

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS - PPGCEM**

PATRICIA CABRAL CECHINEL

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE BLOCOS DE CERÂMICA
VERMELHA PARA USO EM PAREDES RESISTENTES AO FOGO**

CRICIÚMA

2024

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS - PPGCEM**

PATRICIA CABRAL CECHINEL

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE BLOCOS DE CERÂMICA
VERMELHA PARA USO EM PAREDES RESISTENTES AO FOGO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira
Coorientadora: Dra. Juliana Acordi

CRICIÚMA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

C387e Cechinel, Patricia Cabral.

Estudo das propriedades de blocos de cerâmica vermelha para uso em paredes resistentes ao fogo / Patricia Cabral Cechinel. - 2024.

116 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2024.

Orientação: : Fabiano Raupp Pereira.

Coorientação: Juliana Acordi.

1. Blocos cerâmicos. 2. Cerâmica vermelha. 3. Cerâmica vermelha - Propriedades térmicas. 4. Cerâmica vermelha - Teste de resistência ao calor.
I. Título.

CDD 23. ed. 620.14

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Patrícia Cabral Cechinel

Estudo das propriedades de blocos de cerâmica vermelha para uso em paredes resistentes ao fogo.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 28 de junho de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Tiago Bender Wermuth

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Elídio Angioletto

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro

Instituto Politécnico de Viana do Castelo - IPVC

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar forças para trilhar meu caminho e entregar meu destino nas mãos de pessoas tão especiais.

Ao Programa de Bolsas Universitárias de Pós-Graduação, de Santa Catarina (UNIEDU/FUMDES) pelo apoio financeiro.

A Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) pela estrutura e suporte durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira pela oportunidade e confiança depositada na minha proposta de projeto. Obrigado por me manter motivada durante todo o processo.

Ao Prof. Dr. Elídio Angioletto, pelo apoio na realização dos ensaios prévios de resistência ao fogo.

Ao Prof. Dr. Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro do Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC), de Portugal, pela condução dos ensaios de condutividade térmica.

A Dra. Juliana Acordi ao incentivo de contribuir com a construção do trabalho.

Ao Sindicato da Indústria de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (SINDICER) pela disponibilidade de materiais.

Ao Dr. Vítor de Souza Nandi, pela parceria envolvida na obtenção dos blocos de cerâmica vermelha das cerâmicas da região de Morro da Fumaça/SC.

“O talento nos garante vencer partidas.
O trabalho em equipe garante a vitória de
campeonatos”.

(Michael Jordan)

RESUMO

Incêndios em edificações impulsionaram o Brasil e outros países, no desenvolvimento de materiais cerâmicos com propriedades de resistência ao fogo. No campo dos sistemas construtivos, os blocos cerâmicos são usados para compor paredes de ambientes internos em áreas de saída de emergência de edificações verticais. Os blocos cerâmicos são elementos construtivos e podem ter geometria, espessura e desempenho de resistência ao fogo diferentes, que dependem do seu processo de produção e das matérias-primas. Desta forma, objetiva-se neste trabalho avaliar a resistência ao fogo por meio da associação da propriedade de condutividade térmica, e de caracterizações físico-químicas de diferentes blocos cerâmicos com base na correlação entre suas propriedades geométricas, de massa, espessura e volume, bem como, análise microestrutural, análises composicionais (FRX), mineralógicas (DRX) e de resistência mecânica à compressão. Para isso, foram estudados 4 (quatro) blocos de cerâmica vermelha, usados em paredes de vedação, e 2 (dois) blocos de concreto celular como produto de referência de resistência ao fogo, comumente disponíveis no mercado para construção de paredes de saída de emergência em edificações verticais. Os ensaios de condutividade térmica foram realizados em placas de 15 x 15 cm, extraídas das paredes internas dos blocos. Os resultados de caracterização dos blocos revelaram percentual de absorção de água entre 16% e 20% para aqueles de cerâmica vermelha e 60% a 80% para os blocos de concreto celular. As resistências mecânicas dos blocos cerâmicos de cerâmica vermelha ficaram entre 1,0 a 3,4 MPa e dos blocos de concreto celular entre 1,69 e 3,72 MPa. A caracterização química dos blocos de cerâmica vermelha mostrou a presença de sílica e óxido de alumínio, e para os blocos de concreto celular o conteúdo de sílica e óxido de cálcio. A caracterização mineralógica evidenciou as fases quartzo e silimanita para os blocos de cerâmica vermelha e quartzo e tobermorita para os blocos de concreto celular. Os valores de porosidade total encontrados foram de 32 a 40% para os blocos de cerâmica vermelha, e 49,20% e 55,39% para aqueles de concreto celular, convergindo com a análise microestrutural, onde os blocos de concreto celular apresentaram maior tamanho de poros. Quanto ao ensaio de condutividade térmica, o bloco de cerâmica vermelha B1 apresentou o maior valor com 0,5012 (W/m.°C), e B4, também de cerâmica vermelha, apresentou o menor valor de todos com 0,4236 (W/m.°C). O ensaio de condutividade térmica foi

determinante para a discussão dos resultados de desempenho quanto ao isolamento térmico.

Palavras-chave: Bloco cerâmico; Cerâmica vermelha; Condutividade térmica; Propriedades.

ABSTRACT

The occurrence of fire in buildings, causing life and material damages, make researchers develop ceramic materials with fire resistance properties. In the field of construction systems, ceramic bricks are used to make walls on indoor spaces with exit emergency areas in vertical buildings. Ceramic bricks are building elements and can present different geometry, thickness and fire resistance performance, which depend on the production process applied and the raw materials. For this reason, the aim of this research work is to evaluate the fire resistance associating properties such as thermal conductivity, and other characterizations physical-chemical characterization was correlated with the geometric properties (weight, thickness and volume), chemical (XRF), mineralogical (XRD), and mechanical resistance to compression. For this reason, 4 (four) ceramic bricks, usually applied in sealing walls, and 2 (two) cellular concrete blocks, commonly available for exit emergency areas in vertical buildings, were studied. Thermal conductivity analyses were made in 15x15 cm plates, extracted from internal ceramic walls. Physical characterization indicated water absorption content for ceramic bricks between 16 and 20% and between 60 and 80% for cellular concrete blocks. Mechanical resistance verified for ceramic bricks were from 1.0 to 3.4 MPa and for cellular concrete blocks varied from 1.69 and 3.72 MPa. Chemical characterization for ceramic bricks indicated the presence of silica and aluminum oxide, and for cellular concrete blocks, the major oxides were silica and calcium oxide. Mineralogical characterization showed the quartz and sillimanite phases for ceramic bricks and quartz and tobermorite for cellular concrete blocks. The porosity values varied from 32 to 40% in ceramic bricks and from 49 to 55% for cellular concrete blocks, and the microstructural analyses indicated that ceramic bricks presented smaller pore sizes than cellular concrete blocks. Related to thermal conductivity analyses, sample B1 presented the highest value (0.502 W/m.°C) and B4 presented the lowest one (0.4236 W/m.°C), and this characterization was determination for fire resistance performance and thermal isolation of the ceramics.

Key words: Ceramic bricks; Red ceramic; Thermal conductivity; Properties Ceramic bricks; Red ceramic; Thermal conductivity; Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do sistema de alvenaria submetido a um ensaio de resistência ao fogo (a); e o bloco de cerâmica vermelha a ser estudado nesta pesquisa (b).....	19
Figura 2 – Materiais cerâmicos: blocos de cerâmica vermelha (a); telhas de cerâmica vermelha (b).	22
Figura 3 – Fluxograma dos processos de fabricação de blocos de cerâmica vermelha.	26
Figura 4 – Argila em processo de sazonalização.	27
Figura 5 – Imagens ilustrativas do processo de secagem natural: blocos de cerâmica vermelha (a); telhas de cerâmica vermelha cerâmicas (b).....	28
Figura 6 – Processo de transferência de calor em um bloco cerâmico de 12 furos. .	30
Figura 7 – Processos de transferência de calor de um bloco cerâmico furado submetido a incêndio.	31
Figura 8 – Prismas preparados com blocos cerâmicos (a); Ensaio de blocos cerâmicos submetidos a uma exposição ao fogo (b).....	34
Figura 9 – Fluxograma estruturante das 3 (três) etapas adotadas no procedimento experimental.....	41
Figura 10 – Imagens dos blocos de cerâmica vermelha vazados e de concreto celular usados no estudo.	42
Figura 11 – Representação da extração dos corpos de prova do bloco de concreto celular: geometria a ser extraída conforme norma 13.440 (2021d) (a); amostra BCC extraída(b); amostra BCS extraída (c).....	42
Figura 12 – Fluxograma detalhado das 3 (três) Etapas desenvolvidas.....	43
Figura 13 – Fluxograma da etapa 1 detalhando as caracterizações realizadas.....	44
Figura 14 – Caracterização geométrica dos blocos de cerâmica vermelha.	45
Figura 15 – Imagens do procedimento de secagem em estufa realizado: blocos de concreto celular (a) e blocos de cerâmica vermelha na estufa (b).	45
Figura 16 – Imagens dos blocos imersos durante o ensaio de absorção de água....	46
Figura 17 – Imagens dos diferentes blocos/pós preparados para ensaio de densidade real.	47
Figura 18 – Detalhe da realização do ensaio de picnometria para a determinação da densidade real de sólidos.....	47

Figura 19 – Imagens do ensaio de porosidade:	48
Figura 20 – Blocos de cerâmica vermelha (a), e bloco de concreto celular (b) capeados para a realização do ensaio de resistência mecânica à compressão; Máquina universal de ensaio de resistência mecânica à compressão (c).....	49
Figura 21 – Fluxograma dos ensaios de desempenho térmico realizados.....	51
Figura 22 – Imagem mostrando o ensaio adaptado da norma ISO 1182 (2002) de reação ao fogo feito para os blocos de cerâmica vermelha: forno mufla a 750 °C (a), e amostras de 5 cm secas em estufa e pesadas em balança (b).....	52
Figura 23 – Bloco de cerâmica vermelha onde se obtiveram as placas para ensaios de condutividade térmica (a); modelo esquemático da extração das placas de cerâmica vermelha (b); placa de cerâmica vermelha B1 (c); placa de cerâmica vermelha B2 (d); placa de cerâmica vermelha B3 (e); placa de cerâmica vermelha B4 (f); placa de concreto celular BCC (g); placa de concreto celular BCS (h).....	53
Figura 24 – Imagem do protótipo Prototherm utilizado na realização dos ensaios de condutividade térmica: lado da fonte de calor e do termopar T1 e lado do sensor e do termopar T2.....	54
Figura 25 – Seção mostrando a abertura do protótipo para a colocação da amostra (a); amostra fixada e pronta para o ensaio de condutividade térmica (b).....	55
Figura 26 – Fonte de calor (FC) com dissipador de calor estático (DC) e termopar T1 (a); Sensor de fluxo de calor fixado com pasta térmica (b); <i>Datalogger</i> usado para aquisição automática dos dados (c); Regulador de temperatura que está conectado à fonte de calor (d).	56
Figura 27 – Exemplo ilustrativo do bloco de cerâmica vermelha B1 e a aplicação do cálculo de condutividade térmica.	59
Figura 28 – Imagem do aparato experimental utilizado na realização do ensaio de resistência ao fogo.	61
Figura 29 – Critérios de resistência ao fogo.....	62
Figura 30 – Fluxograma detalhando a integração entre os resultados obtidos nas etapas 1 e 2.....	63
Figura 31 – Representação da paginação de blocos em 1 (um) metro quadrado de parede: bloco de cerâmica vermelha (a); e bloco de concreto celular (b).	67
Figura 32 – Relações entre os blocos de cerâmica vermelha e os blocos de concreto celular.....	67
Figura 33 – Absorção de água e porosidade total.....	71

Figura 34 – MEV dos blocos B1 e B2 com aumento de 1000 vezes.....	72
Figura 35 – MEV do bloco B4 com aumento de 60 vezes.....	73
Figura 36 – MEV dos blocos B3 e B4 com aumento de 1000 vezes.....	73
Figura 37 – MEV dos blocos B1, B2, B3 e B4, todas com aumento em 5000 vezes.	74
Figura 38 – MEV dos blocos BCC (a) e BCS (b), com aumento em 60 vezes.....	75
Figura 39 – DRX dos diferentes produtos/blocos de cerâmica vermelha estudados.	77
Figura 40 – DRX dos blocos de concreto celular BCC e BCS.....	78
Figura 41 – Resultados de condutividade térmica (W/m.°C), das placas extraídas dos diferentes blocos, obtidas experimentalmente pelo aparato Prototherm.....	81
Figura 42 – Resultados de transmitância térmica (em barras) e resistência térmica (em losangos), das placas extraídas dos diferentes blocos, obtidas experimentalmente pelo aparato Prototherm.....	82
Figura 43 – Exemplo de cálculo de resistência térmica, transmitância térmica e capacidade térmica dos blocos de cerâmica vermelha inteiros (com base no bloco B1).	83
Figura 44 – Imagem do ensaio experimental realizado para a determinação de resistência ao fogo (aplicado no bloco de cerâmica vermelha B1 e B2).	87
Figura 45 – Diferentes ciclos térmicos experimentais de tempo e temperatura realizados com o bloco B1 e B2.....	88
Figura 46 – Relação comparativa de condutividade térmica e de porosidade para os diferentes blocos avaliados.	92
Figura 47 – Relação de resistência mecânica à compressão e porosidade total.	93
Figura 48 – Relação entre condutividade térmica e densidade aparente.....	94
Figura 49 – Relação entre resistência térmica e resistência mecânica à compressão dos blocos inteiros.....	95
Figura 50 – Esquematização das correlações feitas entre os diversos resultados realizados para a caracterização dos diferentes blocos de vedação estudados.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físico-químicas dos materiais cerâmicos (blocos) mais comuns para alvenaria de vedação.....	25
Tabela 2 – Propriedades das cerâmicas.	25
Tabela 3 – Propriedades e parâmetros de resistência ao fogo de blocos cerâmicos usados em alvenaria de vedação para áreas de saída de emergência de edificações verticais.	33
Tabela 4 – Classificação de material incombustível.....	38
Tabela 5 – Resultados das propriedades físicas dos blocos.....	69
Tabela 6 – FRX de B1, B2, B3, B4, BCC e BCS, bem como de referências para os materiais de cerâmica vermelha e concreto celular.	76
Tabela 7 – Resultados de condutividade térmica das placas extraídas dos diferentes blocos obtidos experimentalmente pelo aparato Prototherm.	80
Tabela 8 - Resumo dos resultados de resistência térmica, transmitância térmica e capacidade térmica para todos os blocos inteiros, conforme NBR 15220 (2023).	86
Tabela 9 – Integração e comparação das caracterizações dos blocos inteiros com os seus respectivos desempenhos térmicos.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos de resistência ao fogo realizados em paredes de alvenaria de blocos cerâmicos.....	36
Quadro 2 – Estudos realizados em paredes de alvenaria de blocos cerâmicos pós fogo.	39
Quadro 3 – Características e definições para o cálculo da condutividade térmica....	58
Quadro 4 – Características e definições para o cálculo da condutividade térmica....	60
Quadro 5 – Caracterização geométrica dos diferentes blocos de estudo (B1, B2, B3, B4, BCC e BCS).....	64
Quadro 6 – Informações do processo de fabricação dos diferentes blocos de cerâmica vermelha e de concreto celular estudados.	68
Quadro 7 – Resultados do ensaio de reação ao fogo dos blocos (B1, B2, B3, B4, BCC e BCS).....	79

ABREVIATURAS E SIGLAS

APLs – Arranjos Produtivos Locais

APL CV/MF – Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha estabelecido no município de Morro da Fumaça

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica

BCCA – Bloco de concreto celular autoclavado

CBMSC – Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina

CBPMESP – Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo

CERTEC – Laboratório de Cerâmica Técnica da Universidade do Extremo Sul Catarinense

CMAR – Controle de materiais de acabamento e de revestimento

DRX – Difractometria de raio-X

EAACAC – Associação Europeia de Concreto Celular Autoclavado

EUROCODE – Conjunto de normas europeias de responsabilidade do Comitê Europeu de Normalização que visa unificar critérios e normativas de cálculo e dimensionamento de estruturas

FRX – Fluorescência de raio-X

SINDICER – Sindicato da Indústria de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça

IDT – Instituto de Engenharia e Tecnologia

IN – Instrução Normativa

I.Parque – Parque Científico e Tecnológico da Universidade do Extremo Sul Catarinense

IPAT – Instituto de Pesquisas Ambientais

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

IT – Instrução Técnica

MCTI – Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação

NBR – Norma Brasileira

PF – Perda ao fogo

RF – Resistente ao fogo

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

TRRF – Tempo requerido de resistência ao fogo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	OBJETIVO GERAL	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1	MATÉRIAS-PRIMAS DE BLOCOS CERÂMICAS VERMELHA	21
3.1.1	Características físico-química dos blocos de cerâmica vermelha	25
3.1.2	Processamento cerâmico	26
3.2	PROPRIEDADES TÉRMICAS DE BLOCOS CERÂMICOS.....	29
3.3	PROPRIEDADES DOS BLOCOS DE CONCRETO CELULAR	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	MATERIAIS.....	41
4.2	MÉTODOS	43
4.2.1	Etapa 1: Caracterização dos blocos	44
4.2.2	Etapa 2: Ensaios de desempenho térmico	51
4.2.2.1	Ensaio de reação ao fogo	52
4.2.2.2	Ensaio de condutividade térmica	53
4.2.2.3	Ensaio de resistência ao fogo	61
4.2.3	Etapa 3: Associação, integração e comparação das caracterizações com os ensaios de desempenho térmico entre etapas de 1 e 2	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1	RESULTADOS E ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO DAS ETAPAS 1	64
5.2	RESULTADOS DE DESEMPENHO TÉRMICO DOS BLOCOS ETAPA 2	79
5.2.1	Reação ao fogo	79
5.2.2	Ensaios de condutividade térmica	80
5.2.3	Ensaios de resistência ao fogo	87
5.3	RESULTADOS DA ETAPA 3: INTEGRAÇÃO E COMPARAÇÃO DAS CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS COM O DESEMPENHO TÉRMICO	91
6	CONCLUSÃO	98
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	100
	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

Blocos de cerâmica vermelha são materiais construtivos tradicionais e de grande importância econômica no Brasil (ZACCARON, 2018). Dados da ANICER (2014), destacam que a indústria da cerâmica vermelha é um segmento formado por aproximadamente 7 mil empresas por todo o país. O setor é responsável por mais de 90% das alvenarias e coberturas construídas no Brasil, gerador de um faturamento anual de 18 bilhões de reais.

O estado de Santa Catarina destaca-se na produção de cerâmica vermelha, tendo o município de Morro da Fumaça como o principal produtor. Ao todo, na região, são 150 empresas associadas ao sindicato, que movimentam a economia do extremo sul catarinense (SAVIATTO *et al.*, 2023b; SCHWOB *et al.*, 2012; SEBRAE, 2019). Tal atividade está inserida no Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha (APL CV/ MF), estabelecido no município de Morro da Fumaça. Em 2023, o APL CV/ MF conquistou o 1º lugar no prêmio de Melhores Práticas em Arranjos Produtivos Locais de Base Mineral do Brasil, promovido pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) (SAVIATTO *et al.*, 2023c, 2023a).

A cerâmica vermelha é composta basicamente por 5% de quartzo e 95% de argilas vermelhas, chamada também de terracota (RIBEIRO; FERREIRA; LABRINCHA, 2005). A presença de compostos ferrosos atribuem a coloração avermelhada, característica dos produtos deste setor, sendo o teor de óxido de ferro total superior a 4% (CONCEIÇÃO FILHO, V.M.; MOREIRA, 2001; GRIGOLETTI, 2001; SEBRAE, 2015).

Segundo Bosnjak *et. al* (2020), as unidades de blocos cerâmicos influenciam no sistema construtivo de alvenaria, e conseqüentemente no desempenho ao fogo. Estes blocos cerâmicos podem ter geometria, espessura e características diferentes, que dependem do seu processo de produção.

Os materiais de construção utilizados em edificações, no que diz respeito à segurança contra incêndio, estão sujeitos as legislações normativas (COUTINHO; CORRÊA, 2016). Além disso, os materiais submetidos a uma situação de incêndio, tem seu desempenho comprometido devido a exposição a elevadas temperaturas, reduzindo a sua resistência mecânica (ABNT, 2012).

A competitividade no setor, tem impulsionado na melhoria dos materiais de cerâmica vermelha, como também o desenvolvimento de materiais que sejam adequados a altas temperaturas. Sendo assim, torna-se fundamental, o conhecimento das propriedades térmicas dos blocos cerâmicos, dentre as quais destaca-se a condutividade térmica (GOMES, 2021). A condutividade térmica quantifica a capacidade dos materiais de conduzir energia térmica e tem influência direta no desempenho térmico de componentes construtivos (MURATA *et al.*, 2018).

Um elemento construtivo também pode ser analisado do ponto de vista da sua reação ao fogo. Ensaios de reação ao fogo são realizados em laboratório com uma pequena parcela de um material exposto ao fogo em condições de temperatura controlada, verificando se é incombustível ou não (ISO, 2002). Para que não ocorra a propagação da chama, é necessário um controle efetivo dos materiais, que são utilizados em construções, bem como os acabamentos e revestimentos, em relação ao seu comportamento ao fogo (BUENO, 2019; IN 18 CBMSC, 2022).

A norma NBR 15575 (2013) estabelece requisitos mínimos de qualidade para as edificações indicando condições térmicas adequadas. Adicionalmente, a NBR 15220 (2023) visa avaliar a condutividade térmica de diferentes blocos de alvenaria de vedação. Desta forma, por meio de ensaios é possível verificar o comportamento de um material (ARIAS *et al.*, 2016; BOTTIN *et al.*, 2018).

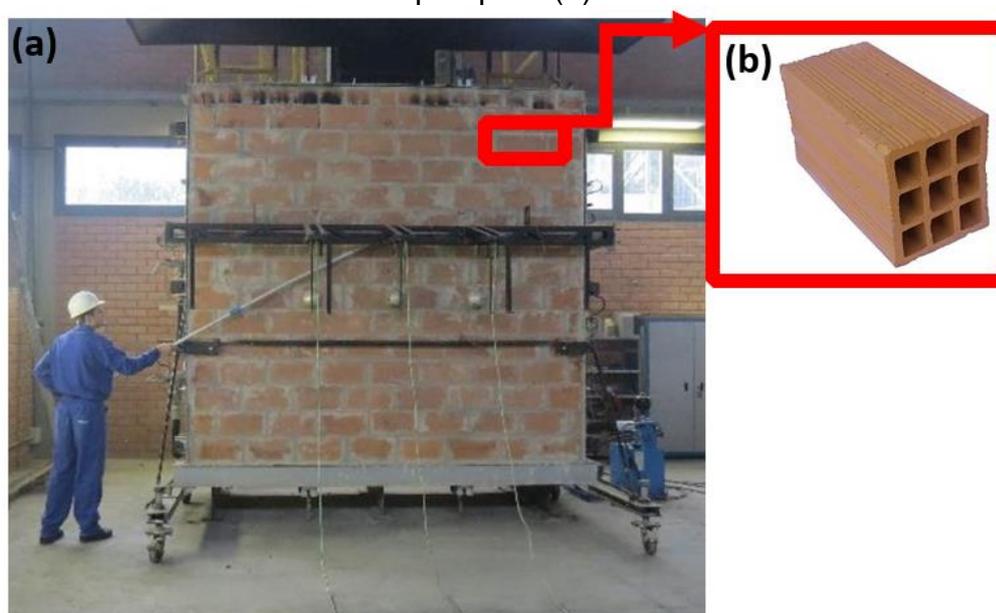
Contudo, no Brasil, ainda faltam parâmetros mais específicos para avaliar o desempenho de materiais, expostos ao fogo em uma situação de incêndio, sendo recomendado a utilização de normas internacionais como a Eurocode 6 (ARIAS *et al.*, 2016; IT-08 CBPMESP, 2019).

De acordo a instrução normativa (IN) 18 do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (2020), os materiais utilizados para resistência ao fogo na composição de paredes podem ser: blocos cerâmicos, gesso acartonado, vidros entre outros, desde que a medida de proteção seja testada e aprovada em seu conjunto, atendendo as características de resistência ao fogo.

Diante do exposto, este trabalho propõe um estudo de características físico-químicas e térmicas de blocos de cerâmica vermelha como componente isolado de sistemas construtivos de alvenaria. Assim, os resultados serão comparados à blocos de concreto celular, usualmente utilizados em alvenaria de vedação para áreas de saída de emergência de edificações verticais. Além das implicações na prática para a escolha de bloco de cerâmica vermelha *versus* os blocos de concreto celular em áreas de saída de emergência, devido ao bloco de concreto celular trazer interferências como na amarração entre o bloco de cerâmica vermelha pela diferença de formato e espessura. Os blocos ensaiados são recomendados para vedação (alvenaria não admitida como participante da estrutura (ABNT, 2017a)).

A Figura 1 mostra de forma representativa o sistema de alvenaria como é integralmente ensaiado (a), com o detalhe do corpo cerâmico (bloco de cerâmica vermelha) a ser estudado (b) neste trabalho.

Figura 1 – Representação do sistema de alvenaria submetido a um ensaio de resistência ao fogo (a); e o bloco de cerâmica vermelha a ser estudado nesta pesquisa (b).



Fonte: Adaptado de Hennemann et al. (2017).

A pesquisa está dividida em seis capítulos. O capítulo 1 traz uma introdução ao tema proposto, seguido pelos objetivos geral e específicos. O capítulo 3 contempla a fundamentação teórica e o capítulo 4 relaciona os materiais e métodos utilizados na fase experimental. No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos, seguido pelo capítulo 6 com a conclusão do estudo e sugestões de trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar diferentes blocos cerâmicos, utilizados em alvenaria de vedação para áreas de saída de emergência de edificações verticais, correlacionando as características físico-químicas com o desempenho das propriedades térmicas, mecânicas e microestruturais dos diferentes produtos cerâmicos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar as propriedades físico-químicas e mecânicas de diferentes blocos de cerâmica vermelha, com espessuras de 11,5 e 14 cm, além do bloco de concreto celular de 10 cm, considerando estes dois últimos como produtos de referência no mercado da construção para áreas de saída de emergência de edificações verticais;
- b) Comparar os blocos de cerâmica vermelha de 11,5 e 14 cm de espessura, e os blocos de concreto celular de 10 cm, com base na correlação entre suas diferentes características, referências normativas e literatura;
- c) Realizar ensaios de desempenho térmico, como reação ao fogo, condutividade térmica e resistência ao fogo nos blocos de estudo;
- d) Avaliar os resultados pela interação dos ensaios de desempenho térmico e as caracterizações dos blocos estudados.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo contém uma revisão da literatura, com informações de matérias-primas e produtos cerâmicos utilizados na construção civil. Está dividido em duas seções, sendo a primeira abrangendo matérias-primas usadas na produção dos blocos de cerâmica vermelha e de concreto celular e seu processamento, seguido pelo estudo da condutividade térmica de blocos de cerâmica vermelha e de concreto celular.

3.1 MATÉRIAS-PRIMAS DE BLOCOS DE CERÂMICA VERMELHA

As cerâmicas são formadas por elementos metálicos e não metálicos, como óxidos de alumínio, sílica e minerais argilosos. É obtida após tratamento térmico em temperaturas elevadas. São rígidas e resistentes, suscetíveis à fratura, isolantes à passagem de calor e eletricidade, possuindo baixa condutividade térmica e elétrica (BELLINGIERI, 2003; CALLISTER, 2020).

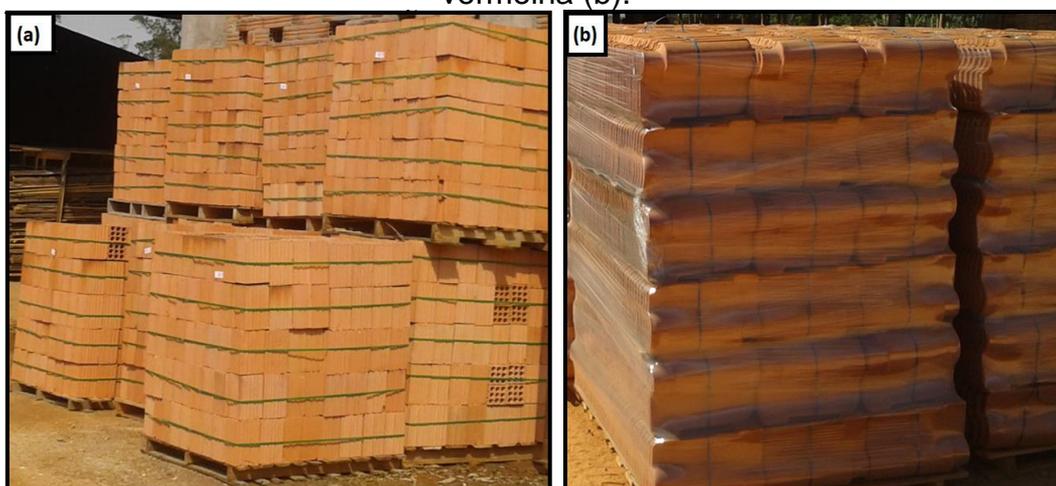
O termo argila é empregado para designar um material inorgânico natural, de granulometria fina, com partículas de poucos micrômetros, que apresenta comportamento plástico quando adicionada uma determinada quantidade de água. Do ponto de vista sedimentológico e granulométrico, a fração argilosa corresponde ao conjunto de partículas inferiores a 2 μm (MOTTA *et al.*, 2004).

A cor é uma característica que distingue as argilas, que são avermelhadas ou brancas. As argilas brancas são consideradas nobres, com maior valor agregado. Possuem baixo percentual de ferro e são destinadas principalmente à fabricação de azulejos e grés porcelânico (GEREMIAS, 2003). O grés porcelânico é produzido por processo de queima rápida de até 90 minutos, com misturas de argila caulínica, quartzo e feldspato (MARTÍN-MÁRQUEZ; RINCÓN; ROMERO, 2008). É utilizado como revestimento, dotado de propriedades como baixa absorção de água, alta resistência à flexão e à abrasão, excelente resistência química, baixa porosidade e alta resistência mecânica (MARTÍN-MÁRQUEZ; RINCÓN; ROMERO, 2008).

As argilas usadas na cerâmica vermelha englobam uma grande variedade de substâncias minerais de natureza argilosa, como sedimentos consolidados e inconsolidados, argilas aluvionares, argilitos, siltitos e folhelhos em cores avermelhadas. Apresentam diferentes graus de plasticidade, além da trabalhabilidade e ganho resistência na secagem natural, denominada resistência verde, que é consolidada após o processo de queima (COELHO, 2009). Apresentam alta porosidade com pouca fase vítrea (JUNIOR *et al.*, 2012).

A cerâmica vermelha é utilizada na construção civil na forma de blocos, telhas, tijolos vazados e maciços, tijolo de laje (tabela), como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Materiais cerâmicos: blocos de cerâmica vermelha (a); telhas de cerâmica vermelha (b).



Fonte: O autor (2017).

As propriedades das argilas estão diretamente ligadas ao local de onde são extraídas, sendo classificadas em argila de várzea ou argila de morro. As argilas de várzea podem ser encontradas às margens de rios, onde predominam solos sedimentares escuros, saturados e com elevado teor de matéria orgânica (MOTTA *et al.*, 2004; SOARES *et al.*, 2004). Possuem granulometria muito fina, característica plástica e coloração natural variando de cinza claro a preto. A argila utilizada no processo de fabricação de cerâmica vermelha é do tipo várzea (CORDOVA, 2007). Elas apresentam alta umidade e plasticidade, propiciando boa trabalhabilidade para os processos cerâmicos de conformação plástica, a exemplo dos produtos extrudados, tais como tijolos e telhas, até mesmo para a produção artesanal (olarias) ou com equipamentos de pequeno porte (MOTTA *et al.*, 2004).

Argilas puras constituem bolsões dentro dos ambientes de várzea e de planície costeira, onde estão associadas a argilas arenosas, constituintes de quartzo e menos plásticas. Elas ocorrem também em encostas de morros, em geral são solos mais drenados, com teor reduzido de matéria orgânica, possuindo colorações diversas como marrom-claro, amarelo, rosa e cinza (MOTTA *et al.*, 2004; SOARES *et al.*, 2004).

As argilas de morro apresentam baixo teor de matéria orgânica e possuem a presença de cascalhos, sua coloração após a queima varia entre amarelo e vermelho. Possuem uma grande diversidade e são utilizadas para misturas com as argilas de várzea. A mistura de duas ou mais argilas ocorre quando uma única argila não é própria para a fabricação de produtos cerâmicos, devido a sua granulometria e propriedades físico-químicas (BORTOLATTO, 2018; CORDOVA, 2007; SOARES *et al.*, 2004).

A granulometria das partículas é uma das características das argilas que as diferem entre fundentes e refratárias. As argilas fundentes são aquelas que apresentam menor ponto de fusão, caracterizado pela menor absorção de água na temperatura de trabalho. As argilas refratárias são aquelas que apresentam maior ponto de fusão e maior absorção de água, necessitando de uma maior temperatura para uma completa sinterização. Podem suportar altas temperaturas sem perder sua forma (GEREMIAS, 2003).

No Brasil, os feldspatos juntamente com as argilas, são usados em cerâmica para formar uma fase vítrea, porque são agentes fundentes, diminuem a temperatura de sinterização e diminuem a porosidade para densificação dos cerâmicos (BERNARDIN, 2006). Sendo mais refratários quando tem a presença do mineral caulim (JUNIOR, 2018).

Branco (2014) define a classificação de argilas refratárias como:

- *Fire-clay*: argila pouco plástica, refratária, de origem sedimentar ou residual, rica em alumina, mas também com óxidos de ferro, que lhes dão cor marrom-clara após a queima. Resistem a temperaturas de até 1500 °C. Argilas refratárias: são ricas em alumina, resistem a temperaturas maiores (até 1640 °C).

