújo, 2013).

Conforme apontado por Drysdale (1998), a convecção pode prevalecer em situações de baixas temperaturas, dependendo dos valores específicos da emissividade e do coeficiente de transferência de calor por convecção. Entretanto, acima de 400°C, a radiação emerge como o principal mecanismo de propagação de calor. Aproximadamente a 550°C, um objeto começa a emitir radiação suficiente para tornar-se visível, e à medida que a temperatura aumenta, a coloração é alterada. A Tabela 3 detalha essa mudança na coloração.

Tabela 3 – Tonalidades visíveis de objetos aquecidos (Drysdale, 1998).

Temperatura (°C)	Aparência
550	Primeiro brilho vermelho visível
700	Vermelho escuro
900	Vermelho cereja
1100	Laranja
1400	Branco

O fluxo térmico resultante da radiação, medido em watts por metro quadrado (W/m^2), de uma superfície emissora em direção a uma superfície receptora, é representado pela seguinte equação (Buchanan, 2002).

Para situações abrangentes, conforme mostrado na Figura 13, o fator de configuração que caracteriza a radiação incidindo no ponto 2, a uma distância r do ponto 1, é estabelecido pela Equação 2.3.

$$q = \cdot \cdot s (\epsilon_e^4 - T_r^4) \quad (2.3)$$

onde:

ϕ é o fator de configuração;

ϵ é a emissividade resultante das duas superfícies;

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

T_e é a temperatura absoluta da superfície emissora, em Kelvin;

T_r é a temperatura absoluta da superfície receptora, em Kelvin.

Esta equação fornece uma descrição precisa da transferência de calor entre as superfícies, fundamentando o entendimento do comportamento térmico nesse contexto.

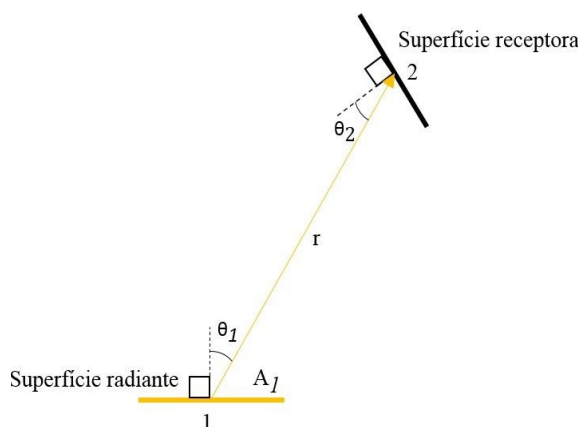


Figura 13 – Radiação incidente sobre uma superfície (Drysdale, 1998, apud Rodvalho, 2018).

No contexto específico de duas superfícies paralelas, o coeficiente de configuração ϕ para a radiação incidente em um ponto, situado a uma distância r do centro de uma superfície emissora retangular com dimensões de largura W e altura H , é expresso pela Equação 2.4.

$$\varphi = \frac{1}{90} \left[\frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \tan^{-1} \left(\frac{y}{\sqrt{1+x^2}} \right) + \frac{y}{\sqrt{1+y^2}} \tan^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{1+y^2}} \right) \right] \quad (2.4)$$

onde:

$$x = H/2r \text{ e } y = W/2r.$$

2.3.2 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)

Conforme especificado pelo Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro na Nota Técnica 2-19 (CBMERJ, 2019), o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) representa o tempo mínimo de resistência ao fogo que um elemento construtivo deve apresentar quando exposto a um incêndio-padrão.

De forma resumida, Seito *et al.* (2008) explicam que o TRRF representa o tempo mínimo em minutos, acordado pela sociedade, durante o qual elementos construtivos devem manter integridade, estanqueidade e isolamento (quando necessário) em testes laboratoriais padronizados de ação térmica.

A NBR 14432 (ABNT, 2000) define que o período de resistência ao fogo de construções é determinado com base em sua finalidade, visando assegurar a evacuação segura dos ocupantes em situações de incêndio, garantir a segurança das equipes de combate ao fogo e reduzir ao mínimo os danos a edificações vizinhas. A Tabela 4 exibe um resumo das diretrizes estabelecidas na NBR 14432 (ABNT, 2000).

Tabela 4 – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF): NBR 14432 (ABNT, 2000).

OCUPAÇÃO/ USO	ALTURA DA EDIFICAÇÃO				
	h≤6m	6m≤h≤12m	12m≤h≤23m	23m≤h≤30m	h>30m
Residência	30	30	60	90	120
Hotel	30	60	60	90	120
Supermercado	60	60	60	90	120
Escritório	30	60	60	90	120
Shopping	60	60	60	90	120
Escola	30	30	60	90	120
Hospital	30	60	60	90	120
Igreja	60	60	60	90	120

O TRRF, um tempo fictício, é considerado, em conjunto com uma curva-padrão igualmente fictícia, como um indicador para alcançar a temperatura máxima no elemento de aço durante um incêndio real, conforme ilustrado na Figura 14, Seito *et al.* (2008). Tipicamente, este intervalo de tempo é estabelecido por consenso em cada sociedade, sem a necessidade de cálculos.

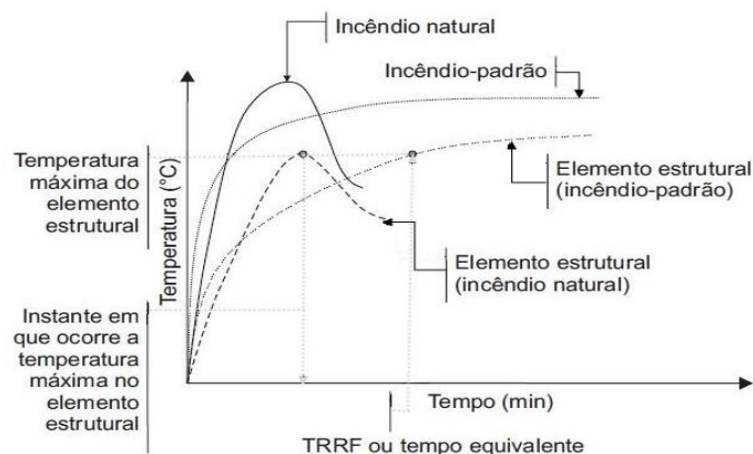


Figura 14 – Conceito de Tempo Equivalente ou TRRF (Seito *et al.*, 2008).

O uso do método do tempo equivalente oferece a vantagem de reduzir a ação térmica quando incorporados dispositivos de proteção ativa, promovendo, assim, a adoção desses dispositivos conhecidos por sua eficácia, Seito *et al.* (2008).

De acordo com a NT 2-2019 do Corpo de Bombeiros do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ), o tempo equivalente é definido como o intervalo de tempo, estabelecido a partir do incêndio-padrão, que é requerido para que um componente estrutural alcance a temperatura máxima prevista durante o incêndio natural em consideração.

2.4 ANÁLISE TERMOESTRUTURAL

A Engenharia Civil é uma disciplina intrinsecamente ligada à segurança, durabilidade e eficiência das estruturas construídas. No contexto contemporâneo, a crescente preocupação com a eficiência energética e o conforto térmico tem impulsionado a necessidade de uma análise mais abrangente e integrada. Nesse sentido, a análise termoestrutural surge como uma ferramenta de grande valor para

avaliar o comportamento simultâneo das estruturas frente às variações térmicas e cargas estruturais.

A análise termoestrutural não se restringe apenas a compreender como as estruturas respondem a cargas mecânicas, mas estende-se à compreensão de como fatores térmicos influenciam diretamente seu desempenho. Esta abordagem integrada torna-se particularmente relevante em um cenário onde as mudanças climáticas e a busca por construções mais sustentáveis demandam uma compreensão mais profunda das interações entre temperatura, deformação e segurança estrutural.

No contexto da análise termoestrutural, é fundamental possuir informações sobre as resistências à compressão e tração, assim como o módulo de elasticidade em relação à temperatura, além da relação tensão-deformação do material.

Dentre os elementos que impactam nas propriedades dos materiais, incluem-se:

- A taxa de aquecimento representa a velocidade com que o elemento estrutural é aquecido, sendo importante para evitar danos estruturais significativos ao concluir a elevação da temperatura antes do *flashover*;
- A geometria do elemento, considerando a presença de vazios internos ou sua forma geométrica, que afeta a propagação ao longo do elemento;
- O teor de umidade, que exerce influência nas propriedades térmicas do concreto;
- A taxa de resfriamento, que pode ser lenta ou rápida, influenciando a resistência residual do elemento estrutural.

No estudo de Santos *et al.* (2017), foi realizada uma análise numérica para analisar o desempenho termoestrutural de alvenaria feita com blocos cerâmicos. Essa análise foi realizada e baseada em pesquisas experimentais conduzidas por Rosemann (2011) e Rigão (2012), utilizando o *software ABAQUS* e uma abordagem de macromodelagem com elementos do tipo C3D8R.

Os resultados indicaram que o comportamento termoestructural da alvenaria é diretamente influenciado pelo nível de carga, resultando em uma diminuição na resistência ao fogo. Vale ressaltar que o carregamento não foi levado a um ponto próximo da ruptura. Além disso, as curvas de temperatura obtidas com os modelos numéricos mostraram uma boa concordância com as curvas de temperatura obtidas, considerando o tempo de exposição ao fogo.

Ingham (2009) destaca que paredes de alvenaria expostas a temperaturas entre 250°C e 300°C apresentam alterações visíveis em sua coloração e tonalidade, indicando o início de transformações térmicas no material. Com o aumento mais expressivo da temperatura, na faixa de 600°C a 800°C, observa-se uma deterioração significativa dos componentes, resultando em uma redução da resistência à compressão. Além disso, o autor alerta para os riscos associados ao resfriamento brusco dessas estruturas, uma vez que a rápida dissipação do calor pode provocar choque térmico, favorecendo o surgimento de fissuras e, em casos extremos, levando ao colapso da alvenaria.

Rosemann (2011) analisou paredes de alvenaria cerâmica estrutural sem carga, variando revestimento e preenchimento, constatando que a aplicação de argamassa aumentou a resistência ao fogo em 80%, enquanto o preenchimento dos blocos com areia elevou esse valor em 100%, ressaltando a necessidade de ensaios com carga estrutural para uma avaliação mais completa. Russo e Sciarrett (2012) estudaram alvenarias novas e antigas sob temperaturas de 300°C e 600°C, observando fissuras na interface da alvenaria e microfissuras nos tijolos e argamassa em temperaturas mais altas, além de significativa redução da resistência à compressão, destacando a importância de avaliar a espessura da camada danificada.

Russo e Sciarretta (2013) examinaram o comportamento térmico de alvenarias tradicionais à base de barro, utilizando o Eurocode 2 para verificar a redução gradual da resistência à compressão com o aumento da temperatura, apontando a carência de dados sobre materiais não cimentícios e sugerindo estudos detalhados sobre cisalhamento e compressão.

Leite *et al.* (2016) compararam normativas internacionais para alvenaria estrutural exposta ao fogo, analisando os critérios americanos, europeus e

australianos, e enfatizando a necessidade de regulamentações específicas para o Brasil, considerando materiais, dimensões e métodos de fabricação locais.

Silva (2016) aborda o modelo de construção de prédios caixão, onde a alvenaria assume a função estrutural em vez do concreto armado, utilizando blocos de concreto ou cerâmicos unidos por argamassa de cimento e areia, com possível adição de saibro ou cal. O estudo foca no comportamento da estrutura sob altas temperaturas, constatando que as áreas das paredes danificadas pelo fogo apresentam redução significativa na resistência, podendo levar ao colapso da estrutura. A segurança e estabilidade do edifício ficam comprometidas em incêndios.

Rodovalho *et al.* (2017) investigaram gradientes térmicos em paredes de alvenaria estrutural com aquecimento em uma face, desenvolvendo um modelo numérico. Observaram que paredes com revestimento possuem maior resistência ao fogo, e que o tipo de curva de aquecimento dos gases influencia o gradiente térmico, sendo mais acentuado em curvas rápidas. Locais como bibliotecas e indústrias de materiais inflamáveis apresentam maior risco estrutural em incêndios.

Menegon *et al.* (2018) utilizaram termografia infravermelha para analisar miniparedes de 90 cm de altura por 80 cm de comprimento, construídas com dois tipos de blocos cerâmicos (B1 e B2) de resistência similar, mas dimensões diferentes. As miniparedes foram submetidas a 900 °C por 4 horas. A termografia revelou que o bloco B1 aqueceu mais rapidamente devido à sua espessura menor, enquanto o B2 retardou a passagem de calor por ser mais espesso. A termografia infravermelha mostrou-se útil na análise de alvenaria estrutural em altas temperaturas.

Menegon *et al.* (2019) investigaram o comportamento de paredes de alvenaria estrutural expostas a altas temperaturas, com foco no controle de dilatação. Foram utilizados blocos cerâmicos de diferentes tipos, com resistências de 7 e 10 MPa e larguras de 14 cm, além de blocos de 7 MPa com 19 cm de largura. As juntas foram preenchidas com argamassas convencionais, com resistências variando de 4,60 a 10 MPa. O experimento foi dividido em três etapas, incluindo a exposição de mini paredes a ensaio térmico. Os resultados mostraram que as paredes ensaiadas apresentaram bom desempenho, com fissuras verticais

na face exposta ao calor. Além disso, os deslocamentos longitudinais e a ampliação das espessuras dos blocos foram analisados, evidenciando que juntas mais flexíveis favorecem um sistema mais deformável. Os autores destacaram a complexidade do comportamento térmico da alvenaria, devido às diversas variáveis envolvidas, tornando difícil a aplicação de um único parâmetro de estudo.

Rigão *et al.* (2021) ensaiaram blocos cerâmicos estruturais e revestimentos de argamassa estrutural industrializada (resistência nominal de 4 MPa), analisando seu comportamento térmico e estrutural. Utilizaram blocos cerâmicos prismáticos e pequenas paredes maciças, assentados com argamassa estrutural. As argamassas expostas a 400°C apresentaram resistência residual de 39% a 56,6% em compressão, mas as expostas a 900°C não mostraram resistência significativa, além de deterioração ao ar livre, indicando degradação. Os blocos cerâmicos, com resistência média à compressão de 11,5 MPa (desvio padrão de 1,14), perderam menos resistência em comparação aos prismas cerâmicos, que sofreram maior perda de resistência que a pequena parede moldada com os mesmos materiais e submetida ao mesmo aquecimento.

2.5 ANÁLISE TÉRMICA

A análise térmica em alvenaria visa compreender como os materiais e a construção de uma estrutura afetam sua eficiência térmica. Este tipo de análise é importante para se entender como a alvenaria responde às variações de temperatura e como ela pode afetar o desempenho térmico de um edifício.

Conforme destacado por Ferreira *et al.* (2019), o resultado da análise térmica consiste essencialmente na determinação das temperaturas em cada nó da malha estrutural da peça. Vale ressaltar que a temperatura se mantém uniforme longitudinalmente, enquanto a variação térmica ocorre predominantemente na seção transversal da peça.

Segundo Costa e Silva (2006), ao analisar estruturas sujeitas a elevadas temperaturas, é fundamental compreender as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais. Massa específica, calor específico e condutividade térmica são propriedades essenciais em análises exclusivamente térmicas.

O trabalho realizado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) utilizou o *software* Abaqus para simular a transferência de calor em prismas de blocos cerâmicos estruturais submetidos a incêndios. A análise seguiu os critérios da norma ISO 834:1999, sendo aplicada a curvas padrão de incêndio. Os resultados indicaram a eficiência do sistema construtivo cerâmico em retardar a propagação do calor e atender critérios mínimos de isolamento térmico, contribuindo para o dimensionamento de alvenarias resistentes ao fogo, conforme destacado por Quispe (2022).

A análise das propriedades térmicas dos materiais de alvenaria é um ponto muito importante para se entender como a energia térmica é transferida através das estruturas construídas. Diferentes materiais de alvenaria, como tijolos, blocos de concreto, pedras e cerâmicas, apresentam características únicas que influenciam diretamente na capacidade de isolamento térmico das construções.

Conforme destacado por Seito *et al.* (2008), os tijolos, por exemplo, são conhecidos por sua capacidade de reter calor devido à sua alta massa térmica. Essa característica faz com que os tijolos possam absorver calor durante o dia e liberá-lo lentamente à noite, proporcionando uma estabilização térmica no interior dos edifícios. Por outro lado, materiais como blocos de concreto celular podem oferecer propriedades isolantes mais eficientes, reduzindo a transferência de calor.

Além disso, as propriedades intrínsecas dos materiais, como condutividade e efusividade térmica, resistência térmica e difusividade térmica, influenciam diretamente na eficiência do isolamento. Compreender estes fatores é essencial para selecionar os materiais de alvenaria mais adequados, levando em consideração as condições climáticas locais e os objetivos específicos de eficiência térmica do edifício.

2.6 MODELAGEM NUMÉRICA

Chandrupatla e Belegundu (2012) relatam que o método dos elementos finitos é uma ferramenta poderosa para resolver uma ampla variedade de problemas de engenharia, desde análises estruturais até problemas de fluxo de calor e fluido. Os autores ainda mencionam que, com avanços na tecnologia de computação e sistemas CAD, pode-se modelar problemas complexos com

facilidade, permitindo a análise de várias configurações antes da construção de protótipos. Para acompanhar esses avanços, é fundamental entender a teoria, técnicas de modelagem e aspectos computacionais do método. Isto envolve a discretização de uma região complexa em elementos finitos, no qual as propriedades reais e relações de equações, leis ou princípios físicos são expressos em termos de valores desconhecidos nos vértices dos elementos. A solução dessas equações resulta em uma aproximação do comportamento do contínuo.

Vários estudos numéricos vêm sendo realizados para examinar, de maneiras diversas, a transferência de calor em paredes de alvenaria quando expostas a temperaturas elevadas. Essas investigações podem considerar diferentes abordagens de modelagem. De acordo com Lourenço (1996), a escolha entre as estratégias de modelagem da alvenaria, como micromodelagem detalhada, micromodelagem simplificada e macromodelagem depende do nível de precisão desejado e da complexidade existente. Cada abordagem possui sua relevância e aplicações específicas, e a seleção adequada deve ser baseada nos objetivos e resultados almejados, no nível de precisão necessário, bem como na capacidade computacional e no tempo de processamento disponível.

Na micromodelagem detalhada, as unidades e a argamassa são representadas por elementos contínuos, enquanto a interface entre as mesmas é delineada por elementos descontínuos. São considerados o módulo de elasticidade, o coeficiente de *Poisson* e, opcionalmente, propriedades não-lineares. A interface representa um plano potencial de fissuração/deslizamento, com uma rigidez inicial reduzida para evitar a interpenetração do meio contínuo, permitindo uma análise mais minuciosa da interação entre as unidades, a argamassa e a interface.

Na micromodelagem simplificada, são representadas apenas as unidades e interfaces. As unidades, modeladas como elementos contínuos, incorporam as juntas de argamassa, enquanto a interface é concentrada em elementos específicos. Cada junta é tratada como uma interface média, e as dimensões das unidades são ampliadas para manter as características geométricas da alvenaria. Essa abordagem considera a alvenaria como um conjunto de unidades elásticas conectadas por linhas potenciais de fratura e deslizamento nas juntas, embora haja

uma perda de precisão devido à desconsideração do efeito de *Poisson* na argamassa.

No modelo de macromodelagem, o bloco e a argamassa são considerados componentes integrados da alvenaria, compartilhando propriedades homogêneas. Não há distinção entre a unidade e a argamassa; em vez disso, a alvenaria é tratada como um meio homogêneo, contínuo e anisotrópico.

Rodovalho (2018) realizou simulações numéricas para avaliar o isolamento térmico de prismas de alvenaria em situações de incêndio. Utilizando micromodelagem no *software* ABAQUS/CAE, a autora considerou a interação fluido-estrutura para representar o ar nos vazados dos blocos. As propriedades térmicas foram validadas experimentalmente, e a simulação aplicou uma curva de temperatura na face exposta ao fogo, próxima à considerada na ISO 834-1 (1999).

O estudo destacou a contribuição positiva do revestimento para o isolamento térmico, observando que prismas revestidos superaram o critério de 60 minutos, sendo o aumento mais significativo (59%) para prismas com revestimento em ambas as faces. O uso de revestimento apenas na face exposta resultou em um aumento de cerca de 23% no tempo de isolamento térmico em relação aos prismas sem revestimento.

Bolina *et al.* (2020) conduziram uma análise numérica-experimental sobre a influência da geometria de blocos cerâmicos na resistência ao fogo de paredes de alvenaria. Utilizando o *software* ANSYS MECHANICAL, criaram modelos computacionais bidimensionais com uma malha de elementos variando de 1 mm a 50 mm de lado. Os parâmetros essenciais, como condutividade térmica, calor específico, densidade e coeficientes de convecção, foram derivados de experimento.

Após a calibração do modelo, a extrapolação computacional mostrou que blocos com maior porcentagem de vazios oferecem melhor isolamento térmico do que blocos mais espessos, aumentando o tempo de resistência ao fogo. Em temperaturas mais baixas, a influência dos vazios é mínima. A análise térmica revelou que a convecção e a radiação dentro dos blocos são mais significativas que a condução no material sólido, confirmando o ar confinado como excelente isolante.

Conforme Oliveira *et al.* (2021), a ausência de normas e dados documentados sobre as propriedades dos materiais em elevadas temperaturas, essenciais para calibrar e validar modelos numéricos, evidencia a necessidade de mais pesquisas na área de alvenaria durante incêndios.

Com o auxílio de ferramentas de análise estrutural por meio de *softwares*, têm-se desenvolvido diversas maneiras para simular distintos cenários e combinações de cargas. Essa abordagem contribui para aprimorar a confiabilidade dos experimentos laboratoriais, permitindo comparações entre os modelos numéricos e os experimentais, conforme observado por Pedroti (2007).

O estudo desenvolvido por Cerqueira *et al.* (2023), investigou o comportamento estrutural de blocos prensados e queimados de cerâmica vermelha por meio de ensaios laboratoriais e modelagem numérica com elementos finitos. Os blocos foram submetidos a compressão axial, e os dados foram comparados com os resultados simulados. Os autores ressaltaram que os blocos apresentam desempenho adequado para construções de até três pavimentos, indicando viabilidade estrutural relevante.

Garcia (2000) realizou ensaios numéricos por meio do *software ANSYS*, empregando elementos de chapa PLANE 42. Nesse estudo, foram criados quatro modelos de paredes em várias configurações, considerando restrições nodais de deslocamento nas direções X e Y na base, conforme ilustrado nas Figuras 15 a 22, que apresentam os resultados obtidos. Nas Tabela 5 a 8, são apresentados dados considerados dos modelos.

Tabela 5 – Dados do Modelo da Parede 1 (Garcia, 2000).

Parede composta por dois materiais	Bloco e argamassa
Características do bloco	$E_b = 817,2 \text{ kN/cm}^2$ e $\nu_b = 0,25$
Características da argamassa	$E_a = 1090 \text{ kN/cm}^2$ e $\nu_a = 0,20$
Espessura da parede	Igual a 7 cm
Tensão aplicada de 3,60 MPa	Equivalente a uma força de 300kN

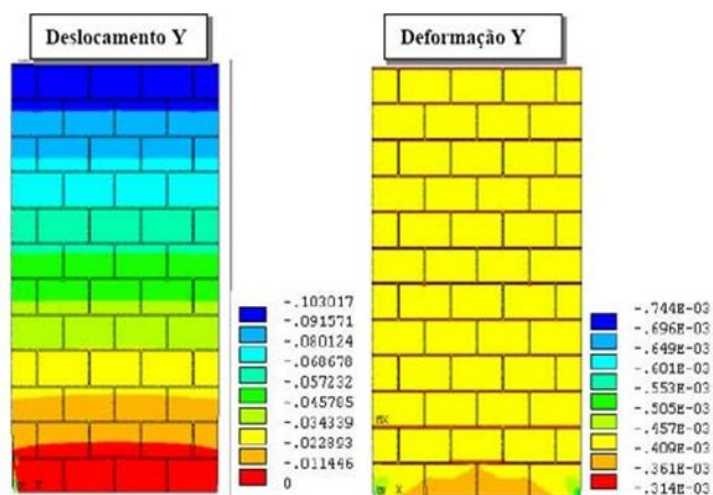


Figura 15 – Deslocamentos e Deformações em Y – Parede 1 (Garcia, 2000).

Na Figura 15, observa-se que os deslocamentos na parte superior da parede foram mais expressivos, diminuindo gradualmente em direção à base. Ainda na parede 1, Garcia (2000) destacou uma concentração de tensões nas uniões verticais preenchidas com argamassa, atribuída à maior rigidez desse material em relação ao bloco (indicado pela cor laranja) na Figura 16.

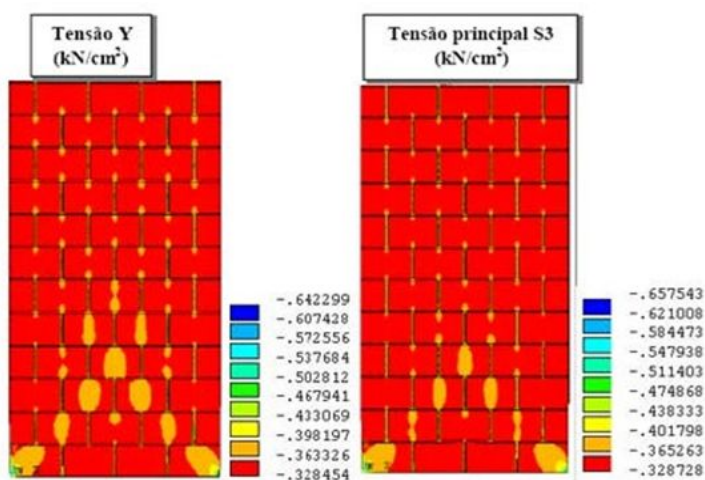


Figura 16 – Tensões em Y e Tensões Principais S3 – Parede 1 (Garcia, 2000).

Tabela 6 – Dados do Modelo da Parede 2 (Garcia, 2000).

Parede composta por um material	Alvenaria
Características do material	$E_{alv} = 1090 \text{ kN/cm}^2$ e $\nu_{alv} = 0,20$
Espessura da parede	Igual a 7 cm
Tensão aplicada de 3,60 MPa	Equivalente a uma força de 300kN

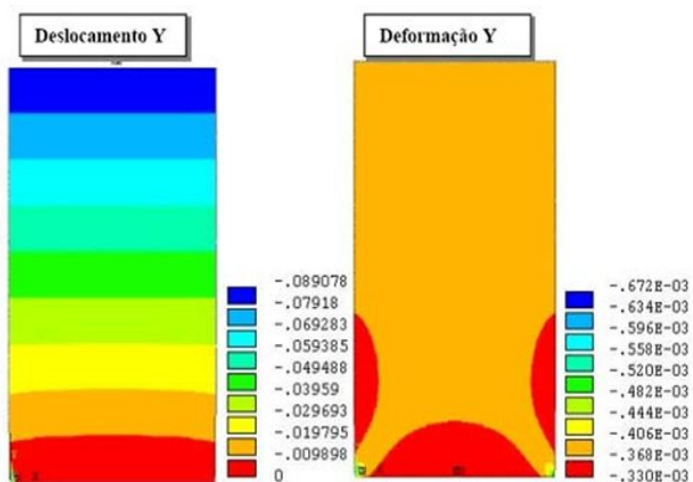


Figura 17 – Deslocamentos e Deformações em Y – Parede 2 (Garcia, 2000).

Os deslocamentos em Y da parede 2 são menores quando comparados com o modelo da parede 1.

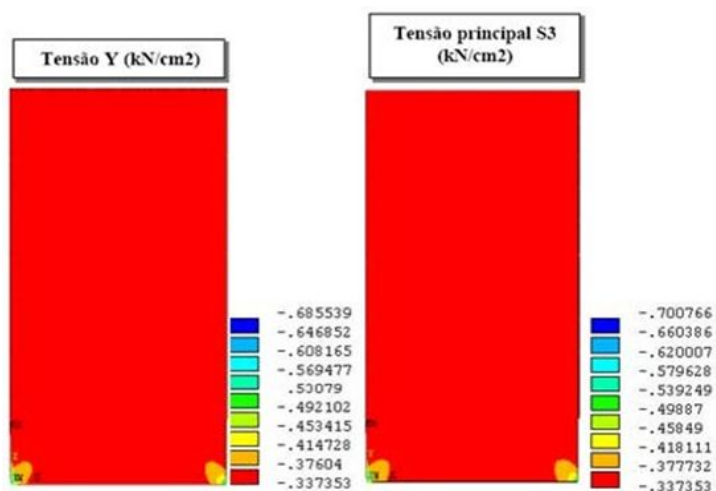


Figura 18 – Tensões em Y e Tensões Principais S3 – Parede 2 (Garcia, 2000).

Tabela 7 – Dados do Modelo da Parede 3 (Garcia, 2000).

Parede composta por três materiais	Bloco com e sem graute e argamassa
Características do bloco grauteado	$E_{bg} = 849,3 \text{ kN/cm}^2$ e $\nu_{bg} = 0,25$
Características do bloco sem graute	$E_{bsg} = 817,2 \text{ kN/cm}^2$ e $\nu_b = 0,25$
Características da argamassa	$E_a = 1090 \text{ kN/cm}^2$ e $\nu_a = 0,20$
Espessura da parede	Igual a 9,8 cm
Tensão aplicada de 2,55 MPa	Equivalente a uma força de 300kN

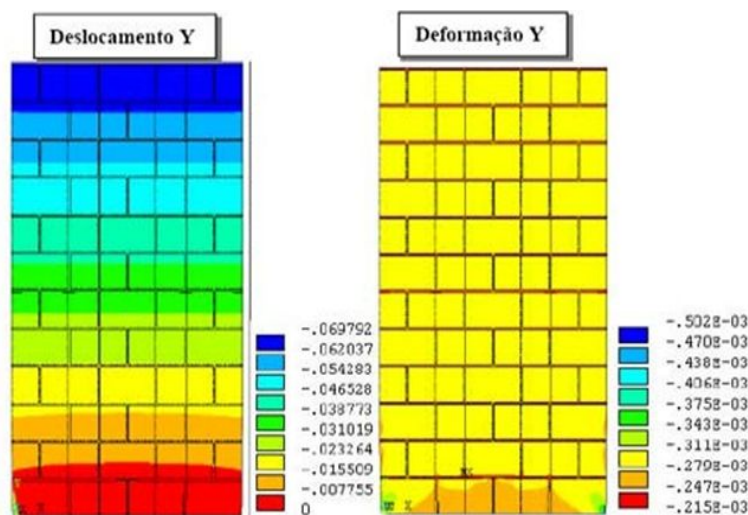


Figura 19 – Deslocamentos e Deformações – Parede 3 (Garcia, 2000).

Na Figura 20, é possível notar uma maior absorção de tensões nas juntas verticais devido às disparidades nas rigidezes dos materiais. Na análise, é evidente que nos blocos vazios, por sua menor rigidez em comparação com os blocos grauteados, não ocorre concentração de tensões (Garcia, 2000).

