

Utilização de ultrassom em análises experimentais das propriedades mecânicas residuais de blocos e prismas de concreto de alvenaria estrutural submetidos a elevadas temperaturas

Humberto Moura Lima

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

HUMBERTO MOURA LIMA

**Utilização de ultrassom em análises experimentais das propriedades
mecânicas residuais de blocos e prismas de concreto de alvenaria estrutural
submetidos a elevadas temperaturas**

VERSÃO CORRIGIDA

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Jorge Munaiar Neto

São Carlos

2024

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

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

L732u Lima, Humberto Moura
 Utilização de ultrassom em análises
 experimentais das propriedades mecânicas residuais de
 blocos e prismas de concreto de alvenaria estrutural
 submetidos a elevadas temperaturas / Humberto Moura
 Lima; orientador Jorge Munaiar Neto. São Carlos, 2024.

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

 1. alvenaria estrutural. 2. incêndio. 3. ensaios
 não destrutivos. 4. velocidade de pulso ultrassônico.
 5. propriedades mecânicas residuais. 6. resistência à
 compressão residual. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **HUMBERTO MOURA LIMA**.

Título da dissertação: "Utilização de ultrassom em análises experimentais das propriedades mecânicas residuais de blocos e prismas de concreto de alvenaria estrutural submetidos a elevadas temperaturas".

Data da defesa: 23/05/2024.

Comissão Julgadora

Prof. Associado Jorge Munaiar Neto
(Orientador)

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

Profa. Dra. Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Dr. Cláudius de Sousa Barbosa
(Escola Politécnica/EP-USP)

Resultado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

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

Prof Associado **Ricardo Carrazedo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que esteve ao meu lado em todos os momentos dessa jornada, sustentando-me com sua graça.

À minha querida noiva, Andréa Maria, com quem tenho a alegria de compartilhar a vida, agradeço do fundo do meu coração.

À minha família, especialmente aos meus pais, Marcus Jonatas e Mara Rúbia, e ao meu irmão Gabriel Moura e sua esposa, Alicia Melo, pelo apoio constante, compreensão e incentivo.

Aos professores Jorge M. Neto e Vladimir G. Haach, cuja orientação e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos do Departamento de Engenharia de Estruturas, em especial José Caio, Hélio Rodrigues, Marcos Silva, Gabriel de Bessa, Anchiêta Fernandes, Danilo Bomfim, Chiara Teodoro, Daniel Teles, Guilherme Amorim, João Segala e Thiago Costa, pela amizade, pela colaboração nesta pesquisa e pelo apoio mútuo durante este período.

Ao corpo técnico do LMCC (Laboratório de Construção Civil), do LE (Laboratório de Estruturas), e da Oficina mecânica da EESC, por viabilizarem a execução dos ensaios propostos.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, por proporcionarem um ambiente acadêmico estimulante e propício ao aprendizado e à pesquisa.

À empresa Tatu Pré-moldados, pelo fornecimento dos materiais necessários para a realização deste estudo.

Por fim, agradeço aos órgãos financiadores dessa pesquisa. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Este trabalho também foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – processo 131188/2022-4.

“Tudo o que fizerem, façam de todo o coração, como para o Senhor, não para os homens”

Colossenses 3:23 NVI

RESUMO

LIMA, H. M. **Utilização de ultrassom em análises experimentais das propriedades mecânicas residuais de blocos e prismas de concreto de alvenaria estrutural submetidos a elevadas temperaturas.** 2024. 217 p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Civil – (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

No Brasil, as construções em alvenaria estrutural têm aumentado devido às suas vantagens logísticas e econômicas. No entanto, como qualquer tipo de estrutura, essas edificações estão sujeitas a diferentes tipos de ações, incluindo incêndios, para os quais ainda não existe uma norma específica de dimensionamento no país. Diante dessa lacuna, pesquisas voltadas ao comportamento mecânico desse sistema em elevadas temperaturas têm sido realizadas. Nesse contexto, os ensaios de ultrassom se mostram bastante promissores, pois viabilizam a avaliação da integridade física e das propriedades mecânicas dos materiais sem comprometer sua resistência. Este estudo tem como objetivo principal avaliar as propriedades mecânicas dos componentes da alvenaria estrutural com blocos de concreto, submetidos a altas temperaturas, por meio de ensaios de ultrassom. Para tanto, foi realizado um programa experimental abrangendo blocos de concreto, corpos de prova de argamassa e prismas de alvenaria de dois blocos. Inicialmente, foram realizados ensaios para caracterização física e geométrica, seguidos pelos ensaios em contexto térmico, para, posteriormente, proceder à avaliação por meio de ensaios de ultrassom e de compressão. Os resultados atestam a viabilidade do uso de ensaios de ultrassom na avaliação das propriedades mecânicas dos elementos de alvenaria em elevadas temperaturas, uma vez que as velocidades ultrassônicas demonstraram ser sensíveis às degradações causadas pelo aumento da temperatura. Além disso, observaram-se reduções significativas na capacidade resistente e na rigidez dos elementos de alvenaria em resposta ao aumento da temperatura, sendo a deformabilidade desses elementos mais sensível a esse aumento do que a resistência à compressão. Os resultados desta pesquisa, além de contribuir com informações relevantes para futura normatização nacional, colaboram com o desenvolvimento da metodologia de ensaios de caracterização de blocos e prismas de alvenaria em elevadas temperaturas.

Palavras-chave: alvenaria estrutural; incêndio; ensaios não destrutivos; velocidade de pulso ultrassônico; propriedades mecânicas residuais; resistência à compressão residual.

ABSTRACT

LIMA, H. M. **Use of ultrasound in experimental analysis of residual mechanical properties of concrete blocks and prisms of structural masonry subjected to high temperatures.** 2024. 217 p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structural Engineering)) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2024.

In Brazil, masonry constructions have increased due to their logistical and economic advantages. However, like any type of building type, these constructions are subject to various actions, including fires, for which there is still no specific design standard in the country. In response to this gap, researchers have been investigating the mechanical behavior of this system at high temperatures. Within this context, ultrasound testing emerges as a promising method, enabling the evaluation of material physical integrity and mechanical properties without compromising their strength. The primary objective of this study is to investigate the mechanical properties of masonry components constructed with concrete blocks when subjected to high temperatures, using ultrasound testing. To achieve this, an experimental program was conducted, comprising the evaluation of concrete blocks, mortar specimens, and masonry prisms consisting of two blocks. Initially, physical and geometric characterization tests were conducted, followed by thermal tests, and subsequently, ultrasound and compression tests were carried out. The results confirm the feasibility of using ultrasound testing to evaluate the mechanical properties of masonry elements at high temperatures, as ultrasonic velocities were sensitive to the degradations caused by increased temperature. Additionally, significant reductions in the load-bearing capacity and stiffness of the masonry elements were observed in response to the temperature increase, with the deformability of these elements being more sensitive to this increase than compressive strength. The findings of this research, besides providing relevant information for future national standardization, contribute to the development of testing methodologies for characterizing blocks and masonry prisms at high temperatures.

Keywords: masonry; fire situation; non-destructive testing; ultrasonic pulse velocity; residual mechanical properties; residual compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Incêndios estruturais noticiados por ano no Brasil	29
Figura 2.1: Blocos de concreto armazenados sobre paletes	36
Figura 2.2: Tipos de argamassamento: (a) total e (b) parcial	39
Figura 2.3: Incêndio nos edifícios: (a) Joelma e (b) Andraus	44
Figura 2.4: Modelo de incêndio real.....	45
Figura 2.5: Modelo de incêndio natural.....	46
Figura 2.6: Modelos de incêndio-padrão	47
Figura 2.7: Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF).....	49
Figura 2.8: Esquema de transferência de calor em alvenaria	51
Figura 2.9: Propagação de ondas ultrassônicas: (a) longitudinais e (b) transversais	56
Figura 2.10: Esquema dos aparatos utilizados no ensaio de ultrassom	57
Figura 2.11: Transmissão do pulso ultrassônico: (a) direta, (b) semidireta e (c) indireta	58
Figura 2.12: Etapas de refinamento da revisão sistemática (#1 and #2)	61
Figura 2.13: Etapas de refinamento da revisão sistemática (#1 and #3)	61
Figura 2.14: Etapas de refinamento da revisão sistemática (#1 and #2 and #3)	62
Figura 2.15: Esquema de interseção entre as buscas realizadas na revisão sistemática	62
Figura 2.16: Evolução do número de publicações sobre a alvenaria estrutural em situação de incêndio conforme o protocolo de revisão sistemática adotado	63
Figura 2.17: Abordagem dos trabalhos científicos levantados.....	64
Figura 2.18: Materiais utilizados nas alvenarias nos trabalhos científicos levantados	64
Figura 2.19: Pequenas paredes de alvenaria estrutural antes da realização dos ensaios	65
Figura 2.20: Pequenas paredes de alvenaria estrutural revestidas com gesso pós fogo	66
Figura 2.21: Ensaios de compressão em prismas de alvenaria.....	68
Figura 2.22: Evolução do número de publicações sobre a utilização do ultrassom na alvenaria estrutural conforme o protocolo de revisão sistemática adotado.....	70
Figura 2.23: Materiais utilizados nas alvenarias nos trabalhos científicos levantados	71
Figura 2.24: Classificação dos trabalhos científicos levantados	71
Figura 2.25: Malha para ensaio de ultrassom em: (a) Marvila <i>et al.</i> (2019) e (b) Sombra e Haach (2022)	72
Figura 2.26: Ensaios de ultrassom em tijolos cerâmicos maciços.....	73
Figura 2.27: Ensaio ultrassônico em painel de alvenaria	74
Figura 3.1: Bloco de concreto da Tatu Pré-moldados	79

Figura 3.2: Fluxograma de execução dos ensaios do <i>Programa Experimental I</i>	80
Figura 3.3: Indicação das dimensões dos blocos	81
Figura 3.4: Forno elétrico industrial tipo câmara da JUNG (modelo TB20012)	85
Figura 3.5: Disposição dos blocos de concreto no forno	85
Figura 3.6: Leitura dos termopares durante os ensaios em elevadas temperaturas:	86
Figura 3.7: Blocos de concreto após ensaios em temperaturas elevadas:	87
Figura 3.8: Materiais e equipamentos utilizados nos ensaios de ultrassom: (a) aparelho de ultrassom Pundit Lab ⁺ , (b) cilindro de calibração, (c) transdutores de cisalhamento com 250 kHz e (d) glucose de milho	88
Figura 3.9: Malha idealizada para ensaio ultrassônico em blocos de concreto	89
Figura 3.10: Aplicação da malha idealizada no ensaio de ultrassom em bloco de concreto	89
Figura 3.11: Perfil típico do sinal de onda em blocos de concreto	90
Figura 3.12: Identificação do tempo de chegada das ondas transversais	90
Figura 3.13: Velocidades ultrassônicas nos blocos de concreto: (a) longitudinal e (b) transversal	91
Figura 3.14: Velocidades ultrassônicas residuais nos blocos de concreto: (a) longitudinal e (b) transversal	92
Figura 3.15: Densidade específica dos blocos de concreto em elevadas temperaturas	94
Figura 3.16: Módulos de elasticidade dinâmico dos blocos de concreto em elevadas temperaturas:	95
Figura 3.17: Módulos de elasticidade dinâmico residuais dos blocos de concreto em elevadas temperaturas:	96
Figura 3.18: Ensaio de resistência à compressão nos blocos de concreto: (a) realização do ensaio e (b) desenho esquemático de instrumentação	97
Figura 3.19: Diagramas tensão x deformação dos blocos de concreto em elevadas temperaturas	99
Figura 3.20: Curvas residuais dos blocos de concreto:	100
Figura 4.1: Fluxograma de execução dos ensaios do <i>Programa Experimental II</i>	102
Figura 4.2: Distribuição granulométrica da areia utilizada na argamassa de assentamento...	104
Figura 4.3: Caracterização mecânica da argamassa de assentamento:	105
Figura 4.4: Ensaio de índice de consistência da argamassa de assentamento	106
Figura 4.5: Forma cilíndrica de PVC 10 x 30 cm: (a) vazia e (b) preenchida com argamassa	107

Figura 4.6: Confeção dos prismas de alvenaria: (a) argamassamento total e (b) armazenamento dos prismas	108
Figura 4.7: Ensaio de resistência à tração na flexão em prisma de argamassa.....	109
Figura 4.8: Ensaio de resistência à compressão em prisma de argamassa	109
Figura 4.9: Propriedades físicas das argamassas em elevadas temperaturas: (a) absorção e porosidade; e (b) densidades específica e aparente	111
Figura 4.10: Relações entre as propriedades físicas da argamassa:	112
Figura 4.11: Relações entre as propriedades físicas da argamassa: porosidade e densidade aparente.....	112
Figura 4.12: Leitura dos termopares durante os ensaios em elevadas temperaturas:	113
Figura 4.13: Disposição dos corpos de prova de argamassa durante os ensaios térmicos	114
Figura 4.14: Corpos de prova de argamassa após ensaios em temperaturas elevadas:	115
Figura 4.15: Evolução das fissuras em argamassas ensaiadas à 600 °C:	116
Figura 4.16: Disposição dos prismas de alvenaria no forno.....	116
Figura 4.17: Prismas de alvenaria após ensaios em temperaturas elevadas:	117
Figura 4.18: Detalhes dos danos nas juntas de argamassa causados pelos ensaios térmicos: 118	
Figura 4.19: Metodologia do ensaio de ultrassom nos corpos de prova de argamassa	119
Figura 4.20: Ensaio de ultrassom nos corpos de prova de argamassa.....	120
Figura 4.21: Perfil típico do sinal de onda em argamassas de assentamento	120
Figura 4.22: Variação das velocidades ultrassônicas em temperatura ambiente.....	121
Figura 4.23: Velocidades ultrassônicas nos corpos de prova de argamassa.....	122
Figura 4.24: Velocidades ultrassônicas residuais nos corpos de prova de argamassa	122
Figura 4.25: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal dos corpos de prova de argamassa.....	124
Figura 4.26: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal residuais dos corpos de prova de argamassa.....	125
Figura 4.27: Malha idealizada para ensaio ultrassônico em prismas de alvenaria	126
Figura 4.28: Aplicação da malha idealizada no ensaio de ultrassom em prisma de alvenaria	126
Figura 4.29: Perfil típico do sinal de onda na direção da altura em prismas de alvenaria	127
Figura 4.30: Perfil típico do sinal de onda de medição indireta em prismas de alvenaria	127
Figura 4.31: Velocidades ultrassônicas nos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas:	129
Figura 4.32: Velocidades ultrassônicas residuais nos prismas de alvenaria:	130

Figura 4.33: Módulos de elasticidade dinâmico dos blocos de concreto associados aos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas: (a) longitudinal e (b) transversal.....	132
Figura 4.34: Módulos de elasticidade dinâmico residuais dos blocos de concreto associados aos prismas de alvenaria: (a) longitudinal e (b) transversal.....	132
Figura 4.35: Ensaio de resistência à compressão nas argamassas.....	133
Figura 4.36: Variação da resistência à compressão das argamassas de assentamento em temperatura ambiente	134
Figura 4.37: Diagramas tensão x deformação das argamassas de assentamento em elevadas temperaturas.....	135
Figura 4.38: Curvas residuais das argamassas de assentamento:	135
Figura 4.39: Ensaio de resistência à compressão nos prismas de alvenaria:	137
Figura 4.40: Variação da resistência à compressão dos prismas de alvenaria em temperatura ambiente	138
Figura 4.41: Diagramas tensão x deformação dos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas.....	138
Figura 4.42: Curvas residuais dos prismas de alvenaria:	139
Figura 5.1: Velocidades ultrassônicas nos blocos de concreto: (a) longitudinal e (b) transversal	141
Figura 5.2: Relação entre as velocidades longitudinal e transversal nos blocos de concreto:	144
Figura 5.3: Curvas residuais da velocidade ultrassônica longitudinal nos blocos de concreto e em corpos de prova de concreto moldado úmido: comparação com outros autores	146
Figura 5.4: Curvas residuais das velocidades ultrassônicas nos blocos de concreto:	146
Figura 5.5: Coeficiente de Poisson dinâmico dos blocos de concreto	148
Figura 5.6: Módulos de elasticidade dinâmico dos blocos de concreto: (a) longitudinal e (b) transversal.....	150
Figura 5.7: Relação entre os módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal dos blocos de concreto	151
Figura 5.8: Curvas residuais dos módulos de elasticidade dinâmico dos blocos de concreto:	152
Figura 5.9: Curvas residuais da resistência à compressão dos blocos de concreto:	153
Figura 5.10: Curvas residuais do módulo de elasticidade longitudinal estático dos blocos de concreto:	156
Figura 5.11: Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos blocos de concreto em termos residuais	157

Figura 5.12: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e a resistência à compressão dos blocos de concreto em diferentes níveis de temperatura.....	157
Figura 5.13: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico transversal e a resistência à compressão dos blocos de concreto em diferentes níveis de temperatura.....	158
Figura 5.14: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão dos blocos de concreto em termos residuais: (a) longitudinal e (b) transversal.....	159
Figura 5.15: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e o módulo de elasticidade longitudinal estático dos blocos de concreto	159
Figura 5.16: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico transversal e o módulo de elasticidade longitudinal estático dos blocos de concreto	160
Figura 5.17: Relação entre propriedades mecânicas dinâmicas e estáticas dos blocos de concreto:	161
Figura 5.18: Velocidades ultrassônicas nas argamassas de assentamento: (a) longitudinal e (b) transversal	163
Figura 5.19: Relação entre as velocidades longitudinal e transversal nas argamassas de assentamento.....	164
Figura 5.20: Curvas residuais da velocidade ultrassônica longitudinal nas argamassas de assentamento:	165
Figura 5.21: Curvas residuais das velocidades ultrassônicas nas argamassas.....	165
Figura 5.22: Módulos de elasticidade dinâmico das argamassas de assentamento:.....	167
Figura 5.23: Relação entre os módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal das argamassas	168
Figura 5.24: Curvas residuais dos módulos de elasticidade dinâmico das argamassas de assentamento:	169
Figura 5.25: Curvas residuais da resistência à compressão das argamassas de assentamento:	171
Figura 5.26: Curvas residuais do módulo de elasticidade longitudinal estático das argamassas de assentamento:.....	173
Figura 5.27: Relação entre a resistência à compressão e módulo de elasticidade das argamassas de assentamento em termos residuais	173
Figura 5.28: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e a resistência à compressão das argamassas de assentamento	174
Figura 5.29: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico transversal e a resistência à compressão das argamassas de assentamento	175

Figura 5.30: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão das argamassas de assentamento em termos residuais: (a) longitudinal e (b) transversal	175
Figura 5.31: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e a resistência à compressão das argamassas de assentamento em termos residuais: comparação com outros autores.....	176
Figura 5.32: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e o módulo de elasticidade longitudinal estático das argamassas de assentamento	177
Figura 5.33: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico transversal e o módulo de elasticidade longitudinal estático das argamassas de assentamento	177
Figura 5.34: Relação entre propriedades mecânicas dinâmicas e estáticas das argamassas de assentamento:	178
Figura 5.35: Velocidade ultrassônica longitudinal nos prismas de alvenaria: (a) altura e (b) indireta.....	182
Figura 5.36: Junta de assentamento em (a) boas e (b) más condições de interface.....	183
Figura 5.37: Propagação teórica de onda ultrassônica em prisma de alvenaria	183
Figura 5.38: Relação entre a média das velocidades longitudinal ao longo do comprimento e largura dos blocos de concreto com a velocidade longitudinal ao longo da altura	185
Figura 5.39: Comparação entre as velocidades longitudinais teórica e experimental dos prismas de alvenaria na direção da altura	186
Figura 5.40: Curvas residuais das velocidades ultrassônicas nos prismas de alvenaria:.....	187
Figura 5.41: Curva residual de resistência à compressão dos prismas de alvenaria	188
Figura 5.42: Curva residual do módulo de elasticidade longitudinal estático dos prismas de alvenaria.....	189
Figura 5.43: Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos prismas de alvenaria em termos residuais.....	190
Figura 5.44: Comparação entre os diagramas “tensão x deformação” dos elementos de alvenaria:	191
Figura 5.45: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal na direção da altura e a resistência à compressão dos prismas de alvenaria.....	192
Figura 5.46: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal aferidos de forma indireta e a resistência à compressão dos prismas de alvenaria	193
Figura 5.47: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal na direção da altura e o módulo de elasticidade longitudinal estático dos prismas de alvenaria.....	194

Figura 5.48: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal aferidos de forma indireta e o módulo de elasticidade longitudinal estático dos prismas de alvenaria 194

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração	36
Tabela 2.2: Classes de uso e respectivos critérios de resistência à compressão da argamassa inorgânica para assentamento das unidades de alvenaria estrutural.....	38
Tabela 2.3: Especificação dos materiais da alvenaria estrutural em função da resistência do bloco	40
Tabela 2.4: Eficiências parede-bloco e prisma-bloco.....	40
Tabela 2.5: Equações teóricas para o módulo de elasticidade da alvenaria	42
Tabela 2.6: TRRF de acordo com a ABNT NBR 14432:2001.....	49
Tabela 2.7: Planejamento de pesquisa	59
Tabela 2.8: Variáveis da revisão bibliográfica sistemática	59
Tabela 3.1: Dimensões efetivas dos blocos de concreto	81
Tabela 3.2: Dimensões das paredes externas, dos septos, dos furos e raio das mísulas dos blocos de concreto.....	82
Tabela 3.3: Área bruta e área líquida dos blocos de concreto	83
Tabela 3.4: Propriedades físicas dos blocos de concreto.....	84
Tabela 3.5: Velocidades ultrassônicas longitudinal e transversal nos blocos de concreto em elevadas temperaturas.....	91
Tabela 3.6: Variação do coeficiente de Poisson dinâmico dos blocos de concreto em elevadas temperaturas.....	94
Tabela 3.7: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal dos blocos de concreto em elevadas temperaturas	95
Tabela 3.8: Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos blocos de concreto	98
Tabela 4.1: Propriedades físicas dos aglomerantes utilizados na argamassa de assentamento	103
Tabela 4.2: Propriedades físicas da areia utilizada na argamassa de assentamento	104
Tabela 4.3: Descrição dos traços de argamassa testados.....	104
Tabela 4.4: Propriedades mecânicas dos traços de argamassa testados	105
Tabela 4.5: Propriedades mecânicas da argamassa de assentamento	110
Tabela 4.6: Condições de idade e temperatura dos ensaios de caracterização física da argamassa	110
Tabela 4.7: Propriedades físicas das argamassas de assentamento	111

Tabela 4.8: Velocidades longitudinal e transversal nos corpos de prova de argamassa em elevadas temperaturas.....	121
Tabela 4.9: Coeficiente de Poisson dinâmico dos corpos de prova de argamassa em elevadas temperaturas.....	123
Tabela 4.10: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal das argamassas de assentamento em elevadas temperaturas	124
Tabela 4.11: Velocidades longitudinal e transversal nos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas – comprimento e largura	128
Tabela 4.12: Velocidades longitudinal nos prismas em elevadas temperaturas – altura e indireta	128
Tabela 4.13: Variação do coeficiente de Poisson dinâmico dos blocos constituintes dos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas	131
Tabela 4.14: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal dos blocos de concreto associados aos prismas em elevadas temperaturas	131
Tabela 4.15: Resistência à compressão e módulo de elasticidade das argamassas de assentamento.....	134
Tabela 4.16: Resistência à compressão e módulo de elasticidade longitudinal dos prismas de alvenaria.....	137
Tabela 5.1: Comparação entre as velocidades ultrassônicas nos blocos de concreto.....	141
Tabela 5.2: Teste de hipóteses estatístico para as velocidades longitudinais e transversais ao longo da altura, comprimento e largura dos blocos de concreto	143
Tabela 5.3: Comparação entre velocidades residuais longitudinal e transversal nos blocos de concreto e em corpos de prova de concreto moldado úmido	145
Tabela 5.4: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal dos blocos de concreto em elevadas temperaturas	149
Tabela 5.5: Propriedades dinâmicas residuais dos blocos de concreto	152
Tabela 5.6: Comparação entre a resistência característica à compressão residual dos blocos de concreto	153
Tabela 5.7: Comparação entre o módulo de elasticidade longitudinal estático residual dos blocos de concreto	155
Tabela 5.8: Relações obtidas para os blocos de concreto.....	161
Tabela 5.9: Comparação entre velocidades ultrassônicas nas argamassas de assentamento..	162
Tabela 5.10: Comparação entre velocidades residuais longitudinal e transversal nas argamassas de assentamento.....	164

Tabela 5.11: Média das propriedades dinâmicas das argamassas de assentamento em elevadas temperaturas.....	166
Tabela 5.12: Propriedades dinâmicas residuais das argamassas de assentamento	168
Tabela 5.13: Comparação entre resistências à compressão residuais das argamassas de assentamento.....	170
Tabela 5.14: Comparação entre o módulo de elasticidade longitudinal estático residual das argamassas de assentamento.....	172
Tabela 5.15: Relações entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e a resistência à compressão das argamassas de assentamento em termos residuais	176
Tabela 5.16: Relações obtidas para as argamassas de assentamento	178
Tabela 5.17: Velocidades longitudinal e transversal nos blocos de concreto superiores dos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas	180
Tabela 5.18: Velocidades longitudinal e transversal nos blocos de concreto inferiores dos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas	180
Tabela 5.19: Teste de hipóteses estatístico para as velocidades longitudinais e transversais ao longo dos blocos de concreto constituintes dos prismas de alvenaria.....	181
Tabela 5.20: Velocidades residuais longitudinal na direção da altura e obtidas de maneira indireta nos prismas de alvenaria.....	187
Tabela 5.21: Propriedades mecânicas estáticas dos prismas de alvenaria.....	188
Tabela 5.22: Relações obtidas para os prismas de alvenaria	195

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	29
1.1 OBJETIVO	30
1.2 JUSTIFICATIVA	31
1.3 METODOLOGIA.....	32
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	33
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
2.1 ALVENARIA ESTRUTURAL.....	34
2.1.1 Componentes da alvenaria estrutural.....	35
2.1.2 Comportamento mecânico das paredes de alvenaria estrutural	39
2.2 SOBRE ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	42
2.2.1 Contextualização	43
2.2.2 Modelos de incêndio.....	44
2.2.3 Curva RILEM TC 200-HTC:2007	48
2.2.4 Tempo requerido de resistência ao fogo	48
2.2.5 Mecanismos de transferência de calor	50
2.2.6 Critérios normativos da alvenaria em situação de incêndio	52
2.3 ENSAIO DE ULTRASSOM: VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO (VPU) ..	55
2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	58
2.4.1 Protocolo de pesquisa	58
2.4.2 Resultados obtidos	60
2.5 RESUMO DO CAPÍTULO	77
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL I: BLOCOS DE CONCRETO.....	79
3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	79
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO	80
3.2.1 Caracterização geométrica.....	80
3.2.2 Caracterização física	83
3.3 ENSAIOS EM ELEVADAS TEMPERATURAS	84
3.4 ENSAIOS DE ULTRASSOM.....	88
3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO ...	96
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL II: ARGAMASSAS E PRISMAS DE DOIS BLOCOS	101

4.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	101
4.2 ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	103
4.2.1 Materiais utilizados	103
4.2.2 Testes para definição da argamassa	104
4.2.3 Confeção da argamassa	106
4.3 PRISMAS DE ALVENARIA	108
4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PRISMAS DE ARGAMASSA.....	108
4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ARGAMASSA	110
4.6 ENSAIOS EM ELEVADAS TEMPERATURAS	112
4.6.1 Argamassas de assentamento	114
4.6.2 Prismas de alvenaria	116
4.7 ENSAIOS DE ULTRASSOM.....	118
4.7.1 Argamassa de assentamento	119
4.7.2 Prismas de alvenaria	125
4.8 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO .	133
4.8.1 Argamassa de assentamento	133
4.8.2 Prismas de alvenaria	136
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	140
5.1 BLOCOS DE CONCRETO	140
5.1.1 Velocidade de pulso ultrassônico nos blocos de concreto	140
5.1.2 Propriedades mecânicas dinâmicas dos blocos de concreto	147
5.1.3 Propriedades mecânicas estáticas dos blocos de concreto.....	152
5.1.4 Relação entre as velocidades de pulso ultrassônico e propriedades mecânicas estáticas dos blocos de concreto.....	157
5.1.5 Velocidade de pulso ultrassônico das argamassas	162
5.1.6 Propriedades mecânicas dinâmicas das argamassas	166
5.1.7 Propriedades mecânicas estáticas das argamassas.....	170
5.1.8 Relação entre as velocidades de pulso ultrassônico e propriedades mecânicas estáticas das argamassas de assentamento	174
5.2 PRISMAS DE ALVENARIA	179
5.2.1 Velocidade de pulso ultrassônico nos prismas de alvenaria	179
5.2.2 Propriedades mecânicas estáticas dos prismas de alvenaria	187
5.2.3 Relação entre as velocidades de pulso ultrassônico e propriedades mecânicas estáticas dos prismas de alvenaria.....	192

6 CONCLUSÕES.....	196
REFERÊNCIAS	201

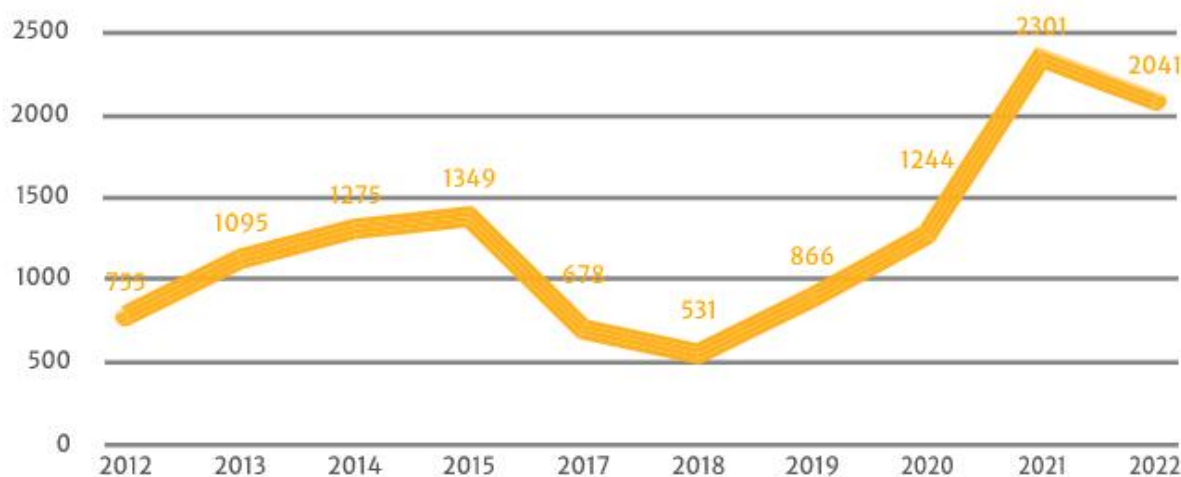
1 INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo multifuncional, no qual os elementos estruturais também desempenham funções de vedação, subdivisão dos espaços, isolamento termoacústico e proteção contra intempéries e incêndio. Esse sistema, composto por unidades, usualmente blocos vazados de concreto ou cerâmicos, unidos por juntas de argamassa, tem sido amplamente adotado na construção civil brasileira devido à sua eficiência e versatilidade, proporcionando economia de tempo e material, além da redução do volume de resíduos na obra, conforme destacado em Ramalho e Corrêa (2003).

Em Parsekian, Medeiros e Sipp (2018) se ratifica que, atualmente, a alvenaria estrutural é extensivamente utilizada em todas as diferentes regiões do Brasil, sendo reconhecida como um ramo consolidado da Engenharia Civil. Sabe-se que, semelhantemente a qualquer outro tipo de estrutura, as edificações em alvenaria estrutural estão sujeitas a situações de incêndio. No entanto, em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2022), destaca-se a escassez de informações sobre as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais e componentes construtivos da alvenaria estrutural no país, o que se reflete na ausência de uma norma nacional que prescreva critérios de dimensionamento para alvenaria estrutural em situações de incêndio.

Em relação à ocorrência de incêndios, estatísticas globais revelam elevado número de mortes anualmente. De acordo com o Center of Fire Statistics – CTIF (2022), incêndios em edificações são frequentes em todo o mundo, e representam cerca de 32% das ocorrências registradas. No Brasil, de acordo com o Instituto Sprinkler Brasil (2023), o aumento de ocorrências de incêndios estruturais é evidente, com 2301 casos registrados no ano de 2021, quase o dobro do registrado em 2015, como ilustrado na Figura 1.1.

Figura 1.1: Incêndios estruturais noticiados por ano no Brasil



Fonte: Instituto Sprinkler Brasil (2023)

No âmbito internacional, existem normas específicas para o dimensionamento da alvenaria estrutural nesta situação, como por exemplo o Eurocode 6 (EN 1996-1-2:2005), ACI/TMS 216.1:2014 e AS 3700:2018. No entanto, como ressaltado em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2022), sabe-se que particularidades relacionadas ao tipo de material e mão-de-obra executiva diferem bastante em função da região, sendo assim, a aplicação das normas internacionais pode conduzir a resultados nem sempre representativos da realidade brasileira.

Nesse contexto, atualmente, há uma crescente de estudos dedicados à investigação do comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio. Além das pesquisas conduzidas na Universidade de São Paulo (USP) nos últimos anos, investigações também têm sido realizadas por grupos de pesquisa da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), demonstrando o engajamento da comunidade acadêmica nessa área.

Diante desses desafios, os ensaios não destrutivos se apresentam como método promissor de investigação nessas situações, podendo ser uma alternativa aos métodos de ensaios estáticos normatizados na avaliação do comportamento mecânico residual dos elementos de alvenaria estrutural. Em Fernandes Neto (2023), destaca-se que dentre as técnicas não destrutivas, o método da velocidade de pulso ultrassônico (VPU) se apresenta como alternativa eficaz e consistente para analisar estruturas e materiais. Esse método permite, a partir da obtenção da velocidade do pulso ultrassônico, avaliar características como homogeneidade, profundidade de fissuras, detecção de vazios, presença de falhas e degradação do material, bem como estimar as propriedades mecânicas dos materiais.

Diante do exposto, fica evidenciada a necessidade de aprofundar os conhecimentos sobre o comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio, bem como, a possibilidade da utilização dos ensaios não destrutivos de ultrassom para avaliação das estruturas de alvenaria estrutural em situação de incêndio. Nesse sentido, é imprescindível a realização de estudos que visem a investigação do comportamento mecânico residual dos elementos da alvenaria estrutural, fornecendo informações que contribuam com a elaboração de norma nacional direcionada à alvenaria estrutural em situação de incêndio.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar, por meio de ensaios de ultrassom, as propriedades mecânicas residuais dos componentes da alvenaria estrutural com blocos de concreto submetidos a altas temperaturas.

Como objetivos específicos tem-se:

- Analisar o comportamento mecânico residual de blocos de concreto, argamassas de assentamento e prismas de alvenaria após a exposição a diferentes níveis de temperaturas;
- Verificar a influência da elevação de temperatura nas velocidades de propagação das ondas longitudinal e transversal em elementos de alvenaria estrutural, avaliando também, quando possível, as propriedades mecânicas dinâmicas associadas;
- Estabelecer relações analíticas entre os parâmetros obtidos nos ensaios de ultrassom (velocidade de pulso ultrassônico e módulos de elasticidade dinâmicos) e as propriedades mecânicas estáticas;
- Contribuir para definição futura de desenvolvimento de um procedimento experimental para avaliação do comportamento mecânico de elementos de alvenaria estrutural em elevadas temperaturas, incluindo a utilização de ensaios de ultrassom.

1.2 JUSTIFICATIVA

Como destacado anteriormente, os sistemas estruturais em alvenaria têm sido amplamente utilizados no Brasil, por conta das vantagens técnicas e econômicas associadas à sua utilização. Sabe-se que uma vez que a estrutura passa a ser utilizada, ela está exposta a diversos processos de degradação, inclusive a situações acidentais, como o incêndio. Contudo, o comportamento dos elementos constituintes da alvenaria estrutural quando submetidos a elevadas temperaturas ainda é pouco abordado nas pesquisas. No âmbito nacional, isso se reflete, por exemplo, na inexistência de um código normativo que regule os procedimentos para verificação da segurança no dimensionamento dos elementos de alvenaria estrutural em situação de incêndio, tornando necessária a consulta a códigos internacionais.

Nesse contexto, a ABNT criou a comissão de estudo ABNT/CE – 002:123.010 para estabelecer diretrizes visando a normatização nacional sobre alvenaria estrutural em situação de incêndio. Tal iniciativa tem mobilizado pesquisas com o objetivo de avaliar o comportamento dos elementos de alvenaria estrutural sob elevadas temperaturas, contribuindo com análises teóricas, experimentais ou simulações numéricas.

Segundo Kodur e Harmathy (2016), o comportamento de uma estrutura em alvenaria estrutural em situação de incêndio depende das propriedades térmicas e mecânicas dos seus componentes isoladamente ou em conjunto. Sendo assim, entende-se a importância do

desenvolvimento de programas experimentais direcionados à caracterização dos elementos de alvenaria estrutural sob altas temperaturas.

Em relação a essa caracterização, a utilização dos ensaios não destrutivos pode oferecer uma abordagem valiosa, uma vez que proporciona a avaliação de propriedades físicas e mecânicas sem alterar a capacidade resistente do corpo de prova, diferentemente dos ensaios usuais estáticos. Entre os ensaios não destrutivos, destaca-se o ensaio de ultrassom, o qual pode ser aplicado de maneira eficaz na avaliação da integridade física das estruturas e na previsão das propriedades mecânicas dinâmicas e estáticas de um material, por meio da aferição da velocidade de pulso ultrassônico.

Visto o exposto, julga-se de grande relevância a elaboração de um estudo como este, que visa avaliar as propriedades mecânicas estáticas residuais dos principais componentes da alvenaria estrutural, tais como blocos de concreto, argamassa de assentamento e prismas de alvenaria, por meio da utilização de ensaios de ultrassom. Entende-se que esses resultados são fundamentais para aprofundar a compreensão do desempenho desses elementos pós aquecimento.

1.3 METODOLOGIA

Com a finalidade de atingir os objetivos estabelecidos, a metodologia desta pesquisa foi dividida em quatro etapas principais: revisão bibliográfica sistemática, programa experimental I, programa experimental II e análise dos resultados obtidos.

- **Revisão bibliográfica:** nessa etapa foram investigados os principais conceitos relacionados aos três grandes temas abordados neste trabalho: alvenaria estrutural, o fenômeno do incêndio e ensaios de ultrassom. Além disso, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática para mapear o panorama atual da utilização do ultrassom na investigação de elementos da alvenaria estrutural em situação de incêndio, bem como identificar as produções científicas mais relevantes na área. Diante dessa etapa, os conceitos e métodos pesquisados puderam ser discutidos e aplicados de maneira consistente no desenvolvimento do trabalho.
- **Programa experimental I:** essa etapa consistiu na condução de ensaios nos blocos de concreto, abrangendo ensaios para obtenção das propriedades geométrica e física, ensaios térmicos seguindo a curva proposta pela RILEM TC 200-HTC:2007 para diferentes temperaturas de interesse (200, 400, 600 e 800 °C), ensaios de ultrassom, e por fim, os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático.