A cerâmica vermelha é composta basicamente por uma mistura de uma argila mais plástica denominada gorda, com granulometria fina e mistura de argilominerais, e uma menos plástica denominada magra, rica em quartzo, podendo ser caracterizada também como material redutor de plasticidade. Essa composição melhora a trabalhabilidade e resistência mecânica no processo de queima (DIAS, 2009; MOTTA; ZANARDO; JUNIOR, 2001). Os principais argilominerais presentes na região sul do Brasil são os plásticos: argila comum para cerâmica vermelha e argila plástica para cerâmica branca, além do caulim. Estão presentes também os argilominerais não plásticos: feldspatos, filito, talco, calcário e quartzo (MOTTA; ZANARDO; JUNIOR, 2001).

A plasticidade das argilas é a propriedade de maior interesse da indústria cerâmica, variando de acordo com o tipo de produto cerâmico fabricado (GAIDZINSKI, 2006). Argilas com maior plasticidade tendem a ser mais densas quando conformadas, devido ao percentual de argilominerais que contêm. A falta de materiais arenosos pode ser prejudicial à secagem, causando problemas no processo. Embora o resíduo bruto contido na argila, em tamanhos de partículas mais grosseiros, ajude o processo de secagem, esse pode gerar porosidades inconsistentes durante a conformação (ZACCARON, 2018).

Matérias-primas não-plásticas atuam nas fases de conformação e secagem, diminuindo a retração das peças e favorecendo a secagem, além de atuarem no processamento térmico, controlando as transformações, deformações e a sinterização. Devido principalmente ao seu papel na fase de queima, são qualificadas como inertes, vitrificantes e fundentes (MOTTA *et al.*, 2002).

3.1.1 Características físico-químicas dos blocos cerâmicos

As Tabelas 1 e 2 relacionam algumas características físicas e químicas dos blocos cerâmicos mais comuns para alvenaria de vedação.

Tabela 1 – Características físico-químicas dos materiais cerâmicos (blocos) mais comuns para alvenaria de vedação.

Características	Valores
Densidade aparente	1800 – 2000 kg/m ³
Porosidade aberta	20 – 30%
Absorção de água por imersão a frio	9 – 13%
Coefficiente de saturação	0,6 – 0,8
Absorção de água por capilaridade (1 min)	11 g/dm ² .min ^{0,5}
Condutibilidade térmica	0,5 – 0,7 W/m ² K
Coefficiente de absorção de radiação solar	0,65 – 0,80
Dilatação térmica linear	3,5 – 5,8x10 ⁶ m/m.°C
Expansão por umidade	0,9 – 1,7 mm/m
Umidade em equilíbrio (20°C e 80% HR)	0,11%
Módulo de elasticidade longitudinal	6300 MPa
Coefficiente de Poisson	0,2

Fonte: Dias (2009).

O valor de porosidade aberta pode variar de 20 a 30% devido a alterações de tamanho, forma e distribuição de poros, provocados durante o processo de mistura, moldagem e queima do material cerâmico (DIAS, 2009). Adicionalmente, a condutividade térmica dos blocos de cerâmica vermelha varia de 0,35 a 1,5 W m⁻¹ K⁻¹ (NGUYEN *et al.*, 2009).

Blocos cerâmicos com maior porosidade exibem melhores características isolantes do que outros materiais com mesma densidade. As cerâmicas porosas podem apresentar propriedades como baixa densidade, baixa condutividade térmica, alta área superficial e alta permeabilidade. Outra grande vantagem é sua resistência ao fogo, conferida por sua composição completamente inorgânica (INCROPERA; DEWITT, 2007; SILVA; MENDES; LADCHUMANANANDASIVAM, 2000).

Tabela 2 – Propriedades das cerâmicas.

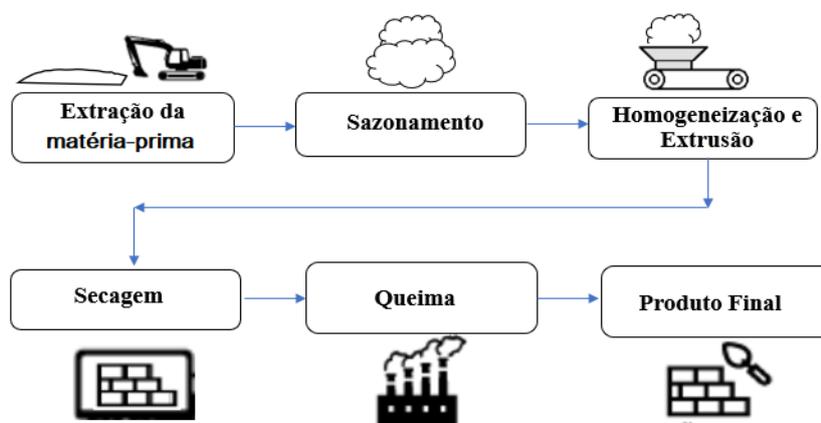
Baixo	Alto
Densidade	Porosidade
Condutividade térmica	Permeabilidade
Condutividade elétrica	Dureza/resistência ao desgaste
	Resistência ao choque térmico
	Resistência à corrosão química

FONTE: Riedel; Chen (2008).

3.1.2 Processamento blocos de cerâmica vermelha

O processo de fabricação de blocos de cerâmica vermelha envolve várias etapas que vão desde a extração da argila, passando pelo sazonalamento, homogeneização, extrusão, secagem, queima e finalmente expedição do produto (MAURÍCIO; MOL; FILHO, 2004), conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma dos processos de fabricação de blocos de cerâmica vermelha.



Fonte: O autor (2023).

O sazonalamento é o processo de preparação da massa onde o material argiloso, após extraído, é armazenado nas proximidades da jazida sobre a ação de intempéries, para proporcionar melhorias nas propriedades das matérias-primas e aumentar sua uniformidade (GAIDZINSKI, R.; TAVARES, L. M. M.; DUAILIBI FILHO, 2002). São extraídas durante os meses mais secos e depositadas ao ar livre, em montes de camadas intercaladas, em grandes quantidades que chegam a atingir um ano de consumo. Este processo permite a eliminação de impurezas como sais solúveis e decomposição da matéria orgânica, além de facilitar a homogeneização, conferindo às argilas características melhores do que aquelas do material diretamente extraído da jazida (SPOSTO; MORAIS; PEREIRA, 2007). O sazonalamento proporciona melhor trabalhabilidade na conformação e nas demais etapas do processo produtivo, permitindo ganhos de produtividade e melhorias significativas na qualidade do produto final (DIAS, 2009). Os resultados do processo de sazonalamento revelam melhorias nas propriedades das matérias-primas como plasticidade, resistência mecânica e absorção de água (GAIDZINSKI, 2002). A Figura 4 mostra a argila em processo de sazonalamento.

Figura 4 – Argila em processo de sazonalamento.



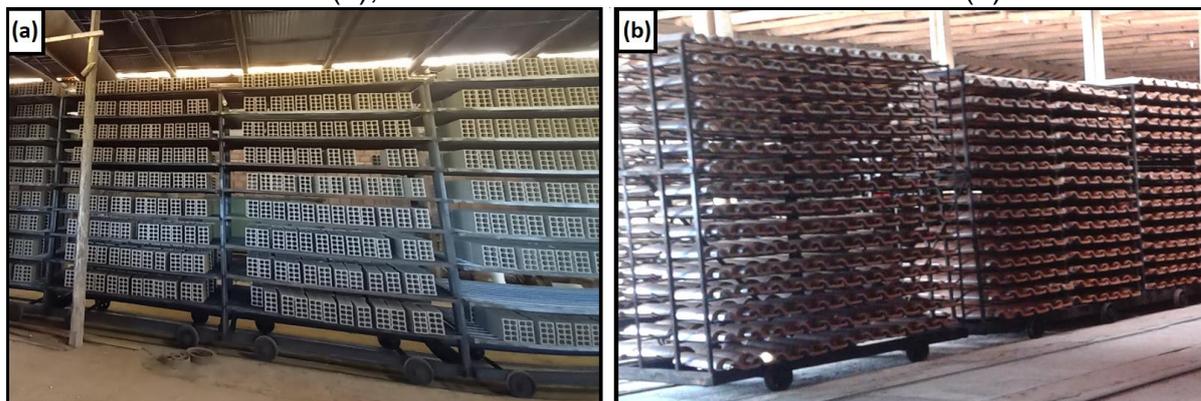
Fonte: Gondim (2021).

A fase de preparação consiste em homogeneizar o material (argila) com água, garantindo condições de umidade e plasticidade. Após a fase de preparação da massa, inicia o processo de conformação por extrusão em moldes na forma do tijolo. O material é cortado com a dimensão desejada, colocado em estantes para secagem seguida pela queima (DIAS, 2009).

Schwob et al. (2016) definem secagem como o processo realizado de forma natural ou secagem térmica realizada em estufa a temperatura de 75 a 140 °C para evaporação parcial umidade presente no produto cerâmico, de 6 a 10% (ALMEIDA, 2009). Nesta etapa, ocorre a retração (CRUZ *et al.*, 2020), e acontece o chamado ganho de resistência a verde, que têm um impacto significativo nas propriedades do produto cerâmico a verde (OUMMADI *et al.*, 2019). Todo este processo torna-se necessário para a preparação do produto de cerâmica vermelha para a sinterização (queima).

A Figura 5 ilustra a secagem natural de produtos de cerâmica vermelha.

Figura 5 – Imagens ilustrativas do processo de secagem natural: blocos de cerâmica vermelha (a); telhas de cerâmica vermelha cerâmicas (b).



Fonte: O autor (2017).

O processo de queima (sinterização) normalmente é realizado em fornos com temperaturas entre 800 a 1000° C, sendo o ciclo térmico dependente do tipo de produto e da tecnologia empregada, podendo variar de algumas horas até vários dias. Esse processo é responsável por uma série de transformações físico-químicas nas peças tais como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas e formação de fase vítrea. Os produtos são submetidos à diferentes etapas de processamento térmico: a primeira, aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada; segunda etapa, patamar durante certo tempo na máxima temperatura da curva de queima; terceira etapa, o resfriamento até temperaturas inferiores a 200 °C (DIAS, 2009; JUNIOR; TORQUETTI, 2013).

O controle das condições de queima, das matérias-primas e as características que se pretende para o produto final são fundamentais para a evitar a propagação de trincas, falhas ou fissuras, e conseqüentemente, no comprometimento das propriedades dos produtos cerâmicos acabados (CALLISTER, 2020; RAMBALDI *et al.*, 2017; VILLAR *et al.*, 2008).

3.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS DE BLOCOS CERÂMICOS FURADOS

Este capítulo faz referência à influência da condutividade térmica dos blocos de cerâmica vermelha na resistência ao fogo. O comportamento do fogo em paredes de blocos cerâmicos furados, acontece por transferências térmicas condutivas, convectivas e radiativas (RIEDEL; CHEN, 2008).

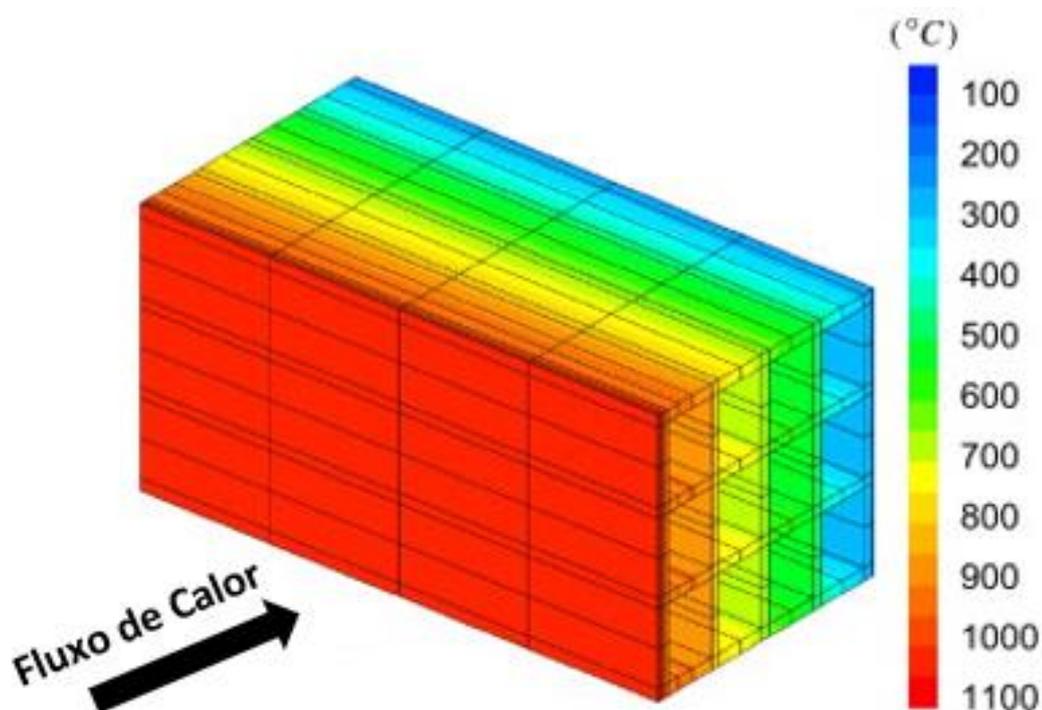
No início do incêndio, as chamas estão concentradas na superfície dos materiais combustíveis onde se iniciou a combustão, os materiais combustíveis vão sendo aquecidos e o calor ocasiona a sua ignição, dando início ao processo de combustão, com formação de chamas e início do período de alastramento do incêndio. Com o passar do tempo, a intensidade das chamas vai aumentando e o calor vai se propagando, por radiação, para os demais materiais combustíveis presentes no ambiente, que também podem ser afetados pelo contato com as próprias chamas e com os gases quentes produzidos pela combustão (LIMA, 2005).

A propagação generalizada é denominada *flash over*, onde o incêndio se processa com um crescimento rápido e acelerado em um período muito curto de tempo. Quando a temperatura do ambiente atinge em torno de 600 °C, no auge do incêndio, o compartimento é tomado pelas chamas de forma descontrolável e o sinistro deixa de ser controlável (DUARTE; ONO; SILVA, 2021).

Devido a diferença de temperatura entre o ambiente onde ocorre o incêndio e o ambiente do lado oposto, ocorrerá a transferência de calor através da parede do bloco (ROSEMANN, 2011). Nas partes maciças desses blocos, a transferência de calor ocorre através dos mecanismos de condução, e nos vazios, por convecção e radiação (NGUYEN *et al.*, 2009).

A Figura 6 mostra esquematicamente o processo de transferência de calor de um bloco cerâmico tradicional de 14 cm com 12 furos testado experimentalmente. O bloco é aquecido na face externa (face exposta), tendo a face oposta (externa não exposta) submetido a temperatura ambiente. Na análise ilustrativa, os lados superior e inferior do bloco foram isolados, proporcionando uma transferência de calor unidirecional da face quente para a face fria. As temperaturas em ambos os lados podem ser medidas para verificar a relação de condutividade térmica (NGUYEN *et al.*, 2009).

Figura 6 – Processo de transferência de calor em um bloco cerâmico de 12 furos.



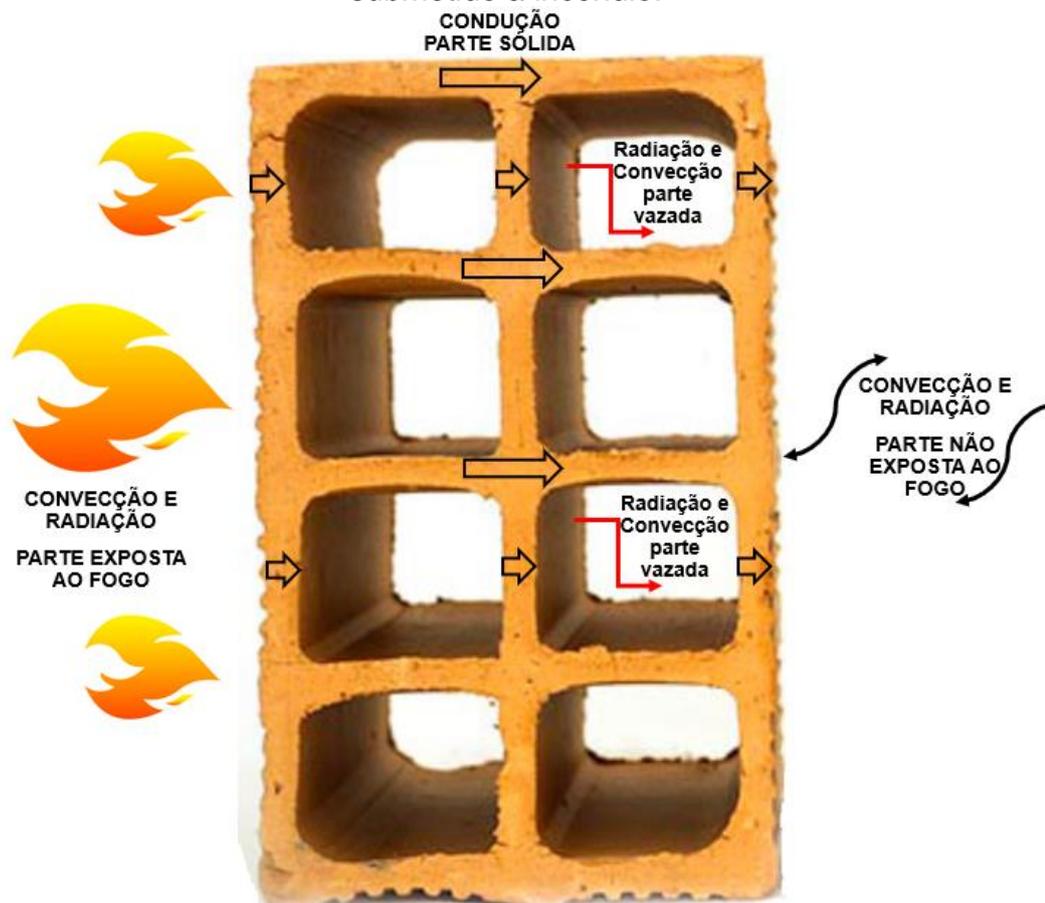
Fonte: Nguyen (2009).

Na presença de umidade excessiva, também poderá ocorrer a evaporação acelerada de umidade presente, caracterizada por lascamentos explosivos chamados *spalling* (NGUYEN; MEFTAH, 2012).

O fenômeno de condução ocorre na parede do bloco com contato físico direto (parte sólida). Esse processo é caracterizado pela transferência de energia cinética através de vibração e colisão entre átomos e moléculas vizinhas, onde o calor flui de temperaturas mais altas para temperaturas mais baixas (ALMEIDA, 2018).

A Figura 7 mostra a transferência de calor por convecção e radiação que se dá através dos furos presentes no bloco cerâmico (RIEDEL; CHEN, 2008). A temperatura dos gases e ondas eletromagnéticas no interior do compartimento submetido ao incêndio irá aumentar, apresentando uma temperatura superior a temperatura da superfície da parede exposta a ação do fogo, que traduzirá na troca de calor entre as duas superfícies dos vazios (ROSEMANN, 2011).

Figura 7 – Processos de transferência de calor de um bloco cerâmico furado submetido a incêndio.



Fonte: Adaptado Nguyen et al. (2009).

NGUYEN et al. (2009) analisaram o processo de transferência de calor, em relação a variação da condutividade térmica, com o aumento da temperatura de um bloco com alta densidade e porosidade reduzida, onde ocorrem reações químicas (endotérmicas ou exotérmicas) e mudanças de fase. Al Nahhas et al. (2007) apontam a vaporização da água presente na temperatura de 100 °C.

NGUYEN et al. (2009) observaram que a condutividade térmica permanece constante quando a temperatura é inferior a 300 °C. A partir daí, sua evolução apresenta uma fase decrescente até aproximadamente 800 °C, seguida de um aumento. Esse decréscimo de condutividade térmica é devido à mecanismos de transmissão de calor como convecção e radiação através dos (furos) vazados dos blocos cerâmicos, onde a condutividade térmica efetiva dos blocos será diminuída, contribuindo para o aumento do isolamento térmico, ao invés de condução, como ocorre em partes sólidas, (ROSEMANN, 2011).

Rigão (2012) descreve a relação entre a condutividade térmica e a resistência ao fogo. Os blocos cerâmicos possuem sua condutividade térmica dependente da densidade e a resistência ao fogo depende da massa, espessura e porcentagem de área vazada nos blocos. A densidade varia pela compactidade e microestrutura do material, quanto maior a densidade, menor é a quantidade de vazios do bloco, ou seja, blocos com densidade maiores apresentam maior condutividade térmica.

Paredes construídas com materiais de menor condutividade térmica oferecem maior isolamento térmico, fato que representa uma maior resistência ao fogo (ROSEMANN, 2011).

A resistência térmica é calculada pela razão entre a espessura do material e sua condutividade térmica e o somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais internas e externas. Quanto maior a resistência térmica, menor quantidade de calor irá atravessar pela alvenaria (ABNT, 2023).

A transmitância térmica (U) representa o inverso da resistência térmica total, sendo o fluxo calor que passa por unidade de área e por diferença de temperatura. A transmitância térmica representa o coeficiente global de transferência de calor, e está relacionada à permissão da passagem de energia em função dos materiais que a compõe (ABNT, 2023).

A capacidade térmica é a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade de área a temperatura de um sistema (ABNT, 2023). Mede a capacidade de um material de armazenar energia térmica (MACH; QUEIROZ, 2014). Além disso, indica sua maior ou menor capacidade em reter calor. Um material de grande capacidade térmica necessita de uma grande quantidade de calor para variar (1) um grau de temperatura seus componentes por unidade de área (LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, 2015).

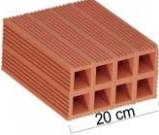
Os materiais cerâmicos têm pontos de fusão elevados, podendo ser considerados como refratários, duros, quebradiços e quimicamente inertes (RAHAMAN, 2003). Porém, durante um incêndio, perdem sua resistência, ocasionando risco iminente de colapso (DUNN, 2010). E ainda, os blocos cerâmicos são frágeis ao impacto e quando forem usados como alvenaria de cortina, parapeito e marquise são considerados como um risco ao colapso, pois são independentes e possuem pouca resistência (DUNN, 2010).

As legislações do Corpo de Bombeiros do Estado de Santa Catarina IN 14 (2020) e de São Paulo IT 08 (2019) apresentam como recomendação propriedades e parâmetros de resistência ao fogo para blocos cerâmicos usados em alvenaria de vedação, para áreas de saída de emergência das edificações verticais, conforme mostrado na Tabela 3. Esses parâmetros são aplicados para os casos em que, o material usado, não possui laudo ou ensaio específico.

A IN 14 CBMSC (2020) recomenda que, para obter um tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) de 2 e 4 h, a parede de bloco cerâmico, com revestimento, precisa ter espessuras com 13 e 23 cm, respectivamente. O TRRF é o tempo máximo que o elemento construtivo pode manter a sua função segundo os critérios de resistência ao fogo, estabilidade estrutural ou da compartimentação (COSTA, 2011).

Se o produto cerâmico a ser usado possuir maior espessura que os elementos trazidos como referência, sendo ele composto dos mesmos materiais, pode ser adotado o TRRF dos elementos com margem de segurança. Ressalta-se que o TRRF será maior quanto maior for a espessura da parede, quando executada com o mesmo material. Esta informação está apoiada, conforme consulta técnica externa apresentada no anexo A.

Tabela 3 – Propriedades e parâmetros de resistência ao fogo de blocos cerâmicos usados em alvenaria de vedação para áreas de saída de emergência de edificações verticais.

Características de paredes de alvenaria (revestimento + bloco cerâmico)			
Tijolo Cerâmico	Revestimento (cm)	Espessura total (cm)	TRRF (h)
	1,5	13	≥ 2 h
	1,5	23	≥ 4 h

Fonte: Adaptado de IN 14 CBMSC (2020).

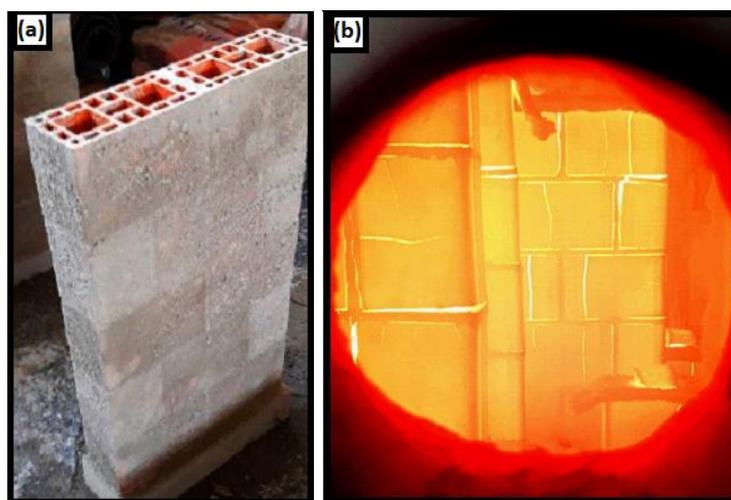
A ANICER (2018), na sua ficha de avaliação de desempenho n. 43 define que, uma parede em alvenaria com blocos cerâmicos de vedação, com dimensões geométricas de 14 x 19 x 29 cm e com revestimento de argamassa de 2,5 cm em ambas as faces, resiste ao fogo durante 120 minutos de ensaio.

Os blocos cerâmicos vazados, destacados na ficha de avaliação de desempenho n. 45, com dimensões geométricas de 11,5 x 19 x 39 cm e com revestimento de argamassa de 2,5 cm em ambas as faces, comprovaram a resistência ao fogo de 60 minutos durante o ensaio (ANICER, 2018).

Nguyen & Meftah (2012) descrevem em seus ensaios, que em paredes de blocos cerâmicos de vedação, com espessura superior a 14 cm, podem ocorrer falhas como os lascamentos explosivos ou *spalling*.

Neto (2020) avaliou o desempenho térmico de prismas de blocos cerâmicos estruturais com dimensões de 14 x 19 x 29 cm, quando expostos a uma ação de incêndio, e em seguida fez a caracterização geométrica, física e mecânica dos prismas com argamassa de assentamento e revestimento. Os blocos cerâmicos apresentaram uma maior densificação com redução da porosidade, além do surgimento de fissuras significativas. O pesquisador observou a decomposição dos principais constituintes da argamassa de assentamento e redução da resistência a compressão do material após a situação de incêndio, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Prismas preparados com blocos cerâmicos (a); Ensaio de blocos cerâmicos submetidos a uma exposição ao fogo (b).



Fonte: Neto (2020).

Sciarreta et al. (2021) citam que a temperatura está relacionada com a condutividade térmica, calor específico e densidade dos materiais. Além disso, a capacidade estrutural, mecânica e o comportamento tensão-deformação, bem como os efeitos da expansão e contração térmica são as propriedades geralmente afetadas pelo aumento de temperatura.

Bosnjak (2020) e Lugaresi et al. (2022) concluíram que, se as chamas e a fumaça saírem do compartimento, elas podem colidir com a fachada do edifício e danificar elementos externos, podendo atingir o andar superior, rompendo a compartimentação, sendo ela uma camada essencial de proteção em edifícios verticais.

A simulação de um incêndio real é muito complexa e singular, pois cada incêndio possui suas particularidades dependentes da taxa de aquecimento, temperatura máxima e duração (COSTA, C. N.; BRITZ, 2011). Por isso, a avaliação de um incêndio em ordem global, excede as capacidades dos fornos padrão para testes de incêndio. O método mais preciso de prever uma resposta é através da avaliação por meio de testes ou modelagem em escala real. A principal desvantagem desse ensaio é a complexidade e o custo, tendo como resultado sua limitada utilização. Por isso, são utilizados métodos de avaliação da resistência ao fogo como métodos tabulares, simplificados e avançados de cálculo, bem como os ensaios em escala real (KHOURY, 2007).

Entre outros estudos já realizados com a simulação de um incêndio real com chamas em paredes e prismas, destacam-se as pesquisas apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Estudos de resistência ao fogo realizados em paredes de alvenaria de blocos cerâmicos.

Autor	Corpo de prova e espessuras (cm)	Metodologia	Resultado
(NETO, 2020)	Blocos cerâmicos de 14 x 19 x 29 cm, prismas e pequenas paredes com e sem argamassa de assentamento e revestimento.	Avaliou o desempenho térmico, mecânico e imagens de microscopia dos elementos cerâmicos, quando expostos a uma ação incêndio.	Demonstrou uma maior densificação, redução da porosidade, surgimento de fissuras, redução na resistência à compressão do material após a situação de incêndio.
(BUENO, 2019)	Paredes com 2,5 x 2,5 m com argamassa de assentamento e revestimento com blocos cerâmicos tipo estrutural de 14 x 19 x 29 cm.	Paredes com aberturas de instalações prediais ensaiadas em forno vertical.	Nas regiões de aberturas de instalações, a parede perdeu a capacidade resistente exposta ao aumento de temperatura.
(NGUYEN; MEFTAH, 2012)	Paredes de 3,00 x 3,00 m com blocos cerâmicos de vedação com espessuras de 12, 14 e >14 cm com argamassa de assentamento e revestimento.	Análise de comportamento térmico e mecânico. Análise dos efeitos da orientação alvéolo (furos) do bloco cerâmico - tijolo.	Paredes espessas e não estruturais (de espessura superior a 12–14 cm) podem sofrer lascas, que, no entanto, não se propagam através da espessura da parede. Portanto, a estabilidade da parede é preservada e o isolamento continua sendo o critério de projeto do ponto final.
(ROSEMANN, 2011)	Paredes tipo prisma com 2,70 x 2,60 m, com blocos de 14 x 19 x 29 cm, com revestimento e enchimento nos vazados.	Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos pelo critério de isolamento térmico.	O revestimento das faces com argamassa representou boa alternativa para a melhoria do desempenho ao fogo.

Fonte: O autor (2023).

A NBR 15575-1 (2013) define alguns critérios dos materiais quanto ao sistema construtivo e segurança contra incêndio, tais como: utilizar materiais incombustíveis, prever o isolamento térmico, integridade e estabilidade, dificultar a propagação do incêndio e garantir a segurança minimizando o risco de colapso da edificação. Para a escolha das características dos blocos cerâmicos resistentes ao fogo, devem ser levados em consideração os seguintes parâmetros: espessura do bloco, orientação dos vazados dos blocos (alvéolos), carga aplicada, assentamento e revestimento (NGUYEN; MEFTAH, 2012).

Os critérios utilizados para avaliar a resistência ao fogo de um sistema construtivo são: integridade, isolamento térmico e tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) estabelecido como referência pelas normas NBR 16945 (2021a) e NBR 16965 (2021b).

O critério de integridade é a capacidade do elemento construtivo de suportar a exposição ao fogo em um lado apenas, por um determinado período de tempo, sem que haja transmissão do fogo para o outro lado. Pode ser avaliada pela ocorrência de trincas ou aberturas (ABNT, 2021b).

No critério de isolamento térmico é avaliada a capacidade do elemento construtivo de suportar a exposição ao fogo em um lado apenas, por um determinado período de tempo, impedindo a transmissão do fogo para o outro lado. O atendimento ao critério de isolamento térmico, pode ser obtido com a fixação de termopares a fim de medir-se as elevações máxima e média de temperatura nas superfícies não expostas (ABNT, 2022).

O tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) é o tempo que o elemento construtivo pode manter a sua função segundo os critérios de resistência ao fogo, estabilidade estrutural e compartimentação (COSTA, 2011).

Dentre os ensaios de resistência ao fogo, tem-se o ensaio de reação ao fogo. A reação ao fogo está diretamente relacionada com a combustão da amostra, que visa avaliar o comportamento do material ainda na primeira fase de incêndio, ou seja, antes do momento de ocorrência da sua inflamação generalizada (SEITO, 2008).

É possível verificar a incombustibilidade de uma amostra e verificar quais materiais irão ou não contribuir para os riscos de propagação e de crescimento do incêndio. Este ensaio foi desenvolvido para selecionar materiais que produzem uma quantidade reduzida de calor, ou não se ignizam quando submetidos a elevadas temperaturas (MOREIRA, 2002).

A NBR 16626 (2017b) classifica como incombustíveis aqueles materiais que apresentem desenvolvimento de calor limitado, não causando variação de mais de 30 °C entre a temperatura máxima e a temperatura final do forno, com combustão sem chama ou com chamejamento durante tempo inferior a 10 segundos e perda limitada de massa com variação inferior a 50%.

Deve ser observado, nessas condições de exposição, a absorção e a liberação de calor, a ignição, a sustentação de chamas e a perda de massa do material (SIMONETTI, 2020).

A Tabela 4 mostra a classificação de material incombustível, de acordo com a IT 10 CBPMESP (2019).

Tabela 4 – Classificação de material incombustível.

Classe	Método de Ensaio ISO 1182
I	Incombustível Δ Temperatura < 30 °C Δ massa < 50% Tempo de fumaça < 10 segundos
II a VI	Combustível Propagação de Chama Propagação de Fumaça Até 20 segundos aceitável

Fonte: Adaptado IT 10 CBPMESP (2019).

Quando a amostra for considerada combustível, será necessário fazer o ensaio pelo método do painel radiante e de densidade óptica específica de fumaça (SIMONETTI, 2020).

Russo e Sciarretta (2013) citam que há poucos estudos na segurança pós-incêndio de alvenaria, e essa falta de conhecimento afeta especialmente a alvenaria tradicional, conforme mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Estudos realizados em paredes de alvenaria de blocos cerâmicos pós fogo.

Autor	Delimitação da pesquisa	Material	Análise pós fogo
(BOŠNJAK <i>et al.</i> , 2020)	Estudos experimentais e numéricos em alvenaria após exposição a temperaturas elevadas.	Bloco de argila	Defeitos significativos são visíveis na amostra exposta a 1100 °C. Ocorreu encolhimento devido à mudança de fase nos constituintes do tijolo, principalmente devido a evaporação da água quimicamente ligada. Vitrificação parcial ocorreu após a exposição a 1100 °C. O comportamento tornou-se extremamente frágil e os corpos de prova aquecidos a 1100 °C quase explodiram instantaneamente ao atingir o pico de carga.
(LIMA <i>et al.</i> , 2018)	Avaliação de alvenaria de blocos de argila sob alta temperatura.	Bloco de argila	Os blocos de alvenaria expostos a uma temperatura constante de 900 °C por até 4 h apresentaram redução na resistência e desenvolvimento de fissuras, passando pela argamassa de assentamento e propagando-se através do bloco.
(BOTTIN <i>et al.</i> , 2018)	Estruturas de alvenaria em situação de incêndio: avaliação experimental em escala real.	Bloco cerâmico	Fissuras foram verificadas em todas as amostras, mas sem comprometer a estanqueidade do sistema. Notou-se o incremento do tempo de resistência ao fogo das paredes conforme o aumento do índice de alvéolos dos blocos. Concluiu que a disposição dos alvéolos foi decisiva para o desempenho do sistema quanto ao isolamento térmico.