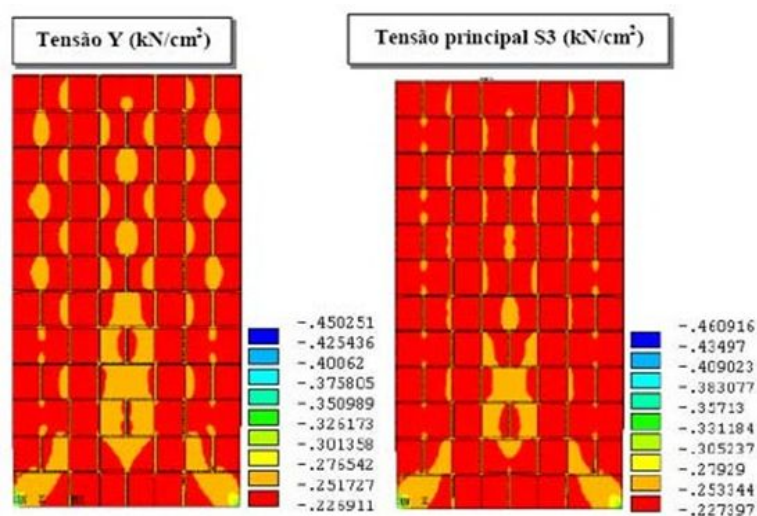


Figura 20 – Tensões em Y e Tensões Principais S3 – Parede 3 (Garcia, 2000).

Tabela 8 – Dados do Modelo da Parede 4 (Garcia, 2000).

Parede composta por un material	Alvenaria grauteada
Características do bloco grauteado	$E_{alv} = 1241,7 \text{ kN/cm}^2$ e $\nu_{alv} = 0,25$
Espessura da parede	Igual a 9,8 cm
Tensão aplicada de 2,55 MPa	Equivalente a uma força de 300kN

Na Figura 21, é possível observar a deformação na direção Y e seu respectivo deslocamento, destacando a distribuição dessa deformação na parte inferior (representada pela cor vermelha).

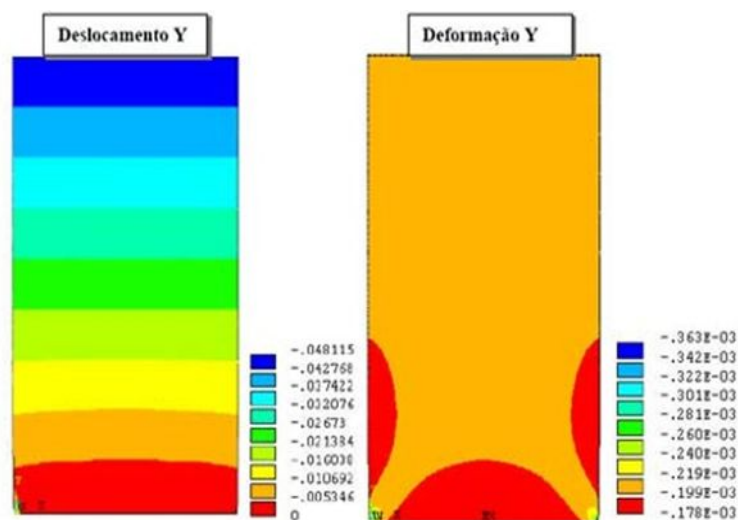


Figura 21 – Deslocamentos e Deformações – Parede 4 (Garcia, 2000).

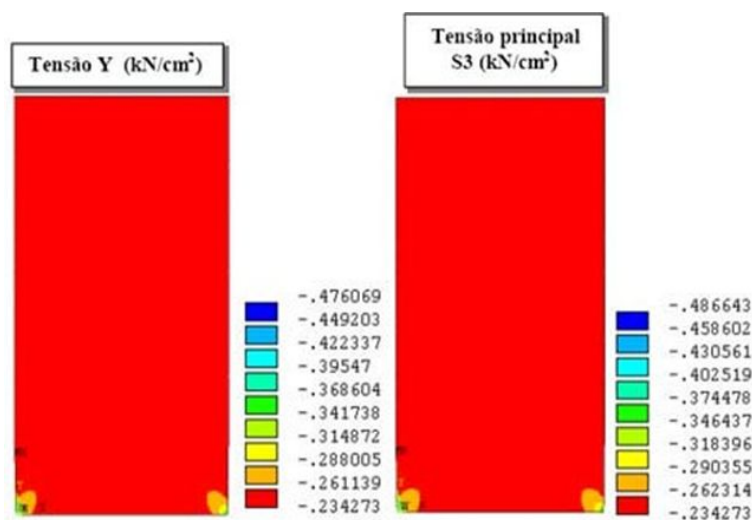


Figura 22 – Tensões em Y e Tensões Principais S3 – Parede 4 (Garcia, 2000).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e as metodologias que serão utilizadas nesta pesquisa para alcançar os resultados a serem obtidos nos ensaios realizados.

O programa experimental deste trabalho visou determinar as propriedades físico-mecânicas da massa argilosa e do BCEPQ, além de avaliar o desempenho dos blocos isolados e integrados em prismas e pequenas paredes. O estudo contemplou ensaios térmicos e termoestrutural em prismas. A simulação numérica foi realizada utilizando um *software* baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF).

3.1 ASPECTOS GERAIS

Durante a execução deste estudo, foram realizados ensaios para caracterização da matéria-prima (argila), cujos procedimentos são detalhados a seguir. A preparação das amostras envolveu etapas fundamentais para garantir a uniformidade e representatividade do material, incluindo coleta da matéria-prima, secagem ao ar livre, destorroamento dos grãos, homogeneização por quarteamento, peneiramento, mistura e separação das amostras, além da formação da massa cerâmica para a realização dos ensaios. Dentre os testes realizados, destacam-se Proctor Normal, limites de Atterberg, absorção de água, massa específica aparente seca, entre outros. A Figura 23 ilustra este processo.



Figura 23 – Fluxograma do Preparo da Matéria-prima (Autoria própria, 2025).

3.1.1 Preparo da Matéria-prima

A coleta da matéria-prima foi realizada na empresa Arte Cerâmica Sardinha, localizada na Rua Francisco Mota, 77, no distrito de São Sebastião, em Campos dos Goytacazes. Este local é caracterizado pela organização e separação dos materiais cerâmicos em diferentes baias, facilitando o processo de coleta e análise das amostras.

Durante a visita, observou-se que os materiais estavam distribuídos em baias distintas, sendo algumas destinadas a uma mistura de areia fina e outras contendo argilas de diferentes composições. As argilas apresentavam variações significativas em sua coloração, com tonalidades que variavam entre vermelha e branca.

Foram coletados aproximadamente 30 kg de areia fina e 40 kg de cada tipo de argila, com o objetivo de caracterizá-los posteriormente por meio de diversos ensaios laboratoriais. As amostras foram cuidadosamente selecionadas e acondicionadas em sacos plásticos, de modo a preservar suas características originais e garantir a confiabilidade dos resultados obtidos nas análises subsequentes. Esses ensaios visam investigar as propriedades físicas, químicas e mecânicas das argilas, contribuindo para um melhor entendimento do comportamento dos materiais cerâmicos oriundos da região.

Após a coleta, as amostras de argila e areia foram separadas, identificadas e submetidas ao processo de secagem ao ar livre, seguindo as orientações da NBR 6457 (ABNT, 1986). Este método é amplamente reconhecido por sua eficácia em eliminar o excesso de umidade, homogeneizar a massa e prevenir a formação de aglomerados. Além disso, a secagem natural favorece a decomposição de materiais orgânicos, resultando em argilas de maior qualidade para aplicações cerâmicas. A Figura 24 mostra o processo de secagem dos materiais.



Figura 24 – Secagem das Amostras (Autoria própria, 2024).

Posteriormente, as amostras secas foram submetidas ao destorroamento, realizado de forma manual, para garantir a desagregação dos torrões em partículas menores. Esse procedimento foi conduzido com cuidado para preservar as características originais do material e evitar a perda de frações finas, conforme especificado pela NBR 7181 (ABNT, 2016). O destorroamento foi essencial para obter uma massa homogênea e assegurar a qualidade nas etapas subsequentes de moldagem e caracterização granulométrica. Isso facilita o manuseio e a preparação posterior da amostra, garantindo uma distribuição mais uniforme dos materiais durante a homogeneização.

O quarteamento foi realizado para reduzir as amostras de material ao tamanho adequado para os ensaios, mantendo a representatividade do material original. Conforme estipulado pela NBR 7181 (ABNT, 2016), a amostra foi dividida de forma homogênea, garantindo que cada parte representasse fielmente a composição e as características do material. Isso é um fator muito importante que visa garantir a representatividade da amostra nos testes subsequentes.

Realizou-se o peneiramento das amostras, segundo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7181 (ABNT, 2016). O peneiramento ajuda a obter uma granulometria mais uniforme e adequada para os ensaios. Essa etapa é fundamental para caracterizar o material de forma precisa e assegurar que os ensaios subsequentes sejam representativos e confiáveis, evitando interferências de partículas de tamanho inadequado para os testes realizados.

A mistura foi realizada para garantir a homogeneidade do material, evitando segregação das partículas. Após a mistura, a separação das amostras foi realizada para assegurar a representatividade do material, utilizando técnicas apropriadas de divisão, como divisores mecânicos ou manuais, conforme as exigências dos ensaios. Este procedimento segue as orientações da NBR 6502 (ABNT, 1995).

A formação da massa argilosa foi realizada com base na preparação e mistura dos componentes, buscando homogeneidade e plasticidade adequadas para os processos de conformação. O material argiloso foi inicialmente peneirado para remoção de partículas grosseiras e, em seguida, misturado com a quantidade de água necessária para atingir a consistência ideal. Esta massa argilosa representa a matéria-prima que foi analisada e testada durante esta pesquisa.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Com as amostras preparadas, os ensaios de caracterização foram realizados no LECIV-UENF e em outros laboratórios da instituição. Estes ensaios determinaram parâmetros essenciais para a produção dos blocos cerâmicos, abrangendo aspectos físicos, químicos, mineralógicos e térmicos. Os métodos utilizados para análise destes materiais cerâmicos e suas propriedades são detalhados nos tópicos seguintes.

3.2.1 Caracterização física

Os procedimentos para caracterização física dos materiais compreenderam a determinação dos limites de consistência e a realização do ensaio de compactação Proctor normal.

A NBR 7181 (ABNT, 2016) estabelece os procedimentos normativos para a execução de ensaios de caracterização de solos, incluindo métodos para determinação da granulometria, limites de consistência e análise de compactação, entre outros parâmetros essenciais.

Os limites de consistência, compostos pelo limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP), são parâmetros fundamentais para a classificação e análise do comportamento dos solos, conforme definido pela

NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016). Estes ensaios foram realizados no LECIV/UENF, seguindo os procedimentos normativos para garantir precisão e confiabilidade nos resultados. A determinação desses limites possibilita avaliar a plasticidade e a consistência do solo em diferentes condições de umidade, fornecendo dados fundamentais para a caracterização do material e o desenvolvimento de projetos geotécnicos.

O ensaio de compactação Proctor Normal foi realizado de acordo com as diretrizes da NBR 7182 (ABNT, 2016), com o objetivo de determinar a densidade seca máxima e a umidade ótima de compactação do solo estudado. O procedimento consiste em compactar o solo em camadas utilizando uma energia padronizada, ajustando progressivamente a umidade durante o processo.

A densidade seca é calculada a partir da relação entre a massa e o volume do solo compactado. Este ensaio é de fundamental importância na engenharia civil, pois permite avaliar a qualidade dos solos e fornece parâmetros essenciais para o planejamento e execução de projetos de construção.

3.2.2 Análise Química

Utilizou-se a técnica de Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDS), acoplada ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). O EDS é uma ferramenta complementar útil para entender a mineralogia e a distribuição elementar, auxiliando na previsão do comportamento térmico e mecânico do material cerâmico.

Para a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), as amostras cerâmicas foram preparadas em forma de pequenos fragmentos, retiradas dos prismas rompidos nas temperaturas de 30°C a 100°C (uma amostra para cada temperatura), com dimensões aproximadas de 5 a 10 mm, de modo a preservar as características morfológicas da superfície e permitir a observação de aspectos como porosidade, microtrincas, zonas vitrificadas e textura superficial.

Os fragmentos foram cuidadosamente limpos com pincel para remoção de partículas soltas e posteriormente fixados sobre suportes metálicos utilizando fita condutiva de carbono. Em seguida, as amostras foram submetidas à metalização

por pulverização catódica, recebendo uma fina camada de ouro, com espessura controlada, suficiente para garantir a condução elétrica na superfície e evitar o acúmulo de cargas durante a varredura com o feixe de elétrons. Esse preparo é essencial para assegurar imagens de alta resolução e evitar artefatos na análise morfológica.

Essa técnica permite identificar qualitativa e semiquantitativamente os elementos químicos presentes na superfície da amostra, auxiliando na compreensão da mineralogia e do comportamento termoestrutural do material. As análises foram realizadas no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV/UENF). A Figura 25 mostra o equipamento utilizado no presente trabalho.



Figura 25 – Equipamento *TESCAN MIRA* do LAMAV/UENF
(Autoria própria, 2024).

3.2.3 Análise Mineralógica

A análise das fases mineralógicas das massas cerâmicas deste estudo foi realizada no LECIV/UENF utilizando o equipamento de Difração de Raios X, modelo AXRD POWDER DIFRACTION SYSTEM da marca PROTO MANUFACTURING, mostrado na Figura 26.

As amostras foram coletadas do centro dos prismas rompidos para cada temperatura (30°C a 1000°C). Após a coleta, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 110 °C por um período de 24 horas, com a finalidade de eliminar a umidade livre e evitar interferências nas análises subsequentes.

Após a secagem, as amostras foram fragmentadas manualmente com auxílio de almofariz e pistilo. Essa redução no tamanho das partículas é fundamental para a melhora na resolução dos picos difratométricos e para a homogeneidade da amostra.

A fração fragmentada manualmente foi peneirada em peneira de malha 325 (45 μm), sendo selecionado o material passante para compor as amostras destinadas à difração de raios X. A escolha dessa malha proporciona partículas com tamanho ideal para o empacotamento uniforme no suporte do equipamento, favorecendo a nitidez dos picos obtidos no difratograma.

Com uma potência de 600 Watts, este equipamento oferece uma resolução de pico com largura total à meia altura (FWHM) inferior a $0,04^\circ 2\theta$ e precisão angular menor que $\pm 0,02^\circ \Delta 2\theta$ em toda a faixa angular, garantindo resultados de alta qualidade comparáveis aos de equipamentos de laboratório de maior porte.

Os parâmetros utilizados para as amostras do DRX são: variação angular de 5° a 80° , passo de $0,02^\circ$ e tempo de passo de 3 segundos.



Figura 26 – Equipamento AXRD BENCHTOP (LAMAV/UENF, 2025).

3.2.3 Quantitativo de corpos de prova

Foram utilizadas diferentes amostras para a caracterização dos blocos cerâmicos. Nos ensaios de Absorção de Água (AA) e Massa Específica Aparente (MEA), realizados de acordo com a NBR 15270-2 (ABNT, 2023), foram analisadas seis amostras representativas. Já para a análise por Difração de Raios X (DRX),

complementada com Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), foram utilizadas quatro amostras, submetidas previamente a temperaturas de 30 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C, sendo uma amostra correspondente a cada condição térmica avaliada.

Para a avaliação das características geométricas, foram analisadas 13 amostras, em conformidade com as especificações da NBR 15270-3 (ABNT, 2023). Nos ensaios de resistência à compressão, aproximadamente 136 amostras foram testadas: 30 blocos na Universidade Federal de Viçosa (UFV), um bloco e meio de cinco fiadas, com foco na análise termoestrutural; 66 blocos destinados à confecção de pequenas paredes no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV/UENF); e 30 blocos utilizados na montagem dos prismas de cinco fiadas, um bloco inteiro e 1 bloco cortado ao meio, também no LECIV/UENF.

Esses ensaios seguiram os procedimentos estabelecidos pelas normas NBR 15270-1 (ABNT, 2023) e NBR 16868-2 (ABNT, 2020), respectivamente. Para a análise térmica, foram utilizadas aproximadamente 10 gramas de amostra passante na peneira #325 (abertura de 45 µm). A Tabela 9 mostra o resumo da quantidade de amostras utilizadas na pesquisa.

Tabela 9 – Quantitativo de Amostras Utilizadas na Pesquisa.

Características	Ensaio	Quantitativo de CPs por ensaio
Geométricas	-	13 unidades
Físicas	AA	6 unidades
	MEA	6 unidades
Mecânicas	RC	140 unidades
Microestruturais	DRX/EDS	4 unidades
	TG	10g aproximadamente
Total de CPs dos Ensaio		Aproximadamente 170

3.2.4 Análise Térmica

A *International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry* (ICTAC) define que a análise térmica compreende um conjunto de técnicas que visam medir uma propriedade física de uma substância e/ou seus produtos de reação em relação à temperatura, enquanto a substância é submetida a um programa controlado de variação térmica.

Foi realizada apenas a ATG, utilizando o analisador simultâneo ATG-ATD da marca *Shimadzu*, modelo DTG-60H, operando com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. O ensaio foi realizado no Laboratório de Polímeros do LAMAV/UENF, empregando material previamente passante na peneira #325, garantindo uma granulometria adequada para a análise.

3.2.4.1 Condutividade e Efusividade Térmica

No Laboratório de Física do Centro de Ciência e Tecnologia (CCT) da UENF, foram realizados ensaios para a determinação da condutividade e efusividade térmica das amostras de blocos cerâmicos. Estes ensaios têm como objetivo caracterizar o desempenho térmico dos materiais, fornecendo dados essenciais para análises termoestruturais. A metodologia empregada seguiu recomendações do manual do equipamento, visando garantir a precisão dos resultados, considerando fatores como a homogeneidade das amostras e as condições ambientais controladas durante os testes.

Para a obtenção dos resultados, utilizou-se o equipamento C-THERM, que mede condutividade térmica e efusividade de forma não destrutiva. Foram analisadas 20 amostras representativas dos blocos cerâmicos, cujos dados embasaram a modelagem numérica e auxiliaram na compreensão do comportamento térmico em diferentes temperaturas. A Figura 27 apresenta o equipamento utilizado.

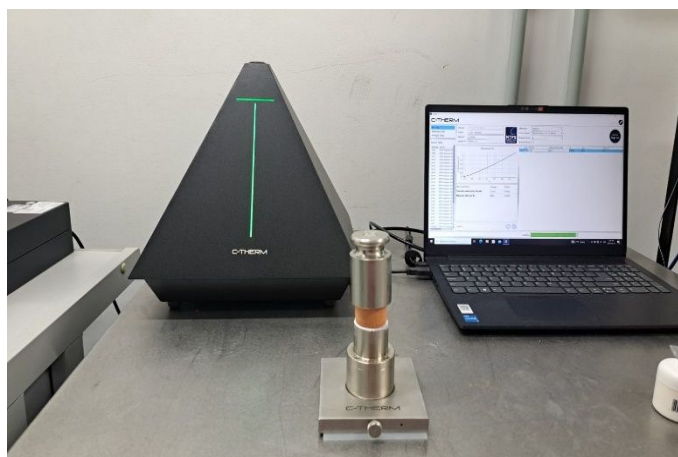


Figura 27 – Equipamento C-*THERM* do Laboratório de Física do CCT/UENF (Autoria própria, 2024).

3.2.5 Análise Termoestrutural

Os ensaios de compressão simples foram realizados em prismas cerâmicos na Universidade Federal de Viçosa (UFV), com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico dos BCEPQ após exposição a diferentes temperaturas. Devido à complexidade dos ensaios e ao seu alto custo, foram ensaiados quatro prismas, submetidos às seguintes temperaturas:

- Prisma 1: temperatura ambiente, aproximadamente 30°C;
- Prisma 2: aquecido a 600°C;
- Prisma 3: aquecido a 800°C; e
- Prisma 4: aquecido a 1000°C.

Estes ensaios permitem compreender a influência do aquecimento na resistência à compressão dos blocos cerâmicos, contribuindo para análises estruturais e de segurança em edificações expostas a altas temperaturas.

O aquecimento dos prismas foi realizado em um forno elétrico da marca *ALDIEN*, com capacidade máxima até 1200°C. O processo de aquecimento seguiu uma taxa controlada de 5°C/min, garantindo uma elevação gradual da temperatura até os valores definidos para cada prisma. Essa taxa de aquecimento foi adotada para minimizar choques térmicos e simular condições mais próximas das exposições térmicas reais.

O forno elétrico *ALDIEN*, projetado para ensaios termo-mecânicos, possui dimensões internas de 250 x 450 x 600 mm e conta com isolamento de manta de fibra cerâmica de 4,0" de espessura, garantindo alta eficiência térmica. Equipado com resistores em *KANTHAL A1* espiral suportados em canais, alcança uma temperatura máxima de aquecimento de 1200 °C, operando com uma potência de 8000 W. O controle térmico é realizado por três controladores de temperatura *NOVUS N480D*, associados a três termopares tipo "K" com capacidade para até 1260 °C. Sua estrutura é fabricada em aço carbono, e a abertura frontal removível facilita o acesso ao interior do equipamento. A Figura 28 mostra o esquema do forno utilizado neste trabalho.

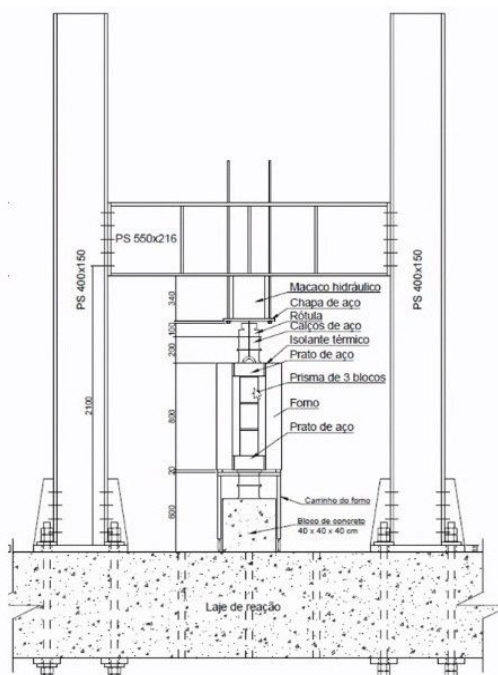


Figura 28 – Esquema do Forno Elétrico Utilizado na Pesquisa (UFV, 2024).

Após atingirem as temperaturas estabelecidas, os prismas foram mantidos no forno por um tempo mínimo de 30 minutos, conforme recomendado pela NT 02:2019 do Corpo de Bombeiros do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ), que trata do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF). Essa permanência visa assegurar a homogeneização térmica do material antes da realização dos ensaios mecânicos. Em seguida, os prismas foram rompidos, permitindo a avaliação da resistência residual do material após a exposição ao calor. A Figura 29 mostra o forno elétrico utilizado no processo de aquecimento dos prismas.



Figura 29 – Forno Elétrico ALDIEN da UFV (Autoria própria, 2024).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS

Os blocos utilizados neste trabalho foram coletados na empresa Arte Cerâmica Sardinha, localizada na Rua Francisco Mota, 77, no distrito de São Sebastião, em Campos dos Goytacazes/RJ.

3.3.1 Propriedades Geométricas dos Blocos

As dimensões geométricas foram analisadas em blocos e meios-blocos selecionados aleatoriamente do lote, seguindo as especificações da NBR 12118 (ABNT, 2013).

O bloco inteiro possui medidas de 28cm de comprimento, 14cm de largura e 6cm de altura, além de ter um encaixe de 0,5cm de altura. O meio-bloco possui medidas de aproximadamente 14 cm de comprimento (uma vez que estes blocos são cortados ao meio por uma serra mármore, logo, alguns milímetros são perdidos neste processo), 14cm de largura, 6cm de altura e uma borda de encaixe de 0,5cm de altura, igual ao bloco inteiro.

Para as medições, utilizou-se um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, permitindo a obtenção precisa das medidas em três pontos distintos de cada face referentes à largura, altura e comprimento dos blocos e meios-blocos. Complementando o processo, uma balança digital com precisão de 0,01g foi empregada para determinar a massa, com o apoio de um escalímetro para auxiliar nas verificações.

A norma NBR 15270-2 (ABNT, 2023) estipula as especificações dimensionais para os blocos estruturais, com o objetivo de evitar a reprovação de lotes que apresentem variações consideráveis em relação às dimensões padrão estabelecidas previamente. Os blocos cerâmicos a serem utilizados nesta pesquisa têm suas dimensões detalhadas na Figura 30.

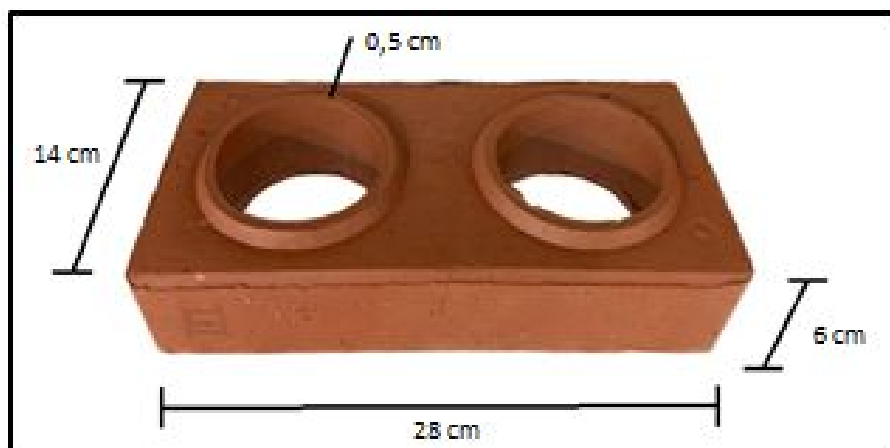


Figura 30 – Dimensões dos Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2024).

As características físicas e mecânicas e da microestrutura em corpos de prova de cerâmica vermelha foram determinados pelos seguintes ensaios: índice de absorção de água (AA), massa específica aparente (MEA), resistência à compressão de bloco (f_{bk}), resistência à compressão de prismas (f_{pk}), resistência à compressão de pequenas paredes (f_{ppk}), módulo de deformação e coeficiente de *Poisson*, microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme detalhado nos tópicos seguintes.

3.3.2 Propriedades Tecnológicas dos Blocos

3.3.2.1 Absorção de Água (AA)

O ensaio de absorção de água de um material cerâmico é um procedimento para avaliar sua capacidade de absorver água, realizado ao imergir uma amostra do material em água por um período definido. A diferença de massa antes e depois do ensaio determina a quantidade de água absorvida, o que é importante para entender propriedades como resistência e estabilidade dimensional do material.

Para determinar os parâmetros do Índice de Absorção de Água (AA), foram ensaiados seis blocos cerâmicos, seguindo as diretrizes da NBR 15270-1 (ABNT, 2023). As amostras foram colocadas em estufa a 110°C por 24 horas para determinação da massa seca (m_s), conforme as orientações da NBR 15270-1 (ABNT, 2023).

Após este período, as amostras foram retiradas da estufa, resfriadas em temperatura ambiente e, em seguida, pesadas para registrar a massa seca (m_s). Posteriormente, as amostras foram imersas em água por 24 horas, e o excesso de água foi cuidadosamente removido antes de realizar a pesagem em uma balança de precisão para obter a massa úmida (m_u). O índice de Absorção de Água (AA) foi calculado utilizando a Equação 3.2.

$$AA(\%) = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (3.2)$$

onde:

AA representa a absorção de água, expressa em porcentagens (%);

m_u é a massa úmida do corpo de prova, após imersão por um tempo determinado, em gramas (g);

m_s é a massa seca do corpo de prova, em gramas.

3.3.2.2 Massa Específica Aparente (MEA)

A densidade aparente é uma característica relevante no contexto da produção cerâmica, influenciando diretamente a resistência à flexão, a absorção de água e a retração linear das peças. Foi calculada a densidade aparente dos blocos extrudados, prensados e queimados por meio da Equação 3.3.

$$MEA = \frac{M_s}{V_a} \quad (3.3)$$

onde:

MEA representa a massa específica aparente, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3) ou quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);

M_s é a massa do bloco cerâmico seco em estufa, em gramas (g);

V_a é o volume do bloco cerâmico queimado ou seco, incluindo vazios e poros, em centímetros cúbicos (cm^3).

3.3.2.4 Resistência Característica à Compressão de Bloco (f_{bk})

Conforme especificado na NBR 15270-1 (ABNT, 2023), é necessário testar pelo menos 13 blocos cerâmicos de cada tipo produzido, e os resultados devem

ser avaliados em relação aos requisitos estabelecidos para blocos estruturais na mesma norma. A NBR 15270-1 (ABNT, 2023), no Anexo C, menciona que a resistência característica à compressão (f_{bk}) deve ser de, no mínimo, 4,0 MPa.

Antes de os blocos serem rompidos, os mesmos foram capeados com pasta de cimento, seguindo as recomendações da NBR 12118 (ABNT, 2013). O objetivo do capeamento é nivelar e regularizar as superfícies das extremidades dos blocos, promovendo uma distribuição uniforme das tensões durante o ensaio de compressão simples. A Figura 31 mostra o processo de capeamento destes blocos cerâmicos.



Figura 31 – Blocos capeados (Autoria própria, 2024).

Os ensaios de compressão simples foram realizados na Prensa SOLOTEST, ISO 4230, Série 13833, localizada no LECIV/UENF, mostrada na Figura 32.



Figura 32 – Prensa SOLOTEST (Autoria própria, 2024).

3.3.2.5 Módulo de Deformação dos Blocos

O módulo de deformação longitudinal e o coeficiente de *Poisson* dos blocos cerâmicos foram estimados com base na NBR 16868-1 (ABNT, 2020). De acordo com esta norma, o módulo de elasticidade pode ser obtido utilizando a Equação 3.4.

$$E = 600 \cdot f_{pk} \quad (3.4)$$

onde:

E é o módulo de deformação longitudinal, geralmente em GPa;

f_{pk} é a resistência característica dos blocos e tijolos cerâmicos, geralmente em MPa.

Os ensaios térmicos nos blocos não puderam ser realizados de forma isolada devido à prioridade dada aos ensaios térmicos nos prismas.

3.4 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PRISMAS

De acordo com as recomendações da NBR 16868-1 (ABNT, 2020), a altura mínima exigida para a realização dos ensaios em prismas deve ser de dois blocos de altura, critério que foi atendido na configuração adotada. Este procedimento possibilitou a obtenção de dados representativos sobre o comportamento estrutural dos blocos cerâmicos quando submetidos a esforços de compressão.

Os prismas foram constituídos por cinco fiadas de um bloco e meio, sem a utilização de argamassa de assentamento entre as fiadas, permitindo que a avaliação refletisse exclusivamente o comportamento do material cerâmico. Os ensaios foram realizados no laboratório da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em conformidade com as diretrizes normativas.