- **Programa experimental II:** nessa fase foram realizados os ensaios de caracterização geométrica e física, ensaios térmicos, ultrassônicos e de compressão nas argamassas de assentamento e nos prismas de alvenaria.
- **Análise dos resultados:** essa etapa consistiu no processamento dos dados obtidos nos programas experimentais, incluindo a confecção de tabelas, gráficos, obtenção de curvas residuais e tratamento estatístico. Por meio dessa análise, foi possível caracterizar o comportamento mecânico dos componentes de alvenaria em elevadas temperaturas, além disso, estabelecer relações analíticas envolvendo as suas propriedades mecânicas dinâmicas e estáticas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O corpo da dissertação foi estruturado em seis capítulos. No primeiro capítulo, introduz-se o tema do trabalho, apresentando sua contextualização, os objetivos geral e específicos, a justificativa da escolha do tema e a metodologia aplicada.

No segundo capítulo, que se refere à revisão bibliográfica, são apresentados os principais conceitos relacionados ao tema de pesquisa, tais como alvenaria estrutural, incêndio e ultrassom. Além disso, é apresentada a revisão bibliográfica sistemática realizada, cujo objetivo foi identificar o estado da arte e os principais trabalhos divulgados na comunidade científica acerca dos temas abordados nesta dissertação.

No terceiro capítulo, é detalhada a metodologia e os resultados do Programa experimental I, que abrangeu apenas os ensaios realizados nos blocos de concreto sob elevadas temperaturas. No quarto capítulo, por sua vez, é abordada a metodologia e os resultados do Programa experimental II, voltado à investigação das argamassas de assentamento e dos prismas de alvenaria sob altas temperaturas.

No quinto capítulo, são conduzidas análises e discussões acerca dos resultados obtidos nos programas experimentais, propondo relações entre as propriedades dinâmicas e estáticas aferidas, além de comparações com normas vigentes e trabalhos científicos.

Por fim, no sexto capítulo constam as principais conclusões extraídas das análises experimentais deste trabalho, como também sugestões para trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são abordados os principais conceitos inerentes aos principais temas abordados neste trabalho, no caso, *a alvenaria estrutural, o fenômeno do incêndio e os ensaios de ultrassom*. Em seguida, é descrito o processo de revisão bibliográfica sistemática que visou identificar o panorama atual da utilização do ultrassom na investigação de elementos da alvenaria estrutural em situação de incêndio, bem como os principais trabalhos divulgados na comunidade científica relativos aos temas de interesse.

2.1 ALVENARIA ESTRUTURAL

A alvenaria estrutural é um dos sistemas mais antigos da história da humanidade. Segundo exposto em Ramalho e Corrêa (2003), construções monumentais como as Pirâmides, o Farol de Alexandria, e o Coliseu Romano foram erguidas com base nos princípios desse sistema e permaneceram intactas por muitos anos. Em Oliveira Junior (1992), também é destacado a presença da alvenaria estrutural nas construções de castelos e catedrais na Idade Média, onde as paredes atingiam espessuras de 2 a 2,5 m. Isso se devia ao desconhecimento acerca do comportamento resistente dos materiais constituintes, bem como à falta de métodos de cálculo precisos na época, levando ao dimensionamento empírico.

Em relação ao histórico da alvenaria estrutural no Brasil, conforme mencionado em Ramalho e Corrêa (2003), o sistema construtivo em alvenaria é utilizado desde a chegada dos portugueses no início do século XVI. No entanto, em se tratando da alvenaria com blocos estruturais, pode-se supor que os primeiros edifícios tenham sido construídos em São Paulo no ano de 1966, possuindo apenas quatro pavimentos.

Segundo o autor, em 1972, também em São Paulo, foram construídos edifícios mais elevados em alvenaria armada de blocos de concreto, como o condomínio “Central Parque da Lapa”, com quatro blocos de 12 pavimentos. Apenas em 1977, tem-se notícia dos primeiros edifícios em alvenaria não-armada. A partir daí, o sistema se firmou como uma alternativa eficiente e econômica para construções de edificações residenciais e também industriais (RAMALHO e CORRÊA, 2003).

Nos dias de hoje, a utilização deste sistema tem crescido cada vez mais no país devido a diversos fatores. Conforme defendido em Roman, Mutti e Araújo (1999), a alvenaria estrutural possibilita a incorporação dos conceitos de racionalização, produtividade e qualidade, gerando construções com bom desempenho tecnológico aliado a baixos custos. Em Mohamad

(2007), corrobora-se que as grandes vantagens econômicas oportunizadas pelo sistema estão relacionadas com a otimização do processo de construção por meio da utilização de técnicas simplificadas de execução, facilidade no controle das etapas das obras e redução do desperdício de materiais.

De modo geral, a norma que rege os parâmetros de projeto, execução e controle e métodos de ensaio para alvenaria estrutural é a ABNT NBR 16868:2020. Especificamente para os blocos de concreto, as recomendações são realizadas por meio da ABNT NBR 6136:2016, “Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – requisitos”, e pela ABNT NBR 12118:2013, “Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – métodos de ensaio”.

2.1.1 Componentes da alvenaria estrutural

Conforme Ramalho e Corrêa (2003), a alvenaria estrutural é uma solução técnica caracterizada que se destaca pela presença de paredes que possuem capacidade portante, cuja transmissão das ações ocorre por meio das tensões de compressão. O sistema é constituído por blocos, normalmente vazados, feitos de concreto, cerâmica ou sílico-calcário, juntas de argamassa, graute, armaduras e revestimento.

O escopo deste trabalho se restringe ao estudo da alvenaria estrutural composta por blocos de concreto, não armada e não grauteada. Portanto, a seguir, são destacadas as principais características dos blocos de concreto e da argamassa de assentamento.

2.1.1.1 Bloco de concreto

O bloco estrutural é o principal responsável pelo bom desempenho da alvenaria estrutural em relação aos esforços de compressão. Além disso, as unidades são responsáveis por outras características importantes das paredes de alvenaria, tais como resistência ao fogo, estabilidade, precisão dimensional, estética, isolamento térmico e acústico, além das capacidades resistentes à tração e ao cisalhamento, bem como garantir a durabilidade da estrutura (SOARES, 2011). Como mencionado anteriormente, os blocos estruturais podem ser fabricados a partir de diversos materiais, como concreto, cerâmica, sílico-calcário, entre outros.

De acordo com o exposto em Medeiros (2022), os blocos vazados de concreto utilizados no Brasil (Figura 2.1) geralmente são constituídos por agregados de peso normal, ou seja, possuem densidade e peso convencionais. Esses blocos são fabricados por meio de grandes prensas vibratórias com forte energia de compactação e baixo consumo de cimento. Esse

processo, conhecido como vibro-prensagem, confere ao concreto uma consistência bem seca, sendo esse denominado de concreto vibro-prensado. Geralmente, esses blocos apresentam aproximadamente 50% de área de vazios e o desenho da seção transversal interna varia de acordo com o fornecedor.

Figura 2.1: Blocos de concreto armazenados sobre paletes



Fonte: Jarfel (2018)

Na ABNT NBR 6136:2016, os blocos de concreto são classificados em famílias de acordo com as dimensões nominais atribuídas pelo fabricante, bem como são designados para as classes A, B e C, largura e espessura mínima para as paredes longitudinais e transversais das unidades. Além disso, são apresentados na norma requisitos físico-mecânicos em função da classe do bloco e de sua função estrutural. Na Tabela 2.1, são apresentadas as exigências quanto à resistência característica à compressão axial, índice de absorção e retração dos blocos de concreto, sendo esse último um ensaio facultativo.

Tabela 2.1: Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração

Classificação	Classe	f _{bk} (MPa)	Absorção (%)				Retração (%)
			Agregado normal		Agregado leve		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	f _{bk} ≥ 8,0	≤ 9,0	≤ 8,0			
	B	4,0 ≤ f _{bk} < 8,0	≤ 10,0	≤ 9,0	≤ 16,0	≤ 13,0	≤ 0,065
Com ou sem função estrutural	C	f _{bk} ≥ 3,0	≤ 11,0	≤ 10,0			

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6136:2016

2.1.1.2 Argamassa de assentamento

A argamassa de assentamento é utilizada para solidarizar e permitir a aderência entre os blocos, bem como uniformizar e transmitir as tensões atuantes entre os elementos de alvenaria (FERNANDES NETO, 2020). Conforme destacado em Ramalho e Corrêa (2003), as juntas de argamassa absorvem pequenas deformações e resistem às condições ambientais, impedindo entrada de água e vento nas edificações. Em Haach, Vasconcelos e Lourenço (2011), destaca-se que a argamassa é responsável por distribuir uniformemente as tensões na alvenaria, corrigir irregularidades dos blocos e acomodar deformações associadas às expansões térmicas e retração. Além disso, rege o comportamento não linear da alvenaria, exercendo uma forte influência na deformação axial das paredes de alvenaria e na aderência entre o bloco e a junta.

A argamassa é composta basicamente por cimento Portland, cal, areia e água. O cimento Portland é o principal responsável pela resistência mecânica da mistura, no entanto, seu uso excessivo ocasiona a redução na trabalhabilidade e capacidade de acomodação das deformações. Por outro lado, a utilização da cal na mistura contribui para a trabalhabilidade e a capacidade de deformação em detrimento da capacidade resistente da argamassa. A areia, por sua vez, é um material de baixo custo que viabiliza o uso das misturas de argamassa, substituindo os aglomerantes mais onerosos.

São características importantes para argamassa: trabalhabilidade, aderência, resistência, plasticidade, durabilidade e capacidade de retenção de água. A trabalhabilidade é avaliada com a argamassa ainda no estado fresco por meio do índice de consistência, obtido através do ensaio de consistência descrito na ABNT NBR 13276:2016. No estado endurecido é possível caracterizar a argamassa quanto à aderência e resistência à compressão e tração. Em relação à resistência à compressão, em Gomes (1983) é mencionado que o aumento exagerado da resistência da argamassa faz com que as deformações decorrentes do carregamento não sejam acomodadas pela alvenaria, levando a parede à ruptura frágil.

É recomendado pela ABNT NBR 16868-1:2020 que as argamassas possuam resistência à compressão de até 1,5 vezes a resistência característica do bloco. Já na ABNT NBR 13281-2:2023 são estabelecidos requisitos mais específicos em relação a resistência à compressão da argamassa para assentamento (f_a), sendo essa definida de acordo com a resistência característica à compressão do bloco (f_{bk}), conforme demonstrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Classes de uso e respectivos critérios de resistência à compressão da argamassa inorgânica para assentamento das unidades de alvenaria estrutural

Classes de uso	Classe de resistência à compressão da argamassa - f_a (MPa)	Sugeridas para as seguintes faixas de uso em relação à resistência do bloco – f_{bk} (MPa)
AAE5	$5,0 \leq f_a < 8,0$	$3,0 \leq f_{bk} \leq 6,0$
AAE8	$8,0 \leq f_a < 12,0$	$8,0 \leq f_{bk} \leq 10,0$
AAE12	$12,0 \leq f_a < 16,0$	$12,0 \leq f_{bk} \leq 16,0$
AAE16	$16,0 \leq f_a < 20,0$	$18,0 \leq f_{bk} \leq 20,0$
AAE20	$20,0 \leq f_a < 24,0$	$22,0 \leq f_{bk} \leq 24,0$
AAEE (Especial)	$f_a \geq 24,0$	Sujeitas à especificação para cada obra por especialistas

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 13281-2:2023

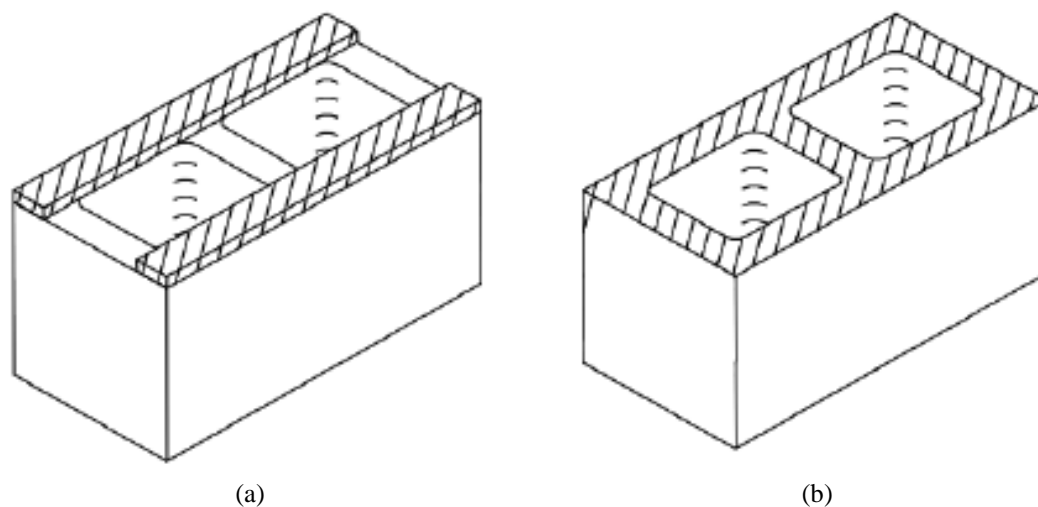
Em relação à espessura das juntas de argamassa, é recomendado na ABNT NBR 16868-1:2020 que a espessura das juntas horizontais seja de 10 mm. Em virtude da pequena espessura da junta de argamassa em relação às dimensões do bloco, existe um confinamento que a torna menos vulnerável à ruptura, mesmo quando a própria possui resistência à compressão relativamente baixa.

Em Ramalho e Corrêa (2003), é apontado que à medida que a espessura da junta aumenta, a resistência da parede decresce devido à redução do seu confinamento. Na mesma referência citada anteriormente, argumenta-se que argamassas com altas resistências podem reduzir a resistência final da parede de alvenaria. Além disso, as propriedades da argamassa estão diretamente relacionadas à aderência entre o bloco e a argamassa, e, portanto, à resistência à tração e ao cisalhamento da alvenaria.

No processo de construção, existem dois tipos de argamassamento ou assentamento dos blocos: parcial e total. No argamassamento parcial (Figura 2.2a), a argamassa é aplicada apenas nas paredes longitudinais dos blocos, enquanto no argamassamento total (Figura 2.2b), a argamassa é aplicada em todas as faces das paredes das unidades.

Essa definição pode ser determinante em relação à produção e rendimento da obra (OLIVEIRA, 2014). O tipo de argamassamento pode influenciar a resistência da alvenaria, a distribuição de tensões, a ocorrência de fissuras e a ruptura das paredes estruturais. Por exemplo, a ausência de argamassa nos septos dos blocos provoca concentração de tensões, reduzindo a resistência da alvenaria, contudo, promovem uma maior estanqueidade.

Figura 2.2: Tipos de argamassamento: (a) total e (b) parcial



Fonte: Oliveira (2014)

2.1.2 Comportamento mecânico das paredes de alvenaria estrutural

Neste tópico são apresentadas informações relacionadas ao comportamento mecânico das paredes de alvenaria estrutural, com ênfase na resistência à compressão e no módulo de elasticidade longitudinal estático.

2.1.2.1 Resistência à compressão

O comportamento mecânico das paredes de alvenaria estrutural está intrinsecamente ligado às características e ao desempenho de cada um dos seus componentes. A principal influência nesse comportamento deriva da resistência dos blocos, juntamente com as parcelas de contribuições relacionadas à argamassa de assentamento e à execução dos elementos.

Em Ramalho e Corrêa (2003), é mencionado que a resistência à compressão é o parâmetro de resistência mais importante para a alvenaria estrutural. Em relação a isso, a ABNT NBR 16868-1:2020 prescreve que a resistência característica à compressão simples da alvenaria deve ser determinada com base em ensaios de paredes. No entanto, para o caso de alvenaria compostas por blocos de 190 mm de altura e junta de argamassa de 10 mm, esse valor pode ser estimado como 70% da resistência característica de compressão dos prismas de dois blocos ou 85% da resistência de pequenas paredes.

Além disso, na Tabela F.1 da norma citada, demonstrada na Tabela 2.3, são apresentados valores de referência para especificação das resistências da argamassa (f_a) e prisma (f_{pk}) em função da resistência do bloco (f_{bk}).

Tabela 2.3: Especificação dos materiais da alvenaria estrutural em função da resistência do bloco

f_{bk} (MPa)	f_a (MPa)	f_{pk} (MPa)	f_{pk}/f_{bk}
3,0	4,0	2,4	0,80
4,0	4,0	3,2	0,80
6,0	6,0	4,5	0,75
8,0	6,0	6,0	0,75
10,0	8,0	7,0	0,70
12,0	8,0	8,4	0,70
14,0	12,0	9,8	0,70
16,0	12,0	10,4	0,65
18,0	14,0	11,7	0,65
20,0	14,0	12,0	0,60
22,0	18,0	12,1	0,55
24,0	18,0	13,2	0,55

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 16868-1:2020

Como comentado em Leal (2022), devido ao elevado custo envolvido e, por vezes, à indisponibilidade de equipamentos necessários, os ensaios em paredes de alvenaria em escala natural acabam por ser inviáveis. Sendo assim, trabalhos presentes na literatura buscam estabelecer correlações entre a capacidade resistente de paredes e a resistência de elementos de alvenaria, como blocos, prismas e pequenas paredes. Como mencionado anteriormente, a ABNT NBR 16868-1:2020 também sugere esse tipo de correlação para determinação da resistência da alvenaria.

Com base nessa ideia, tem-se o conceito de “eficiência” da alvenaria, que aborda a influência da resistência dos blocos na resistência à compressão das paredes ou prismas de alvenaria. Na Tabela 2.4, são apresentados os valores de eficiência estimados em Ramalho e Corrêa (2003), para paredes ou prismas executados com blocos vazados de concreto, não-grauteados e utilizando argamassas usuais.

Tabela 2.4: Eficiências parede-bloco e prisma-bloco

Eficiência	Valor mínimo	Valor máximo
f_{par} / f_b	0,4	0,6
f_p / f_b	0,5	0,9
f_b – Resistência à compressão do bloco		
f_{par} – Resistência à compressão da parede		
f_p – Resistência à compressão do prisma		

Fonte: Adaptado de Ramalho e Corrêa (2003)

Segundo a última referência, a eficiência costuma variar bastante dependendo da forma, material e resistência dos blocos, mas normalmente, quanto mais resistente for o bloco, menor será a eficiência e vice-versa. Ao comparar o intervalo apresentado em Ramalho e Corrêa (2003) com a quarta coluna da Tabela 2.3, que expressa especificações da ABNT NBR 16868-1:2020 em relação à eficiência para prismas de alvenaria, observa-se que os valores estimados pelos autores extrapolam os limites apresentados pela norma, que, por sua vez, varia de 0,55 a 0,80, de acordo com a resistência do bloco.

Internacionalmente, o Eurocode 6 (EN 1996-1-1:2005) estabelece que a resistência característica à compressão da alvenaria ($f_{alv,k}$) pode ser definida por meio da resistência da unidade e da argamassa de assentamento, como demonstrado na Equação 2.1 que segue:

$$f_{alv,k} = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_a^{0,3} \quad (2.1)$$

Em relação à Equação 2.1, valem as definições:

f_b – Resistência à compressão da unidade;

f_a – Resistência à compressão da argamassa;

K – Constante tabelada que varia de acordo com o tipo de alvenaria utilizada, sendo que para alvenaria compostas por argamassa usuais e blocos de concreto, K varia de 0,35 a 0,55.

2.1.2.2 Módulo de elasticidade longitudinal estático

O módulo de elasticidade é uma propriedade importante na análise do comportamento mecânico da alvenaria, afetando diretamente sua deformabilidade e seus mecanismos de falha. A determinação do módulo de elasticidade tangencial, através do traçado do diagrama “tensão x deformação”, é uma abordagem viável. No entanto, é importante ressaltar que esse parâmetro pode apresentar uma considerável variabilidade devido aos diferentes tipos de unidades e argamassas que podem ser empregados na alvenaria.

Segundo Mohamad (2007), diversos estudos foram realizados para estabelecer a relação “tensão x deformação” na alvenaria estrutural, bem como para determinar o módulo de elasticidade em relação a diferentes tipos de blocos e argamassas. Com o objetivo de simplificar esse processo, diversos códigos normativos e pesquisadores propõem uma abordagem direta, vinculando o módulo de elasticidade à resistência à compressão da alvenaria. No entanto, conforme destacado em Ramalho e Corrêa (2003), o tema ainda suscita dúvidas e controvérsias

entre diversos autores, que acabam por apresentar relações diferentes para o cálculo do módulo, conforme demonstrado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Equações teóricas para o módulo de elasticidade da alvenaria

Referência	Equação
Colville, Miltenberger e Wolde-Tinsae (1993)	$E_{alv} = 666 \cdot f_{alv}$
Pedreschi (1998 apud RAMALHO e CORRÊA, 2003)	$E_{alv} = 1000 \cdot f_{pk}$
Ramalho e Corrêa (2003)	$E_{alv} = 800 \cdot f_{pk}$
EN 1996-1-1:2005	$E_{alv} = 1000 \cdot f_{alv,k}$
ACI 530-11:2011	$E_{alv} = 900 \cdot f_{alv}$
ABNT NBR 16868-1:2020	$E_{alv} = k \cdot f_{pk}$
E_{alv} – Módulo de elasticidade da alvenaria f_{alv} – Resistência à compressão da alvenaria determinada por ensaio de prismas $f_{alv,k}$ – Resistência característica à compressão da alvenaria k – Constante que varia entre 700, 750 ou 800, conforme a resistência do bloco. f_{pk} – Resistência característica à compressão dos prismas	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em se tratando das equações listadas na Tabela 2.5, observa-se que a relação proposta em Colville, Miltenberger e Wolde-Tinsae (1993), específica para blocos de concreto, é a que mais tende a subestimar o módulo de elasticidade. Por outro lado, a equação sugerida em Pedreschi (1998 apud RAMALHO e CORRÊA, 2003), também destinada exclusivamente para os blocos de concreto, tende a superestimar o módulo, assim como ocorre com o Eurocode 6 (2005) e o ACI 530-11:2011.

Vale ressaltar que no Eurocode 6 (2005), recomenda-se a aplicação de um fator de 0,6 ao módulo de elasticidade calculado para verificações de estado limite de serviço. Por fim, destaca-se a ABNT NBR 16868-1:2020, que estabelece um coeficiente intermediário na relação entre a resistência dos prismas e o módulo de elasticidade da alvenaria, variando de 700 a 800.

2.2 SOBRE ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Nesta seção, são abordados os principais conceitos e informações relacionados ao fenômeno do incêndio e suas implicações nas estruturas. Nesse sentido, inicialmente é apresentada uma breve contextualização sobre o tema, seguida da exposição de conceitos fundamentais, como modelos de incêndio, tempo requerido de resistência ao fogo e mecanismos

de transferência de calor. Por fim, são apresentados os critérios normativos existentes para alvenaria em situação de incêndio.

2.2.1 Contextualização

Segundo a National Fire Protection Association – NFPA (2016), o fogo é um processo de oxidação que ocorre rapidamente, emitindo luz, fumaça e calor, resultando em elevação de temperatura. Conforme descrito em Seito *et al.* (2008), quatro elementos são essenciais para a existência do fogo: combustível (material que será oxidado), comburente (que sofre redução durante o processo), calor ou fonte de ignição, e reação em cadeia.

Em relação ao incêndio, Wang (2002) o define como o fogo não controlado e destaca que suas consequências podem causar grandes malefícios quando o combate não ocorre de maneira eficaz. Por sua vez, na ISO 8421-1:1987, o incêndio é descrito como um processo de combustão rápida que se dispersa de maneira descontrolada no espaço e tempo em que está inserido.

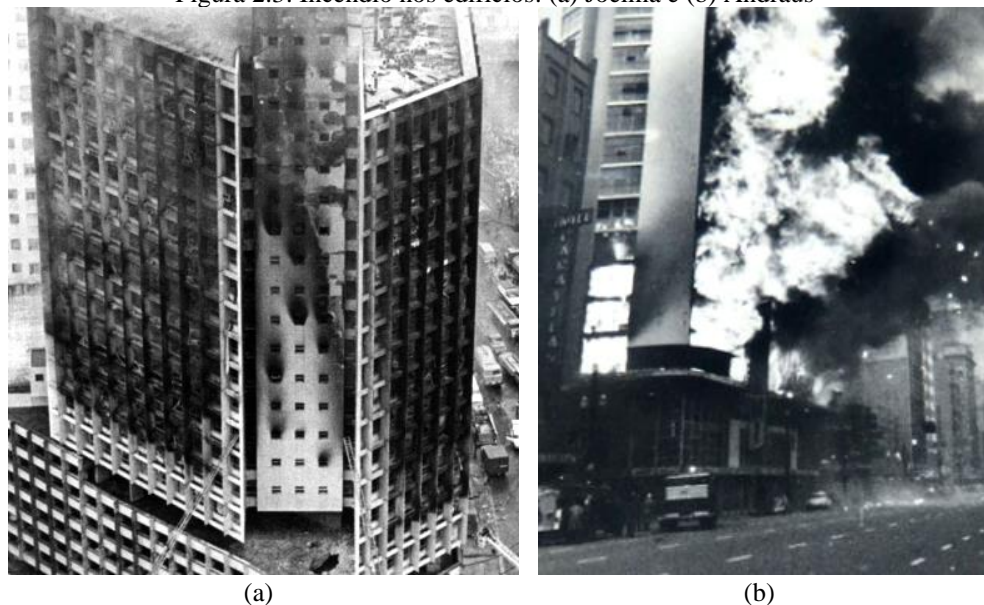
Conforme Seito *et al.* (2008), diversos fatores influenciam o início e o desenvolvimento dos incêndios, incluindo a geometria e dimensões do ambiente, a disposição dos materiais inflamáveis no local, as características de queima dos materiais envolvidos, a ventilação do ambiente e as condições climáticas instantâneas. De acordo com Nunes (2005), grande parte dos incêndios começa de forma reduzida, resultando do contato entre uma fonte de energia térmica, mecânica ou elétrica e algum material combustível, dando início ao processo de combustão, que provoca a geração de calor, gases e fumaça, responsáveis diretos pelos danos provocados pelo incêndio.

No contexto dos incêndios em edificações no Brasil, durante a década de 70, na cidade de São Paulo, os trágicos eventos nos edifícios Joelma e Andraus (Figura 2.3) ganharam visibilidade devida a expressiva quantidade de vítimas. De acordo com Regobello (2007), essas ocorrências impulsionaram a busca por soluções acerca da proteção contra incêndios e redução de danos.

Conforme Silva (2007), nos anos seguintes, a norma ABNT NBR 5672:1980 – “Exigências particulares das obras de concreto armado em relação à resistência ao fogo” foi elaborada. Embora tenha sido extinta em 2001, seu texto serviu como base para a criação da ABNT NBR 15200:2012, “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio”. Ainda, segundo a última referência, em 1996, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) instituiu uma comissão de estudos composta por representantes do meio universitário e outros

colaboradores do meio técnico, com o objetivo de desenvolver estudos e pesquisas relacionados ao tema, a fim de elaborar novas normas sobre o assunto.

Figura 2.3: Incêndio nos edifícios: (a) Joelma e (b) Andraus



Fonte: CBMMS (2018) e Fenacor (2017)

Atualmente, a ABNT disponibiliza uma variedade de normas relacionadas ao projeto de estruturas em situação de incêndio e à determinação da resistência ao fogo de elementos e componentes construtivos de edificações, bem como diretrizes que estipulam os requisitos mínimos de resistência ao fogo para esses elementos.

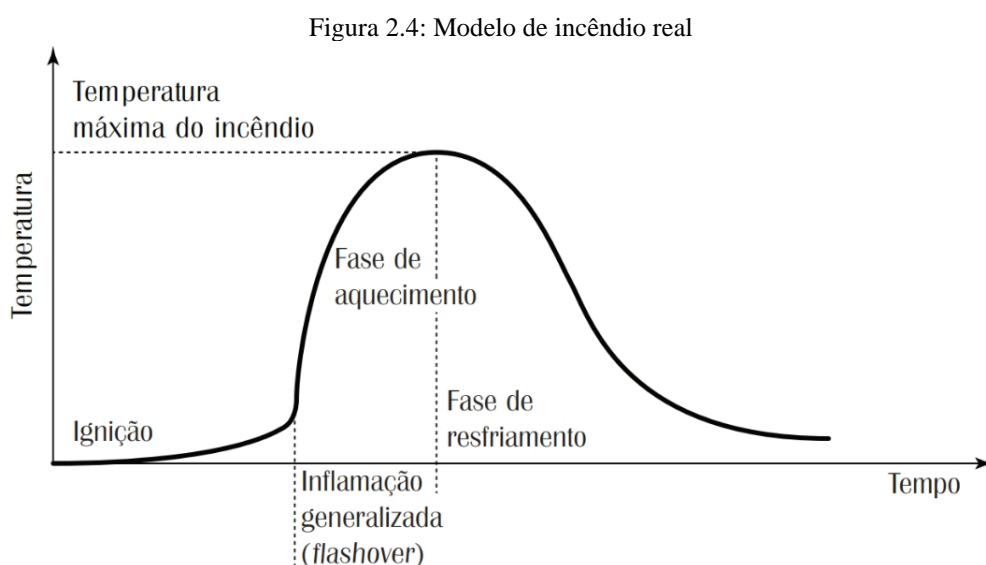
De acordo com Silva (2012), as normas modernas de segurança contra incêndio têm como objetivos principais: *proteção da vida, prevenção de incêndios e maneiras de evitar sua propagação para fora do compartimento*. Conforme destacado em Leal (2022), os métodos convencionais para a verificação da resistência das estruturas ao fogo iniciam com o dimensionamento de seus elementos em temperatura ambiente, os quais são protegidos com revestimentos que forneçam isolamento térmico, ou com camadas de sacrifício. Essa abordagem busca controlar as temperaturas no interior dos componentes estruturais, assegurando que ainda haja uma seção transversal íntegra, que seja suficiente para fornecer a resistência estrutural necessária em condições de incêndio (BUCHANAN e ABU, 2017).

2.2.2 Modelos de incêndio

Geralmente, os códigos e normas internacionais realizam a análise da estrutura em situação de incêndio por métodos tabulares. Entretanto, também permitem a análise por meio

de outros métodos, como ensaios em laboratório, desempenho histórico e simulações por modelos computacionais, desde que obedecem aos critérios estabelecidos pelas normas correspondentes (MEDEIROS, 2022).

Para a execução de experimentos que investiguem as ações do incêndio nas estruturas, é necessário definir a elevação de temperatura de modo que se tente simular um incêndio real. De acordo com Seito *et al.* (2008), a curva representativa de um incêndio real pode ser dividida em três fases distintas: *ignição, aquecimento e resfriamento*; conforme ilustrado na Figura 2.4.



Fonte: Silva (2012)

A *fase de ignição (pré-flashover)* representa o início da combustão e é caracterizada por baixas temperaturas. Nesta fase o incêndio ainda é considerado de baixas proporções, não oferecendo grandes riscos à integridade da estrutura. No entanto, conforme Regobello (2007), é a fase mais crítica em termos de segurança da vida humana, pois durante esse período há uma grande ocorrência de gases tóxicos.

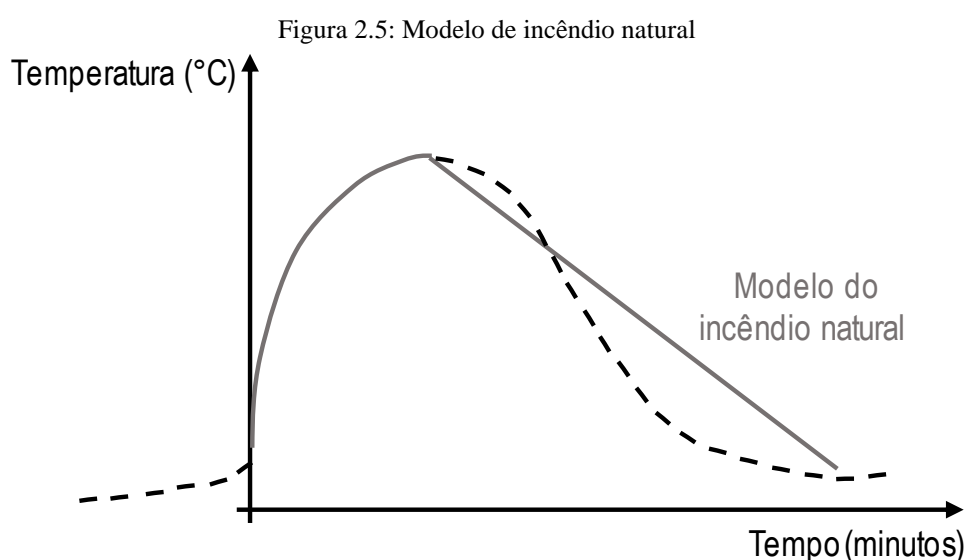
Após a fase de ignição, inicia-se a *fase de aquecimento*, caracterizada por um aumento brusco da temperatura, denominado *flashover ou instante da inflamação generalizada*. Neste momento, toda carga de incêndio (combustível) do ambiente entra em ignição, sendo tomado por grandes labaredas, gases e vapores combustíveis.

Por fim, tem-se a fase do *resfriamento*, na qual ocorre uma diminuição progressiva da temperatura dos gases, seja pela falta de combustível ou oxigênio, uma vez que todo material combustível se extinguiu, ou mesmo pela intervenção de uma brigada de incêndio (REGOBELLO, 2007).

Contudo, devido à grande variabilidade dos parâmetros envolvidos no desenvolvimento de um *incêndio real*, é difícil determinar uma curva representativa do mesmo. Para solucionar

esse problema, a representação do *incêndio real* pode ser substituída por modelos simplificados, como a curva de *incêndio natural* e a curva de *incêndio-padrão*.

O modelo de *incêndio natural* foi desenvolvido por meio de ensaios e modelos matemáticos e consiste em uma simplificação das condições de um incêndio real. Nesse modelo, a fase de ignição é desconsiderada, pois entende-se que nessa fase não há alteração na capacidade estrutural da edificação. Dessa forma, o modelo começa na fase de aquecimento, com o crescimento exponencial da temperatura, que ao atingir um valor máximo, entra na fase de resfriamento, que é linearizada por simplificação, conforme esquematizado na Figura 2.5.



Fonte: Adaptado de Kimura (2009)

Quanto aos modelos de *incêndio-padrão*, estes consistem em curvas simplificadas geralmente recomendadas pelas normas para padronizar as análises experimentais de estruturas em situação de incêndio. Essas curvas possuem apenas o ramo ascendente de aquecimento, tendo a fase de ignição e resfriamento desconsiderada.

No Brasil, a ABNT NBR 16965:2021 estabelece os métodos de ensaio aplicados para elementos estruturais para a determinação de resistência ao fogo. Essa norma recomenda a curva-padrão da ISO 834-1:1999 – “Fire resistance tests: Elements of building construction”, que, segundo Moreno Junior e Molina (2012), é a curva mais utilizada tanto no cenário nacional quanto internacional. Tal curva segue a relação demonstrada na Equação 2.2.

$$\theta = 345 \log(8t + 1) + \theta_0 \quad (2.2)$$

Outros exemplos de Curva de Incêndio-Padrão são as propostas pelas normas ASTM E119:2020 e pelo Eurocode 1 (EN 1991-1-2:2002). A curva apresentada pela ASTM

E119:2020 é definida por meio de vários pontos discretos. Buchanam e Abu (2017) mencionam a Equação 2.3 como aquela que melhor retrata a evolução de temperatura segundo este código.

$$\theta = \theta_0 + 750 \left[1 - e^{-3,79533\sqrt{t_h}} \right] + 170,41\sqrt{t_h} \quad (2.3)$$

O Eurocode 1 (2002) propõe a utilização de três curvas-padrão aplicadas em diferentes situações. Para ambientes em que a carga de incêndio é composta principalmente por materiais celulósicos, a norma recomenda o uso curva de incêndio-padrão apresentada pela ISO 834-1:1999 (Equação 2.2). Para representar o desenvolvimento da temperatura em ambientes e elementos estruturais externos, recomenda-se a Equação 2.4. Por fim, a norma recomenda a Equação 2.5 para representação de incêndios cujo combustível predominante é formado por hidrocarbonetos. Na Figura 2.6 estão ilustradas as curvas de *incêndio-padrão* mencionadas.

$$\theta = 660[1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}] + \theta_0 \quad (2.4)$$

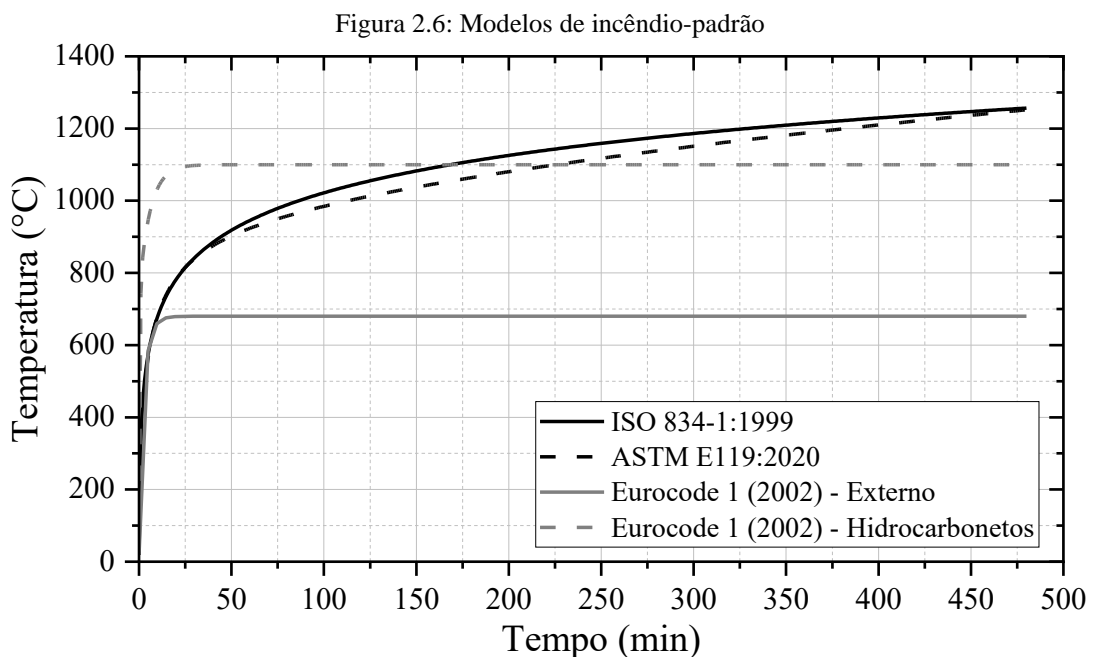
$$\theta = 1080[1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}] + \theta_0 \quad (2.5)$$

Em relação às Equações 2.2 a 2.5, valem as definições:

t é o tempo decorrido em minutos; t_h é o tempo decorrido em horas;

θ_0 é a temperatura inicial do ambiente ($^{\circ}\text{C}$), usualmente adotada igual a 20°C ;

θ é temperatura atual no instante t ($^{\circ}\text{C}$), após o início do aquecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.3 Curva RILEM TC 200-HTC:2007

Em se tratando de programas experimentais voltados para a caracterização de materiais em elevadas temperaturas, onde o objetivo principal é obter um conhecimento detalhado acerca das suas propriedades físicas e mecânicas em diferentes temperaturas, os pesquisadores geralmente optam por taxas de aquecimento mais lentas, variando entre 0,5 °C/min a 5 °C/min. Essa abordagem permite garantir a uniformidade da temperatura em todo o corpo de prova. Nesses casos, não é recomendado utilizar as curvas de incêndio-padrão.