Fonte: O autor (2023).

Blocos de argila são compostos de argilas, formados e processados por secagem realizada de forma natural, adquirindo apenas a resistência a verde. Blocos cerâmicos são blocos que além de passarem pelo processo de secagem natural, passaram por processo queima (sinterização) em alta temperatura, adquirindo novas fases químicas e resistência (DIAS, 2009).

3.3 PROPRIEDADES DOS BLOCOS DE CONCRETO CELULAR

O bloco de concreto celular é produzido por meio misturas de cimento, cal, areia fina, gesso e pó de alumínio finamente moído (RETELATTO, 2019). A reação desta mistura, libera bolhas de hidrogênio, formando a tobermorita ($5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), silicatos de cálcio hidratado, células de ar, e conseqüentemente, um material aerado e leve (BARRETO, 2012). Este material normalmente é produzido pelo processo autoclavado (NEVILLE A.M., 2015; VARISCO, 2014), onde a câmara de cura da autoclave é aquecida e submetida a pressão e vapor, operando a temperatura de 180 a 190 °C (SCHEFFLER, M.; COLOMBO, 2005).

O bloco de concreto celular, no Brasil, se restringe apenas ao cumprimento das normas que o Corpo de Bombeiros Militar solicita para determinadas áreas, como um produto que atende à uma maior resistência ao fogo (PERON, 2018). Possui alta porosidade, cerca de 80% (GOUAL *et al.*, 2006; SCHEFFLER, M.; COLOMBO, 2005), que caracteriza um material extremamente leve, isolante térmico (condutividade térmica entre 0,1 a 0,14 W/mk), bem como isolante acústico (ARUN KUMAR *et al.*, 2022).

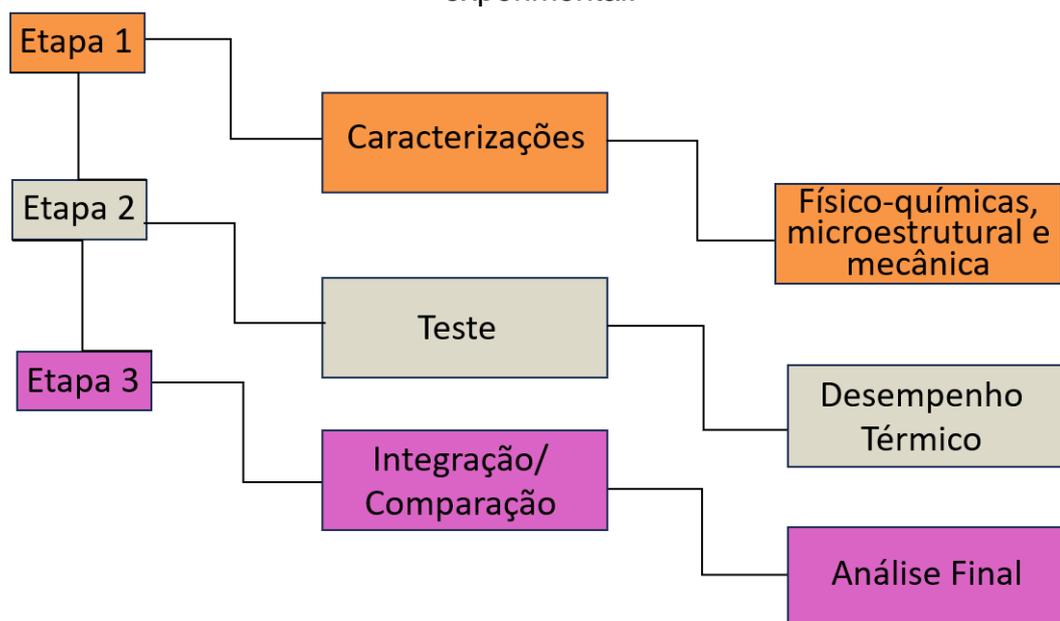
De acordo com a Associação Europeia de Concreto Celular Autoclavado - EAACAC (2022), o bloco de concreto celular fornece segurança contra incêndio, classificado como um material incombustível, podendo resistir a temperaturas de até 1200 °C, não permitindo a propagação de chama, além de não liberar gases tóxicos quando exposto ao fogo (WITZKE, 2017). No Brasil, o Instituto de Pesquisa Tecnológicas – IPT (2008), realizou um ensaio de segurança contra incêndio em um corpo de prova de bloco de concreto celular, como parede de vedação, sem função estrutural, com dimensões da parede de 2,60 m de largura, 2,60 m de altura, com blocos de 30 cm de altura, 60 cm de comprimento e 10 cm de espessura. O ensaio foi conduzido durante 180 minutos, chegando à temperatura de 1090 °C, caracterizando este material como adequado para áreas de saída de emergência das edificações verticais.

Segundo Scheffler e Colombo (2005), os blocos de concreto celular podem ser fabricados a partir de cimento Portland, mas também podem ser fabricados a partir de cimento Portland misturado com materiais residuais, como cinzas volantes e escória de alto-forno moída.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma mostrado na Figura 9, exemplifica a estrutura das três etapas experimentais desenvolvidas.

Figura 9 – Fluxograma estruturante das 3 (três) etapas adotadas no procedimento experimental.

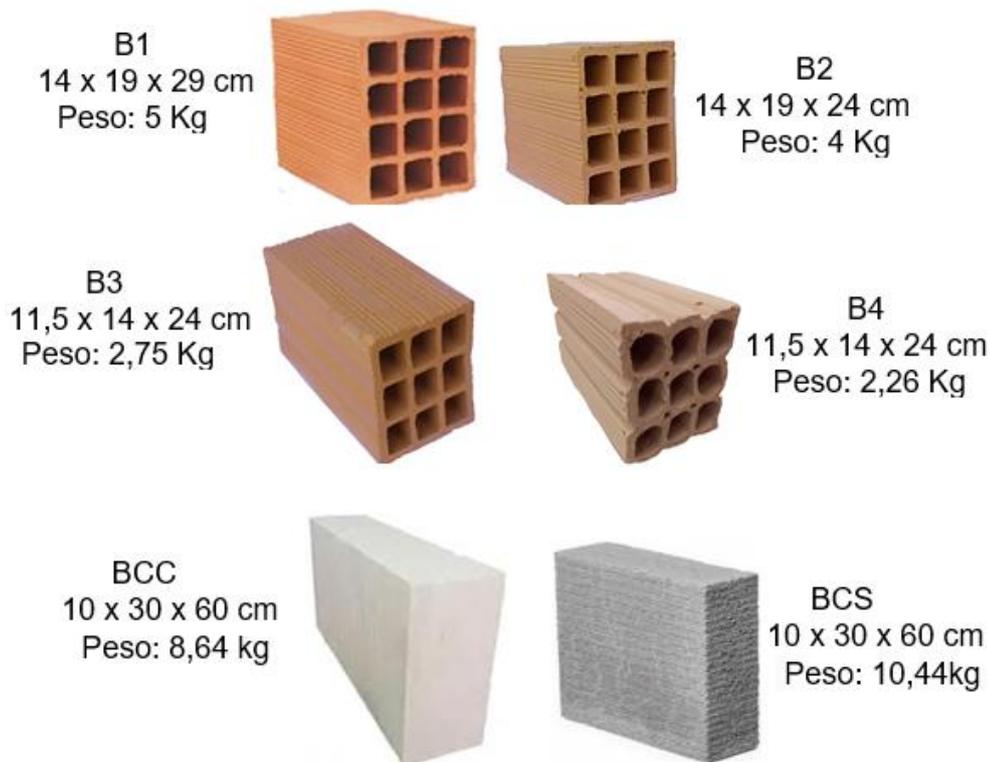


Fonte: O autor (2023).

4.1 MATERIAIS

Foram selecionados quatro blocos de cerâmica vermelha vazados (Figura 10), com espessuras de 14 cm (B1 e B2) e de 11,5 cm (B3 e B4) de diferentes características geométricas, fornecidos por empresas da região, sendo B2 e B3 do mesmo fabricante, e dois blocos de concreto celular de fabricantes diferentes como referência (BCC e BCS). A escolha do bloco de concreto celular, deve-se ao fato da sua grande utilização na construção civil da região para compor paredes de vedação para áreas de saída de emergência de edificações verticais (PERON, 2018; ROSSO *et al.*, 2018).

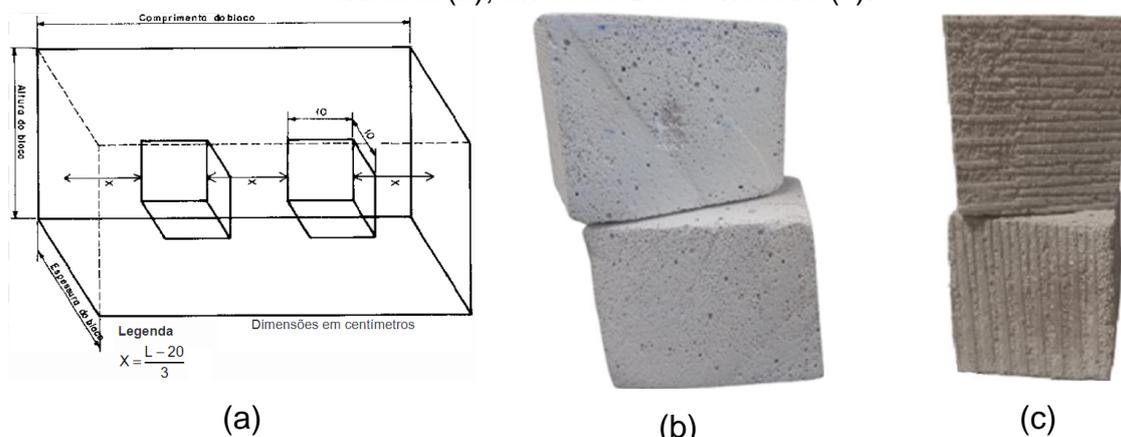
Figura 10 – Imagens dos blocos de cerâmica vermelha vazados e de concreto celular usados no estudo.



Fonte: O autor (2023).

Para a caracterização do bloco de concreto celular foram extraídos corpos de prova com dimensões de 10 x 10 x 10 cm (Figura 11), conforme definido pela NBR 13.438 (2021c) e NBR 13.440 (2021d).

Figura 11 – Representação da extração dos corpos de prova do bloco de concreto celular: geometria a ser extraída conforme norma 13.440 (2021d) (a); amostra BCC extraída (b); amostra BCS extraída (c).

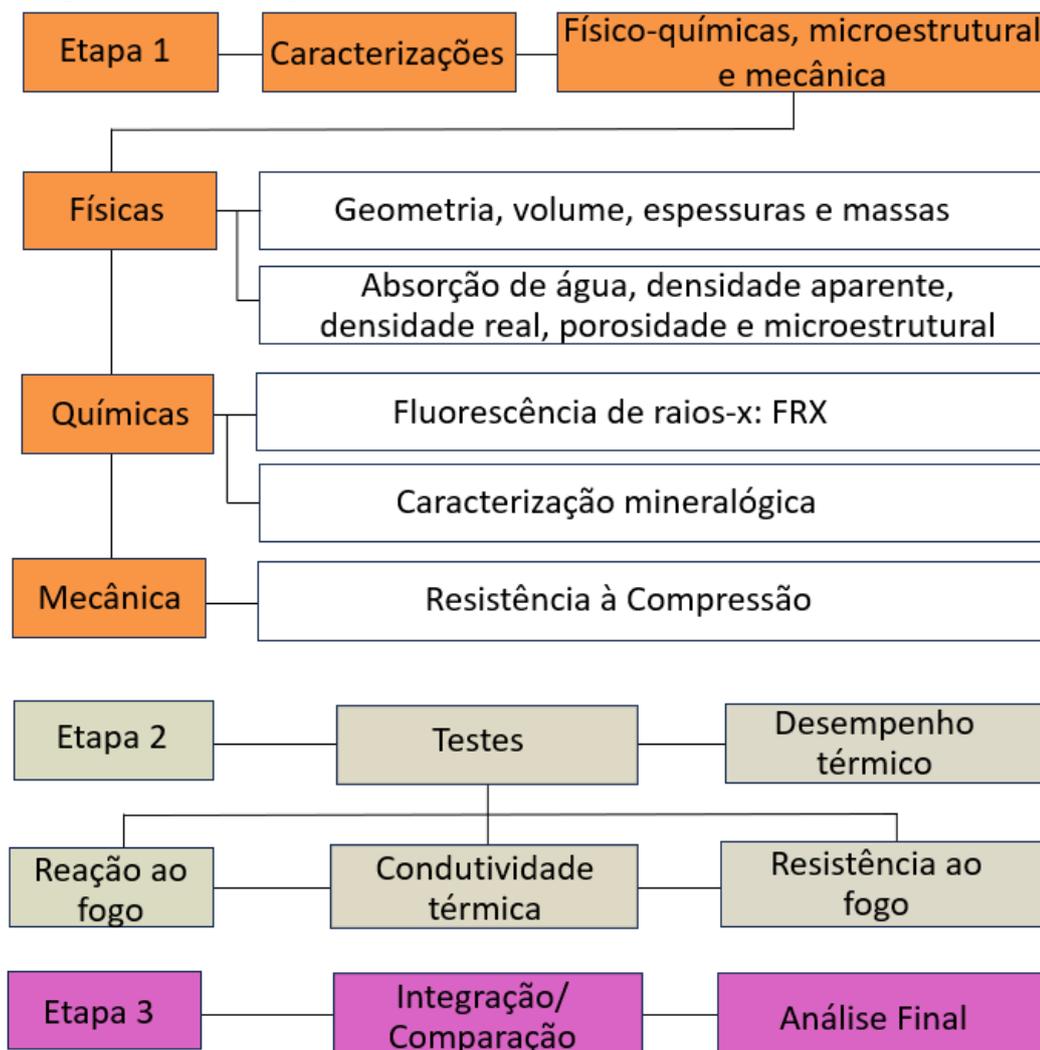


Fonte: (a) NBR 13.440 (2021d), (b e c) o autor (2023).

4.2 MÉTODOS

De acordo com os métodos normativos, na Etapa 1 foram realizadas as caracterizações físico-químicas dos blocos de cerâmica vermelha e de concreto celular, seguido pela Etapa 2, onde foram realizados ensaios de desempenho térmico, reação ao fogo, condutividade térmica e resistência ao fogo. Na Etapa 3 avaliou-se o desempenho térmico e a sua correlação com o restante das caracterizações obtidas, além de uma análise comparativa com normas e literatura. O fluxograma mostrado na Figura 12, exemplifica a estrutura das três etapas experimentais desenvolvidas de modo detalhado.

Figura 12 – Fluxograma detalhado das 3 (três) Etapas desenvolvidas.

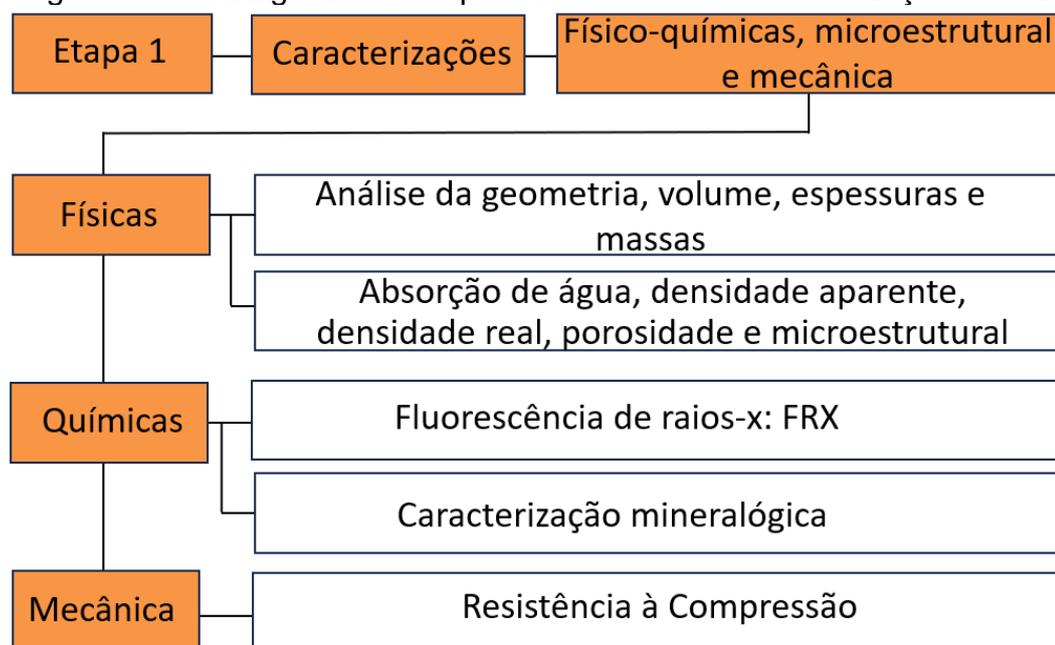


Fonte: O autor (2023).

4.2.1 Etapa 1: Caracterização dos blocos

Na primeira etapa, correlacionada com o primeiro objetivo específico, foram feitas caracterizações físicas e químicas dos blocos, seguindo métodos normativos. As caracterizações físicas incluíram: identificação da geometria, espessura das paredes, massa, relação massa/volume, absorção de água, densidade aparente, densidade real e porosidade. A caracterização mecânica deu-se por meio do ensaio de resistência à compressão. Também foram realizadas caracterizações químicas e microestruturais. A Figura 13 mostra o fluxograma das caracterizações realizadas.

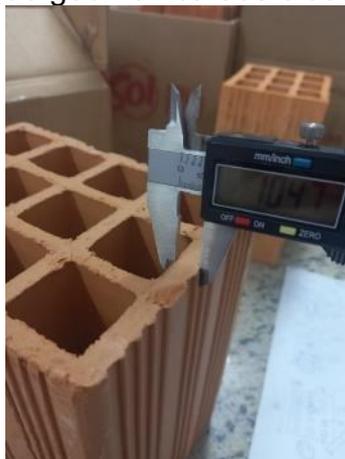
Figura 13 – Fluxograma da etapa 1 detalhando as caracterizações realizadas.



Fonte: O autor (2023).

As caracterizações físicas, incluíram a medição geométrica dos blocos de cerâmica vermelha, como espessuras e volume, que foram realizadas por meio da utilização de paquímetro digital com precisão de 0,01 mm, Modelo CD-8PSX (Mitutoyo, Japão), conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Caracterização geométrica dos blocos de cerâmica vermelha.

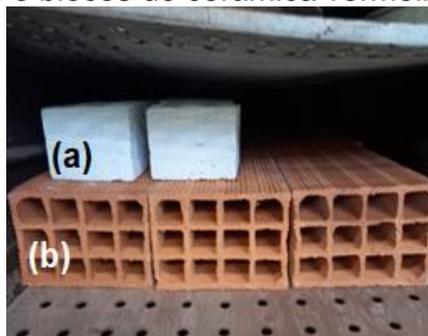


Fonte: O autor (2023).

A NBR 15.270-1 (2017a) determina que nas caracterizações geométricas as paredes externas dos blocos cerâmicos devem ter espessura mínima de 7 mm, e a soma mínima das paredes em um mesmo corte transversal, incluindo paredes externas e internas, deve ser de 20 mm.

Para determinação da massa seca foram utilizados 6 (seis) corpos de prova de cada bloco de cerâmica vermelha e 4 (quatro) amostras de 10 x 10 x 10 cm de cada do bloco de concreto celular. Os blocos de cerâmica vermelha foram secos em estufa (Figura 15) a temperatura de 105 ± 5 ° C, até que duas pesagens consecutivas, em intervalo mínimo de 1 hora, diferiram em no máximo 0,25%. As massas foram obtidas imediatamente após a remoção das amostras da estufa e/ou estabilização das pesagens para obter a massa seca NBR 15.270-1 (2017a). Os blocos de concreto celular, foram secos em estufa a temperatura de 105 ± 5 ° C, até que a diferença entre duas pesagens sucessivas, efetuadas em um intervalo de 24 h, fosse menor ou igual a 1,0 g, de acordo com a NBR 13.440 (2021d).

Figura 15 – Imagens do procedimento de secagem em estufa realizado: blocos de concreto celular (a) e blocos de cerâmica vermelha na estufa (b).



Fonte: O autor (2023).

Para a determinação da densidade aparente, foi utilizada a relação da massa seca, pelo volume dos blocos, (Equação 1) (ABNT, 2021d). A densidade aparente foi determinada pela média aritmética dos resultados obtidos nos corpos de provas ensaiados.

Para blocos cerâmicos, o valor de densidade aparente pode variar acima de 1,0 g/cm³ conforme DIAS (2009). A NBR 13.438 (2021c) descreve um valor médio da densidade aparente de 0,45 a 0,65 g/cm³ para blocos de concreto celular.

$$\text{Densidade aparente (g/cm}^3\text{)} = \text{massa seca (g)} / \text{volume do corpo de prova (cm}^3\text{)} \quad (\text{Equação 1})$$

A determinação de absorção de água, foi feita conforme a NBR 15.270 (2017a), onde os corpos de prova foram completamente imersos em água por 24 h, conforme mostrado na Figura 16, em seguida, pesados em balança de precisão 0,1 g, modelo AC 10 K (Marte, Brasil). O ensaio de absorção de água permite identificar a capacidade do material de absorver e reter água (THAKUR; KUMAR, 2022).

Figura 16 – Imagens dos blocos imersos durante o ensaio de absorção de água.



Fonte: O autor (2023).

O percentual de absorção de água para os blocos de cerâmica vermelha deve variar de 8 a 25%, de acordo com a NBR 15.270 (2017a) conforme Equação 2. Para o bloco de concreto celular, o percentual de absorção de água deve ser de ~70% (KELLER, 2021).

$$\text{Absorção de água (\%)} = [(\text{massa úmida (g)} - \text{massa seca (g)}) / \text{massa seca (g)}] \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Para o ensaio de densidade real, as amostras (Figura 17) foram cominuídas em moinho periquito com vaso de porcelana de 500 ml, e após, desaglomeração em almofariz de porcelana até o material ficar passante em peneira de 375 mesh. Todas as amostras foram secas em estufa a temperatura de 100 °C durante 24 h antes do serem submetidas ao ensaio.

Figura 17 – Imagens dos diferentes blocos/pós preparados para ensaio de densidade real.



Fonte: O autor (2023).

Para a determinação da densidade real, ou massa específica real, foi utilizado um picnômetro de gás hélio modelo Ultrapyc 5000 (Anton-Paar, USA), conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Detalhe da realização do ensaio de picnometria para a determinação da densidade real de sólidos.



Fonte: O autor (2023).

Com a finalidade de estudar a porosidade total foi utilizado a Equação 3 (ROSSO *et al.*, 2018):

$$\text{Porosidade total (\%)} = (1 - \text{densidade relativa (g/cm}^3\text{)}) \times 100$$

(Equação3)

A densidade relativa é calculada conforme Equação 4 (ROSSO *et al.*, 2018)

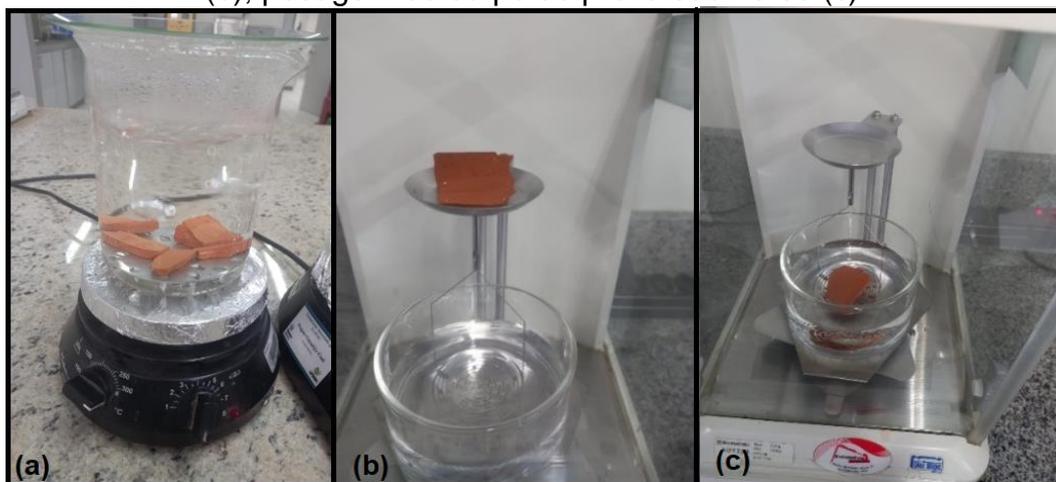
$$\text{Densidade relativa (g/cm}^3\text{)} = \text{densidade aparente (g/cm}^3\text{)} / \text{densidade real (g/cm}^3\text{)} \quad (\text{Equação.4})$$

A porosidade aparente foi realizada baseada no princípio de Arquimedes, por meio da obtenção da massa seca, massa úmida e massa submersa dos corpos de prova, conforme ASTM C373 (2006). Foram separadas cinco amostras de um sólido com formato irregular, com aproximadamente 6,0 g cada. Inicialmente, foi obtida a massa seca, em seguida as amostras foram imersas em água fervente por 5 h, seguida de um repouso, com as amostras ainda imersas por 24 h em temperatura ambiente (Figura 19). Após, as amostras foram pesadas úmidas e submersas em água. Durante o ensaio, ao perceber que as amostras dos blocos de concreto celular perderam material com a fervura, o processo de submersão para as mesmas foi novamente realizado, porém em imersão a frio durante 24 h.

A porosidade aparente, P , expressa em percentual, é a relação do volume dos poros abertos do corpo de prova com seu volume externo, conforme a Equação 5.

$$\text{Porosidade aparente (\%)} = [(\text{Massa saturada (g)} - \text{massa seca (g)}) / (\text{massa saturada (g)} - \text{massa suspensa em água (g)})] \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Figura 19 – Imagens do ensaio de porosidade: fervura por imersão (a); pesagem do corpo de prova saturado com superfície seca (b); pesagem do corpo de prova submerso (c).



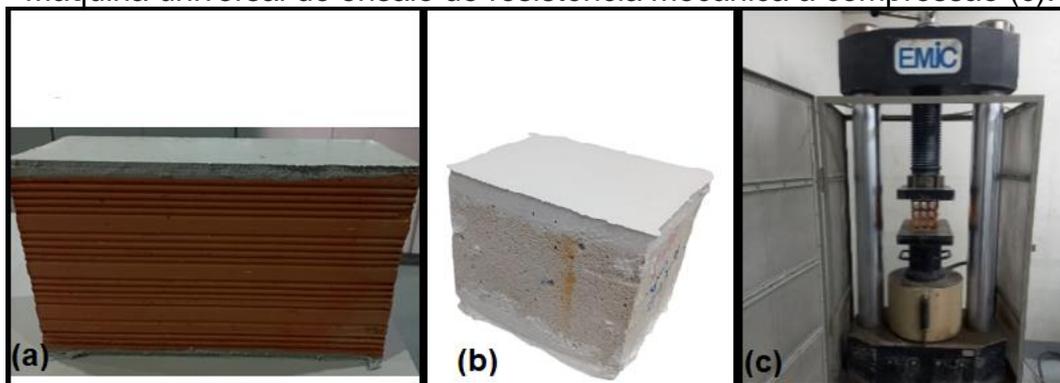
Fonte: O autor (2023).

O ensaio de resistência mecânica à compressão dos blocos foi realizado conforme NBR 15270 (2017a). Os corpos de prova foram capeados com argamassa industrializada do tipo estabilizada. Antes do ensaio, os blocos ficaram imersos em água durante 24 h para saturação.

Os corpos de provas do bloco de concreto celular foram capeados com gesso e não foram saturados, conforme determina a NBR 13440 (2021d).

Os ensaios de resistência mecânica à compressão foram realizados em máquina universal de ensaios modelo PC 200, célula de carga Trd 30 (Emic, Brasil), conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Blocos de cerâmica vermelha (a), e bloco de concreto celular (b) capeados para a realização do ensaio de resistência mecânica à compressão; Máquina universal de ensaio de resistência mecânica à compressão (c).



Fonte: O autor (2023).

Os valores obtidos no ensaio de resistência mecânica à compressão dos blocos de cerâmica vermelha foram comparados conforme a NBR 15270 (2017a), que menciona o valor mínimo de 1,5 MPa. Com relação ao bloco de concreto celular, deve variar de 1,0 a 4,0 MPa, conforme exigido pela NBR 13440 (2021d).

O valor de resistência mecânica à compressão foi calculado conforme a Equação 6 (ABNT, 2021d).

$$f_{cb} = \frac{F}{S} \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

f_{cb}: resistência à compressão em Mega Pascal;

F: Carga máxima suportada pelo corpo de prova em Newton;

S: área da seção transversal comprimida, determinada geometricamente em milímetro quadrado.

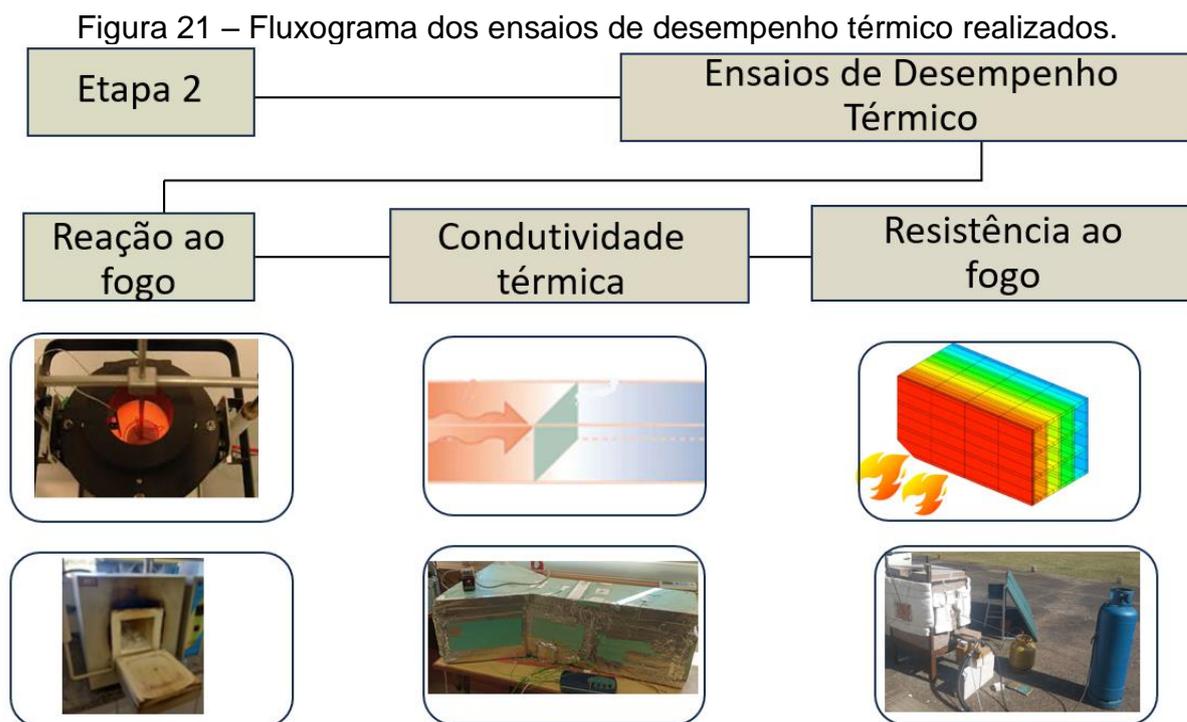
Para análise química por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), foi utilizada a amostra em pó, passante na peneira de 375 mesh. Para a realização do ensaio de perda ao fogo (PF, 950 °C), seguiu-se a norma ASTM D7348 (2007). Após a realização da PF, as amostras em pó foram prensadas manualmente em forma de pastilha, para realização da análise química. Utilizou-se o equipamento de espectrometria de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (FRX), modelo EDX 7000 (Shimadzu, Japão), seguindo o método semiquantitativo de óxidos para amostras sólidas em pó.

Para a caracterização mineralógica, foi utilizado um difratômetro de raios - X marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000, equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 30 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário. A amostra em pó foi analisada no intervalo angular de 5 a 80° 2 θ em passo de 0.05°/1s utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 1° e 0,6 mm no detector. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Difractometria de Raios - X da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Ensaio de microscopia foram realizados em microscópio eletrônico de varredura, modelo EVO MA10 (Zeiss, Inglaterra). As amostras foram recobertas com uma fina película de ouro por pulverização catódica utilizando um metalizador a vácuo modelo Q150R (Quórum Technologies, Inglaterra).

4.2.2 Etapa 2: Ensaios de desempenho térmico

Na etapa 2 foram iniciados os ensaios de desempenho térmico dos blocos de cerâmica vermelha e dos blocos de concreto celular, submetidos a altas temperaturas, no ensaio de reação ao fogo, seguido do ensaio de condutividade térmica e resistência ao fogo (Figura 21).



Fonte: O autor (2023).

4.2.2.1 Ensaio de reação ao fogo

No ensaio de reação ao fogo, as amostras são submetidas a temperatura de 750 °C para verificar a combustibilidade. São utilizadas cinco amostras por tipo de material, com formato cilíndrico, diâmetro na faixa de 42 a 45 mm e altura de 50 ± 3 mm conforme a norma ISO 1182 (2002). As amostras devem ser secas em uma estufa ventilada com temperatura de 60 ± 5 °C por um período de 24 h. Após, devem ser colocadas em um dessecador. Para a realização do teste deve ser utilizado um forno cilíndrico, aquecido internamente por resistências elétricas e envolto externamente por material isolante. Assim, as amostras cilíndricas são inseridas dentro do forno, acopladas em um suporte e monitoradas continuamente, por termopares no interior do forno, no centro e na superfície da amostra.