A não observância da excentricidade no ensaio de compressão simples pode introduzir momentos fletores indesejáveis, resultando em uma distribuição não uniforme das tensões e na redução da resistência aparente do material. Isso pode modificar o modo de ruptura, tornando-o inclinado ou assimétrico, além de dificultar a comparação com outros ensaios e a calibração de modelos numéricos.

Para minimizar estes efeitos, é essencial garantir o alinhamento adequado da carga, utilizar dispositivos de centralização e monitorar possíveis desvios, assegurando a confiabilidade dos resultados experimentais. A Figura 33 mostra a montagem dos prismas de 5 fiadas.

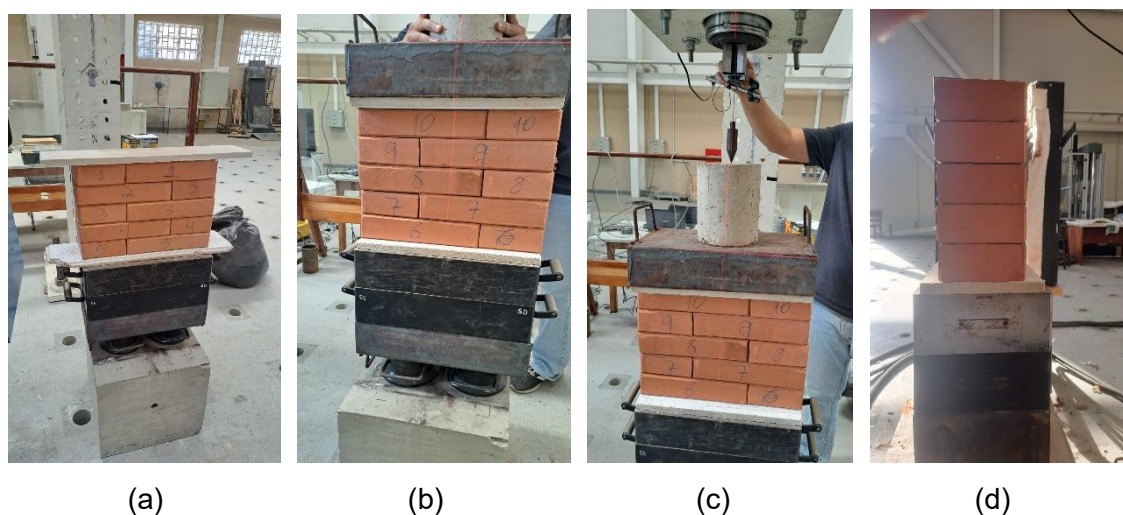


Figura 33 – Montagem dos prismas (Autoria própria, 2024).

3.4.1 Resistência à Compressão de Prismas (f_{pk})

A norma NBR 16868-3 (ABNT, 2020) define o método de ensaio para determinação da resistência à compressão de prismas, diretriz adotada nesta pesquisa. As resistências individuais e médias dos prismas, bem como as resistências características à compressão (f_{prk}), foram calculadas de acordo com as fórmulas estabelecidas pela referida norma.

A NBR também estabelece o teste de, no mínimo, seis prismas para garantir a confiabilidade dos resultados. Neste trabalho, esse requisito foi rigorosamente atendido, assegurando a representatividade estatística e a validade das análises comparativas.

Os prismas foram capeados em conformidade com as recomendações estabelecidas pela NBR 12118 (ABNT, 2013). Segundo a norma, os materiais mais comuns para o capeamento incluem argamassa de enxofre, argamassa de cimento e areia, argamassa e água, pasta de cimento, resinas epóxi ou outros materiais sintéticos, dependendo das condições e do objetivo do ensaio. Neste trabalho, optou-se pela utilização de cimento CPV/ARI combinado com água, garantindo

uma superfície uniforme e adequada para a aplicação da carga durante os ensaios, visando não comprometer a resistência dos prismas.

3.4.2 Módulo de Deformação e o Coeficiente de *Poisson* dos Prismas

O módulo de deformação longitudinal e o coeficiente de *Poisson* dos prismas foram estimados conforme a NBR 16868-1 (ABNT, 2020), que estabelece parâmetros para a avaliação de elementos estruturais de alvenaria. Neste estudo, o coeficiente de *Poisson* foi adotado com base na Tabela 1 da referida norma, assumindo o valor de 0,15. A resistência característica média dos prismas foi determinada em 1,68 MPa, resultando em um módulo de deformação estimado de aproximadamente 1008 MPa, conforme mostrado na Equação 3.5.

$$E = 600 \cdot f_{pk} \quad (3.5)$$

onde:

E é o módulo de deformação longitudinal, geralmente em GPa;

f_{pk} é a resistência característica dos blocos e tijolos cerâmicos, em MPa.

Devido à indisponibilidade de equipamentos específicos para a obtenção experimental do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de *Poisson*, os valores adotados foram estimados conforme a recomendação da norma mencionada. A impossibilidade de mensuração direta dessas propriedades se deve à ausência de instrumentos como extensômetros ou sistemas de medição de deformação durante os ensaios. Assim, a adoção de valores normativos possibilitou a continuidade da pesquisa sem comprometer a confiabilidade dos dados.

3.5 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PEQUENAS PAREDES

3.5.1 Resistência à Compressão de Pequenas Paredes (f_{ppk})

Os procedimentos que foram adotados para realização dos ensaios em pequenas paredes tiveram como base a NBR 16868-3 (ABNT, 2020). As resistências características das pequenas paredes foram calculadas de acordo com esta norma. A norma menciona que, para análise da resistência à compressão, o

quantitativo deve ser de, no mínimo, três paredes, e esta pesquisa baseou-se na referida norma. A Figura 34 mostra a montagem das pequenas paredes.

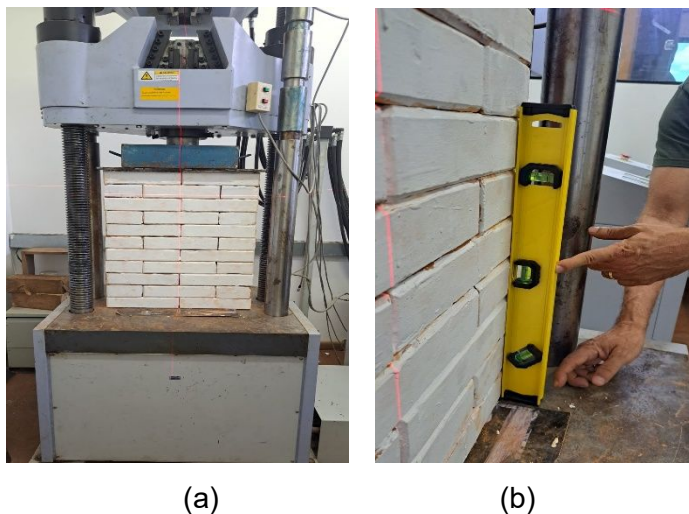


Figura 34 – Pequenas Paredes (Autoria própria, 2024).

3.5.2 Módulo de Deformação e Coeficiente de *Poisson* de Pequenas Paredes

O módulo de deformação e o coeficiente de *Poisson* em blocos cerâmicos, prismas e pequenas paredes são determinados por ensaios laboratoriais específicos, conforme as diretrizes da NBR 16868-3 (ABNT, 2020). O módulo de deformação, ou módulo de elasticidade, é obtido por meio da análise da relação entre a variação da tensão aplicada e a deformação resultante.

Já o coeficiente de *Poisson* representa a relação entre a deformação lateral e a longitudinal quando o material é submetido a uma tensão axial, sendo determinado a partir de ensaios de tração ou compressão uniaxial, nos quais as deformações são medidas simultaneamente.

O módulo de deformação longitudinal e o coeficiente de *Poisson* para pequenas paredes foram estimados da mesma forma que para os blocos e prismas, seguindo os mesmos critérios e metodologias previamente mencionados.

3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Com o objetivo de examinar a microestrutura dos materiais, incluindo suas texturas e morfologias, foi utilizado a técnica de microscopia eletrônica de varredura para analisar as amostras desta pesquisa.

Para realizar esta técnica analítica, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura da marca *TESCAN MIRA*, localizado no LAMAV/UENF. As amostras foram preparadas e desidratadas em uma estufa a uma temperatura de (105 ± 5) °C por um período de 24 horas, antes de serem fixadas em suportes utilizando fita de carbono e submetidas à metalização com paládio.

3.7 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O *software* utilizado para a modelagem e análise numérica foi o *ANSYS 2024 R1*, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (FEM), e se caracteriza por ser uma ferramenta amplamente reconhecida por sua robustez na simulação de problemas estruturais e térmicos. A utilização deste *software* permitiu a aplicação de condições de contorno realistas, além da definição de um refinamento adequado da malha de elementos para capturar os fenômenos físicos envolvidos na análise termoestrutural dos prismas.

O *ANSYS 2024* é um *software* de simulação numérica que aprimora a geração de malhas, otimiza algoritmos e integra inteligência artificial para maior eficiência. Neste estudo, é utilizado na modelagem termoestrutural de prismas cerâmicos submetidos a altas temperaturas, permitindo avaliar seu desempenho mecânico e térmico.

A modelagem numérica foi realizada em 4 prismas de cinco fiadas de blocos cerâmicos sem o uso de argamassa de assentamento entre as fiadas, nas temperaturas de 30°C, 600°C, 800°C e 1000°C, permitindo uma análise mais detalhada do comportamento estrutural do material sob diferentes condições de temperaturas. Para garantir maior precisão na simulação, foi utilizado o elemento *Hex Dominant Mesh* (Malha Hexaédrica Dominante), que possibilita uma melhor representação da geometria e uma distribuição mais uniforme dos esforços ao longo da estrutura.

A malha hexaédrica dominante (*Hex Dominant Mesh*) caracteriza-se pela predominância de elementos hexaédricos no preenchimento de volumes tridimensionais. Esse tipo de malhagem visa combinar a elevada qualidade numérica dos elementos hexaédricos com a flexibilidade geométrica dos elementos prismáticos e tetraédricos, que são utilizados apenas onde a complexidade da geometria impede o uso exclusivo de hexaedros. Essa abordagem híbrida permite modelar com eficiência estruturas que apresentam geometrias complexas, como o prisma cerâmico utilizado nesta pesquisa, que possui superfícies de contato irregulares e variações dimensionais ao longo de seu volume.

A escolha por uma malha *Hex Dominant* justifica-se pela busca de maior precisão nos resultados da simulação, sobretudo em análises termoestruturais, onde a distribuição de tensões e fluxos de calor deve ser captada com maior fidelidade. Além disso, esse tipo de malha contribui para a redução do custo computacional, já que os elementos hexaédricos exigem menor número de integrações por volume e apresentam melhor desempenho em comparação aos elementos tetraédricos. Dessa forma, a *Hex Dominant Mesh* apresenta-se como uma solução intermediária ideal entre qualidade de resultado e viabilidade computacional.

No presente estudo, a malha *Hex Dominant* foi aplicada na modelagem numérica dos prismas de blocos cerâmicos submetidos a temperaturas elevadas, com o objetivo de simular o comportamento termoestrutural do material. Considerando as particularidades da geometria dos blocos cerâmicos extrudados e a ausência de argamassa entre as fiadas no modelo, tornou-se essencial utilizar uma estratégia de malhagem que proporcionasse bom acoplamento entre os blocos e captasse adequadamente os efeitos térmicos e mecânicos nas regiões de contato. A malha gerada apresentou elevada densidade de elementos hexaédricos nas regiões centrais dos blocos, garantindo maior precisão nas zonas de maior gradiente térmico e concentração de tensões.

Para a geração da malha no *software* ANSYS, adotou-se o método de malhagem automática com predominância hexaédrica, utilizando refinamentos locais nas regiões de maior interesse, como as interfaces entre os blocos e as bordas submetidas a variações térmicas. A malha final foi avaliada quanto à sua qualidade e convergência, apresentando valores satisfatórios de ortogonalidade e

proporção. Essa configuração permitiu a obtenção de resultados coerentes com os dados experimentais obtidos em laboratório, reforçando a importância da escolha adequada do tipo de malha para análises numéricas que envolvam transferência de calor e análise estrutural simultaneamente.

O carregamento foi aplicado na face superior do prisma, simulando a condição real dos ensaios experimentais. Além disso, o encaixe da última fiada foi retirado para reproduzir as condições práticas de teste, garantindo maior compatibilidade entre os modelos numérico e experimental.

O módulo de deformação longitudinal e o coeficiente de *Poisson* foram estimados conforme os critérios estabelecidos na norma NBR 16868-1 (ABNT, 2020). Estes parâmetros são fundamentais para a calibração do modelo numérico e para a obtenção de respostas precisas na simulação computacional, garantindo uma melhor correlação entre os resultados numéricos e experimentais.

A definição das condições de contorno é um aspecto essencial para a modelagem numérica, pois influencia diretamente a precisão dos resultados simulados e sua correlação com os ensaios experimentais. No presente estudo, as condições de contorno dos prismas de cinco fiadas foram configuradas com base nos ensaios laboratoriais, considerando os pontos de apoio, os tipos de restrições aplicadas e os carregamentos térmicos e mecânicos impostos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos na caracterização e avaliação do comportamento dos Blocos Cerâmicos Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ). Para garantir uma abordagem abrangente, os ensaios realizados foram organizados em diferentes categorias, abordando desde a análise das matérias-primas até a avaliação termoestrutural dos blocos em altas temperaturas. Inicialmente, são apresentados os ensaios físicos e químicos da matéria-prima utilizada na fabricação dos BCEPQ, incluindo análises granulométricas, ensaios de compactação, composição química e mineralógica, que fornecem um panorama detalhado das propriedades fundamentais do material.

Em seguida, são discutidos os resultados dos ensaios mecânicos e térmicos dos blocos, prismas e pequenas paredes, contemplando parâmetros como absorção de água, resistência à compressão e deformabilidade sob diferentes condições de temperatura. A análise termoestrutural, conduzida para investigar o desempenho dos blocos em temperaturas elevadas (30°C, 600°C, 800°C e 1000°C), revelou variações estruturais e mecânicas relevantes, possibilitando a identificação de modos de falha e degradação térmica.

Além dos ensaios físicos, este capítulo também aborda a modelagem numérica no *software* ANSYS 2024, utilizada para prever o comportamento dos BCEPQ sob diferentes cenários térmicos e validar os dados experimentais. Dessa forma, os resultados apresentados contribuem para um entendimento aprofundado da viabilidade dos BCEPQ na construção civil, possibilitando recomendações para aperfeiçoamento de sua aplicação estrutural.

4.1 MATÉRIA-PRIMA – ARGILA

A caracterização física envolveu a determinação dos limites de Atterberg, complementadas por ensaios de compactação Proctor normal. Essas análises permitiram avaliar a distribuição granulométrica e o comportamento do material sob compressão, fornecendo informações essenciais para o aprimoramento dos processos de fabricação.

Além disso, foram realizadas análises químicas e mineralógicas, fundamentais para identificar a composição dos constituintes e a presença de minerais que influenciam diretamente as propriedades finais do produto. Essa abordagem integrada proporcionou uma compreensão mais abrangente das características dos materiais, desde sua fase inicial como matéria-prima até sua aplicação prática na construção civil.

4.1.1 Caracterização física

Os limites de Atterberg foram determinados seguindo as diretrizes da NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016). A Figura 35 mostra os resultados obtidos no ensaio.

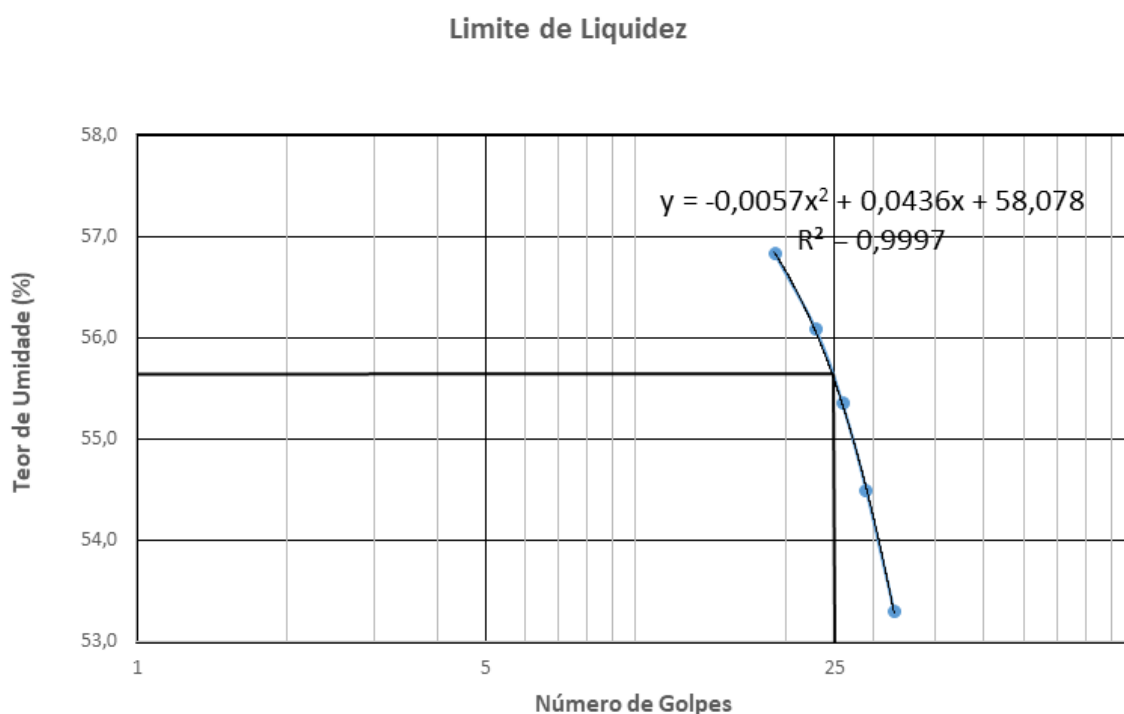


Figura 35 – Limite de Liquidez (Autoria própria, 2025).

Os limites e o índice de plasticidade foram determinados seguindo as mesmas diretrizes das normas mencionadas. A Tabela 10 mostra os resultados encontrados nos ensaios. Vale salientar que os valores da tabela estão sem casas decimais; porém, estão em conformidade com o disposto na norma mencionada.

Tabela 10 – Índices de Consistência.

Índice	Valores obtidos
Limite de Liquidez (%)	56
Limite de Plasticidade (%)	24
Índice de Plasticidade (%)	32

A caracterização física dos BCEPQ envolveu a determinação dos limites de Atterberg, conforme apresentado na Figura 35, e os índices de consistência, descritos na Tabela 10. Esses parâmetros são essenciais para avaliar a plasticidade da argila utilizada na fabricação dos blocos, influenciando diretamente sua processabilidade e desempenho mecânico.

Os resultados obtidos indicam um limite de liquidez de 56%, um limite de plasticidade de 24% e um índice de plasticidade de 32%. Esses valores são condizentes com solos argilosos de alta plasticidade, o que sugere um bom potencial para conformação cerâmica. No entanto, um índice de plasticidade elevado pode aumentar a tendência à retração durante a secagem e queima, o que deve ser considerado no controle do processo produtivo.

A importância desses parâmetros está diretamente relacionada aos objetivos da pesquisa, pois a consistência e a plasticidade da argila influenciam não apenas a moldagem dos BCEPQ, mas também sua resistência final e comportamento térmico. Um material com plasticidade inadequada pode resultar em fissuração ou deformações estruturais, comprometendo o desempenho dos blocos em altas temperaturas.

4.1.2 Compactação Proctor Normal

O ensaio de compactação Proctor Normal foi realizado seguindo as recomendações estabelecidas pela NBR 7182 (ABNT, 2016). Durante a execução do ensaio, a umidade ótima foi determinada em 24%, o que resultou em uma densidade aparente seca de 1,49 g/cm³. Estes parâmetros são essenciais para garantir a qualidade e a estabilidade do solo compactado, refletindo as condições ideais para a máxima densificação e resistência do material em obras de

engenharia. A Figura 36 mostra os resultados encontrados no ensaio de compactação.

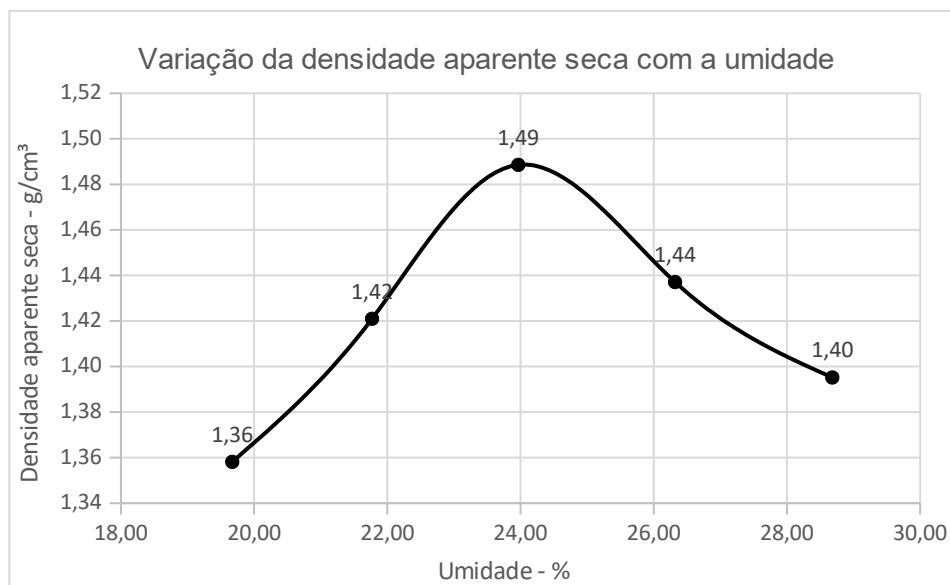


Figura 36 – Gráfico do Ensaio de Compactação (Autoria própria, 2025).

Os resultados do ensaio de compactação Proctor Normal, apresentados na Figura 36, indicam uma umidade ótima de 24% e uma densidade seca máxima de 1,49 g/cm³, valores que refletem a boa compactabilidade da argila utilizada na fabricação dos BCEPQ. Esses parâmetros são fundamentais para a produção de blocos cerâmicos com maior densidade e menor porosidade, fatores que influenciam diretamente sua resistência mecânica e estabilidade dimensional após o processo de queima.

Uma umidade ótima bem determinada permite um melhor controle da compactação, reduzindo o risco de retratação excessiva e fissuração durante a secagem e sinterização. Além disso, a densidade seca obtida sugere que o solo possui boa capacidade de conformação, favorecendo a obtenção de blocos com propriedades homogêneas e adequadas para aplicação estrutural. Esses resultados corroboram a necessidade de um controle preciso da umidade na prensagem dos BCEPQ para garantir desempenho mecânico e térmico satisfatórios, alinhando-se aos objetivos da pesquisa.

4.1.3 Análise Química

As Figuras 37, 38, 39 e 40 apresentam os resultados obtidos na análise da composição química da massa argilosa utilizada na confecção dos blocos cerâmicos em relação às temperaturas 30°C, 600°C, 800°C e 1000°C, respectivamente.

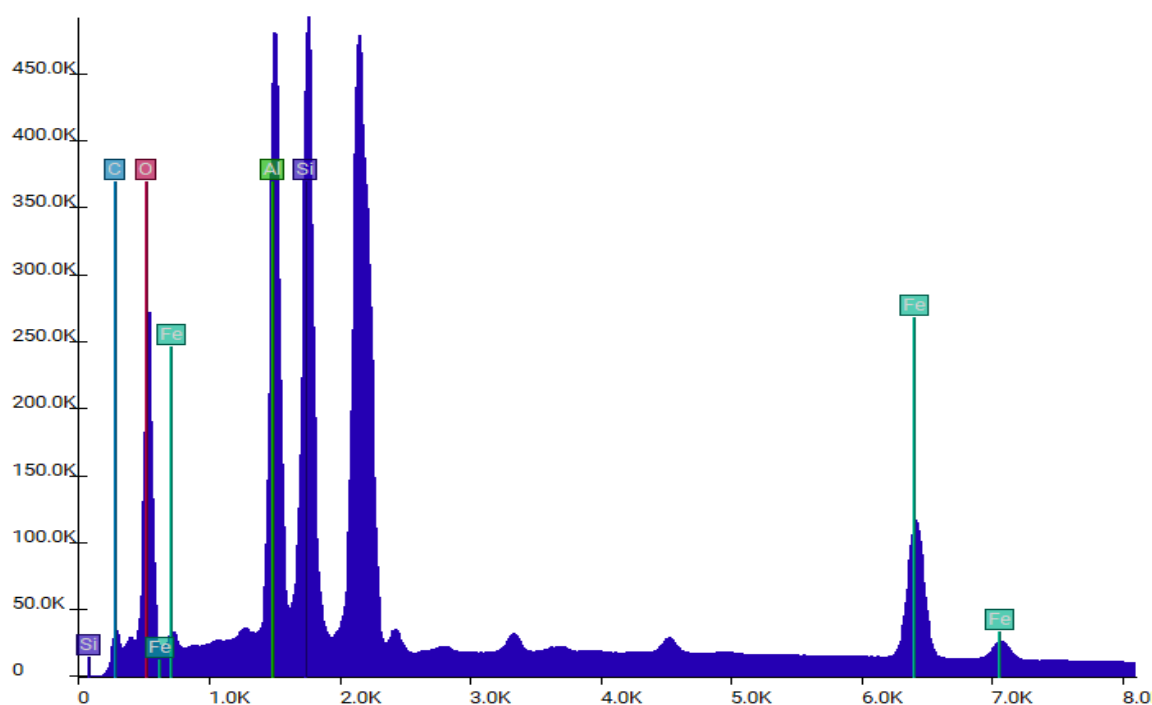


Figura 37 – Mapa *Spectron* da Temperatura de 30°C (Autoria própria, 2025).

Com base no espectro da Figura 37, observa-se a presença marcante dos elementos Silício (Si), Alumínio (Al), Oxigênio (O), Carbono (C), e Ferro (Fe), evidenciados pelos picos intensos no espectro de energia dispersiva de raios X (EDS). Os picos mais altos de Silício e Alumínio indicam a predominância de aluminos-silicatos, especialmente caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e possivelmente quartzo (SiO_2), minerais típicos de matérias-primas cerâmicas. A presença significativa de Ferro em diferentes regiões do espectro, como próximo a 0,7 keV e acima de 6 keV, sugere a ocorrência de óxidos de ferro, como hematita (Fe_2O_3) ou goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), que influenciam a coloração e as propriedades mecânicas do bloco. O Oxigênio e o Carbono presentes indicam, respectivamente, a oxidação natural dos minerais e possíveis traços de material orgânico residual ou carbonatos.

Comparando com outros estudos, a composição identificada nesta análise é coerente com os resultados de Cerqueira *et al.* (2019), que também observaram altos teores de Si, Al e Fe em blocos cerâmicos provenientes de argilas do Nordeste brasileiro. Da mesma forma, Santos *et al.* (2016) destacam que a presença de ferro está relacionada à coloração avermelhada dos blocos após a queima, sendo este um indicativo da presença de hematita. Além disso, a identificação de caulinita e quartzo foi comum em pesquisas como a de Oliveira *et al.* (2018), que analisaram blocos prensados e queimados, comprovando que tais minerais garantem boa estabilidade térmica e resistência mecânica. Assim, os dados obtidos corroboram com a literatura, reforçando a adequação da composição mineralógica da amostra para a produção de materiais cerâmicos estruturais.

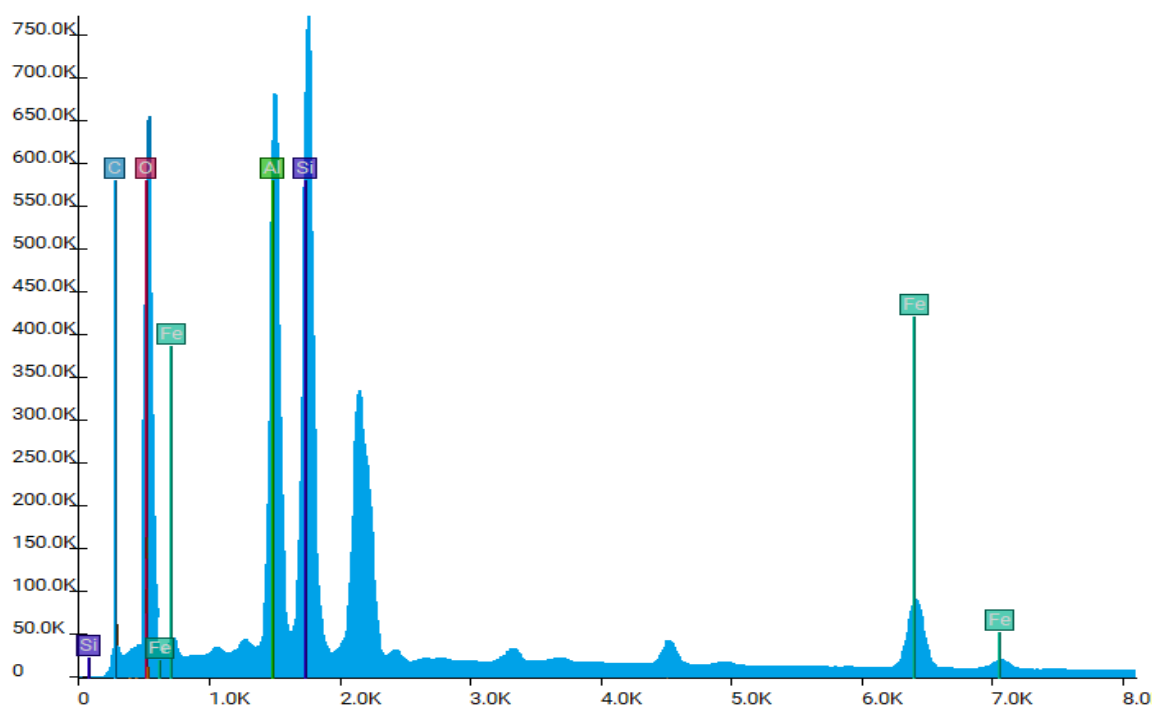


Figura 38 – Mapa *Spectron* da Temperatura de 600°C (Autoria própria, 2025).

A análise do Mapa *Spectron*, representado pela Figura 38, mostra uma composição química mais homogênea entre os espectros, especialmente quando comparada à amostra anterior. Observa-se a predominância dos elementos Silício (Si), Alumínio (Al), Oxigênio (O), Carbono (C) e Ferro (Fe). Esses elementos apontam para a presença de minerais típicos de argilas utilizadas na fabricação de blocos cerâmicos, como a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2) e óxidos de ferro, como a hematita (Fe_2O_3). Os picos mais intensos ocorrem nas faixas de 1,74

keV (Si), 1,48 keV (Al) e próximos de 6,4 keV (Fe), que confirmam a forte presença desses elementos. O carbono e o oxigênio, por sua vez, aparecem em menores energias (abaixo de 1 keV) e são esperados, tanto pela composição mineral quanto pela presença de compostos orgânicos residuais ou carbonatos.