Nesse sentido, destaca-se a curva proposta pela RILEM TC 200-HTC:2007, que fornece recomendações para a avaliação da resistência mecânica do concreto moldado úmido sob condições de temperaturas elevadas. A referida norma estabelece diretrizes para o aquecimento e resfriamento dos espécimes, os quais variam em termos de taxas e duração conforme o tamanho das amostras adotadas. As taxas de aquecimento e resfriamento especificadas pela RILEM TC 200-HTC:2007 são de 0,5 °C/min, 1 °C/min, 2 °C/min e 4 °C/min, conforme o diâmetro da amostra cilíndrica iguais a 150, 100, 80 e 60 mm, respectivamente. Após atingida temperatura alvo, essa deve ser mantida por 60 minutos. O processo de resfriamento deve ser conduzido de forma gradual, com taxa, no máximo, igual a de aquecimento.

A curva foi utilizada em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2022) que desenvolveram, a partir das diretrizes da RILEM TC 200-HTC:2007, uma metodologia para avaliação da resistência mecânica residual de blocos de concreto em elevadas temperaturas.

2.2.4 Tempo requerido de resistência ao fogo

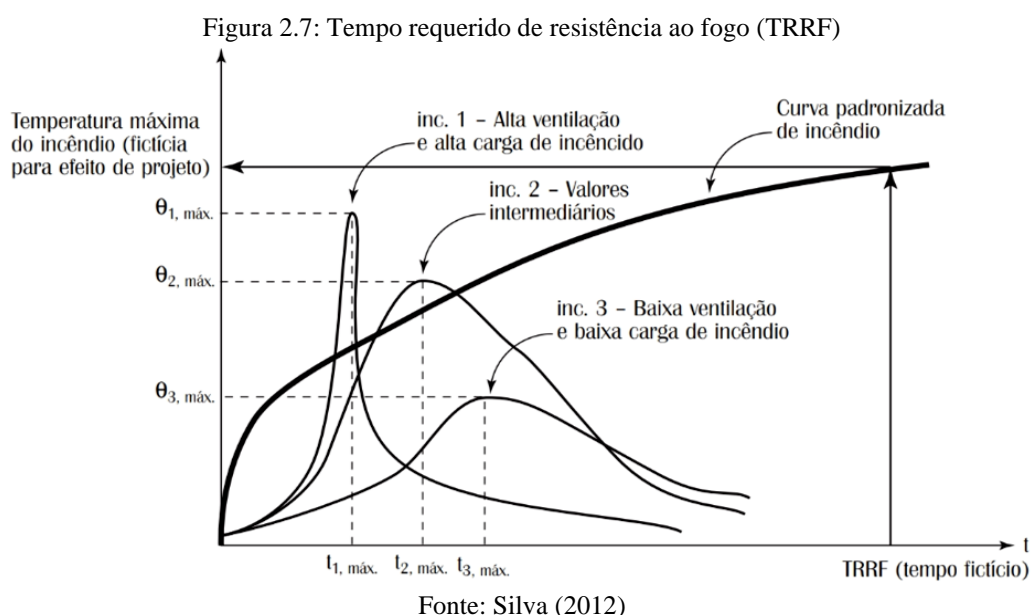
Em elevadas temperaturas, os materiais estruturais geralmente sofrem alterações em suas propriedades mecânicas, podendo perder parcial ou totalmente sua capacidade de resistir aos esforços para as quais foram projetados (RODOVALHO, 2018).

Segundo Leal (2022), a resistência dos elementos ao fogo pode ser definida como sua capacidade de suportar a ação do incêndio, impedindo sua propagação e preservando a estabilidade da edificação por um determinado período de tempo. Nesse contexto, as normas geralmente estabelecem condições que as edificações devem atender em situação de incêndio, utilizando como referência principal o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF).

O TRRF é definido pela ABNT NBR 14432:2001 como o tempo mínimo que um elemento construtivo deve resistir ao fogo, sujeito ao aquecimento baseado em curvas de incêndio-padrão. Nesse período, o elemento estrutural deve manter adequabilidade estrutural,

estanqueidade e isolamento, garantindo a segurança dos ocupantes na evacuação da edificação e da equipe de combate ao incêndio, além de minimizar os danos às edificações adjacentes.

Em Silva (2012), destaca-se a importância de compreender o esforço resistente de um elemento estrutural, o que requer o conhecimento das resistências dos materiais à temperatura atingida durante o incêndio. Geralmente, essa temperatura é simulada pelo modelo de incêndio-padrão, por sua simplicidade. A determinação do campo de temperaturas no elemento depende do tempo de duração do incêndio. Devido à natureza fictícia da curva de incêndio-padrão, as normas e códigos arbitram tempos fictícios altos, visando garantir uma margem de segurança para o campo de temperaturas, conforme ilustrado na Figura 2.7.



No contexto nacional, a ABNT NBR 14432:2001 permite a obtenção do TRRF de forma tabular, em função do uso e dimensões da edificação, conforme Tabela 2.6.

Tabela 2.6: TRRF de acordo com a ABNT NBR 14432:2001

Ocupação/Uso	Altura da edificação (metros)				
	$h \leq 6$	$6 < h \leq 12$	$12 < h \leq 23$	$23 < h \leq 30$	$h > 30$
Residencial	30	30	60	90	120
Hotéis	30	60	60	90	120
Comercial	60	60	60	90	120
Escritórios	30	60	60	90	120
Shoppings	60	60	60	90	120
Escolas	30	30	60	90	120
Hospitais	30	60	60	90	120
Industrial	60	60	90	120	120
Depósitos	60	60	90	120	120

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 14432:2001

Além da ABNT NBR 14432:2001, a Instrução Técnica N° 08/2018 (IT-08) do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, também recomenda requisitos para o TRRF, sendo na grande maioria das situações, valores correspondentes com os da ABNT NBR 14432:2001 (Tabela 2.6), mas com a diferença de que na IT-08 (2018) é estabelecido mais duas classes adicionais de altura de edificações. O TRRF também pode ser calculado de maneira analítica utilizando o método do tempo equivalente do Eurocode 1 (2002), conforme a Equação 2.6.

$$t_e = q_{fi,k} \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s \cdot W \cdot K \cdot M \quad (2.6)$$

Em relação a Equação 2.6, vale as definições:

t_e é o tempo equivalente mínimo em minutos;

$q_{fi,k}$ é o valor característico da carga e incêndio específicos, em MJ/m²;

γ_n é um coeficiente adimensional que considera a presença de medidas de proteção ativa;

γ_s é um coeficiente de segurança acerca do risco de incêndio e consequências do colapso da edificação;

W é um fator associado à ventilação e à altura do compartimento;

K é um fator associado às características do material de vedação do compartimento, em min.m²/MJ;

M é um fator dependente do material da estrutura, sendo igual a 1,0 para aço com revestimento contra fogo ou concreto, e 13,7^v para aço sem revestimento, onde v é o grau de ventilação da edificação.

2.2.5 Mecanismos de transferência de calor

Conforme Buchanan e Abu (2017), compreender a transferência de calor é fundamental para entender o comportamento das estruturas em situação de incêndio, uma vez que a elevação da temperatura representada nos modelos de incêndio está relacionada aos gases do ambiente em chamas, e não aos elementos da edificação. Em Leal (2022), é ressaltada a importância do entendimento da transferência de calor do ambiente incendiado para os diferentes tipos de elementos estruturais da edificação, o que ocorre por meio de três mecanismos, a condução, a convecção e a radiação, podendo se manifestar em conjunto ou separadamente.

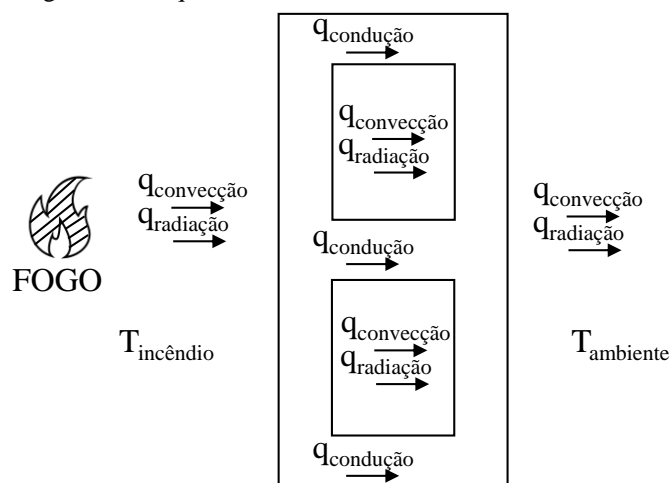
Em Buchanan e Abu (2017), a condução é descrita como um mecanismo de transferência de calor que ocorre nos materiais sólidos devido às interações envolvendo elétrons livres ou vibrações mecânicas da estrutura molecular. Este processo permite a propagação interna do calor nos elementos estruturais maciços ou entre elementos que estejam em contato

direto entre si. Além da diferença de temperaturas entre dois pontos, a existência de um meio físico é condição básica para que haja transferência por condução, sendo influenciada pelas propriedades físicas e térmicas do material, como densidade, calor específico e condutividade térmica. Portanto, a taxa de aquecimento devido à condução varia conforme o material.

A convecção é a transferência de calor causada pelo movimento dos fluídos. De acordo com a mesma referência citada anteriormente, esse processo desempenha papel importante na propagação de chamas e no transporte de gases quentes em ambientes submetidos a elevação de temperatura. Conforme ressaltado em Leal (2022), devido à variação da densidade dos fluídos mediante a mudança temperatura, em ambientes em chamas, por exemplo, os gases mais quentes tornam-se menos densos e tendem a subir, enquanto os menos aquecidos tendem a descer, por terem maior densidade, impulsionando um fluxo convectivo que acelera o aquecimento do ambiente e dos elementos estruturais presentes.

Finalmente, diferentemente dos mecanismos anteriores, a radiação não depende de um meio físico para sua ocorrência, uma vez que nesse mecanismo a transferência de calor se dá por meio da propagação de ondas eletromagnéticas. Conforme Buchanan e Abu (2017), esse é o principal mecanismo de transferência de calor das chamas quentes para os materiais combustíveis. De acordo com Rosemann (2011), nos elementos de alvenaria, a transferência de calor ocorre por *condução, convecção e radiação*, resultando em um fenômeno complexo devido às propriedades dos materiais envolvidos e às reações químicas na composição das argamassas, além da mudança de fase da umidade presente nos materiais. Como a transferência de calor ocorre em regime transiente, a distribuição de temperatura dentro do elemento estrutural acontece de maneira não linear. Na Figura 2.8 é demonstrado um esquema dos mecanismos de transferência de calor observados nos elementos de alvenaria.

Figura 2.8: Esquema de transferência de calor em alvenaria



Fonte: Adaptado de Rosemann (2011)

2.2.6 Critérios normativos da alvenaria em situação de incêndio

Conforme já comentado anteriormente, o comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio está intrinsicamente ligado à capacidade resistente de cada um de seus elementos em elevadas temperaturas, tanto individualmente quanto em conjunto. Tal resistência ao fogo refere-se à capacidade do elemento construtivo de manter suas funções para as quais foi projetado por um determinado tempo, apesar da exposição ao fogo.

Nesse cenário, as normas técnicas geralmente definem requisitos a serem atendidos pelas edificações em situação de incêndio. Segundo Medeiros (2022), os principais objetivos da verificação de estruturas nessas circunstâncias são: proteger vidas humanas, mitigar os riscos da vizinhança e da sociedade, e limitar os danos à propriedade exposta ao fogo.

No contexto nacional, ainda não há normas específicas para avaliar e dimensionar alvenaria estrutural em situação de incêndio. Diante disso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) instituiu recentemente uma comissão de estudos, que tem como propósito a inclusão de procedimentos para atender a essa necessidade na norma brasileira de projeto de edifícios de alvenaria estrutural, a ABNT NBR 16868:2020, atualmente em fase de revisão.

Atualmente, devido a essa ausência de normas específicas, tem-se como referência a ABNT NBR 14432:2001, já citada anteriormente, a qual estabelece requisitos para os elementos estruturais e de compartimentação em situação de incêndio nos edifícios em geral. Em se tratando da alvenaria sem função estrutural, a ABNT NBR 10636-1:2022 estabelece as condições de ensaio e a classificação de paredes divisórias com base em *critérios de estanqueidade e isolamento térmico* para avaliar sua resistência ao fogo. Outra referência nacional relevante no contexto da alvenaria estrutural em situação de incêndio é a Instrução Técnica Nº 08/2018 (IT-08) do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, que orienta a adesão às diretrizes do Eurocode 6 (EN 1996-1-2:2005) ou de normas internacionais equivalentes.

Além disso, é importante ressaltar que a ABNT NBR 15575-4:2021 também estabelece requisitos relacionados à resistência ao fogo dos componentes estruturais. A norma aborda os sistemas de vedação vertical, tanto internos quanto externos, nos quais se incluem as paredes de alvenaria estrutural nos edifícios. De modo similar à IT-08 (2018), a ABNT NBR 15575-1:2024 também orienta a utilização do Eurocode 6 (2005) para o desenvolvimento do projeto estrutural.

Em linhas gerais, os códigos e normas internacionais requerem que a estrutura deve satisfazer determinados critérios básicos de verificação:

- Resistência mecânica (R): considerada atendida quando a estrutura mantém sua capacidade de suporte de carga durante todo o tempo necessário de exposição ao fogo;
- Estanqueidade (E): alcançada quando não há passagem de chamas e gases através do elemento;
- Isolamento térmico (I): considerado satisfatório quando a temperatura média na face não exposta ao fogo não excede 140 °C e não ultrapassa 180 °C em qualquer ponto;
- Impacto mecânico (M): satisfatória quando um elemento de separação vertical, com características estruturais ou não, suporta o impacto da aplicação de uma carga concentrada horizontal.

Entre as normas internacionais relacionadas ao dimensionamento de alvenaria estrutural em situação de incêndio, destacam-se o código americano ACI/TMS 216.1:2014, a norma australiana AS 3700:2018 e o Eurocode 6 (2005).

Em relação ao ACI/TMS 216.1:2014, como indicado em Medeiros (2022), a verificação das paredes de alvenaria estrutural é realizada considerando valores mínimos para sua espessura equivalente, os quais são determinados de acordo com o tipo de bloco e o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). A norma contempla paredes com blocos de concreto ou cerâmicos, com ou sem função estrutural.

No que se refere à norma australiana AS 3700:2018, o dimensionamento está diretamente relacionado aos critérios de resistência mecânica (R), estanqueidade (E), e isolamento térmico (I). São disponibilizadas duas opções para o dimensionamento das paredes de alvenaria estrutural em situação de incêndio: utilizando um método tabular ou através de ensaios laboratoriais.

O método tabular adotado na norma australiana simplifica o processo de dimensionamento. Em relação ao critério de resistência mecânica, a norma estabelece limites para o índice de esbeltez das paredes em função do TRRF, abrangendo alvenarias com diferentes tipos de materiais, armada ou não armada.

A verificação da resistência ao fogo com base no critério de isolamento é realizada através de uma tabela que determina a espessura equivalente mínima necessária para a parede de acordo com o TRRF. Quanto à estanqueidade, a norma considera um elemento de alvenaria com adequada resistência ao fogo se ele satisfazer ambos os critérios de resistência mecânica e isolamento térmico, para o mesmo tempo requerido de resistência ao fogo.

Uma alternativa ao método tabular é o dimensionamento com base em resultados de ensaios experimentais, muitas vezes disponibilizados por meio de ábacos pelos próprios

fabricantes de blocos do país. Conforme Medeiros (2022), esses ábacos permitem uma verificação rápida do critério de adequabilidade estrutural (R), levando em consideração os critérios de estanqueidade e isolamento térmico. Portanto, é necessário ajustar apenas a espessura da parede de acordo com o material do bloco, o TRRF, as condições de apoio e as dimensões da parede.

Finalmente em relação ao Eurocode 6 (2005), pode-se destacar que esse se apresenta como um dos códigos mais completos para o dimensionamento da alvenaria estrutural, estabelecendo requisitos de desempenho, como resistência mecânica (R), estanqueidade (E), isolamento térmico (I) e impacto mecânico (M) para as paredes. Os dimensionamentos podem ser realizados por meio de três métodos: tabular, analítico simplificado ou com modelos avançados de cálculo. Além disso, a resistência ao fogo pode ser determinada por meio de ensaios de laboratório, oferecendo uma alternativa ou complemento aos procedimentos de cálculo mencionados.

O método tabular é reconhecido por sua simplicidade e praticidade, sendo considerado o mais conservador dos métodos. Basicamente, ele determina a espessura mínima da parede para um determinado TRRF. No Anexo B do Eurocode 6 (2005), são fornecidas tabelas que mostram o valor mínimo necessário da espessura da parede em relação ao TRRF, ao nível de carregamento dos materiais da alvenaria, à geometria dos blocos, à função da parede na estrutura e à presença ou ausência de revestimento.

Quanto ao método de cálculo simplificado do Eurocode 6 (2005), este está detalhado em seu Anexo C e é direcionado a paredes e pilares de alvenaria expostos ao incêndio-padrão, construídos com blocos e argamassas específicas. Esse método determina a capacidade resistente da alvenaria considerando sua seção transversal residual após um determinado período de exposição ao incêndio-padrão. Conforme mencionado em Leal (2022), o método foi desenvolvido com base em resultados experimentais realizados em blocos com especificações do Grupo 1 do Eurocode 6 (2005), que são unidades com volume de furos igual ou inferior a 25% do volume total. No entanto, como os blocos no Brasil comumente têm um volume de furos em torno de 50%, o uso direto desse método simplificado seria limitado. A própria norma sugere que, ao aplicar os princípios desse método a outros tipos de blocos, estes devem ser devidamente calibrados por meio de novos ensaios ou através de uma base de dados confiável para a obtenção das isoterma.

Em relação ao dimensionamento utilizando métodos avançados de cálculo, este fundamenta-se no comportamento físico dos materiais constituintes da alvenaria, visando antecipar o comportamento dos elementos estruturais sob elevadas temperaturas. Esse processo

requer a integração de modelos térmicos, capazes de prever a distribuição e variação da temperatura nos elementos estruturais, e modelos mecânicos, que consideram a variação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais e seus impactos no comportamento da estrutura.

Nesse contexto, o Eurocode 6 (2005) disponibiliza dados relevantes para diferentes tipos de alvenaria, que abrangem: propriedades térmicas, como condutividade térmica e capacidade térmica específica; propriedades físicas, como densidade; e propriedades mecânicas, por meio de relações tensão-deformação.

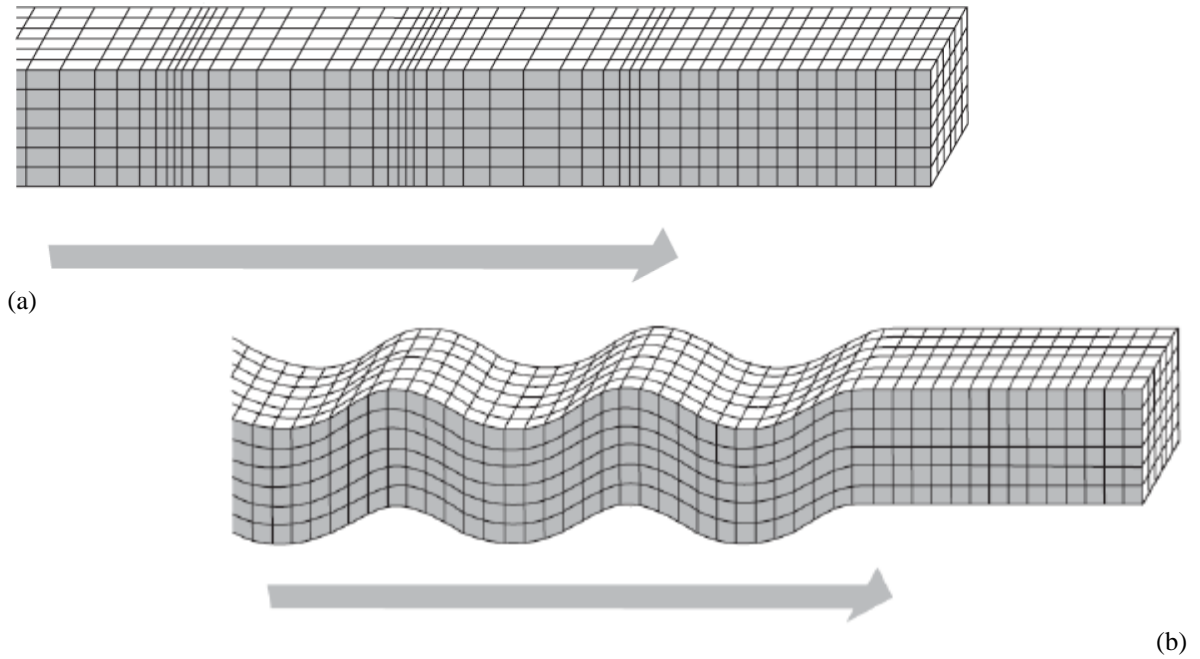
2.3 ENSAIO DE ULTRASSOM: VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO (VPU)

O método de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) é uma técnica de ensaio não destrutivo que se baseia no princípio da propagação de ondas mecânicas com frequência superior a 20 kHz, ou seja, ondas ultrassônicas, em um determinado meio material. Conforme mencionado em Resende (2018), a utilização desse ensaio na avaliação estrutural é notável devido ao baixo custo operacional, à simplicidade do procedimento experimental e por não provocar nenhum dano à estrutura. Trata-se de um procedimento viável tanto em ambientes laboratoriais quanto em situações de campo, apresentando eficácia independente das dimensões e formas da estrutura.

Existem diversos tipos de ondas ultrassônicas, que são classificadas de acordo com sua propagação e polarização. Nos ensaios de velocidade de pulso ultrassônico (VPU), usualmente são utilizadas *ondas ultrassônicas longitudinais e transversais*. As *ondas ultrassônicas longitudinais*, também conhecidas como ondas “P” ou ondas de compressão, caracterizam-se por apresentarem uma direção comum para a direção de propagação e polarização das partículas. Por outro lado, as *ondas ultrassônicas transversais* ou ondas de cisalhamento, também conhecida como ondas “S”, têm a direção de polarização das partículas perpendicular à direção principal de propagação. Na Figura 2.9 está ilustrada a diferença entre a propagação desses tipos de ondas.

O ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) consiste em registrar o tempo que um pulso ultrassônico leva para percorrer um meio sólido de um ponto da superfície da amostra até outro ponto. Conhecida a distância entre os dois pontos, é possível obter a velocidade de propagação do pulso. As velocidades de propagação das ondas longitudinais (V_L) e transversais (V_T) fornecem informações importantes sobre o material analisado, tendo em vista que as mesmas são dependentes das propriedades elásticas e da densidade do material. Esse princípio é representado pelas Equações 2.7 e 2.8, aplicáveis para ondas que se propagam em um meio homogêneo e material isotrópico.

Figura 2.9: Propagação de ondas ultrassônicas: (a) longitudinais e (b) transversais



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008)

$$V_L = \sqrt{\frac{E_D(1 - \nu_D)}{2\rho(1 - 2\nu_D)(1 + \nu_D)}} \quad (2.7)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{G_D}{\rho}} \quad (2.8)$$

$$\frac{V_L}{V_T} = \sqrt{\frac{2(1 - \nu_D)}{1 - 2\nu_D}} \quad (2.9)$$

Em relação às Equações 2.7 a 2.9, valem:

V_L – Velocidade de propagação das ondas longitudinais;

V_T – Velocidade de propagação das ondas transversais ou de cisalhamento;

E_D – Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico;

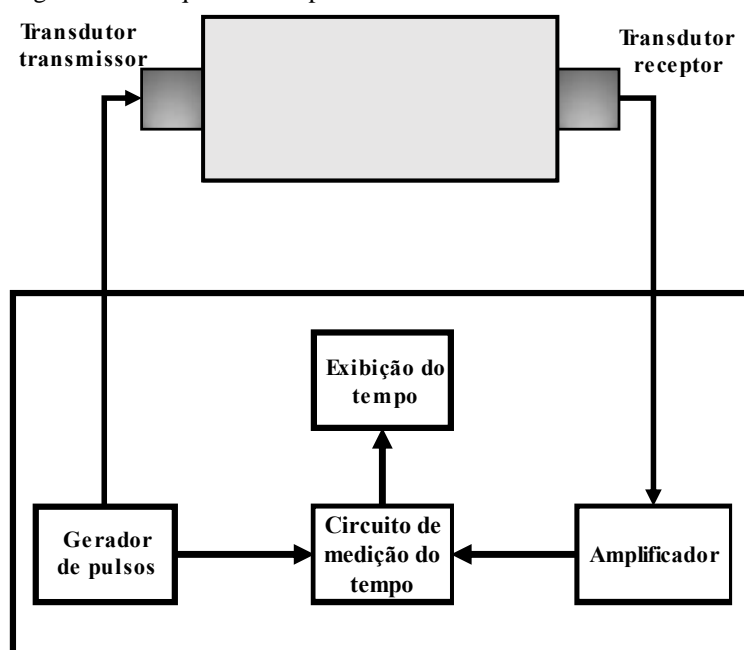
G_D – Módulo de elasticidade transversal dinâmico;

ν_D – Coeficiente de Poisson dinâmico;

ρ – Densidade específica.

Os aparatos necessários para realização dos experimentos são: *dois transdutores para emissão e recepção dos pulsos ultrassônicos, um aparelho de ultrassom com gerador de pulsos e circuito medidor de tempo, bem como cabos coaxiais que permitem a conexão entre o circuito gerador-receptor.* A aparelhagem utilizada está esquematizada na Figura 2.10.

Figura 2.10: Esquema dos aparatos utilizados no ensaio de ultrassom



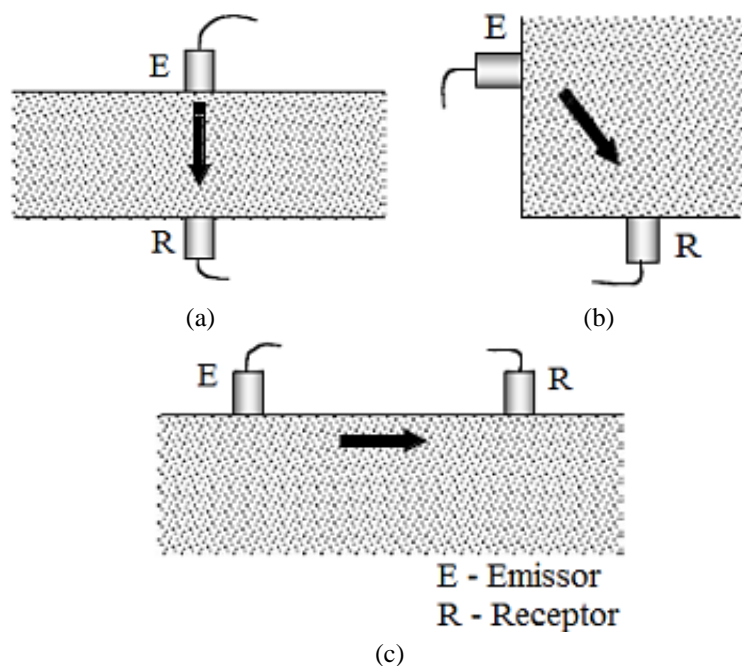
Fonte: Adaptado de ASTM C597-16 (2016)

Para assegurar a transmissão e recepção adequadas do pulso ultrassônico, é essencial que os transdutores estejam em pleno contato com o corpo de prova durante o ensaio. Caso contrário, a presença de bolsas de ar entre o transdutor e a superfície do material pode resultar em imprecisões no tempo de propagação registrado pelo aparelho (SOMBRA, 2020). Para garantir medições adequadas, recomenda-se o uso de um agente acoplante, como gel à base d'água ou outro tipo de material viscoso, juntamente com aplicação de uma certa pressão por parte do operador.

As *ondas longitudinais* são as que se propagam com maior velocidade, sendo, portanto, as principais ondas captadas pelos transdutores. Em Schiavon (2015) se menciona a existência de transdutores específicos para emissão de *ondas transversais*, os quais requerem um agente acoplante de viscosidade superior ao utilizado para as ondas longitudinais.

Durante o ensaio, são considerados três arranjos diferentes, determinados em função da posição relativa entre os transdutores. Na transmissão direta (Figura 2.11a), os transdutores são colocados em faces opostas do elemento, resultando em uma menor perda de energia durante a propagação do pulso ultrassônico. Esse é o método mais recomendado pela ABNT NBR 8802:2019 devido à clareza na definição da distância percorrida pela onda. Nas transmissões semidiretas (Figura 2.11b), os transdutores são posicionados em faces adjacentes do elemento, sendo um arranjo útil quando não é possível acessar duas faces opostas do corpo de prova. Por fim, no arranjo de transmissão indireta (Figura 2.11c), os transdutores são acoplados na mesma face.

Figura 2.11: Transmissão do pulso ultrassônico: (a) direta, (b) semidireta e (c) indireta



Fonte: Adaptado de Malhotra e Carino (2004)

2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

Nesta seção, apresenta-se a metodologia adotada no processo de revisão bibliográfica sistemática, que teve como objetivo identificar as produções e conhecimentos científicos relevantes nas áreas de atuação deste trabalho. Inicialmente, é detalhado o protocolo de pesquisa adotado, apresentando todo o processo de seleção dos artigos. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos da revisão bibliográfica sistemática.

2.4.1 Protocolo de pesquisa

Dado que a pesquisa abrange três grandes temas – alvenaria estrutural, incêndio e ultrassom – o protocolo de pesquisa foi elaborado para abranger as seguintes abordagens: análise da alvenaria estrutural em situação de incêndio, aplicação do ultrassom em elementos de alvenaria estrutural e, por fim, a integração dos três temas, ou seja, a utilização do ultrassom voltada para elementos de alvenaria estrutural em elevadas temperaturas.

Para proporcionar um fluxo de dados eficiente, os objetivos da busca foram delineados, abrangendo: os questionamentos a serem respondidos, os documentos a serem analisados, os resultados esperados e as principais aplicações advindas das informações coletadas durante a revisão, conforme apresentado na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Planejamento de pesquisa

Questão de pesquisa	1. Qual o panorama geral do conhecimento acerca da alvenaria estrutural em situação de incêndio? 2. Qual a relevância da utilização de técnicas ultrassônicas na avaliação da alvenaria estrutural? 3. Os ensaios de ultrassom têm sido utilizados para avaliação dos elementos de alvenaria em elevadas temperaturas?
Documentos analisados	Artigos que abordem as seguintes combinações de áreas: 1. Alvenaria estrutural e Incêndio; 2. Alvenaria estrutural e Ultrassom; 3. Elementos de alvenaria estrutural, Incêndio e Ultrassom.
Resultados esperados	Estado da arte dos temas propostos, com destaque para a utilização dos ensaios de ultrassom com foco na avaliação da alvenaria estrutural em situação de incêndio.
Principais aplicações	1. Comportamento mecânico residual dos elementos de alvenaria em elevadas temperaturas; 2. Identificação das metodologias utilizadas nos ensaios de ultrassom voltados à caracterização de elementos da alvenaria estrutural em temperatura ambiente ou elevadas temperaturas.

Fonte: Elaborado pelo autor

Após definir os objetivos da pesquisa bibliográfica, foram escolhidas as bases de dados onde ela seria conduzida, além de serem estabelecidos os termos de busca (*strings*) a serem identificados nos títulos ou nas palavras-chave dos trabalhos indexados nas respectivas bases de dados. Na Tabela 2.8 são apresentadas as variáveis da revisão bibliográfica sistemática.

Tabela 2.8: Variáveis da revisão bibliográfica sistemática

Termos de busca	#1: “Masonry”; “Structural Masonry”; “Concrete Block”; “Hollow concrete blocks”; “Concrete block masonry”. #2: “Elevated temperature”; “Fire”; “High temperatures”; “Thermal exposure”. #3: “Ultrasound”; “Ultrasonic”; “UPV”; “Ultrasonic pulse velocity”.
Bases de dados	Scopus e Web of Science (WoS)
Filtros (WoS)	Inglês; WoS categories: construction building or Engineering Civil; Article or Review Article.
Filtros (Scopus)	Inglês; Subject area: Engineering; Article or Review Article.
Data da pesquisa	SET/2023 (Revisão FEV/2024)
#1 – Alvenaria Estrutural; #2 – Incêndio; #3 - Ultrassom	

Fonte: Elaborado pelo autor

Depois de escolhidos os termos de busca, as bases de dados e os filtros, foram realizadas pesquisas utilizando combinações por meio dos operadores booleanos (*and* e *or*) entre os três grupos de termos de busca apresentados na Tabela 2.8. Essas combinações foram: Alvenaria estrutural e Incêndio (#1 *and* #2); Alvenaria estrutural e Ultrassom (#1 *and* #3) e, por fim, Alvenaria estrutural, Incêndio e Ultrassom (#1 *and* #2 *and* #3). Por exemplo, na última pesquisa citada, que engloba as três grandes áreas, as *strings* foram definidas da seguinte forma nas respectivas bases de dados:

- a) *String (WoS)*: (TS=(elevated temperature OR Fire OR high temperatures OR Thermal exposure) AND TS=(ultrasound OR ultrasonic OR UPV OR ultrasonic pulse velocity) AND TS=(masonry OR structural masonry OR concrete block OR concrete block masonry OR hollow concrete block))
- b) *String (Scopus)*: (TITLE-ABS-KEY ("masonry" OR "structural masonry" OR "concrete block" OR "concrete block masonry" OR "hollow concrete block") AND TITLE-ABS-KEY ("elevated temperature" OR "Fire" OR "high temperatures" OR "Thermal exposure") AND TITLE-ABS-KEY ("ultrasound" OR "ultrasonic" OR "UPV" OR "ultrasonic pulse velocity"))

Finalizadas as buscas, os artigos foram exportados para a plataforma Rayyan, onde os dados foram gerenciados. Primeiramente, foram identificados os artigos duplicados entre as duas bases de dados. Em seguida, foram aplicados critérios de inclusão e exclusão para garantir que somente os artigos relevantes aos objetivos da pesquisa fossem mantidos. A seguir estão explicitados os critérios de exclusão:

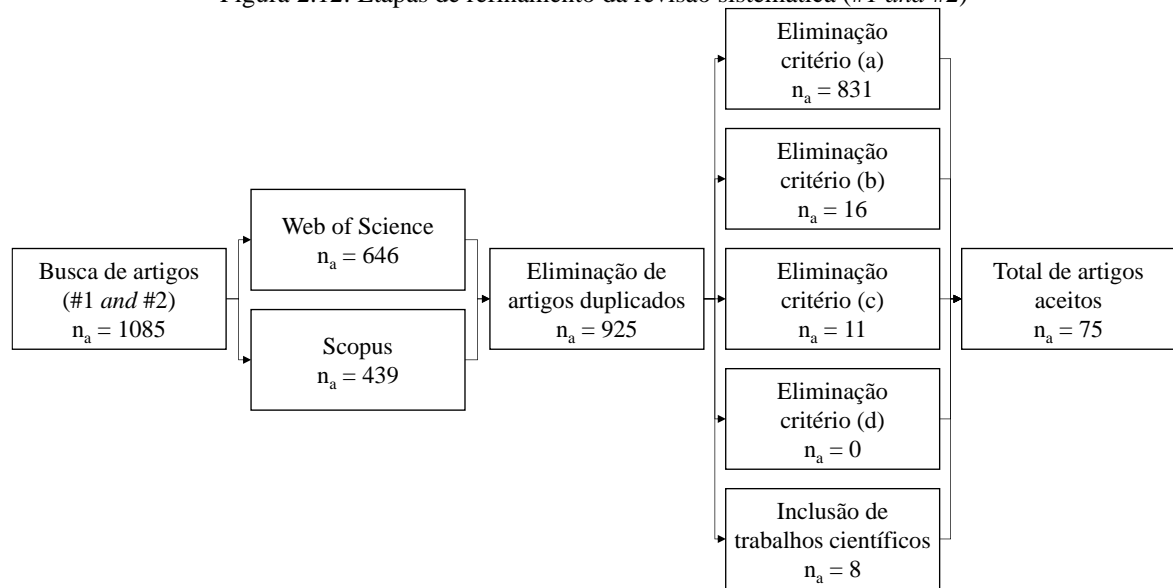
- a) *Título e resumo não abordam o tema ou abordam o tema de maneira secundária;*
- b) *Artigo publicado antes de 2013 sem mais de duas citações;*
- c) *Documentos cuja visualização é indisponível;*
- d) *Falta de detalhes suficientes acerca da metodologia, ou a metodologia não corresponde ao esperado.*

Após a aplicação dos critérios de exclusão, mediante à leitura dos títulos, resumos e conteúdo dos trabalhos selecionados, foi realizada a sintetização dos artigos aceitos na revisão sistemática. Nesta etapa, foi feita uma análise detalhada dos artigos, e as informações consideradas mais relevantes foram registradas por meio de um formulário de extração de dados. Vale ressaltar que, além dos resultados obtidos conforme o protocolo estabelecido, foram incorporados dissertações e trabalhos científicos relacionados ao tema, recomendados pelo orientador e pela banca de qualificação.

2.4.2 Resultados obtidos

A busca relacionada à Alvenaria estrutural e Incêndio (#1 and #2) resultou em 1085 documentos. Após remoção de artigos duplicados, aplicação dos critérios estabelecidos e inclusão de 8 trabalhos científicos adicionais, esse número foi reduzido para 75, conforme ilustrado na Figura 2.12.