Levando em conta a metodologia citada acima, o ensaio realizado neste trabalho foi adaptado em forno mufla a 750 °C, Figura 22 (a), onde pretendeu-se fazer a simulação de uma condição padrão de um incêndio com a suas limitações do forno mufla. Conforme a norma ISO 1182 (2002), o ensaio foi conduzido por 30 min a 750 °C. As amostras de 5 cm de forma irregular (Figura 22-b), foram separadas e preparadas, secas em estufa a temperatura de 100 °C durante 24 h, e pesadas em balança de precisão 0,001 g, Modelo UX620H (Marte, Filipinas). As amostras foram então posicionadas dentro de um cadinho de alumina, no interior da mufla e mantidas durante 30 minutos a temperatura constante de 750 °C.

Figura 22 – Imagem mostrando o ensaio adaptado da norma ISO 1182 (2002) de reação ao fogo feito para os blocos de cerâmica vermelha: forno mufla a 750 °C (a), e amostras de 5 cm secas em estufa e pesadas em balança (b).



(a)



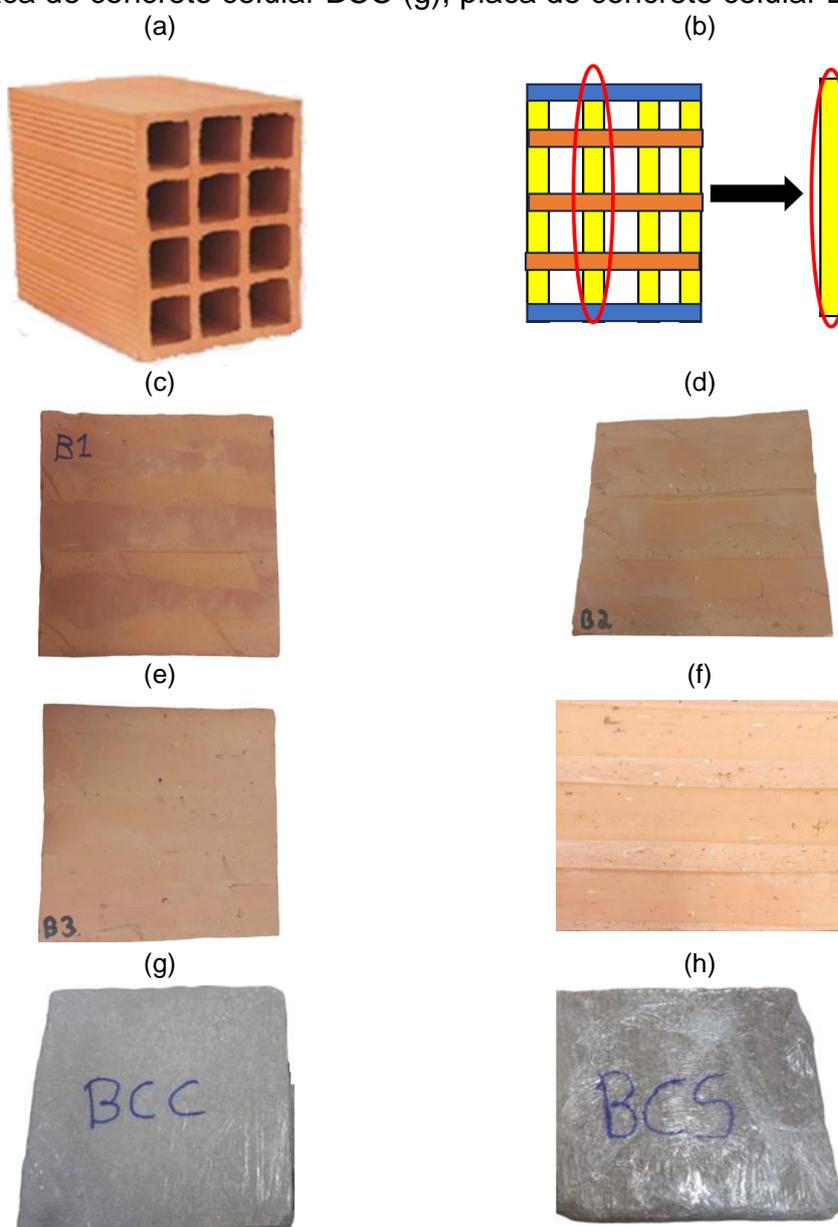
(b)

Fonte: O autor (2023).

4.2.2.2 Ensaio de condutividade térmica

Para a realização do ensaio de condutividade térmica foi utilizado um protótipo chamado Prototherm (GOMES, 2021). Com este aparato, foi possível avaliar condutividade térmica dos diferentes dos blocos em estudo. Para tal, placas de dimensões de 15 x 15 cm e com espessura variável entre 0,6-1,6 cm, foram preparadas a partir das paredes internas dos blocos (Figura 23).

Figura 23 – Bloco de cerâmica vermelha onde se obtiveram as placas para ensaios de condutividade térmica (a); modelo esquemático da extração das placas de cerâmica vermelha (b); placa de cerâmica vermelha B1 (c); placa de cerâmica vermelha B2 (d); placa de cerâmica vermelha B3 (e); placa de cerâmica vermelha B4 (f); placa de concreto celular BCC (g); placa de concreto celular BCS (h).

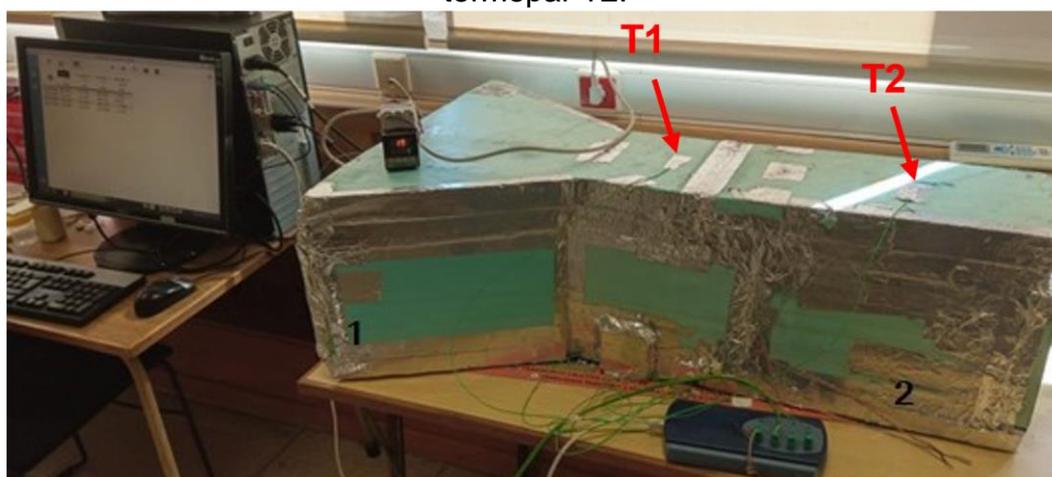


Fonte: O autor (2023).

Este ensaio foi realizado no Laboratório de materiais do Instituto Politécnico de Viana do Castelo e com o apoio do Laboratório de materiais de construção da Universidade do Minho, Portugal. O ensaio seguiu o procedimento interno baseado na norma ISO-9869 (2014) desenvolvido por estas duas instituições.

O protótipo Prototherm consistiu em formar um canal fechado com placas isolantes em *roofmate*, de maneira que não houvesse trocas térmicas entre o exterior e o interior, coladas com espuma expansiva de poliuretano e cujas juntas foram ainda vedadas exteriormente com fita adesiva de alumínio, Figura 24. O canal tem uma seção retangular com uma área interior de 18.750 mm^2 ao longo de 600 mm, e uma seção trapezoidal, onde foi colocada a fonte de calor (resistência de aquecimento).

Figura 24 – Imagem do protótipo Prototherm utilizado na realização dos ensaios de condutividade térmica: lado da fonte de calor e do termopar T1 e lado do sensor e do termopar T2.



Fonte: Jesus (2024).

A seção retangular foi dividida em 2 seções com 300 mm de comprimento cada, de maneira a facilitar a colocação das placas para a realização dos ensaios (Figura 25). Em cada uma das seções encontra-se localizado um termopar, para medição da temperatura do ar (T1 e T2).

O interior da seção retangular tem as dimensões necessárias para a colocação exata de todas as placas de ensaio, embora após colocação de cada amostra as respectivas extremidades laterais são preenchidas com espuma expansiva de poliuretano, de modo a garantir o isolamento total entre as duas seções.

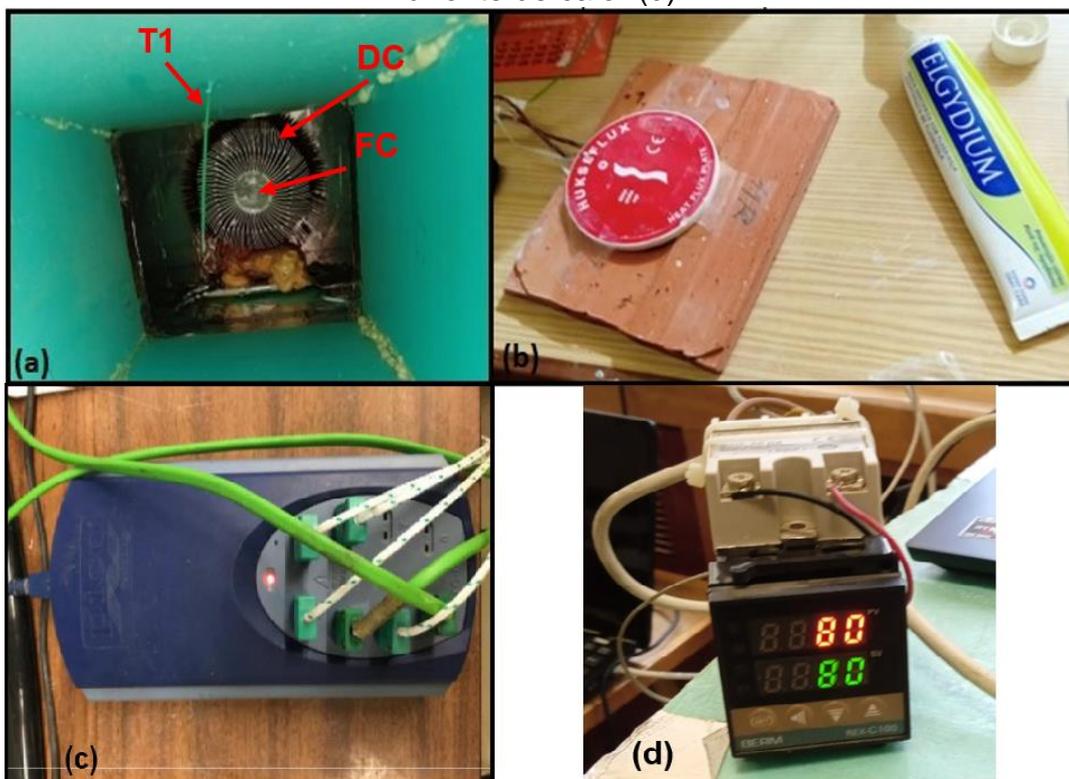
Figura 25 – Seção mostrando a abertura do protótipo para a colocação da amostra (a); amostra fixada e pronta para o ensaio de condutividade térmica (b).



Fonte: (a) Gomes (2021); (b) Jesus (2024).

Na seção trapezoidal, Figura 26 (a), foram instalados uma fonte de calor acoplada e um dissipador estático, próximo do começo da seção retangular, de maneira que todo o calor pudesse propagar-se homoganeamente ao longo da mesma. Para ser possível estabilizar a temperatura dentro do Prototherm, um controlador de temperatura foi ligado diretamente à fonte de calor, conforme mostrado na Figura 26 (d) de forma a se atingir uma temperatura T_1 de $50 \pm 0,2$ °C (temperatura estabilizada ao fim de ± 12 h). Na parte fria das amostras, foi posicionado um sensor de fluxo de calor, que determina o fluxo de calor que atravessa a área ativa de contato e que foi aplicado com uma pasta térmica de contato de boa condutividade térmica (Figura 26 (b)).

Figura 26 – Fonte de calor (FC) com dissipador de calor estático (DC) e termopar T1 (a); Sensor de fluxo de calor fixado com pasta térmica (b); *Datalogger* usado para aquisição automática dos dados (c); Regulador de temperatura que está conectado à fonte de calor (d).



Fonte: Jesus (2024).

O sensor de fluxo de calor é um transdutor que emite um sinal elétrico em (mV) que é uma função da diferença de temperatura entre as duas faces do sensor (ISO, 2014). Esse sensor foi fixado na superfície da amostra com pasta térmica. Para o cálculo da condutividade térmica consideraram-se apenas as leituras obtidas por um *datalogger* (registrador de dados da marca Picolog, Figura 26 (c)), durante 1-2 h, correspondentes a uma média de temperaturas em T1 estabilizada a $50 \pm 0,2$ °C (situação de regime estacionário). O tempo total do ensaio necessário para se atingir a estabilização da temperatura em T1, variou entre 8-12 h.

Os dados de cada ensaio registrados em intervalos de 5 minutos pelo *datalogger* são: as temperaturas dos termopares T1 e T2 em graus Celcius (°C), o fluxo de calor em milivolt (mV) e o tempo em minutos (min.) em que decorre todo o ensaio. Deve-se salientar que o fluxímetro de calor tem uma correção associada de $61,3 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$, segundo informação do próprio fabricante.

A norma ISO 9869 (2014) apresenta um procedimento de medição condutividade térmica semelhante da NBR 15.220 (2023), que define métodos e modelos técnicos de cálculos para determinar a resistência térmica de paredes baseado em uma análise dinâmica de dados experimentais. Com estas medições, avaliam-se as propriedades térmicas das amostras, tais como: resistência térmica, transmitância térmica, fluxo de calor propagado pela amostra e capacidade térmica, que neste caso foram usadas para caracterizar a amostra como um elemento de isolamento térmico.

Gomes (2021) propõem o seguinte método indireto para estimar a variação de condutividade térmica (λ) pelo fluxo de calor, espessura e variação da temperatura. O ensaio é realizado em ambiente com temperatura controlada de 20 °C (temperatura do laboratório), enquanto o interior do Prototherm é aquecido pela fonte de calor, até se atingir uma temperatura de $50 \pm 0,2$ °C em T1.

O valor da taxa de fluxo de calor (W/m^2) resultante do sensor é calculado pela razão entre a tensão gerada em (μV) e a potência ($\mu V/W/m^2$) estabelecida pela constante do sensor utilizado. Esta condição experimental torna possível calcular o coeficiente de transmitância térmica (U) definido pela razão entre a taxa de fluxo de calor e a diferença de temperatura (ISO, 2014).

A relação entre condutividade térmica e a variação de temperatura é dada pelas equações constantes no Quadro 3, levando em conta a média dos valores calculados pelas equações.

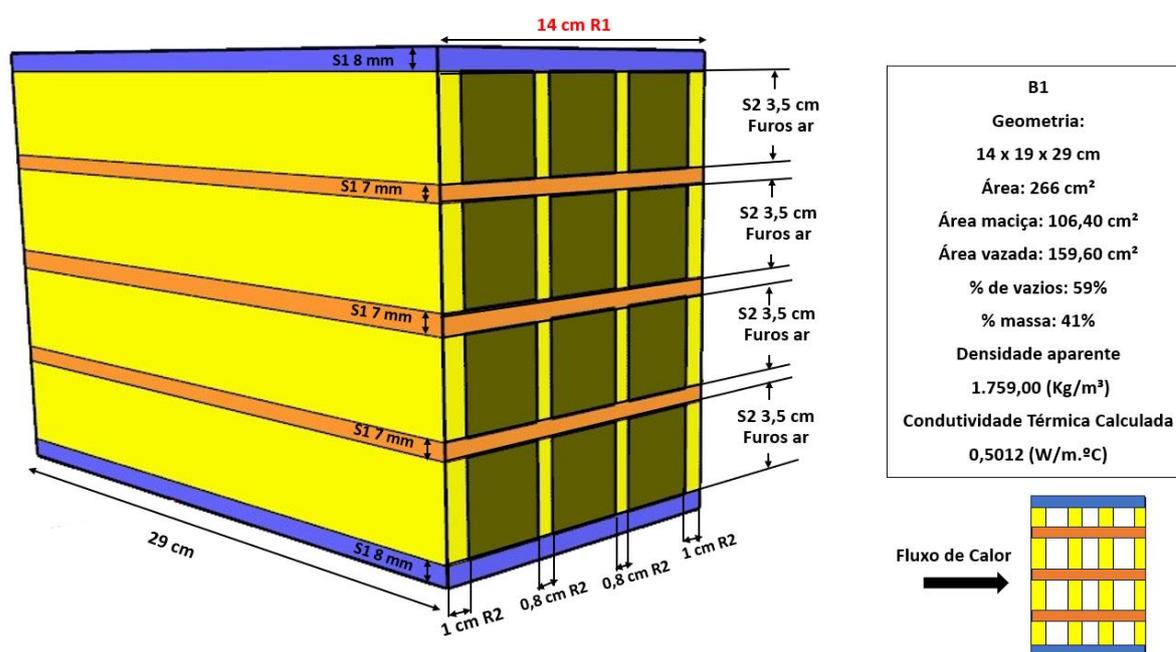
Quadro 3 – Características e definições para o cálculo da condutividade térmica.

Definição Unidade	Fórmula	Descrição
Varição de Temperatura (°C)	$\Delta T = T_f - T_i$	Representa os valores de temperatura (T_i) valor da temperatura da amostra ao lado da fonte de calor e (T_f) a temperatura do outro lado da amostra que não esteve em contato com a fonte de calor.
Fluxo de calor (W/m ²)	$q = \frac{t}{P}$	O fluxo de calor é a razão da tensão gerada pela fonte de calor pela potência. Quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário.
Transmitância térmica (W/m ² . °C)	$U = \frac{q}{\Delta T}$	Transmitância térmica é a razão do fluxo de calor pela variação de temperatura.
Condutividade térmica W/(m.°C)	$\lambda = \frac{\text{espessura da amostra}}{\left(\frac{1}{U}\right)^{-0,26}}$	Propriedade de um material homogêneo e, no qual se verifica o fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m ² , quando submetido a um gradiente de temperatura °C ou uniforme de 1 Kelvin por metro. Valor de condutividade térmica de um material de construção ou produto sob condições externas e internas específicas que podem ser considerados como típicas de desempenho deste material. O coeficiente (0,26) está relacionado com a condutividade na interface de cada um dos lados do medidor do fluxo térmico sendo uma constante, (igual a 0,13 de cada um dos lados).
Resistência térmica (m ² .°C/W)	$Rt = \frac{\text{esp.}}{\lambda}$	Resistência térmica é calculada pela razão entre a espessura do material e sua condutividade térmica. A resistência térmica pode ser vista como a resistência que um meio oferece à passagem de um fluxo térmico, isto é, é a resistência térmica contra o calor.

Fonte: Adaptado NBR 15220 (2023).

Como os blocos de cerâmica vermelha possuem elementos vazados (ar), entre paredes maciças, uma transferência de calor unidirecional da face quente para a face fria pode ser assumida. Portanto, foram calculados a capacidade térmica dos diferentes blocos de cerâmica vermelha levando-se em conta os coeficientes das camadas de ar a partir da condutividade térmica calculada anteriormente (Figura 27 e Quadro 4).

Figura 27 – Exemplo ilustrativo do bloco de cerâmica vermelha B1 e a aplicação do cálculo de condutividade térmica.



Fonte: O autor, 2024.

Quadro 4 – Características e definições para o cálculo da condutividade térmica.

Definição Unidade	Fórmula	Descrição
Resistência térmica (m ² . °C) /W	$Rt = \frac{esp.}{\lambda}$	Quociente da espessura total do bloco pela condutividade térmica.
Resistência térmica superficial interior (interna) (Rsi) (m ² . °C)/W	Coeficientes Rsi 0,1 a 0,2 NBR 15.220 (2023) Rsi 0,13 NBR 15.220 (2023)	Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície interna de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção.
Resistência térmica superficial externa (Rse) (m ² . °C) /W	Coeficientes Rse=0,04	Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície externa de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção.
Resistência térmica da camada de ar (Rar) (m ² . °C) /W	Coeficientes Rar: 0,16	Resistência térmica da camada de ar (furos, vazados dos blocos)
Resistência térmica com a camada de ar (m ² . °C) /W	$Rt = \frac{esp.}{\lambda} + Rar$	Somatório da Resistência térmica do material e da camada de ar
Resistência térmica à superfície (Rt) (m ² . °C) /W	$RT = \frac{Aa+Ab+\dots+An}{\frac{Aa+Ab+\dots+An}{Ra+Rb+\dots+Rn}}$	A resistência térmica à superfície é a relação da soma da área das superfície sólida e das camadas de ar com as resistências térmicas, perpendiculares ao fluxo de calor.
Resistência Térmica Total (m ² . °C) /W	RT=Rsi + Rt + Rse	Somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais internas e externas. Quanto maior a resistência térmica, menor o calor que irá atravessar pela alvenaria.
Transmitância térmica W/m ² . °C	$U = \frac{1}{RT}$	Representa o inverso da resistência térmica total, sendo o fluxo calor que passa por unidade de área e por diferença de temperatura.
Calor específico KJ/(kg. °C)	Coeficientes Bloco cerâmico c=0,92 Bloco de concreto celular c=1,00	Quociente da capacidade térmica pela massa.
Capacidade térmica KJ/(m ² . °C)	Ct=Σesp x ci x λ	Somatório das espessuras multiplicada pelo calor específico e pela densidade aparente. Quociente da capacidade térmica total de um componente pela sua área.
Capacidade térmica total KJ/(m ² . °C)	$CT = \frac{Aa+Ab+\dots+An}{\frac{Aa+Ab+\dots+An}{CTa+CTb+\dots+CTn}}$	Capacidade térmica total de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor. Mede a capacidade de um material de armazenar energia térmica, ou seja a capacidade de um material acumular calor (MACH; QUEIROZ, 2014)

Fonte: Adaptado NBR 15220 (2023).

4.2.2.3 Ensaio de resistência ao fogo

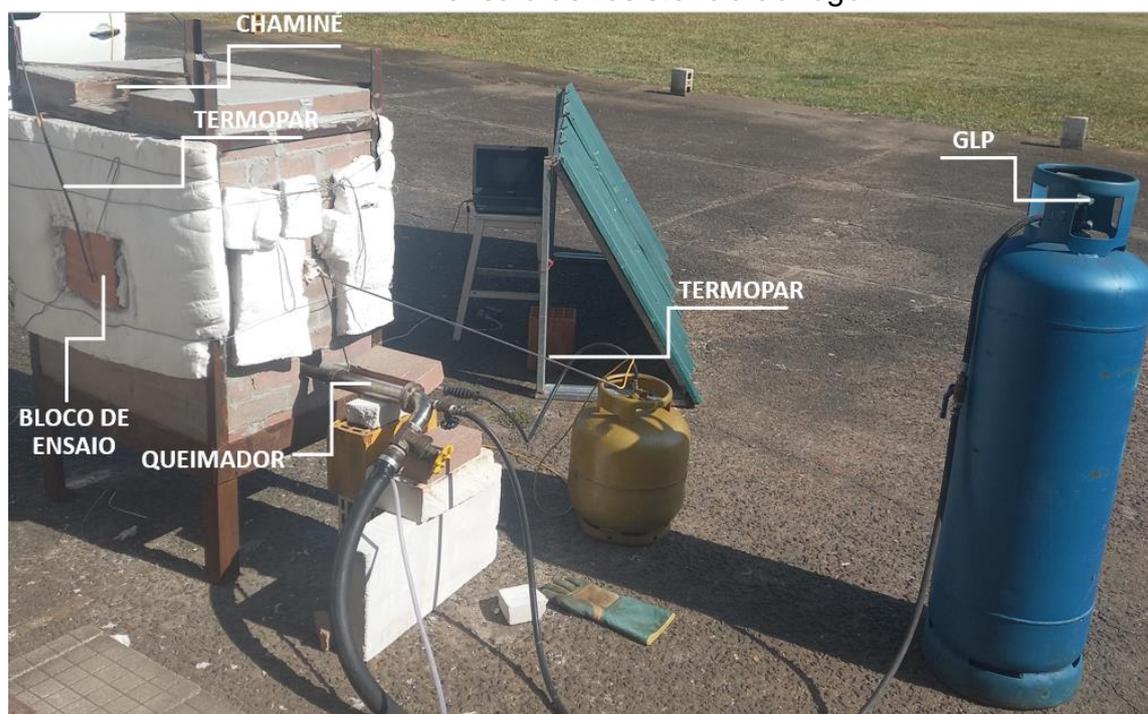
De acordo com a metodologia deste trabalho, foram analisados apenas blocos de cerâmica vermelha, não sendo possível avaliar o sistema construtivo de parede, incluindo argamassa de assentamento e revestimentos, e nem o critério de capacidade portante.

Sendo assim, o bloco ensaiado pode ter um desempenho diferente daquele definido em norma, sendo esta utilizada apenas como referência para avaliação dos resultados.

O ensaio de resistência ao fogo foi realizado no IPARQUE, no laboratório de fornos do IDT.

A avaliação da resistência ao fogo foi realizada em um forno (Figura 28) com dimensões de 1,00 x 0,80 x 1,00 m construído em tijolo refratário e especialmente projetado para acomodar dois blocos de cerâmica vermelha (um de cada lado). O aparato foi projetado de forma que se obtivesse o campo indireto de aplicação e exposição ao fogo de forma lateral. Este aparato foi construído à exemplo de outros trabalhos (NETO, 2020; ROSEMAN, 2011).

Figura 28 – Imagem do aparato experimental utilizado na realização do ensaio de resistência ao fogo.



Fonte: O autor (2024).

O forno de ensaio foi projetado para empregar combustíveis gasosos, conforme NBR 16965 (2021b). O propulsor combustível do forno usado foi o gás liquefeito de petróleo (GLP), sendo que os blocos foram expostos ao aquecimento apenas em um dos lados.

Foram distribuídos termopares tipo k, estilo varetas, em partes específicas do forno e do tijolo, como direto na fonte de aquecimento, face externa do bloco (lado não exposto ao aquecimento), face interna do bloco (lado exposto ao aquecimento) e no interior do bloco (furo). Destaca-se que termopares foram fixados na superfície não exposta, com o objetivo de obter as temperaturas médias e máximas da superfície de acordo com a NBR 10636-1 (2022).

Os critérios utilizados para avaliar a resistência ao fogo do bloco foram: comparação do comportamento das amostras entre si; verificação se os mesmos atendem ao desempenho estabelecido como referência pelas normas NBR 16945 (2021a) e NBR 16965 (2021b), conforme esquematizado na Figura 29.

Figura 29 – Critérios de resistência ao fogo.

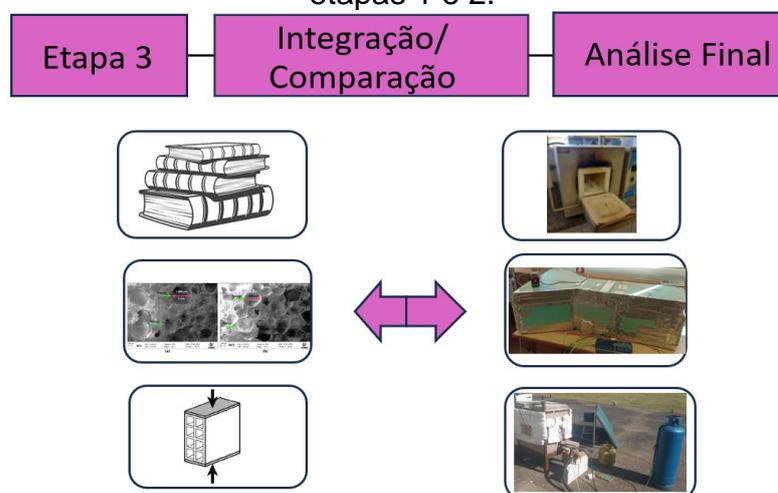


Fonte: O autor (2024).

4.2.3 Etapa 3: Associação, integração e comparação das caracterizações com os ensaios de desempenho térmico entre etapas de 1 e 2

Nesta etapa, detalhada na Figura 30, os resultados foram avaliados por meio da associação dos ensaios de desempenho térmico com as caracterizações realizadas nos diferentes produtos/blocos, correlacionando os resultados entre eles, normas e literatura.

Figura 30 – Fluxograma detalhando a integração entre os resultados obtidos nas etapas 1 e 2.



Fonte: O autor (2024).

A partir das caracterizações dos blocos foi possível identificar suas características distintas para comparar com os resultados de desempenho dos ensaios e cálculos de condutividade térmica e resistência ao fogo. Assim, verificou-se, de forma a alcançar o objetivo geral, se o bloco de cerâmica vermelha de 11,5 cm de espessura possui seu desempenho térmico comparado aos blocos de cerâmica vermelha de 14 cm e o bloco de concreto celular de 10 cm.

O critério para avaliação do ensaio de condutividade térmica foi utilizado como base nos resultados dos cálculos de resistência térmica, transmitância térmica e capacidade térmica estabelecida pela NBR 15.220 (2023), ISO-9869 (2014) e protótipo Prototherm utilizado por Gomes (2021).

O desempenho quanto a resistência ao fogo dos blocos foi obtido com base na comparação do comportamento das amostras entre si; verificação se os mesmos atendem ao desempenho estabelecido como referência pelas normas, NBR 16945 (2021a) e NBR 16965 (2021b) (2021a), como integridade, isolamento térmico e TRRF.

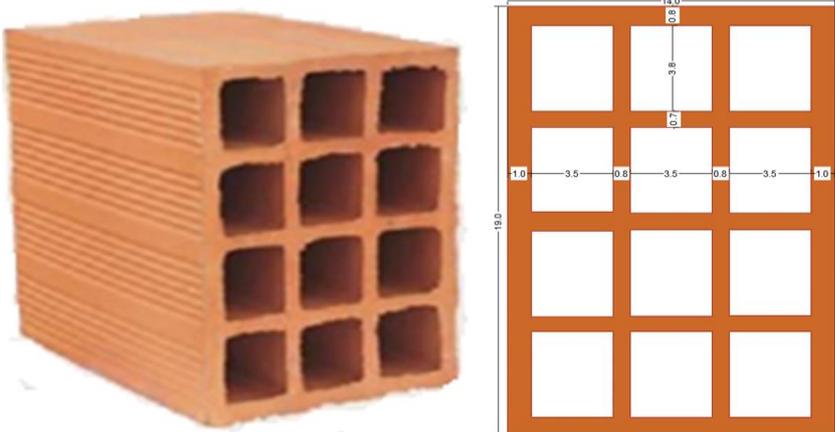
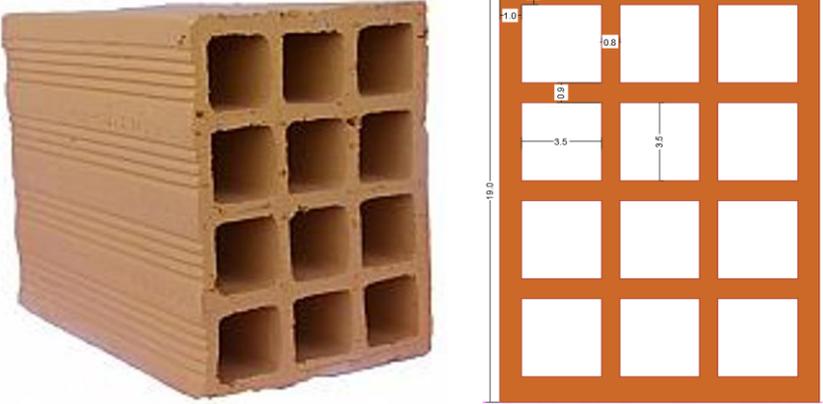
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

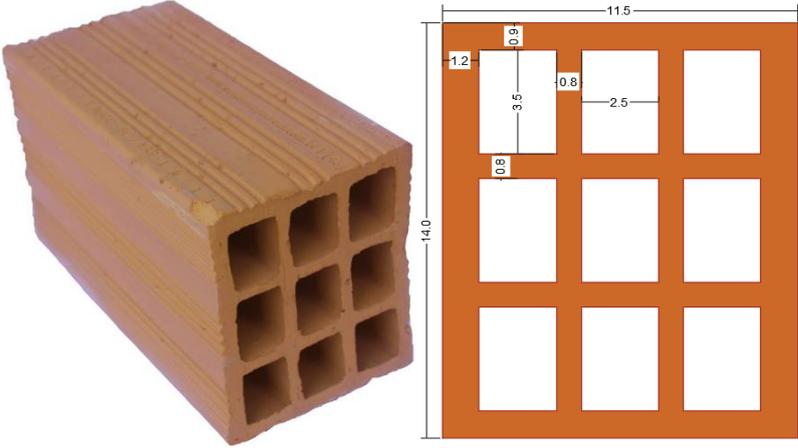
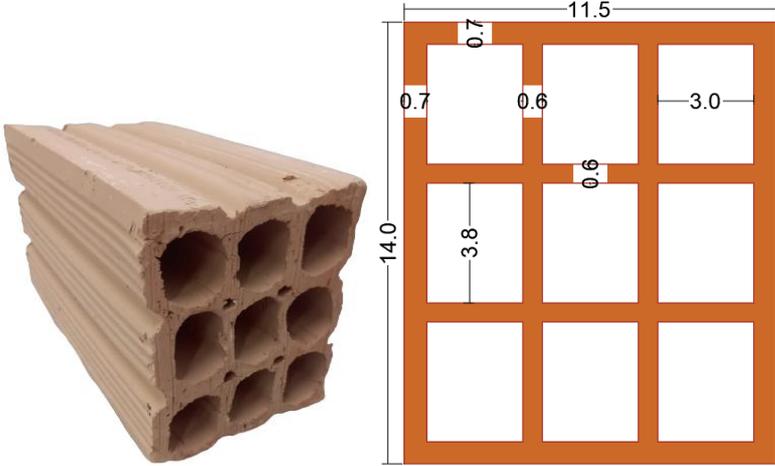
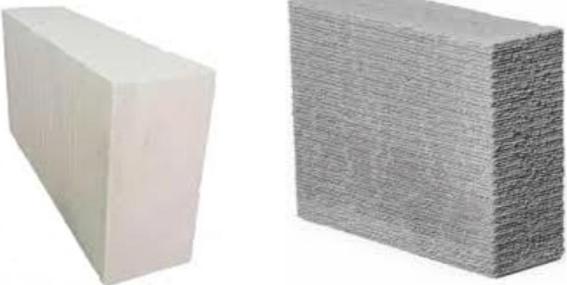
Os resultados são apresentados e discutidos nos itens subsequentes, seguindo a mesma sequência dos métodos descrito no capítulo anterior.