Comparando com o espectro anterior, esta amostra revela uma possível matéria-prima mais pura ou menos alterada termicamente. Autores como Ferreira *et al.* (2013) e Souza *et al.* (2018) apontam que blocos cerâmicos com alta concentração de Si e Al tendem a apresentar melhor estabilidade dimensional e menor retração. Essa composição é compatível com argilas cauliníticas utilizadas em cerâmica estrutural, sendo adequadas para a fabricação de blocos com boas propriedades mecânicas e térmicas.

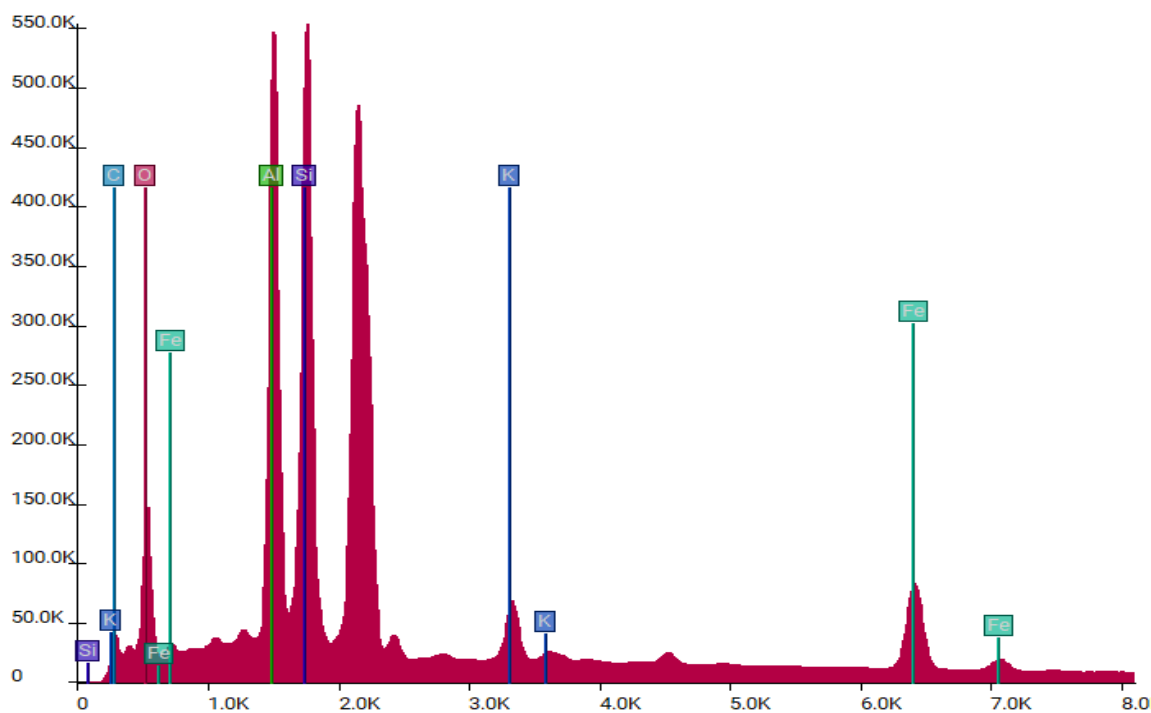


Figura 39 – Mapa Spectron da Temperatura de 800°C (Autoria própria, 2025).

Na Figura 39, a análise espectral obtida por espectroscopia de dispersão de energia (EDS), acoplada à microscopia eletrônica de varredura (MEV), revelou a presença predominante dos elementos oxigênio (O), silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe) e potássio (K), além de traços de carbono (C). Essa composição é típica de materiais cerâmicos argilosos, ricos em silicatos e aluminossilicatos, como

caulinita, illita e feldspatos (RAASK, 1985; SOUZA Santos & SOUZA Santos, 2008).

Os elevados teores de Si e Al indicam uma matriz composta principalmente por sílica e alumina, elementos fundamentais para a formação de fases cristalinas e vítreas durante a queima. A temperatura de fabricação em torno de 900 °C promove a desidroxilação dos argilominerais e o início da formação de mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), conforme observado por Souza Santos & Souza Santos (2008), que destacam a importância da mulita para a resistência mecânica e estabilidade térmica das cerâmicas estruturais.

O ferro, identificado em diversos picos, provavelmente está presente na forma de óxidos como hematita e magnetita. Esses óxidos não apenas conferem coloração avermelhada à cerâmica, como também influenciam sua resistência mecânica (MENEZES *et al.*, 2005). O potássio detectado pode ser atribuído à presença de feldspatos potássicos ou illita, minerais fundentes que contribuem para a vitrificação parcial do corpo cerâmico.

A presença de carbono, ainda que discreta, pode estar relacionada a traços de matéria orgânica residual, carbonatos ou mesmo à contaminação durante o preparo da amostra, como o uso de fita condutiva de carbono para fixação. Segundo Goldstein *et al.* (2017), é comum que análises por EDS apresentem picos de carbono em função da própria metodologia de preparação e das condições de vácuo da câmara do MEV, principalmente quando não há um tratamento prévio de limpeza química da superfície analisada.

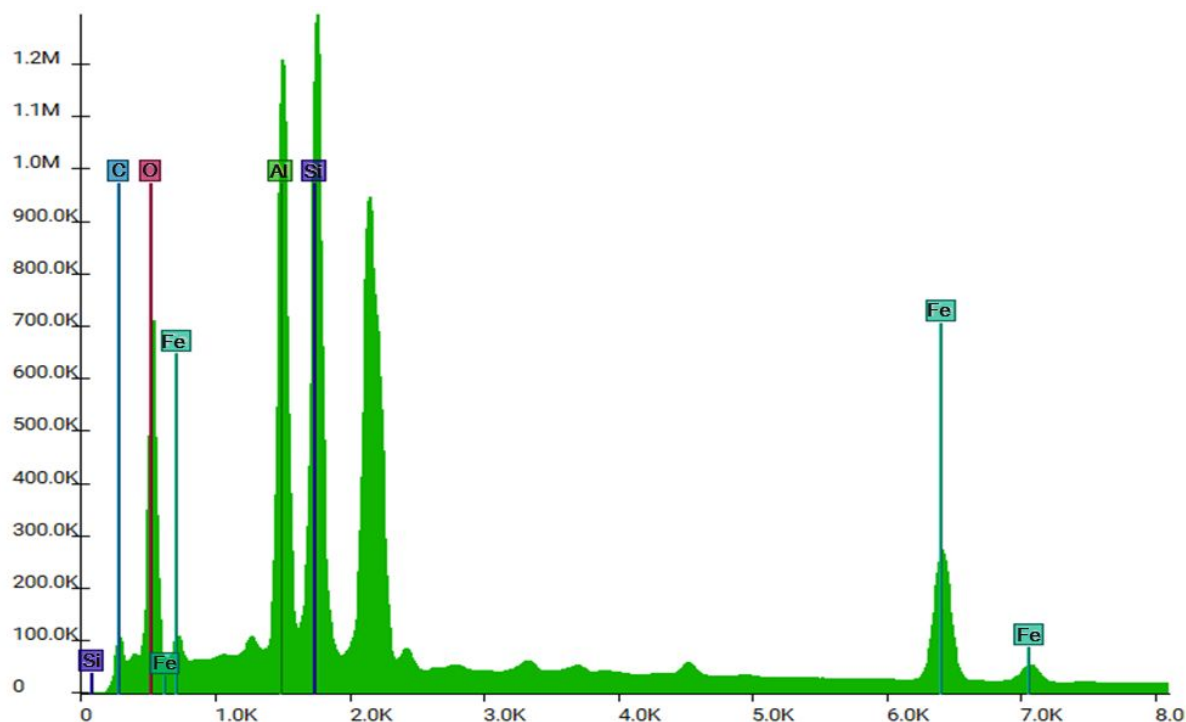


Figura 40 – Mapa *Spectron* da Temperatura de 1000°C (Autoria própria, 2025).

A análise do espectro EDS apresentado na Figura 40 confirma a predominância de uma matriz composta por aluminossilicatos, com destaque para os elementos silício (Si), alumínio (Al) e oxigênio (O). Essa composição é típica de blocos cerâmicos estruturais e está em conformidade com os resultados obtidos por Cerqueira *et al.* (2020) e Alexandre *et al.* (2019), que descrevem a presença desses elementos como indicadores de uma estrutura estabilizada após o processo de queima inicial. Tais elementos garantem boa coesão da matriz e favorecem a resistência mecânica e a estabilidade térmica dos blocos.

A presença significativa de ferro (Fe) em estado oxidado indica a formação de óxidos como hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), também verificados por Souza *et al.* (2017), que associam esses compostos à maior densidade e resistência mecânica dos materiais. Além disso, o ferro influencia a coloração final dos blocos e participa ativamente dos processos de recristalização a altas temperaturas, comportamento confirmado na exposição a 1000°C.

O carbono (C), detectado em traços, pode estar relacionado à presença de resíduos orgânicos não totalmente eliminados durante a queima ou à contaminação superficial durante o manuseio e ensaios. Gomes e Pontes (2016) mencionam essa

ocorrência como relativamente comum, especialmente em amostras que passam por ciclos térmicos adicionais.

Conclui-se que, a análise química das amostras de BCEPQ pós-ensaio de resistência de prismas em diferentes temperaturas, conforme apresentado nas Figuras 37 a 40, revela a evolução da composição química dos blocos após sucessivas exposições térmicas. Inicialmente, na Figura 37 (30°C), observa-se a predominância de silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe) e oxigênio (O), característicos da matriz cerâmica já queimada, com estrutura estabilizada após o processo de sinterização inicial.

Com o aumento da temperatura (Figura 38 – 600°C e Figura 39 – 800°C), ocorrem alterações significativas, incluindo a intensificação da concentração relativa de óxidos metálicos, refletindo a progressiva eliminação de componentes voláteis e transformações minerais.

Já em 1000°C (Figura 40), nota-se um aumento expressivo na presença de óxidos de ferro e a cristalização mais intensa de fases refratárias, sugerindo um processo avançado de recristalização e densificação do material. Essas mudanças indicam que, mesmo após o processo inicial de queima dos BCEPQ, a exposição térmica subsequente continua promovendo alterações químicas e estruturais, impactando diretamente a resistência mecânica e a integridade dos blocos. Dessa forma, os resultados reforçam a necessidade de compreender os limites estruturais dos BCEPQ frente a cargas térmicas repetitivas, garantindo sua aplicação segura em edificações sujeitas a variações extremas de temperatura.

Esses resultados são corroborados por Dondi *et al.* (2003), que discutem o comportamento das argilas cerâmicas frente a altas temperaturas, evidenciando que, mesmo após a sinterização inicial, os blocos continuam a sofrer modificações estruturais, com impacto direto nas propriedades físico-mecânicas.

Logo, os dados obtidos neste trabalho ressaltam a importância de considerar os efeitos da exposição térmica prolongada ou repetitiva sobre os BCEPQ, sobretudo em contextos arquitetônicos e estruturais que envolvem variações térmicas severas. A compreensão dos limites termoestruturais desses blocos é fundamental para garantir sua aplicação segura e eficiente em edificações.

4.1.4 Análise Mineralógica

Neste item, são apresentadas as identificações dos principais minerais presentes nos BCEPQ após a exposição a diferentes temperaturas, possibilitando a correlação entre as alterações mineralógicas e o comportamento mecânico e termoestructural do material. Vale ressaltar que as amostras ensaiadas foram previamente preparadas segundo os procedimentos descritos no Capítulo 3 deste trabalho. Esses resultados são fundamentais para avaliar a adequação dos BCEPQ em ambientes sujeitos a variações térmicas extremas, contribuindo para o aprimoramento de sua aplicação na construção civil. A Figura 41 mostra o difratograma das amostras nas temperaturas de 30°C a 1000°C.

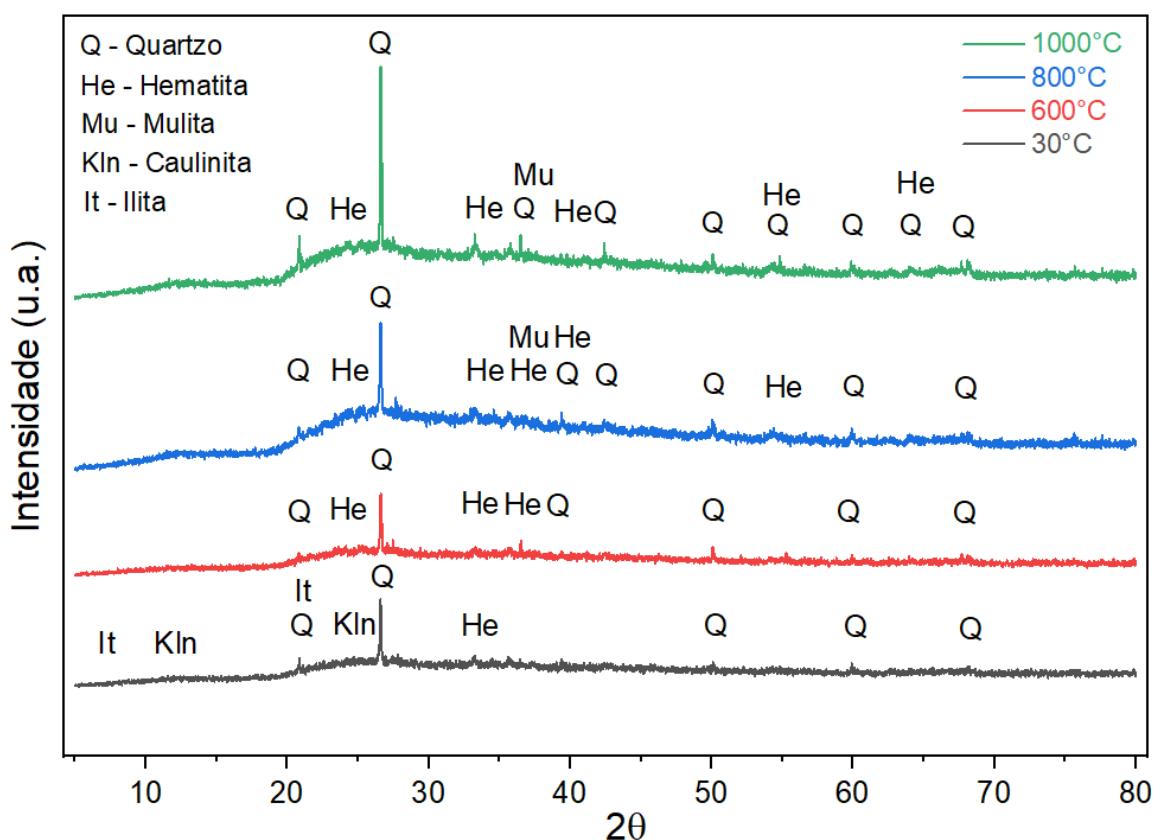


Figura 41 – Difratogramas das Amostras (Autoria própria, 2025).

Na amostra analisada a 30°C, o difratograma revela a presença predominante de quartzo (SiO_2), acompanhado por picos característicos de caulinita (Kln) e ilita (It), minerais argilosos comuns em matérias-primas cerâmicas não submetidas a tratamento térmico. Ramos *et al.* (2013) destacam que a desidroxilação da caulinita ocorre entre 450°C e 650°C, levando à formação de

uma fase amorfa. A illita, por sua vez, começa a se decompor acima de 600°C, conforme também demonstrado por Reichert *et al.* (2004).

A presença da illita, por sua vez, também confirma a baixa influência térmica sobre a estrutura mineralógica, visto que este argilomineral começa a se decompor apenas a partir de aproximadamente 700°C. Essa configuração mineralógica inicial reflete o estado natural do bloco cerâmico antes da requeima, mantendo intactas suas fases originais e servindo como referência para avaliar as transformações ocorridas nas demais temperaturas.

A caulinita e a illita são minerais típicos de argilas utilizadas em cerâmicas estruturais. Com o aquecimento a 600°C, seus picos desaparecem, indicando a ocorrência de transformações térmicas, como a desidroxilação da caulinita e a decomposição progressiva da illita. Esses fenômenos são descritos por Souza Santos (1989), Macedo *et al.* (2005) e Reichert *et al.* (2004), os quais destacam que a caulinita sofre desidroxilação entre 450°C e 650°C, formando metacaulinita amorfa, enquanto a illita apresenta maior resistência térmica, com decomposição parcial acima de 600°C.

No difratograma da amostra tratada a 600°C, observa-se a predominância de quartzo (SiO_2), juntamente com a presença de hematita (Fe_2O_3) e indícios de calcita (CaCO_3). A formação de hematita (Fe_2O_3) é observada a partir de 600°C, com aumento de intensidade em 800°C e 1000°C, resultado da oxidação de compostos ferrosos presentes na matéria-prima cerâmica. Essa transformação é bem documentada por Dondi *et al.* (1998) e Monteiro e Vieira (2004), que correlacionam a formação de hematita com a coloração avermelhada dos produtos cerâmicos queimados.

A permanência do quartzo indica que não houve transformação para outras fases cristalinas, como tridimita ou cristobalita, que poderiam comprometer a estabilidade mecânica da estrutura. Além disso, a presença de calcita sugere que a descarbonatação do carbonato de cálcio ainda não foi concluída nessa temperatura, o que pode ter contribuído para a manutenção da integridade dos prismas.

Na amostra tratada a 800°C, o difratograma mostra novamente a predominância do quartzo, mas com um aumento na intensidade dos picos de

hematita (Fe_2O_3) e o desaparecimento da calcita (CaCO_3). Essa ausência de calcita indica que a descarbonatação foi finalizada, levando à liberação de CO_2 e à possível formação de cal livre (CaO). Entretanto, como não houve detecção de novas fases estruturais que pudessem fragilizar a matriz cerâmica, a resistência mecânica dos prismas permaneceu inalterada. Além disso, a transformação de compostos ferrosos em hematita pode ter contribuído para uma leve consolidação da microestrutura, compensando eventuais perdas de coesão que poderiam ocorrer devido ao aquecimento.

A análise da Difração de Raios X (DRX) realizada na amostra submetida à temperatura de 1000°C revelou mudanças significativas na composição mineralógica do material cerâmico. Observou-se a decomposição quase completa das fases cristalinas originalmente presentes, como a caulinita e a illita, indicando a transformação térmica desses minerais. Além disso, a presença de picos associados à mullita sugere a formação dessa fase cristalina, essencial para o ganho de estabilidade estrutural e resistência mecânica em materiais cerâmicos.

A mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), fase cerâmica de alta estabilidade térmica e mecânica, surge no difratograma a 800°C e se intensifica a 1000°C , indicando o início da sinterização e da consolidação da estrutura cerâmica. A literatura, como demonstrado por Coutinho e Hotza (2009) e Cunha *et al.* (2018), aponta que a formação de mullita ocorre por reação entre alumina e sílica provenientes da decomposição da caulinita e da transformação da metacaulinita, com início por volta de 950°C .

O quartzo permanece presente em todas as temperaturas, o que demonstra sua estabilidade térmica relativa. Estudos como os de Barbosa *et al.* (2002) indicam que o quartzo, apesar de não sofrer decomposição até temperaturas elevadas ($\sim 1100^\circ\text{C}$), pode contribuir para a geração de tensões internas na microestrutura cerâmica devido às suas características de expansão térmica.

Ao comparar os resultados obtidos nas diferentes temperaturas estudadas (600°C , 800°C e 1000°C), nota-se uma evolução progressiva das transformações mineralógicas. Em 600°C , as mudanças ainda são sutis, com a perda inicial de água estrutural e o início da decomposição de argilominerais como a caulinita. Aos 800°C , a desidroxilação desses minerais já está bem avançada, e começam a

surgir fases de transição, como a metacaulinita, que indicam o processo de recristalização.

No entanto, é apenas em 1000°C que as fases mais estáveis, como a mullita, se consolidam, conferindo ao material uma estrutura mais densa e resistente. Esse comportamento evidencia a importância da temperatura na definição das propriedades finais do bloco cerâmico, sendo 1000°C o limiar crítico para o desenvolvimento das fases cristalinas responsáveis pela resistência mecânica e estabilidade térmica do material.

Na Tabela 11 é apresentado um resumo dos principais minerais identificados no difratograma, acompanhado de um comparativo entre diferentes autores.

Tabela 11 – Resumo dos Principais Minerais Identificados nas Análises (Autor, 2025).

Mineral	Observação Experimental	Apoio na Literatura
Caulinita	Presente a 30°C, ausente a 600°C	Desidroxilação entre 450–650°C (Macedo <i>et al.</i> , 2005)
Ilita	Presente a 30°C, ausente a 600°C	Decomposição gradual acima de 600°C (Reichert <i>et al.</i> , 2004)
Hematita	Aparece a 600°C, intensifica com temperatura	Formação por oxidação do ferro (Dondi <i>et al.</i> , 1998)
Mullita	Surge a 800°C, mais intensa a 1000°C	Formada acima de 950°C (Cunha <i>et al.</i> , 2018)
Quartzo	Presente em todas as temperaturas	Estável até ~1100°C (Vieira & Monteiro, 2004)

4.1.4 Análise Térmica

Por meio da análise termogravimétrica (TG), foram investigadas as variações na fração de massa residual dos blocos cerâmicos extrudados, prensados e queimados (BCEPQ), possibilitando a identificação de intervalos críticos de degradação térmica e sua correlação com o comportamento mecânico e termoestrutural do material.

A Figura 42 apresenta os resultados do ensaio termogravimétrico (TG) e sua derivada (DTG) para a amostra cerâmica extraída do centro de um prisma de cinco fiadas previamente submetido a uma temperatura de 1000°C. A curva TG evidencia

perdas de massa em diferentes faixas de temperatura, enquanto a curva DTG permite identificar com maior precisão os eventos térmicos associados a essas perdas.

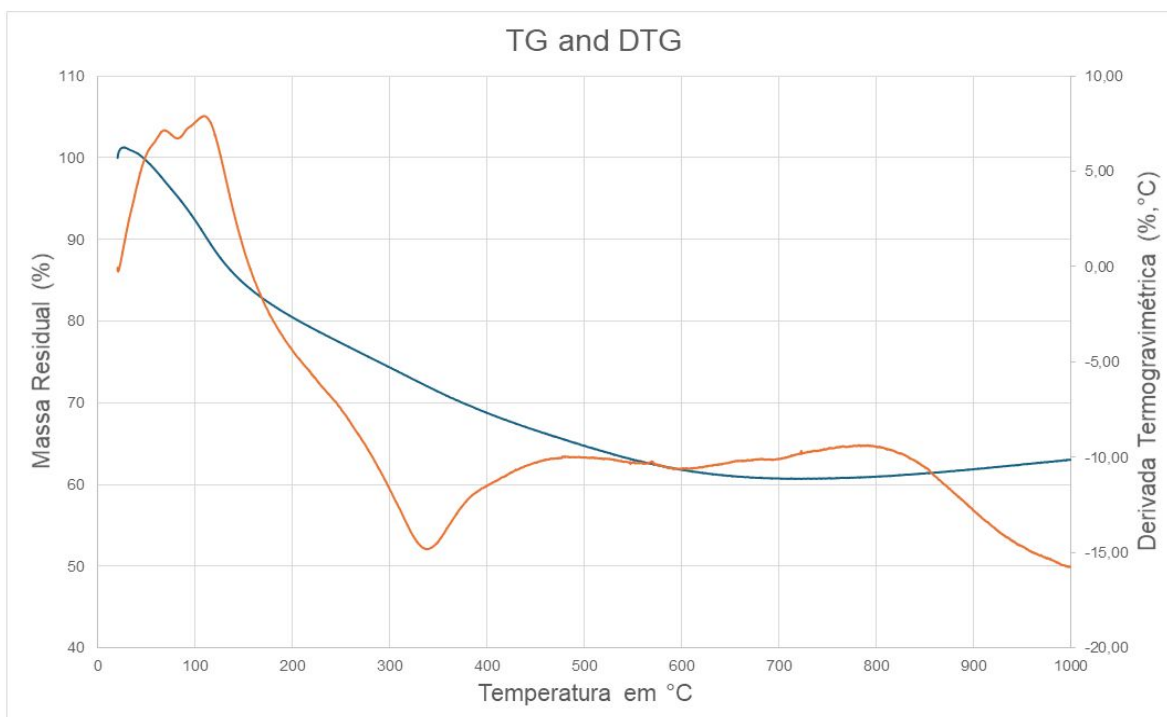


Figura 42 – Curva Massa Residual x Taxa de Perda de Massa (Autoria própria, 2025).

A primeira perda significativa de massa ocorre entre 30°C e 200°C, com destaque para um pico DTG positivo em torno de 100°C, associado à eliminação de água livre e higroscópica, retida na estrutura por reidratação após o resfriamento. Esse comportamento é amplamente relatado na literatura por Cerqueira *et al.* (2016) e Oliveira *et al.* (2012), que observaram perdas similares em argilas caulínicas utilizadas na produção de blocos cerâmicos.

Na faixa de 200°C a 400°C, observa-se uma acentuada queda na massa residual, acompanhada de um pico DTG negativo, indicando a desidroxilação da caulinita e possível decomposição de matéria orgânica residual. Esse fenômeno é típico de argilas cerâmicas e também foi descrito por Souza *et al.* (2019) e Oliveira *et al.* (2012).

Entre 400°C e 600°C, ocorre uma nova perda de massa, porém de menor intensidade, atribuída à oxidação de compostos orgânicos remanescentes e à transição de metacaulinita para estruturas mais ordenadas. Esse comportamento é coerente com os resultados apresentados por Cerqueira et al. (2016).

Na faixa de 600°C a 850°C, a curva TG apresenta uma variação suave, sugerindo estabilidade térmica relativa da matriz cerâmica. A partir de 850°C, observa-se uma leve redução na taxa de perda de massa, indicando formação de fases mais estáveis, como a mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), já esperada em cerâmicas caulínicas tratadas termicamente. Essa fase está diretamente associada ao aumento da resistência mecânica e estabilidade térmica, como relatado por Souza et al. (2019).

A comparação entre os resultados experimentais e a literatura é sintetizada na Tabela 12.

Tabela 12 – Comparação entre os Resultados Experimentais e a Literatura.

Temperatura (°C)	(TG/DTG)	Interpretação	Referências
30–200	Perda inicial de massa; pico DTG positivo	Eliminação de água livre	Cerqueira et al. (2016); Oliveira et al. (2012)
200–400	Queda de massa acentuada; pico DTG negativo	Desidroxilação caulinita; decomposição orgânica	Souza et al. (2019); Oliveira et al. (2012)
400–600	Nova perda moderada	Formação metacaulinita	Cerqueira et al. (2016)
600-850	Variação lenta da TG	Estabilidade relativa da estrutura cerâmica	Oliveira et al. (2012)
850-1000	Estabilização da curva TG; pequena queda residual	Formação de mulita e fases vitrificadas	Souza et al. (2019); Cerqueira et al. (2016)

A análise termogravimétrica confirma que, mesmo após exposição prévia a 1000°C, a amostra ainda apresenta eventos térmicos característicos, reforçando a complexidade dos processos físico-químicos que ocorrem em materiais cerâmicos durante o resfriamento e reexposição a ciclos térmicos. Esses dados são fundamentais para compreender o comportamento termoestrutural dos blocos cerâmicos utilizados na pesquisa.

4.1.4.1 Condutividade e Efusividade Térmica

O ensaio de condutividade térmica foi realizado no Laboratório de Física do CCT/UENF, utilizando um total de 20 amostras. De acordo com o manual do equipamento, a utilização de apenas três amostras já é suficiente para garantir resultados satisfatórios.

O valor médio encontrado para a condutividade térmica e a efusividade foi de 0,5188 W/mK e 898,295 $Ws^{1/2}/m^2K$, respectivamente. Para o presente trabalho, foram utilizados estes valores como entrada de dados para modelagem numérica. O resultado da efusividade foi gerado automaticamente pelo equipamento, não necessitando de nenhum ensaio subsequente. A Figura 43 mostra os resultados do ensaio. Os demais resultados podem ser consultados no Apêndice 6.

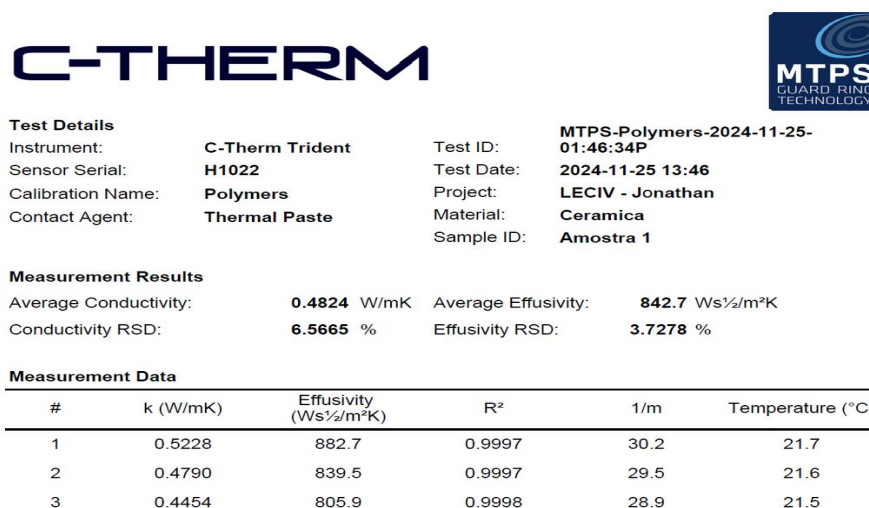


Figura 43 – Resultados do Ensaio de Condutividade e Efusividade Térmica (Autoria própria, 2024).

Os resultados obtidos para condutividade térmica e efusividade térmica dos BCEPQ demonstram a influência da microestrutura cerâmica na transferência e armazenamento de calor, aspectos fundamentais para seu desempenho em aplicações estruturais sujeitas a variações térmicas extremas. A condutividade térmica média de 0,5188 W/mK indica que os BCEPQ possuem um comportamento isolante moderado, o que pode ser benéfico para a eficiência térmica das edificações, reduzindo a dissipação de calor e contribuindo para maior conforto térmico. Já o valor de efusividade térmica médio de 898,295 $Ws^{1/2}/m^2K$ sugere que

o material tem capacidade razoável de armazenar calor, característica relevante para sua resposta a incêndios ou flutuações térmicas.

Portanto, os resultados obtidos confirmam a viabilidade dos BCEPQ para aplicações estruturais expostas a temperaturas elevadas, demonstrando que sua condutividade e efusividade térmica podem ser ajustadas de acordo com requisitos específicos do projeto. Essas informações são fundamentais para orientar o uso adequado dos BCEPQ na construção civil, garantindo maior segurança térmica e eficiência energética em edificações.

4.1.5 Análise Termoestrutural

No presente trabalho, foram realizados ensaios termoestruturais em 4 prismas por cinco fiadas de um bloco e meio na Universidade Federal de Viçosa (UFV). As análises foram realizadas considerando os efeitos térmicos e estruturais nas temperaturas de 30°C (ambiente), 600°C, 800°C e 1000°C. Os blocos foram montados sem o uso de argamassa e não foram capeados; no entanto, uma placa de fibra mineral foi utilizada durante os ensaios para melhor distribuição das tensões nos prismas. As Figuras 44, 45, 46 e 47 mostram os prismas nas temperaturas de 30°C, 600°C, 800°C e 1000°C, respectivamente.