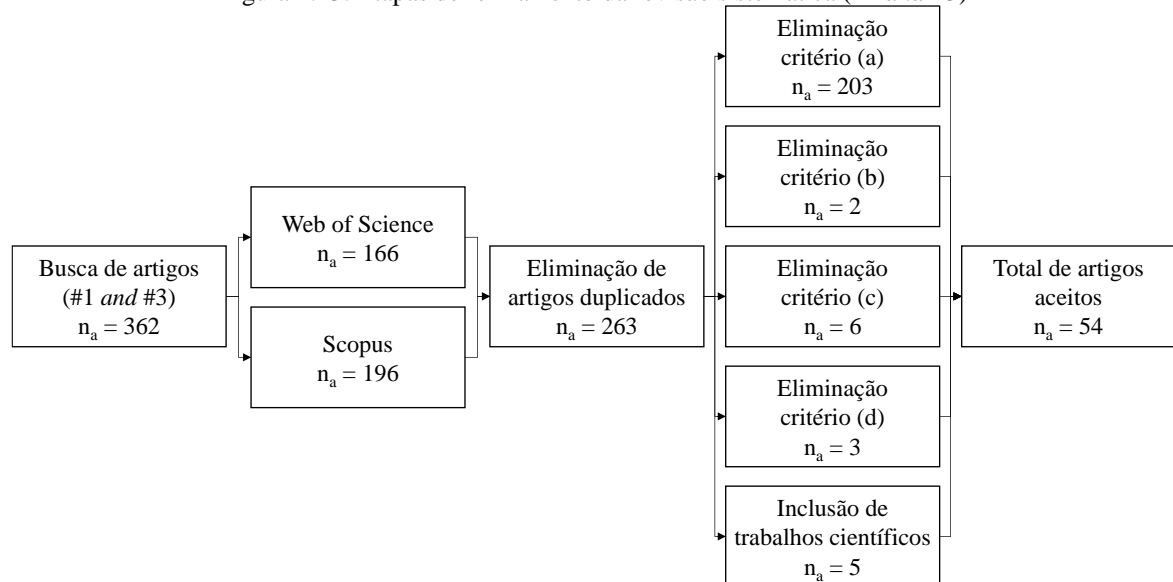
Figura 2.12: Etapas de refinamento da revisão sistemática (#1 and #2)



Fonte: Elaborado pelo autor

Na busca relacionada à Alvenaria estrutural e Ultrassom (#1 and #3), foram identificados inicialmente 362 documentos. Após remover os artigos duplicados, integrar 5 trabalhos científicos e aplicar os critérios estabelecidos, esse número foi reduzido para 54, conforme ilustrado na Figura 2.13.

Figura 2.13: Etapas de refinamento da revisão sistemática (#1 and #3)

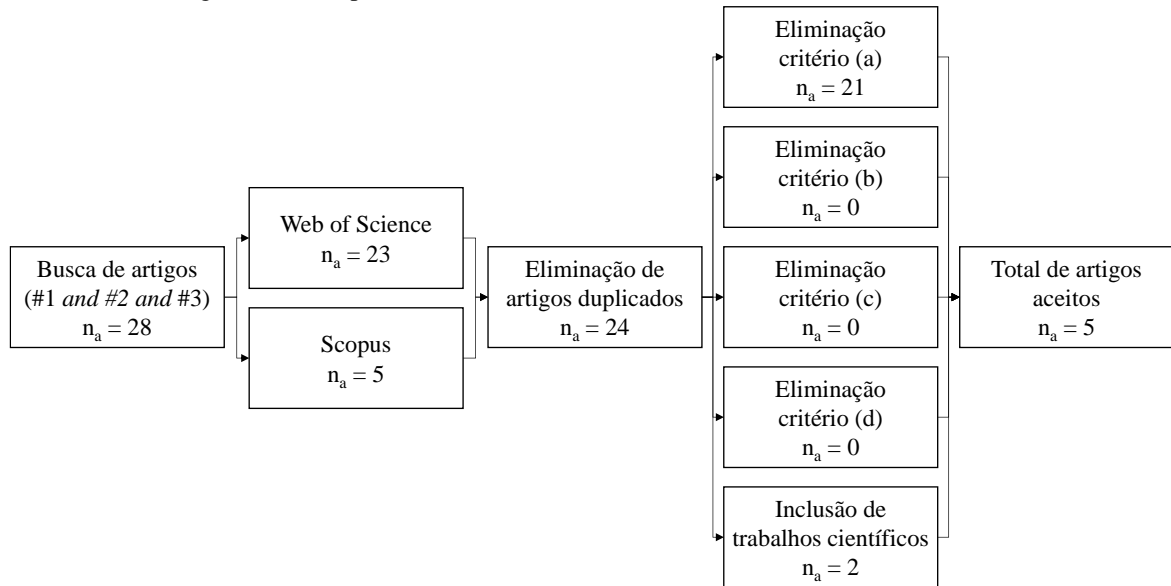


Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto à busca que envolveu os três grandes temas (#1 and #2 and #3), foram encontrados inicialmente 28 documentos. Os quais foram reduzidos para 5, após a eliminação

dos artigos duplicados e aplicação dos critérios definidos, além da inclusão de 2 trabalhos científicos, conforme ilustrado na Figura 2.14.

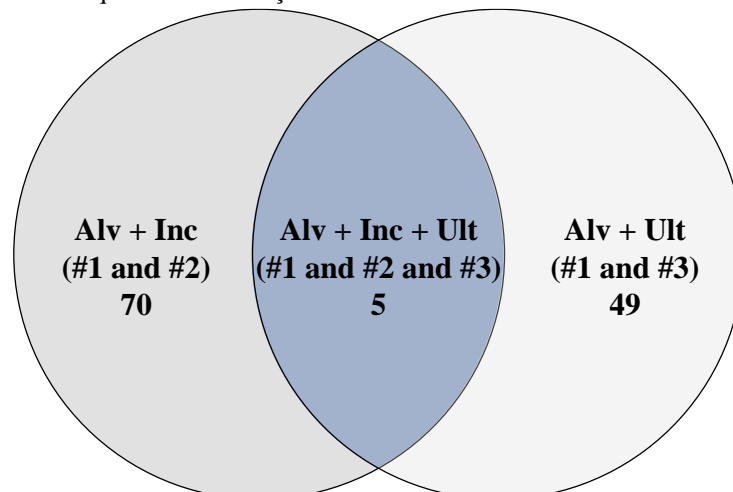
Figura 2.14: Etapas de refinamento da revisão sistemática (#1 and #2 and #3)



Fonte: Elaborado pelo autor

É evidente que nos resultados da terceira busca, restrita às três classes de *strings*, há uma interseção de artigos já contabilizados nas duas primeiras buscas. Nessa terceira busca, apenas 5 documentos foram aceitos. Logo, dos 75 aceitos na primeira busca, 70 artigos referem-se apenas a Alvenaria e Incêndio, enquanto dos 54 aceitos na segunda, 49 tratam exclusivamente de Alvenaria e Ultrassom. Em suma, foram analisados um total de 124 trabalhos científicos. Na Figura 2.15 é esquematizada a interseção de artigos descrita.

Figura 2.15: Esquema de interseção entre as buscas realizadas na revisão sistemática

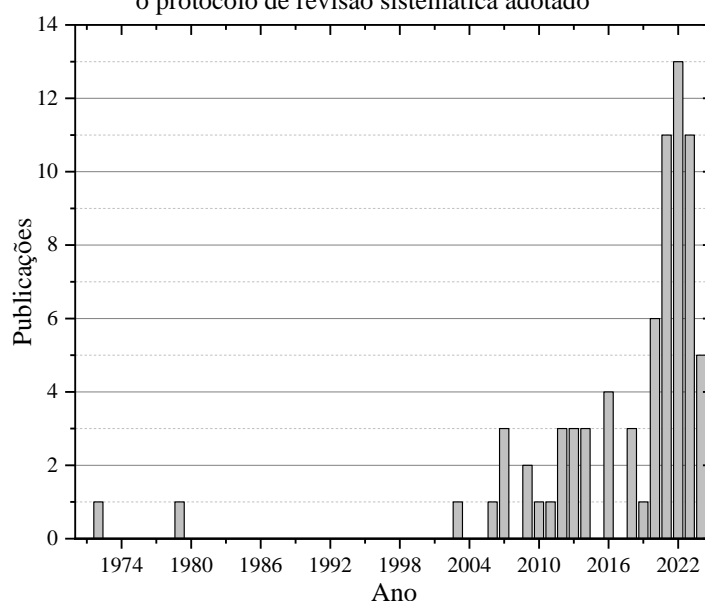


Fonte: Elaborado pelo autor

2.4.2.1 Alvenaria Estrutural em situação de incêndio

Diante dos resultados obtidos da busca sobre alvenaria estrutural em situação de incêndio, foi viável realizar uma análise acerca da evolução do número de publicações relacionadas ao tema ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 2.16.

Figura 2.16: Evolução do número de publicações sobre a alvenaria estrutural em situação de incêndio conforme o protocolo de revisão sistemática adotado



Fonte: Elaborado pelo autor

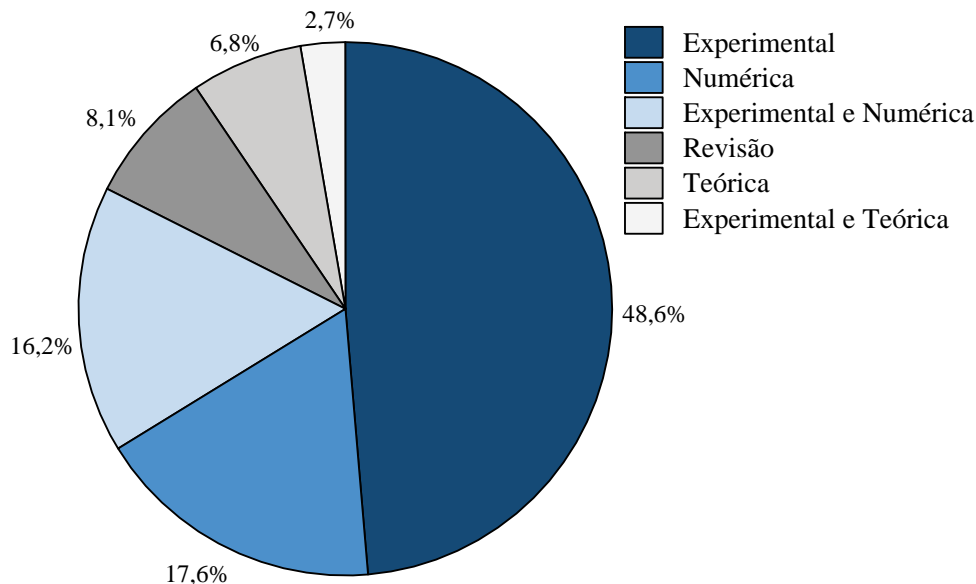
Observa-se, na última figura, um aumento significativo no número de publicações nesse sentido, refletindo o crescente interesse despertado por este tema, e a necessidade de mais informações acerca do desempenho dos elementos de alvenaria em elevadas temperaturas.

Além disso, foram quantificadas as diferentes abordagens adotadas nos estudos relacionados à alvenaria em situação de incêndio, categorizando-os em abordagens experimental, numérica, teórica, e artigos de revisão. Conforme ilustrado na Figura 2.17, observa-se uma maior frequência de trabalhos voltados para os programas experimentais, seguidos pelos que adotam uma abordagem numérica. Em seguida, destacam-se aqueles que atrelam ao programa experimental uma abordagem numérica, como demonstrado nos estudos em Al Nahhas *et al.* (2007), Zhang *et al.* (2014) e em Oliveira *et al.* (2021).

Essa predominância dos estudos experimentais destaca a lacuna e a necessidade de mais conhecimento acerca das propriedades térmicas e mecânicas dos elementos de alvenaria em elevadas temperaturas. A construção desse conhecimento é fundamental para a avaliação da

alvenaria estrutural em situação de incêndio, bem como para a realização de modelagens numéricas mais condizentes com a realidade.

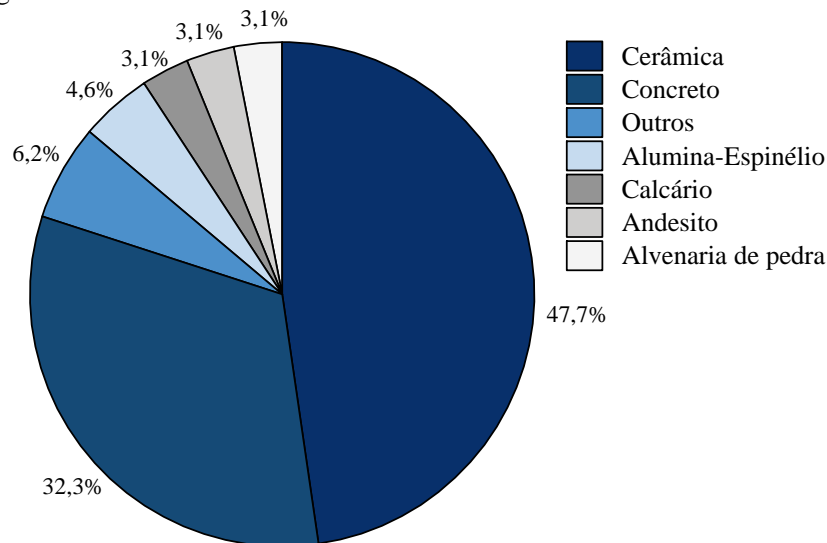
Figura 2.17: Abordagem dos trabalhos científicos levantados



Fonte: Elaborado pelo autor

Do ponto de vista do tipo de alvenaria investigado nos estudos em questão, os resultados são demonstrados na Figura 2.18. Observou-se que a maioria, correspondendo a 47,7%, era composta por tijolos ou blocos cerâmicos, seguida pelos blocos de concreto, que representaram 32,3% dos artigos levantados. Vale ressaltar que em alguns dos trabalhos analisados, foram investigados dois tipos de materiais, como por exemplo em Bošnjak *et al.* (2020), que caracterizaram tanto tijolos cerâmicos quanto de silicato de cálcio.

Figura 2.18: Materiais utilizados nas alvenarias nos trabalhos científicos levantados



Outros: Materiais com até uma ocorrência (Granito, Cimento, Polipropileno e Silicato de cálcio)

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação aos procedimentos de ensaio, observou-se que nos artigos dedicados à análise de pequenas paredes ou paredes em escala real de alvenaria em situação de incêndio, a elevação de temperatura seguia as curvas de incêndio-padrão determinadas pelas normas. Isso pode ser observado, por exemplo, em Hartmann e Burkert (2018), Pham *et al.* (2022) e Kiran *et al.* (2023). Por outro lado, nos trabalhos voltados à caracterização dos elementos de alvenaria, como blocos ou argamassas, os procedimentos variaram. Por exemplo, em Khaliq e Bashir (2016), Yan *et al.* (2018) e Pachta, Konopisi e Stefanidou (2021), as curvas de temperatura utilizadas foram similares às da RILEM TC 200-HTC:2007, seguindo uma taxa de aquecimento específica até atingir a temperatura-alvo, mantida por um determinado período.

No que diz respeito aos trabalhos conduzidos em pequenas paredes ou paredes em escala real de alvenaria em situação de incêndio, menciona-se que em Ayala (2010) foram realizadas investigações experimentais e numéricas para a análise do comportamento de tijolos de concreto leve, argamassas e pequenas paredes sob elevadas temperaturas. As amostras (Figura 2.19) foram submetidas a uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até atingirem as temperaturas de 200, 400, 600, 700 e $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, e à ensaios de compressão com incremento de força de 10 kN/min até a ruptura. No que diz respeito à simulação numérica, foi utilizado o Abaqus® para avaliar o comportamento dessas pequenas paredes em elevadas temperaturas e quando submetidas à compressão, utilizando uma abordagem de micro-modelagem simplificada.

Figura 2.19: Pequenas paredes de alvenaria estrutural antes da realização dos ensaios



Fonte: Ayala (2010)

Concluiu-se que, para as pequenas paredes, as temperaturas de 200, 400, 600, 700 e 800°C provocaram uma redução na resistência à compressão de 3, 9, 19, 60 e 83% respectivamente, e redução de 33, 40, 65, 89 e 98% no módulo de elasticidade, indicando uma maior sensibilidade deste último em relação ao aumento da temperatura.

Em Dupim (2019) foi desenvolvido um programa experimental com blocos, prismas e pequenas paredes de alvenaria de concreto em situação de incêndio, segundo a curva padrão ISO 834-1:1999, com o objetivo de avaliar a resistência residual destes elementos. Dois grupos de resistência de blocos com espessura de 14 cm foram utilizados, sendo de 4,0 e 10,0 MPa.

Na primeira fornada, os elementos sem revestimento, foram submetidos a elevação de temperatura conforme incêndio-padrão durante 70 minutos. No caso de exposição ao fogo em todas as faces, as pequenas paredes com resistência de 4,0 MPa apresentaram resistência residual de 14%. Enquanto que, quando foi exposto apenas uma única face, caso do trio de paredes com interior compartimentado e isolado termicamente, a resistência residual foi de 46%. Para paredes com resistência de 10,0 MPa, o valor obtido considerando fogo em ambas as faces foi de 13%.

Na segunda fornada, em que as paredes foram revestidas com uma camada de 5 mm de gesso, e submetidas a um tempo de exposição de 120 minutos ao incêndio-padrão, as pequenas paredes com menor resistência apresentaram uma resistência residual de 11%. Por outro lado, as paredes com maior resistência registraram uma resistência residual de 4%, nessas foi possível observar o total deslocamento do revestimento de gesso, conforme ilustrado na Figura 2.20.

Figura 2.20: Pequenas paredes de alvenaria estrutural revestidas com gesso pós fogo



Fonte: Dupim (2019)

No estudo conduzido em Leal (2022), o objetivo foi investigar o comportamento dos elementos da alvenaria estrutural feitos de blocos de concreto (blocos, prismas e pequenas paredes) quando submetidos à curva de incêndio-padrão especificada na ISO 834-1:1999, por meio de análises numéricas e experimentais. Os resultados revelaram que a alvenaria estrutural é significativamente afetada pela ação do fogo, visto que, após 70 minutos de exposição, as paredes com função de compartimentação apresentaram resistência residual média igual a 46%, reduzindo para apenas 14% quando ambas as faces são expostas ao fogo.

Além disso, foram avaliadas formas de proteção contra o fogo, testando dois tipos de revestimentos: com gesso em pasta e argamassa de cimento, cal e areia. Nos ensaios realizados com as paredes revestidas o tempo de exposição ao fogo foi de 120 minutos. Nessa situação, as pequenas paredes apresentaram resistências residuais à compressão entre 5% a 24%, dependendo do tipo de bloco e do revestimento aplicado. Nas paredes com função de compartimentação (com apenas uma face exposta), a resistência residual verificada foi bem maior, variando de 48% a 64%.

Em suma, os resultados mostraram que esses revestimentos desempenham um papel considerável na redução dos níveis de temperatura no interior da alvenaria, com diferenças de até 322°C quando utilizando argamassa. Entretanto, sua eficácia como revestimento térmico ainda necessita de estudos adicionais, de forma a correlacionar espessura e capacidade de aderência ao tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF).

Em relação aos estudos destinados à caracterização dos elementos de alvenaria em elevadas temperaturas, destaca-se que em Bošnjak *et al.* (2020) foram realizados estudos em contextos experimental e numérico para analisar o comportamento mecânico residual (pós-aquecimento) da alvenaria. Foram utilizados dois tijolos de materiais distintos: argila e silicato de cálcio, conforme Figura 2.21.

Os ensaios foram realizados nos tijolos, na argamassa e em prismas de alvenaria, os quais foram expostos a diferentes níveis de temperatura (100, 200, 300, 500, 700, 900 e 1000°C). A taxa de aquecimento adotada foi de 2 °C/min, e a temperatura alvo foi mantida por 2 horas para assegurar o aquecimento uniforme dos corpos de prova, seguido de resfriamento gradual até a temperatura ambiente para posterior avaliação da resistência residual.

Em geral, observou-se que a resistência residual à compressão permaneceu estável para ambos os tipos de alvenaria, exceto a partir dos 700 °C, em que os prismas compostos por tijolos de silicato de cálcio apresentaram queda significativa em sua resistência residual. No entanto, diferentemente da resistência residual, a rigidez residual foi significativamente influenciada pela exposição a temperaturas elevadas, principalmente devido à forte degradação

da argamassa. Além disso, constatou-se que os tijolos de silicato de cálcio sofreram danos substanciais quando deixados em condições ambiente após exposição térmica.

Figura 2.21: Ensaio de compressão em prismas de alvenaria



Fonte: Bošnjak *et al.* (2020)

A modelagem numérica dos espécimes foi realizada (elementos finitos tridimensionais), e um modelo microplano dependente da temperatura foi adotado como lei constitutiva para o tijolo e a argamassa. Essa abordagem de modelagem numérica foi validada e demonstrou ser capaz de simular de forma realística o comportamento residual da alvenaria após exposição a altas temperaturas. Os resultados tanto do estudo experimental quanto do numérico indicam uma influência relativamente moderada da temperatura na resistência, porém uma influência significativa na rigidez do sistema de alvenaria.

Em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2022), foi desenvolvido um estudo experimental com o objetivo de estabelecer um procedimento para a avaliação laboratorial das propriedades mecânicas residuais dos blocos de concreto após exposição a altas temperaturas. Este estudo envolveu uma adaptação da metodologia estabelecida pela RILEM TC 200-HTC:2007 que se refere ao concreto moldado úmido, levando em consideração as peculiaridades do bloco de concreto, como suas características da unidade (geometria, tamanho, processo de fabricação, moldagem, cura, armazenamento, preparo e idade). Além disso, uma ênfase foi dada à definição de uma taxa de aquecimento e resfriamento adequada os corpos de prova (bloco de concreto) em avaliação.

Os autores concluíram que é recomendável utilizar uma quantidade mínima de seis corpos de prova, com uma idade mínima de 90 dias. Além disso, foi constatado que a taxa de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para a graduação da temperatura é a mais adequada para o estudo das propriedades

mecânicas dos blocos de concreto, visto que, mediante essa taxa foi averiguada equidade da temperatura em todo o volume interno do material do bloco ao final do período do aquecimento. Quanto ao resfriamento, este deve ser conduzido de forma gradual, com uma taxa no máximo igual àquela utilizada para o aquecimento.

Em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2023), os autores aplicaram a metodologia proposta anteriormente, analisando a resistência mecânica e o módulo de elasticidade residuais de blocos de concreto. Foram ensaiados blocos com três diferentes tipos de agregado graúdo: basalto, calcário e gnaiss; e três classes de resistência: 12, 24 e 48 MPa.

Observou-se que o comportamento mecânico dos blocos de concreto difere, em certo grau, do comportamento mecânico residual encontrado na literatura para o concreto moldado úmido. Por exemplo, os blocos de concreto apresentaram uma deterioração tardia em sua resistência residual, mostrando uma resistência residual maior na faixa de até 400 °C e menor após 700 °C. Também foi avaliado que o tipo de agregado transfere aos blocos comportamentos diferentes frente a elevadas temperaturas; blocos com agregados do tipo gnaiss e basalto tiveram comportamento semelhante, enquanto os blocos com agregado do tipo calcário, apesar de obterem um acréscimo de resistência a partir de 100°C, experimentaram um declínio abrupto da resistência após os 600°C. Quanto à resistência à compressão dos blocos, não foram observadas diferenças significativas no comportamento das diferentes resistências dos blocos em relação à temperatura. No que diz respeito ao módulo de elasticidade dos blocos, observou-se que a exposição a altas temperaturas afetou intensamente a deformabilidade do material mais do que sua resistência.

Em Amaral *et al.* (2024), foi realizado um programa experimental para avaliar a resistência mecânica residual de bloco de concreto e argamassa de assentamento após exposição a elevadas temperaturas. Foram investigadas a resistência à compressão e o módulo de deformação residual de quatro tipos de blocos de concreto e dois traços de argamassa diferentes. Os espécimes foram ensaiados conforme método proposto em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2022), em que as especificações da RILEM TC 200-HTC:2007 são adaptadas para os blocos de concreto. Os corpos de prova foram submetidos a uma taxa de elevação de temperatura de 1 °C/min e avaliados nas temperaturas de 100, 300, 500, 700 °C.

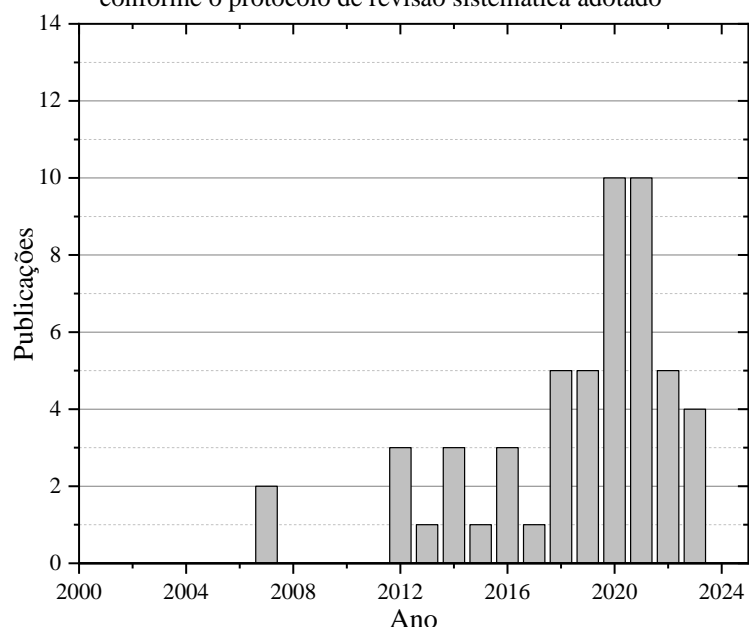
Os autores constataram que, embora tenha ocorrido uma queda acentuada no módulo de deformação após o aquecimento dos blocos e da argamassa, não foram observados comportamentos distintos na deformabilidade dos materiais devido às variáveis estudadas. No entanto, o mesmo não pode ser afirmado em relação à variação da resistência à compressão residual dos blocos, pois esta é afetada pelas variáveis: resistência à compressão nominal inicial

e a largura do bloco de concreto. Para ambos os espécimes, observou-se que o valor do módulo de elasticidade diminui mais rapidamente do que a resistência à compressão.

2.4.2.2 Utilização do ultrassom em elementos de alvenaria

Os resultados da busca sobre o uso do ultrassom na alvenaria estrutural foram analisados quanto à evolução do número de publicações relacionadas ao tema ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 2.22.

Figura 2.22: Evolução do número de publicações sobre a utilização do ultrassom na alvenaria estrutural conforme o protocolo de revisão sistemática adotado



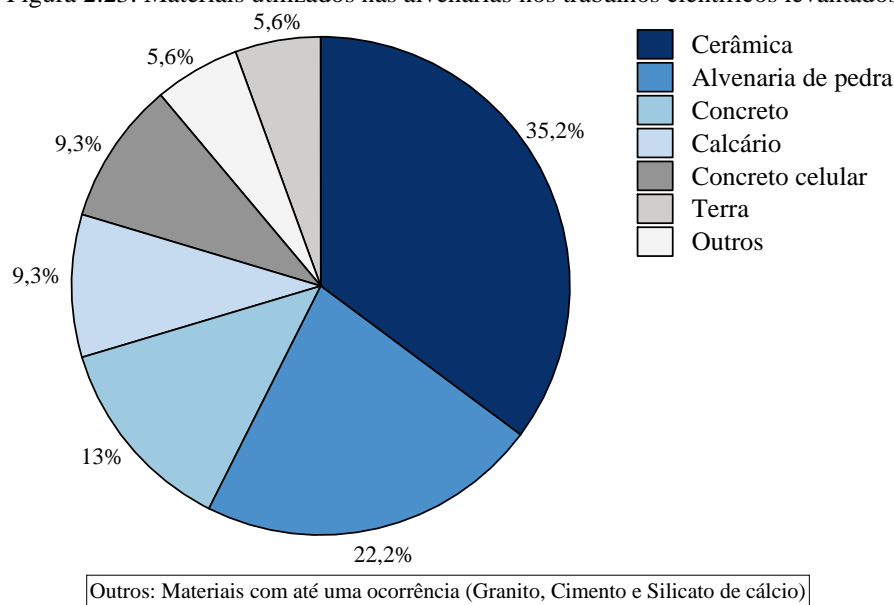
Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação à Figura 2.22, observa-se uma tendência de aumento na aplicação do ultrassom na análise de elementos de alvenaria nos últimos anos. Conforme Fernandes Neto (2023), esse aumento pode ser atribuído à crescente preocupação com a avaliação e diagnóstico de estruturas históricas, principalmente em países europeus, onde cada vez mais se utilizam de técnicas não destrutivas, como o ultrassom, para identificar danos significativos à estrutura, fornecendo informações importantes em uma posterior restauração da mesma.

Quanto aos materiais das alvenarias investigadas, na Figura 2.23 é apresentado a relação dos principais abordados nas publicações. Nesse sentido, a maioria dos estudos (35,2%) concentrou-se em alvenarias construídas com tijolos cerâmicos, os quais são largamente empregados em edificações mais antigas, assim como as alvenarias de pedra, que foi a segunda opção mais comum dentre os resultados obtidos da busca. Destaca-se que apenas 13% dos

trabalhos aplicaram ultrassom em elementos de alvenaria de concreto, material avaliado neste trabalho.

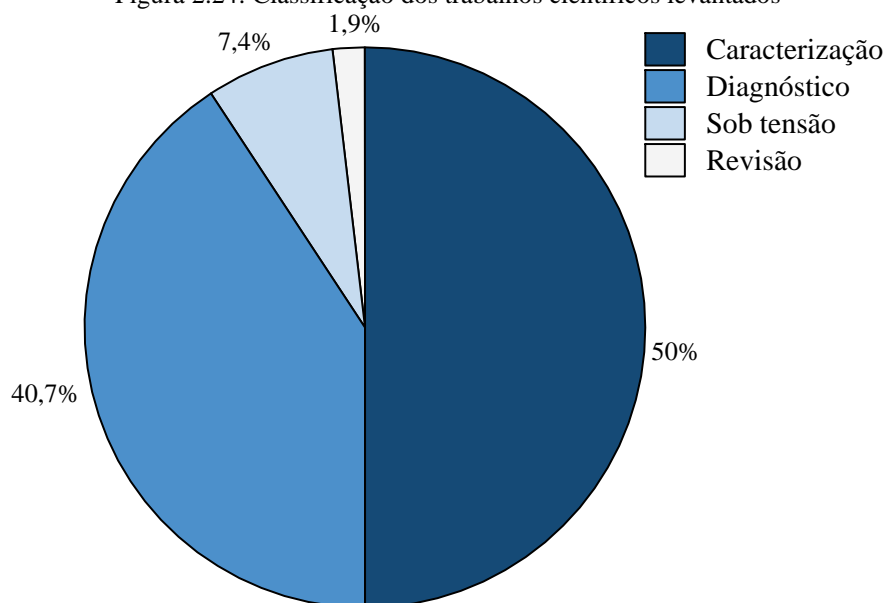
Figura 2.23: Materiais utilizados nas alvenarias nos trabalhos científicos levantados



Fonte: Elaborado pelo autor

Também foi possível classificar os trabalhos alcançados, conforme Figura 2.24, mediante às buscas em relação aos seus principais objetivos, sendo identificados quatro classes distintas: a de caracterização de elementos, diagnóstico de estruturas, análise dos elementos sob tensão (acustoelasticidade) e trabalhos de revisão.

Figura 2.24: Classificação dos trabalhos científicos levantados

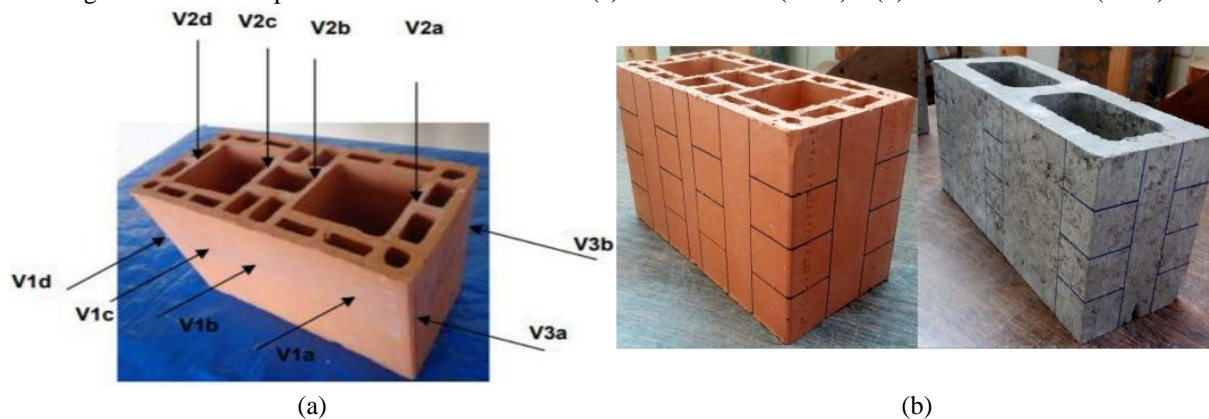


Fonte: Elaborado pelo autor

Observou-se que a maioria dos trabalhos estava relacionado às linhas de pesquisa de caracterização e diagnóstico de estruturas. Em geral, os estudos de caracterização investigaram as propriedades das unidades de alvenaria, como demonstrado em Stancato e Beraldo (2013), Brozovsky (2014), Sajid *et al.* (2018) e Noor-E-Khuda e Albermani (2019), nos quais foram conduzidos ensaios de velocidade de pulso ultrassônico para avaliar as propriedades mecânicas das unidades de alvenaria constituídas de diferentes materiais: cimento, silicato de cálcio, concreto e cerâmica, respectivamente.

Em Marvila *et al.* (2019) e em Sombra e Haach (2022), blocos cerâmicos e de concreto foram caracterizados por meio dos ensaios de velocidade de pulso ultrassônico, revelando relações interessantes entre as propriedades mecânicas dinâmicas e propriedades físico-mecânicas como a resistência à compressão e absorção de água. As abordagens metodológicas se diferiram entre os estudos: em Marvila *et al.* (2019), as medições foram realizadas apenas no ponto médio de cada face longitudinal e lateral do bloco (Figura 2.25a), enquanto em Sombra e Haach (2022), a velocidade de propagação ultrassônica foi mapeada ao longo de diferentes pontos em cada uma das faces dos blocos (Figura 2.25b).

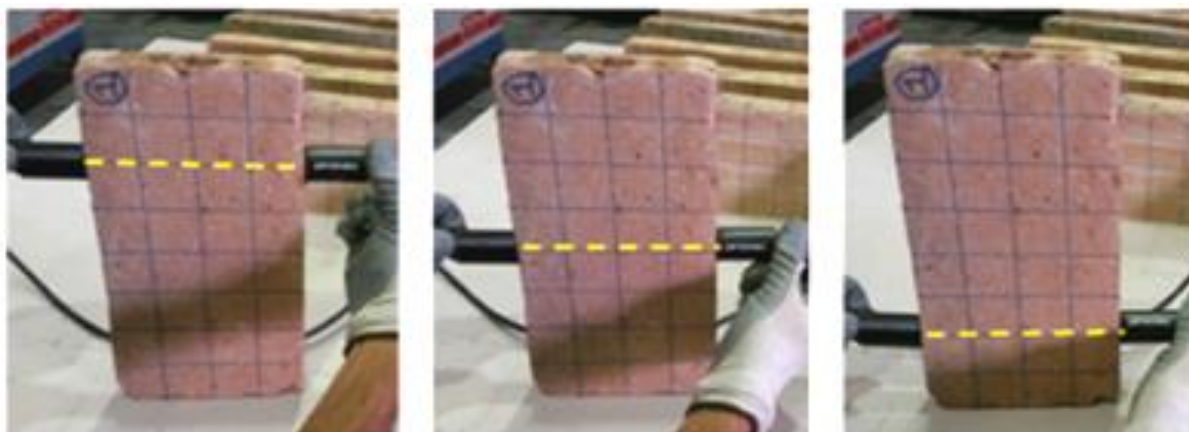
Figura 2.25: Malha para ensaio de ultrassom em: (a) Marvila *et al.* (2019) e (b) Sombra e Haach (2022)



Fonte: Marvila *et al.* (2019) e Sombra e Haach (2022)

Em Makoond *et al.* (2020), um programa experimental foi realizado, onde unidades maciças de alvenaria extraídas de edifícios históricos (Figura 2.26) foram submetidas a uma série de ensaios ultrassônicos. O objetivo era estabelecer relações entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico dos componentes. Os autores identificaram uma relação empírica entre essas propriedades, mas observaram que ela é significativamente influenciada pela heterogeneidade e composição química das diferentes unidades.

Figura 2.26: Ensaios de ultrassom em tijolos cerâmicos maciços



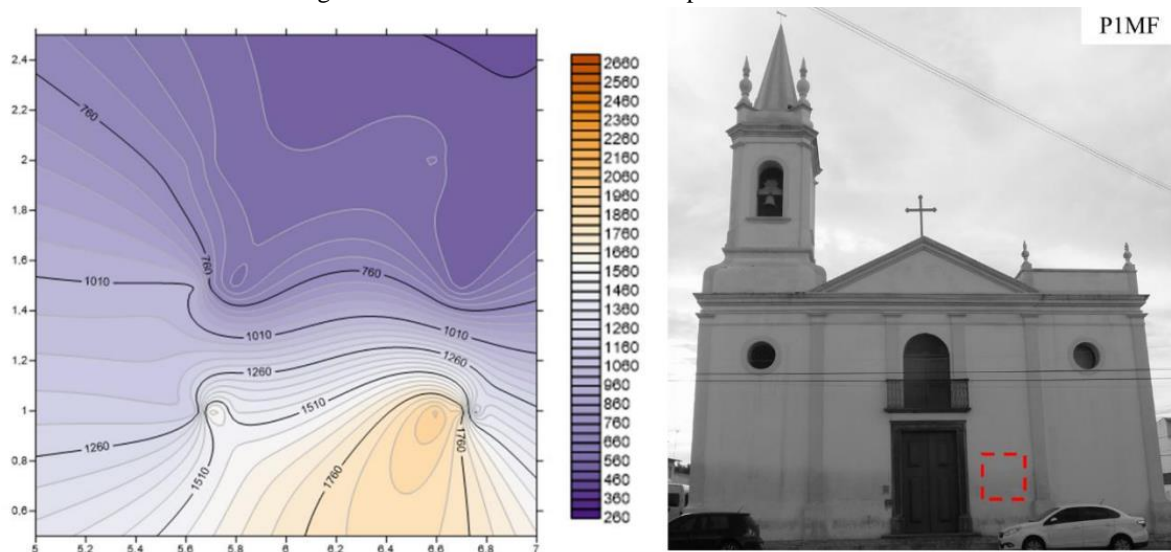
Fonte: Makoond *et al.* (2020)

Em Vasanelli *et al.* (2020), é apresentado um procedimento para avaliar a resistência à compressão de alvenarias a partir de resultados de ensaios não destrutivos de velocidade de pulso ultrassônico nos materiais constituintes. Esse procedimento foi calibrado por meio da realização de ensaios em unidades de pedra de calcário, de comum utilização em alvenarias de edificações patrimoniais no sul da Itália. Por meio de uma técnica de validação cruzada aprimorada, o método proposto permitiu estimar a resistência à compressão de novas amostras fazendo apenas medições não destrutivas, sem a necessidade de se realizar ensaios de compressão. A qualidade do procedimento foi avaliada tanto na escala do bloco quanto na escala da parede, comparando os resultados estimados com aqueles obtidos experimentalmente.

Em relação aos trabalhos relacionados ao diagnóstico de estruturas destaca-se que em Dilek (2007), são apresentadas várias abordagens possíveis para a aplicação dos ensaios de velocidade de pulso ultrassônico voltados ao diagnóstico de estruturas. Em uma das abordagens, os ensaios ultrassônicos foram utilizados para avaliar a condição de paredes de alvenaria de um prédio histórico. Neste sentido, o autor descreve que foi possível identificar locais da alvenaria com qualidade inferior, uma vez que nessas regiões os resultados das velocidades ultrassônicas se mostraram inferiores.