5.1 RESULTADOS E ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO DA ETAPA 1

A caracterização geométrica obtida por meio de medição dos diferentes blocos de cerâmica vermelha e blocos de concreto celular, são apresentados no Quadro 5 e Tabela 5.

Quadro 5 – Caracterização geométrica dos diferentes blocos de estudo (B1, B2, B3, B4, BCC e BCS).

	<p style="text-align: right;">B1</p> <p>Geometria: 14 x 19 x 29 cm 12 furos Espessura paredes externas: 8 e 10 mm Espessura paredes internas: 7 e 8 mm Soma das espessuras: 37 mm Vazados: 3,5 x 3,8 cm Volume total do bloco: 7714 cm³ Volume maciço 106,4x29:3085 cm³ Volume vazado: 4629 cm³ Área: 266 cm² Área maciça: 106,40 cm² Área vazada: 159,60 cm² % de vazios: 59% % massa: 41% Peso: 5,0 Kg</p>
	<p style="text-align: right;">B2</p> <p>Geometria: 14 x 19 x 24 cm 12 furos Espessura paredes externas: 10 e 12 mm Espessura paredes internas: 8 e 9 mm Soma das espessuras: 51 mm Vazados: 3,5 x 3,5 cm Volume total do bloco: 6384 cm³ Volume maciço 121x24:2904 cm³ Volume vazado: 3480 cm³ Área: 266 cm² Área maciça: 121 cm² Área vazada: 145 cm² % de vazios: 55% % massa: 45% Peso: 4,0 Kg</p>

	<p style="text-align: right;">B3</p> <p>Geometria: 11,5 x 14 x 24 cm 9 furos Espessura paredes externas: 9 e 12 mm Espessura paredes internas: 8 mm Soma das espessuras: 34 mm Vazados: 3,5 x 2,5 cm Volume total do bloco: 3864 m³ Volume maciço 84x24: 2016 cm³ Volume vazado: 1848 cm³ Área: 161 cm² Área maciça: 84 cm² Área vazada: 77 cm² % de vazios: 48 % % massa: 52% Peso: 2,75 Kg</p>
	<p style="text-align: right;">B4</p> <p>Geometria: 11,5 x 14 x 24 cm 9 furos Espessura paredes externas: 7 mm Espessura paredes internas: 6 mm Soma das espessuras: 26 mm Vazados: 3,8 x 3,0 cm Volume total do bloco: 3864 m³ Volume maciço 60x24: 1440 cm³ Volume vazado: 2424 cm³ Área: 161 cm² Área maciça: 60 cm² Área vazada: 103 cm² % de vazios: 64% % massa: 36% Peso: 2,26 Kg</p>
	<p style="text-align: right;">BCC e BCS</p> <p>Bloco de Concreto Celular Geometria: 10 x 30 x 60 cm Volume do bloco: 18000 m³ Área: 300 cm² Peso BCC: 8,64 kg Peso BCS: 10,44 kg</p>

Fonte: O autor (2023).

Os blocos de cerâmica vermelha apresentaram espessuras externas variando de 7 a 12 mm, estando de acordo com a norma NBR 15270 (2017a) que determina que nas caracterizações geométricas as paredes externas dos blocos cerâmicos devem ter espessura mínima de 7 mm, e a soma das paredes em um mesmo corte transversal, incluindo paredes externas e internas, deve ser no mínimo de 20 mm.

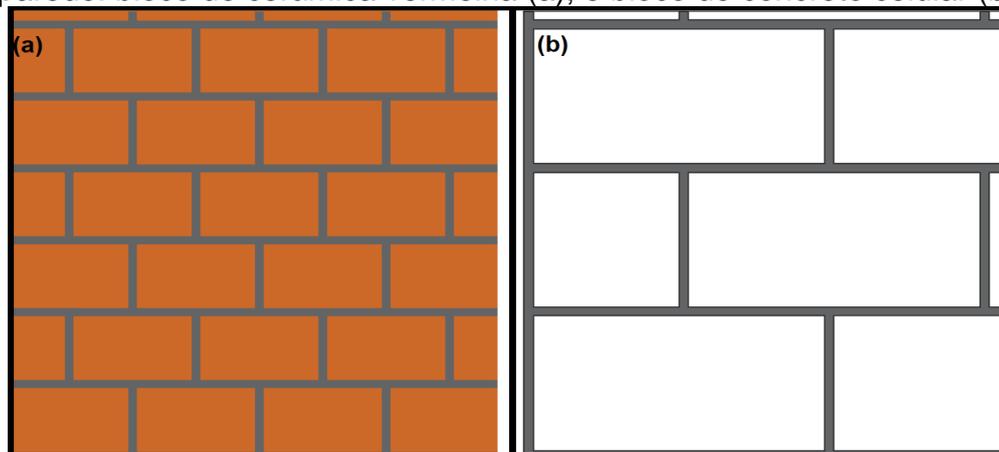
Os blocos de cerâmica vermelha B1 e B2 de 14 cm de espessura são equivalentes em sua proporção em número de furos, volume. E os blocos de cerâmica vermelha de 11,5 cm de espessura, B3 e B4, são equivalentes em sua proporção em número de furos, volume e peso, sendo que B3 possui um percentual menor de área de vazios comparado com o B4, que apresentou maior percentual de área de vazios que todos os blocos de cerâmica vermelha.

Considerando a construção de uma parede de um metro quadrado (1 m^2) composta de blocos de cerâmica vermelha de $11,5 \times 14 \times 24 \text{ cm}$, são necessários 24 blocos (Figura 31 (a)), e quando composta por blocos de concreto celular de tamanho $10 \times 30 \times 60 \text{ cm}$, são necessários apenas 5 blocos (Figura 31 (b)).

Sendo assim, compara-se os diferentes produtos com base nas suas respectivas massas, visto que os blocos de concreto celular, possuem 8,64 kg (BCC) e 10,44 kg (BCS), comparativamente aos blocos de cerâmica vermelha com (B1: 5,0 kg, B2: 4,0 kg, B3: 2,7 kg e B4: 2,2 kg). Considerando a soma da massa dos blocos em uma parede de um metro quadrado (1 m^2), o bloco de concreto celular (BCS $10,44 \text{ kg} \times 5 \text{ blocos} = 52,20 \text{ Kg}$) e o bloco de cerâmica vermelha (B3 $2,7 \text{ Kg} \times 24 \text{ blocos} = 64,80 \text{ Kg}$).

De acordo com as medições realizadas, torna-se possível identificar que o tipo de alvenaria interfere no custo do metro quadrado de parede construída. O custo médio para uma unidade de bloco de cerâmica vermelha é de R\$ 0,97 (SINAPI, 2023) e o valor de mercado da unidade de bloco de concreto celular é de R\$ 13,90. Assim, o custo total por metro quadrado da parede de blocos de cerâmica vermelha é de 23,28 R\$/ m^2 e para o bloco de concreto celular é de 69,50 R\$/ m^2 , correspondendo à um custo 3 (três) vezes maior do que o bloco de cerâmica vermelha.

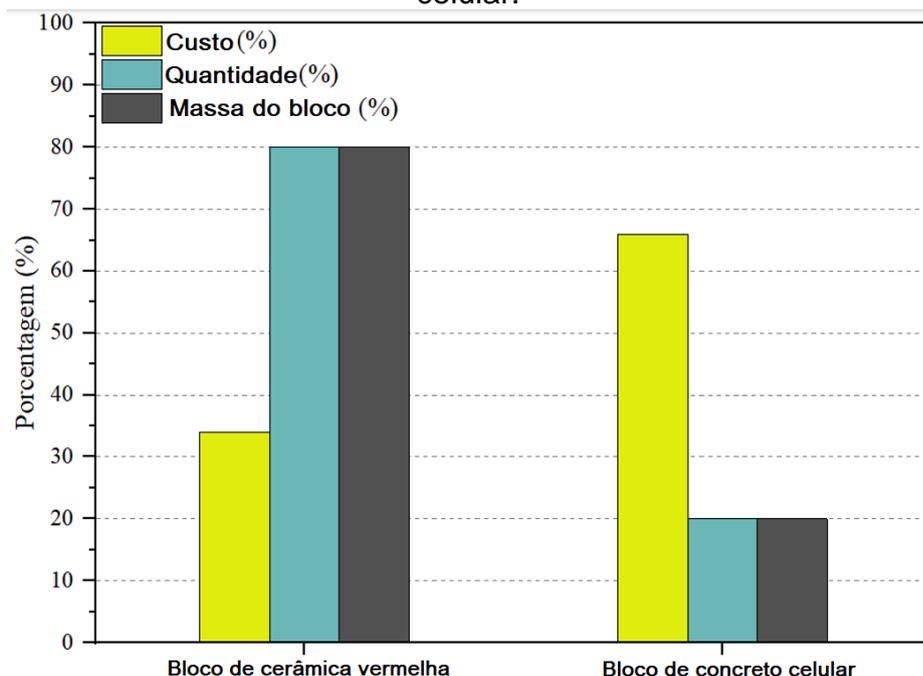
Figura 31 – Representação da paginação de blocos em 1 (um) metro quadrado de parede: bloco de cerâmica vermelha (a); e bloco de concreto celular (b).



Fonte: O autor (2023).

A partir das relações estabelecidas para um metro quadrado de parede construída com os diferentes blocos, observa-se com auxílio da Figura 32, que a quantidade unitária de blocos de cerâmica vermelha será de 4,8 vezes maior do que o bloco de concreto celular. O custo referente ao tipo do bloco de concreto celular utilizado representa 3 (três) vezes mais quando comparado ao bloco de cerâmica vermelha. E os blocos de concreto celular contribuem em 25% para a redução do peso na estrutura.

Figura 32 – Relações entre os blocos de cerâmica vermelha e os blocos de concreto celular.



Fonte: O autor (2023).

Associa-se à estas considerações o processamento dos blocos utilizados pelos diferentes fornecedores, como: tipo de forno, tempo e temperaturas de queima, apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Informações do processo de fabricação dos diferentes blocos de cerâmica vermelha e de concreto celular estudados.

Blocos	Tipo de forno	Temperatura máx. (°C)	Tempo de aquecimento (h)	Tempo de queima (h)	Tempo de resfriamento (h)	Tempo de processamento total (h)
B1	Forno túnel contínuo	até 910	10,0	7,0	7,0	24
B2	Forno túnel contínuo	até 890	17,5	4,9	5,6	28
B3	Forno túnel contínuo	até 890	17,5	4,9	5,6	28
B4	Forno tipo intermitente	até 900	22,5	6,3	7,2	36
BCC	O tempo de autoclavagem varia, mas geralmente dura entre 10 e 12 h. Durante esse período, os blocos são submetidos a uma temperatura média de 180 °C a 200 °C e uma pressão de cerca de 10 a 12 atm.					
BCS	O tempo do ciclo de autoclavagem total tem duração de 11 h com 7 h de temperatura e pressão constantes (200 °C; 12 atm).					

Fonte: O autor (2023).

O que difere em relação ao processo de fabricação dos diferentes blocos de cerâmica vermelha são os tipos de fornos utilizados para a queima. Algumas empresas utilizam os fornos contínuos enquanto outras os intermitentes (ZACCARON, 2013).

O forno contínuo é ideal para a produção em grande escala. O processo de queima se faz de forma contínua, sem interrupção para descarga ou carregamento das peças, controlados através de painel de comando e diagrama térmico que operam na mesma curva de queima (MÁS, 2006).

Os fornos intermitentes são considerados os primeiros fornos utilizados no Brasil. São fornos simples e fáceis de construir, ideal para pequenas empresas e produção em pequenas escalas. Consistem em câmaras circulares em forma de abóbada ou garrafão, e a qualidade da queima depende da maneira de conduzir o fogo,

programado e controlado de forma manual, através de planilha de queima e de forma visual com a retirada de amostras. A queima é conduzida uma a uma, por lotes (MÁS, 2006).

O desempenho proporcionado pelos diferentes métodos no processamento dos blocos, podem ser vistos inicialmente na Tabela 5. Os resultados das propriedades de absorção de água, densidade aparente, densidade real, porosidade total e resistência mecânica à compressão evidenciam algumas diferenças.

Tabela 5 – Resultados das propriedades físicas dos blocos.

Tipo de bloco	Absorção de água (%)	Densidade aparente (Kg/m³)	Densidade real (Kg/m³)	Porosidade aparente (%)	Porosidade total (%)	Resistência à compressão (MPa)
Blocos B1	16,47	1.759,00	2.599,20	18,60	32,32	1,90 ± 0,33
14 cm	± 0,16	± 0,05	± 0,04	± 0,85	± 4,19	
Blocos B2	20,40	1.727,16	2.660,70	22,20	35,09	2,70 ± 0,45
14 cm	± 0,25	± 0,03	± 0,12	± 0,71	± 1,94	
Blocos B3	18,89	1.702,33	2.740,90	21,15	37,89	3,40 ± 0,87
11,5 cm	± 1,23	± 0,10	± 0,04	± 2,14	± 5,71	
Blocos B4	20,46	1.622,38	2.711,10	21,52	40,16	1,00 ± 0,17
11,5 cm	± 0,63	± 0,12	± 0,02	± 2,69	± 6,55	
Bloco BCC	60,52	660,00	1.275,23	49,20	49,20	3,72 ± 0,65
	± 5,19	± 25,17		± 1,41	± 1,41	
Bloco BCS	80,73	429,40	1.282,63	55,39	55,39	1,69 ± 0,07
	± 3,52	± 29,56		± 0,88	± 0,88	

Fonte: O autor (2023).

Observando a Tabela 5, vemos o percentual de absorção de água entre 16 e 20% para os blocos de cerâmica vermelha, e 60 e 80% para os blocos de concreto celular. O percentual de absorção de água, de acordo com a NBR 15270 (2017a), para os blocos de cerâmica vermelha deve ficar entre 8 a 25%. De acordo com Keller (2021), blocos de concreto celular podem alcançar teores de absorção de água de até 70%.

Os valores de densidade aparente dos blocos de cerâmica vermelha ficaram entre 1.622,38 a 1.759,00 kg/m³, sendo que os valores podem variar de 1000 a 2000 kg/m³ conforme Al Nahhas et al. (2007) e DIAS (2009). Os blocos de concreto celular apresentaram valores de 429,40 e 660,00 kg/m³. A NBR 13438 (2021c) descreve um valor médio da densidade aparente de 450 a 650 kg/m³ para blocos de concreto celular, sendo assim, o bloco de concreto celular BCS com 429,40 kg/m³, ficou abaixo do estabelecido em norma.

O valor encontrado de densidade real dos sólidos para os blocos de cerâmica vermelha foi de 2.599,20 a 2.740,90kg/m³, corroborando com Benedet et al. (2023) com resultados de 2.600,00 kg/m³. Os valores encontrados para os blocos BCC e BCS foram de 1.275,23 e 1.282,63 kg/m³.

Os blocos de cerâmica vermelha apresentaram valores de porosidade total entre 32 a 40%. De acordo com Dondi et al. (2004), esses valores são inferiores aos blocos cerâmicos refratários que apresentam porosidade total superior a 45% (EMILIANI; CORBARA, 2001). Os valores de porosidade total para o bloco celular ficaram 49,20% para o BCC e 55,39% para o BCS, corroborando com os valores de Scheffler e Colombo (2005), que encontraram percentuais entre 50 a 80%. Esta porosidade confere ao material um conjunto de propriedades favoráveis, tal como excelente isolamento térmico (AGNIESZKA RÓŻYCKA, 2016).

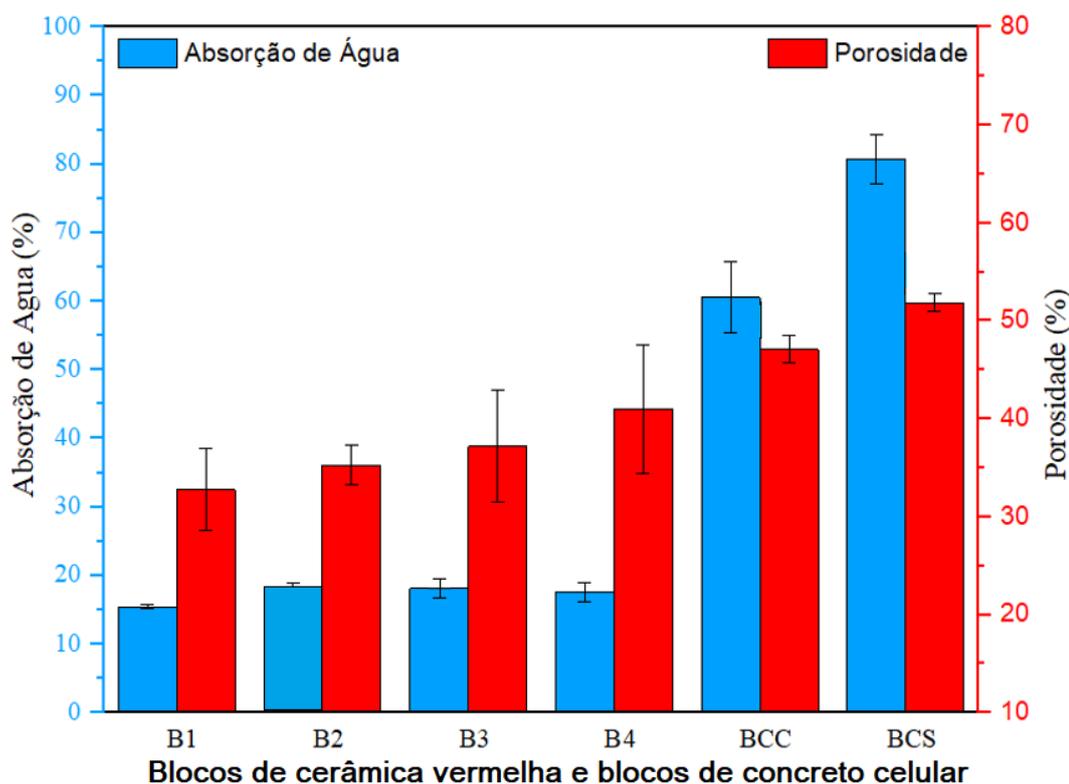
Os blocos de cerâmica vermelha ensaiados apresentaram o valor de resistência mecânica à compressão médio de: 1,90 MPa para B1, 2,70 MPa para B2, 3,40 MPa para B3 e 1,00 MPa para B4. Sendo assim, os blocos B1, B2 e B3 obtiveram valores superiores ao exigido pela norma NBR 15270 (2017a). No entanto o bloco B4 não alcançou o valor mínimo normativo de 1,5 MPa. Esse resultado vai de encontro ao valor de porosidade apresentado por B4 em relação aos outros blocos.

Os resultados de resistência à compressão dos blocos de concreto celular foram de 3,72 MPa para BCC e 1,69 MPa para BCS, estando dentro do exigido pela NBR 13438 (2021c) que determina uma faixa de 1,0 a 4,5 MPa.

Observa-se na Tabela 5 que os valores apresentados para os blocos de cerâmica vermelha B2 e B3 tiveram resultados muitos próximos, devido a origem do mesmo fabricante. B1 e B4 porém, apresentaram valores distintos. B1 apresentou maior densidade aparente e menor absorção de água e conseqüentemente menor porosidade total, sendo o inverso de B4.

Na Figura 33, observa-se uma tendência entre absorção de água e porosidade total, dos blocos de cerâmica vermelha, onde, quanto maior o valor de absorção de água maior a porosidade total. A elevada absorção de água, e conseqüentemente, porosidade total dos blocos de concreto celular é ocasionada pela forte sucção capilar da água por estes produtos cerâmicos de baixa densidade aparente, conforme destacam Ghasem (2019) e Narayanan; Ramamurthy (2000).

Figura 33 – Absorção de água e porosidade total.

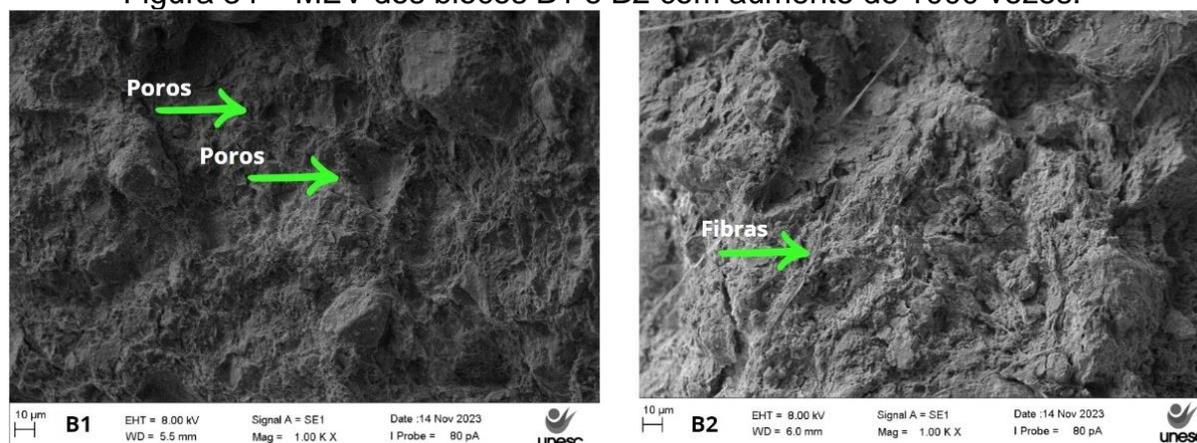


Fonte: O autor (2023).

As imagens capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) são mostradas nas Figuras 34 a 38. A Figura 34 mostra as imagens de amostras com uma ampliação de 1000 vezes dos blocos de cerâmica vermelha B1 e B2 (produtos de cerâmica vermelha com espessura de 14 cm). Ambos apresentaram superfícies irregulares com rugosidade e com tamanho de poros variáveis. Barsoum (2003) destaca, que em cerâmica, os grãos estão na faixa de 1 a 50 μm e são visíveis apenas ao microscópio, com forma e o tamanho dos grãos que variam juntamente com a presença de porosidade.

Na Figura 34, amostra B2, observa-se a presença de algumas fibras. A composição da massa cerâmica deste bloco leva como componente a cinza da casca de arroz, oriundo de uma empresa de processamento de arroz da região. A casca de arroz contém uma camada fibrosa constituída principalmente por celulose e resíduos orgânicos (FERNANDES; SABINO; ROSSETTO, 2014). A incorporação de cinza de casca de arroz em formulações cerâmicas pode substituir parcialmente a argila e melhorar o processo de extrusão, mas aumenta o teor de partículas grossas e afeta a plasticidade (BENEDET *et al.*, 2023).

Figura 34 – MEV dos blocos B1 e B2 com aumento de 1000 vezes.

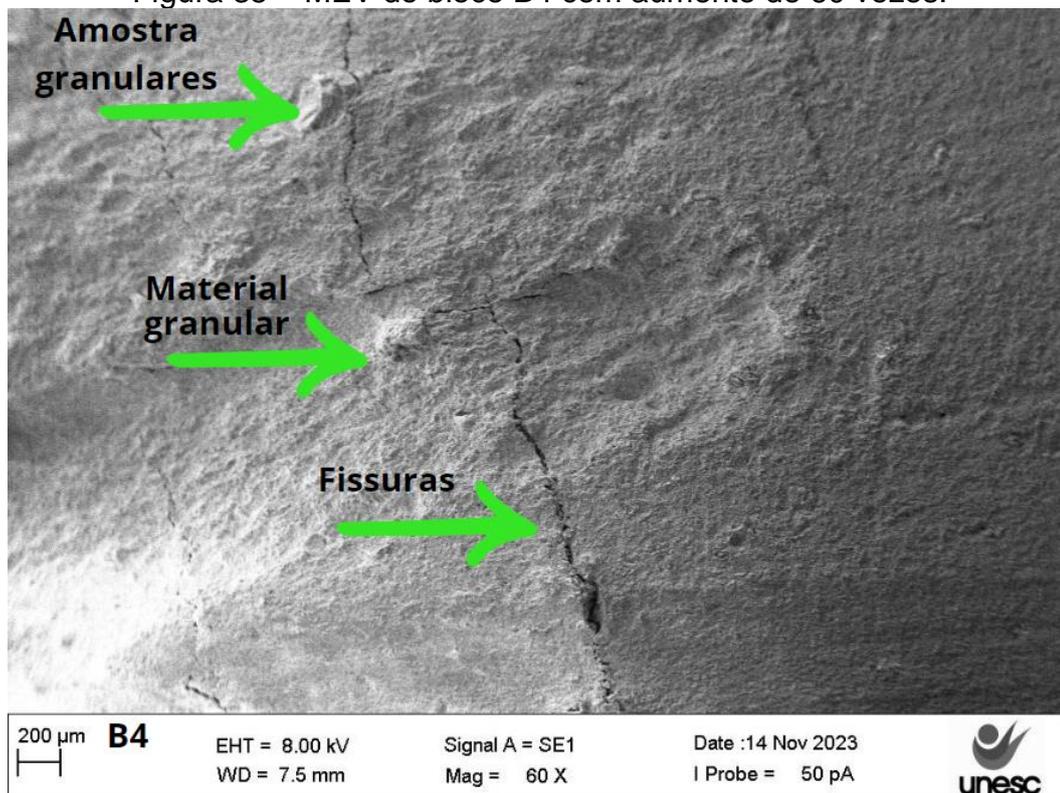


Fonte: O autor (2023).

Na Figura 35, observa-se a micrografia com aumento de 60 vezes, de uma amostra do bloco de cerâmica vermelha B4. A superfície da amostra analisada apresenta fissuras, as quais podem ter sido causadas pelo processo de conformação por extrusão, pela queima do material e/ou pela presença de materiais granulares na mistura. Emiliani e Corbara (2001), descrevem que estes materiais podem apresentar microfissuras pelas variações de dilatação e retração da estrutura ocasionadas pela alteração da temperatura e tensões provocadas pelo processo de queima. Neto (2020) descreve que a formação de microfissuras acontece durante o processo de extrusão do bloco, provocadas pela presença de materiais granulares na pasta de argila.

Barsoum (2003) descreve que as cerâmicas tradicionais são caracterizadas principalmente por microestruturas porosas à base de silicatos que possuem formas grosseiras e não uniformes, normalmente formados pelo tipo e mistura de argilas e consequentemente pelo processo de sinterização.

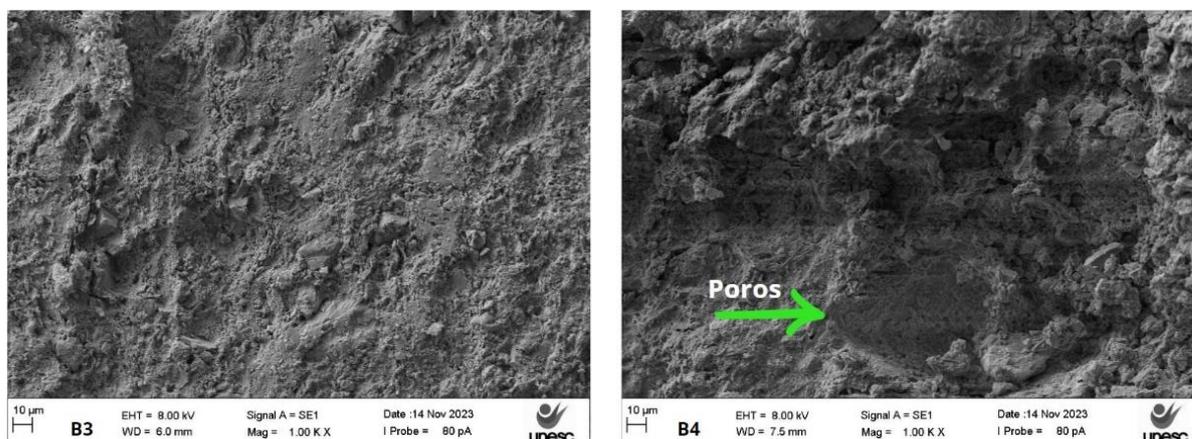
Figura 35 – MEV do bloco B4 com aumento de 60 vezes.



Fonte: O autor (2023).

Na Figura 36, observa-se micrografias com aumento em 1000 vezes de amostras dos blocos B3 e B4, produtos de cerâmica vermelha com espessura de 11,5 cm. O bloco B3 apresenta uma superfície menos porosa do que o bloco B4, característica que pode ser correlacionada com os resultados de porosidade para B3 e B4.

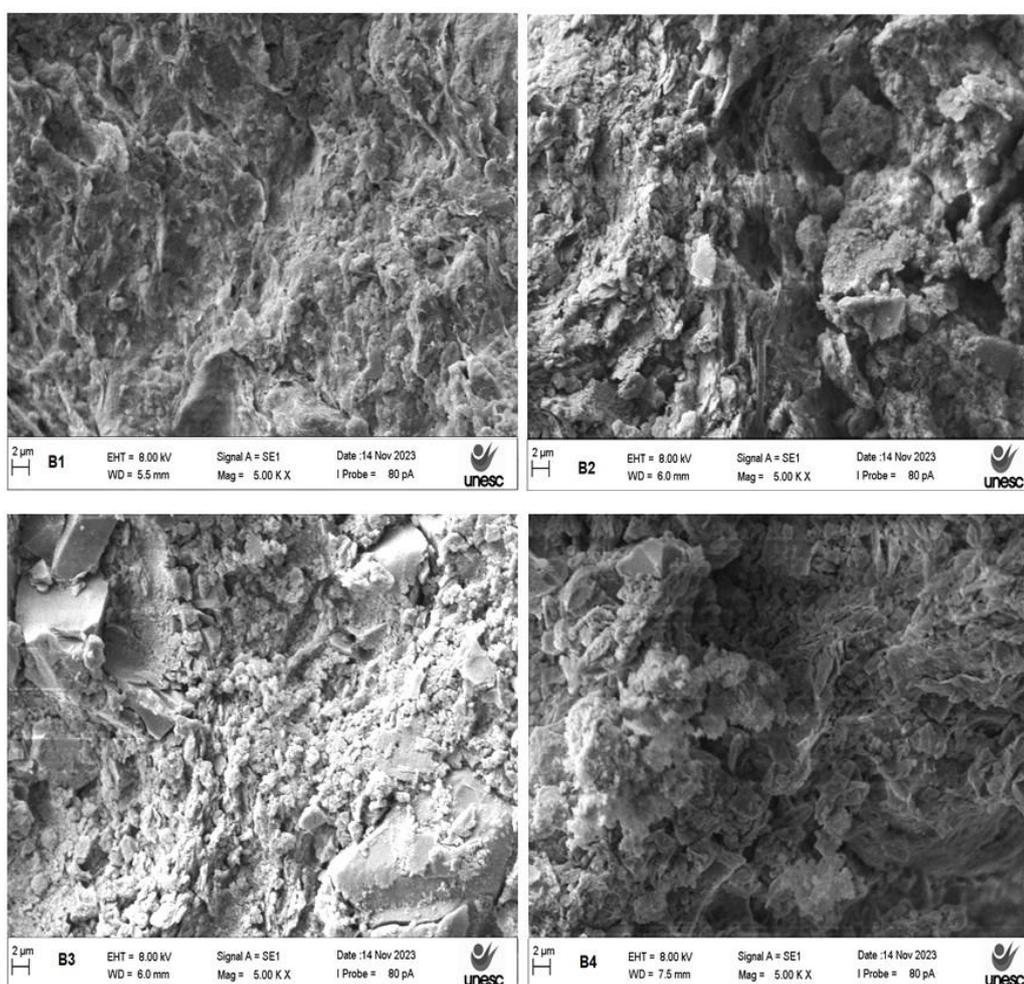
Figura 36 – MEV dos blocos B3 e B4 com aumento de 1000 vezes.



Fonte: O autor (2023).

Observa-se na Figura 37, com um aumento de 5000 vezes, que as imagens B2 e B3 apresentam certa semelhança. Este fato pode ser relacionado à massa cerâmica destes produtos, pois estes são fabricados por uma única empresa, o que não acontecem com os blocos B1 e B4. B1 apresenta uma estrutura mais densa e uniforme, o que vai ao encontro ao resultado da densidade aparente desse bloco que é maior em relação aos outros produtos.

Figura 37 – MEV dos blocos B1, B2, B3 e B4, todas com aumento em 5000 vezes.



Fonte: O autor (2023).

Na Figura 38, podemos observar a microscopia de amostras dos blocos de concreto celular BCC (a) e BCS (b) com um aumento de 60 vezes.

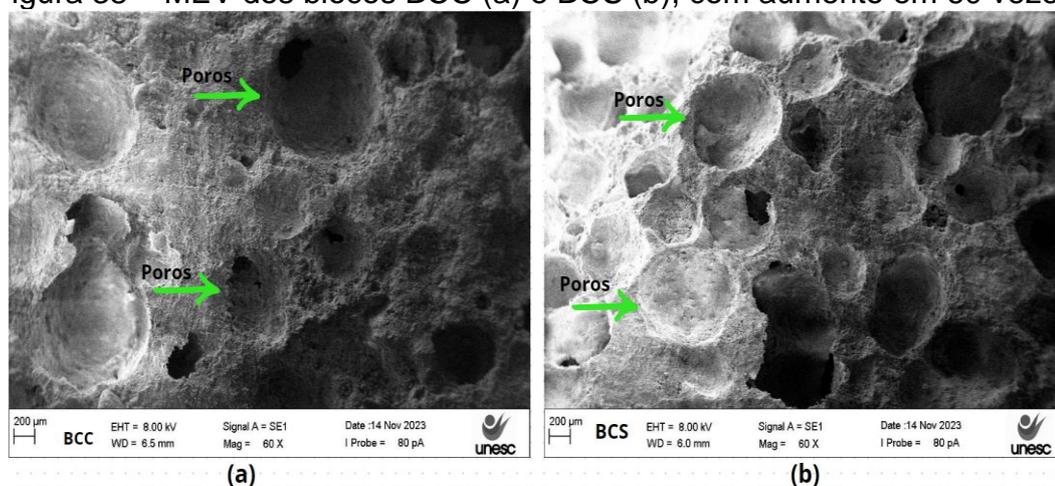
Os blocos de concreto celular possuem em sua matriz uma microestrutura com boa distribuição dos poros com formatos arredondados e bem definidos.