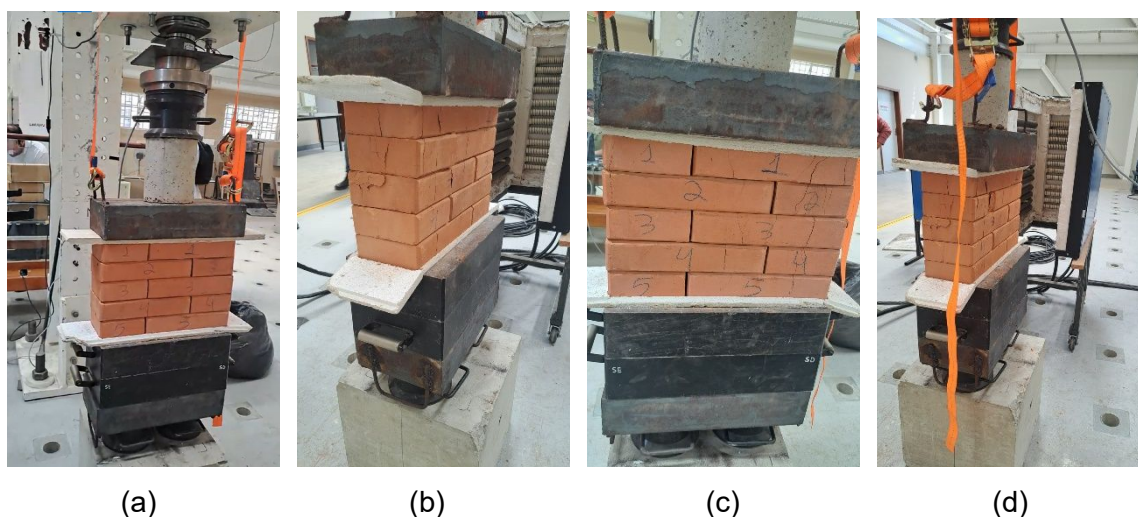


Figura 44 – Ruptura do Prisma 1 na Temperatura de 30°C (Autoria própria, 2024).

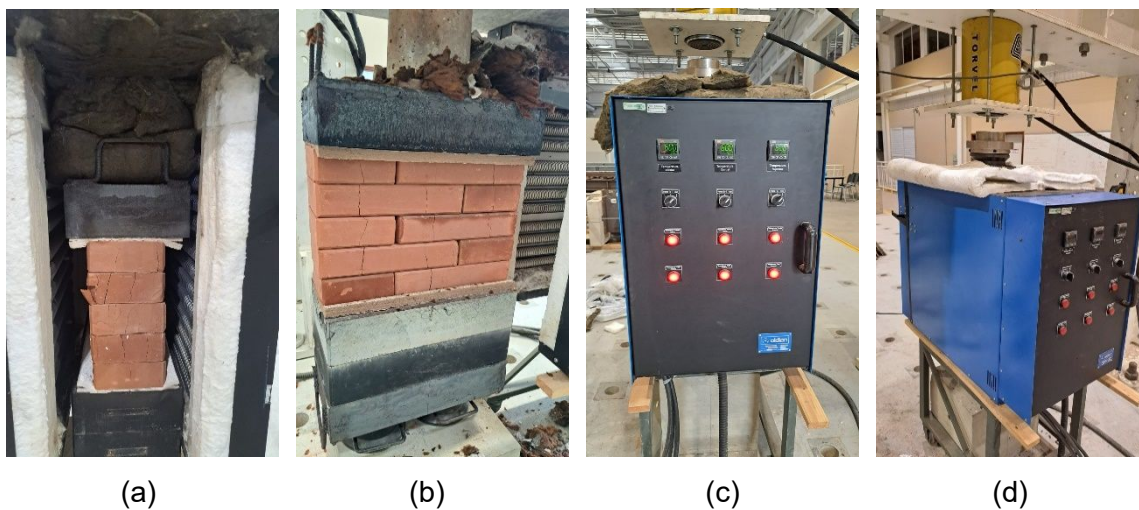


Figura 45 – Ruptura do Prisma 2 na Temperatura de 600°C (Autoria própria, 2024).

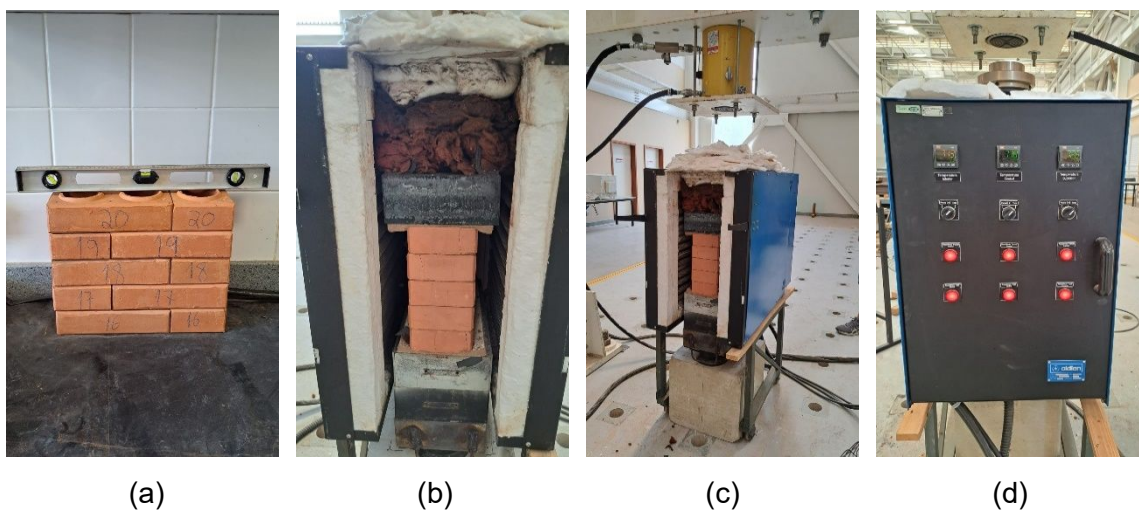


Figura 46 – Ruptura do Prisma 3 na Temperatura de 800°C (Autoria própria, 2024).

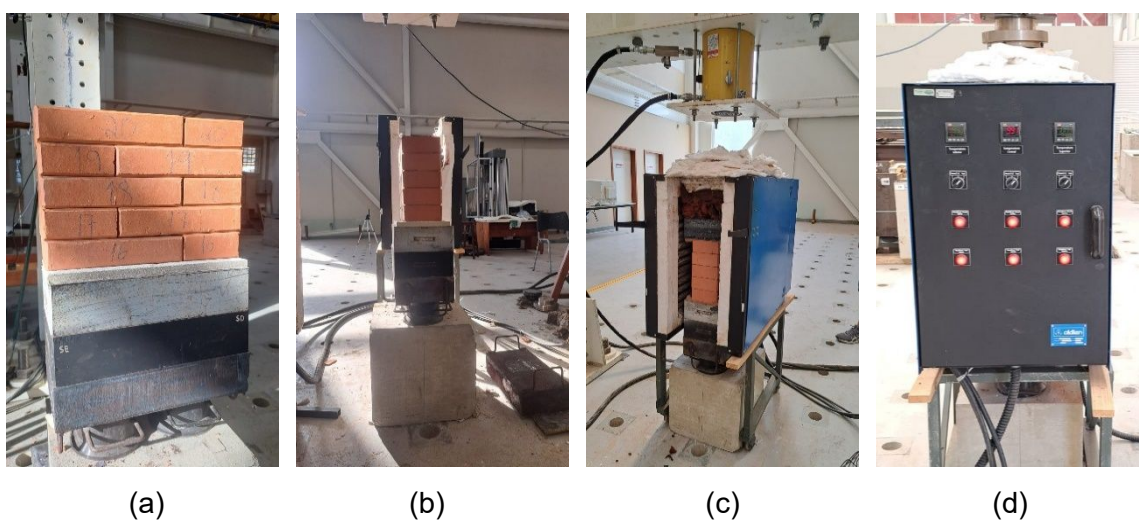


Figura 47 – Ruptura do Prisma 4 na Temperatura de 1000°C (Autoria própria, 2024).

O primeiro prisma foi submetido ao ensaio de ruptura na temperatura ambiente (30°C) na Universidade Federal de Viçosa (UFV). Durante o teste, foi adotada uma medida de segurança, posicionando-se uma cinta no suporte acima do prisma, de modo a evitar danos aos equipamentos caso ocorresse a queda no momento da ruptura. Os prismas dois, três e quatro foram aquecidos a uma taxa de 5°C/minuto até atingirem, respectivamente, 600°C, 800°C e 1000°C, permanecendo nessas temperaturas por 30 minutos antes da realização do ensaio de ruptura. Além disso, foram realizadas verificações para minimizar possíveis excentricidades dos prismas, assegurando uma distribuição uniforme da carga e evitando desvios indesejados de tensão. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos nos ensaios termoestruturais dos prismas.

Tabela 13 – Resultados de Resistência à Compressão dos Prismas.

Prisma	Temperatura em °C	Carga suportada em (N)	Resistência à Compressão (MPa)	Média (MPa)
1	30 (ambiente)	98723,15	1,68	1,75
2	600	98723,15	1,68	
3	800	98916,34	1,68	
4	1000	114699,73	1,95	

Os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa indicaram que os prismas cerâmicos mantiveram uma resistência à compressão constante de 1,68 MPa nas temperaturas de 30 °C (ambiente), 600 °C e 800 °C, apresentando um leve incremento para 1,95 MPa a 1000 °C, com média geral de 1,75 MPa. Tal comportamento evidencia a estabilidade mecânica do material até temperaturas elevadas, apontando para um possível processo de sinterização ou reorganização microestrutural que favorece a resistência, mesmo em condições térmicas críticas.

Este resultado está em consonância com os estudos de Freitas (2020), cujas análises numéricas e experimentais demonstraram que a elevação da temperatura pode promover ganhos pontuais de resistência em blocos cerâmicos, especialmente quando submetidos a aquecimento controlado. De forma similar, Feitosa (2020) observou o aumento da resistência à compressão de blocos estruturais expostos a 400 °C, ainda que seus resultados indiquem redução

acentuada a partir de 800 °C, comportamento que difere desta pesquisa, sugerindo uma maior robustez térmica dos blocos analisados neste trabalho.

Ainda nesse contexto, vale destacar que os dados encontrados também contrastam com os resultados de Coelho (2018), que identificou significativa degradação na resistência mecânica de blocos cerâmicos submetidos a elevadas temperaturas, principalmente quando associados ao resfriamento abrupto. Como os prismas testados nesta pesquisa não passaram por processos de resfriamento forçado, pode-se inferir que a ausência de choque térmico contribuiu para a preservação das propriedades mecânicas observadas.

Adicionalmente, s ensaios térmicos com o C-Therm Trident indicaram condutividade média de 0,4824 W/mK e efusividade de 842,7 Ws^{1/2}/m²K, compatíveis com materiais cerâmicos de baixa densidade. Esses resultados destacam o potencial do material para alvenaria com bom desempenho térmico, especialmente em ambientes com grandes variações de temperatura, como discutido por Souza *et al.* (2023) e Silva *et al.* (2022).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS

4.2.1 Dimensões dos blocos

As dimensões dos blocos cerâmicos foram determinadas conforme os critérios estabelecidos pela NBR 15270-1 (ABNT, 2023). Estas medições são importantes para avaliar se existe algum bloco que não atendeu às variações máximas de medidas. Na Tabela 14, são apresentadas as médias, o desvio padrão e o coeficiente de variação das dimensões realizadas nos blocos cerâmicos deste trabalho. Os demais resultados podem ser consultados no Apêndice 1.

Tabela 14 – Características Geométricas dos Blocos Cerâmicos.

Dimensão (mm)	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
Comprimento	282,69	1,04	0,37
Largura	140,51	0,71	0,51
Altura	62,56	0,46	0,73

Os resultados encontrados nas medições dos blocos estão em conformidade com o estabelecido pela NBR 15270-1 (ABNT, 2023).

4.2.2 Propriedades Tecnológicas dos Blocos

O ensaio de Absorção de Água (AA) dos blocos deste trabalho foi analisado conforme diretrizes da NBR 15270-1 (ABNT, 2023). Na Tabela 15 é apresentado os resultados encontrados do ensaio de AA dos blocos cerâmicos.

Tabela 15 – Resultados do ensaio de Absorção de Água (AA).

Propriedade	Média (%)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
AA	22,83	0,02	0,14

Os resultados encontrados neste trabalho não se adequam com o mínimo estabelecido pela norma referente ao ensaio, que estipula um mínimo de 8% e um máximo de 21%.

Cerqueira (2017), Alexandre (2012) e Pedroti *et al.* (2011) obtiveram valores de absorção de água (AA) de 20,49%, 21% e 31,85%, respectivamente. Os resultados do presente estudo apresentam uma diferença significativa em relação aos valores encontrados por Pedroti *et al.* (2011), com uma discrepância de aproximadamente 28% entre os ensaios. O Apêndice 1 apresenta, de forma detalhada, os resultados obtidos nos ensaios.

A análise dos blocos cerâmicos indicou que apenas os queimados a 1000 °C atenderam aos requisitos normativos. No entanto, essa temperatura raramente é alcançada nas olarias da região, o que pode comprometer a qualidade dos blocos (Pedroti *et al.*, 2011). Segundo o autor, a temperatura de queima afeta diretamente propriedades como resistência e absorção de água. Por isso, é fundamental avaliar a absorção com critérios mais específicos, evitando conclusões precipitadas sobre a adequação estrutural dos blocos.

4.2.3 Resistência à Compressão dos Blocos

A área bruta e líquida dos blocos cerâmicos é apresentada na Tabela 16. Vale salientar que estas medidas não passaram por nenhum tratamento estatístico.

Tabela 16 – Área Bruta e Líquida dos Blocos Cerâmicos.

Bloco Cerâmico	Média (mm ²)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Área Bruta	39708,62	324,99	0,82
Área Líquida	34115,57	321,60	0,94

Os valores da resistência média à compressão (f_{bm}) podem ser observados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resistência Média dos Blocos Cerâmicos.

Bloco Cerâmico	Área Bruta	Área Líquida
Resistência Média (MPa)	8,30	9,66
Desvio Padrão (MPa)	0,69	0,80
Coefficiente de Variação (%)	8,35	8,33

Todos os valores de resistência à compressão, em relação à área bruta, ficaram acima do mínimo recomendado pela NBR 15270-3 (ABNT, 2023), tabela 2 (continuação), que é de 4MPa. Para a observação completa dos resultados de resistência à compressão dos blocos analisados neste trabalho, recomenda-se a consulta ao Apêndice 1.

4.2.4 Parâmetros de Elasticidade dos Blocos

O módulo de elasticidade dos blocos foi estimado conforme recomendações da NBR 16868-1 (ABNT, 2020). A resistência média à compressão dos blocos foi de 8,30MPa, logo, o módulo de elasticidade determinado foi de 4980MPa ou 4,98GPa, estes valores foram utilizados na modelagem numérica dos prismas.

4.3 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS PRISMAS

4.3.1 Resistência à Compressão de Prismas (f_{pk})

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão em 6 prismas são apresentados na Tabela 18. Estes ensaios foram realizados no LECIV/UENF, na prensa *Shimadzu*, modelo UH – F500kN.

Tabela 18 – Resistência à Compressão de Prismas (f_{pk}) em Temperatura Ambiente.

Prisma	Carga Suportada em Newton (N)	Resistência à Compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
1	70330	1,79	1,67	0,38	22,95
2	74638	1,90			
3	40934	1,04			
4	55347	1,41			
5	82684	2,11			
6	68750	1,75			

4.3.2 Parâmetros de Elasticidade dos Prismas

O módulo de elasticidade dos prismas foi estimado seguindo as recomendações da NBR 16868-1 (ABNT, 2020). A resistência média à compressão dos prismas foi de 1,67 MPa, e, com base neste valor, o módulo de elasticidade de cada prisma está apresentado na Tabela 18. Além disso, a norma estabelece que o coeficiente de *Poisson* para blocos e tijolos cerâmicos é de 0,15. Observa-se que o módulo de elasticidade dos prismas varia conforme a distribuição das tensões e a qualidade do material cerâmico. Esses fatores influenciam diretamente no comportamento estrutural dos prismas quando submetidos a carregamentos mecânicos. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Módulo de Elasticidade e Coeficiente de *Poisson*.

Prisma	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de <i>Poisson</i>
1	1,79	1074	0,15

2	1,90	1140	0,15
3	1,04	624	0,15
4	1,41	846	0,15
5	2,11	1266	0,15
6	1,75	1050	0,15

4.3.3 Fator de eficiência dos Prismas (η_p)

Os resultados da eficiência prisma/bloco são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Fator de Eficiência: Prisma/bloco – Resistência Média.

Prisma	f_{bm} (MPa)	f_{bm} (MPa)	Fator de Eficiência (η_p)
1	1,79	8,30	0,21
2	1,90		0,22
3	1,04		0,12
4	1,41		0,17
5	2,11		0,25
6	1,75		0,21

4.4 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DAS PEQUENAS PAREDES

4.4.1 Resistência à Compressão das Pequenas Paredes (f_{ppk})

A resistência média à compressão das pequenas paredes foi de 0,86 MPa, conforme os ensaios realizados. Estes ensaios foram realizados no LECIV/UENF, utilizando a prensa *Shimadzu*, modelo UH – F500kNI (capacidade de até 500kN). De acordo com a NBR 16868-1 (ABNT, 2020), o coeficiente de *Poisson* para blocos e tijolos cerâmicos é de 0,15. Para obtenção do módulo de elasticidade das pequenas paredes, seguiu-se o mesmo método utilizado para os blocos e prismas.

Os resultados detalhados, incluindo o desvio padrão e o coeficiente de variação, são apresentados nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 – Resistência à Compressão de Pequenas Paredes (f_{ppk}).

Pequena Parede	Carga Suportada em Newton (N)	Resistência à Compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
----------------	-------------------------------	--------------------------------	-------------	---------------------	-----------------------------

1	66316	0,85	0,86	0,01	1,16
2	66591	0,85			
3	67853	0,87			

4.4.2 Parâmetros de Elasticidade das Pequenas Paredes

Tabela 22 – Módulo de Elasticidade e Coeficiente de *Poisson*.

Pequena Parede	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coeficiente de <i>Poisson</i>
1	0,85	510	0,15
2	0,85	510	0,15
3	0,87	522	0,15

4.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Utilizando o *software* (ANSYS, 2024), foram conduzidas análises numéricas para estudar o comportamento de prismas submetidos às variações de temperatura, permitindo correlacionar os resultados obtidos nos ensaios experimentais com as simulações computacionais.

A modelagem numérica foi estruturada com base nas propriedades térmicas e mecânicas dos BCEPQ, previamente determinadas nos ensaios laboratoriais, garantindo maior precisão na representação do comportamento dos blocos em condições de sobrecarga térmica. A simulação considerou prismas de cinco fiadas, avaliando a propagação do calor, a estabilidade estrutural e possíveis mecanismos de falha em temperaturas elevadas. A modelagem considerou a interação apenas entre os blocos, não houve argamassa de assentamento entre eles, conforme mencionado nos objetivos específicos deste trabalho.

Os resultados das simulações são comparados aos dados experimentais discutidos no capítulo anterior, permitindo validar o modelo numérico e identificar potenciais ajustes para aprimorar a precisão das simulações computacionais. Assim, este capítulo contribui para consolidar uma abordagem integrada entre ensaios experimentais e modelagem numérica, fornecendo informações essenciais

para a compreensão do desempenho térmico dos BCEPQ e sua aplicação segura na construção civil.

4.5.1 Propriedades Mecânicas e Térmicas

As propriedades mecânicas e térmicas, apresentadas nas Tabelas 23 e 24, constituem uma referência fundamental para a configuração da modelagem numérica. Esses dados são essenciais para a definição dos parâmetros de entrada, assegurando maior precisão e coerência nos resultados esperados das simulações. A correta parametrização desses valores permite que o modelo represente fielmente o comportamento dos BCEPQ sob condições térmicas extremas, possibilitando uma correlação mais robusta entre os ensaios experimentais e as simulações computacionais.

Tabela 23 – Propriedades Mecânicas dos Materiais Utilizados na Simulação.

Material	Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência à Compressão do Bloco (MPa)	Coefficiente de Poisson
Bloco Cerâmico	4980	8,30	0,15

Material	Condutividade Térmica (W/m.K)	Coefficiente de Expansão Térmica ($\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)
Bloco Cerâmico	0,0005188	1,2e-05 $1/^\circ\text{C}$	30 a 1000

O modelo gerado apresenta um total de 533.890 nós, distribuídos de maneira a representar com precisão satisfatória a geometria do prisma, suas condições de contorno e as demais variáveis envolvidas no problema. A quantidade total de elementos utilizados na simulação é de 178.159, dos quais 137.715 correspondem a elementos sólidos, essenciais para a definição volumétrica dos blocos cerâmicos e sua resposta estrutural ao carregamento térmico e mecânico.

A interação entre os blocos foi representada por 40.204 elementos de contato, fundamentais para simular a transmissão de esforços e os efeitos da dilatação térmica nas interfaces. Além disso, foram incorporados 240 elementos do tipo mola, que podem contribuir para a modelagem de interações elásticas específicas na estrutura.

Não foram empregados elementos de apoio rotacional (*bearing elements*), indicando que a fixação do modelo foi realizada exclusivamente por meio de condições de contorno. Também não houve necessidade de condensação de partes do modelo, permitindo uma representação completa da estrutura e de seus fenômenos associados. A configuração da malha adotada permitiu uma análise detalhada do comportamento termoestrutural do prisma cerâmico, assegurando resultados numéricos coerentes e confiáveis.

4.5.3 Condição de Contorno dos Prismas

A definição da malha adotada possibilitou uma captura eficiente dos fenômenos termoestruturais do prisma cerâmico, sendo um fator determinante para a obtenção de resultados numéricos confiáveis. Eventuais refinamentos adicionais podem ser realizados nas interfaces de contato, caso seja necessário um nível maior de detalhamento na resposta da estrutura. A Figura 48 ilustra a disposição da malha dos prismas.

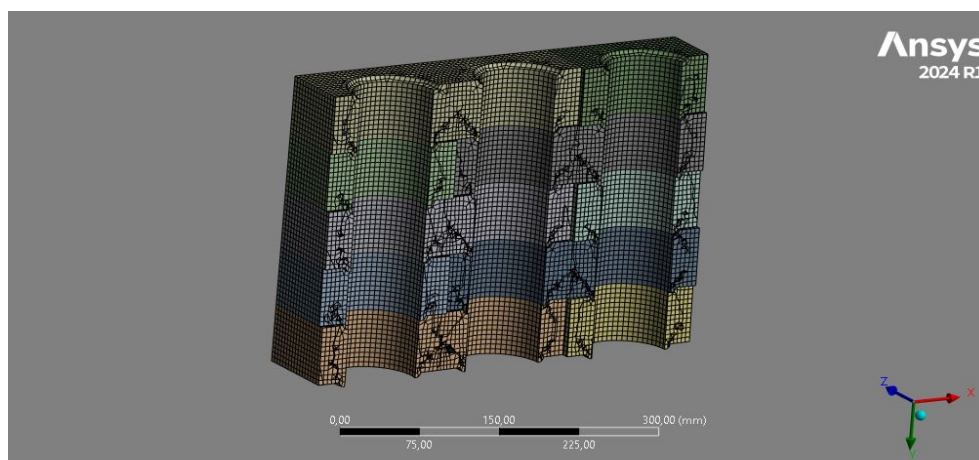


Figura 48 – Disposição da Malha dos Prismas 1, 2, 3 e 4 (Autoria própria, 2025).

Para a modelagem dos prismas, optou-se pela utilização da malha *Hex Dominant Mesh* (Malha Hexaédrica Dominante), devido às vantagens proporcionadas pelos elementos hexaédricos. Esses elementos tendem a apresentar menor distorção geométrica e maior acurácia nos resultados numéricos, especialmente em análises estruturais e térmicas. Além disso, contribuem para uma melhor convergência das soluções, uma vez que a menor incidência de

elementos distorcidos reduz erros numéricos e aprimora o desempenho computacional do modelo.

As condições de contorno adotadas nesta pesquisa foram definidas com base no modelo experimental. Durante a montagem, os prismas estão sujeitos ao efeito do atrito entre eles, tornando essencial a escolha do modelo *Frictional Contact* (Contato Friccional). Este modelo representa a interação entre as superfícies considerando a resistência ao deslizamento, ou seja, o atrito que ocorre quando uma superfície tenta se mover sobre outra. Esta abordagem é mais realista para simulações em que o atrito desempenha um papel significativo, especialmente em componentes submetidos a carga ou movimento.

Embora este modelo seja mais pesado do que outros tipos de contato, como o *Frictionless* (sem atrito) e o *No Separation* (sem separação), e exija um maior número de cálculos para determinar a resistência ao movimento, ainda assim demonstrou maior eficácia na obtenção dos resultados. Cabe destacar que os contatos *Frictionless* (sem atrito) e *Frictional Contact* (com atrito) não influenciaram os resultados durante a simulação. No entanto, em comparação com o contato *No Separation* (sem separação), observou-se uma diferença de aproximadamente 72% na média das tensões dos prismas.

Mais especificamente, a tensão média de ruptura dos prismas nos modelos com ou sem atrito foi de 1,45 MPa, enquanto no modelo *No Separation*, esse valor foi reduzido para 1,19 MPa, devido ao fato de os elementos em contato não sofrerem deslizamentos entre eles. A Tabela 25 e as Figuras 49, 50, 51 e 52 mostram os resultados encontrados para os casos analisados.

Tabela 25 – Comparação entre os Contatos *Frictional Contact* e *No Separation*.

Temperaturas (°C)	<i>No Separation</i>	Média (MPa)	<i>Frictional Contact</i>	Média (MPa)
30 (ambiente)	1,13	1,19	1,38	1,45
600	1,14		1,38	
800	1,15		1,38	
1000	1,33		1,67	

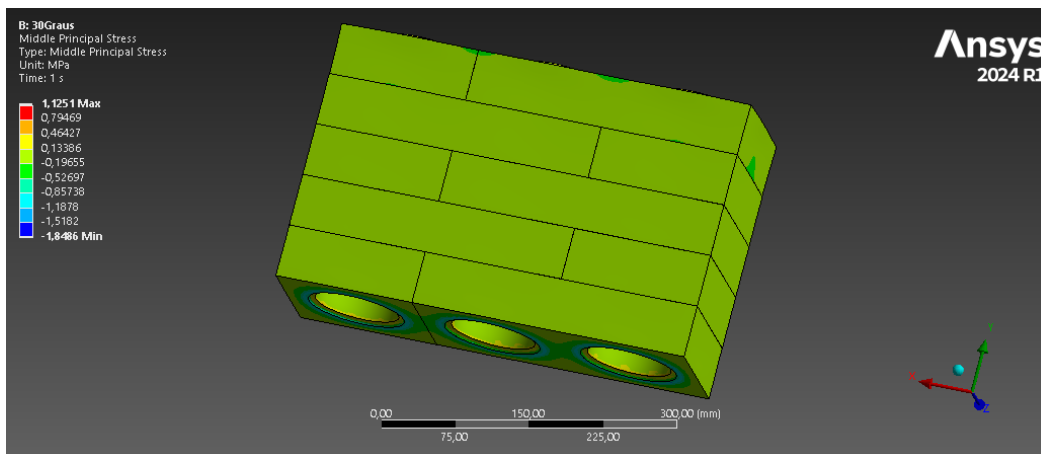


Figura 49 – Condição de Contorno (*No Separation*) a 30°C (Autoria própria, 2025).

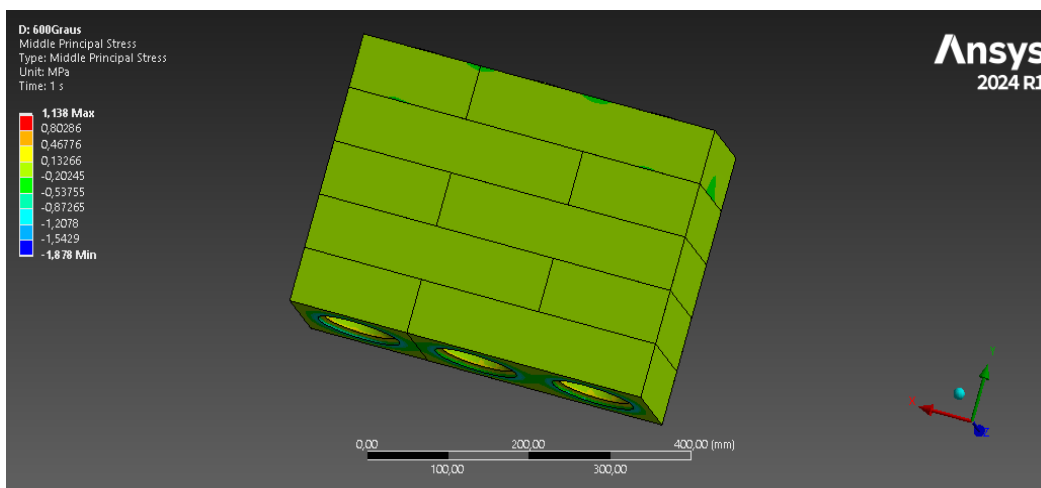


Figura 50 – Condição de Contorno (*No Separation*) a 600°C (Autoria própria, 2025).

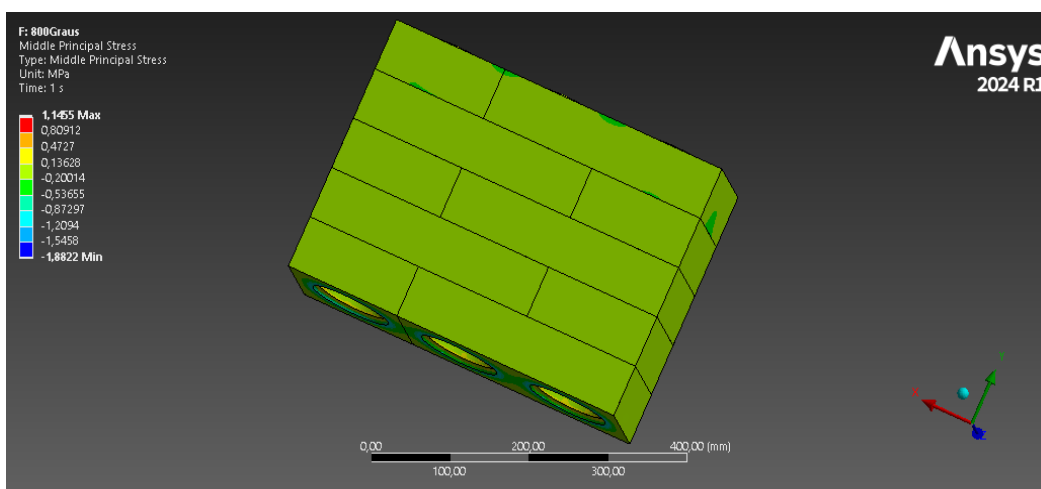


Figura 51 – Condição de Contorno (*No Separation*) a 800°C (Autoria própria, 2025).