Em Mesquita *et al.* (2018) foram realizados testes não destrutivos em painéis externos de alvenaria situados em edificações históricas do século XVIII, com o objetivo de caracterizar as velocidades ultrassônicas. Os autores realizaram medidas indiretas ao longo de diferentes regiões da estrutura para obtenção das velocidades de pulso ultrassônico. Os resultados apresentaram baixa variação, constatando a eficácia da técnica na identificação de heterogeneidades, como pode ser visto na Figura 2.27.

Figura 2.27: Ensaio ultrassônico em painel de alvenaria



Fonte: Adaptada de Mesquita *et al.* (2018)

Em Zielińska e Rucka (2018), a tomografia ultrassônica foi empregada para detectar falhas em pilares de alvenaria. No experimento, foram construídos quatro pilares de alvenaria feitos com tijolos cerâmicos, sendo que em três deles foram introduzidas falhas deliberadamente. A identificação das falhas foi realizada por meio de análises numéricas e experimentais para gerar tomogramas de velocidade ultrassônica. Enquanto as simulações numéricas proporcionaram uma identificação precisa das falhas e do padrão das juntas de argamassa, nos resultados experimentais, as falhas não puderam ser identificadas com clareza devido à presença de amplas zonas de baixa velocidade nas proximidades das juntas.

Em Alexakis *et al.* (2018), Işık, Halifeoğlu e İpek (2020), Wu *et al.* (2021) e Günaydin *et al.* (2022) também foram utilizados ensaios não destrutivos, inclusive o de velocidade de pulso ultrassônico, objetivando o diagnóstico, avaliação e monitoramento da degradação de edificações históricas constituídas de alvenaria de pedra.

Em relação aos trabalhos que visaram identificar o efeito do carregamento na velocidade de pulso ultrassônico, destaca-se que em Gondim (2022), o efeito acustoelástico foi investigado em elementos de alvenaria estrutural composto por blocos de concreto. A autora realizou uma simulação numérica estática, seguido de um programa experimental que se dividiu na fase de caracterização dos materiais e avaliação da acustoelasticidade por meio do ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) em blocos, prismas de dois e três blocos e pequenas paredes submetidos a compressão uniaxial, e, por fim, simulação numérica dinâmica.

Por meio de programa experimental, concluiu-se que as curvas acustoelásticas são altamente influenciadas pela tensão máxima aplicada nos blocos. A autora também observou

que a presença de argamassa contribuiu para uniformização do efeito acustoelástico em prismas, e que nos elementos preenchidos, a presença do graute tornou o comportamento mecânico dos elementos mais complexos, aumentando a variabilidade dos resultados. Por meio da simulação numérica dinâmica, em que foi simulada a propagação de uma onda ultrassônica por um bloco de alvenaria submetidos a diferentes níveis de compressão, conclui-se que a não uniformidade na distribuição das tensões no bloco e a variação na direção de propagação da onda causada pela heterogeneidade do material dificultam a obtenção de coeficientes acustoelásticos consistentes.

Em Fernandes Neto (2023) foi realizado uma avaliação ultrassônica não destrutiva de elementos de alvenaria estrutural formados por blocos cerâmicos com vistas à caracterização de elementos de alvenaria livres de tensão e no estudo do efeito acustoelástico nos elementos submetidos a tensões uniaxiais de compressão. Na etapa de caracterização das unidades cerâmicas, dentre as demais conclusões, o autor constatou que os blocos cerâmicos apresentam comportamento transversalmente isotrópico, sendo as propriedades ao longo da altura estritamente diferentes daquelas obtidas ao longo do comprimento e da largura. Em relação aos ensaios realizados nos prismas, o autor propôs um modelo teórico a partir das velocidades de pulso ultrassônico, visando a obtenção da resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e do comportamento “tensão x deformação” dos prismas. E quanto aos ensaios de acustoelasticidade, notou-se que as ondas ultrassônicas polarizadas na mesma direção de aplicação do carregamento apresentaram maiores sensibilidades para presença do efeito acustoelástico.

2.4.2.3 Avaliação de elementos de alvenaria em elevadas temperaturas por meio do ultrassom

No que se refere à avaliação de elementos de alvenaria em elevadas temperaturas por meio do ultrassom, menciona-se que em Kou, Zhan e Poon (2012), foi conduzido um programa experimental visando explorar a viabilidade da utilização de resíduos de concreto fresco na fabricação de blocos de concreto não estruturais. Nesse contexto, foi realizada uma série de ensaios para determinar diversas propriedades dos blocos, incluindo resistência à compressão e velocidade de pulso ultrassônico em condições de elevadas temperaturas. Os ensaios térmicos seguiram uma taxa de elevação de temperatura de 5 °C/min, com temperaturas-alvo de 300, 500 e 800°C, mantidas por 4 horas. Os resultados indicaram que a incorporação dos resíduos melhorou as propriedades mecânicas dos blocos, embora tenha enfraquecido sua resistência ao fogo.

Em Vasanelli *et al.* (2022), foram examinados os efeitos da exposição a altas temperaturas em pedra calcária comumente utilizada em unidades de alvenaria de edifícios históricos. Além de empregar outras técnicas analíticas e microscópicas, foram conduzidos ensaios não destrutivos de velocidade de pulso ultrassônico para essa avaliação. Os ensaios térmicos foram realizados com uma taxa de elevação de temperatura de 10 °C/min, abrangendo as temperaturas-alvo de 200, 300, 400, 500, 600 e 700 °C, mantidas por três horas. Na realização dos ensaios de ultrassom foram utilizados transdutores de 1 MHz, com medições diretas.

De acordo com os autores, a propagação de ondas ultrassônicas se mostrou capaz de investigar mudanças microestruturais, constituindo-se como um método de ensaio eficaz para detectar danos térmicos em pedras. Os resultados obtidos revelaram uma redução progressiva na VPU. Foi observada uma diminuição leve de 8% na UPV para a pedra aquecida a 300 °C. Em 400 °C, essa redução se tornou mais acentuada, atingindo 20%. A 500 °C, a UPV residual foi de 38%. Por fim, em 700 °C, a velocidade de propagação residual aferida foi de 46%.

Em Dionísio *et al.* (2021), foi realizado um estudo com o objetivo de identificar e descrever as alterações induzidas pela exposição ao fogo em uma construção de granito. Neste cenário real, foram coletados blocos de granito de zonas afetadas e não afetadas pelo fogo. Foram realizadas avaliações das propriedades superficiais (cor e brilho) e parâmetros petrográficos, mineralógicos, físicos e ultrassônicos em ambos os conjuntos. Em relação aos ensaios ultrassônicos, constatou-se que nas amostras afetadas pelo fogo ocorreu uma redução dos parâmetros elásticos, incluindo a velocidade ultrassônica. Conforme os autores, essa redução pode estar relacionada ao aumento da porosidade do material, o que interfere na propagação das ondas ultrassônicas através do material. Além disso, verificou-se maiores índices de anisotropia nos blocos afetados pelo incêndio.

Em Amaral *et al.* (2021), verificou-se a viabilidade da utilização dos ensaios de ultrassom para estimar a deterioração de blocos de concreto estrutural, com resistências de 4,5 e 10 MPa e larguras de 14 e 19 cm, após serem submetidos a elevadas temperaturas. No contexto térmico, os blocos de concreto foram ensaiados a uma taxa de aquecimento de 1 °C/min, atingindo temperaturas-alvo de 100, 300, 500, 700 e 900 °C. Os ensaios de ultrassom foram realizados com transdutores de 45 kHz, realizando-se a transmissão direta em dois pontos médios na extensão longitudinal do bloco. Conforme previsto, observou-se uma redução na VPU à medida que a temperatura aumentava. Essa redução pode ser atribuída à deterioração progressiva da matriz cimentícia e dos agregados do concreto nos blocos. Sendo assim, os ensaios de ultrassom demonstraram eficácia e sensibilidade na identificação da degradação dos materiais constituintes dos blocos de concreto.

Por fim, destaca-se um trabalho referente à utilização do ultrassom na avaliação do comportamento das argamassas de assentamento em elevadas temperaturas. Em Moura *et al.* (2024), foi realizada uma revisão sistemática da literatura para identificar estudos que avaliaram a UPV de argamassas expostas a altas temperaturas. Além disso, foi realizado um programa experimental em que foram avaliadas a resistência à compressão e a VPU residuais de quatro diferentes traços de argamassas de assentamento, dois traços com cal e dois com aditivos em sua composição.

Correlações exponenciais e logarítmicas entre a VPU residual e a resistência à compressão residual foram sugeridas para os dados apresentados por outros autores, assim como para os dados apresentados no trabalho. A análise de regressão logarítmica demonstrou melhores resultados, indicando que a VPU residual e a resistência à compressão residual podem ser correlacionadas de uma melhor forma por meio de funções logarítmicas.

2.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados conceitos fundamentais relacionados aos três temas principais abordados neste trabalho: alvenaria estrutural, o fenômeno do incêndio e ensaios de ultrassom. Adicionalmente, foi detalhada a revisão bibliográfica sistemática realizada durante a pesquisa.

Inicialmente, na seção sobre alvenaria estrutural, foi traçada uma breve contextualização acerca da alvenaria estrutural no Brasil. Em seguida, foram abordados os componentes desse sistema estrutural, dando ênfase ao bloco de concreto (unidade) e a argamassa de assentamento. Além disso, foi discutido o comportamento mecânico das paredes de alvenaria estrutural, abordando aspectos como resistência à compressão e módulo de elasticidade longitudinal estático.

Posteriormente, foram discutidos os principais conceitos e informações pertinentes ao fenômeno do incêndio e suas implicações nas estruturas. Dessa forma, realizou-se uma breve contextualização sobre o tema, seguida da apresentação de conceitos fundamentais, como modelos de incêndio, tempo requerido de resistência ao fogo e mecanismos de transferência de calor. Além disso, foram destacados os critérios normativos existentes para alvenaria em situação de incêndio.

Quanto aos ensaios de ultrassom, foram expostos os principais conceitos relacionados ao assunto, tais como tipos de ondas ultrassônicas, princípio dos ensaios de velocidade de pulso

ultrassônico, equipamentos necessários para sua realização e os arranjos possíveis para as medições ultrassônicas.

Finalmente, foi apresentada a metodologia empregada no processo de revisão bibliográfica sistemática, detalhando o protocolo de pesquisa adotado, o processo de seleção dos artigos e destacando alguns dos estudos relacionados à alvenaria em situação de incêndio, utilização do ultrassom na alvenaria, seja para caracterização dos seus componentes ou como ferramenta de diagnóstico estrutural, e, por fim, pesquisas que tratam da avaliação dos elementos de alvenaria em elevadas temperaturas por meio dos ensaios de ultrassom.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL I: BLOCOS DE CONCRETO

No presente capítulo são apresentados os ensaios executados no *Programa experimental I*, que teve como principal objetivo investigar as velocidades de pulso ultrassônico e resistências residuais das unidades de concreto em elevadas temperaturas.

Os blocos de concreto estruturais utilizados nessa pesquisa, conforme ilustrado na Figura 3.1, foram fornecidos pela empresa Tatu Pré-moldados LTDA., e pertencem a um mesmo lote de fabricação. Segundo a empresa, o concreto do bloco foi produzido com cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), pó de brita, agregados graúdos de rocha ígnea (diabásio) com dimensão máxima característica igual a 12,5 mm, e areia natural média. As unidades são da classe A e designadas como M-15, possuindo dimensões nominais iguais a 140 x 190 x 390 mm e resistência à compressão nominal igual a 10 MPa. Os blocos recebidos foram inspecionados visualmente conforme recomendações da ABNT NBR 6136:2016, não sendo constatada presença de defeitos significativos.

Figura 3.1: Bloco de concreto da Tatu Pré-moldados



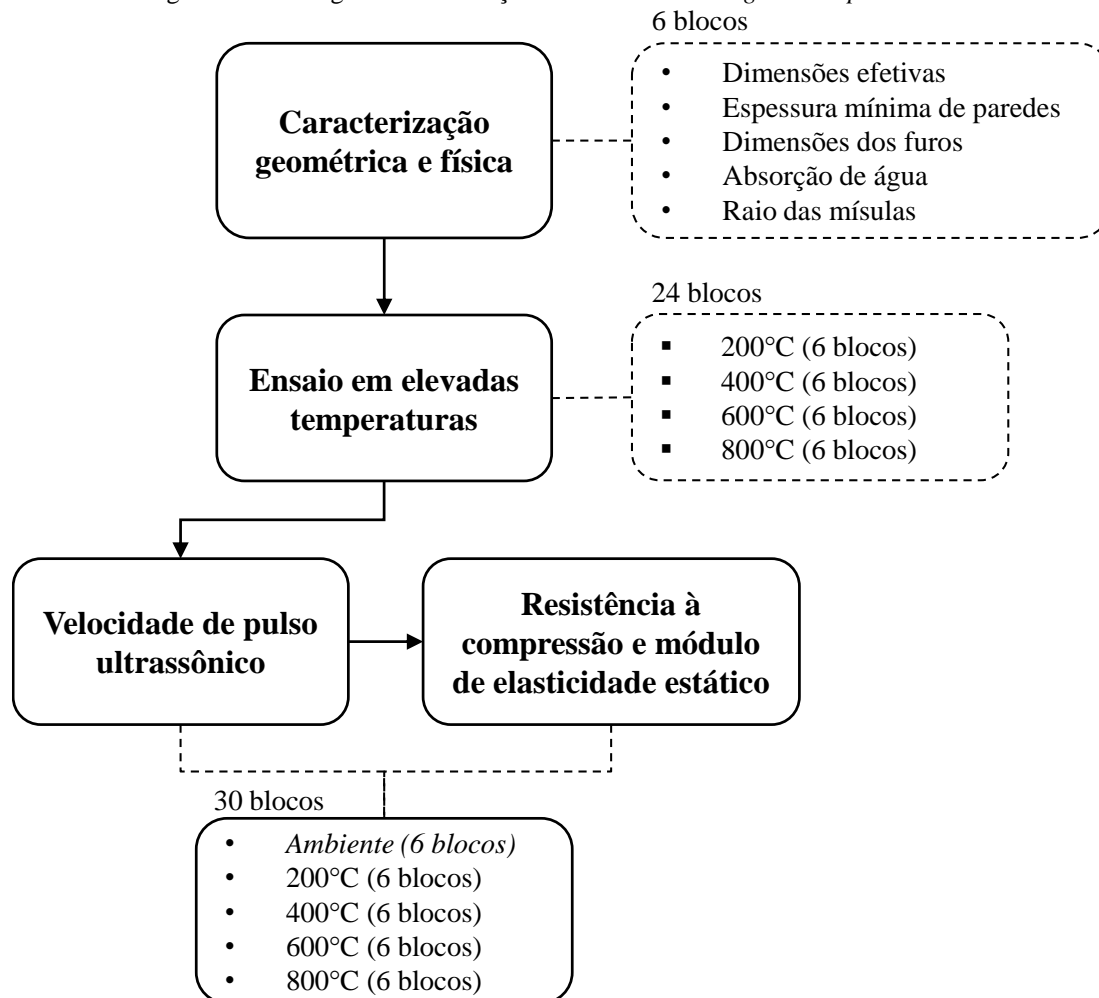
Fonte: Elaborado pelo Autor

3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

O fluxograma apresentado na Figura 3.2 busca informar a ordem dos ensaios realizados no *Programa experimental I*, bem como a amostragem necessária para cada ensaio. Inicialmente, os blocos foram submetidos às caracterizações geométrica e física (ensaio de absorção). Em seguida, foram realizados os ensaios em contexto térmico para quatro temperaturas de interesse: 200, 400, 600 e 800 °C. Essas temperaturas foram escolhidas porque essa faixa atende satisfatoriamente os objetivos do presente trabalho, sendo que em 800 °C já é possível observar uma degradação significativa nos corpos de prova. Após serem submetidos à elevação de temperatura, os blocos foram encaminhados para a avaliação por ultrassom,

seguido dos ensaios de compressão, para determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade longitudinal estático.

Figura 3.2: Fluxograma de execução dos ensaios do *Programa Experimental I*



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO

Nesta seção são apresentadas a metodologia e os resultados obtidos na etapa de caracterizações geométrica e física dos blocos de concreto estruturais.

3.2.1 Caracterização geométrica

A caracterização geométrica foi realizada de acordo com as recomendações da ABNT NBR 12118:2013, compreendendo os ensaios de análise dimensional, que incluem as aferições das dimensões efetivas (largura, comprimento e altura), espessura mínima das paredes, dimensões dos furos, raio das mísulas, área bruta e área líquida. Para tal caracterização, os blocos foram dispostos sobre uma superfície plana e indeformável, e foram empregados os

seguintes equipamentos: uma régua metálica com resolução de 1 mm, um paquímetro com resolução de 0,01 mm, um compasso e uma balança digital com resolução de 0,1 g.

Iniciou-se com a medição das dimensões efetivas, sendo realizadas medidas em três pontos distintos de cada face da largura, altura e comprimento dos blocos. A média das leituras realizadas e os valores de tolerância estabelecidos pela ABNT NBR 6136:2016 estão apresentadas na Tabela 3.1.

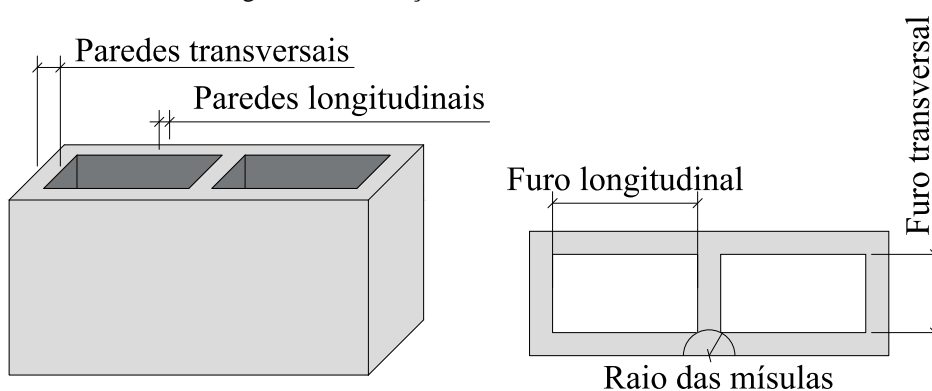
Tabela 3.1: Dimensões efetivas dos blocos de concreto

	Bloco de concreto		
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
Média	390,49	139,32	190,77
CV (%)	0,07	0,13	0,31
Tolerâncias: $\pm 2,0$ mm para largura e $\pm 3,0$ mm para altura e comprimento, expressas como a média das determinações executadas (ABNT NBR 6136:2016)			

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em seguida, foram determinadas, na face de menor espessura do bloco, as dimensões das paredes externas e dos septos. Na face de maior espessura, foram verificadas as dimensões dos furos e do raio das mísulas. As dimensões são ilustradas na Figura 3.3.

Figura 3.3: Indicação das dimensões dos blocos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Tabela 3.2 estão apresentados os resultados obtidos e respectivas tolerâncias preconizadas pela ABNT NBR 6136:2016 para os blocos de Classe A. Desta maneira, de acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2 se constata que, em relação às características geométricas, os blocos estão em conformidade com as tolerâncias estabelecidas pela ABNT NBR 6136:2016.

Tabela 3.2: Dimensões das paredes externas, dos septos, dos furos e raio das mísulas dos blocos de concreto

Bloco	Espessura			Dimensão dos furos		Raio das mísulas (mm)
	Paredes longitudinais (mm)	Paredes transversais (mm)	Transversal Equivalente (mm/m) ¹	Longitudinal (mm)	Transversal (mm)	
1	26,4	25,6	196,7	146,6	78,0	43,3
2	26,1	25,6	196,7	148,0	77,6	43,2
3	26,0	25,5	195,9	147,7	78,1	42,8
4	26,0	25,4	195,1	147,5	78,5	42,8
5	26,0	25,5	196,3	148,2	77,4	43,0
6	26,6	25,7	197,7	147,7	78,6	43,0
Média	26,18	25,53	-	147,63	78,04	-
CV (%)	0,89	0,45	-	0,38	0,61	-

¹ soma das medidas das paredes transversais (mm) dividido pelo comprimento nominal do bloco (m).
Tolerâncias: a espessura mínima das paredes longitudinais e transversais é 25 mm, com tolerância de -1,0 mm para cada valor individual; a espessura transversal equivalente mínima é 188 mm/m. A menor dimensão do furo não deve ser inferior a 70 mm. Os blocos devem ter mísulas de acomodação com raio mínimo de 40 mm, expresso individualmente.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Outras propriedades geométricas definidas se deram em relação à área bruta (A_{bruta}) e à área líquida (A_{liq}). A área bruta foi obtida por meio do produto entre a largura efetiva e comprimento efetivo do bloco, enquanto a área líquida foi obtida por meio da Equação 3.1, baseada no princípio de Arquimedes para medição de volumes em corpos submersos.

$$A_{liq} = \frac{(m_u - m_a)}{\mu_a \cdot h_b} \cdot 1000 \quad (3.1)$$

Em relação à Equação 3.1, valem:

A_{liq} – Área líquida da unidade, em mm^2 ;

m_u – Massa do bloco saturado, em g;

m_a – Massa aparente do bloco, em g;

h_b – Altura do bloco, em mm;

μ_a – Massa específica da água, tomada como 1 g/cm^3 .

Para aferição das medidas m_a e m_u , os blocos foram imersos em água em temperatura ambiente, no caso, de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas. Depois desse período, os blocos tiveram suas massas determinadas enquanto submersos para obtenção da massa aparente (m_a) e, posteriormente, foram pesados com sua superfície seca para aferição da massa saturada (m_u). Na Tabela 3.3 estão apresentados os valores médios da área bruta, área líquida e da relação A_{liq}/A_{bruta} dos blocos de concreto utilizados.

Tabela 3.3: Área bruta e área líquida dos blocos de concreto

	Área bruta (mm ²)	Área líquida (mm ²)	A_{liq}/A_{bruta} (%)
Média	54402,18	29230,07	53,73
CV (%)	0,12	0,12	0,12

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2.2 Caracterização física

As características físicas dos blocos foram obtidas conforme as recomendações da ABNT NBR 12118:2013, cujas propriedades avaliadas foram: índice de absorção (I_A), índice de porosidade (I_P), densidade aparente (γ) e densidade específica (ρ). Para realização dos ensaios foi utilizada uma balança digital com resolução de 0,01 g, juntamente com uma estufa com controle de temperatura ajustável a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para determinar as propriedades citadas anteriormente, foi necessário medir as massas seca, aparente e saturada. O processo de medição das massas aparente e saturada já foi comentado no item 3.2.1. Em relação à obtenção da massa seca (m_s), os corpos de prova (blocos) foram secos em estufa por 24 horas e, após esse período, foram retirados da estufa e pesados imediatamente; em seguida, foram colocados novamente na estufa, tendo suas massas determinadas novamente após 2 horas. O procedimento foi repetido até que dois resultados consecutivos não divergissem em mais de 0,5%.

Após a obtenção das massas seca, saturada e aparente, foi possível determinar o índice de absorção (I_A), índice de porosidade (I_P), densidade aparente (γ) e densidade específica (ρ) por meio da aplicação das Equações 3.2 a 3.5, respectivamente.

$$I_A = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \cdot 100 \quad (3.2)$$

$$I_P = \frac{(m_u - m_s)}{(m_u - m_a)} \cdot 100 \quad (3.3)$$

$$\gamma = \frac{m_s}{(m_u - m_a)} \cdot 1000 \quad (3.4)$$

$$\rho = \frac{m_s}{(m_s - m_a)} \cdot 1000 \quad (3.5)$$

Em relação às Equações 3.2 a 3.5, valem:

I_A e I_P – Índices de absorção de água e de porosidade, respectivamente, em %;

γ e ρ – Densidades aparente e específica, respectivamente, em kg/m^3 ;

m_s – Massa do bloco seco, em g.

Na Tabela 3.4 estão apresentadas as médias dos resultados das propriedades físicas das unidades de concreto. Observa-se que a absorção foi inferior ao limite de 8% estabelecido pela ABNT NBR 6136:2016 para a média dos blocos da classe A com função estrutural (conforme apresentado na Tabela 2.1).

Tabela 3.4: Propriedades físicas dos blocos de concreto

	Absorção, I_A (%)	Porosidade, I_P (%)	Densidade aparente, γ (kg/m³)	Densidade específica, ρ (kg/m³)
Média	4,78	10,81	2264,76	2539,27
CV (%)	5,05	4,28	0,78	0,29

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.3 ENSAIOS EM ELEVADAS TEMPERATURAS

Após os ensaios de caracterizações geométrica e física das unidades, foram conduzidos os ensaios em temperaturas elevadas com o intuito de avaliar as *velocidades de pulso ultrassônico* e as *resistências residuais* dos blocos de concreto após o aquecimento. A metodologia de ensaio seguiu as diretrizes definidas em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2022), que adaptou aos blocos de concreto a metodologia proposta pela RILEM TC 200-HTC:2007, voltada para a avaliação do concreto moldado úmido em temperaturas elevadas.

Em relação à amostragem, utilizaram-se 6 blocos para cada temperatura de interesse. A escolha dessa quantidade se deve ao fato de que, em se tratando da avaliação da resistência mecânica de blocos vazados de concreto em temperatura ambiente, códigos nacionais e internacionais, como por exemplo a ABNT NBR 6136:2016 e ASTM C140/C140M:2021, recomendam um conjunto mínimo de seis blocos para realização dos ensaios.

Quanto ao aquecimento, os corpos de prova foram submetidos à elevação de temperatura de 200, 400, 600 e 800 °C, seguindo uma taxa de 1 °C/min, permanecendo na temperatura alvo por 60 minutos, de modo a garantir um aquecimento uniforme de todos os blocos. Após esse período, houve um resfriamento natural, lento e gradual até a temperatura ambiente. Para o processo de aquecimento, foi utilizado o forno elétrico industrial tipo câmara da JUNG, modelo TB20012, localizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Engenharia de São Carlos (LMCC – EESC/USP), conforme Figura 3.4.

O forno em questão, enquanto características, possui capacidade de elevação de temperatura até 1200 °C, 200 litros, dimensões de 500 x 600 x 650 mm e munido com dois termopares para controle de temperatura interna. Os dados adquiridos pelos termopares foram

coletados por meio do *software* Logchart II, desenvolvido pela Novus®. Devido às dimensões internas do forno, foi possível ensaiar até três blocos em cada fornada, sendo duas por temperatura de interesse, totalizando oito fornadas durante a campanha experimental. Na Figura 3.5 é mostrada a disposição dos blocos no forno.

Figura 3.4: Forno elétrico industrial tipo câmara da JUNG (modelo TB20012)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 3.5: Disposição dos blocos de concreto no forno



Fonte: Elaborado pelo Autor

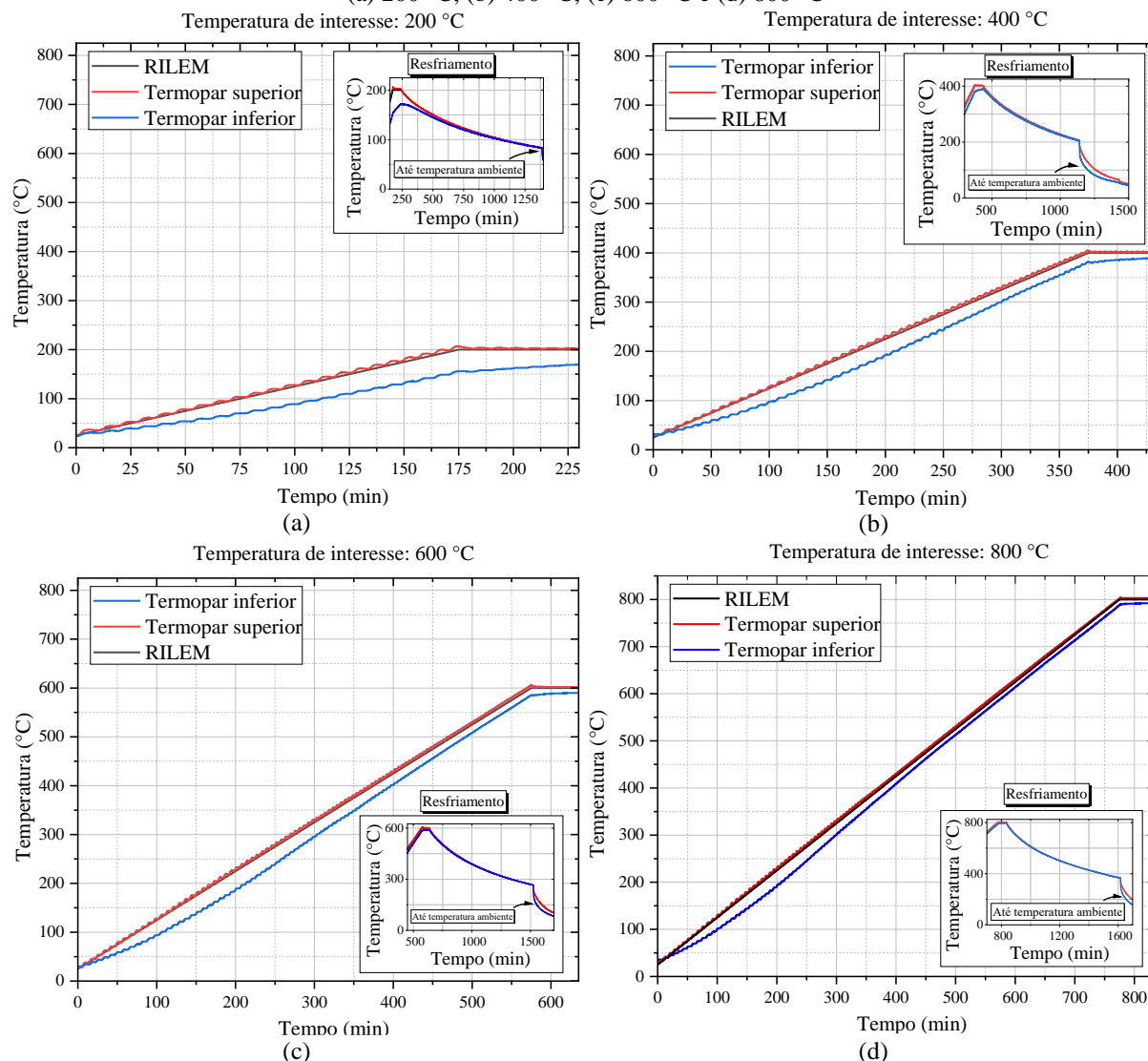
Após o aquecimento e resfriamento dos corpos de prova, os blocos foram isolados com *plástico-filme*, cujo procedimento foi adotado para evitar o contato direto do bloco com a umidade do ambiente e garantir que suas condições pós-aquecimento permaneçam estáveis até a realização dos demais ensaios. Tal procedimento foi adotado uma vez que, se exposto a

temperaturas elevadas devido a processos químicos expansivos de reidratação, o contato com o ambiente externo ao forno poderia resultar em fissuras no corpo de prova, prejudicando a resistência do material.

Na Figura 3.6 estão dispostas as temperaturas obtidas pelos termopares superior e inferior durante os ensaios em elevadas temperaturas. A condição dos blocos de concreto após os ensaios térmicos é ilustrada na Figura 3.7.

Figura 3.6: Leitura dos termopares durante os ensaios em elevadas temperaturas:

(a) 200 °C, (b) 400 °C, (c) 600 °C e (d) 800 °C



Fonte: Elaborado pelo Autor

Vale destacar que até 200 °C, os blocos permaneceram com características similares ao seu estado original. A partir dos 400 °C, as unidades começaram a apresentar uma coloração de tons rosáceos, se tornando mais evidente aos 600 °C. Em 800 °C, observou-se a mudança de

coloração dos blocos para tons de cinza claro, o que ocorreu devido à decomposição do material cimentício em óxido de cálcio (CaO), conforme comentado em Amaral *et al.* (2024).

As variações de tonalidade observadas nos blocos de concreto em temperaturas elevadas são coerentes com os eventos mencionados em Morales, Campos e Faganello (2011) e em Georgali e Tsakiridis (2005), que indicam uma mudança na coloração do concreto para tons rosáceos na faixa de temperatura entre 300 e 600 °C. Tal fato, está associado à presença dos constituintes ferrosos contidos nos agregados finos e graúdos, que por sua vez, oxidam à temperatura de 300 °C. Os autores também apontam uma alteração para tons de cinza claro na faixa de 600 a 900 °C.

Além da mudança de coloração, também foi possível notar uma clara alteração na textura dos blocos, que, em 600 °C e, sobretudo, 800 °C, apresentaram um aspecto bem quebradiço com superfície pulverulenta, o que também foi observado nos ensaios realizados em Dupim (2019) e em Leal (2022).

Figura 3.7: Blocos de concreto após ensaios em temperaturas elevadas:
(a) Ambiente, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C e (e) 800 °C



Fonte: Elaborado pelo Autor

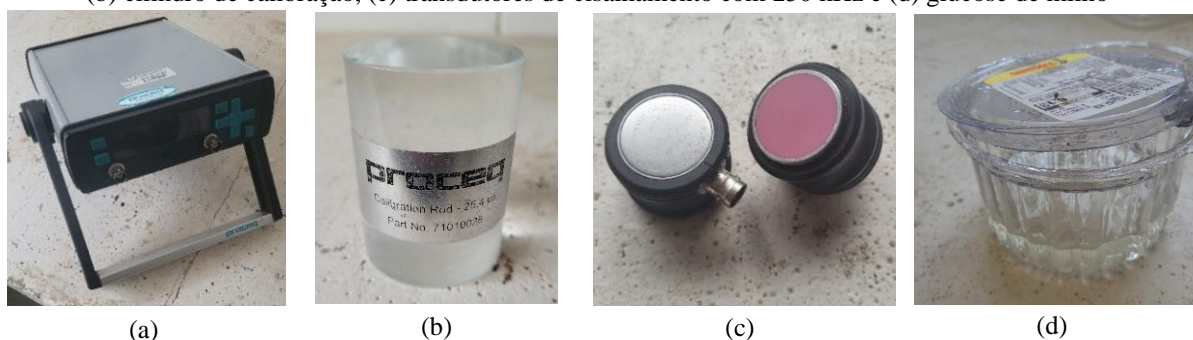
3.4 ENSAIOS DE ULTRASSOM

Após a realização dos ensaios em altas temperaturas, conforme apresentado no item 3.3, foram realizados os ensaios de *velocidade de pulso ultrassônico (VPU)* nos blocos de concreto, visando avaliar a influência do aumento da temperatura nas *velocidades longitudinal (V_L) e transversal (V_T) do pulso ultrassônico*, bem como nas propriedades dinâmicas associadas, tais como os *módulos de elasticidade dinâmico longitudinal (E_D) e transversal (G_D)* em pontos pré-definidos dos blocos de concreto.

Foram seguidas as prescrições da ABNT NBR 8802:2019 no que concerne à preparação das amostras e execução do ensaio, que consistiu na avaliação da propagação das ondas longitudinais (primárias) e transversais (secundárias) obtidas por meio da medição de pulsos ultrassônicos transmitidos de forma direta em diversos pontos do bloco.

Para a medição e armazenamento dos pulsos ultrassônicos, utilizou-se o equipamento Pundit Lab⁺, demonstrado na Figura 3.8a, e o *software* Pundit Link, ambos da empresa Proceq[®]. Antes da execução de cada ensaio, foi realizada a calibração dos transdutores e do equipamento de ultrassom a partir de um *cilindro de calibração* com tempo de percurso de ondas definido, conforme Figura 3.8b. As aquisições das medidas foram feitas por meio de um par de transdutores específicos para ondas de cisalhamento com frequência nominal de 250 kHz (Figura 3.8c), que realiza simultaneamente a aquisição de ondas longitudinais. O *agente acoplante* utilizado foi a glucose de milho (Figura 3.8d), em virtude da alta viscosidade e acessibilidade no mercado.

Figura 3.8: Materiais e equipamentos utilizados nos ensaios de ultrassom: (a) aparelho de ultrassom Pundit Lab⁺, (b) cilindro de calibração, (c) transdutores de cisalhamento com 250 kHz e (d) glucose de milho



Fonte: Elaborado pelo Autor

Devido à geometria relativamente complexa dos blocos de concreto, constituído por saliências, reentrâncias, vazios, além de paredes externas e internas com diferentes espessuras, entendeu-se que os ensaios ultrassônicos deveriam ser realizados tomando diversos pontos ao

longo da superfície, considerando a propagação das ondas em três direções distintas: altura, comprimento e largura; visando mapear as velocidades de pulso ultrassônico e propriedades dinâmicas em todo o corpo do bloco.

Dessa forma, idealizou-se uma malha retangular fictícia que possibilitou a realização de medidas em 6 pontos distintos ao longo de cada direção (altura, comprimento e largura). Ao todo, foram medidos 18 pontos por blocos, sendo importante salientar que, em cada uma das medidas, foram aplicados 10 pulsos ultrassônicos.

A malha de medição idealizada, com a disposição e numeração dos pontos adotados, bem como a direção de propagação e polarização das ondas ultrassônicas é apresentada na Figura 3.9. A propagação das ondas longitudinais ocorreu ao longo de cada uma das direções, enquanto as ondas transversais foram polarizadas na direção da largura (quando propagadas na altura) e na direção da altura (quando propagadas ao longo do comprimento e da largura). A aplicação da malha idealizada nos ensaios de ultrassom é apresentada na Figura 3.10.