Os blocos de concreto celular são formados por poros, que podem variar em 60% de seu volume, considerados como macroporos (ILJA KADASHEVICH, HANS-JÜRGEN SCHNEIDER, 2005).

Os macroporos são formados devido à expansão da massa causada pela aeração e os microporos aparecem nas paredes entre os macroporos que possuem diâmetros entre 100 μm e 4 mm (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000). Os tamanhos dos poros são classificados em três faixas dimensionais diferentes: microporos (2 μm), mesoporos (2-50 μm) e macroporos (>50 μm). De acordo com esta definição, os blocos de concretos celular são constituídos de macroporos ou também chamados de macrocelulares e microcelulares (RIEDEL; CHEN, 2008).

Neste caso, infere-se que o bloco celular BCC absorve 60,52% de água, comparativamente menor que BCS, que absorve até 80,73%. Ressalta-se a diferença na massa específica observada para o bloco BCC, sendo 1,5 vezes maior do que BCS.

Figura 38 – MEV dos blocos BCC (a) e BCS (b), com aumento em 60 vezes.



Fonte: O autor (2023).

A Tabela 6 mostra a caracterização química (FRX) dos blocos de cerâmica vermelha e blocos de concreto celular estudados.

Tabela 6 – FRX de B1, B2, B3, B4, BCC e BCS, bem como de referências para os materiais de cerâmica vermelha e concreto celular.

Óxidos	BLOCOS DE CERÂMICA VERMELHA				BLOCOS DE CONCRETO CELULAR		
	B1	B2 e B3	B4	(ROSSO <i>et al.</i> , 2018)	BC	BCS	(BARRETO, 2012)
	Teor (%)						
SiO ₂	68,81	67,10	70,00	65,20	60,09	46,07	58,18
CaO	-	-	-	-	20,65	34,18	19,19
SO ₃	-	-	-	-	0,85	9,13	-
Al ₂ O ₃	18,34	21,94	20,61	17,06	2,38	2,52	traços
Fe ₂ O ₃	6,12	6,17	4,94	6,22	0,72	5,05	traços
K ₂ O	2,17	2,34	2,47	2,97	0,48	0,38	-
TiO ₂	1,11	1,28	0,86	0,87	0,12	0,19	-
MgO	-	-	-	1,17	-	0,56	-
Na ₂ O	-	-	-	1,13	-	-	-
Outros	0,22	1,25	0,05	0,31	0,06	0,05	-
Perda ao fogo (%)	3,21	0,78	1,03	5,82	14,61	1,24	-
Total (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	-

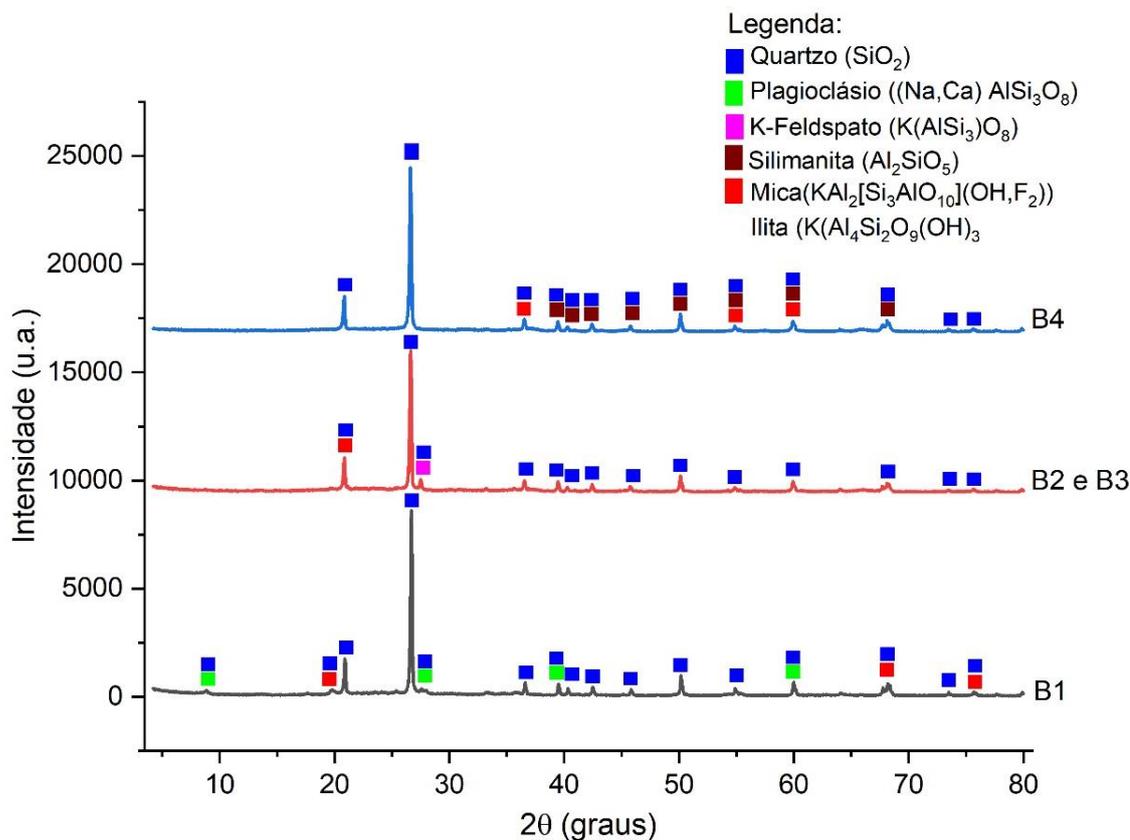
Fonte: O autor (2023).

Constata-se de forma geral, nos blocos de cerâmica vermelha a presença de sílica (SiO₂), seguida de óxido de alumínio (Al₂O₃), ferro (Fe₂O₃) e potássio (K₂O). Estes resultados são semelhantes aos encontrados por outros autores (AZEVEDO, 2004; BARSOUM, 2003; BERNARDIN, 2006; KLAUMANN; CARVALHO, 2017; ROSSO *et al.*, 2018; SAVIATTO *et al.*, 2023c; ZACCARON, 2018).

Observa-se para os blocos de concreto celular, a predominância de sílica (SiO₂), seguida pelo óxido de cálcio (CaO) e óxido de alumínio (Al₂O₃), valores que vão ao encontro de Barreto (2012).

Os resultados de Difração de raios-X dos blocos de cerâmica vermelha são apresentados na Figura 39. Foram identificadas a presença de quartzo (SiO₂), feldspatos plagioclásios ((Na,Ca) AlSi₃O₈), K - feldspato K(AlSi₃)O₈, silimanita (Al₂SiO₅) e argilominerais mica/ilita.

Figura 39 – DRX dos diferentes produtos/blocos de cerâmica vermelha estudados.



Fonte: O autor (2023).

B1 apresenta picos de quartzo (SiO_2), seguido da fase plagioclásios ($(\text{Na,Ca})\text{AlSi}_3\text{O}_8$), e mica/ilita. Os plagioclásios constituem uma série completa de solução sólida, desde a albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e a anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) (ZHANG *et al.*, 2024).

B2 e B3 apresentam picos da fase quartzo (SiO_2), com a presença de picos de feldspato da série do feldspato potássico ($\text{K}(\text{AlSi}_3)\text{O}_8$) também chamados de microclina, sanidina e kalsilita, (PEREIRA; GOMES; ROCHA, 2018), e a presença de mica/ilita, similar ao encontrado por Benedet *et al.* (2023) e Pinheiro e Holanda (2010).

Os feldspatos plagioclásios possuem sódio e cálcio na sua composição, e os K-feldspatos $\text{K}(\text{AlSi}_3)\text{O}_8$ possuem potássio (LUZ; LINS, 2005).

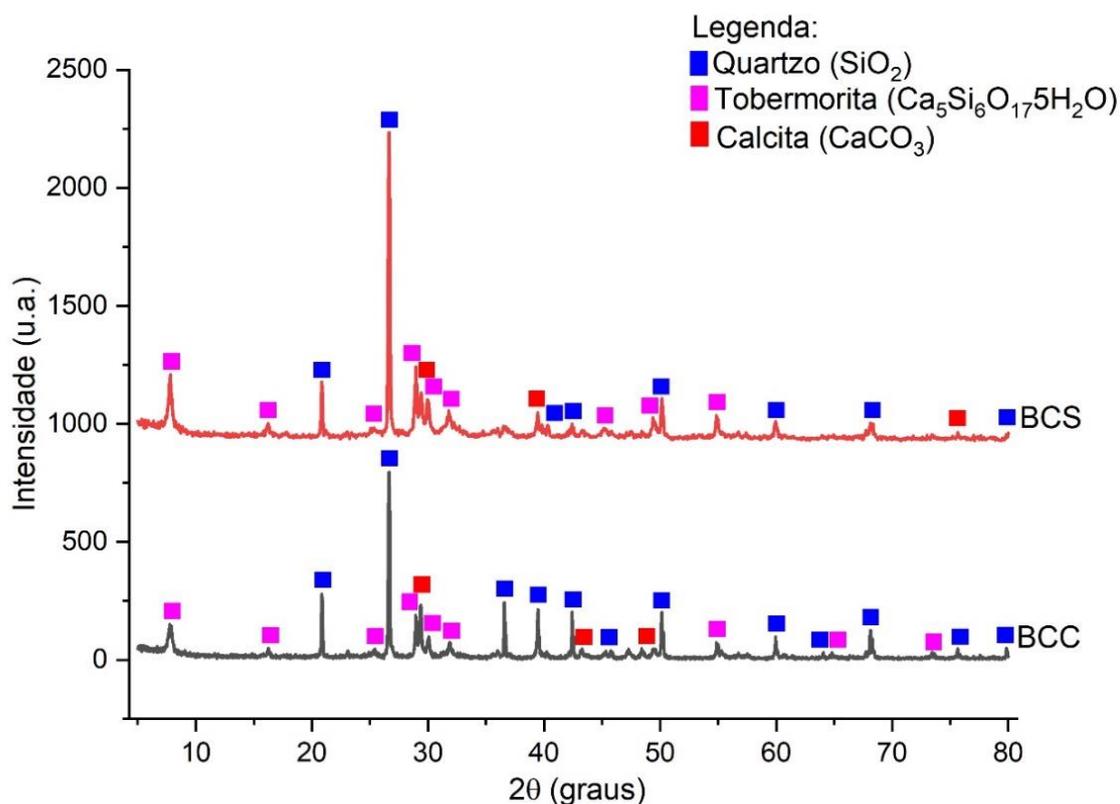
O bloco B4 apresentou como fases o quartzo (SiO_2), a silimanita (Al_2SiO_5) e mica/ilita, similar ao estudo de Benedet *et al.* (2023) e Pinheiro e Holanda (2010).

A Silimanita é considerada um silicato de alumínio, sendo uma matéria-prima importante para a indústria de refratários (MASSABNI, 2011).

A mineralogia dos blocos de cerâmica vermelha reflete as características das matérias-primas que compõem a massa cerâmica. A pasta cerâmica moldável por sua vez, desempenha um papel importante no processamento cerâmico (AZEVEDO, 2004; BENEDET *et al.*, 2023).

O DRX dos blocos de concreto celular, apresentados na Figura 40, mostram a presença de quartzo (SiO_2), tobermorita ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{17}5\text{H}_2\text{O}$) e calcita (CaCO_3) em ambas as amostras de BCC e BCS.

Figura 40 – DRX dos blocos de concreto celular BCC e BCS.



Fonte: O autor (2023).

Scheffler e Colombo (2005) descrevem que a formação da composição mineralógica de cristais de tobermorita ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{17}5\text{H}_2\text{O}$) se faz presente no processo de autoclave, pela hidratação do concreto com a evaporação da água a temperatura de 100-200 °C junto com a calcita (CaCO_3) na reação com alumínio, formando os poros. Essa observação também está presente nos resultados obtidos e com os estudos de Chen *et al.* (2017) e Galvánková *et al.* (2016).

5.2 RESULTADOS DE DESEMPENHO TÉRMICO DOS BLOCOS: ETAPA 2

O desempenho térmico dos diferentes blocos é discutido a partir dos resultados de reação ao fogo, condutividade térmica e resistência ao fogo.

5.2.1 Reação ao fogo

Os resultados do ensaio de reação ao fogo dos blocos (B1, B2, B3, B4, BCC e BCS) são apresentados no Quadro 7.

As amostras foram submetidas a temperatura de 750 °C para verificar a combustibilidade. A NBR 16626 (2017b) classifica como incombustíveis aqueles materiais que atendam aos critérios de não produzir fumaça e chama, fissuras e perda de massa.

Quadro 7 – Resultados do ensaio de reação ao fogo dos blocos (B1, B2, B3, B4, BCC e BCS).

Critérios:	Não	Sim
Produção de fumaça	X	-
Produção de chama	X	-
Manchas de fumaça e escurecimento e nem descolorações	X	-
Microfissuras e fissuras	X	-
Falhas como os lascamentos explosivos os spalling	X	-
Perda de massa superior a 50% do peso inicial	X	-
Diferença da temperatura do forno em valor igual ou superior a 30 °C Temperatura inicial do forno (Ti): 750 °C Temperatura máxima Temperatura final $\Delta T = T_{\text{máx}} - T_f$ (°C) Tmáx (°C): Tf (°C): $\Delta T = 752 - 740$ 752 °C 740 °C $\Delta T = 12$ °C	X	-

Fonte: O autor (2023).

De acordo com os resultados apresentados, verificou-se que nos blocos (B1, B2, B3, B4, BCC e BCS) ensaiados não houve variação de temperatura e massa, e nem produção de chama, fumaça e descoloração das amostras. Contudo, os resultados estão em conformidade com os critérios de incombustibilidade.

Conforme os resultados apresentados, os blocos foram considerados do tipo incombustível, possuindo boa resistência ao fogo, conforme instrução técnica IT 10 do Corpo de Bombeiros Militar de São Paulo CBPMESP (2019). Os blocos podem suportar temperaturas na região de 1000 °C sem danos, mas sob aquecimento muito severo e prolongado a superfície dos blocos pode ser comprometida. O bom desempenho é possível por conta de sua baixa condutividade térmica (INGHAM, 2009).

5.2.2 Ensaios de condutividade térmica

Na Tabela 7 são apresentados os resultados do ensaio de condutividade térmica das placas extraídas dos diferentes blocos, obtidos experimentalmente pelo aparato Prototherm.

Tabela 7 – Resultados de condutividade térmica das placas extraídas dos diferentes blocos obtidos experimentalmente pelo aparato Prototherm.

Blocos	Equações	B1	B2	B3	B4	BCC	BCS
(esp.) Espessura (m)		0,01142	0,0069	0,0067	0,0064	0,014	0,0166
Tempo (min.) (T1)		0-95	0-95	0-75	0-85	0-95	0-120
Temperatura lado da fonte de calor (°C) (T2)		49,45 ± 0,06	49,65 ± 0,18	50,59 ± 0,06	50,21 ± 0,12	50,46 ± 0,10	50,21 ± 0,02
Temperatura face fria lado da sensor (°C) (ΔT)		28,92 ± 0,05	29,41 ± 0,02	31,04 ± 0,18	31,34 ± 0,16	26,87 ± 0,30	26,28 ± 0,02
Varição de Temperatura (°C)	$\Delta T = T1 - T2$	20,53 ± 0,02	20,24 ± 0,17	19,55 ± 0,16	18,87 ± 0,04	23,59 ± 0,22	23,93 ± 0,01
(t) tensão gerada (μV) (P)		4.448,7 0 ± 9,09	4.515, 70 ± 41,00	4.365,06 ± 29,00	4.203,330 ± 7,00	3.551,10 ± 29,00	3.363,65 ± 8,00
Potência (μV/W/m²) constante do sensor (q)		61,30	61,30	61,30	61,30	61,30	61,30
Fluxo de calor (W/m²) (U)	$q = t/P$	72,57 ± 0,15	73,67 ± 0,68	71,21 ± 0,16	68,57 ± 0,12	57,93 ± 0,49	54,87 ± 0,14
Transmitância térmica (W/m².°C) (Λ)	$U = q/\Delta T$	3,53 ± 0,01	3,64 ± 0,01	3,64 ± 0,01	3,63 ± 0,01	2,46 ± 0,01	2,29 ± 0,01
Condutividade Térmica (W/m.°C)	$\Lambda = \text{esp}/((1/U) - 0,26)$	0,05012 ± 0,01	0,4695 ± 0,02	0,4651 ± 0,02	0,4236 ± 0,02	0,0951 ± 0,01	0,0944 ± 0,01
Resistência térmica (m².°C/W)	$Rt = \frac{\text{esp.}}{\lambda}$	0,0228 ± 0,01	0,0147 0 ± 0,01	0,0144 ± 0,01	0,0151 ± 0,01	0,1472 ± 0,01	0,1759 ± 0,01

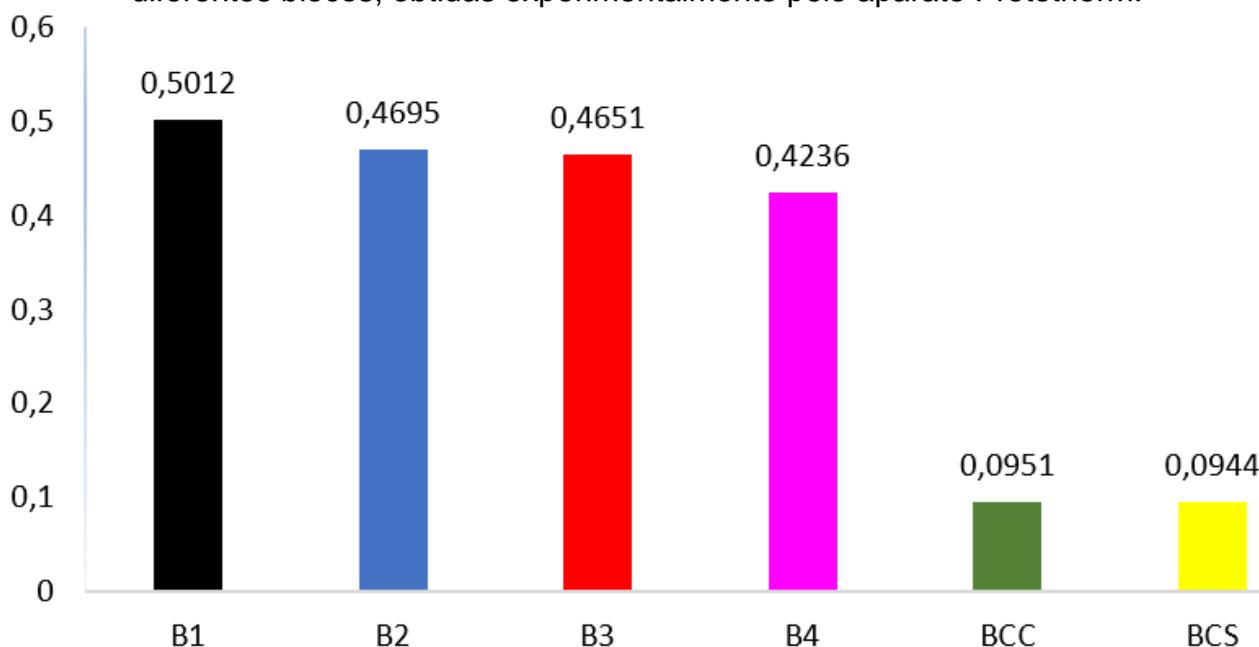
Fonte: O autor (2024).

A Figura 41 mostra os resultados de condutividade térmica $W/m.^{\circ}C$ das placas extraídas dos diferentes blocos, obtidas experimentalmente pelo aparato Prototherm.

Observa-se que o bloco de cerâmica vermelha B1 apresentou o maior valor de condutividade térmica com $0,5012 W/m.^{\circ}C$, B2 com $0,4695 (W/m.^{\circ}C)$, sendo muito similar ao B3 que possui $0,4651 W/m.^{\circ}C$. A semelhança de valores de condutividade térmica para B2 e B3 de fato era esperado por serem do mesmo fabricante. Entretanto, B4 apresentou o menor valor de todos blocos de cerâmica vermelha com $0,4236 (W/m.^{\circ}C)$.

Os blocos de concreto celular, apresentaram valores muito próximos variando de $0,0951 W/m.^{\circ}C$ para BCC e $0,0944 W/m.^{\circ}C$ para BCS.

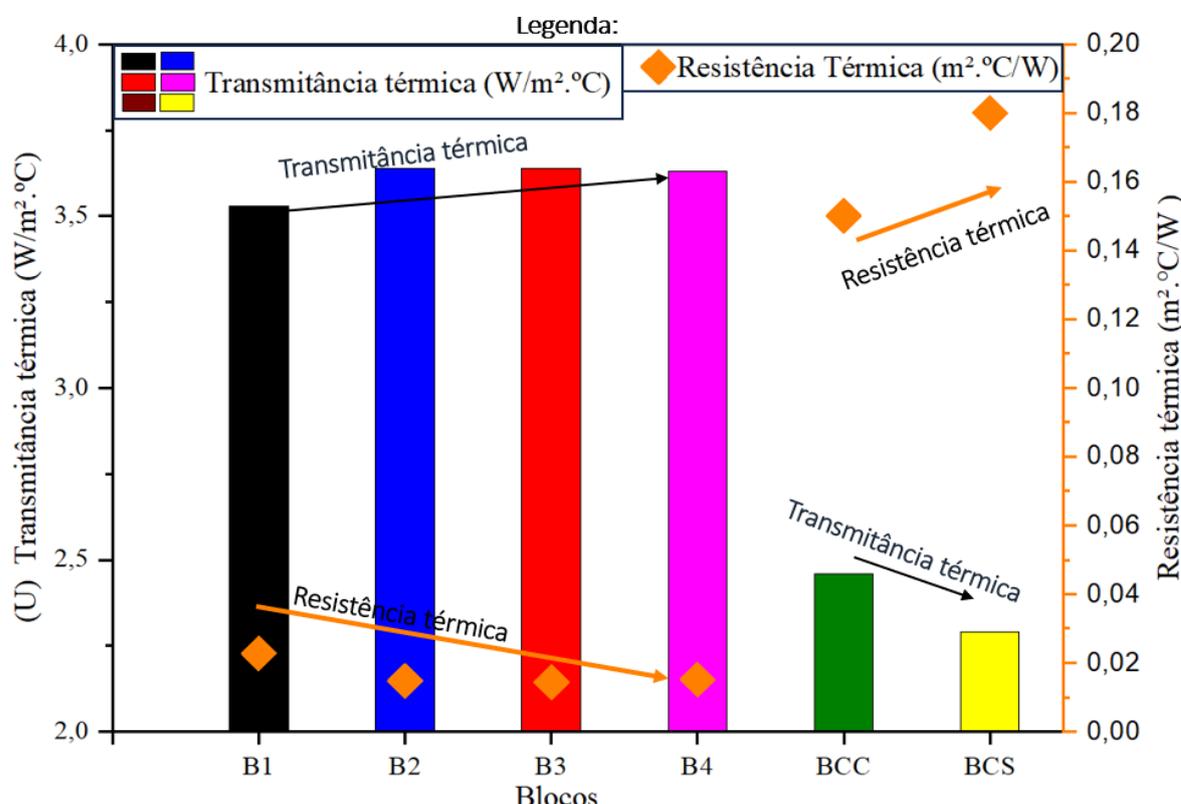
Figura 41 – Resultados de condutividade térmica ($W/m.^{\circ}C$), das placas extraídas dos diferentes blocos, obtidas experimentalmente pelo aparato Prototherm.



Fonte: O autor (2024).

A Figura 42 mostra resultados dos valores de transmitância térmica e resistência térmica das placas extraídas dos diferentes blocos, obtidas experimentalmente pelo aparato Prototherm. É possível observar, no gráfico, que a transmitância térmica e a resistência térmica são inversamente proporcionais. Como por exemplo os blocos de concreto celular, (BCC) possui transmitância térmica de 2,46 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) e resistência térmica 0,1472 ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$) enquanto (BCS) apresenta transmitância térmica 2,29 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) e resistência térmica 0,1759 ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$).

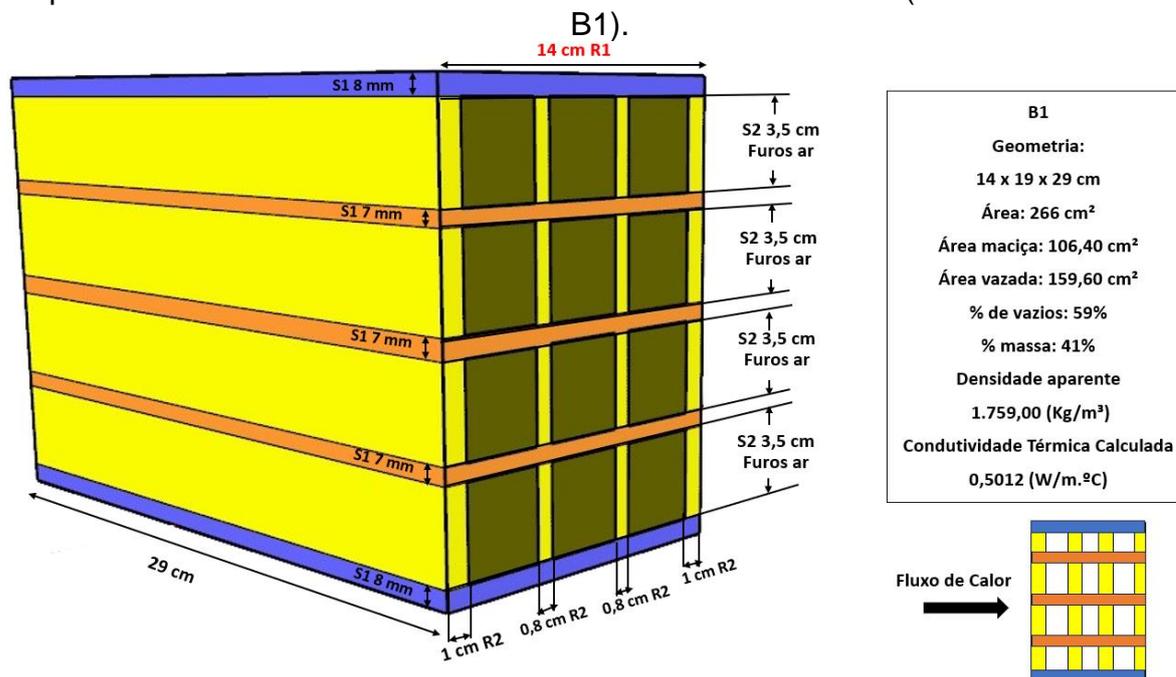
Figura 42 – Resultados de transmitância térmica (em barras) e resistência térmica (em losangos), das placas extraídas dos diferentes blocos, obtidas experimentalmente pelo aparato Prototherm.



Fonte: O autor (2024).

A partir da obtenção dos valores de condutividade térmica das diferentes placas, foram calculadas a resistência térmica, transmitância térmica e capacidade térmica dos blocos inteiros. Para os cálculos dos blocos de cerâmica vermelha, foram consideradas as camadas de massa cerâmica e os vazios (Figura 43), conforme NBR 15220 (2023), e para os blocos de concreto celular foi considerado o bloco inteiro.

Figura 43 – Exemplo de cálculo de resistência térmica, transmitância térmica e capacidade térmica dos blocos de cerâmica vermelha inteiros (com base no bloco B1).



Fonte: O autor (2024).

O cálculo de resistência térmica, transmitância térmica e capacidade térmica dependem da condutividade térmica, espessura da camada, da densidade e do calor específico, sendo obtidos pelas equações abaixo:

Blocos de cerâmica vermelha

a) Área das Seções

Seção 1 (espessura do maciço horizontal) * sem argamassa de assentamento e revestimento

$$\text{Área S1 8 mm: } (0,008) \times 0,29 = 0,0023 \times 2 = 0,0046 \text{ m}^2$$

$$\text{Área S1 7 mm: } (0,007) \times 0,29 = 0,0020 \times 3 = 0,0061 \text{ m}^2$$

$$\text{Soma S1} = 0,0107 \text{ m}^2$$

Seção 2 (furos)

$$\text{Área S2 3,5 cm: } (0,035) \times 0,29 = 0,0102 \times 4 = 0,0406 \text{ m}^2$$

b) Resistências Térmicas

λ = condutividade térmica

$$Rs1 = \frac{\text{espessura}}{\lambda} = \frac{0,14}{0,5012} = 0,2793 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C/W)}$$

Rs2 (maciço vertical + câmara de ar + maciço vertical + câmara de ar + maciço vertical + câmara de ar + maciço vertical)

$$Rs2 = \frac{\text{espessura}}{\lambda} + R_{ar} + \frac{\text{espessura}}{\lambda} + R_{ar} + \frac{\text{espessura}}{\lambda} + R_{ar} + \frac{\text{espessura}}{\lambda}$$

R_{ar}: Considerando coeficiente 0,16 referente a resistência térmica da camada de ar na direção do fluxo (horizontal) de calor dos vazados (furos) dos blocos cerâmicos, conforme NBR 15220 (2023).

$$Rs2 = \frac{0,01}{0,5012} + 0,16 + \frac{0,01}{0,5012} + 0,16 + \frac{0,01}{0,5012} + 0,16 + \frac{0,01}{0,5012}$$

$$Rs2 = 0,5518 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C /W)}$$

Resistência a superfície (R_t):

$$R_t = \frac{As1+As2+\dots+An}{Rs1+Rs2+\dots+Rn} = \frac{0,0107+0,0406}{0,0107+0,0406} = 0,4584 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C)/W}$$

Resistência Térmica Total (R_T):

Resistência térmica superficial interior (interna): R_{si} 0,13 (m². °C)/W

Resistência térmica superficial externa: R_{se}=0,04 (m². °C)/W

$$RT = R_{si} + R_t + R_{se}$$

$$RT = 0,13 + 0,4584 + 0,04$$

$$RT = 0,6284 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C)/W}$$

c) Transmitância Térmica (U)

$$U = \frac{1}{RT} = \frac{1}{0,6284} = 1,5915 \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{°C))}$$

d) Capacidade Térmica (C_T)

Calor específico c_i=0,92 (KJ/(kg. °C))

C_t=Σ espessura x c_i x densidade aparente

$$C_{t1} = 0,14 \times 0,92 \times 1.759,00 = 226,55 \text{ KJ/(m}^2 \cdot \text{°C)}$$

$$C_{t2} = 0,035 \times 0,92 \times 1.759,00 = 56,63 \text{ KJ/(m}^2 \cdot \text{°C)}$$

$$CT = \frac{As1+As2+\dots+An}{ct1+ct2+\dots+Rn} = \frac{0,0107+0,0406}{226,55+56,63} = 67,13 \text{ KJ/(m}^2 \cdot \text{°C)}$$

Bloco de Concreto Celular Considerando o bloco BCC

Área das Seções

Seção 1 (espessura do maciço horizontal) * sem argamassa de assentamento e revestimento

$$\text{Área S1 8 mm: } (0,30) \times 0,60 = 0,18 \text{ m}^2$$

Resistências Térmicas

λ = condutividade térmica

$$R_{s1} = \frac{\text{espessura}}{\lambda} = \frac{0,10}{0,0951} = 1,051 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C/W)}$$

Resistência a superfície (Rt):

$$R_t = \frac{\frac{As1+As2+\dots+An}{Rs1+Rs2+\dots+Rn}}{\frac{0,18}{1,051}} = \frac{0,18}{1,051} = 1,051 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C)/W}$$

Resistência Térmica Total (RT):

Resistência térmica superficial interior (interna): $R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C)/W}$

Resistência térmica superficial externa: $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C)/W}$

$$RT = R_{si} + R_t + R_{se}$$

$$RT = 0,13 + 1,051 + 0,04$$

$$RT = 1,2215 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C)/W}$$

Transmitância Térmica (U)

$$U = \frac{1}{RT} = \frac{1}{1,2215} = 0,8186 \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{°C))}$$

Capacidade Térmica (CT)

Calor específico $c_i = 1,0 \text{ (KJ/(kg} \cdot \text{°C))}$

$C_t = \Sigma \text{ espessura} \times c_i \times \text{densidade aparente}$

$$C_{t1} = 0,10 \times 1,0 \times 660,00 = 66,00 \text{ KJ/(m}^2 \cdot \text{°C)}$$

$$CT = \frac{\frac{As1+As2+\dots+An}{ct1+ct2+\dots+Rn}}{\frac{0,18}{66,00}} = \frac{0,18}{66,00} = 66,00 \text{ KJ/(m}^2 \cdot \text{°C)}$$

Os cálculos também foram realizados para os demais blocos inteiros e são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resumo dos resultados de resistência térmica, transmitância térmica e capacidade térmica para todos os blocos inteiros, conforme NBR 15220 (2023).

Tipo de bloco	Condutividade térmica (W/m.°C)	Resistência térmica (m². °C /W)	Transmitância térmica (W/m². °C)	Capacidade térmica (KJ/m². °C)
Cerâmicos	(<i>NGUYEN et al., 2009</i>) (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Ensaio	Calculado	Calculado
B1	0,35 a 1,5	0,5012	0,6284	1,5915
B2	0,35 a 1,5	0,4695	0,6220	1,6076
B3	0,35 a 1,5	0,4651	0,6003	1,6657
B4	0,35 a 1,5	0,4236	0,6270	1,5948
Celular	(SCHEFFLE R, M.; COLOMBO, 2005)	Ensaio	-	Calculado
BCC	0,10 a 0,14	0,0951	1,2215	0,8186
BCS	0,10 a 0,14	0,0944	1,2293	0,8134

Fonte: O autor (2024).

O bloco de cerâmica vermelha B1 apresentou maior valor de condutividade térmica (0,5012 W/m. °C), os blocos B2 e B3 apresentaram valores de condutividade muito próximos (B2 0,4695 W/m.°C e B3 0,4651 W/m.°C, características do mesmo fabricante. O bloco B4 apresentou menor condutividade (0,4236 W/m.°C), possuindo maior capacidade térmica (62,77 KJ/m² °C) tornando-se mais isolante que os outros blocos de cerâmica vermelha.