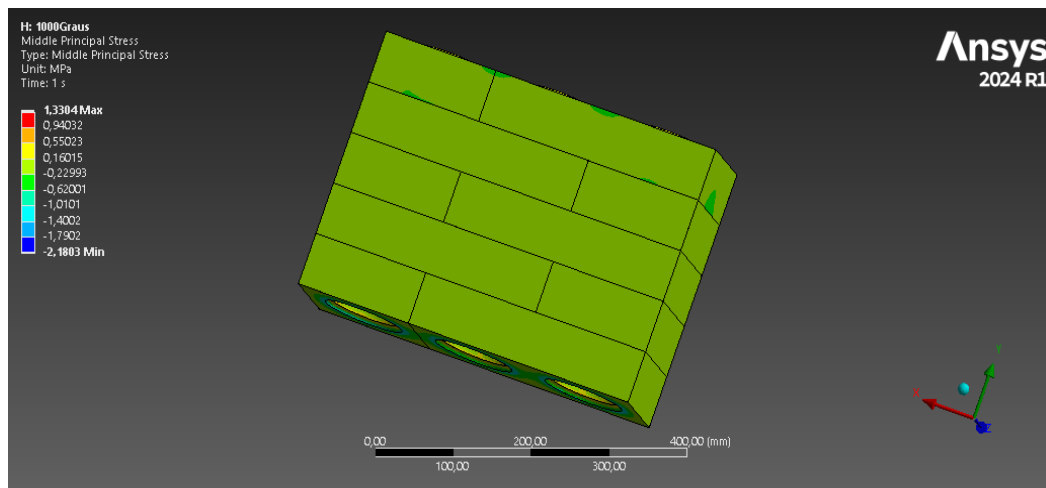
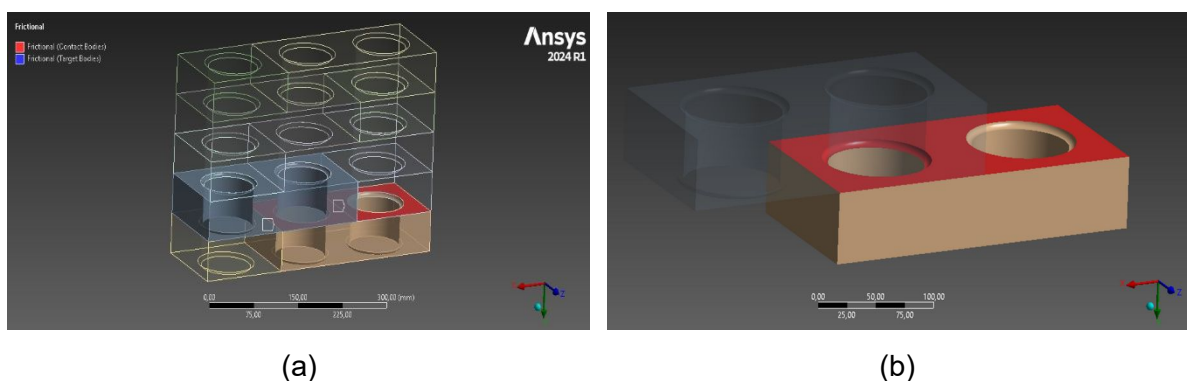


Figura 52 – Condição de Contorno (*No Separation*) a 1000°C (Autoria própria, 2025).

A Figura 53 mostra a condição de contato utilizada no presente trabalho. Os demais modelos podem ser consultados no Apêndice 4.



(a)

(b)

Figura 53 – Condição de Contorno *Frictional Contact* (Autoria própria, 2025).

Outro aspecto relevante a ser destacado é a condição de contorno relacionada à temperatura à qual os prismas foram submetidos antes do ensaio de compressão simples. Os prismas 2, 3 e 4 foram expostos a temperaturas de 600°C, 800°C e 1000°C, respectivamente. Na modelagem numérica, essas mesmas temperaturas foram aplicadas para garantir a correspondência com os ensaios experimentais. As Figuras 54, 55 e 56 ilustram a condição de contorno referente às temperaturas dos prismas.

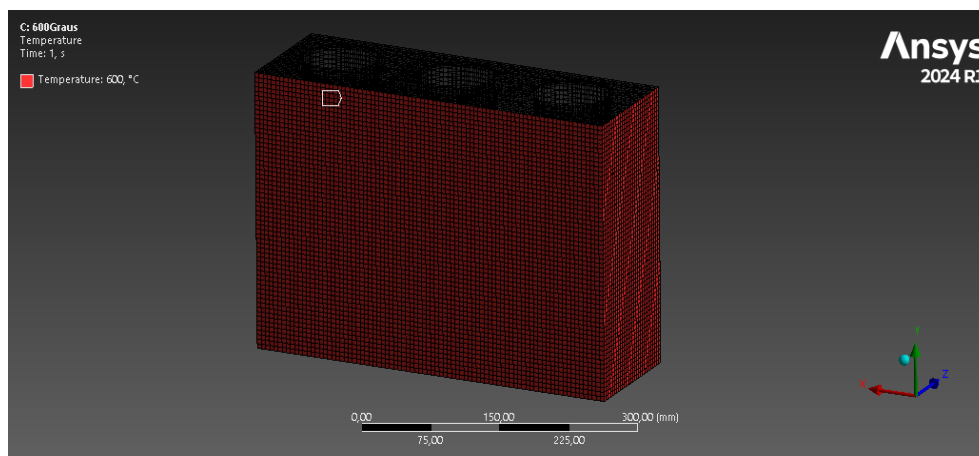


Figura 54 – Temperatura do Prisma 2: 600°C (Autoria própria, 2025).

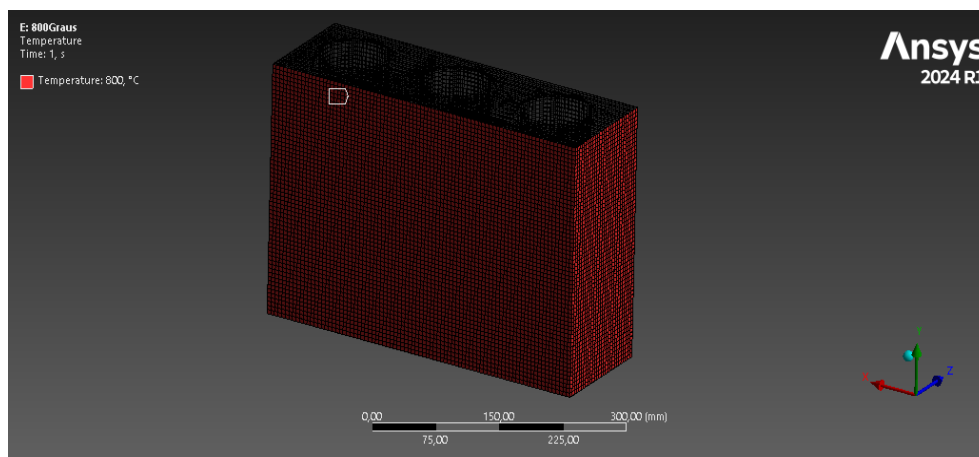


Figura 55 – Temperatura do Prisma 3: 800°C (Autoria própria, 2025).

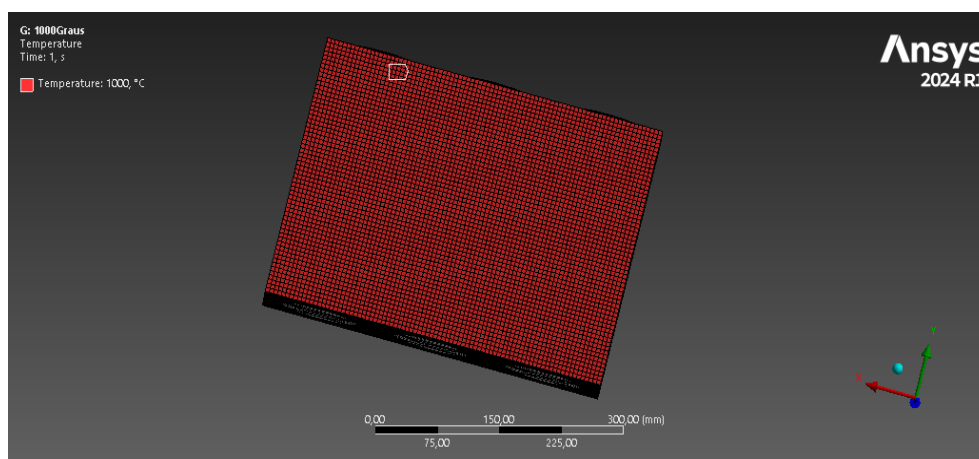


Figura 56 – Temperatura do Prisma 4: 1000°C (Autoria própria, 2025).

As figuras e tabelas apresentadas ilustram a distribuição de temperatura, os deslocamentos térmicos e as tensões geradas nos prismas ao longo da simulação.

Observa-se que, à medida que a temperatura aumenta, há um efeito direto na distribuição das tensões e deformações estruturais, influenciado pela restrição dos apoios e pela forma como o calor se propaga ao longo do material cerâmico.

Em temperaturas de até 800°C, os resultados indicam um comportamento relativamente estável, com tensões e deformações dentro dos limites previstos, sugerindo que os BCEPQ mantêm sua integridade estrutural nessa faixa térmica. Entretanto, para 1000°C, verificam-se deslocamentos mais acentuados e aumento das tensões internas, o que pode indicar um limiar crítico de resistência térmica, possivelmente associado a transformações na microestrutura do material e à redução da sua capacidade mecânica.

A modelagem numérica demonstrou que a configuração dos apoios tem influência significativa no comportamento dos prismas sob carga térmica. Restrições excessivas podem gerar concentrações de tensão, enquanto apoios mais flexíveis favorecem a redistribuições das tensões ao longo da estrutura. Além disso, os resultados reforçam a necessidade de considerar as condições de contorno na calibração dos modelos numéricos, garantindo que as simulações sejam compatíveis com o comportamento real dos BCEPQ em situações de incêndio ou exposição prolongada ao calor.

4.6 DISCUSSÃO COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

A comparação entre os resultados experimentais e os obtidos por modelagem numérica revelou importantes aspectos sobre a confiabilidade e a aplicabilidade do modelo computacional adotado. As simulações foram realizadas no *software ANSYS 2024*, com dois tipos de contato entre os blocos cerâmicos: *No Separation* e *Frictional Contact*, conforme apresentado na Tabela 23. Observou-se uma diferença de aproximadamente 72% nos resultados entre os dois modelos, evidenciando que o tipo de contato exerce influência significativa no comportamento final dos prismas simulados.

Os valores experimentais de resistência à compressão dos prismas foram comparados diretamente com os valores obtidos na modelagem numérica, considerando o contato *No Separation*. A Tabela 26 apresenta essa correlação.

Tabela 26 – Correlação entre os Resultados Experimentais e Numéricos.

Temperaturas (°C)	Experimental (MPa)	Numérico (MPa)	Correlação (%)
30 (ambiente)	1,68	1,13	67%
600	1,68	1,14	68%
800	1,68	1,15	68%
1000	1,95	1,33	68%

Observa-se que os valores obtidos na simulação com o contato *No Separation* foram inferiores aos resultados encontrados com o contato *Frictional Contact*. No modelo com *Frictional Contact*, a diferença entre os resultados experimentais e numéricos foi de 82%, enquanto no modelo com *No Separation*, essa diferença foi reduzida para aproximadamente 68%.

O modelo *Frictional Contact*, que impõe continuidade plena entre os blocos, apresentou resultados mais próximos dos dados experimentais, sugerindo que, para blocos prensados com encaixe (macho e fêmea), essa condição se aproxima da realidade física observada.

Outro aspecto relevante é o comportamento inesperado do prisma a 1000 °C, cuja resistência mecânica superou aquelas observadas a 30 °C, 600 °C e 800 °C. Esse fenômeno pode estar associado à faixa de temperatura de queima original do bloco (em torno de 900 °C) ou a transformações internas que ocorrem em sua estrutura. Nessa faixa, alterações mineralógicas e microestruturais, como a formação de mulita, podem promover a recomposição de ligações e uma sinterização adicional da matriz cerâmica, resultando em maior coesão interna. Ensaios complementares, como difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) pós-queima, reforçam essa hipótese ao evidenciarem a estabilidade da estrutura interna em altas temperaturas.

Assim, os dados indicam um comportamento termoestrutural favorável dos BCEPQ em condições extremas, com destaque para:

- Estabilidade da resistência mecânica até 800 °C;
- Leve incremento na resistência à compressão a 1000 °C;

- Baixo desvio entre os resultados experimentais e numéricos.

5. CONCLUSÃO

A pesquisa realizada demonstrou a importância do dimensionamento adequado das estruturas de alvenaria, especialmente no que diz respeito ao comportamento dessas construções em situações de incêndio. A análise dos resultados evidenciou que as normativas brasileiras, embora forneçam diretrizes importantes, ainda carecem de parâmetros mais completos para uma avaliação eficiente da alvenaria estrutural sob altas temperaturas.

A comparação entre os métodos nacionais e internacionais revelou que, ao integrar normas europeias, como a espessura mínima de 100 mm definida para edificações em situação de incêndio, o projeto da edificação foi aperfeiçoado, adotando-se uma espessura de 140 mm para garantir maior segurança estrutural. A escolha de uma espessura superior à exigida foi confirmada como uma estratégia mais eficaz, pois ofereceu uma proteção adicional sem comprometer a resistência global da estrutura.

Embora estudos anteriores indiquem uma redução na resistência à compressão de blocos, prismas e pequenas paredes quando expostos a altas

temperaturas, os resultados deste trabalho apresentaram um comportamento diferente. O bloco analisado não sofreu perda de resistência final, mesmo após ser submetido a temperaturas elevadas.

Não houve alteração na resistência à compressão dos prismas até a temperatura de 800°C, que foi de 1,38MPa para as três temperaturas analisadas. Acima dessa temperatura, observou-se um aumento de resistência no prisma 4 a 1000°C. Este ganho de resistência pode estar relacionado à temperatura de queima em que os blocos são submetidos, que é de aproximadamente 900°C.

A pesquisa também trouxe à tona a complexidade do comportamento térmico da alvenaria, com a interação de variáveis que influenciam diretamente o desempenho da estrutura, o que torna essencial a análise multidisciplinar na elaboração de projetos. Para avançar neste campo, é necessário realizar novos estudos que considerem a inclusão de materiais alternativos e diferentes tipos de blocos cerâmicos, bem como investigar outras propriedades. Um avanço significativo poderia ser alcançado por meio de modelos numéricos mais complexos, que simulem de maneira mais precisa o comportamento da alvenaria em diferentes cenários de incêndio.

Em vista dos resultados obtidos e das limitações identificadas, é imperativo que futuras pesquisas enfoquem a atualização das normativas brasileiras para incorporar as melhores práticas internacionais e os avanços tecnológicos. A integração de novos métodos experimentais e computacionais permitirá o desenvolvimento de diretrizes mais robustas, garantindo a segurança estrutural em situações extremas e, ao mesmo tempo, promovendo a inovação no uso de materiais de construção.

A continuidade destas investigações é fundamental para assegurar que a alvenaria estrutural continue a ser uma opção confiável e segura em edificações residenciais e comerciais.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento dos prismas em outras temperaturas;

- Simular um modelo reduzido em *software* de elementos finitos que viabilize o estudo de paredes em escala real;
- Diminuir o diâmetro dos furos para verificar se as características dos blocos irão mudar;
- Estudar o comportamento dos blocos, prismas e pequenas paredes usando argamassa refratária em situação de incêndio;
- Comparar o comportamento termoestrutural entre blocos extrudados, prensados e queimados, variando a composição das argilas utilizadas;
- Estudar o comportamento dos blocos quanto ao conforto térmico e eficiência energética;
- Avaliação do efeito de diferentes tipos de carregamento (excêntrico, ciclos térmicos, dentre outros);
- Estudar a influência das propriedades microestruturais dos blocos na resposta termoestrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 1984) Determinação da Massa Específica. NBR 6508. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 1986) Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. NBR 6457. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 1995) Solos – Determinação da composição granulométrica. NBR 6502. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2000) Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento. NBR 14432. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2013) Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. NBR 12118, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2016) Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. NBR 6457, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2016) Determinação do Limite de Liquidez. NBR 6459. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2016) Determinação do Limite de Plasticidade. NBR 7180. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2016) Componentes cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. NBR 7181. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2016) Solo – Ensaio de compactação. NBR 7182. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2017) Componentes Cerâmicos – Blocos cerâmicos para alvenaria Parte 1 – Requisitos: NBR 15270-1. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2017) Componentes Cerâmicos – Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação Parte 3 – Métodos de ensaio: NBR 15270-3. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2020) Alvenaria estrutural – Parte 1: Projeto. NBR 16868-1. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2020) Alvenaria estrutural – Parte 3: Métodos de Ensaio. NBR 16868-3. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2023). Componentes cerâmicos – Parte 1: Blocos e tijolos para alvenaria – Requisitos. NBR 15270-1. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2023). Componentes cerâmicos – Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Métodos de ensaio. NBR 15270-2. Rio de Janeiro.

ANICER, Associação Nacional da Indústria Cerâmica; SEBRAE, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – Cartilha Ambiental: Cerâmica Vermelha. 2020a. Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2020/03/CartilhaAmbientalCeramicaVermelha.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2023.

ANICER, Associação Nacional da Indústria Cerâmica; SEBRAE, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas -. Cartilha Ambiental: Cerâmica Vermelha. 2020b. Disponível em: <<https://revista.anicer.com.br/desempenho-de->

prismas-e-paredes-construidas-com-diferentes-geometrias-de-blocos-ceramicos/>. Acesso em: 22 fev. 2024.

ANSYS Inc. ANSYS Academic Research Mechanical, Release 2024. Canonsburg, PA, USA, 2024.

ALEXANDRE, J. Caracterização das argilas do município de Campos dos Goytacazes para utilização em cerâmica vermelha. Dissertação Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 1997.

ALEXANDRE, J. Análise de Matéria-Prima e Composições de Massa Utilizada em Cerâmicas Vermelhas. Tese de Doutorado em Ciências de Engenharia – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2000.

ALEXANDRE, J.; SILVA, C. Caracterização da argila para confecção de blocos prensados e queimados. Anais do 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica. In: *1º Congresso Latino-Americano de Cerâmica, IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials*, Curitiba, PR. 2012.

ALEXANDRE, J. A.; CERQUEIRA, N. A.; SOUSA, D. J. Avaliação da resistência mecânica de blocos cerâmicos estruturais sob diferentes condições térmicas. *Revista Matéria*, v. 24, n. 2, p. 1–12, 2019.

AKATSU, A.; SATO, N. M. N. Propriedades termofísicas de materiais e componentes de construção, In: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Tecnologia de Edificações. São Paulo, IPT I Pini, pp. 519-522, 1988.

ARAÚJO, M. C. M. Diferente visões da Nebulosa de Órion. *Awesome Universe*, 2013. Disponível em: <<http://awesomeuniverse.org/2013/09/11/diferentes-visões-da-nebulosa-de-orion/>>. Acesso em: 09 mar. 2024.

ARAÚJO, R. S.; LIMA, F. R.; OLIVEIRA, M. L. Desempenho mecânico de blocos cerâmicos prensados e extrudados para alvenaria estrutural. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 1-12, 2020.

AZEVEDO, A. R. G.; XAVIER, G. C.; MARVILLA, M. T.; ZANELATO, E.; CERQUEIRA, N. A.; PEDROTI, L. G.; FERNADES, W. J.; MENDES, B. Assessing the potential of sludge generated by the pulp and paper industry in assembling locking blocks. *Journal of Building Engineering*, v. 23, p. 334-340, 2019.

AZEVEDO FILHO, E.; RIBEIRO, A. C. A governança em aglomerações produtivas: uma análise sobre o setor cerâmico de Campos dos Goytacazes. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, Rio de Janeiro, n. 1, v. 7, p. 97-129, 2011.

BARBOSA, A. P., HOLANDA, J. N. F., & SOUZA, J. S. Caracterização e propriedades de blocos cerâmicos de argila. *Cerâmica*, 48(306), 230-234, 2002.

BOLINA F, Tutikian B, Gonçalves J, Souza T, Manica G. Análise numérico-experimental de paredes de alvenaria de bloco cerâmico com diferentes

espessuras em altas temperaturas. Revista ALCONPAT 2020;10(1):22–35. Disponível em: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i1.415>.

BUCHANAN, A. H. *Structural Design for Fire Safety*. University of Canterbury, New Zealand. John Wiley & Sons, LTD, 421 p. 2002.

BUCHAMAN, A. H.; Abu, A. K. *Structural design for fire safety*. John Wiley & Sons, 2017. 436.

CALLISTER Jr, W.D., RETHWISCH, D.G., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, 9ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016.

CEN – European Committee for Standardization. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. EN 1991-1-2. Brussels: CEN, 2002.

CERQUEIRA, N. A. Parâmetros físicos e mecânicos de blocos prensados e queimados de cerâmica vermelha para uso como alvenaria estrutural. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2017.

CERQUEIRA, N. A.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; SOUZA, V. B.; AZEVEDO, A. R. G. Comportamento Físico e Mecânico de Blocos Prensados e Queimados de Cerâmica Vermelha. *Cerâmica Industrial*, v. 22, n. 5-6, p. 41-49, 2018.

CERQUEIRA, Niander A.; ALEXANDRE, J.; MADALENA, Jonathan A. P.; SILVA, Bruno S.; PICANÇO, Rafael O. Caracterização tecnológica de blocos cerâmicos estruturais produzidos com argilas do Recôncavo Baiano. *Cerâmica*, v. 65, n. 350, p. 178–183, 2019.

CERQUEIRA, N. A.; MARVILLA, M. T.; AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; SOUZA, V. B. *Analysis of deformability modulus by linear and nonlinear elastic methods in ceramic structural masonry and mortars*. *Cerâmica*, v. 66, p. 229-235, 2020.

CERQUEIRA, N. A.; ALEXANDRE, J. A.; LIMA, R. F. Análise microestrutural de blocos cerâmicos submetidos a altas temperaturas. *Cerâmica*, v. 66, n. 380, p. 472–481, 2020.

CERQUEIRA, N. A.; SOUSA, P. F.; ALMEIDA, T. B. Análise termoestrutural de blocos cerâmicos sob condições de incêndio. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 652-670, 2021.

CERQUEIRA, N. A. *Mechanical Feasibility Study of Pressed and Burned Red Ceramic Blocks as Structural and Sealing Masonry*. *Materiais*, v. 15, n. 14, p. 5004, 2022.

CERQUEIRA, N.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; SOUZA, V. B.; AZEVEDO, A. R. G. Análise experimental e numérica de blocos prensados e queimados de cerâmica vermelha. *Anais do 63º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 2019.

Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/anlise-experimental-e-numrica-de-blocos-prensados-e-queimados-de-cermica-vermelha>. Acesso em: 21 abr. 2025.

CHANDRUPATLA T. R.; BELEGUNDU A. D. *Introduction to Finite Elements in Engineering, Fourth Edition*. EUA: Pearson. Disponível em: www.pearsoninternationaleditions.com/chandrupatla, 2012.

COELHO, R. A. S. Avaliação do comportamento de blocos cerâmicos estruturais submetidos à ação do fogo. 2018. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

COUTINHO, A. R., & HOTZA, D. Formação de mulita em cerâmicas estruturais: mecanismo e implicações. *Cerâmica*, 55(335), 241-246, 2009.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. CBMERJ forma nova turma do Curso de Investigação e Perícia de Incêndio. Publicado em: 18 dez. 2024. Disponível em: <https://www.cbmerj.rj.gov.br/cbmerj-forma-nova-turma-do-curso-de-investigacao-e-pericia-de-incendio/>. Acesso em: 18 abr. 2025.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (CBMERJ). Nota técnica Nº 2/2019 – Segurança estrutural contra incêndio - Resistência ao fogo dos elementos de construção. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.cbmerj.rj.gov.br/wp-content/uploads/2022/04/NT-2-19-Seguranca-estrutural-contra-incendio-Resistencia-ao-fogo-dos-elementos-de-construcao.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2025.

COSTA, S. N.; SILVA, V. P. Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio. Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Ed. Paula Souza. 13 p. 2006.

CUNHA, S.; AGUIAR, J.; FERREIRA, V.; TADEU, A. Desenvolvimento de mulita em blocos cerâmicos vermelhos submetidos a altas temperaturas. *Revista Matéria*, [S. l.], v. 23, n. 1, p. e12126, 2018. DOI: 10.1590/S1517-707620180001.0476. Disponível em: <https://www.revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/12126>. Acesso em: 27 maio 2025.

CTIF, *Centre of Fire Statistics (International Association of Fire and Rescue Services)*. *World fire statistics*. Report n. 28, 2023. Disponível em: https://www.ctif.org/sites/default/files/2023-06/CTIF_Report28-ESG.pdf. Acesso em: 18 nov. 2023.

DASSAULT SYSTÈMES. ABAQUS 2018: Unified FEA – User's Manual. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2018.

DONDI, M., MARSIGLI, M., & FABBRI, B. Color development of ceramic bodies: a review. *Industrial Ceramics*, 18(2), 88-95, 1998.

DONDI, M.; ERMOLAEVA, E.; FABBRI, B. *Clay composition and firing temperature: a key factor in the durability of ceramic building materials*. *Applied Clay Science*, v. 23, n. 3, p. 309–316, 2003.

DONDI, M., RAIMONDO, M., & ZANELLI, C. Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification. *Applied Clay Science*, 46(3), 285–293, 2010.

DRYSDALE, D. *An Introduction to Fire Dynamics*. University of Edinburgh, UK. John Wiley & Sons, LTD. 2. ed. 451 p. 1998.

FEITOSA, D. A. de A. Estudo do desempenho térmico e mecânico de blocos cerâmicos estruturais expostos a elevadas temperaturas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

FERREIRA, J. C.; HOLANDA, J. N. F.; SOUZA, G. P. Caracterização físico-química de argilas para uso em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, São Paulo, v. 59, n. 350, p. 178–183. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132013000200013>, 2013.

FERREIRA, M. W.; SILVA FILHO, L. C. P.; REAL, M. V. Análise numérica termomecânica de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. *Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto*, 2019.

FREITAS, D. S. de. Modelagem numérica do comportamento térmico de blocos cerâmicos em alvenaria estrutural expostos a altas temperaturas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

GARCIA, P. D. Contribuições ao estudo da resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos. São Carlos. 115p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

GOLDSTEIN, J. I., NEWBURY, D. E., JOY, D. C., LYMAN, C. E., ECHLIN, P., LIFSHIN, E., SAWYER, L., & MICHAEL, J. R. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis* (4th ed.). Springer, 2017.

GOMES, T. A.; PONTES, F. M. Comportamento térmico de blocos cerâmicos expostos a múltiplos ciclos de aquecimento. *Revista Engenharia Civil*, v. 12, n. 1, p. 44–50, 2016.

GOULARTE, C. L. Caracterização de propriedades térmicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha com adição de resíduos industriais. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pelotas, 2018. Disponível em: <https://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/9120> Acesso em: 2 maio 2025.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. *Física 2*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996. 4. Ed. 289 p.

HILSDORF, H. K. *Investigation into de Failure Mechanisms of Brick Masonry Loaded in Axial Compression*, *Designing, Engineering and Construction with Masonry Products*, Gulf Publishing CO. Houston, pp. 34 – 41, 1969.

HOLANDA, J. N. F.; SOUZA, G. P. Estudo da formação de fases refratárias em blocos cerâmicos estruturais. *Cerâmica*, v. 50, n. 315, p. 191–197, 2004.

IBGE, Instituto Brasileiro De Geografia E Estatísticas. Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e os produtos - Prodlists Indústria 2016 a 2019. 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7752#resultado>. Acesso em: 24 nov. 2023.

INGHAM, J. *Forensic Engineering of Fire-Damaged Structures*. ICE, v. 162, p. 12-17, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8421: Fire protection – Vocabulary: Part 1. *General terms and phenomena off fire*, 1987.

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

INTERNATIONAL CONFEDERATION FOR THERMAL ANALYSIS AND CALORIMETRY (ICTAC). Thermal analysis standards and terminology: recommendations by the ICTAC Committee. [S.l.]: ICTAC, 2000. Disponível em: <https://www.ictac.org/documents/standards>. Acesso em: 18 abr. 2025.

KIMURA, E. F. A. Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio. 2009. 212p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

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

LOURENÇO, P. J. B. B. *Computational strategies for masonry structures*. 1996. 220 p. *Delft University Press. Thesis Delft University of Thechnology*, 1996.

MACEDO, A., HOLANDA, J. N. F., & SOUZA, J. S. Transformações térmicas em argilas caulínicas. *Cerâmica*, 51(318), 148-154, 2005.

MENEGON, J.; GRAEFF, Â. G.; SILVA FILHO, L. C. P. *Structural masonry walls exposed to high temperatures with thermal expansion control*. *Revista ALCONPAT*, v. 10, n. 1, p. 97-113. Disponível em: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i1.440>, 2019.

MENEGON, J.; REGINATTO, L. A.; GRAEFF, Â. C.; LORENZI, L. S.; LORENZI, A.; SILVA FILHO, L. C. P. Análise de paredes de alvenaria estrutural através da termografia infravermelha. In: CBPAT 2018, Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, 2018, Campo Grande, MS. Anais [...]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/263371>. Acesso em: 22 nov. 2023.

MENEZES, R. R., NEVES, G. A., & FERREIRA, H. C. Reaproveitamento de resíduos de granito em massa cerâmica vermelha. *Cerâmica*, 51(317), 30-36, 2005.

MIRANDA, L. A.; CORRÊA, M. R. S. Estudo do efeito do não preenchimento das juntas verticais e eficiência do graute na resistência da alvenaria estrutural de

blocos cerâmicos. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, v. 14, n. 63, p. 33-48, 2012. ISSN: 1809-5860.

MONK, C. B. Jr. *A historical survey and analyses of the compressive strength of masonry. Research report No. 12, Structural Clay Products Research Foundation, Geneva, Ill, 1967.*

MONTEIRO, S. N., & VIEIRA, C. M. F. Influência da hematita nas propriedades de produtos cerâmicos vermelhos. *Cerâmica*, 50(316), 230-234, 2004.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION - NFPA. All about fire. Disponível em: <<http://www.nfpa.org/news-and-research/news-and-media/pressroom/reporters-guide-to-fire-and-nfpa/all-about-fire>>, 2016. Acesso em: 18 nov. 2023.

NESSRALLA, M. A. Resistência à compressão de paredes de alvenaria estrutural: bloco cerâmico de 44cm. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.