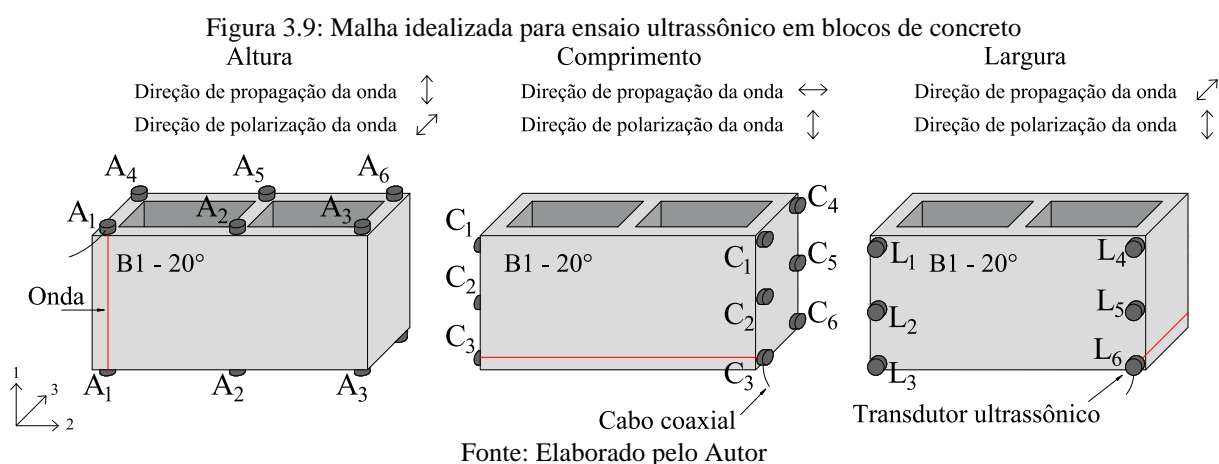


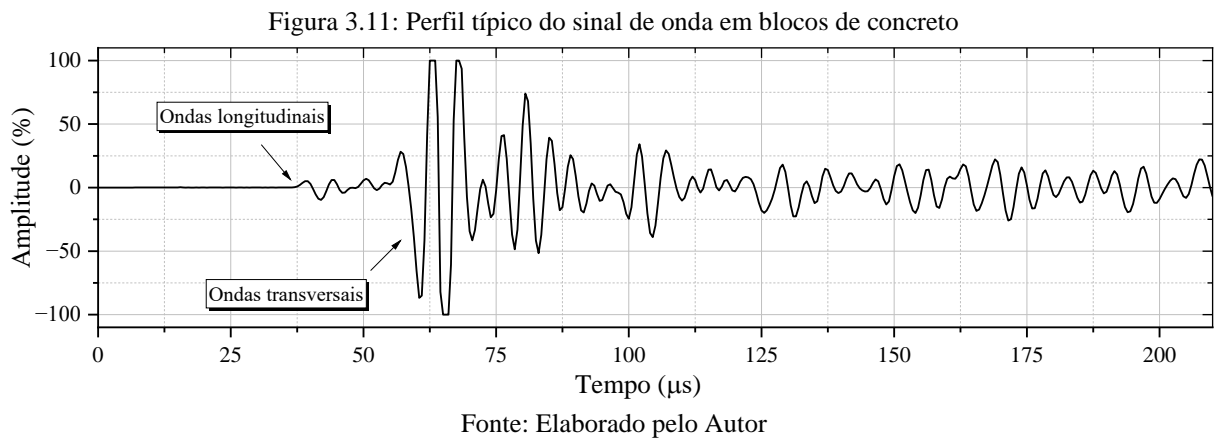
Figura 3.10: Aplicação da malha idealizada no ensaio de ultrassom em bloco de concreto



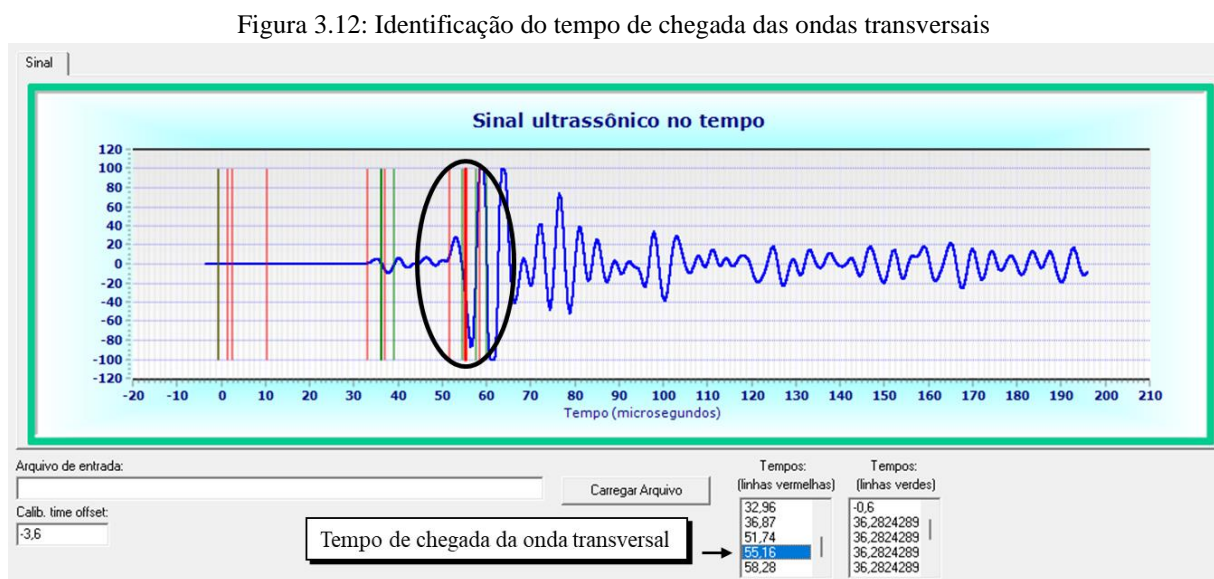
Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 3.11 é apresentado um perfil de onda típico obtido nas medições realizadas durante os ensaios, identificando o momento de chegada das *ondas longitudinais e transversais*.

As *ondas longitudinais* possuem velocidade maior que as transversais, uma vez que, as partículas do meio analisado vibram na mesma direção de propagação da onda. Por outro lado, as *ondas transversais* possuem menor velocidade e maior amplitude, devido ao processo de oscilação das partículas (transversal à propagação da onda). É importante destacar que, durante a realização do ensaio, foi dada especial atenção à orientação dos conectores dos cabos coaxiais, uma vez que ela interfere no plano de polarização da onda transversal.



Em relação às *ondas longitudinais*, o Pundit Lab⁺ identifica e registra o tempo de chegada automaticamente. Para determinar o tempo de propagação da onda transversal, foi necessário analisar a onda registrada pelo *software* por meio de uma ferramenta computacional desenvolvida por Schiavon (2015), conforme ilustrado na Figura 3.12.



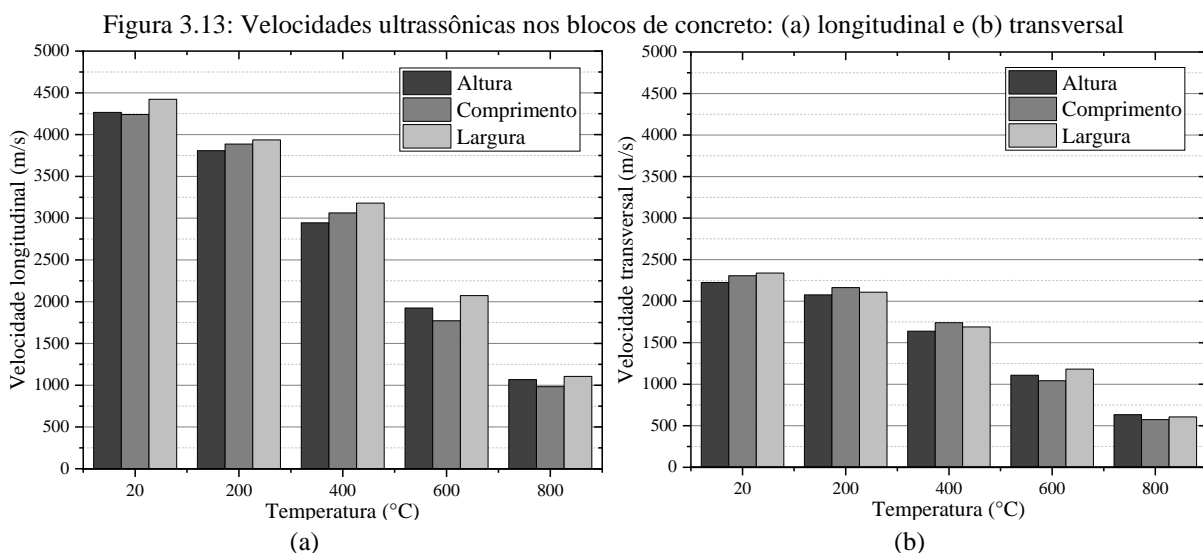
Após a realização dos ensaios e identificação dos tempos de chegada das ondas longitudinal e transversal nos pontos indicados na Figura 3.9, as velocidades foram calculadas a partir da razão entre a distância entre os transdutores e o tempo de chegada das ondas. Vale ressaltar, novamente, que para cada medida realizada, foram aplicados 10 pulsos ultrassônicos, logo, a velocidade representativa de um ponto do bloco foi obtida pela média entre as velocidades obtidas nos 10 pulsos.

Na Tabela 3.5 são apresentados os resultados obtidos das velocidades longitudinal (V_{Lb}) e transversal (V_{Tb}) dos blocos de concreto, contendo a média das velocidades de acordo com a temperatura de análise e a direção avaliada, além de uma média total por temperatura, que abrange todas as medidas aferidas. O comportamento da velocidade longitudinal e transversal segundo o aumento de temperatura é apresentado na Figura 3.13.

Tabela 3.5: Velocidades ultrassônicas longitudinal e transversal nos blocos de concreto em elevadas temperaturas

Temperatura		Altura		Comprimento		Largura		Média Total	
		$V_{Lb,A}$ (m/s)	$V_{Tb,A}$ (m/s)	$V_{Lb,C}$ (m/s)	$V_{Tb,C}$ (m/s)	$V_{Lb,L}$ (m/s)	$V_{Tb,L}$ (m/s)	V_{Lb} (m/s)	V_{Tb} (m/s)
20 °C	Média	4266,51	2225,49	4240,61	2306,72	4422,68	2338,88	4309,93	2290,36
	CV (%)	4,52	4,83	5,14	6,64	3,94	3,88	4,88	5,60
200 °C	Média	3808,47	2075,51	3887,15	2164,15	3936,74	2108,46	3877,45	2116,04
	CV (%)	2,76	5,22	4,32	3,99	4,20	5,37	4,04	5,14
400 °C	Média	2944,39	1639,02	3062,28	1740,14	3180,24	1689,78	3062,31	1689,65
	CV (%)	3,74	3,61	4,65	2,84	5,44	5,48	5,63	4,76
600 °C	Média	1924,39	1109,24	1771,71	1041,80	2073,54	1181,96	1923,21	1111,00
	CV (%)	3,66	6,80	12,55	14,92	8,62	8,60	10,85	11,54
800 °C	Média	1067,03	633,03	982,19	573,43	1105,07	606,11	1051,43	604,19
	CV (%)	10,02	13,89	16,91	19,35	11,16	12,90	13,58	15,84

Fonte: Elaborado pelo Autor



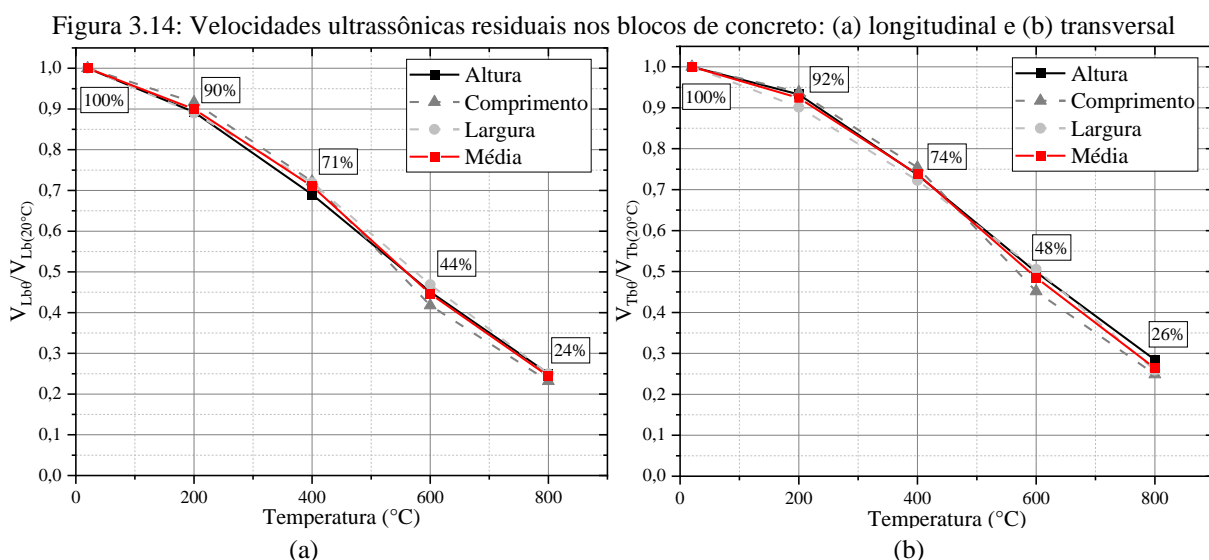
Fonte: Elaborado pelo Autor

É possível identificar uma considerável diminuição das velocidades longitudinal e transversal em decorrência da elevação da temperatura. Essa redução é consequência do processo de degradação do material e da fissuração do corpo de prova, que ocorre devido à exposição a altas temperaturas, o que torna a estrutura do bloco mais porosa e quebradiça, dificultando a propagação da onda no material.

Com base nos resultados apresentados anteriormente, é possível notar uma variação nas velocidades médias conforme a direção em que estão sendo avaliadas, o que se acentua com o aumento da temperatura. Em relação às ondas longitudinais, é possível notar que em todas as temperaturas avaliadas as velocidades obtidas na largura dos blocos são maiores do que nas outras direções, o que pode ser justificado pelo fato dela ser a direção de menor comprimento, sendo menor o percurso de onda e, portanto, menor as interferências encontradas devido à heterogeneidade do material.

Em se tratando das velocidades transversais, essa relação varia de acordo com a temperatura de análise. Por exemplo, em temperatura ambiente, a largura apresenta as maiores velocidades, enquanto em 200 e 800 °C, as maiores velocidades estão no comprimento e na altura, respectivamente. A diferença nas velocidades longitudinal e transversal propagadas em direções distintas foi analisada sob o ponto de vista estatístico, e será discutida posteriormente no capítulo 5.

Na Figura 3.14, as velocidades ultrassônicas dos blocos de concreto referentes a cada direção avaliada e à média total são apresentadas em termos residuais, tendo os resultados obtidos nos ensaios em temperatura ambiente como referência (100%) para o cálculo dos valores residuais das velocidades das ondas em diferentes temperaturas.



Fonte: Elaborado pelo Autor

É notório que as velocidades ultrassônicas apresentam uma grande semelhança no comportamento residual. Em geral, as velocidades longitudinais apresentaram um decréscimo de velocidade ligeiramente maior em relação às transversais. Em 200 °C, a média de velocidade longitudinal residual é de 90%, enquanto a transversal é de aproximadamente 92%. A pequena diferença persiste nas próximas temperaturas avaliadas, em 400 °C, têm-se velocidades longitudinais da ordem de 71% e transversais de 74%. Em 600 °C, os valores residuais das velocidades longitudinal e transversal decrescem para cerca de 44% e 48%, respectivamente, e, por fim, para 24% e 26%, em 800 °C.

Após aquisição das velocidades transversais e longitudinais, foram determinadas as propriedades dinâmicas do material que compõe a unidade de concreto por meio das Equações 2.7 e 2.8, assumindo-se a hipótese de que as ondas se propagaram em um meio isotrópico e homogêneo, como feito em Sombra e Haach (2022) e discutido em Bertoldo, Gorski e Gonçalves (2020). Para tanto, foi necessário, inicialmente, determinar a densidade específica do material (ρ) e o coeficiente de Poisson dinâmico (ν_D).

Em se tratando do parâmetro da densidade específica, nos cálculos dos módulos de elasticidade dinâmicos dos blocos em temperatura ambiente foi utilizada a densidade específica média obtida durante os ensaios de caracterização. Em relação aos blocos submetidos à elevação de temperatura, a propriedade foi calculada por meio das equações disponíveis no Eurocode 2 (EN 1992-1-2:2004), demonstrado nas Equações 3.6 a 3.9.

$$\rho(\theta) = \rho(20\text{ }^{\circ}\text{C}), \text{ para } 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.6)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot \left(1 - \frac{0,02(\theta - 115)}{85}\right), \text{ para } 115\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 200\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.7)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot \left(0,98 - \frac{0,03(\theta - 200)}{200}\right), \text{ para } 200\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 400\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.8)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot \left(0,95 - \frac{0,07(\theta - 400)}{800}\right), \text{ para } 400\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.9)$$

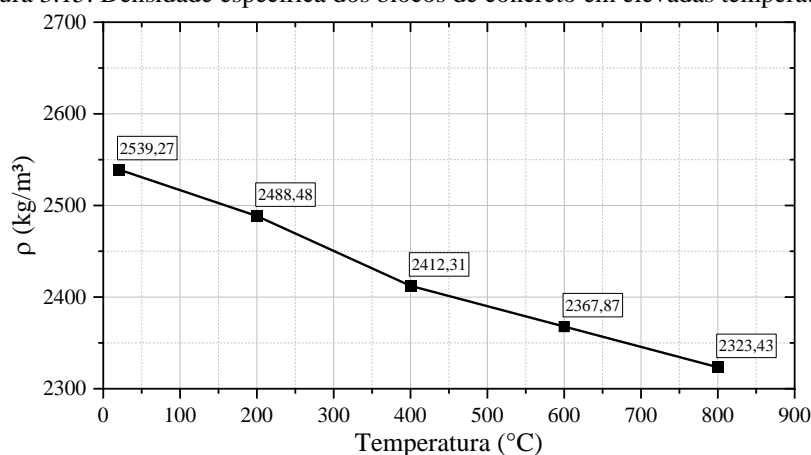
Em relação às Equações 3.6 a 3.9, valem:

ρ – Densidade específica, em kg/m^3 , em que $\rho(20\text{ }^{\circ}\text{C}) = 2539,27\text{ kg/m}^3$

θ – Temperatura, em °C

Na Figura 3.15 é ilustrada a variação da densidade específica com a elevação da temperatura.

Figura 3.15: Densidade específica dos blocos de concreto em elevadas temperaturas



Fonte: Elaborado pelo Autor

O coeficiente de Poisson dinâmico (ν_D), referente à cada ponto indicado na Figura 3.9, foi calculado por meio da Equação 3.10.

$$\nu_D = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} \quad (3.10)$$

Na Tabela 3.6 estão apresentados os resultados dos coeficientes de Poisson dinâmico médio para cada direção avaliada em diferentes níveis de temperatura, bem como a média total considerando todos os pontos avaliados. Observa-se, de forma clara, o aumento da dispersão dos valores do Poisson dinâmico nos blocos de concreto (ν_{Db}) em resposta ao aumento da temperatura, permitindo concluir que com a elevação de temperatura, a heterogeneidade do material é evidenciada.

Tabela 3.6: Variação do coeficiente de Poisson dinâmico dos blocos de concreto em elevadas temperaturas

Temperatura		Altura	Comprimento	Largura	Média Total
		$\nu_{Db,A}$	$\nu_{Db,C}$	$\nu_{Db,L}$	ν_{Db}
20 °C	Média	0,31	0,29	0,31	0,30
	CV (%)	8,14	9,59	4,80	8,30
200 °C	Média	0,29	0,27	0,30	0,29
	CV (%)	7,70	7,23	7,41	8,12
400 °C	Média	0,27	0,26	0,30	0,28
	CV (%)	8,73	8,96	8,14	10,55
600 °C	Média	0,25	0,23	0,25	0,25
	CV (%)	14,57	20,01	18,97	18,10
800 °C	Média	0,22	0,24	0,28	0,25
	CV (%)	21,86	26,22	19,40	24,12

Fonte: Elaborado pelo Autor

A partir da determinação dos coeficientes de Poisson dinâmico e da aplicação da densidade específica, foi possível calcular os módulos de elasticidade dinâmico longitudinal

(E_D) e transversal (G_D) do material que compõe a unidade de concreto por meio das Equações 3.11 e 3.12.

$$E_D = \frac{V_L^2 \cdot \rho \cdot (1 - 2\nu_D)(1 + \nu_D)}{(1 - \nu_D)} \quad (3.11)$$

$$G_D = V_T^2 \cdot \rho \quad (3.12)$$

Na Tabela 3.7 estão apresentadas as médias dos módulos de elasticidade dinâmico longitudinal (E_{Db}) e transversal (G_{Db}) dos blocos de concreto.

Tabela 3.7: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal dos blocos de concreto em elevadas temperaturas

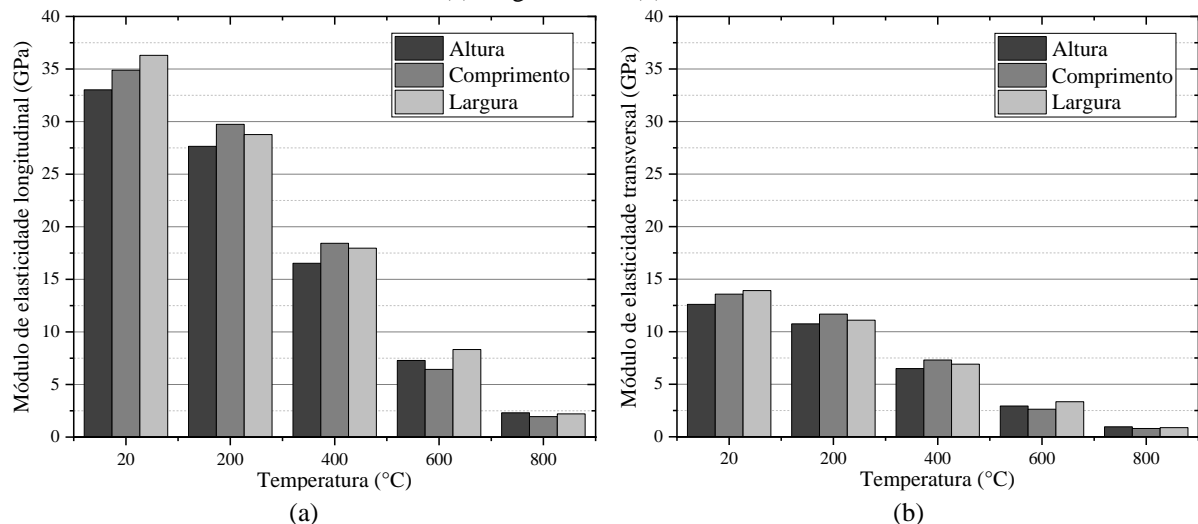
Temperatura		Altura		Comprimento		Largura		Média Total	
		$E_{Db,A}$ (GPa)	$G_{Db,A}$ (GPa)	$E_{Db,C}$ (GPa)	$G_{Db,C}$ (GPa)	$E_{Db,L}$ (GPa)	$G_{Db,L}$ (GPa)	E_{Db} (GPa)	G_{Db} (GPa)
20 °C	Média	33,02	12,60	34,89	13,57	36,30	13,91	34,74	13,36
	CV (%)	8,64	9,56	11,93	13,18	7,45	7,75	10,20	11,13
200 °C	Média	27,74	10,75	29,74	11,67	28,76	11,09	28,72	11,17
	CV (%)	8,99	10,37	7,68	7,88	9,67	10,55	9,21	10,12
400 °C	Média	16,52	6,49	18,42	7,31	17,96	6,91	17,64	6,90
	CV (%)	6,57	7,21	6,29	5,61	10,50	11,24	9,23	9,58
600 °C	Média	7,29	2,93	6,44	2,63	8,33	3,33	7,35	2,96
	CV (%)	11,19	13,41	25,06	26,42	16,17	17,13	20,47	21,32
800 °C	Média	2,31	0,95	1,94	0,79	2,21	0,87	2,15	0,87
	CV (%)	25,26	27,54	35,72	36,89	24,10	25,48	28,83	30,51

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em concordância com as velocidades, as propriedades dinâmicas regrediram com o aumento da temperatura, o que pode ser visto na Figura 3.16.

Figura 3.16: Módulos de elasticidade dinâmico dos blocos de concreto em elevadas temperaturas:

(a) longitudinal e (b) transversal

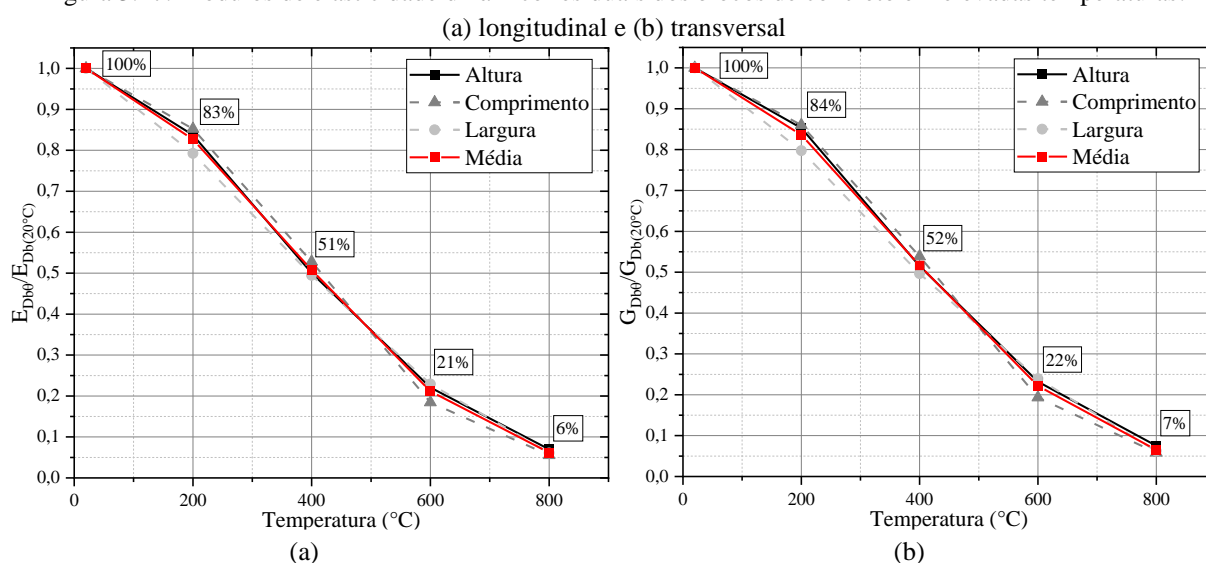


Fonte: Elaborado pelo Autor

Tal fato demonstra o processo de degradação do material, já citado anteriormente, causado pela exposição a altas temperaturas. Nota-se também os altos coeficientes de variabilidade nas propriedades dinâmicas em 600 e 800 °C, evidenciando a maior heterogeneidade do material em temperaturas elevadas.

Na Figura 3.17 as propriedades mecânicas dinâmicas longitudinal e transversal dos blocos de concreto referentes a cada direção avaliada e à média total são apresentadas em termos de $E_{Db\theta}/E_{Db(20^{\circ}C)}$ e $G_{Db\theta}/G_{Db(20^{\circ}C)}$, respectivamente.

Figura 3.17: Módulos de elasticidade dinâmico residuais dos blocos de concreto em elevadas temperaturas:



Fonte: Elaborado pelo Autor

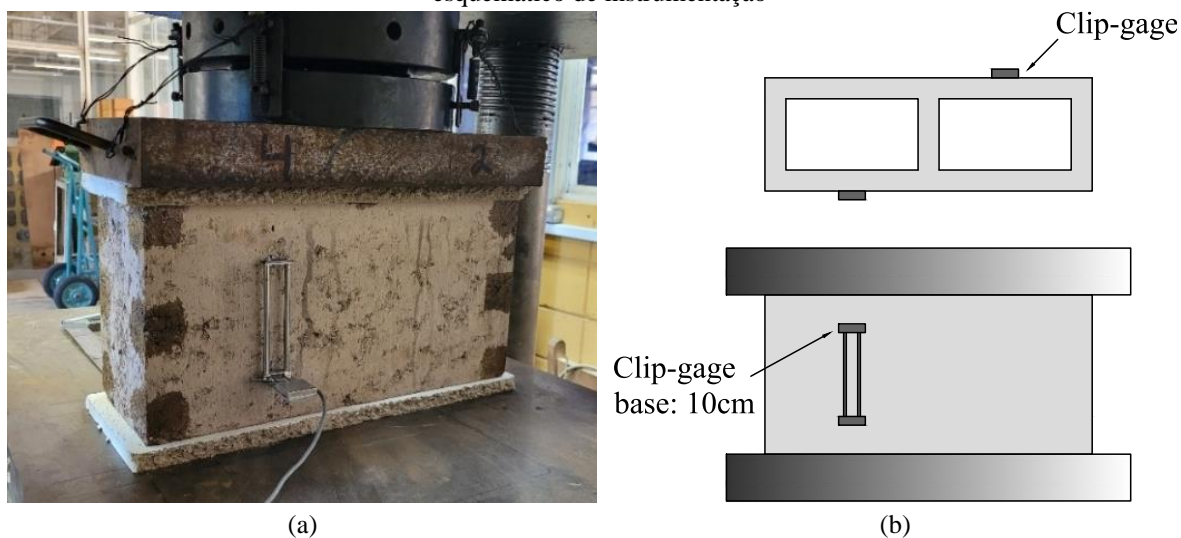
Percebe-se, que os módulos de elasticidade longitudinal e transversal possuem comportamento residual semelhante. Em 200 °C, a média das propriedades dinâmicas residuais é de cerca de 84%, e em 400 °C, da ordem de 50%. As propriedades continuam a regredir nas temperaturas de análise que se seguem, sendo de aproximadamente 22% aos 600 °C e 6% em 800 °C. É notório também que, comparado as velocidades ultrassônicas, as propriedades dinâmicas são afetadas de forma mais intensa devido à elevação de temperatura.

3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Os ensaios de resistência à compressão e determinação do módulo de elasticidade longitudinal estático dos blocos de concreto foram realizados conforme a ABNT NBR 12118:2013 e ABNT NBR 16868-3:2020, sendo iniciados posteriormente aos ensaios de ultrassom e em até 15 dias após os ensaios no forno. Foram utilizadas placas de forro de fibra

mineral para o capeamento das faces superior e inferior dos blocos, conforme ilustrado na Figura 3.18a, a fim de evitar a concentração de tensões devido à conformação irregular ou à presença de agregados nas superfícies das unidades. Essa metodologia já foi realizada em pesquisas anteriores desenvolvidas no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, como em Dupim (2019), em Leal (2022) e em Gondim (2022), e se mostrou adequada para obtenção das propriedades mecânicas dos corpos de prova.

Figura 3.18: Ensaio de resistência à compressão nos blocos de concreto: (a) realização do ensaio e (b) desenho esquemático de instrumentação



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os ensaios foram realizados na máquina servo-hidráulica Instron Satec®, modelo 300 UTM-HVL, com capacidade nominal de 1500 kN, juntamente com o sistema de aquisição de dados System 5000 da Vishay Instruments®. O carregamento foi aplicado por meio do controle de deslocamentos a uma velocidade de 0,02 mm/s. Para análise da deformabilidade dos blocos de concreto foram utilizados dois clip-gages de base igual a 100 mm, posicionados de forma antissimétrica nas duas faces longitudinais dos blocos, conforme apresentado na Figura 3.18b.

Desse modo, foram obtidas as curvas tensão x deformação dos blocos para cada temperatura de interesse, bem como o módulo de elasticidade secante estático (E_s) de acordo com o recomendado pela ABNT NBR 16868-3:2020, utilizando trechos limitados a 5% e 30% da máxima resistência à compressão. O módulo de elasticidade transversal estático foi calculado a partir da expressão oriunda da teoria da elasticidade ($G_s = E_s/2(1+\nu)$), adotando coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,20, conforme indicado pela ABNT NBR 16868-1:2020 para os blocos de concreto.

Na Tabela 3.8, são apresentadas as resistências média e característica à compressão, e os módulos de elasticidade estático longitudinal e transversal dos blocos de concreto em diferentes níveis de temperatura. Os valores de resistência média foram calculados pela relação entre a carga de ruptura e a área bruta do bloco, ressaltando-se que a adoção da área bruta para esses fins foi feita devido essa ser utilizada nos parâmetros de projeto. Já a resistência característica dos blocos foi calculada de acordo com o procedimento estabelecido pela ABNT NBR 16868-3:2020. Acrescenta-se ainda que, para verificação da existência de valores espúrios, todas as amostras foram avaliadas segundo teste estatístico de Grubbs (1969).

Tabela 3.8: Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos blocos de concreto

Temperatura		Força (kN)	Resistência na Ábruta - f_b (MPa)	E_{sb} (GPa)	G_{sb} (GPa)
20°C	Média	1093,42	20,10	14,78	6,16
	CV (%)	9,03	9,03	28,34	28,34
	f_{bk} (MPa)		15,72		
200°C	Média	1029,19	18,92	10,29	4,29
	CV (%)	12,20	12,20	4,93	4,93
	f_{bk} (MPa)		13,66		
400°C	Média	838,70	15,42	4,83	2,01
	CV (%)	13,50	13,50	5,27	5,27
	f_{bk} (MPa)		11,46		
600°C	Média	739,50	13,59	1,72	0,72
	CV (%)	13,39	13,39	6,39	6,39
	f_{bk} (MPa)		11,35		
800°C	Média	286,62	5,27	0,39	0,16
	CV (%)	5,97	5,97	5,60	5,60
	f_{bk} (MPa)		4,79		

Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 3.19 são apresentados os diagramas tensão x deformação obtidos para cada temperatura de interesse, destacando que os valores positivos nos eixos do diagrama em questão se referem às tensões de compressão e deformações de encurtamento. Com o aumento da temperatura, os blocos perderam capacidade de resistência à compressão, além de apresentarem uma diminuição na rigidez (ou aumento da deformabilidade), como já era esperado.

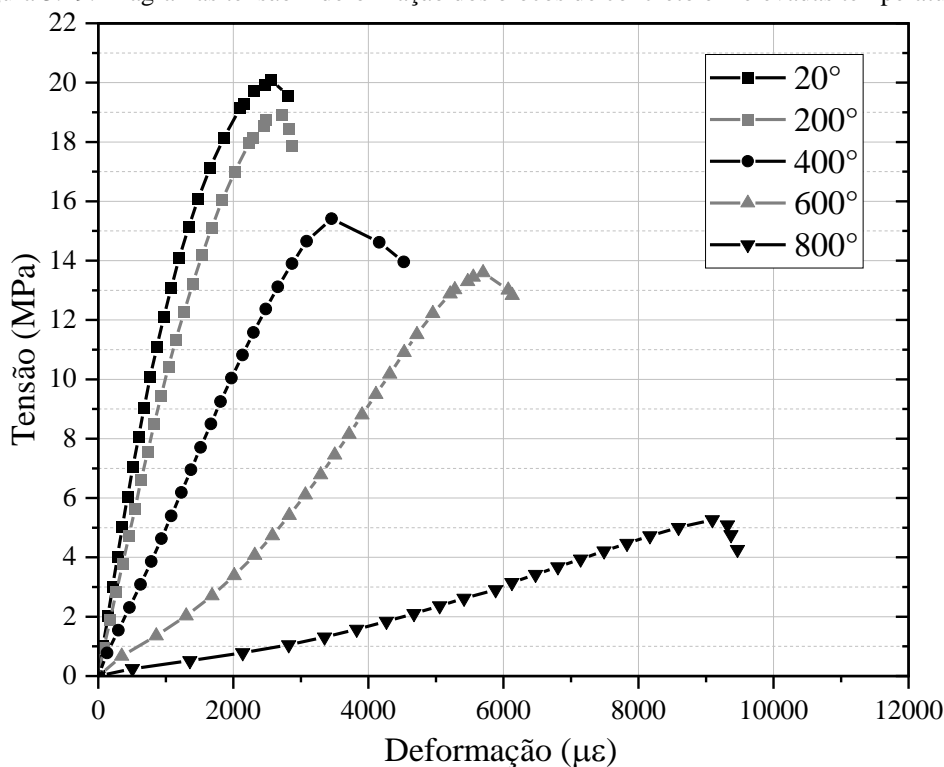
Na Figura 3.20a é exibida a curva residual de resistência à compressão dos blocos de concreto, expressa em termos de $f_{bm\theta}/f_{bm(20^\circ C)}$. De modo geral, observa-se que houve uma razoável perda de resistência até 600 °C, tendo-se ainda cerca de 67% da resistência aferida em temperatura ambiente. Entretanto, após os 600 °C, há uma queda abrupta da resistência, chegando a apenas 26% de resistência residual aos 800 °C. Isso está relacionado, segundo

Amaral *et al.* (2024), ao processo de expansão do quartzo, que ocorre aproximadamente à 570 °C, devido a uma transformação polimórfica, o que contribui com o aumento das tensões internas e fissuração do material; além do processo de desidratação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que ocorre nessa mesma faixa de temperatura.

A curva residual do módulo de elasticidade longitudinal do bloco é mostrada na Figura 3.20b, expressa em termos de $E_{Sb\theta}/E_{Sb(20^\circ\text{C})}$. Observa-se que a exposição a altas temperaturas afeta mais intensamente a deformabilidade do material do que sua resistência. Ao atingir a temperatura de 200 °C, verificou-se um módulo de elasticidade longitudinal residual de aproximadamente 70%, comportando-se de forma quase que linear até os 400 °C, com cerca de 33%. Em 600 °C, o resíduo é de 12%. Por fim, aos 800 °C, o módulo residual cai para 3%.

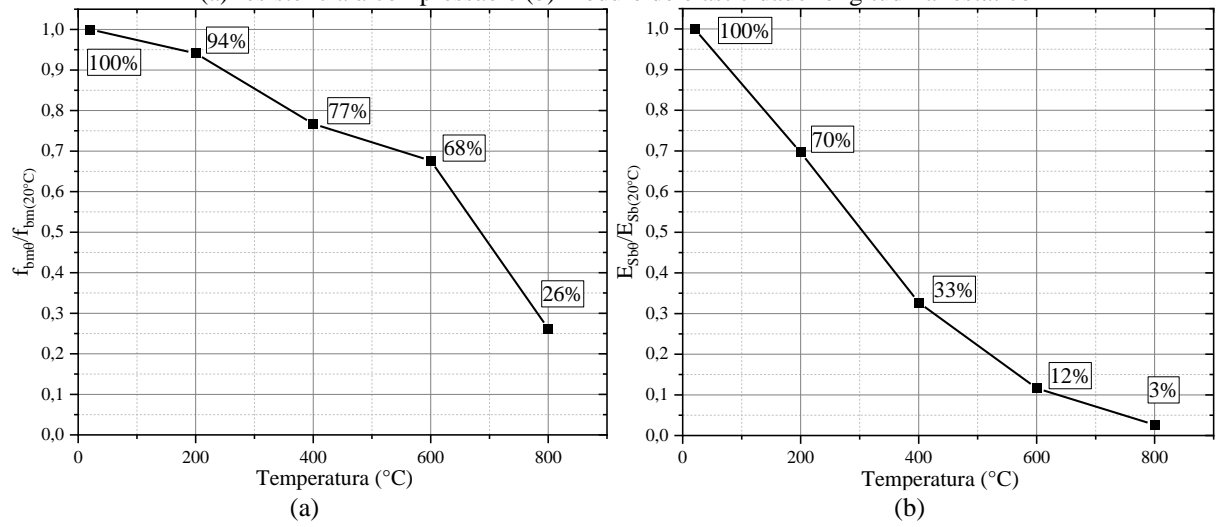
Em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2023), a rápida diminuição do módulo de elasticidade dos blocos é atribuída à microestrutura da zona de transição na interface pasta-agregado, que exerce grande influência na rigidez do concreto. No material compósito, esta zona atua como uma ponte entre a matriz de argamassa e as partículas de agregado gráudo. Devido à microfissuração e aumento de vazios, decorrente da exposição a altas temperaturas, a transferência de tensão é impedida. Como consequência, a rigidez do compósito é reduzida e o módulo de elasticidade do concreto cai mais rapidamente do que a resistência à compressão.