Os valores apresentados na Tabela 8, podem ser comparados com os resultados de Akutsu et al. (2020). Os autores analisaram o desempenho do bloco cerâmico de 14 x 19 x 29 cm de 9 furos, e obtiveram valores de resistência térmica de 0,5728 m²K/W, transmitância térmica 1,7458 W/m²K e capacidade térmica de 45,6400 KJ/m²K.

Scheffler e Colombo (2005), classificaram os blocos de concreto celular quanto a condutividade térmica em: alta (<0,10 W m⁻¹ K⁻¹), média (0,6-0,14 W m⁻¹ K⁻¹) e baixa (>0,12 W m⁻¹ K⁻¹).

5.2.3 Ensaio de resistência ao fogo

No ensaio de resistência ao fogo mostrado na Figura 44, os resultados foram obtidos utilizando a variação de temperatura em função do tempo de incêndio, representado por curvas de temperatura *versus* tempo, chamadas de curva padrão de incêndio, adotadas para ensaios experimentais (COSTA, C. N.; BRITTEZ, 2011).

Figura 44 – Imagem do ensaio experimental realizado para a determinação de resistência ao fogo (aplicado no bloco de cerâmica vermelha B1 e B2).



Fonte: O autor (2023).

Os parâmetros normativos, indicam que a temperatura de ensaio de 1000 °C deve ser alcançada em 1 (uma) hora, e assim, se manter por mais 1 (uma) hora NBR 16945 (2021a).

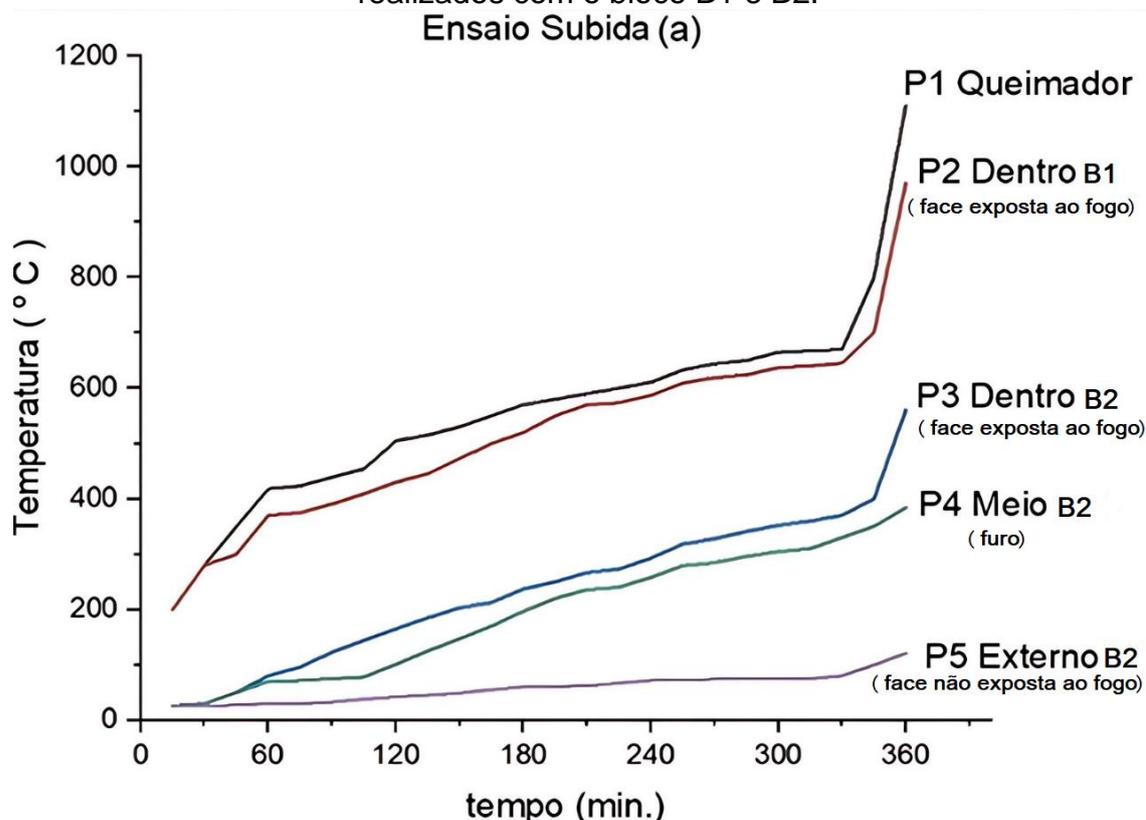
Durante o ensaio de resistência ao fogo, foram seguidos e observados os critérios de classificação de desempenho, estabelecidos dentro do conjunto dos limites especificados pela NBR 16965 (2021b) como: integridade, isolamento térmico e TRRF.

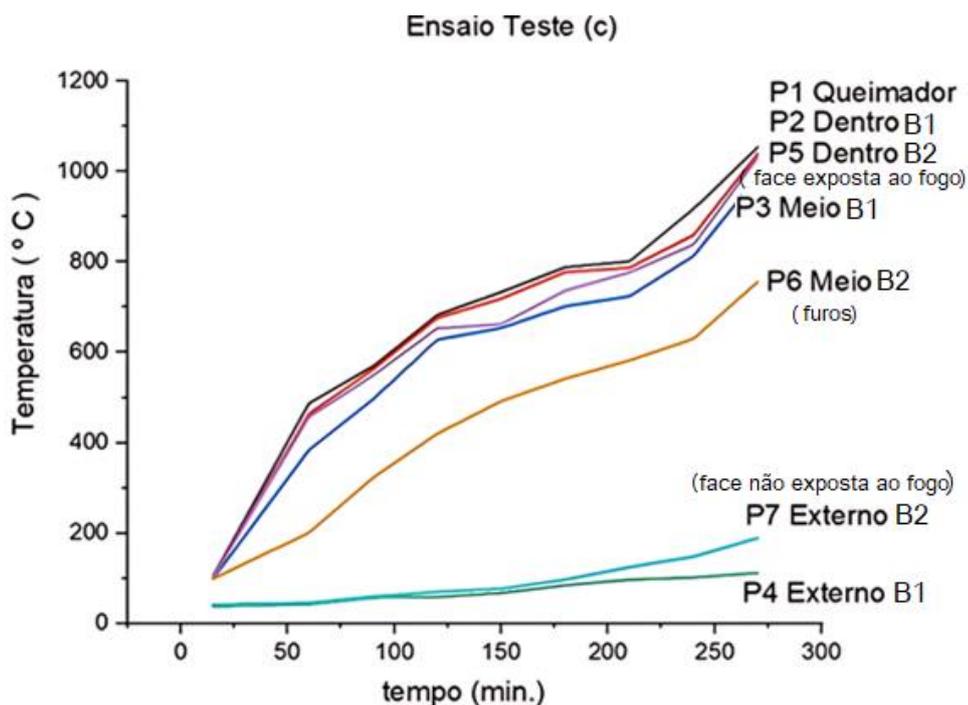
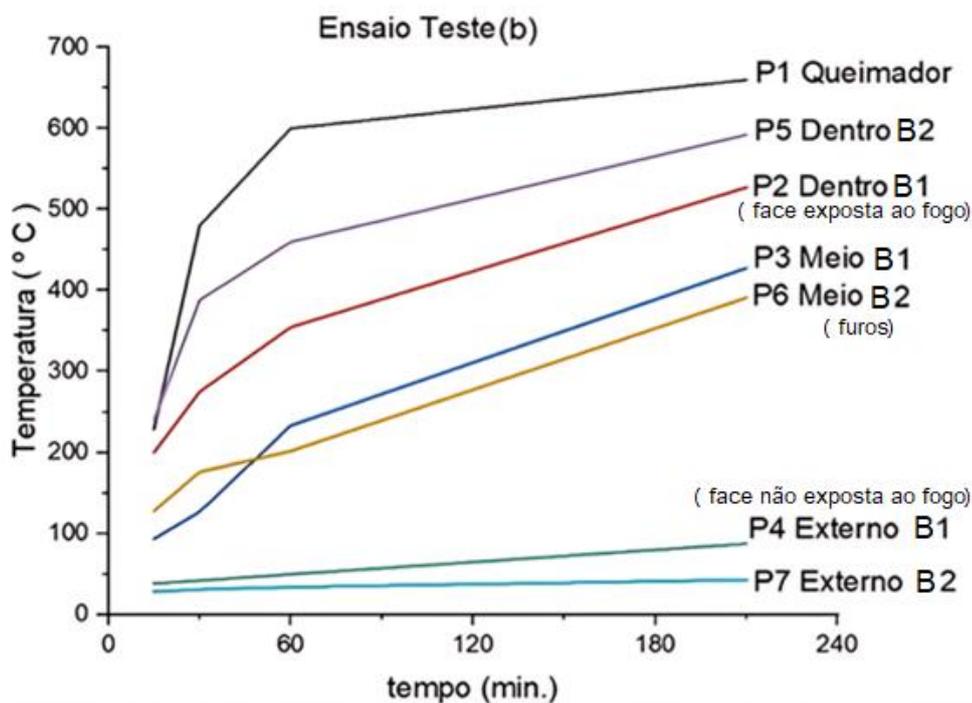
Primeiramente registrou-se o ciclo de cura do forno que estava sendo usado pela primeira vez, Figura 45 (a), com a temperatura e o tempo mais lento e gradativo. Para tal, foram acrescentados aproximadamente 200 °C a cada hora, sendo posteriormente acrescentado manualmente de maneira acentuada até 1000 °C, totalizando 6 h de ensaio/ciclo de preparação do forno.

A partir deste preparo experimental, foi realizado o primeiro ciclo térmico de teste, Figura 45 (b), com o alcance de 700 °C nas primeiras h, mas sem atingir o objetivo de 1000 °C. Este teste preliminar durou cerca de 4 h. Nestes dois ciclos térmicos iniciais utilizou-se o gás natural (GN) como combustível.

No terceiro ciclo realizado, Figura 45 (c), trocou-se o propulsor combustível do forno para gás liquefeito de petróleo (GLP) no qual se obteve melhor resultado chegando no tempo e na temperatura superior a 1000 °C, conforme determinados em norma.

Figura 45 – Diferentes ciclos térmicos experimentais de tempo e temperatura realizados com o bloco B1 e B2.





Fonte: O autor (2023).

Nas amostras dos blocos de cerâmica vermelha B1 e B2 usados no ensaio de subida e cura do forno, foi possível verificar que a face exposta ao fogo apresentou coloração escura de aspecto queimado e apareceram algumas fissuras, mas que não provocaram chamas e formação de fumaça. Na face do bloco de cerâmica vermelha não exposta ao fogo, nenhuma alteração visual pôde ser constatada.

O isolamento térmico foi determinante na classificação dos sistemas, fato destacado, devido a ação que os furos exercem, dispostos em sentidos diferentes da condução de calor. Conforme Rigão (2012) e Souza (2017), a resistência ao fogo de blocos cerâmicos é dada em função da massa e espessura do material e da porcentagem de área vazada nos blocos, dificultando a transferência de calor.

Nos blocos ensaiados, não foram observados indícios de degradação. Segundo Dutra (2007), o aparecimento de fissuras no bloco cerâmico também sofre influência da velocidade de aquecimento e temperatura. Embora houvesse o aparecimento de fissuras ao longo do ensaio, as análises de integridade e isolamento térmico não foram comprometidas e suportaram ao TRRF.

Segundo a NBR 16965 (2021b), no final do ensaio deve ser verificado as temperaturas na face não exposta, a qual não tiveram um aumento superior a 180 °C em relação à temperatura média inicial, o qual o corpo de prova continua a manter sua função de compartimentação de isolamento térmico, durante o ensaio, sem desenvolver temperaturas superiores em sua superfície.

Com a realização dos testes térmicos no aparato construído para uma única unidade de bloco, tornou-se inviável comparar com os ensaios dos sistemas construtivos de parede, verificação de estabilidade de deslocamento e deformação. O material ensaiado atendeu satisfatoriamente apenas ao conjunto critérios de classificação de desempenho de resistência ao fogo estabelecidos, como tempo superior a 4 h e temperatura superior a 1000 °C.

Sendo que o fator aumento de temperatura do sistema construtivo, pode alterar a estabilidade de alvenaria do bloco cerâmico, durante um incêndio. Como a sua degradação, e o encurvamento devido à dilatação térmica. Em paredes de baixa espessura, diminuindo a resistência mecânica, gerando fissuras excessivas podendo levar o bloco a ruptura, principalmente nos blocos cerâmicos vazados, podendo comprometer a parede (ROSEMANN, 2011).

Segundo NETO (2020), a elevação da temperatura em blocos cerâmicos pode ocasionar a mudança ou decomposição de fases. Rosso (2018) destaca que, no ensaio de resistência ao fogo de blocos cerâmicos, os materiais não apresentaram mudanças nas suas características físicas, pós-fogo.

Os ensaios ao fogo da unidade de bloco de cerâmica vermelha B1 e B2 realizados foram relevantes para a percepção do isolamento térmico, principalmente para a observação de indícios de degradação, fissuras e formação de fumaça.

5.3 INTEGRAÇÃO E COMPARAÇÃO DAS CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS COM O DESEMPENHO TÉRMICO: ETAPA 3

Os resultados deste trabalho são apresentados inicialmente na Tabela 9. De forma geral, e com o objetivo de avaliar os resultados das caracterizações, são feitas associações com os resultados apresentados nos ensaios de desempenho térmico.

Tabela 9 – Integração e comparação das caracterizações dos blocos inteiros com os seus respectivos desempenhos térmicos.

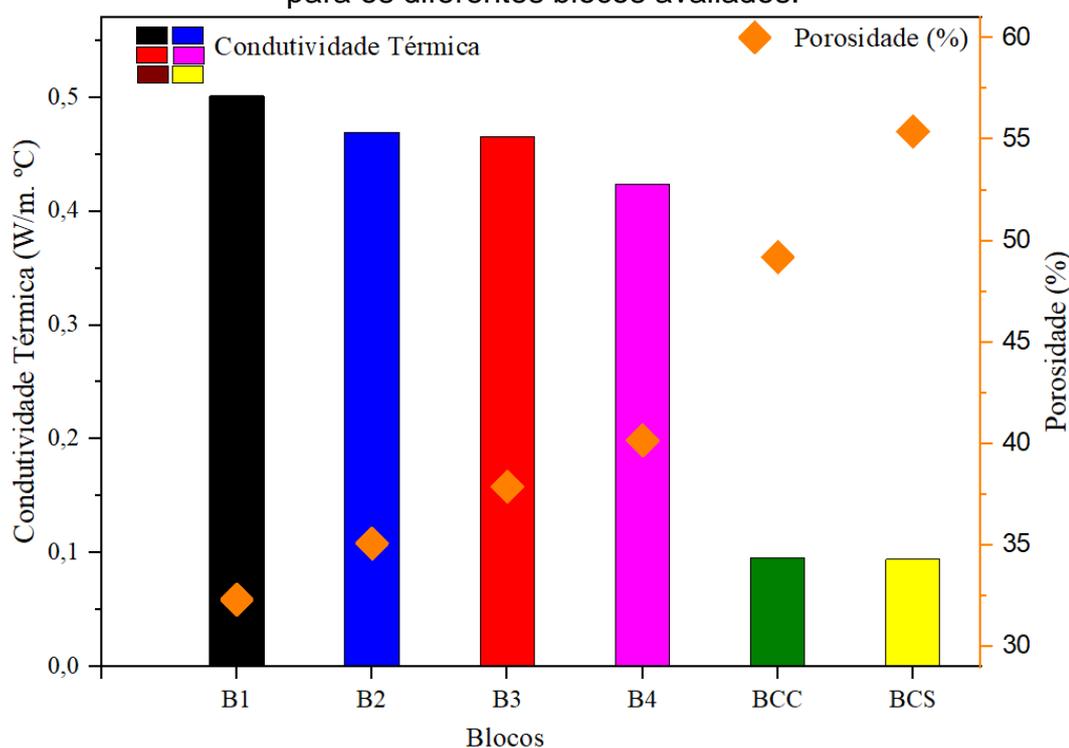
Blocos	Condutividade térmica (W/m.°C)	Transmitância térmica (W/m². °C)	Capacidade térmica (KJ/m². °C)	Densidade aparente (Kg/m³)	Porosidade total (%)	Resistência térmica (m². °C /W)	Resistência à compressão (MPa)
B1	0,5012 ± 0,01	1,5915	67,13	1.759,00 ± 0,05	32,32 ± 4,19	0,6284	1,90 ± 0,33
B2	0,4695 ± 0,02	1,6076	69,54	1.727,16 ± 0,03	35,09 ± 1,94	0,6220	2,70 ± 0,45
B3	0,4651 ± 0,02	1,6657	66,05	1.702,33 ± 0,10	37,89 ± 5,71	0,6003	3,40 ± 0,87
B4	0,4236 ± 0,02	1,5948	64,77	1.622,38 ± 0,12	40,16 ± 6,55	0,6270	1,00 ± 0,17
Referência	(NGUYEN <i>et al.</i> , 2009) 0,35 a 1,50	(AKUTSU <i>et al.</i> , 2020) 1,7458	(AKUTSU <i>et al.</i> , 2020) 45,64	(DIAS, 2009) 1.800,00 a 2.000,00	(DONDI <i>et al.</i> , 2004) 18,80 a 42,60	(AKUTSU <i>et al.</i> , 2020) 0,5728	NBR 15270 (2017a) 1,50
BCC	0,0951 ± 0,01	0,8186	66,00	660,00 ± 25,17	49,20 ± 1,41	1,2215	3,72 ± 0,65
BCS	0,0944 ± 0,01	0,8134	42,94	429,40 ± 29,56	55,39 ± 0,88	1,2293	1,69 ± 0,07
Referência	(SCHEFFLER, M.; COLOMBO, 2005) 0,10 a 0,14	(MARINOSKI, 2015) 0,70 a 1,22	(MARINOSKI, 2015) 53,00	NBR 13438 (2021c) 450,00 a 650,00	(SCHEFFLER, R, M.; COLOMBO, 2005) 50,00 a 80,00	(PRUTEANU ; VASILACHE, 2013) 1,14 a 1,46	NBR 13438 (2021c) 1,00 a 4,50

Fonte: O autor (2024).

É possível observar na Tabela 9 e na Figura 46 que, quanto menor a condutividade térmica, maior será o percentual de porosidade. Observa-se o exemplo do bloco de cerâmica vermelha B4, que apresentou o menor valor de condutividade térmica de 0,4236 W/m. °C e percentual de porosidade de 40,16%. O inverso foi observado no bloco cerâmico B1, que apresentou maior condutividade 0,5012 W/m. °C e menor porosidade com 32,32 %. B2 e B3 apresentaram valores muito próximos de condutividade e porosidade total, característica resultante de sua origem.

Os blocos de concreto celular também apresentaram menor condutividade e maior porosidade, fortalecendo a indicação teórica de que a porosidade influencia na condução de calor.

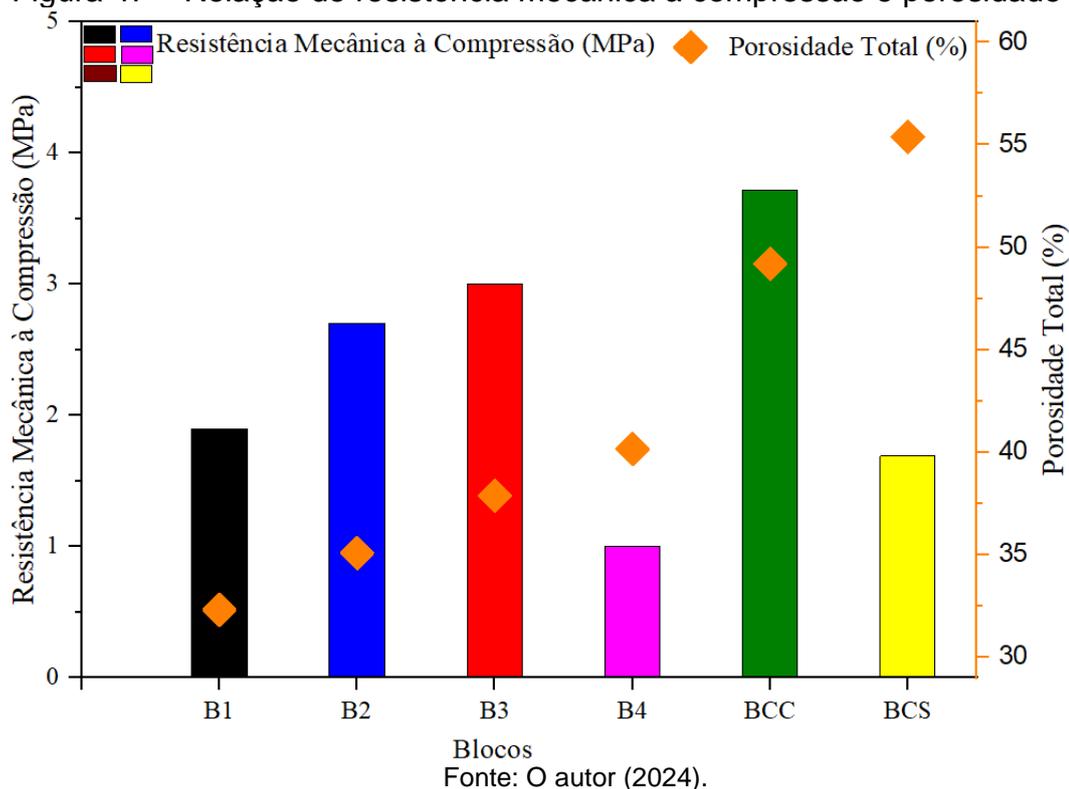
Figura 46 – Relação comparativa de condutividade térmica e de porosidade para os diferentes blocos avaliados.



Fonte: O autor (2024).

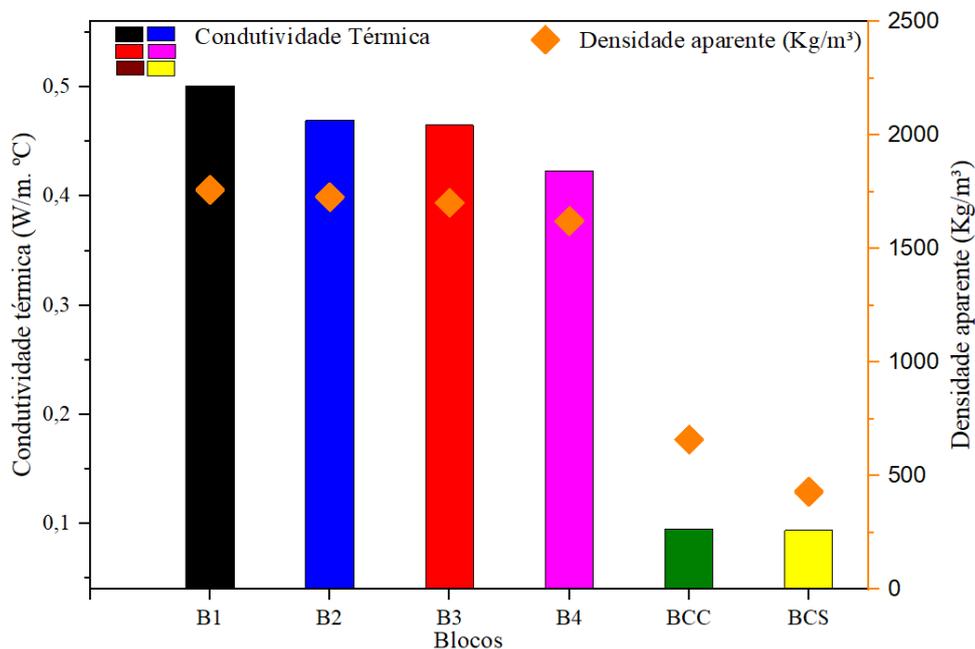
Na Figura 47 vemos que a porosidade total influencia na resistência mecânica à compressão dos blocos de concreto celular, sendo uma o inverso das outra. Para os blocos de cerâmica vermelha apenas o bloco B4 apresentou esta tendência. Provavelmente outros fatores influenciaram na resistência mecânica à compressão dos blocos de cerâmica vermelha.

Figura 47 – Relação de resistência mecânica à compressão e porosidade total.



Observando-se a Figura 48, é possível afirmar que os blocos B4, BCC e BCS são menos densos e possuem menor condutividade térmica, do que os blocos B1, B2 e B3.

Figura 48 – Relação entre condutividade térmica e densidade aparente.

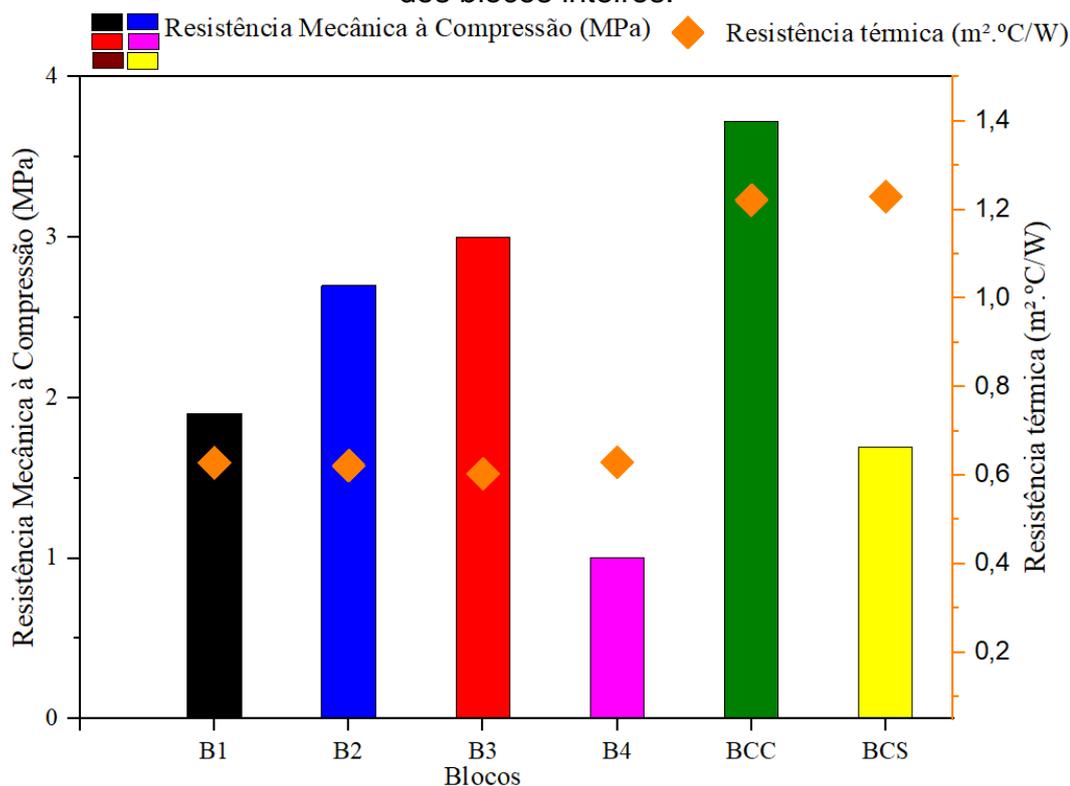


Fonte: O autor (2024).

Na Figura 49 observa-se que os blocos de cerâmica vermelha B1 e B4 apresentam maior resistência térmica e menor resistência mecânica à compressão, contrariamente aos dos blocos de cerâmica vermelha B2 e B3, os quais aparentemente se diferenciam apenas em aspectos geométricos.

Os blocos de concreto celular apresentaram valores de resistência térmica muito semelhantes como (BCC) 1,2215 ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$) e (BCS) 1,2293 ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$), sendo que (BCC) apresentou resistência mecânica à compressão de 3,72 (MPa) sendo 2,2 vezes mais que (BCS) apresentou resistência mecânica à compressão de 1,69 (MPa).

Figura 49 – Relação entre resistência térmica e resistência mecânica à compressão dos blocos inteiros.

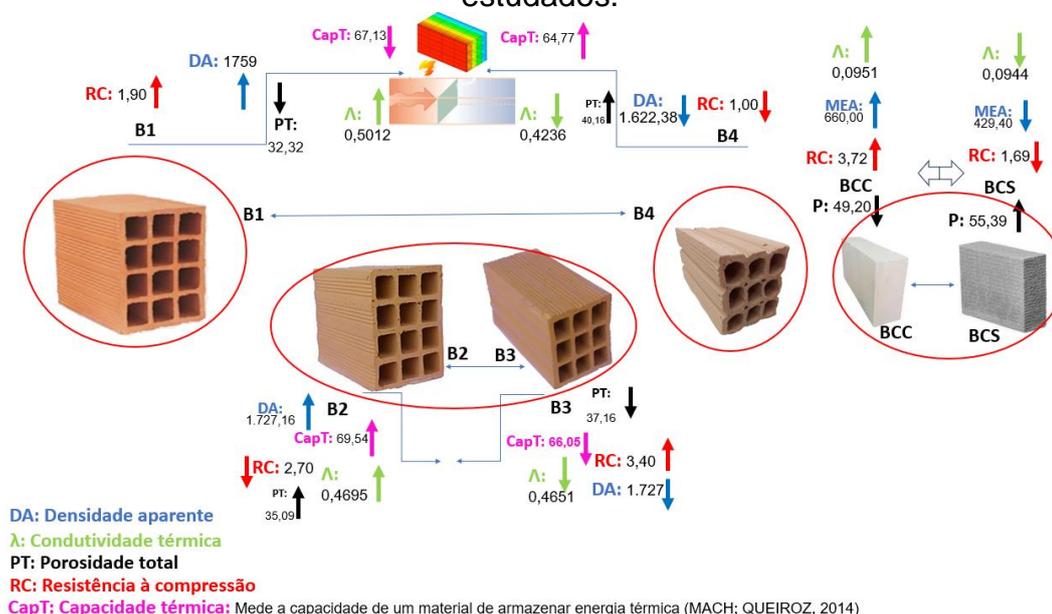


Fonte: O autor (2024).

Os resultados apresentados na Figura 50, revelam que as características dos blocos de cerâmica vermelha B1 e B4 de 14 cm e de 11,5 cm respectivamente, são importantes para entender como atua o sistema de isolamento térmico, comparando ainda com os resultados obtidos dos blocos de cerâmica vermelha B2 e B3.

O bloco de cerâmica vermelha B1 (de maior espessura) apresentou menor capacidade térmica do que o bloco B4 (de menor espessura), considerando o fato da condutividade térmica de B4 ser menor e o bloco B1 apresentar maior densidade aparente e menor porosidade total.

Figura 50 – Esquematização das correlações feitas entre os diversos resultados realizados para a caracterização dos diferentes blocos de vedação estudados.



Fonte: O autor (2024).

Os blocos de cerâmica vermelha B1 e B4 apresentaram valores característicos, e tiveram maiores variações, B1 apresentou maior densidade aparente e menor absorção de água e conseqüentemente menor porosidade total. Considerando que o bloco B4 apresentou menor resistência mecânica do que estabelecido pela norma e, conseqüentemente, caracterizando um bloco/produto mais frágil, o mesmo revelou um ser um melhor isolante térmico, por ter maior capacidade térmica e menor condutividade térmica, bem como maior porosidade e menor densidade aparente. Ressalta-se que estes resultados de desempenho térmico são bastante significativos para blocos/produtos de 11,5 cm.

B2 e B3 tiveram resultados semelhantes devido à sua origem, sendo do mesmo fabricante.

Os valores de porosidade total dos blocos de cerâmica vermelha ficaram entre 32 a 40%, e 49,20% e 55,39% para os blocos de concreto celular, e foram confirmados pelas análises de densidade aparente, densidade real e análise microestrutural, os quais os blocos de cerâmica vermelha apresentaram menor tamanhos de poros do que os blocos de concreto celular.

Quanto ao ensaio de reação ao fogo, em exposição ao aumento de temperatura, todas as amostras foram classificadas como incombustíveis. Os ensaios de desempenho térmico realizados em forno experimental, foram determinantes para avaliar critérios como isolamento térmico, fissuras e formação de fumaça.

Este trabalho revelou que, o estudo das propriedades de condutividade térmica, associada ao desenvolvimento de composições de massas de cerâmica vermelha poderia proporcionar o desenvolvimento de blocos de vedação com menores espessuras considerando a porosidade como ponto de partida. A exemplo de Rebelo e Smaniotto (2022), que utilizaram a caracterização química do rejeito fino do carvão para obter resultado relativamente similar ao da massa cerâmica para alguns elementos, especialmente de alumina, que possui características refratárias.

Neste contexto, a porosidade da cerâmica vermelha poderia ser uma das possibilidades existentes no APL, e para o município de Morro da Fumaça, como uma das alternativas que tendem a expandir o setor como forma de melhorar seus produtos em relação a resistência ao fogo e aos requisitos estabelecidos pelas normas do Corpo de Bombeiros.

Se conseguíssemos obter um bloco de cerâmica vermelha tão isolante quanto ao bloco de concreto celular, a empresas teriam ganhos financeiros. E o impacto em relação ao custo referente ao peso da estrutura precisaria ainda ser avaliado.

6 CONCLUSÃO

Com base nas caracterizações dos blocos, infere-se que as comparações entre os blocos de cerâmica vermelha B1 e B2 de 14 cm de espessura são equivalentes em sua proporção em número de furos, volume e peso. E os blocos de cerâmica vermelha de 11,5 cm de espessura, B3 e B4, são equivalentes em sua proporção em número de furos, volume e peso, sendo que B3 possui um percentual menor de área de vazios comparado com o B4.

Todos os blocos de cerâmica vermelha avaliados, apresentaram espessuras das paredes externas variando de 8 a 12 mm, com o somatório das paredes internas e externas superior a 20 mm, enquadrando-se dentro da norma NBR 1570 (2017a).

O percentual de absorção de água observado ficou entre 16 a 20% para os blocos de cerâmica vermelha e 60,52% (BCC) e 80,73% (BCS) para os blocos de concreto celular.