OLIVEIRA, L. C.; SOUZA, R. M.; SILVA, J. R. M.; BARBOSA, A. L. R. Estudo termogravimétrico de argilas caulínicas para aplicação em cerâmica estrutural. *Cerâmica*, São Paulo, v. 58, n. 345, p. 234–241, 2012.

OLIVEIRA, L. C.; SOUZA, D. M.; RIBEIRO, B. S.; NASCIMENTO, Carlos T.; MACHADO, Heloisa F. Avaliação da composição mineralógica de blocos cerâmicos prensados e queimados. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, v. 45, p. 88–96, 2018.

OLIVEIRA R. G, RODRIGUES J. P. C, PEREIRA J. M, LOURENÇO P. B, LOPES R. F. R. *Experimental and numerical analysis on the structural fire behaviour of three-cell hollowed concrete masonry walls.* *Eng Struct*; 228:111439. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.>, 2021.

OTI, J. E. *Design thermal values for unfired clay bricks.* 2009. 9 p. Artigo científico (Jornal Materials and Design) - University of Glamorgan, UK, 2009. Disponível em: <homepage: www.elsevier.com/locate/matdes>.

PARSEKIAN, G. A.; DEANA, D.F.; BARBOSA, K. C.; INFORSATO, T. B. Retração em Alvenaria Estrutural. *Téchne, Revista de Tecnologia da Construção São Paulo*, n. 119. Fev. 2007.

PARSEKIAN, G. A. Parâmetros de projeto de alvenaria estrutural com blocos de concreto. São Carlos: EdUFSCar, 2012.

PASSOS, M. E. M.; SANTOS, F. A.; CARVALHO, M. C. R. Avaliação experimental do comportamento e da resistência à compressão de paredes com juntas verticais não preenchidas. In: *INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES*, 7, Belo Horizonte. Proceeding. Belo Horizonte: [s.n.]. p.163-167, 2002.

PEDROTI, L. G.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M.F.; BAHIENSE, A. V.; MAIA, P. C. A. Desenvolvimento de Massa Cerâmica para Blocos Queimados e Prensados. *Cerâmica Industrial*, v. 16, n. 1, p. 25-30, 2011.

PEDROTI, L. G. Desenvolvimento de massa argilosa com uso de resíduo de granito para obtenção de blocos cerâmicos prensados de encaixe de matriz argilosa. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2011.

PEDROTI, L. G. Estudo de Conformidades em Relação à ABNT de Blocos Cerâmicos Prensados e Queimados. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2007.

PELETEIRO, S. C. (2002). Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural. 143 p. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2002.

PITHON, A. J. C.; BROCHADO, M. R.; BARBOSA, C. M. Rede de empresas: proposta de modelo organizacional do setor de Cerâmica vermelha de Campos dos Goytacazes. In. Simpósio de Engenharia de Produção, 13, 2006, Bauru. Anais... Bauru: UNESP, 2006.

QUISPE, A. P. C. Análise numérica da transferência de calor em paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos em situação de incêndio. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/27196>. Acesso em: 21 abr. 2025.

RAMALHO, M. A., CORRÊA, M. R. S. (2003). Projetos de Edifícios de Alvenaria Estrutural. 1. ed. São Paulo: Editora Pini, 174 p.

RAMOS, A. L., OLIVEIRA, A. P. N., & VIEIRA, C. M. F. Comportamento térmico de argilas caulínicas. *Cerâmica*, 59(349), 75-81, 2013.

RAASK, E. Mineral impurities in coal combustion: behavior, problems and remedial measures. Hemisphere Publishing, 1985.

REGOBELLO, R. Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço concreto em situação de incêndio. 2007. 269p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

REICHERT, D. A., RECCIUS, C. H., & BERGMANN, C. P. Transformações térmicas da ilita. *Cerâmica*, 50(315), 221-226, 2004.

RIBEIRO, G. C.; FERREIRA, A. M.; SANTOS, R. R. Modelagem numérica de alvenarias submetidas a altas temperaturas utilizando o método dos elementos finitos. *Revista de Engenharia Civil, Curitiba*, v. 29, n. 1, p. 21-33, 2022.

RIGÃO, A. O. Comportamento de pequenas paredes de Alvenaria Estrutural frente a altas Temperaturas. Santa Maria, 2012. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, São Maria, 2012.

RIGÃO, A. O., FAGUNDES, R. M. C., GROTO, L. G., & VISINTAINER, M. R. M. Desempenho mecânico de alvenaria estrutural cerâmica e seus componentes em temperaturas elevadas / *Mechanical performance of ceramic structural masonry and its components at elevated temperatures. Brazilian Journal of Development*, 7(3), 22402–22415. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-113>, 2021.

RODOVALHO, F.S. Simulação numérica de blocos e prismas de alvenaria em situação de incêndio. 2018. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

RODOVALHO, F. S.; SIMÕES, Y. S.; CORREA, M. R. S. Análise térmica de alvenaria estrutural em situação de incêndio: um estudo do gradiente térmico. In: CILAMCE 2017, XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Anais [...], 2017.

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

RUSSO, S.; SCIARRETTA, F. *Experimental and Theoretical Investigation on Masonry after High Temperature Exposure*. *Exp Mech*, v. 52, p. 341-359. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11340-011-9493-0>, 2012.

RUSSO, S.; SCIARRETTA, F. *Masonry exposed to high temperatures: Mechanical behaviour and properties – An overview*. *Fire Safety Journal*, v. 55, p. 69-86, 2013. ISSN 0379-7112. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.10.001>.

SAADA, R. A. *Resistance to fire of walls constituted by hollow blocks: Experiments and thermal modeling*. 2006. 10 p. Artigo científico (Jornal ScienceDirect) - Université de Marne-La-Valle, 2007. Disponível em: www.elsevier.com/locate/apthermeng.

SÁNCHEZ, E. Nova normalização brasileira para alvenaria estrutural. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

SANTOS, P. S. Tecnologia de Argilas aplicada às argilas brasileiras. Vol. 1: Fundamentos. São Paulo: Edgard Blucher, 1975.

SANTOS, M. J. F. Análise da resistência de prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica para diferentes tipos de argamassas. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS): Santa Maria, RS, 2008. 135f.

SANTOS, T. A.; OLIVEIRA, L. C.; SOUZA, R. M.; FERREIRA, Renata G.; MOTA, Eduardo S. Influência dos óxidos de ferro nas propriedades térmicas e mecânicas de blocos cerâmicos. *Revista Matéria*, v. 21, n. 3, p. 132 – 140, 2016.

SANTOS, C. F. R.; SIMÕES, Y. S.; RODOVALHO, F. S.; NALON, G. H. *Thermo-structural modeling of clay units masonry walls under fire conditions*. Florianópolis: Cilamce, 2017.

SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; CARLO, U. D.; SILVA, V. P. A segurança contra incêndios no Brasil. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 484 p.

SILVA, M. L. Colapso em caso de incêndio em edifícios de alvenaria resistente. 2016. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2016.

SILVA, D. M. Estudo da influência da temperatura de queima nas propriedades tecnológicas de cerâmicas vermelhas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/250087991.pdf> Acesso em: 2 maio 2025.

SILVA, L. R.; SANTOS, A. M.; FERREIRA, A. R. Influência do nióbio em cerâmicas estruturais: potencialidades e aplicações. *Revista Brasileira de Materiais*, v. 10, n. 1, p. 88–94, 2021.

SILVA, R. J.; MOURA, K. L.; PEREIRA, A. C. Simulação numérica do desempenho térmico de blocos cerâmicos estruturais. *Revista Matéria*, v. 27, n. 1, p. e12543, 2022. DOI: 10.1590/S1517-707620220001.1443, 2022.

SILVA, T. H.; MELO, L. A. Análise computacional do comportamento de blocos cerâmicos em incêndios utilizando o software ANSYS. *Revista de Modelagem Computacional*, Vitória, v. 13, n. 4, p. 88-102, 2023.

SOUZA, A. M. de; FERREIRA, V. H.; NASCIMENTO, E. C. Análise termoestrutural de alvenaria cerâmica submetida a incêndio utilizando o método dos elementos finitos. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 10, n. 1, p. 89–101, 2023. DOI: 10.21439/rbes.v10i1, 2023

SOUZA SANTOS, P. *Ciência e tecnologia de argilas*. Edgard Blücher, 1989.

SOUZA, S. D. C.; ELER, D. C.; ARICA, J. Um estudo sobre o impacto da mudança tecnológica no pólo de cerâmica vermelha do Norte Fluminense. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 23, 2003, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: UFOP, 2003.

SOUZA, M. F.; PEREIRA, F. R.; ARAÚJO, R. C. Efeito dos óxidos de ferro nas propriedades físicas de blocos cerâmicos. *Construmat*, v. 9, n. 1, p. 33–40, 2017.

SOUZA, D. M.; NASCIMENTO, R. M.; SANTOS, T. T.; SILVA, J. R. M. Influência mineralógica de argilas caulínicas na qualidade de produtos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 23, n. 2, p. 32–38, 2018.

SOUSA, E. M.; LIMA, J. C.; BRITO, A. F. Considerações sobre segurança ao fogo em edificações de alvenaria estrutural: revisão normativa e estado da arte. *Revista Técnico-Científica da Engenharia Civil*, Belo Horizonte, v. 12, n. 3, p. 45-59, 2020.

STANCATO, A. C. Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve. *Dissertação (Mestrado)*. Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Civil. Campinas –SP, 184 p. 2000.

TAUIL, C. A.; NESE, F. J. M. *Alvenaria Estrutural*. São Paulo: Pini, 2010.

VIEIRA, C. M. F., & MONTEIRO, S. N. Argilas industriais: aplicações e perspectivas. *Cerâmica*, 51(317), 220-228, 2005.

VILATÓ R. R. (2004). Influência do preenchimento das juntas verticais entre componentes no comportamento da alvenaria estrutural. 165p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

WALTON, W. D; THOMAS, P. H. *Section3/Chapter 6: Estimating temperatures in compartment fires*. In: DiNenno, P. J.; Beyler, C.L.; Custer, R. L. P.; Walton, W. D., (Eds.). *Handbook of Fire Protection Engineering*. 2nd Edition. Quincy: NFPA, 1995.

XAVIER, G. C.; AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; MONTEIRO, S. N.; PEDROTI, L. G. *Determination of useful life of red ceramic parts incorporated with ornamental stone waste*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, n. 2, p. 04018381, 2019.

ZECHMEISTER, Dóris. Estudo para a padronização das dimensões de unidades de alvenaria estrutural no Brasil por meio do uso da coordenação modular..p.161. *Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil*, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

APÊNDICE

Apêndice 1 – BLOCOS CERÂMICOS

1.1 Características Geométricas dos Blocos

Tabela 27 – Análise Dimensional NBR15270-2: Anexo A (ABNT, 2023).

Bloco	Medidas (mm)			S1 (mm)	S2 (mm)	Área Bruta (mm ²)	Área Líquida (mm ²)
	L	H	C				
B1	139,58	62,2	282,03	27,46	27,48	39365,75	33814,74
B2	140,76	62,7	282,55	28,02	27,93	39771,74	34241,84
B3	141,04	63,0	284,08	28,34	28,21	40066,64	34523,55
B4	139,32	62,0	281,52	27,32	27,42	39221,37	33673,00
B5	140,47	61,9	281,58	27,97	28,07	39553,54	33994,61
B6	140,59	62,0	281,72	27,51	27,75	39607,01	34037,50
B7	140,91	62,8	281,98	28,27	28,24	39733,80	34169,58
B8	141,01	62,9	283,48	28,43	28,36	39973,51	34357,61
B9	140,83	62,6	284,42	28,05	27,97	39814,05	34134,21
B10	140,45	62,2	283,03	27,68	27,59	39604,09	33997,48
B11	139,13	62,3	281,74	27,33	27,28	39198,49	33522,65
B12	141,23	63,0	284,11	28,07	27,94	40124,86	34499,65
B13	141,26	63,2	282,71	28,16	28,03	40177,17	34536,00
Média	140,51	62,5	282,69	27,89	27,87	39708,62	34115,57
Desvio Padrão	0,71	0,46	1,04	0,39	0,34	324,99	321,60
CV (%)	0,51	0,73	0,37	1,39	1,21	0,82	0,94

1.2 – Absorção de Água dos Blocos

Tabela 28 – Índice de Absorção de Água NBR15270-2 (ABNT, 2023).

Bloco	M _u (g)	M _s (g)	AA (%)	Média (%)
1	2791,60	3430,80	22,90	22,83
2	2742,00	3373,00	23,01	
3	2781,80	3410,50	22,60	
4	2760,80	3390,1	22,79	
5	2746,70	3373,4	22,82	

6	2768,60	3402,3	22,89	
---	---------	--------	-------	--

1.3 – Massa Específica Aparente dos Blocos

Tabela 29 – Resultados Obtidos no Ensaio de MEA NBR 15270-2 (ABNT, 2023).

Bloco	M _s (g)	Valor Líquido Blocos (cm ³)	MEA (g/cm ³)	Média (g/cm ³)
1	2647,80	2150,04	1,232	1,21
2	2642,60	2194,61	1,204	
3	2653,90	2174,77	1,220	
4	2641,10	2201,37	1,200	
5	2636,30	2198,92	1,199	
6	2650,60	2166,85	1,223	

1.4 – Resistência à Compressão dos Blocos

Tabela 30 – Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão NBR15270-2 (ABNT, 2023).

Bloco	Carga Suportada em Newton (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistência à Compressão (MPa)	Média (MPa)
1	347840,60	39365,75	8,84	8,30
2	298611,40	39771,74	7,51	
3	324991,19	40066,64	8,11	
4	339406,91	39221,37	8,65	
5	328913,83	39553,54	8,32	
6	345879,28	39607,01	8,73	
7	306554,75	39733,80	7,72	
8	357745,28	39973,51	8,95	
9	360785,33	39814,05	9,06	
10	343035,36	39604,09	8,66	
11	259384,94	39198,49	6,62	
12	323029,87	40124,86	8,05	
13	347938,66	40177,17	8,66	

Apêndice 2 – ANÁLISE TERMOESTRUTURAL DOS PRISMAS DE 5 FIADAS

Nas figuras 57 a 60, são apresentadas imagens dos ensaios para análise termoestrutural que foram realizados nos prismas de cinco fiadas na Universidade Federal de Viçosa (UFV).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 57 – Ruptura do Prisma 1 na UFV – Temperatura de 30°C (Autoria própria, 2024).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 58 – Ruptura do Prisma 2 na UFV – Temperatura de 600°C (Autoria própria, 2024).



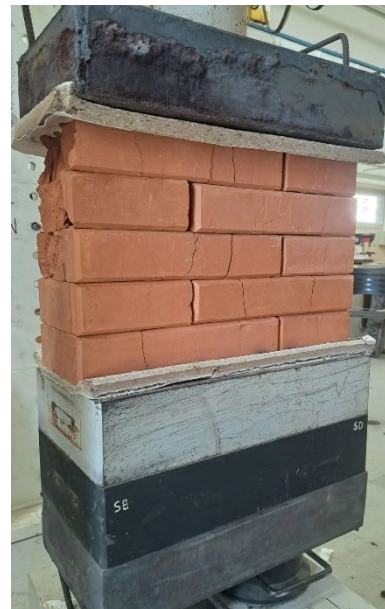
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 59 – Ruptura do Prisma 3 na UFV – Temperatura de 800°C (Autoria própria, 2024).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 60 – Ruptura do Prisma 4 na UFV – Temperatura de 1000°C (Autoria própria, 2024).

Apêndice 3 – COMPRESSÃO DOS PRISMAS EM TEMPERATURA AMBIENTE

A Figura 61 apresenta o Ensaio de Resistência à Compressão realizado em prismas com cinco fiadas, na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).

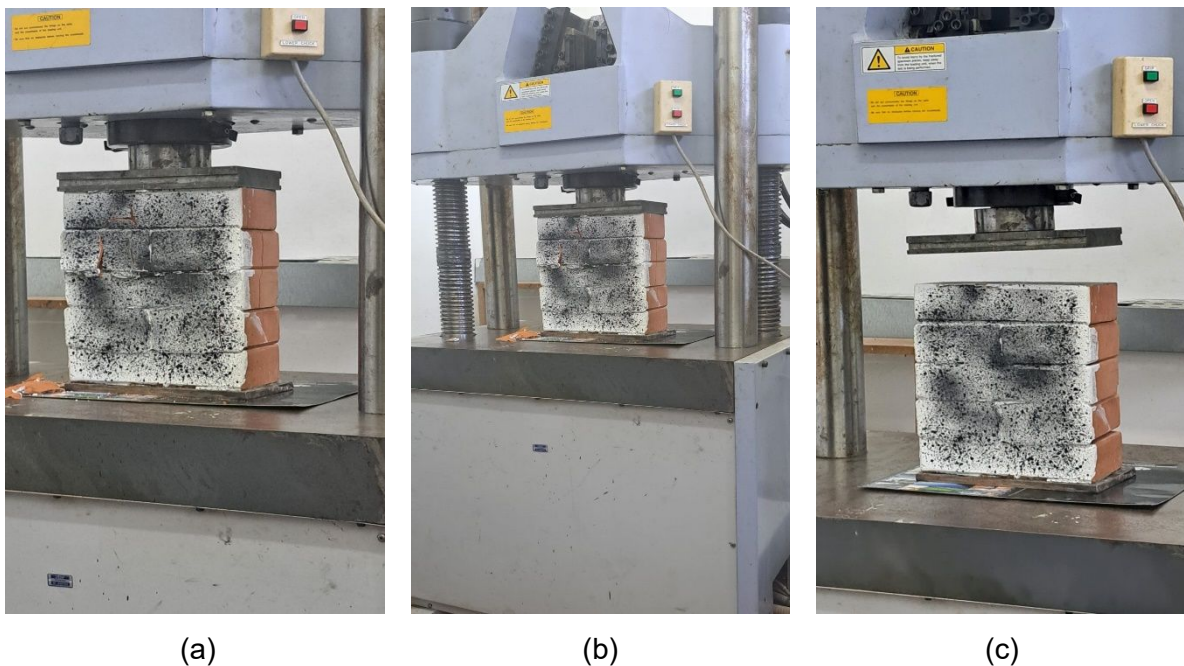


Figura 61 – Ruptura dos Prismas no LECIV/UENF (Autoria própria, 2024).

Apêndice 4 – PEQUENAS PAREDES

As Figuras 62 e 63 apresentam o Ensaio de Resistência à Compressão realizado em pequenas paredes na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).

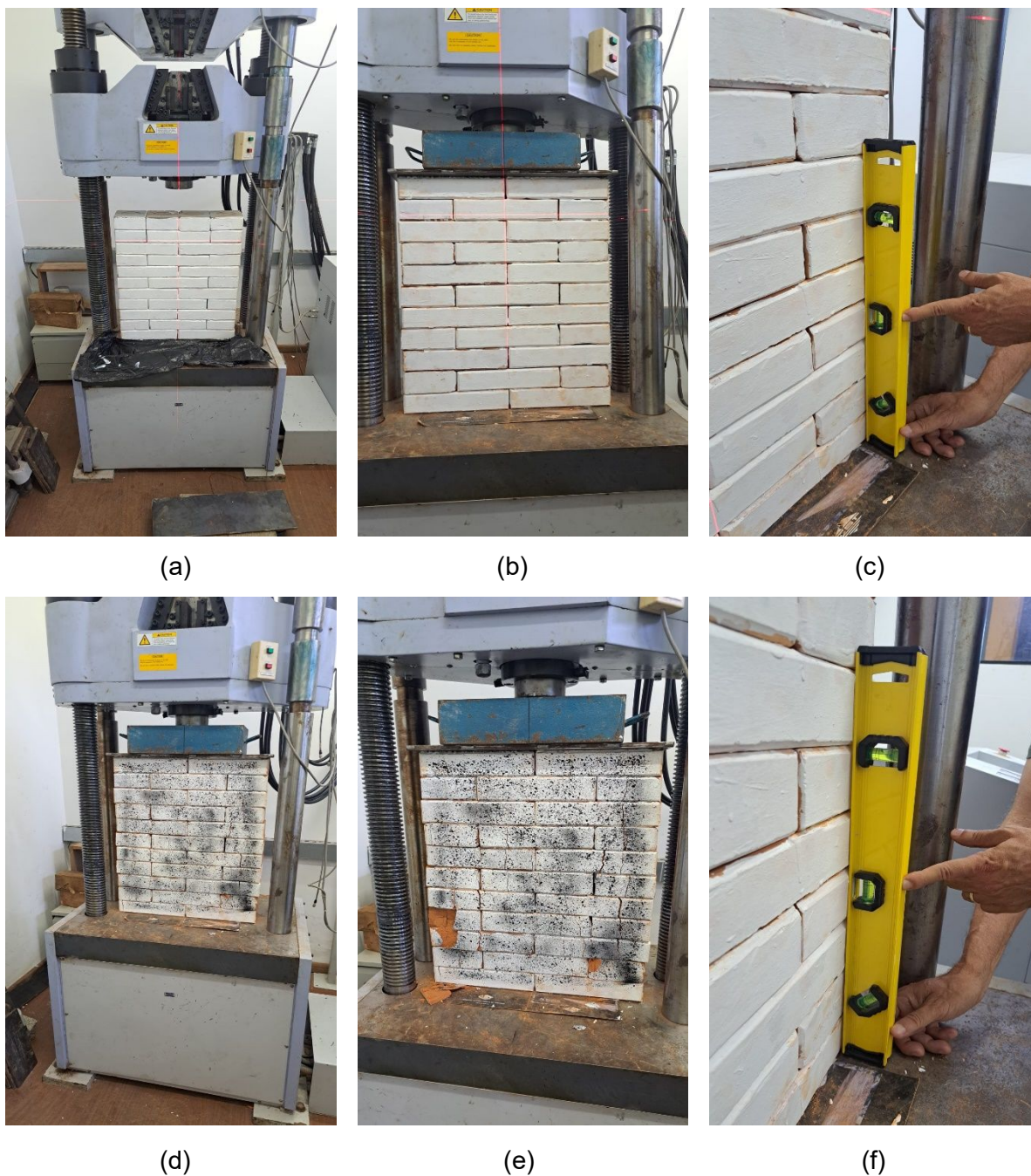


Figura 62 – Ruptura das Pequenas Paredes LECIV/UENF (Autoria própria, 2024).



(a)



(b)



(c)



(e)



(f)

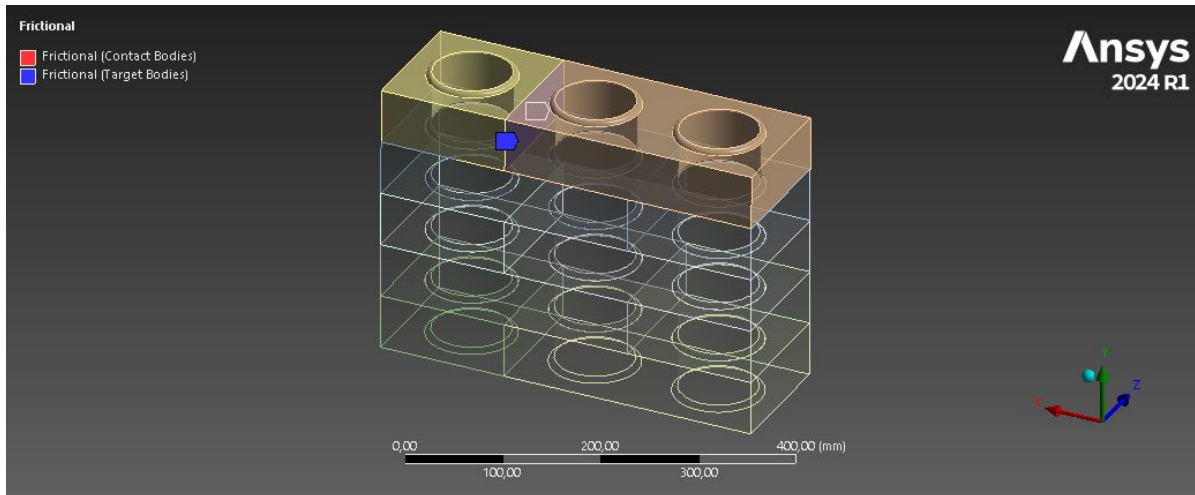


(g)

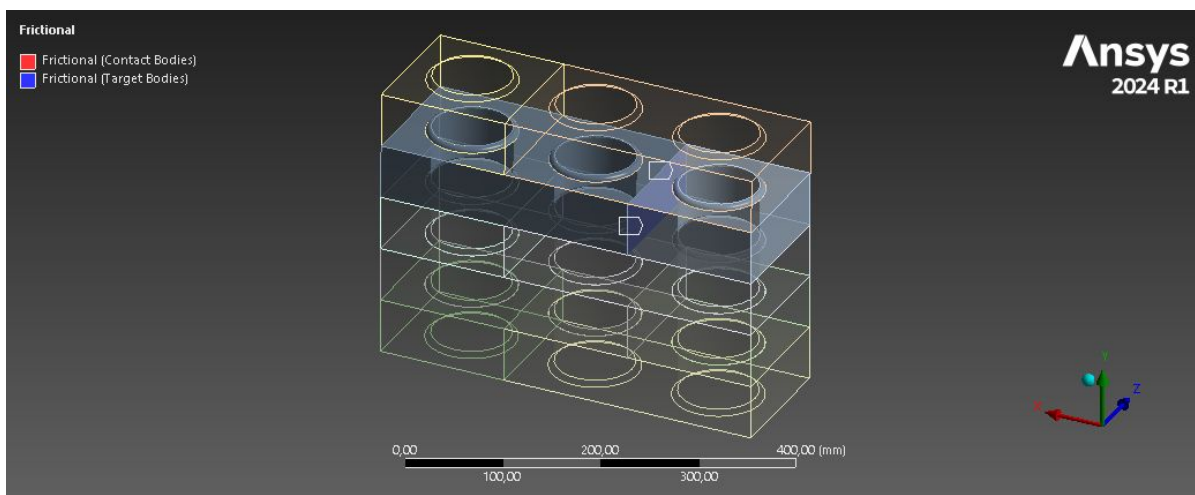
Figura 63 – Ruptura das Pequenas Paredes LECIV/UENF (Autoria própria, 2024).

Apêndice 5 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA

5.1 – Contato entre os Blocos



(a)



(b)

Figura 64 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).

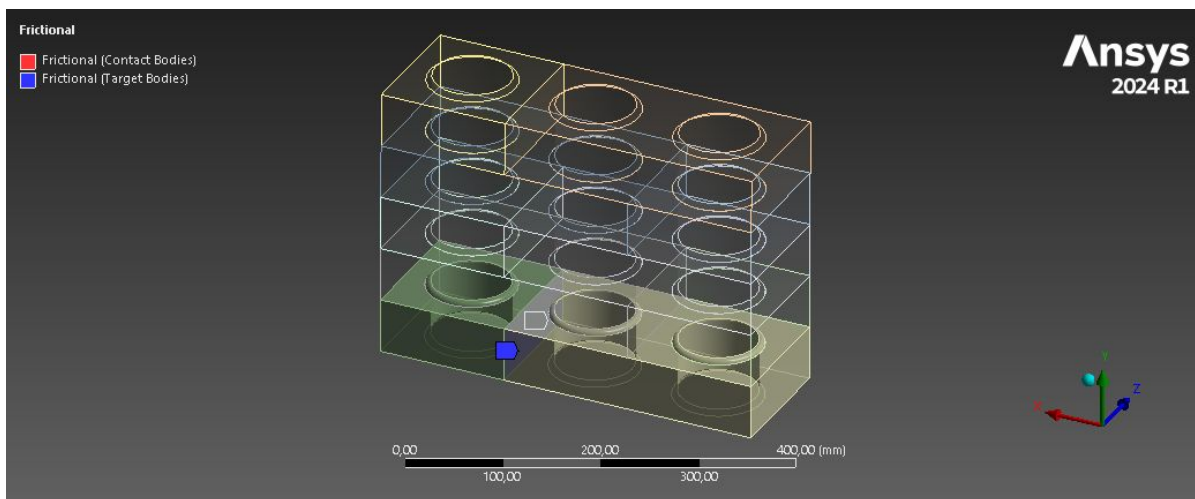
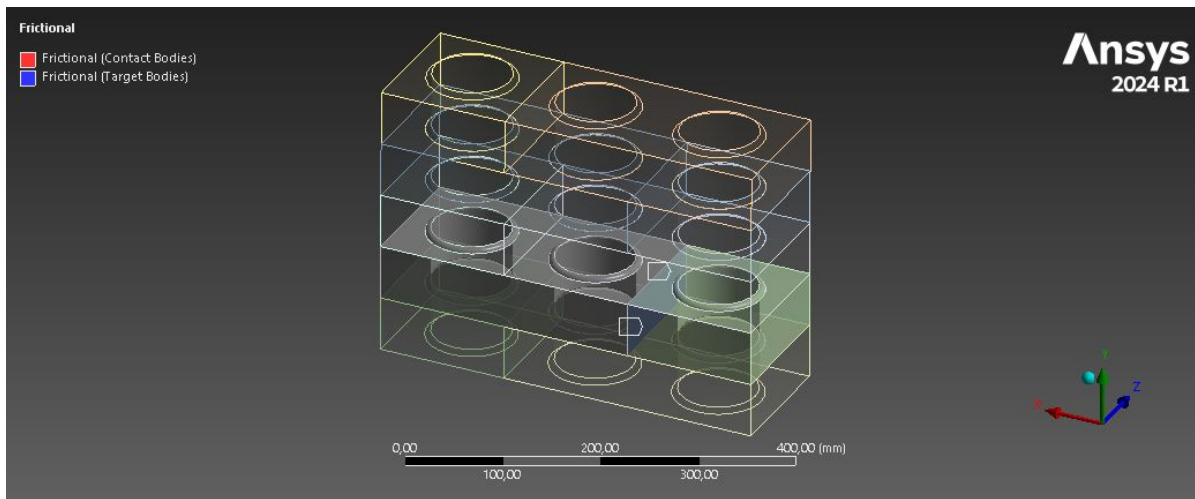
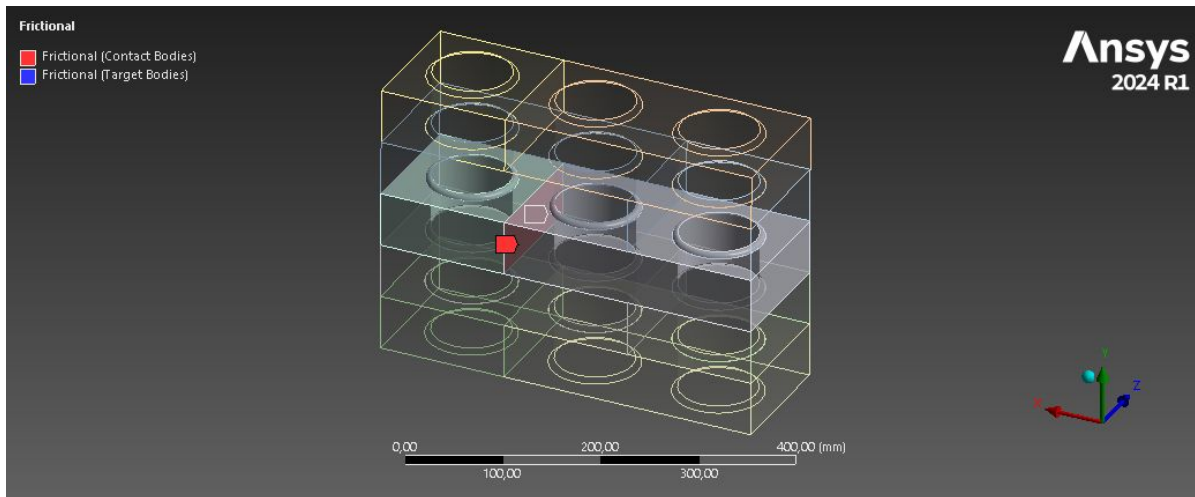
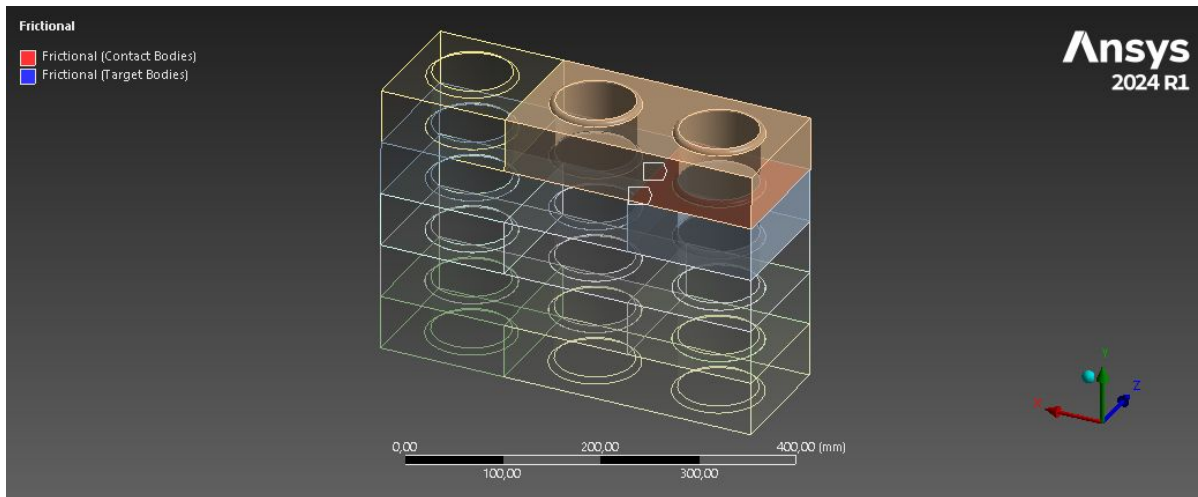
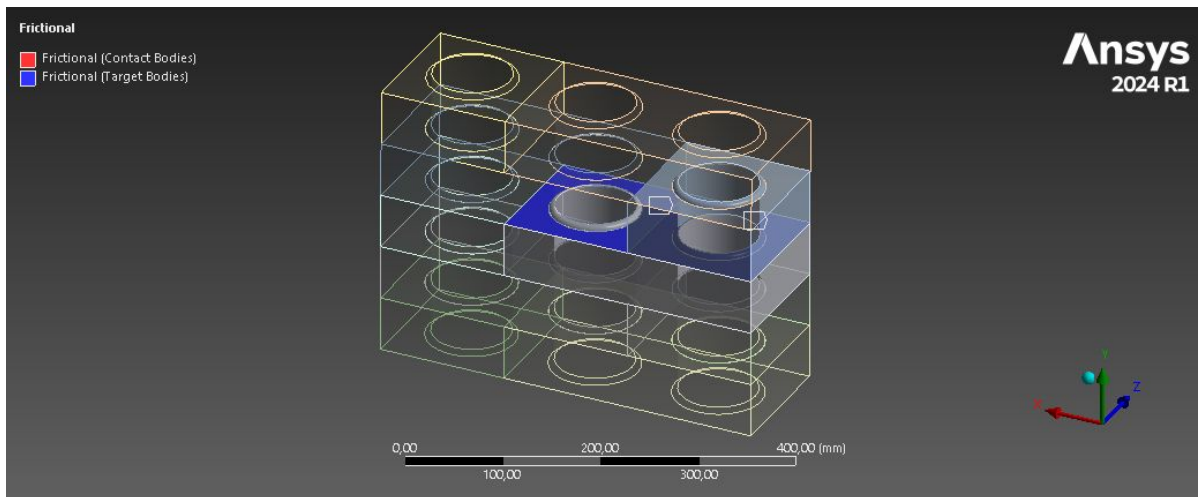