Figura 3.19: Diagramas tensão x deformação dos blocos de concreto em elevadas temperaturas



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 3.20: Curvas residuais dos blocos de concreto:
(a) resistência à compressão e (b) módulo de elasticidade longitudinal estático



Fonte: Elaborado pelo Autor

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL II: ARGAMASSAS E PRISMAS DE DOIS BLOCOS

No presente capítulo, analogamente ao que foi feito no capítulo 3, é apresentada a metodologia empregada no *Programa experimental II*, que abordou o comportamento mecânico residual estático e dinâmico dos prismas constituído por dois blocos de concreto e argamassa de assentamento submetidos a elevadas temperaturas.

4.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

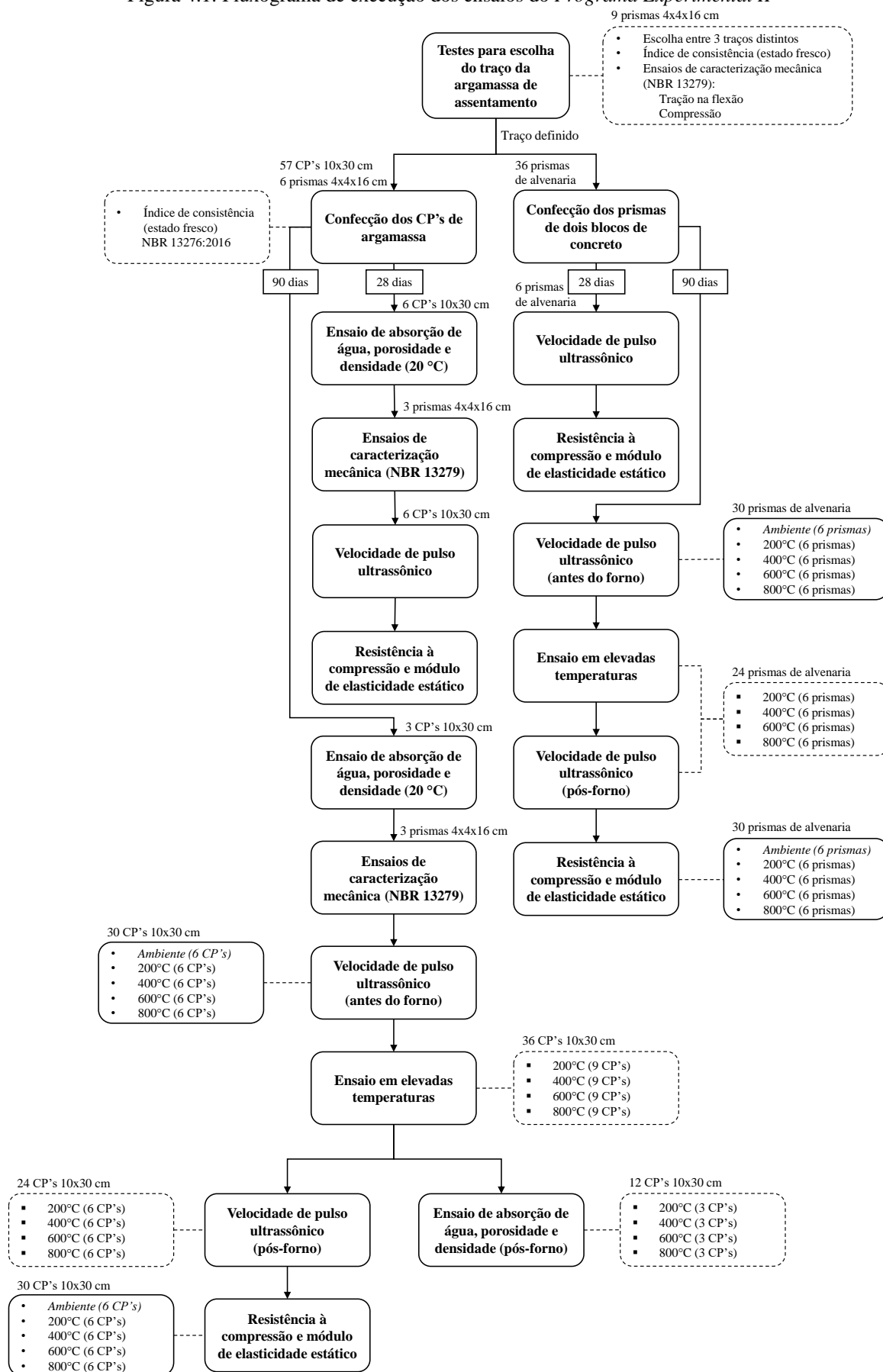
Na Figura 4.1, é apresentado um fluxograma contendo a ordem dos ensaios realizados no *Programa experimental II*, bem como a amostragem correspondente a cada um deles. O programa iniciou-se com os testes para a definição da argamassa de assentamento, que incluíram a avaliação de três tipos de traços. Após a definição do traço de argamassa para assentamento dos blocos, deu-se início a etapa de construção dos prismas de alvenaria e dos corpos de prova de argamassa. Em ambos foram realizados ensaios em 28 e 90 dias.

Em se tratando das argamassas, foram confeccionados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 30 cm de altura, de acordo com a RILEM TC 200-HTC:2007, para as avaliações em elevadas temperaturas; e prismáticos de 4 x 4 x 16 cm conforme ABNT NBR 13279:2005, para caracterização mecânica da argamassa.

Aos 28 dias, os corpos de prova de argamassa 10 x 30 cm foram submetidos aos ensaios de absorção de água, velocidade de pulso ultrassônico, resistência à compressão e módulo de elasticidade longitudinal estático, destacando que para os ensaios de ultrassom e compressão, os corpos de prova estavam em seu estado seco após um período de 24 horas em estufa elétrica. Após 90 dias da confecção, realizaram-se os ensaios térmicos, sendo parte desses corpos de prova conduzidos aos ensaios de absorção, e outra parte aos ensaios de ultrassom (realizados antes e depois da fornada), de resistência à compressão e de módulo de elasticidade estático.

Em relação aos corpos de prova prismáticos de argamassa, esses foram submetidos aos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão aos 28 e 90 dias, sendo possível avaliar a evolução das propriedades mecânicas da argamassa nesse intervalo de tempo.

Com relação aos prismas de alvenaria, aos 28 dias foram realizados os ensaios de velocidade de pulso ultrassônico, seguido de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático. Após o período de 90 dias de cura, os prismas de dois blocos de concreto foram submetidos aos ensaios em altas temperaturas, ultrassom (antes e depois da fornada) e determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade longitudinal estático.

Figura 4.1: Fluxograma de execução dos ensaios do *Programa Experimental II*

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2 ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

Nesta seção, é apresentado o processo de confecção da argamassa de assentamento, descrevendo os materiais utilizados, a fase de testes para escolha do traço ideal para a argamassa, bem como a produção dos corpos de prova.

4.2.1 Materiais utilizados

Para a confecção das argamassas, foram utilizadas areia natural média (agregado miúdo) e dois aglomerantes: cimento Portland CP II-E e cal hidratada CH III, ambos da Itaú®. Foram realizados ensaios para obtenção das massas específica e unitária dos aglomerantes.

Para determinação da massa específica foram seguidas as instruções da ABNT NBR 16605:2017, mediante a disposição de uma massa conhecida do aglomerante em um frasco de Le Chatelier preenchido com querosene. A massa unitária, por sua vez, foi obtida de acordo com as recomendações da ABNT NBR 16972:2021, por meio da relação entre a massa não compactada do material e o volume conhecido de um recipiente metálico preenchido. Na Tabela 4.1 estão apresentados os valores das propriedades físicas dos aglomerantes.

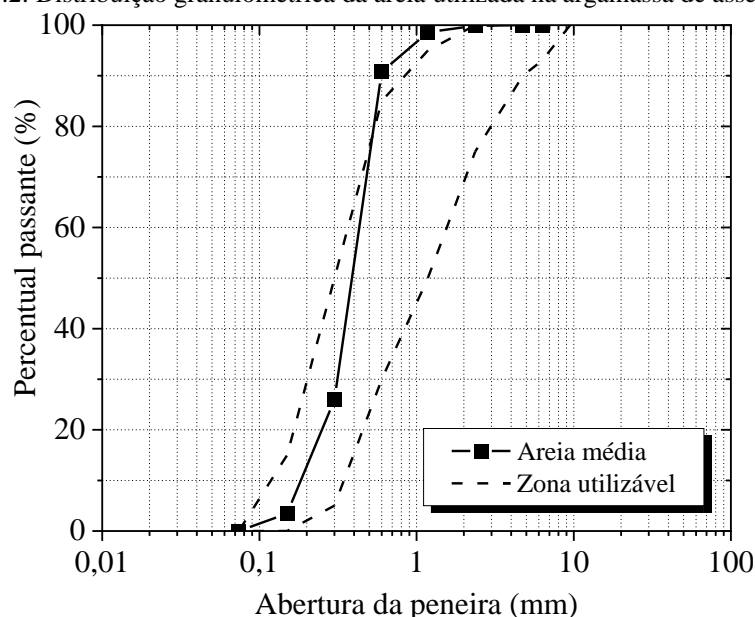
Tabela 4.1: Propriedades físicas dos aglomerantes utilizados na argamassa de assentamento

	Massa específica (kg/m³)	Massa unitária (kg/m³)
Cimento CP II-E	3015,1	1134,7
Cal CH III	2467,0	737,4

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em relação ao agregado miúdo, foi utilizada areia de granulometria média (classificação conforme a ABNT NBR 6502:2022). Assim como feito para os aglomerantes, as propriedades físicas dos agregados, como massa específica e unitária, foram obtidas por meio de ensaios prescritos pela ABNT NBR 16916:2021 e ABNT NBR 16972:2021, respectivamente. Adicionalmente, foi realizado o ensaio de granulometria da areia, que seguiu as instruções estabelecidas na ABNT NBR 17054:2022, devendo atender às especificações da ABNT NBR 7214:2015. Na Figura 4.2 é apresentada a distribuição granulométrica da areia utilizada na fabricação da argamassa, enquanto na Tabela 4.2 são apresentadas as suas propriedades físicas, a dimensão máxima característica do agregado e o módulo de finura.

Figura 4.2: Distribuição granulométrica da areia utilizada na argamassa de assentamento



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 4.2: Propriedades físicas da areia utilizada na argamassa de assentamento

Propriedade	Areia média
Massa específica (kg/m ³)	2530,1
Massa unitária (kg/m ³)	1656,3
Dimensão máxima característica (mm)	1,18
Módulo de finura	1,81

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2.2 Testes para definição da argamassa

Foram testados três traços de argamassa, compostos por: cimento Portland, cal e areia, sugeridos pela BS 5628-1:2005, norma britânica referente à alvenaria estrutural, a fim de determinar qual seria o traço empregado na construção dos prismas de alvenaria. Na Tabela 4.3 estão suas descrições em termos de volume e massa.

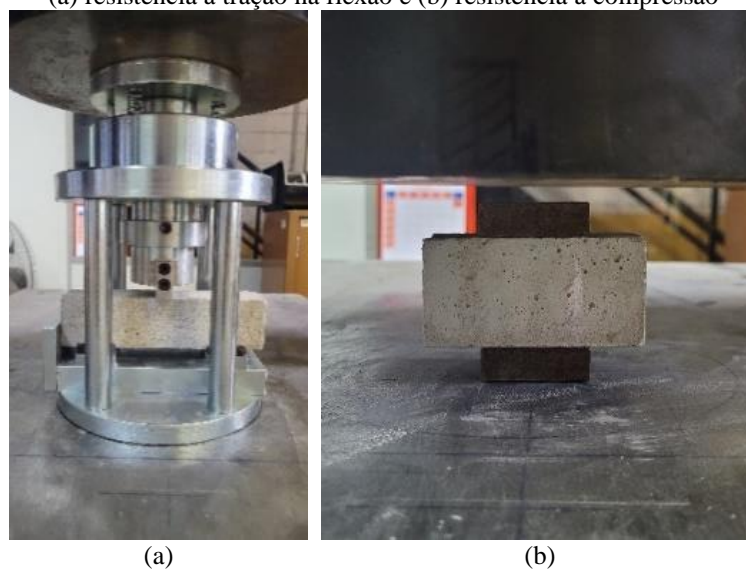
Tabela 4.3: Descrição dos traços de argamassa testados

Identificação		Cimento	Cal	Areia	Água
Traço I	Traço em volume	1	0,25	3	0,85
	Traço em massa	1	0,16	4,38	0,85
Traço II	Traço em volume	1	0,5	4,5	1,3
	Traço em massa	1	0,32	6,57	1,3
Traço III	Traço em volume	1	1	6	1,7
	Traço em massa	1	0,65	8,76	1,7

Fonte: Elaborado pelo Autor

Foram produzidos três corpos de prova prismáticos 4 x 4 x 16 cm para cada traço, totalizando nove prismas. Após 28 dias do processo de moldagens desses prismas, os mesmos foram submetidos aos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão (f_a), conforme ilustrado na Figura 4.3, cujos respectivos resultados estão dispostos na Tabela 4.4.

Figura 4.3: Caracterização mecânica da argamassa de assentamento:
(a) resistência à tração na flexão e (b) resistência à compressão



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 4.4: Propriedades mecânicas dos traços de argamassa testados

Identificação		Resistência à compressão - f_a (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)
Traço I	Média	11,05	3,59
	CV (%)	6,86	3,14
Traço II	Média	4,56	1,89
	CV (%)	5,87	2,02
Traço III	Média	4,14	1,37
	CV (%)	2,60	1,81

Fonte: Elaborado pelo Autor

A ABNT NBR 13281-2:2023 estabelece requisitos para a resistência à compressão da argamassa (f_a) de acordo com a resistência característica à compressão do bloco (f_{bk}), conforme demonstrado na Tabela 2.2.

Tendo em vista que os blocos utilizados nessa pesquisa possuem resistência característica à compressão de 15,72 MPa, foi escolhido o traço de argamassa que melhor se adequa aos critérios de resistência da classe de uso AAE12. Sendo assim, apesar de estar um pouco abaixo do limite estabelecido ($12,0 \text{ MPa} \leq f_a < 16,0 \text{ MPa}$), o Traço I, com resistência à compressão de 11,05 MPa, foi escolhido para a produção da argamassa de assentamento dos prismas de alvenaria.

4.2.3 Confeção da argamassa

Posteriormente à determinação do traço a ser utilizado, deu-se início à confecção da argamassa de assentamento dos prismas de alvenaria. A argamassa foi produzida em misturador mecânico de eixo inclinado (betoneira) do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Engenharia de São Carlos (LMCC – EESC/USP), seguindo o traço 1:0,25:3 (em volume – cimento, cal e areia), como dito na seção anterior, bem como relação água/cimento a 0,85, sendo estabelecida de forma a garantir a trabalhabilidade adequada para o serviço em questão, conforme menciona a ABNT NBR 16868-2:2020.

O processo de mistura da argamassa foi realizado conforme as prescrições da ABNT NBR 16541:2016. Em seu estado fresco, a argamassa foi caracterizada em relação ao índice de consistência de acordo com as recomendações da ABNT NBR 13276:2016. Para tanto, foi utilizada uma mesa manual para índice de consistência, um molde tronco cônico, um soquete metálico e uma régua metálica com resolução de 1,0 mm. O índice de consistência encontrado foi igual a 251,0 mm, obtido a partir da média de três registros realizados em diferentes pontos da argamassa. Na Figura 4.4 está ilustrada a realização do ensaio.

Figura 4.4: Ensaio de índice de consistência da argamassa de assentamento



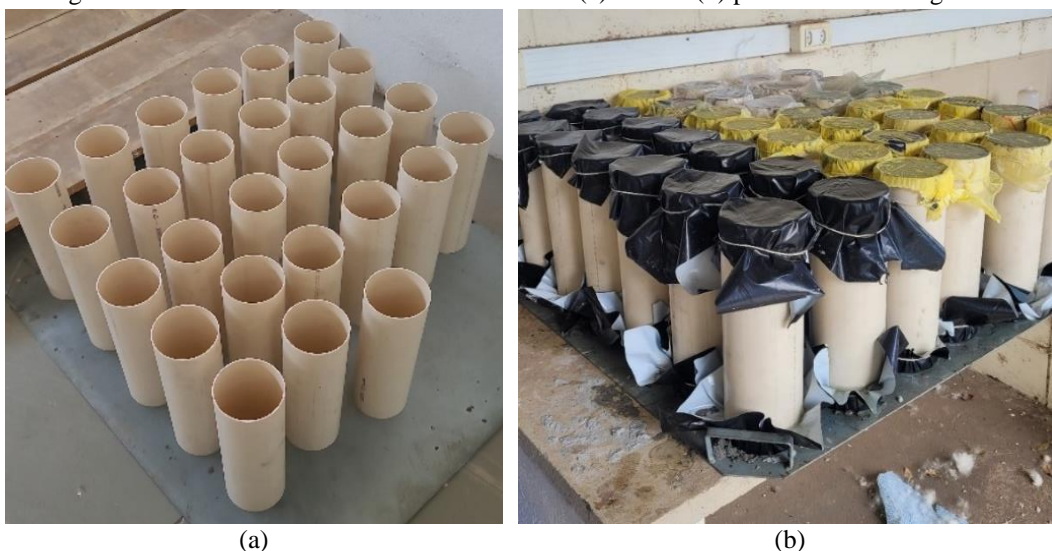
Fonte: Elaborado pelo Autor

Foram confeccionados 63 corpos de prova, sendo 6 prismas de 4 x 4 x 16 cm para caracterização mecânica da argamassa (resistência à tração na flexão e resistência à compressão) aos 28 e 90 dias, conforme a ABNT NBR 13279:2005, e 57 corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 30 cm de altura para realização dos ensaios em elevadas temperaturas, de acordo com a proporção proposta pela RILEM TC 200-HTC:2007.

No que diz respeito aos corpos de prova cilíndricos 10 x 30 cm, uma vez que essas dimensões não estão nas normas brasileira, não havia forma metálica no laboratório com as

dimensões propostas. Por essa razão, as formas foram elaboradas a partir do corte a cada 30 cm de tubos de PVC de 100 mm de diâmetro. Os serviços de corte e retificação dos moldes foram executados pela equipe de Oficina Mecânica da EESC de São Carlos. Na Figura 4.5a estão apresentadas as formas produzidas.

Figura 4.5: Forma cilíndrica de PVC 10 x 30 cm: (a) vazia e (b) preenchida com argamassa



Fonte: Elaborado pelo Autor

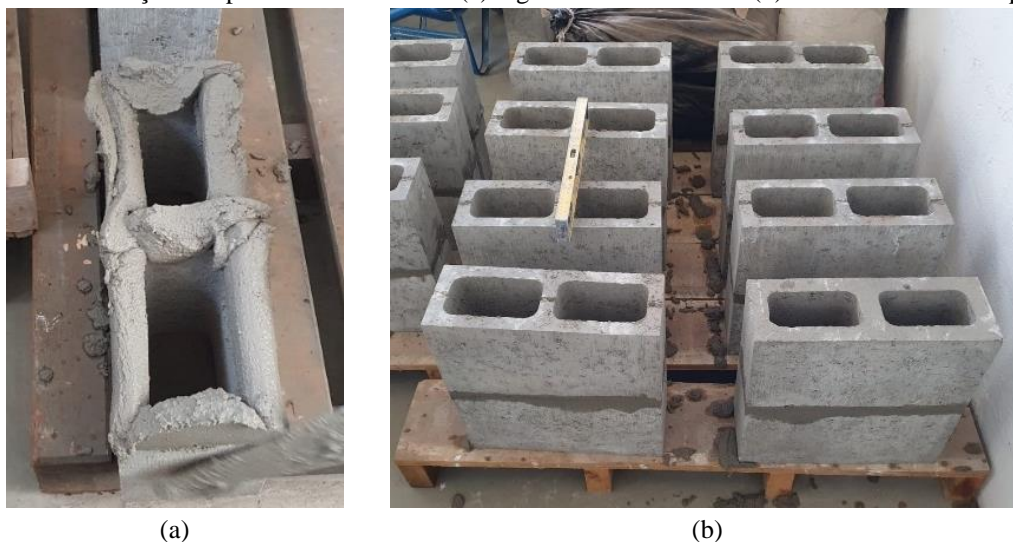
O processo de moldagem dos corpos de prova cilíndricos seguiu as diretrizes da ABNT NBR 7215:2019. Os moldes foram colocados sobre uma superfície metálica lisa, tendo a parte de baixo da forma de PVC forrada com lona plástica de 200 micras, antes de serem preenchidas com argamassa. A superfície interna dos moldes foi previamente revestida (untada) com desmoldante e, depois, preenchidas com quatro camadas de argamassa aproximadamente iguais. Cada camada recebeu 30 golpes uniformes e distribuídos com um soquete manual. Na Figura 4.5b é demonstrado os corpos de prova preenchidos com argamassa.

Em relação à moldagem dos corpos de prova prismáticos, o procedimento seguiu as prescrições da ABNT NBR 13279:2005, portanto, foi aplicado o desmoldante no molde e, logo após a preparação da argamassa, esta foi introduzida em duas camadas, que foram niveladas com um nivelador (espátulas) e adensadas com a aplicação de 30 quedas através da mesa de adensamento. Após 24 horas, iniciou-se o processo de desmolde dos corpos de prova de argamassa, que permaneceram em processo de cura na câmara úmida até a realização dos ensaios. Foram realizadas séries de ensaios aos 28 e 90 dias após a confecção. Vale ressaltar que os corpos de prova cilíndricos foram submetidos ao processo de retífica para alinhamento das faces inferior e superior antes dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão.

4.3 PRISMAS DE ALVENARIA

Os prismas de alvenaria foram construídos com as unidades de concreto utilizadas no *Programa experimental I*, juntamente com a argamassa de assentamento descrita no item 4.2.3. Os prismas foram executados por um operário contratado, o qual o utilizou uma colher de pedreiro, um nível e um prumo. Os corpos de prova (prismas), ilustrados na Figura 4.6a, foram constituídos de juntas de argamassamento total com espessura igual a 10 mm, conforme recomenda a ABNT NBR 16868-3:2020. Após serem construídos, os prismas de alvenaria foram mantidos sobre peças de madeira para evitar o contato com o solo (Figura 4.6b).

Figura 4.6: Confeção dos prismas de alvenaria: (a) argamassamento total e (b) armazenamento dos prismas



Fonte: Elaborado pelo Autor

Até a realização dos ensaios, os corpos de prova permaneceram curando no ambiente do laboratório. Ao todo, foram produzidos 36 prismas, dos quais 12 foram avaliados em temperatura ambiente, sendo metade avaliada aos 28 dias de cura e a outra metade após 90 dias, além de 6 para cada faixa de temperatura alvo (200, 400, 600 e 800 °C), nos quais os ensaios também começaram a partir dos 90 dias.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PRISMAS DE ARGAMASSA

Os prismas de argamassa 4 x 4 x 16 cm foram submetidos à caracterização mecânica, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 13279:2005, sendo determinadas as resistências à tração na flexão e à compressão dos corpos de prova. Foram caracterizadas seis amostras, três aos 28 dias e três aos 90 dias.

Os ensaios foram realizados na máquina servo-hidráulica Instron Satec®, modelo 300 UTM-HVL, disponível no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE – EESC). O carregamento foi aplicado por meio do controle de força a uma velocidade de 50 ± 10 N/s para determinar a resistência à tração na flexão, bem como 500 ± 50 N/s para a determinação da resistência à compressão axial.

Primeiramente, foram realizados os ensaios de tração na flexão (Figura 4.7) e, em seguida, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial nas metades dos corpos de prova provenientes dos ensaios de flexão, mostrado na Figura 4.8. Na Tabela 4.5, estão os resultados dos ensaios de caracterização mecânica realizados em 28 e 90 dias.

Figura 4.7: Ensaio de resistência à tração na flexão em prisma de argamassa



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 4.8: Ensaio de resistência à compressão em prisma de argamassa



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 4.5: Propriedades mecânicas da argamassa de assentamento

Idade		Resistência à compressão - f_a (MPa)	Resistência à tração na flexão - f_t (MPa)
28 dias	Média	11,16	3,16
	CV (%)	3,45	4,88
90 dias	Média	16,38	3,24
	CV (%)	2,99	2,82

Fonte: Elaborado pelo Autor

Dessa forma, a argamassa foi caracterizada com resistência à compressão igual a 11,16 MPa aos 28 dias e igual a 16,38 MPa aos 90 dias. Em relação à resistência à tração na flexão, a argamassa foi caracterizada com 3,16 MPa aos 28 dias e igual a 3,24 MPa aos 90 dias.

4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ARGAMASSA

Os ensaios para a obtenção das propriedades físicas das argamassas foram realizados nos corpos de prova cilíndricos aos 28 e 90 dias de cura. No total, foram ensaiados 21 corpos de prova sob diferentes condições de idade e temperatura. A amostragem referente a cada condição de ensaio está apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Condições de idade e temperatura dos ensaios de caracterização física da argamassa

Idade do CP	Quantidade	Temperatura
28 dias	6	Ambiente
	3	Ambiente
	3	200 °C
90 dias	3	400 °C
	3	600 °C
	3	800 °C

Fonte: Elaborado pelo Autor

Basicamente, os ensaios foram realizados com os mesmos equipamentos descritos no item 3.2.2, portanto, com auxílio de uma balança digital, um recipiente para imersão e uma estufa, foi possível determinar a massa aparente, saturada e seca dos corpos de prova. As Equações 3.2 a 3.5 foram utilizadas para calcular as propriedades físicas: índice de absorção (I_A), índice de porosidade (I_P), densidade aparente (γ) e densidade específica (ρ), as quais estão apresentadas na Tabela 4.7.

Os resultados mostram que as propriedades físicas permaneceram estáveis quando comparadas àquelas obtidas aos 28 e 90 dias após o desmolde. Em relação à elevação de temperatura, é notável o aumento brusco nos índices de porosidade e absorção da argamassa

submetidos às temperaturas de 600 e 800 °C, aliado a uma diminuição gradual da densidade aparente.

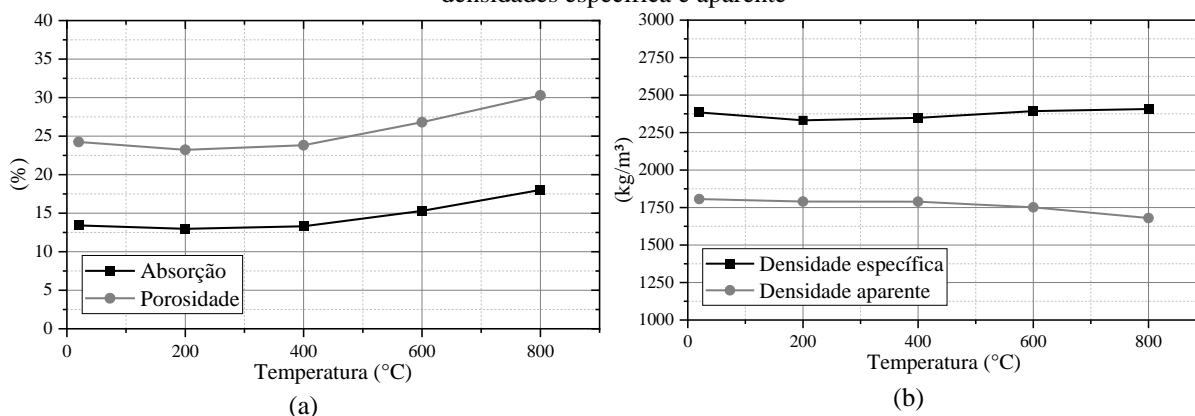
Tabela 4.7: Propriedades físicas das argamassas de assentamento

Temperatura	Idade (dias)		Absorção (%)	Porosidade (%)	Densidade aparente (kg/m ³)	Densidade específica (kg/m ³)
Ambiente	28	Média	13,44	24,35	1811,63	2394,63
		CV (%)	0,52	0,46	0,49	0,56
Ambiente	90	Média	13,42	24,24	1806,54	2384,53
		CV (%)	0,35	0,40	0,20	0,29
200 °C	90	Média	12,97	23,22	1790,47	2331,90
		CV (%)	0,78	0,48	0,33	0,23
400 °C	90	Média	13,31	23,81	1789,21	2348,45
		CV (%)	0,08	0,09	0,09	0,11
600 °C	90	Média	15,31	26,81	1751,36	2392,76
		CV (%)	0,35	0,33	0,22	0,27
800 °C	90	Média	18,02	30,28	1680,09	2406,96
		CV (%)	3,03	2,15	0,89	0,08

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em relação à densidade específica, os valores se mantiveram aproximados em todas as faixas de temperatura, tendo valor mínimo igual a 2331,90 kg/m³ (200 °C) e valor máximo igual a 2406,96 (800 °C). Na Figura 4.9 é apresentado graficamente o comportamento das propriedades físicas das argamassas em função da elevação de temperatura.

Figura 4.9: Propriedades físicas das argamassas em elevadas temperaturas: (a) absorção e porosidade; e (b) densidades específica e aparente



Fonte: Elaborado pelo Autor

Nas Figuras 4.10 e 4.11 estão apresentadas algumas relações de proporcionalidade obtidas entre as propriedades físicas. As relações demonstram que com o aumento da quantidade de poros no corpo de prova, a capacidade de absorção de água também aumenta. Em contrapartida, a densidade aparente (propriedade que considera os vazios do CP) diminui, em decorrência da elevação do índice de vazios internos e aumento da absorção.

Figura 4.10: Relações entre as propriedades físicas da argamassa:

(a) absorção e porosidade, (b) absorção e densidade aparente

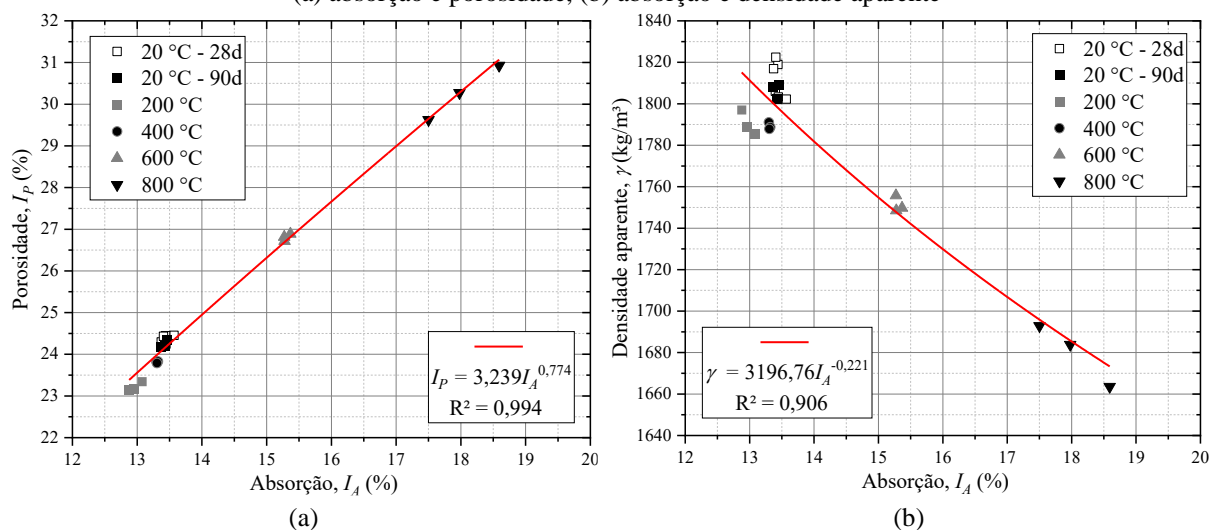
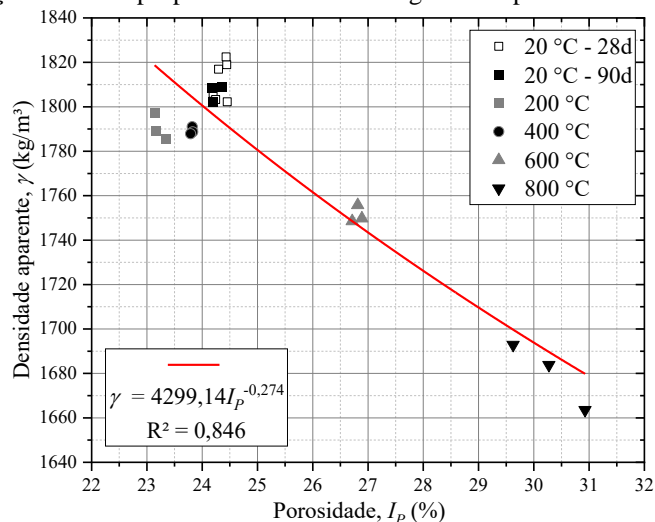


Figura 4.11: Relações entre as propriedades físicas da argamassa: porosidade e densidade aparente



Fonte: Elaborado pelo Autor

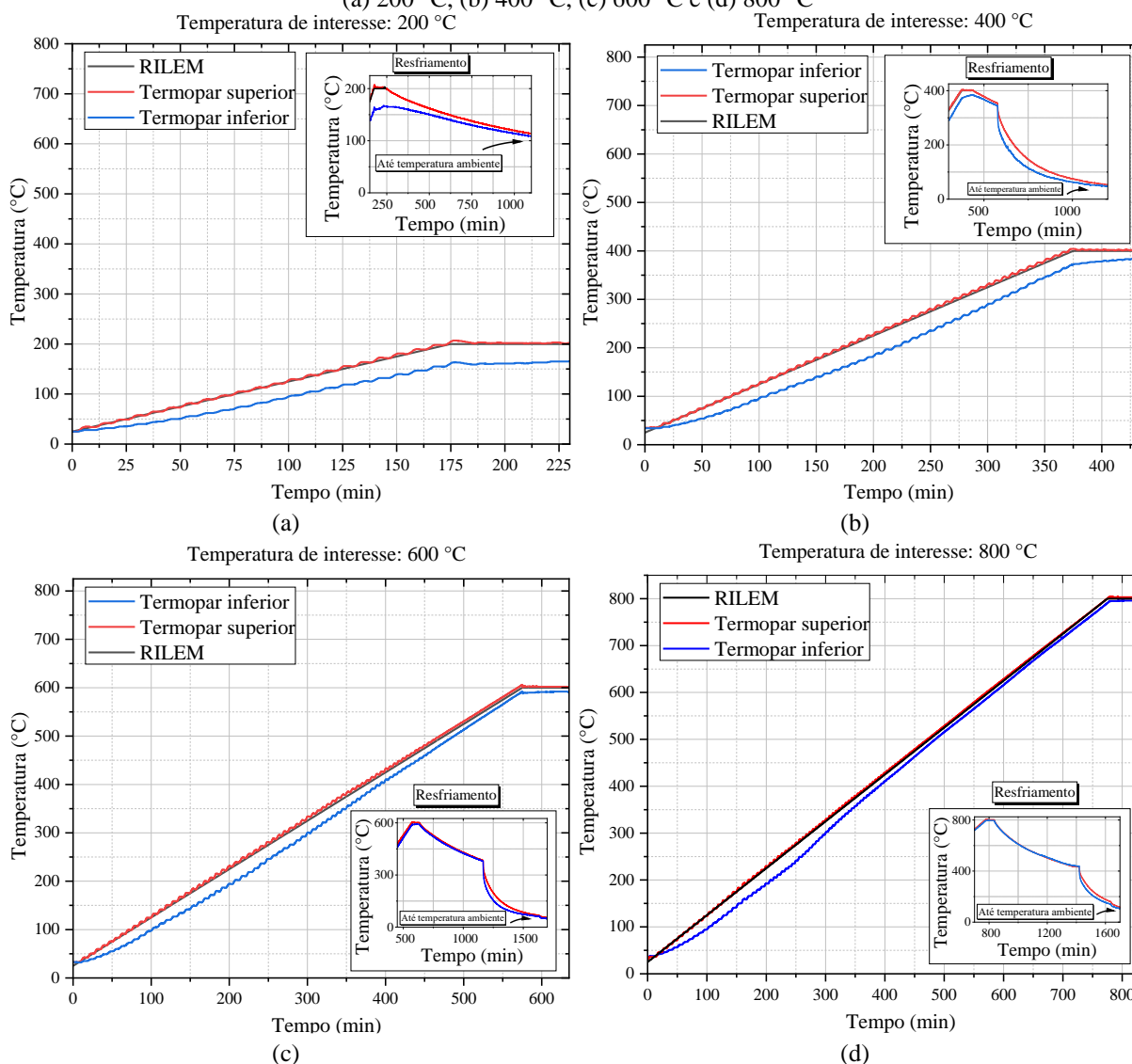
4.6 ENSAIOS EM ELEVADAS TEMPERATURAS

Os ensaios em elevadas temperaturas foram iniciados após 90 dias de cura dos prismas de alvenaria e das argamassas de assentamento, com o intuito de avaliar as velocidades de pulso ultrassônico e resistência residual dos elementos de alvenaria (prismas e argamassas) pós-aquecimento. Os equipamentos, dispositivos de aquisição e metodologia dos ensaios em elevadas temperaturas do *Programa Experimental II* foram idênticos aos citados no tópico 3.3, que se refere aos ensaios realizados nos blocos de concreto, estando de acordo com as diretrizes da RILEM TC 200-HTC:2007 e observações disponibilizadas em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2022).

Nesse sentido, os corpos de prova foram submetidos à elevação de temperatura de 200, 400, 600 e 800 °C, mediante uma taxa de aquecimento de 1 °C/min, permanecendo na temperatura-alvo por 60 minutos, de modo a garantir o aquecimento uniforme de todo o corpo de prova, seguido de resfriamento natural até a temperatura ambiente.

Após aquecimento e resfriamento, os corpos de prova (argamassas e prismas de alvenaria) foram isolados com *plástico-filme*, a fim de evitar o contato deles com a umidade do ambiente e conservar as suas condições pós-aquecimento até a realização dos demais ensaios. Devido aos processos químicos expansivos de reidratação que ocorre no material devido à exposição a elevadas temperaturas, esse contato pode causar fissuras ao corpo de prova, prejudicando a sua resistência. Na Figura 4.12 estão dispostas as temperaturas obtidas pelos termopares superior e inferior durante a realização dos ensaios.

Figura 4.12: Leitura dos termopares durante os ensaios em elevadas temperaturas:
(a) 200 °C, (b) 400 °C, (c) 600 °C e (d) 800 °C



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6.1 Argamassas de assentamento

Em se tratando das argamassas de assentamento, os ensaios em elevadas temperaturas foram realizados após 90 dias de cura dos corpos de prova cilíndricos de 10 x 30 cm. Em termos de amostragem, foram ensaiados 9 corpos de prova de argamassa por temperatura-alvo. Após o aquecimento, seis deles foram direcionados para avaliação por ultrassom e ensaio de resistência residual, enquanto três foram destinados à obtenção das propriedades físicas por meio dos ensaios de absorção.

Foi possível ensaiar nove corpos de prova em cada fornada, resultando em uma fornada por temperatura de interesse, totalizando quatro fornadas com corpos de prova de argamassa durante o programa experimental. Na Figura 4.13 é mostrada a disposição das argamassas no forno durante os ensaios.