A caracterização química de todos os blocos mostrou a presença de sílica e alumina. A caracterização mineralógica (DRX) dos blocos de cerâmica vermelha mostrou as fases quartzo e silimanita, e dos blocos de concreto celular as fases quartzo e tobermorita.

Quanto aos ensaios de reação ao fogo, em exposição ao aumento de temperatura, todos os produtos/blocos classificaram-se como incombustíveis, sendo que não foram observados indícios de degradação, fissuras e formação de fumaça.

No ensaio de condutividade térmica, o bloco de cerâmica vermelha B1 apresentou o maior valor com 0,5012 W/m.°C, B2 com 0,4695 W/m.°C, sendo muito similar ao B3 que possui 0,4651 W/m.°C características da mesma massa e fabricante. B4 apresentou o menor valor de todos com 0,4236 W/m.°C sendo o mais isolante dentre os blocos de cerâmica vermelha estudados. Os blocos de concreto celular, apresentaram valores de 0,0951 W/m.°C (BCC) e 0,0944 W/m.°C (BCS). Portanto, o resultado do ensaio de condutividade térmica foi determinante para a associação com os resultados dos ensaios físicos tais como porosidade e resistência mecânica.

No ensaio de resistência ao fogo, os blocos atenderam aos critérios de integridade, isolamento térmico e tempo de resistência ao fogo.

Ressalta-se que os exemplos apresentados pelo CBMSC devem ser considerados apenas como valores de referência na ausência de laudos ou de ensaios específicos. Pois seria impossível o CBMSC esgotar o assunto e todos os

casos possíveis, uma vez que podem haver variações de dimensões destes elementos conforme as diferentes regiões do Estado de Santa Catarina. Entretanto, focando no desempenho exigido (horas) de resistência ao fogo, este sim deve ser observado, seja qual for o meio usado para tal.

Os objetos de estudo (bloco de cerâmica vermelha de 14 x 19 x 29 cm e bloco de 11,5 x 14 x 24 cm) não constam como referência do CBMSC, cabendo ao responsável técnico buscar ensaios ou testes práticos, ou mesmo na literatura elementos que comprovem o tempo de resistência ao fogo exigido.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1 - São necessários estudos que visem avaliar o comportamento do sistema construtivo como parede executada com argamassas de assentamento e revestimento;

2 - E suas variações quando expostos a altas temperaturas, em escala real, de modo a auxiliar no desenvolvimento de modelos de dimensionamento adequados e compará-los com modelos já existentes;

3 - Simular o ensaio de fluxo de calor em uma amostra de tijolo inteiro e comparar com os resultados de cálculos baseados na norma para verificar a sua correlação;

4 - Além de estudos de propriedades de condutividade térmica associada ao desenvolvimento de composições massas de cerâmica vermelha;

5 - Proporcionar o desenvolvimento de blocos de vedação com menores espessuras considerando a porosidade como ponto de partida, especialmente para a alumina, que possui características refratárias.

REFERÊNCIAS

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 15200 Projetos de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio**. Rio de Janeiro. 2012.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 15575-1: Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro. 2013.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 15270-1: Componentes Cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro. 2017a.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 16626: Classificação da reação ao fogo de produtos de construção**. Rio de Janeiro. 2017b.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 16945: Classificação da resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações**. Rio de Janeiro. 2021a.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 16965: Ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos — Diretrizes gerais**. Rio de Janeiro. 2021b.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 13438: Blocos de concreto celular autoclavado - Requisitos**. Rio de Janeiro. 2021c.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 13440: Blocos de concreto celular autoclavado - Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro. 2021d.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 10636-1: Componentes construtivos não estruturais — Ensaio de resistência ao fogo. Paredes divisórias de compartimentação**. Rio de Janeiro. 2022.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro. 2023.

AGNIESZKA RÓŻYCKA, W. P. Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 65–71, 2016.

AKUTSU, M.; FRATEL, D. J.; FROLLINI, C.; KIYOHARA, V. Y. Análise do potencial de desempenho térmico de diferentes tipologias de blocos cerâmicos. **Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais**, 2020. Disponível em: <<https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/881/542>> Acesso em: 22 jul. 2023.

AL NAHHAS, F.; AMI SAADA, R.; BONNET, G.; DELMOTTE, P. Resistance to fire of walls constituted by hollow blocks: Experiments and thermal modeling. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, n. 1, p. 258–267, 1 jan. 2007.

ALMEIDA, G. S. **Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais**. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba - Brasil, 2009. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/11369>>. Acesso em: 22 jul. 2023.

ALMEIDA, M. **Verificação da segurança estrutural de pilares de concreto armado em situação de incêndio**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais - Brasil, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21887/1/VerificacaoSegurancaEstrutural.pdf>>. Acesso em: 2 mar. 2023.

ANICER. **A cerâmica vermelha do Brasil**. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2014/08/Release_Setor.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2023.

ANICER. **Fichas de Avaliação de Desempenho Blocos Cerâmicos FAD nº 003**. Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2021/04/FADn03-Parede-estrutural-em-alvenaria-14x19x29-revestimento-de-argamassa.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2023.

ARIAS, H.; LEITE, L.; LOPES, A.; JÚNIOR, M.; TORRES, D. L.; JUNIOR, M. Dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio: contribuição à futura normatização nacional. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 89–107, jun. 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/j/ac/a/NrPZPGszVDdpx7H3ntRFz8y/?lang=pt>>. Acesso em: 26 mar. 2023.

ARUN KUMAR, M.; PRASANNA, K.; CHINNA RAJ, C.; PARTHIBAN, V.; KULANTHAIVEL, P.; NARASIMMAN, S.; NAVEEN, V. Bond strength of autoclaved aerated concrete manufactured using partial replacement of flyash with fibers – A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 581–589, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322015279>> Acesso em: 21 ago. 2023..

ASTM, A. S. F. T. A. M. **ASTM C373-88: Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water**¹. West Conshohocken, PA. 2006.

ASTM, A. S. F. T. A. M. **ASTM D7348-07 Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues**. West Conshohocken, PA. 2007.

AZEVEDO, J. C. de. AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DE CERÂMICAS VERMELHAS. **Universidade Federal de Minas Gerais**, 2004. Disponível em: <<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/721M.PDF>> Acesso em: 02 jun. 2023.

BARRETO, M. F. O. Análise microestrutural de blocos de concreto celular autoclavado (BCCA) com o auxílio de métodos instrumentais. **Revista Conexão Ciência Online - UNIFOR-MG**, v. 7, p. 38–63, 2012. Disponível em: <<https://periodicos.uniformg.edu.br:21011/periodicos/index.php/conexaociencia/index>>.

BARSOUM, M. W. **Fundamentals of ceramics**. New York, USA: Taylor & Francis, 2003. 603 p.

BELLINGIERI, J. C. A indústria cerâmica em São Paulo e a “invenção” do filtro de água: um estudo sobre a cerâmica Lamparelli-Jaboticabal (1920-1947). **Congresso Brasileiro de História Econômica**, 2003.

BENEDET, G. A.; ALEXANDRE, Z.; INOCENTE, J. M.; NANDI, V. de S.; ARCARO, S.; RAUPP-PEREIRA, F.; NETO, D. G. Mining circular economy: Potential of rice husk ash as an alternative mineral source in the production of clay ceramics using simplex design. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 176, p. 1–1130, 2023.

BERNARDIN, A. M. **Evolução microestrutural de porcelanas brandas de queima rápida**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química., 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88619>> Acesso em: 01 set. 2023.

BORTOLATTO, M. S. R. **Cerâmica vermelha no sul catarinense: da expansão à organização cooperativa**. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento Socioeconômico. Unesc - Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2018. Disponível em: <[http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/6473/1/Mario Sergio Rosso Bortolatto.pdf](http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/6473/1/Mario_Sergio_Rosso_Bortolatto.pdf)>. Acesso em: 8 abr. 2023.

BOŠNJAK, J.; GAMBARELLI, S.; SHARMA, A.; MEŠKOVIĆ, A. Experimental and numerical studies on masonry after exposure to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 116926, 10 jan. 2020.

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

BRANCO, P. de M. **Minerais Argilosos. Serviço Geológico do Brasil**. São Paulo. 2014. Disponível em: < <https://www.sgb.gov.br/minerais-argilosos> >. Acesso em: 8 abr. 2023.

BUENO, G. **Avaliação da Resistência ao Fogo de Paredes de Alvenaria de Blocos Cerâmicos com Instalações Prediais**. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS São Leopoldo. 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/7700/GuilhermeManfrediniBueno_.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 8 mar. 2023.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2020. 589 p.

CHEN, M.; LU, L.; WANG, S.; ZHAO, P.; ZHANG, W.; ZHANG, S. Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 280–288, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817305305>> Acesso em: 8 mar. 2023..

COELHO, J. M. Perfil de argilas para Cerâmica Vermelha. **Ministério de Minas e Energia**, p. 30, 2009.

CONCEIÇÃO FILHO, V.M.; MOREIRA, M. D. **Depósitos de argila do Recôncavo Baiano – geologia e potencialidade econômica**. Salvador: Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, 2001. 46 p.

CORDOVA, M. V. **Diagnóstico da Poluição Atmosférica no Setor de Cerâmica Estrutural do Município de Morro da Fumaça – SC**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC., 2007.

COSTA, C. N.; BRITZ, C. A. Ações do fogo nas estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, p. 1029–1068, 2011.

COSTA, C. N. Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio. 26 mar. 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-04092008-155911/>>. Acesso em: 16 mar. 2023.

COUTINHO, B.; CORRÊA, A. A Interpretação do Controle de Materiais de Acabamentos e de Revestimento no Processo de Segurança Contra Incêndio e Pânico. v. 2, p. 41, 2016.

CRUZ, P. J. S.; CAMÕES, A.; FIGUEIREDO, B.; RIBEIRO, M. J.; RENAULT, J. Additive manufacturing effect on the mechanical behaviour of architectural stoneware bricks. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117690, 30 mar. 2020.

DIAS, B. **Manual de Alvenaria de Tijolo**. 2. ed. Portugal: APICER CTCV, 2009. 241 p.

DONDI, M.; MAZZANTI, F.; PRINCIPI, P.; RAIMONDO, M.; ZANARINI, G. Thermal Conductivity of Clay Bricks. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 1, p. 8–14, fev. 2004.

DUARTE, R. B.; ONO, R.; SILVA, S. B. da. **Problemática de incêndio em edifícios altos**. 1. ed. São Paulo: Ed. do Autor, 2021. 178 p.

DUNN, V. **Collapse of Burning Buildings: a guide to fireground safety**. 2. ed. EUA: Ed. Fire Engineering Books, 2010. 347 p.

DUTRA, R. P. S. **Efeito da velocidade de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica estrutural**. Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/12870>>. Acesso em: 4 dez. 2023.

EAACA. **Associação Europeia de Concreto Celular Autoclavado. Net-Zero-Roadmap-for-AAC**. Germany. 2022. Disponível em: <https://eaaca.org/wp-content/uploads/2022/08/EAACA_Net-Zero-Roadmap-for-AAC_2022-08-12.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2023.

EMILIANI, G.; CORBARA, F. **Tecnologia ceramica Le Tipologie**. 3. ed. Faenza, Itália: Editrice, Gruppo Editoriale Faenza, 2001. 789 p.

FERNANDES, L.; SABINO, M. G.; ROSSETTO, H. L. Method of extration of silica from rice hull. **Cerâmica - Inovamat - Inovação em Materiais Ltda**, v. 60, p. 353, 2014.

GAIDZINSKI, R.; TAVARES, L. M. M.; DUAİLÍBI FILHO, J. Estudo do efeito da umidade no processo de sazonalimento acelerado de argilas. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Anais.** p. 309–314, 2002.

GAIDZINSKI, R. NoInfluência do pré-preparo nas características tecnológicas de argilas utilizadas em cerâmica vermelha da região de Itaboraí. 2002.

GAIDZINSKI, R. **Estudo do Sazonamento de Argilas para a Utilização na Indústria Cerâmica.** Tese Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2006.

GALVÁNKOVÁ, L.; MÁŠILKO, J.; SOLNÝ, T.; ŠTĚPÁNKOVÁ, E. Tobermorite Synthesis Under Hydrothermal Conditions. **Procedia Engineering**, v. 151, p. 100–107, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816317829>> Acesso em: 23 ago. 2024.

GEREMIAS, M. L. **Caracterização das Argilas da Bacia do Paraná, no Sul de Santa Catarina, para uso na Fabricação de Pisos Cerâmicos.** Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/001352063>> Acesso em: 24 ago. 2023.

GHASEM PACHIDEH, M. G. Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 26, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219302827>> 04 jul. 2023.

GOMES, F. C. F. PLACAS À BASE DE DESPERDÍCIOS INDUSTRIAIS PARA PAREDES INTERIORES. **Universidade do Minho**, 2021. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/80424>> 04 jul. 2023.

GONDIM, I. L. M. **Análise da eficiência do secador rápido do tipo talisca em indústrias de cerâmica vermelha: produtividade na fabricação de telhas – estudo de caso localizado na cidade de Russas-CE.** 2021 Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/61183/1/2021_tcc_ilmgondim.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2024.

GOUAL, M. S.; BALI, A.; BARQUIN, F. de; DHEILLY, R. M.; QUÉNEUDEC, M. Isothermal moisture properties of Clayey Cellular Concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1768–1776, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884605003406>> Acesso em: 4 jul. 2024.

GRIGOLETTI, G. de C. **Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/1753>>.

HENNEMANN, G. G.; GIL, A. M.; FERNANDES, B.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. Avaliação teórico-experimental da influência da espessura de alvenaria na resistência ao fogo de sistemas verticais de vedação. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 183–195, dez. 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ac/a/YRTHhLCzm6tksVMV4YwLvqP/?lang=pt>>. Acesso em: 8 ago. 2023.

ILJA KADASHEVICH, HANS-JÜRGEN SCHNEIDER, D. S. Statistical modeling of the geometrical structure of the system of artificial air pores in autoclaved aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 8, p. 1495–1502, 2005.

IN 14 CBMSC. **Compartimentação, Tempo de Resistência ao Fogo e Isolamento de Risco. Corpo de Bombeiros Militar**. Santa Catarina. 2020.

IN 18 CBMSC. **Controle de Materiais de Acabamento e Revestimento. Corpo de Bombeiros Militar**. Santa Catarina. 2022.

INCROPERA, F.; DEWITT, D. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 6. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2007. 1070 p.

INGHAM, J. P. Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures. **Materials Characterization**, v. 60, n. 7, p. 700–709, 1 jul. 2009.

IPT. **Instituto de Pesquisa Tecnológicas - Ensaio de segurança contra incêndio bloco de concreto celular**. São Paulo. 2008.

ISO, I. O. for S. **ISO 1182: Building, Reaction to fire tests for Test, products — Non-combustibility**. Genebra. 2002.

ISO, I. O. for S. **ISO 9869: Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance**. Genebra. 2014.

IT-08 CBPMESP. **Resistência ao fogo dos elementos de construção. Corpo de Bombeiros Polícia Militar**. São Paulo. 2019.

IT-10 CBPMESP. **Controle de materiais de acabamento e de revestimento. Corpo de Bombeiros Polícia Militar**. São Paulo. 2019.

JESUS, C. **Ensaio de Condutividade Térmica**. 2024. Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal, 2024.

JUNIOR, M. C.; TANNOA, L. C.; SINTONIA, A.; MOTTAA, J. F. M.; COELHO, J. M. A Indústria de Cerâmica Vermelha e o Suprimento Mineral no Brasil: Desafios para o Aprimoramento da Competitividade. **Cerâmica Industrial**, 2012.

JUNIOR, N. D. A. M. Desenvolvimento de massa de revestimento cerâmico, relacionando o desempenho do Caulim e Argila Mataraca. **Universidade Federal da Paraíba – UFPB**, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13250/1/NAMJ15102018.pdf>>. Acesso em: 8 ago. 2023.

JUNIOR, O. M.; TORQUETTI, Z. S. C. **GUIA TÉCNICO AMBIENTAL DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA**. Minas Gerais: Fiemg, 2013. 59 p.

KELLER, T. A. **Laboratório de Materiais de Construção Civil Relatório de Ensaio nº 389/2021**. Criciúma. 2021.

KHOURY, G. A. et al. Fire design of concrete structures: materials, structures and modelling. **Fédération internationale du béton (FIB)**:, v. Bulletin 3, 2007.

KLAUMANN, P. V.; CARVALHO, T. **Vedação em bloco de concreto celular autoclavado e alvenaria de tijolo cerâmico em unidades residenciais multifamiliares: estudo de caso comparativo**. Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça. p. 91, 2017.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. . Eficiência energética na arquitetura. **3ª ed. São Paulo: Editora Eletrobras/Procel**, 2015. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2023.

LIMA, R. C. A.; RIGÃO, A. O.; MOHAMAD, G.; KIRCHHOF, L. D.; NETO, A. B. da S. S. Assess of hollow clay block masonry wallets under high temperature. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, p. e12191, 18 out. 2018. Disponível em: <<http://www.scielo.br/j/rmat/a/7sVqk3NXwW6FF4hccDzgwKC/?lang=en>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

LIMA, R. C. de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRS, Porto Alegre, RS, 2005.

LUGARESÍ, F.; KOTSOVINOS, P.; LENK, P.; REIN, G. Review of the mechanical failure of non-combustible facade systems in fire. **Construction and Building Materials**, v. 361, p. 129506, 26 dez. 2022.

LUZ, A. B.; LINS, F. F. **ROCHAS & MINERAIS INDUSTRIAIS**. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. 990 p.

MACH, T. L. B. . . . [et al. .]; [tradução E.; QUEIROZ, F. L. P. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Tradução de: **Fundamentals of heat and mass transfer**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 1699 p.

MARINOSKI, D. L. **Relatório de avaliação de propriedades térmicas de paredes de alvenaria de vedação em blocos de concreto celular autoclavado**. Disponível em: <<https://celucon.com.br/wp-content/uploads/2017/09/propriedades-termicas-concreto-celular-celucon.pdf>>. Acesso em: 28 jul. 2024.

MARTÍN-MÁRQUEZ, J.; RINCÓN, J. M.; ROMERO, M. Effect of firing temperature on sintering of porcelain stoneware tiles. **Ceramics International**, v. 34, n. 8, p. 1867–1873, 1 dez. 2008.

MÁS, E. **A queima cerâmica forno a forno**. São Paulo: Pólo Produções, 2006. 99 p.

MASSABNI, A. C. **Cerâmicas**. Disponível em: <<https://crqsp.org.br/ceramicas/>>. Acesso em: 19 maio. 2024.

MAURÍCIO, J. R. C.; MOL, ; A C; FILHO, J. C. P. **Panorama do setor de cerâmica vermelha do estado do Rio de Janeiro**. Anais do 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2004.

MOREIRA, P. E. R. **Reação ao fogo dos materiais e tempo de escape em edifícios de centros comerciais no Brasil**. 2002. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil pela Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto, 2002. Disponível em: <<https://www.propec.ufop.br/teses-e-dissertacoes/42/reacao-ao-fogo-dos-materiais-e-tempo-de-escape-em-edificios-de-centros-comerciais-no-brasil>>. Acesso em: 19 maio. 2024.

MOTTA, J. F. M.; CABRAL JR, M.; TANNO, L. C.; ZANARDO, A. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte II: Os Minerais Industriais e as Massas da Cerâmica Tradicional. **Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 1, 2002.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; JUNIOR, M. C. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. **Cerâmica Industrial**, 2001.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; JÚNIOR, M. C.; TANNO, C.; CUCHIERATO, G. As Matérias-Primas Plásticas para a Cerâmica Tradicional: Argilas e Caulins. **Cerâmica Industrial**, 2004.

MURATA, L. C. M.; SILVA JR, O. P.; CELENTE, D. G.; O., L. Construção e teste de um dispositivo para ensaio de condutividade térmica de novos materiais de construção¹. **Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído**, 2018.

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. Structure and properties of aerated concrete: a review. **Cement & Concrete Composites**, v. 22, p. 321–329, 2000. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946500000160>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

NETO, J. **Estudo experimental do comportamento de elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos em situação de incêndio**. 2020. Dissertação de Mestrado em Ciências pela Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-10082020-084728/pt-br.php>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

NEVILLE A.M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

NGUYEN, T. D.; MEFTAH, F.; CHAMMAS, R.; MEBARKI, A. The behaviour of masonry walls subjected to fire: Modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks. **Fire Safety Journal**, v. 44, n. 4, p. 629–641, 1 maio 2009.

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

OUMMADI, S.; NAIT-ALI, B.; ALZINA, A.; VICTOR, J. L.; LAUNAY, Y.; MIRDRIKVAND, M.; DREHER, W.; REZWAN, K.; SMITH, D. S. Distribution of water in ceramic green bodies during drying. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 39, n. 10, p. 3164–3172, 1 ago. 2019.

PEREIRA, A. C.; GOMES, M. R. dos S.; ROCHA, S. D. F. Efficiency of heat treatment in the hydrometallurgical extraction of potassium in rocks containing potassium feldspar. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, p. 1716–1727, 2018.

PERON, R. **Estudo de viabilidade econômica para uso de bloco celular autoclavado assentado com argamassa polimérica como vedação de unidades residenciais multifamiliares: um estudo de caso comparativo**. Tubarão. 2018. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/4477/2/TCC_Robson.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2023.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Effect of the firing temperature on some mechanical properties of red ceramic. **Cerâmica** **56**, p. 237–243, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ce/a/QC5QSSKd4kDsj6vTVrtnQwq/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 9 mai. 2023.

PRUTEANU, M.; VASILACHE, M. THERMAL Conductivity determination for autoclaved aerated concrete elements used in enclosure masonry walls. **Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, CONSTRUCTIONS. ARCHITECTURE Section**, 2013.

RAHAMAN, M. **Ceramic Processing and Sintering**. 2. ed. New York: Ed. Marcel Dekker, 2003. 875 p.

RAMBALDI, E.; PABST, W.; GREGOROVÁ, E.; PRETE, F.; BIGNOZZI, M. C. Elastic properties of porous porcelain stoneware tiles. **Ceramics International**, v. 43, n. 9, p. 6919–6924, 15 jun. 2017.

REBELO, W. B.; SMANIOTTO, A. L. A. ESTUDO PARA A INCORPORAÇÃO DE REJEITO FINO DE CARVÃO MINERAL NA MASSA DA CERÂMICA VERMELHA. **Centro Universitário UniSATC**, 2022. Disponível em: <<http://repositorio.satc.edu.br/handle/satc/474>>. Acesso em: 9 mai. 2023.

RETELATTO, F. C. **Estudo da substituição de cimento portland por resíduos sólidos industriais na fabricação de concreto celular autoclavado**. 2019. Dissertação de mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, 2019. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/handle/1/10561>>. Acesso em: 8 jun. 2023.

RIBEIRO, M. J.; FERREIRA, J. M.; LABRINCHA, J. A. Plastic behaviour of different ceramic pastes processed by extrusion. **Ceramics International**, v. 31, n. 4, p. 515–519, 1 jan. 2005.

RIEDEL, R.; CHEN, I.-W. **Ceramics science and technology**. 1. ed. . Germany: Weinheim : WILEY-VCH, 2008. 590 p.

RIGÃO, A. O. **Comportamento de pequenas paredes de alvenaria estrutural frente a altas temperaturas.** 13 ago. 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7809>>. Acesso em: 7 jul. 2023.

ROSEMANN, F. **Resistência ao Fogo de Paredes de Alvenaria Estrutural de Blocos Cerâmicos pelo Critério de Isolamento Térmico.** 2011. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

ROSSO, F.; NANDI, V. de S.; ZACCARON, A.; MONTEDO, O. R. K.; NOVAIS, R. M. T.; BATISTA, J. A. L.; ROSSO, F.; NANDI, V. de S.; ZACCARON, A.; MONTEDO, O. R. K.; NOVAIS, R. M. T.; BATISTA, J. A. L. **DESENVOLVIMENTO DE BLOCO CELULAR CERÂMICO USANDO PÓ DE ALUMÍNIO COMO AGENTE GERADOR DE POROS. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 4, p. 377–383, 13 nov. 2018. Disponível em: <<http://www.tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/2176-1523.20181366>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

RUSSO, S.; SCIARRETTA, F. Masonry exposed to high temperatures: Mechanical behaviour and properties—An overview. **Fire Safety Journal**, v. 55, p. 69–86, 1 jan. 2013.

SAVIATTO, E.; ZACCARON, A.; BENEDET, G. A.; NANDI, V. de S.; ARCARO, S.; RAUPP-PEREIRA, F.; RIBEIRO, M. J.; GALATTO, S. L. **Mineração Sustentável: reutilização de argila de áreas abandonadas no Sul de Santa Catarina para abastecimento do APL cerâmica vermelha de Morro da Fumaça.** Currais Novos. 2023a.

SAVIATTO, E.; ZACCARON, A.; BENEDET, G. A.; NANDI, V. de S.; SABRINA, A.; RAUPP-PEREIRA, F.; RIBEIRO, M. J.; GALATTO, S. L. **Professor do IPVC é parceiro em estudo premiado no Brasil.** Disponível em: <https://www.ipvc.pt/estg/professor-do-ipvc-e-parceiro-em-estudo-premiado-no-brasil/?cli_action=1702483678.922>. Acesso em: 13 dez. 2023b.

SAVIATTO, E.; ZACCARON, A.; NANDI, V. de S.; ACORDI, J.; ARCARO, S.; RAUPP-PEREIRA, F.; GALATTO, S. L.; RIBEIRO, M. J. Sustainable Mining: Reuse of Clay from Abandoned Areas in the South of Brazil for Ceramic Production Based on a Simplex Design. **MDPI Materials**, 2023c.

SCHEFFLER, M.; COLOMBO, P. **Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications**. Washington: WILEY-VCH, 2005. 645 p.

SCHWOB, M. F.; M.R.V.; M.E., M. C.; HENRIQUES JR.; J.A.P., R. S. H. C. R.; TAPIA. **PROGRAMA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LADRILLERAS ARTESANALES DE AMERICA LATINA PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMATICO - EELA** -. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/9536838-Programa-de-eficiencia-energetica-en-ladrilleras-artesanales-de-america-latina-para-mitigar-el-cambio-climatico-eela.html>>. Acesso em: 30 mar. 2023.

SCHWOB, M. R. V.; OLIVEIRA, A. A.; RODRIGUES, J. A. P.; HENRIQUES JÚNIOR, M. F. **Manual de sistemas de secagem na indústria de cerâmica vermelha**. Rio de Janeiro,: INT/MCTIC, 2016. 42 p.

SCIARRETTA, F.; ESLAMI, J.; BEAUCOUR, A. L.; NOUMOWÉ, A. State-of-the-art of construction stones for masonry exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 304, p. 124536, 18 out. 2021.

SEBRAE. BOLETIM DE INTELIGÊNCIA DEZEMBRO | 2015 CERÂMICA VERMELHA Panorama do mercado no Brasil. 2015.

SEBRAE. **Caderno de Desenvolvimento de Santa Catarina – Morro da Fumaça**. Disponível em: <[https://datasebrae.com.br/municipios/sc/m/Morro da Fumaça - Cadernos de Desenvolvimento.pdf](https://datasebrae.com.br/municipios/sc/m/Morro_da_Fumaça_-_Cadernos_de_Developolvimento.pdf)>. Acesso em: 30 mar. 2023.

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

SILVA, L.; MENDES, J.; LADCHUMANANANDASIVAM, R. Análise das propriedades mecânicas e térmicas de tijolos solocimento com e sem adição do pó da fibra. **Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, p. 1–6, 2000.

SIMONETTI, C. Avaliação do comportamento ao fogo de placas de vedação de concreto com inserção de resíduos de pneus inservíveis. 2020. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/9345>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SINAPI. **Relatório de Insumos e Composições**. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_662>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SOARES, J. M.; DOLEYS; TOMAZETTI, R. R.; TAVARES, I. S.; PINHEIRO, R. B. Panorama Sócio-econômico das Indústrias de Cerâmica Vermelha da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul. **Cerâmica Industrial**, 2004.

SOUZA, R. P. Avaliação da influência da espessura do revestimento argamassado e do carregamento no comportamento de alvenaria frente a altas temperaturas. 2017. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/6388>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SPOSTO, R. M.; MORAIS, D. M. de; PEREIRA, C. H. A Qualidade do Processo de Produção de Blocos Cerâmicos Fornecidos para o Distrito Federal. **Cerâmica Industrial**, 2007. Disponível em: <<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876572f7f8c9d6e028b4716/pdf/ci-12-3->>. Acesso em: 08 mai. 2023.

THAKUR, A.; KUMAR, S. Mechanical properties and development of light weight concrete by using autoclaved aerated concrete (AAC) with aluminum powder. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 3734–3739, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321082584?via%3Dihub>>.

VARISCO, M. Q. **Análise do desempenho de blocos de concreto celular autoclavado em um sistema de vedação externa**. Disponível em: <https://mestrado.lactec.com.br/wp-content/uploads/2021/09/110_PT.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2023.

VILLAR, C. E. F.; NOGUEIRA, R. E. F. Q.; CARVALHO, L. A. M.; ABREU, H. F. G. Influence of pores on the failure of structural ceramic blocks. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 12, p. 2376–2381, 1 dez. 2008.

WITZKE, F. B. Análise técnico-econômica dos blocos de concreto celular autoclavado na alvenaria de vedação. **Revista Engenharia e Construção Civil**, v. 3, n. 2, p. 20–33, 11 jul. 2017. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/recc/article/view/6646>>. Acesso em: 27 ago. 2023.

ZACCARON, A. **Incorporação de chamote na massa de cerâmica vermelha como valorização do resíduo**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental. Unesc - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma - Santa Catarina - Brasil, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/handle/1/2415>>. Acesso em: 22 ago. 2023.

ZACCARON, A. **Estudo do processo de secagem rápida em argilas utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha**. 2018. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Unesc - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma - Santa Catarina - Brasil, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/7259/2/Alexandre_Zaccaron.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2023.

ZHANG, L.; YANG, Y.-N.; CHEN, Z.-M.; WANG, J.; WANG, C.-Y.; CUI, Z.-X.; ZHANG, Y.-Q.; XU, Y.-G. Elemental and Sr isotopic compositions of plagioclase as an indicator of lunar source-rock type: Insights from Chang'e 5 plagioclase fragments. **Icarus**, v. 413, p. 2024, 116002, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103524000605>>.

Anexo A

Consulta Técnica Externa CTE808900002A (2023)



ESTADO DE SANTA CATARINA
SECRETARIA DE ESTADO DA SEGURANÇA PÚBLICA
CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA



PARECER TÉCNICO

1. DADOS DA SOLICITAÇÃO				
Protocolo Processo Técnico: CTE808900002A				
Data da Solicitação: 08/11/2023		Quantidade de anexos: 1		
Nome Solicitante: P. C. C.		CPF: ***.361.439-**		
2. EDIFICAÇÃO (se informado)				
Registro de Endereço (RE):				
Logradouro:		Nº:		
CEP:		Complemento:		
Cidade:		Bairro:		
3. CLASSIFICAÇÕES				
Classificação 1				
Tipo Classificação: Outros				
Sistema: Compartimentação, tempo de resistência ao fogo e isolamento de risco v.23				
Subitem: Art. 16				
Deferimento INDEFERIDO				
4. ANEXOS				
NR	Nome e-SCI	Nome Original	Descrição Documento	Data Upload
1	CONSULTA_TECNIC (...)			08/11/2023 15:56:53
5. DESCRIÇÃO DO PARECER				
Resultado : Indeferido				

Observações:

PERGUNTA 1: "E na mesma tabela apresenta diferenças entre ½ tijolo com revestimento e 1 tijolo com revestimento, como posso interpretar essas diferenças, seria tijolo deitado e em pé?"

RESPOSTA 1: Segue em anexo ilustração para melhor entendimento.

PERGUNTA 2: "Além da Espessura total da parede (cm) informado de 13 e 23 cm, sendo que um tijolo cerâmico convencional de 14x19x29cm ficando com espessura de 17 cm com revestimento, nesse caso qual seria o tempo de resistência? e do tijolo de 11,5x14x24cm que a espessura ficaria 14,5 cm qual seria o tempo de resistência?"

RESPOSTA 2: Conforme previsto na IN 14:

* Art. 12
1º Podem ser empregados quaisquer materiais para a composição dos elementos construtivos, tais como alvenaria, gesso acartonado, vidro e outros, desde que a medida de proteção seja testada e aprovada em seu conjunto, atendendo às características de resistência ao fogo.

...
*Art. 16. A resistência ao fogo das paredes de compartimentação sem função estrutural deve ser comprovada por meio do teste previsto na NBR 10636.
§ 1º Admite-se para comprovação laudo/ensaio realizado pelo fabricante que informe, além dos dados do corpo de prova, a categoria e o grau de resistência ao fogo do elemento testado.
§ 2º Para compartimentação com paredes de alvenaria, caso não seja apresentado laudo ou ensaio específico, o Corpo de Bombeiros Militar adotará os parâmetros do Anexo H.*

No anexo H da IN 14, o CBMSC apresenta apenas alguns valores de referência caso não seja apresentado laudo ou ensaio específico. Tais exemplos não são exaustivos, pois seria impossível o CBMSC esgotar o assunto com todos os casos possíveis, uma vez que podem haver variações de dimensões destes elementos conforme região. Entretanto, focando no desempenho exigido de resistência ao fogo (horas), este sim deve ser observado, seja qual for o meio usado para tal, conforme previsto no Art. 12.

Como os elementos objetos do questionamento (tijolo cerâmico convencional de 14x19x29cm e tijolo de 11,5x14x24cm) não constam no anexo H da IN 14, cabe ao responsável técnico buscar em ensaios ou testes práticos ou mesmo na literatura (livros, estudos acadêmicos) elementos com tais dimensões e de mesma composição e assim obter o tempo de resistência ao fogo exigido pela IN 14.

Entretanto, caso o elemento a ser usado em obra possua maior espessura que os elementos trazidos como referência no anexo H da IN 14, e seja composto dos mesmos materiais, pode ser adotado com margem de segurança o TRRF dos elementos do anexo H, uma vez que o TRRF será maior quanto maior for a espessura da parede, quando executada com o mesmo material.

Assinatura Eletrônica	
E. H. R. - ***059*	
NOME
CRICIÚMA, 10 de Novembro de 2023	
LOCAL E DATA