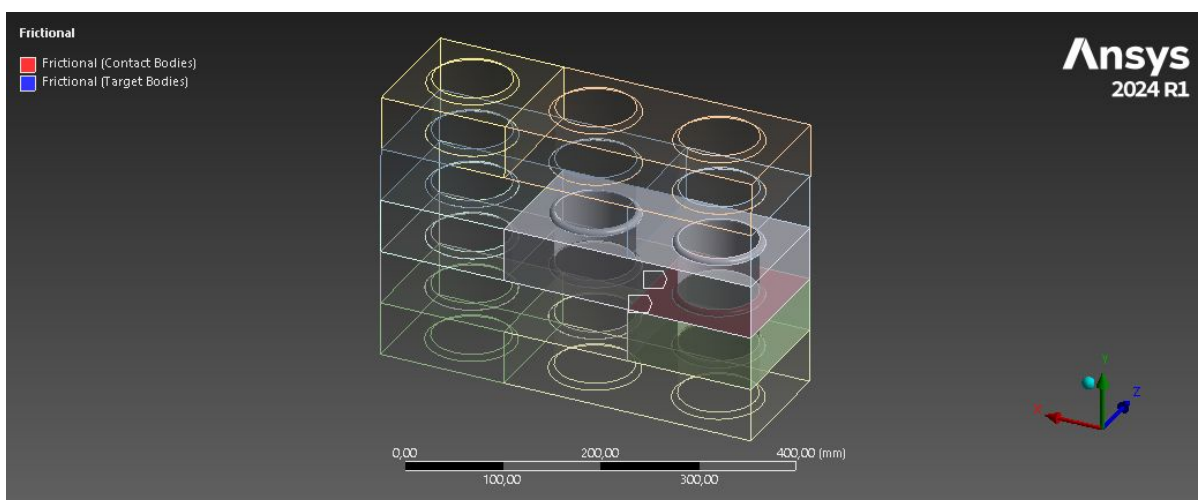
Figura 65 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).



(a)



(b)



(c)

Figura 66 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).

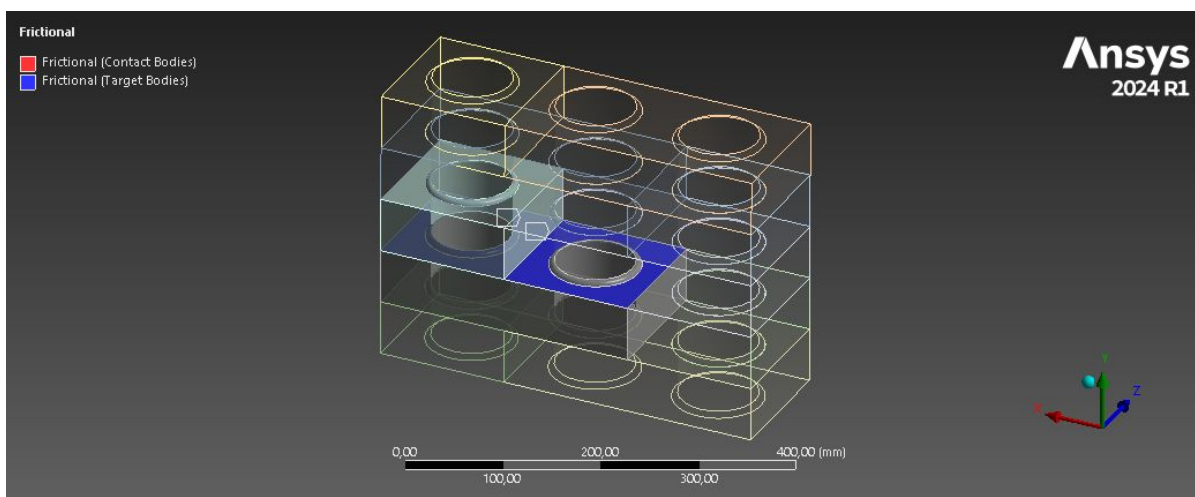
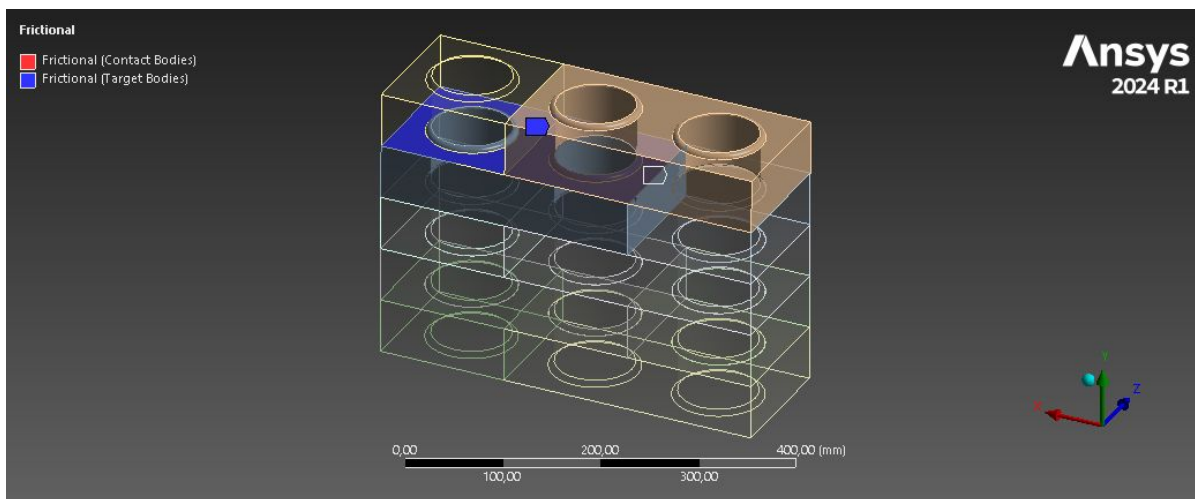
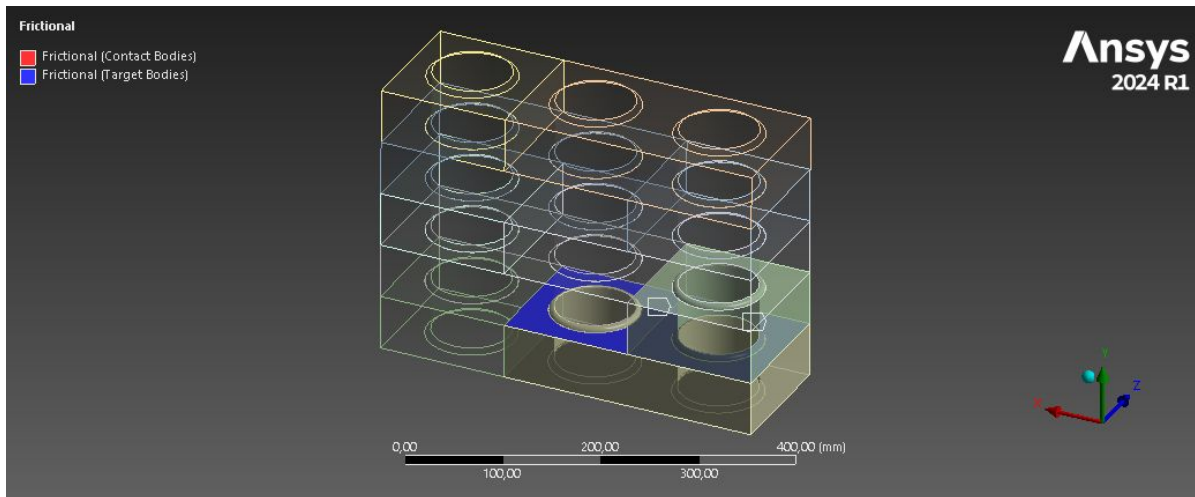


Figura 67 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).

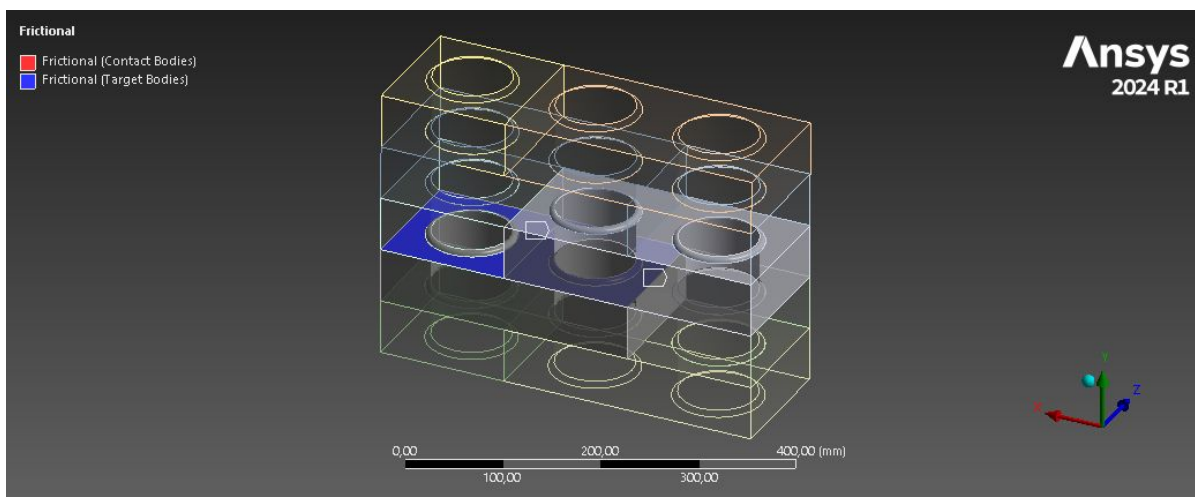
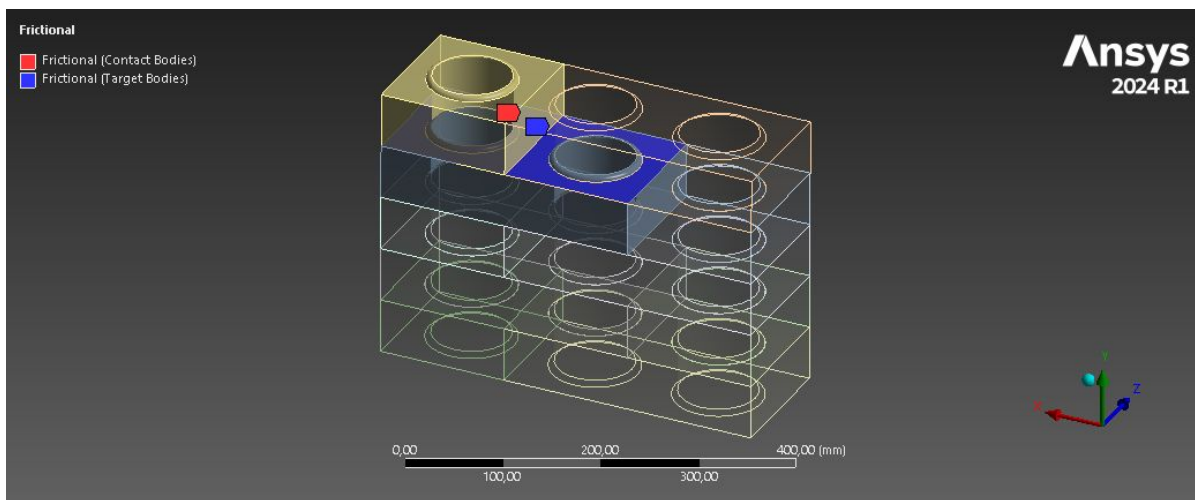
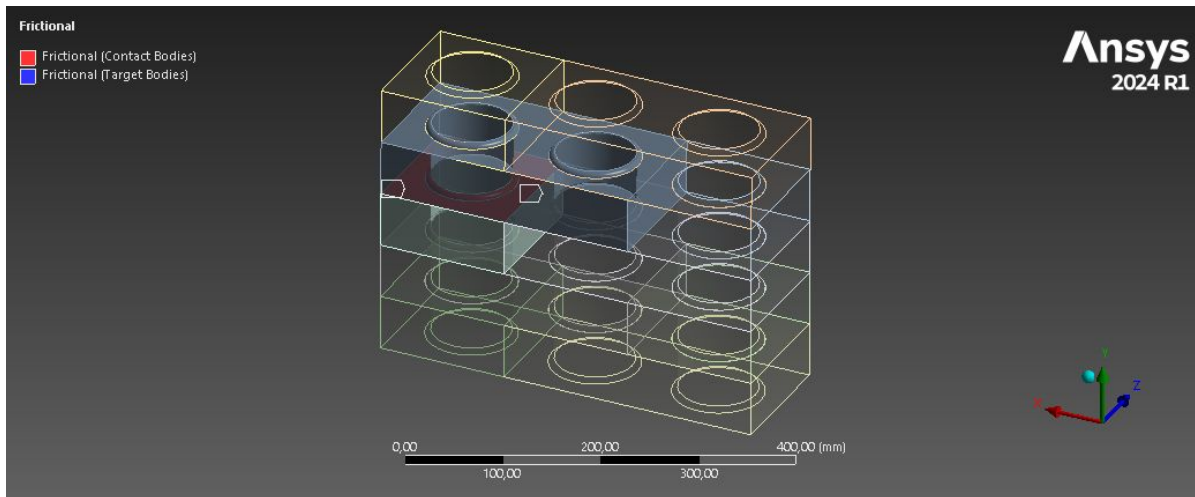


Figura 68 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).

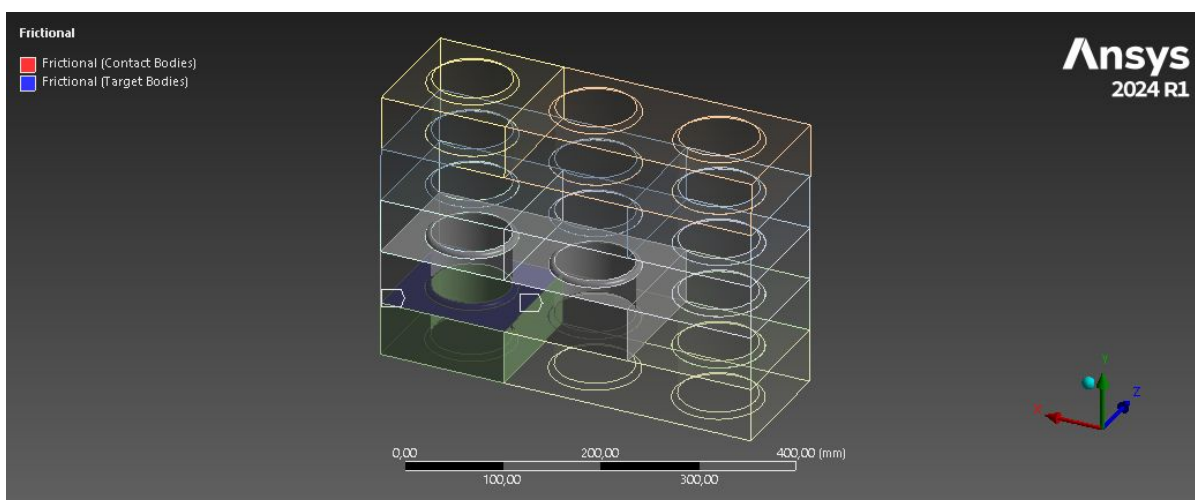
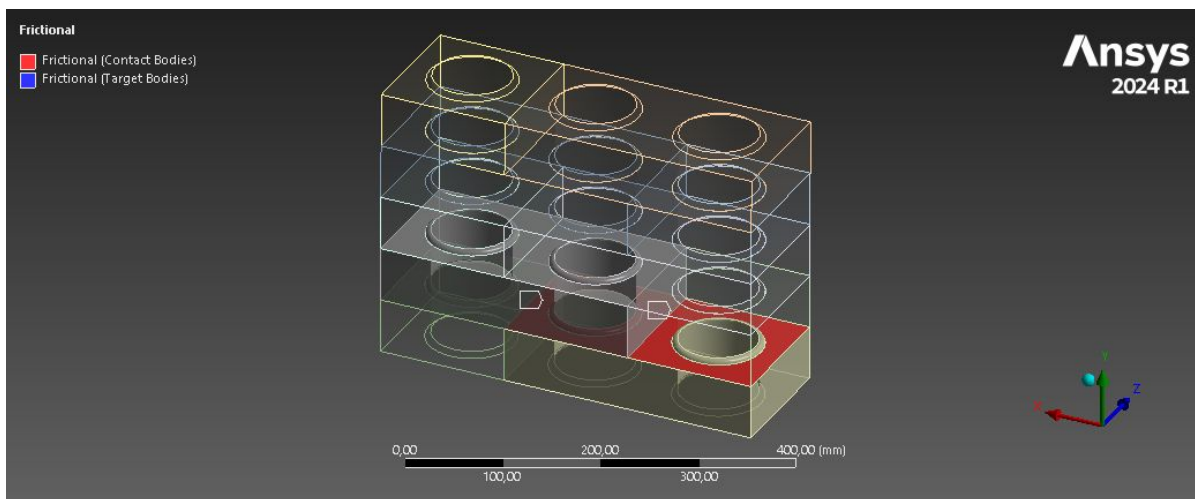
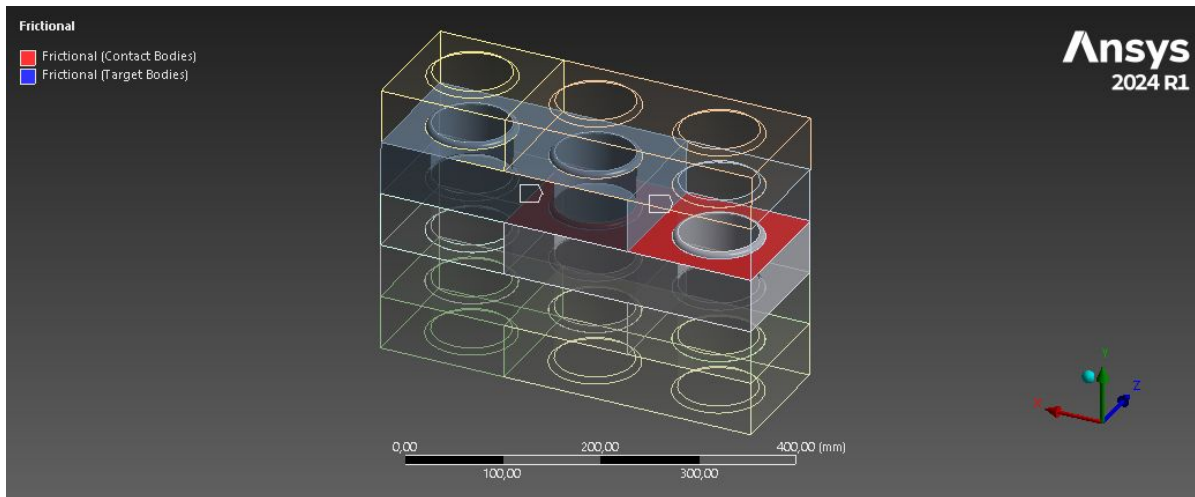


Figura 69 – Contato entre os Blocos Cerâmicos (Autoria própria, 2025).

5.2 – Deformação dos Prismas

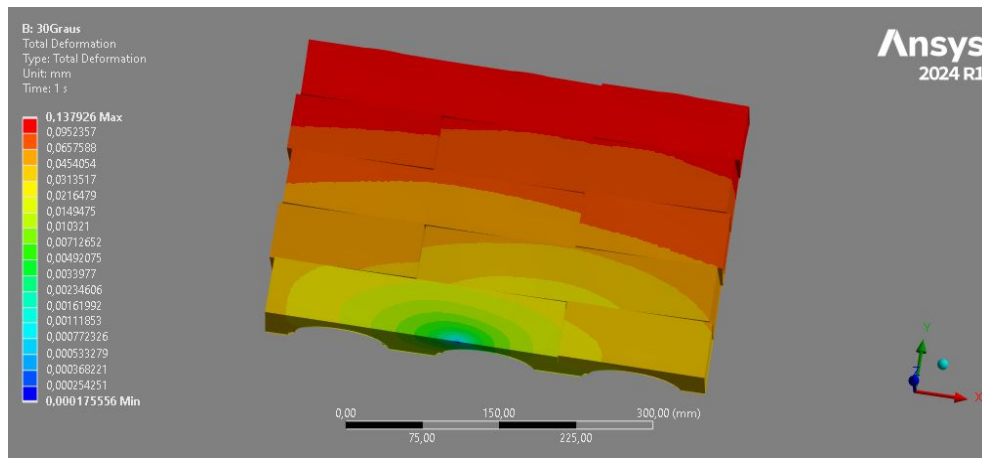


Figura 70 – Deformação do Prisma 1: 30°C (Autoria própria, 2025).

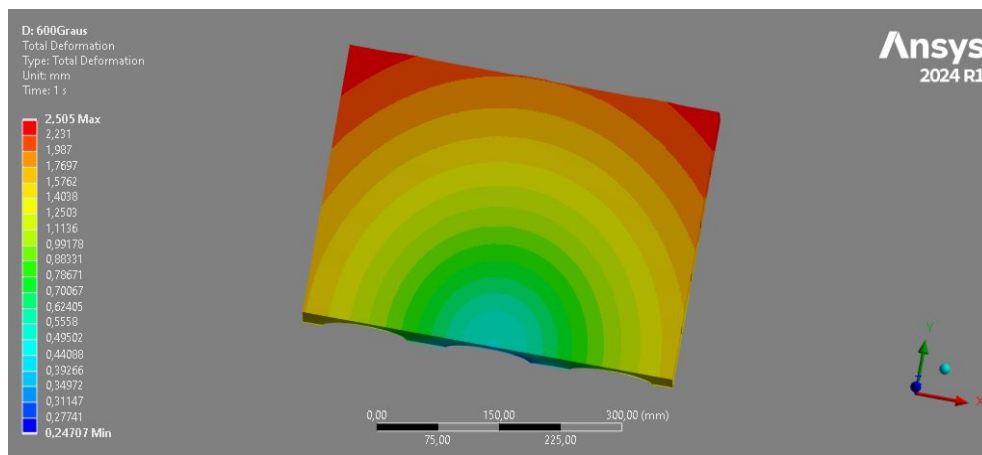


Figura 71 – Deformação do Prisma 2: 600°C (Autoria própria, 2025).

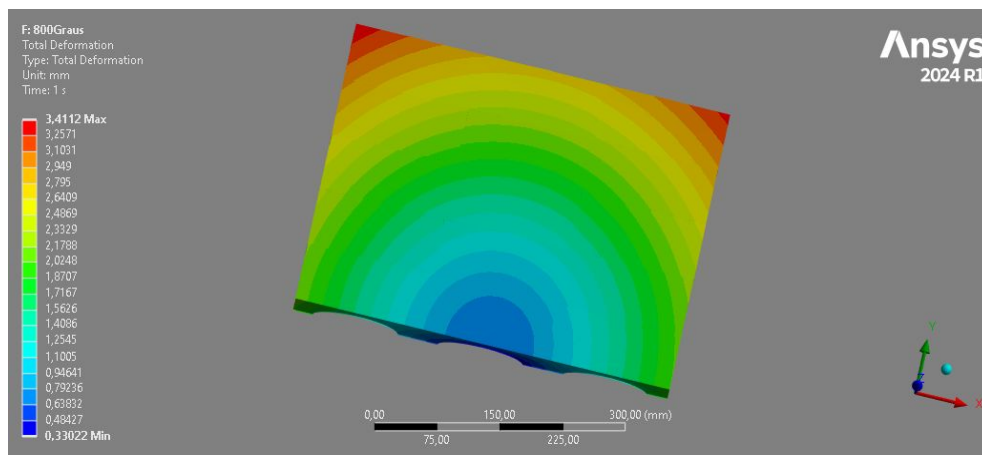


Figura 72 – Deformação do Prisma 3: 800°C (Autoria própria, 2025).

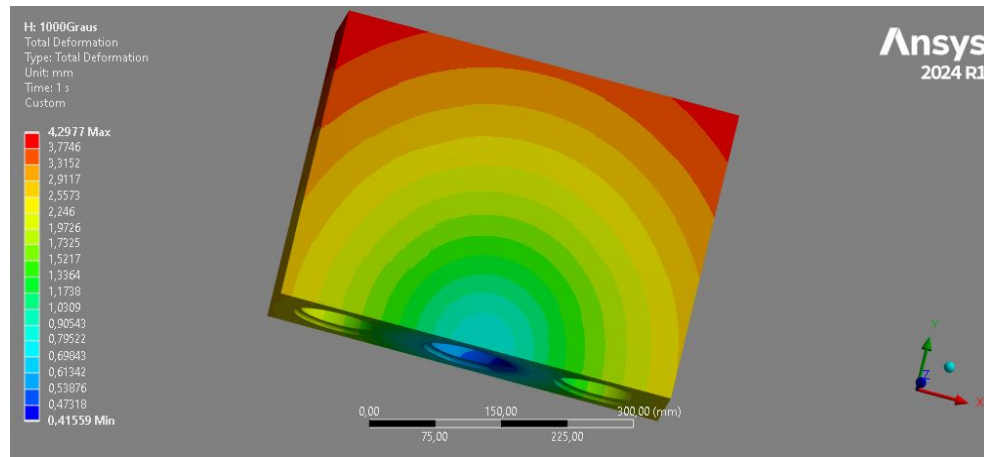


Figura 73 – Deformação do Prisma 4: 1000°C (Autoria própria, 2025).

Apêndice 6 – CONDUTIVIDADE E EFUSIVIDADE TÉRMICA

6.1 – Resultados dos Ensaaios

Tabela 31 – Resultados dos Ensaaios de Condutividade e Efusividade Térmica.

Bloco Cerâmico	Condutividade Térmica (W/mk)	Efusividade Térmica (Ws ^{1/2} /m ² K)
Amostra 1	0,4824	842,70
Amostra 2	0,6374	993,00
Amostra 3	0,4672	827,70
Amostra 4	0,6444	999,60
Amostra 5	0,4732	706,10
Amostra 6	0,3475	905,80
Amostra 7	0,3783	1092,60
Amostra 8	0,5830	941,00
Amostra 9	0,6983	1050,00
Amostra 10	0,6464	1001,40
Amostra 11	0,5664	925,10
Amostra 12	0,3493	707,90
Amostra 13	0,5579	916,90
Amostra 14	0,5774	935,70
Amostra 15	0,3300	687,90
Amostra 16	0,6097	966,60
Amostra 17	0,5613	921,10
Amostra 18	0,5726	931,00
Amostra 19	0,4059	766,00
Amostra 20	0,4874	847,80
Média	0,5188	898,29