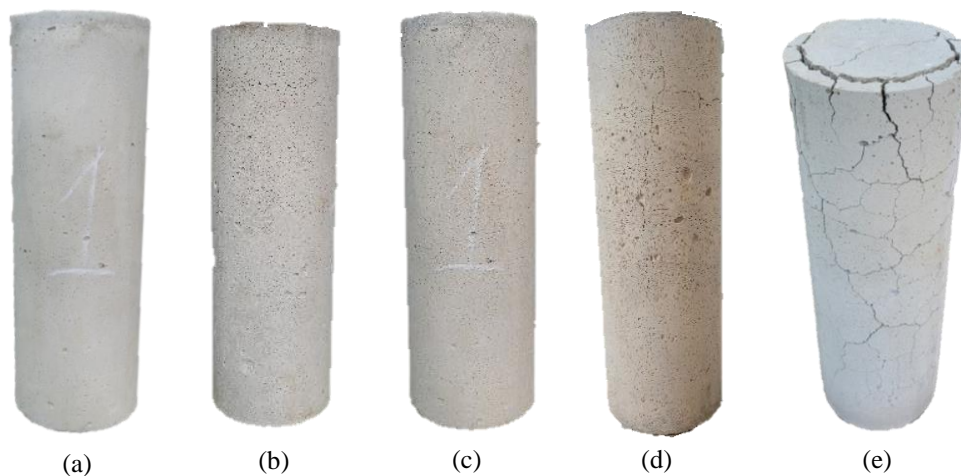
Figura 4.13: Disposição dos corpos de prova de argamassa durante os ensaios térmicos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 4.14 é apresentada a situação dos corpos de prova de argamassa após a realização dos ensaios térmicos. Em relação à coloração da argamassa, foi possível notar uma certa semelhança com o que ocorreu com os blocos de concreto, ou seja, em 200 °C, as argamassas permaneceram com uma tonalidade semelhante à sua coloração original. A partir dos 400 °C, começaram a surgir tons rosáceos, o que se tornou ainda mais evidente aos 600 °C. Em 800 °C, houve uma mudança para tons de cinza claro.

Figura 4.14: Corpos de prova de argamassa após ensaios em temperaturas elevadas:
(a) Ambiente, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C e (e) 800 °C



Fonte: Elaborado pelo Autor

Houve uma maior incidência de fissuras nos corpos de prova ensaiados a 600 e, sobretudo, a 800 °C. Segundo Henry, Suzuki e Kato (2011), as fissuras surgem devido à desidratação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na argamassa, que ocorre entre 400 e 500 °C, o que resulta na transformação deste em óxido de cálcio (CaO). Após o resfriamento, esse componente começa a reagir com o gás carbônico atmosférico (CO_2), formando um composto de maior volume, o carbonato de cálcio (CaCO_3). A expansão volumétrica culmina na formação de fissuras e na redução ainda maior da resistência residual. Esse fenômeno é denominado de carbonatação.

Além disso, destaca-se outro fenômeno associado à desidratação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que é a reidratação do óxido de cálcio (CaO), que, de acordo com Akca e Özyurt (2018), ocorre devido à absorção da umidade do ambiente e ao reestabelecimento da sua forma original (hidróxido de cálcio), composto de maior volume, ocasionando a desintegração do material e a formação de fissuras.

A evolução das fissuras nas argamassas ensaiadas a 600 °C é apresentada na Figura 4.15. Após a realização do ensaio, verificou-se que o corpo de prova apresentava uma textura frágil e esfarelada, com fissuras discretas, como é demonstrado na Figura 4.15a. Após o resfriamento, os corpos de prova foram embalados em *plástico-filme*. No entanto, mesmo com a adoção da medida, foi possível notar os fenômenos de carbonatação e reidratação mencionados nos parágrafos anteriores, evidenciado no aumento das fissuras que surgiram devido à ação térmica e pela maior fragilidade dos corpos de prova, como visto na Figura 4.15b. Apesar disso, os ensaios de ultrassom e resistência à compressão foram realizados normalmente.

Figura 4.15: Evolução das fissuras em argamassas ensaiadas à 600 °C:
(a) imediatamente após retirada do forno e (b) uma semana após retirada do forno



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6.2 Prismas de alvenaria

Os ensaios em elevadas temperaturas nos prismas de alvenaria foram iniciados a partir dos 90 dias de cura. Em se tratando da amostragem, foram ensaiados 6 prismas por temperatura de interesse. Devido às dimensões do forno, somente três prismas foram ensaiados em cada fornada, sendo necessárias duas fornadas por temperatura-alvo, totalizando oito durante o programa experimental. Na Figura 4.16, mostra-se a disposição dos prismas no forno elétrico.

Figura 4.16: Disposição dos prismas de alvenaria no forno

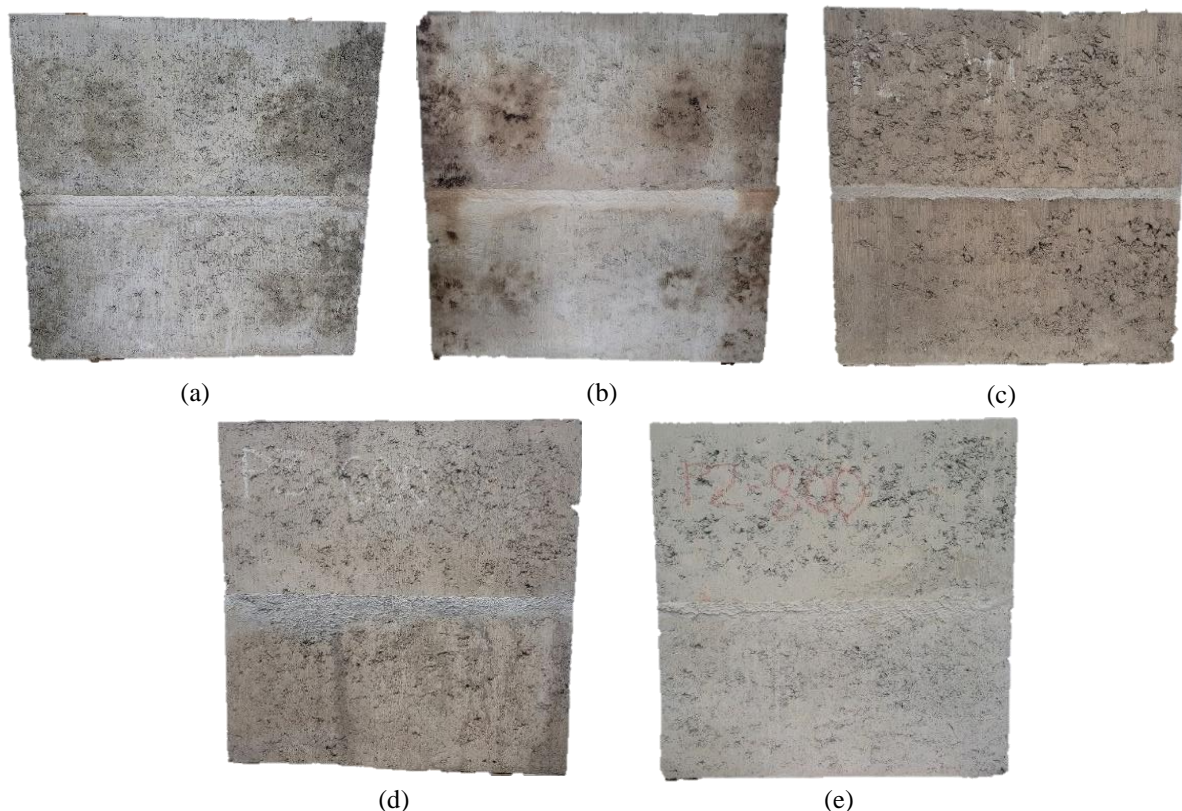


Fonte: Elaborado pelo Autor

A condição dos prismas de alvenaria após a realização dos ensaios térmicos é ilustrada na Figura 4.17. No que diz respeito ao aspecto visual, é possível identificar os mesmos fenômenos de alteração de cor observados nos ensaios realizados separadamente em cada um dos componentes (blocos e argamassas). É importante salientar que, na Figura 4.17b, referente à 200 °C, as manchas escuras nos prismas foram causadas pela aplicação do agente acoplante (glucose de milho) durante os ensaios de ultrassom realizados antes dos ensaios térmicos.

Figura 4.17: Prismas de alvenaria após ensaios em temperaturas elevadas:

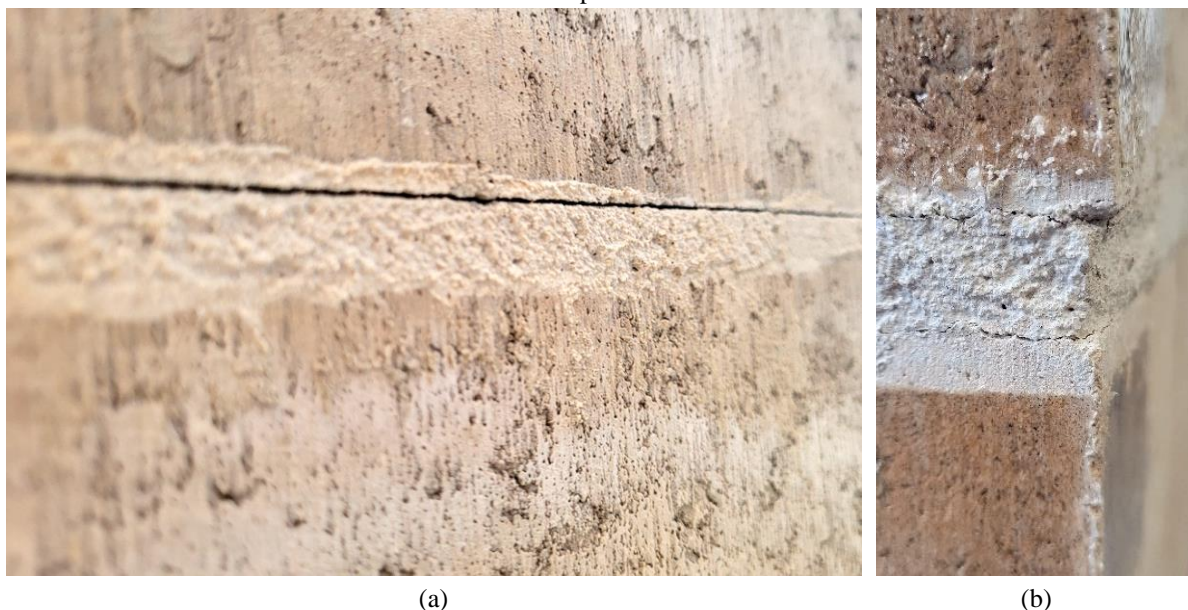
(a) Ambiente, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C e (e) 800 °C



Fonte: Elaborado pelo Autor

Uma das dificuldades enfrentadas durante a execução dos ensaios foi em relação ao transporte dos corpos de prova, que por sua vez, eram pesados e requeriam muito cuidado devido à fragilidade dos prismas após os ensaios no forno. Nesse sentido, em uma das etapas de transporte perdeu-se um corpo de prova ensaiado à 400 °C. O descolamento da junta de argamassa de um dos blocos do prisma foi outro problema recorrente durante os ensaios térmicos, o que ocorreu em dois corpos de prova em cada nível de temperatura-alvo, conforme ilustrado na Figura 4.18.

Figura 4.18: Detalhes dos danos nas juntas de argamassa causados pelos ensaios térmicos:
(a) descolamento total da argamassa ao bloco superior e (b) fissura em canto de prisma submetido a elevadas temperaturas



Fonte: Elaborado pelo Autor

Essa ocorrência não impediu a realização dos ensaios posteriores de ultrassom e resistência à compressão. No entanto, em relação aos ensaios de ultrassom, observou-se uma maior dificuldade na propagação das ondas na direção da altura. Em se tratando dos ensaios de resistência à compressão, não foi possível notar grandes diferenças em relação às outras amostras, apenas um início de ensaio com maiores deformações devido ao processo de acomodação entre os blocos e a interface descolada.

4.7 ENSAIOS DE ULTRASSOM

Os ensaios de ultrassom foram realizados nos prismas de alvenaria e corpos de prova de argamassa para avaliar a influência da elevação de temperatura nas *velocidades longitudinal (V_L) e transversal (V_T) do pulso ultrassônico*, bem como nos *módulos de elasticidade dinâmico longitudinal (E_D) e transversal (G_D)*.

O ensaio consistiu na medição de pulsos ultrassônicos por meio de transdutores específicos para ondas de cisalhamento com frequência nominal de 250 kHz, sendo avaliada a propagação das ondas longitudinais e transversais nos prismas de alvenaria e corpos de prova de argamassa. Os equipamentos, materiais e sistema de aquisição empregados nos ensaios são semelhantes aos mencionados no tópico 3.4 para blocos de concreto.

O tempo de chegada das ondas longitudinais foram obtidos pelo Pundit Lab⁺, enquanto a determinação do tempo de chegada das ondas transversais foi feita pelo *software* desenvolvido em Schiavon (2015).

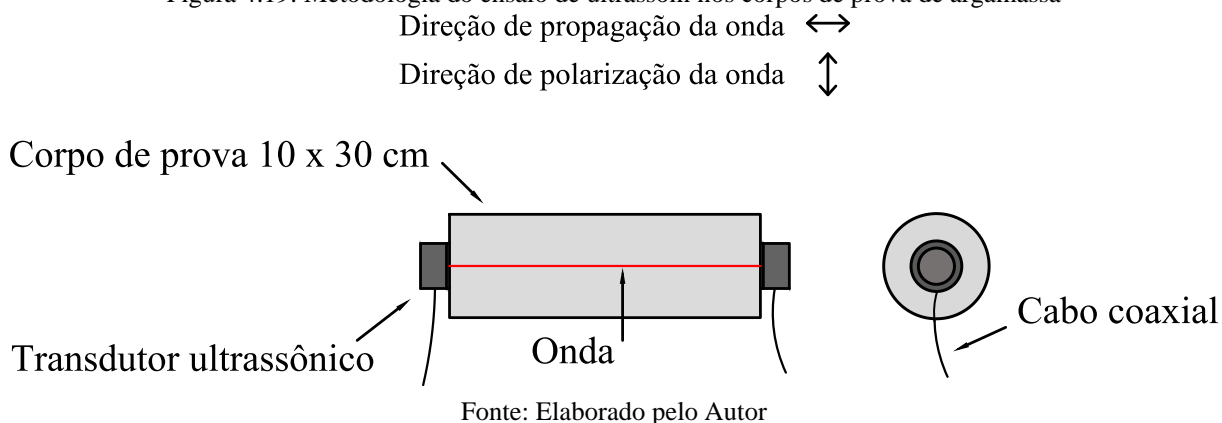
Após a realização dos ensaios e a identificação dos tempos de chegada das ondas longitudinal e transversal nos diferentes pontos dos corpos de prova, foi possível determinar a velocidade em cada medida por meio da razão entre a distância dos transdutores e o tempo de chegada das ondas. Como foram realizados 10 pulsos ultrassônicos por medida, a velocidade representativa de um ponto do corpo de prova foi calculada pela média das 10 velocidades obtidas.

4.7.1 Argamassa de assentamento

Os corpos de prova de argamassa foram submetidos a ensaios ultrassônicos aos 28 e 90 dias. Quanto aos corpos de prova que seriam submetidos à elevação de temperatura, foram realizadas medições antes e depois do aquecimento das argamassas.

Nos ensaios de ultrassom os transdutores ultrassônicos foram posicionados em faces opostas do corpo de prova, como visto na Figura 4.19. Dessa forma, a onda longitudinal foi propagada no sentido do comprimento do corpo de prova. O cabo foi mantido sempre paralelo ao plano da seção transversal do corpo de prova, com o objetivo de obter ondas transversais polarizadas na direção radial da seção.

Figura 4.19: Metodologia do ensaio de ultrassom nos corpos de prova de argamassa



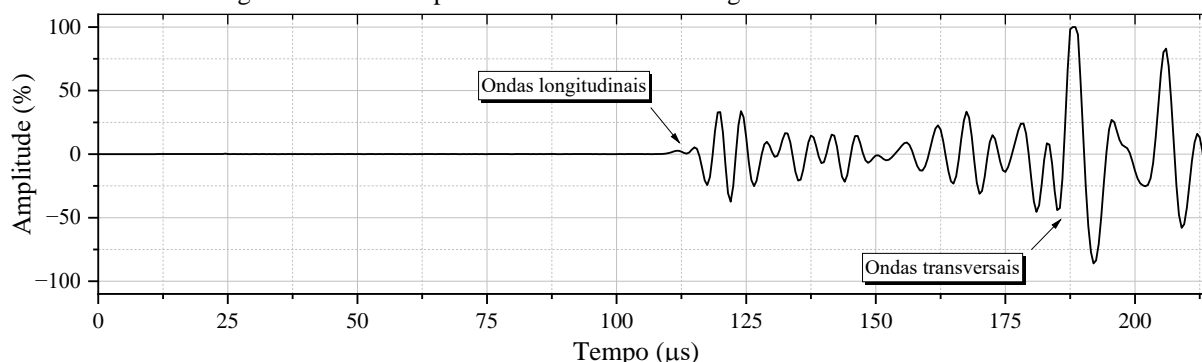
Na Figura 4.20 é mostrada a realização do ensaio nas argamassas de assentamento. Na Figura 4.21, por sua vez, é apresentado graficamente o perfil de onda típico obtido nas medições realizadas durante o ensaio nos corpos de prova de argamassa, na qual é possível identificar o momento de chegada das ondas longitudinal e transversal.

Figura 4.20: Ensaio de ultrassom nos corpos de prova de argamassa



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 4.21: Perfil típico do sinal de onda em argamassas de assentamento



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados obtidos para V_L (velocidade longitudinal) e V_T (velocidade transversal), contendo a média das velocidades antes e depois do processo de aquecimento, em função da idade do corpo de prova e temperatura-alvo de análise. Destaca-se que, para os corpos de prova submetidos a 800 °C, não foi possível propagar a onda devido ao alto grau de degradação da argamassa, sendo a onda totalmente dissipada antes da sua chegada ao outro transdutor ultrassônico.

É possível observar a variação das velocidades longitudinal e transversal entre os ensaios de ultrassom realizados aos 28 e 90 dias em temperatura ambiente. Observa-se que, durante esse período de dias, houve um aumento de aproximadamente 6% nas velocidades longitudinal e transversal, como demonstrado na Figura 4.22, evidenciando a influência do

processo de cura das argamassas em suas propriedades físicas e mecânicas, incluindo dinâmicas.

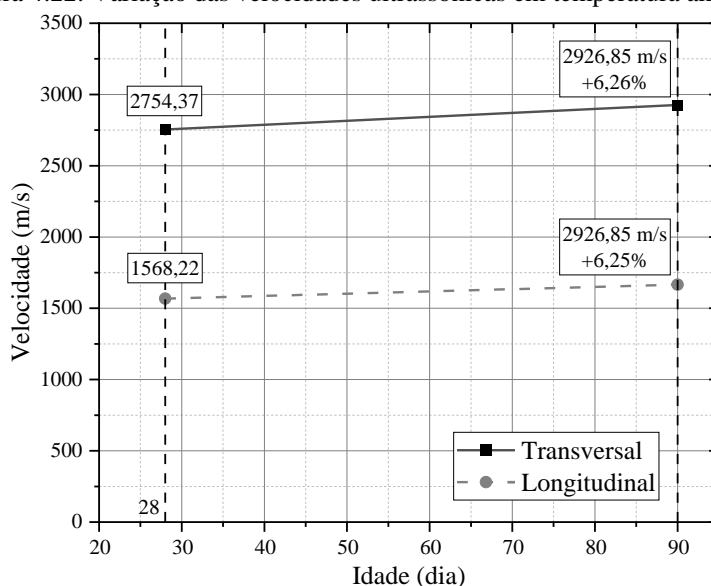
Tabela 4.8: Velocidades longitudinal e transversal nos corpos de prova de argamassa em elevadas temperaturas

Temperatura	Idade (dias)		$V_{La,20^{\circ}C}$ (m/s)	$V_{La,\theta}$ (m/s)	Residual (%)	$V_{Ta,20^{\circ}C}$ (m/s)	$V_{Ta,\theta}$ (m/s)	Residual (%)
Ambiente	28	Média	2754,37	-	-	1568,22	-	-
		CV (%)	1,45	-	-	1,04	-	-
Ambiente	90	Média	2926,85	-	-	1666,18	-	-
		CV (%)	2,27	-	-	1,80	-	-
200 °C	90	Média	2894,13	2762,47	95,46	1646,78	1582,71	96,11
		CV (%)	1,60	1,68	1,35	1,51	1,75	0,59
400 °C	90	Média	2928,90	2173,95	74,21	1685,12	1264,74	75,05
		CV (%)	1,24	3,19	2,26	2,23	3,30	1,98
600 °C	90	Média	2850,32	739,67	25,95	1594,91	414,74	26,06
		CV (%)	0,72	3,22	3,36	5,12	6,90	8,74
800 °C	90	Média	2898,38	-	-	1673,36	-	-
		CV (%)	1,54	-	-	1,90	-	-

O índice (20°C) representa os resultados obtidos nas medições realizadas antes do aquecimento do corpo de prova.
O índice (θ) representa os resultados obtidos pós-aquecimento, referentes à temperatura indicada na primeira coluna.

Fonte: Elaborado pelo Autor

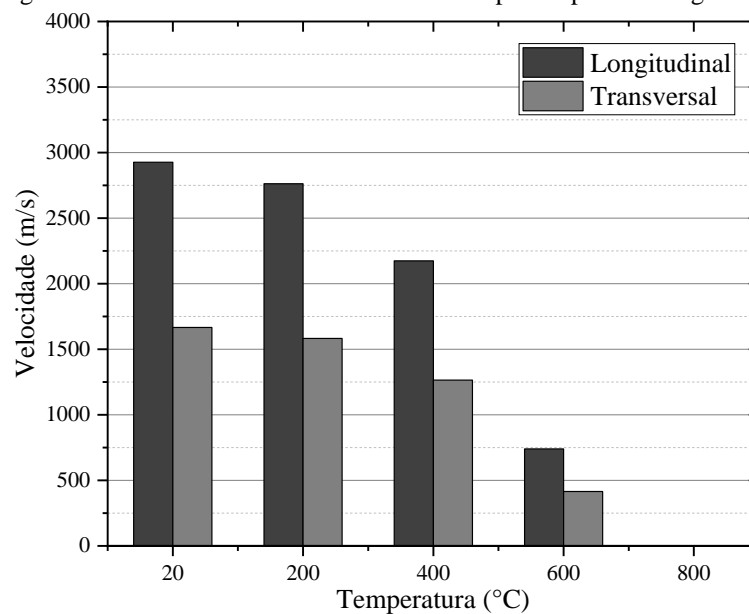
Figura 4.22: Variação das velocidades ultrassônicas em temperatura ambiente



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 4.23 é demonstrado o comportamento das velocidades longitudinal e transversal em temperaturas elevadas, sendo possível identificar uma diminuição considerável das velocidades em decorrência do aumento da temperatura e consequente degradação dos corpos de prova de argamassa.

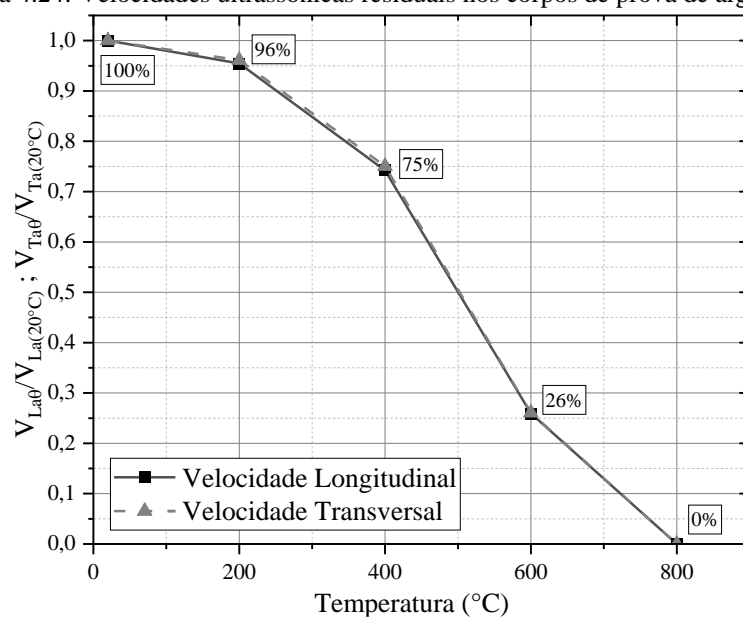
Figura 4.23: Velocidades ultrassônicas nos corpos de prova de argamassa



Fonte: Elaborado pelo Autor

As velocidades dinâmicas das argamassas em termos residuais são apresentadas na Figura 4.24. Percebe-se que as duas velocidades se comportam de maneira quase que idênticas diante da elevação da temperatura. Em 200 °C têm-se velocidades residuais da ordem de 96%, caindo para 75% aos 400 °C, tendo uma queda mais significativa aos 600 °C, chegando a aproximadamente 26%. Como dito anteriormente, em 800 °C não foi possível realizar medidas ultrassônicas, devido ao nível de degradação da argamassa.

Figura 4.24: Velocidades ultrassônicas residuais nos corpos de prova de argamassa



Fonte: Elaborado pelo Autor

Após a aquisição das velocidades das ondas, foi determinado o coeficiente de Poisson dinâmico (ν_D) para cada corpo de prova, por meio da Equação 3.10, apresentada no capítulo 3. Na Tabela 4.9, são apresentados os resultados médios obtidos antes e depois do aquecimento em diferentes níveis de temperatura.

Tabela 4.9: Coeficiente de Poisson dinâmico dos corpos de prova de argamassa em elevadas temperaturas

Temperatura	Idade (dias)		VDa,20°C	VDa,θ	Residual (%)
20 °C	28	Média	0,26	-	-
		CV (%)	2,21	-	-
20 °C	90	Média	0,26	-	-
		CV (%)	2,02	-	-
200 °C	90	Média	0,26	0,26	98,30
		CV (%)	4,22	2,62	4,23
400 °C	90	Média	0,25	0,24	96,56
		CV (%)	3,60	7,71	9,03
600 °C	90	Média	0,27	0,27	100,57
		CV (%)	11,54	12,84	16,67
800 °C	90	Média	0,25	-	-
		CV (%)	5,53	-	-
O índice (20°C) representa os resultados obtidos nas medições realizadas antes do aquecimento do corpo de prova.					
O índice (θ) representa os resultados obtidos pós-aquecimento, referentes à temperatura indicada na primeira coluna.					

Fonte: Elaborado pelo Autor

Mesmo após exposição a elevadas temperaturas, o coeficiente de Poisson dinâmico das argamassas permaneceu estável, variando entre 0,24 e 0,27, com maiores coeficientes de variabilidade em 400 e 600 °C. A baixa variação dessa propriedade demonstra que a relação entre a velocidade longitudinal e transversal da argamassa pouco se altera mesmo em temperaturas elevadas, variando de forma semelhante, como visto na Figura 4.24.

Após a determinação do coeficiente de Poisson e a aplicação das densidades específicas adquiridas nos ensaios descritos na seção 4.5, foram calculadas as propriedades dinâmicas da argamassa por meio das Equações 2.7 e 2.8. Ao utilizar essas equações, considera-se a hipótese de isotropia e homogeneidade do material, consideração já adotada por outros pesquisadores nas referências Oliveira, Brito e Veiga (2015), Farinha, Brito e Veiga (2019), Ramesh, Azenha e Lourenço (2019).

Na Tabela 4.10, são apresentados os valores correspondentes aos módulos de elasticidade dinâmico longitudinal (E_{Da}) e transversal (G_{Da}). Assim como as velocidades, as propriedades dinâmicas diminuíram com o aumento da temperatura, conforme evidenciado na Figura 4.25, o que demonstra o processo de degradação do material, que resulta na fissuração

do corpo de prova, aumento da sua deformabilidade e consequente diminuição da sua capacidade de resistência devido à exposição a temperaturas elevadas.

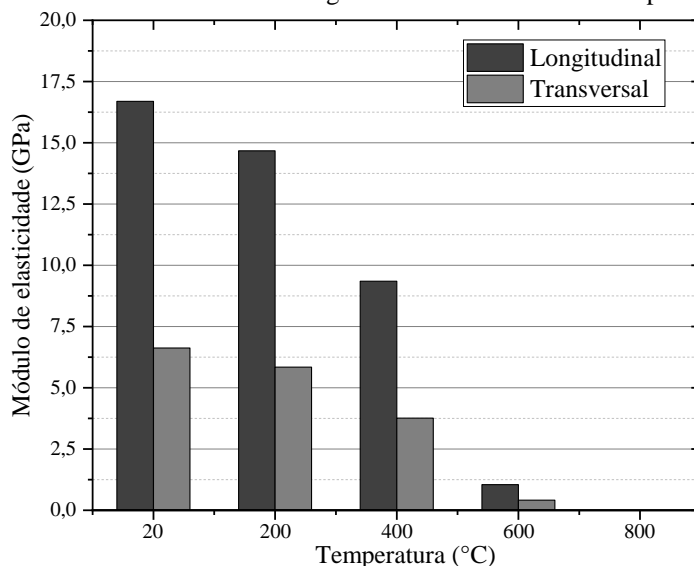
Tabela 4.10: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal das argamassas de assentamento em elevadas temperaturas

Temperatura	Idade (dias)		$E_{Da,20^{\circ}C}$ (GPa)	$E_{Da,\theta}$ (GPa)	Residual (%)	$G_{Da,20^{\circ}C}$ (GPa)	$G_{Da,\theta}$ (GPa)	Resíduo (%)
Ambiente	28	Média	14,84	-	-	5,89	-	-
		CV (%)	2,60	-	-	2,43	-	-
Ambiente	90	Média	16,69	-	-	6,62	-	-
		CV (%)	3,82	-	-	3,60	-	-
200 °C	90	Média	16,30	14,67	89,99	6,47	5,84	90,33
		CV (%)	2,77	3,33	1,08	3,01	3,48	4,23
400 °C	90	Média	16,96	9,35	55,07	6,77	3,76	55,49
		CV (%)	3,81	6,17	3,15	4,42	6,53	3,94
600 °C	90	Média	15,41	1,05	6,82	6,08	0,41	6,86
		CV (%)	7,79	11,53	13,77	9,83	13,66	17,52
800 °C	90	Média	16,69	-	-	6,68	-	-
		CV (%)	3,15	-	-	3,82	-	-

O índice (20°C) representa os resultados obtidos nas medições realizadas antes do aquecimento do corpo de prova.
O índice (θ) representa os resultados obtidos pós-aquecimento, referentes à temperatura indicada na primeira coluna.

Fonte: Elaborado pelo Autor

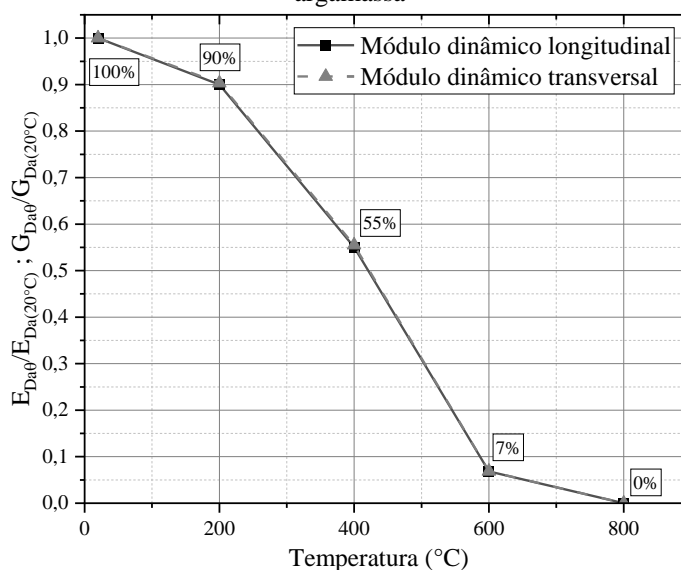
Figura 4.25: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal dos corpos de prova de argamassa



Fonte: Elaborado pelo Autor

As propriedades dinâmicas da argamassa em termos residuais são apresentadas na Figura 4.26. Observa-se que ambos os módulos se comportam de maneira semelhante diante da elevação da temperatura. Em 200 °C, os módulos residuais são de aproximadamente 90%, reduzindo para ordem 55% aos 400 °C. A queda é abrupta aos 600 °C, reduzindo-se para 7%.

Figura 4.26: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal residuais dos corpos de prova de argamassa



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.7.2 Prismas de alvenaria

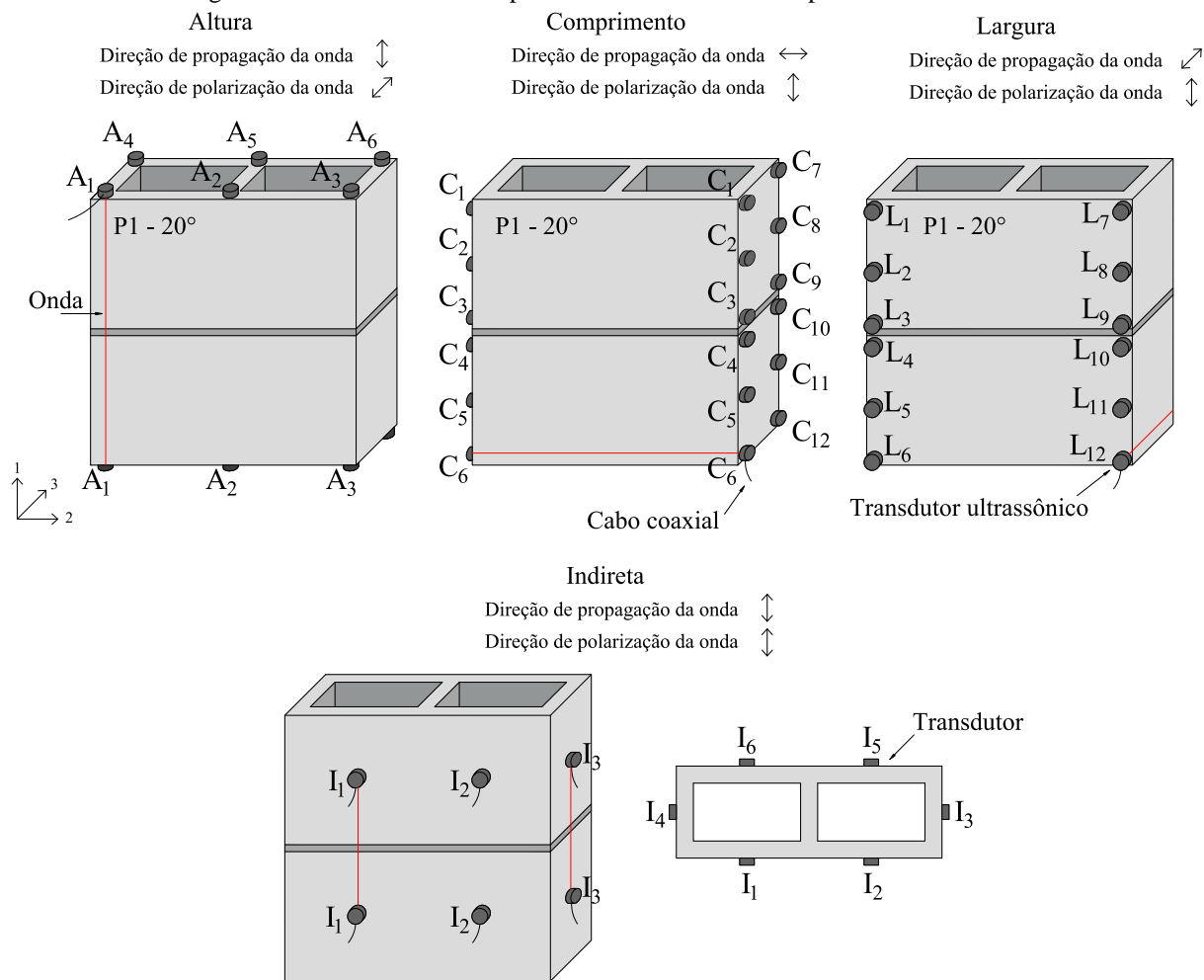
Foram realizados ensaios de ultrassom nos prismas de alvenaria em 28 e 90 dias após a sua confecção. Nos prismas que seriam submetidos à elevação de temperatura, as medições foram realizadas antes e depois dos ensaios térmicos.

Os ensaios ultrassônicos nos prismas foram realizados tomando diversos pontos ao longo da sua superfície, sendo realizadas medições diretas e indiretas, considerando a propagação das ondas nas direções da altura, comprimento e largura. Dessa forma, foram realizadas trinta medidas diretas e seis medidas indiretas por amostra, conforme esquematizado na Figura 4.27, que contém a disposição das medidas, a nomenclatura adotada, bem como as direções de propagação e polarização das ondas ultrassônicas.

As medidas diretas foram tomadas nos sentidos da altura dos prismas de alvenaria e do comprimento e largura dos blocos superiores e inferiores dos prismas. Já as medidas indiretas foram distribuídas ao longo da superfície lateral e longitudinal dos blocos, na qual foram tomadas duas medidas em cada face longitudinal e uma medida nas faces laterais, emitidas do centro de um bloco ao centro de outro, percorrendo uma distância de aproximadamente 17 cm.

Nas medições indiretas e diretas na direção da altura, as ondas longitudinais e transversais percorreram tanto o bloco de concreto quanto a junta de argamassa. Já nas demais medidas, as ondas percorreram apenas os blocos que compõem o prisma. Na Figura 4.28 é apresentado a aplicação das medidas idealizadas na execução do ensaio de ultrassom.

Figura 4.27: Malha idealizada para ensaio ultrassônico em prismas de alvenaria



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 4.28: Aplicação da malha idealizada no ensaio de ultrassom em prisma de alvenaria

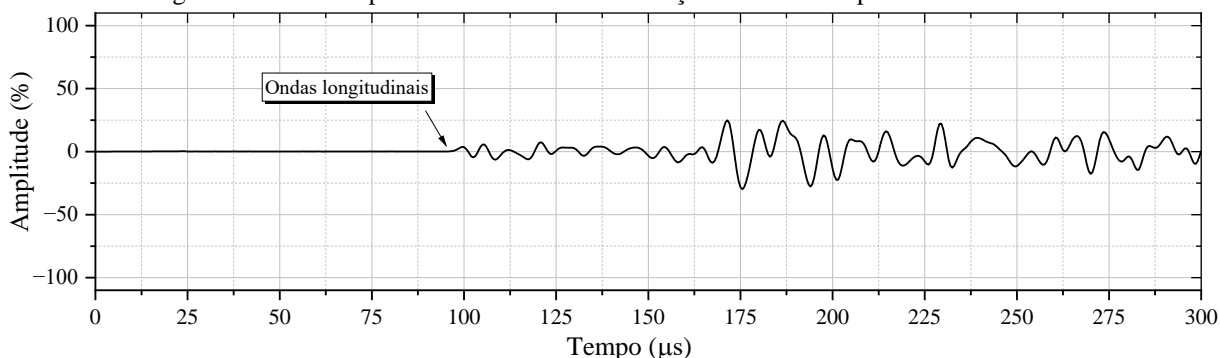


Fonte: Elaborado pelo Autor

Nas Figuras 4.29 e 4.30 são apresentados os perfis de onda típicos obtidos nas medições diretas na direção da altura e indiretas, respectivamente. Como exemplificado nas imagens, na

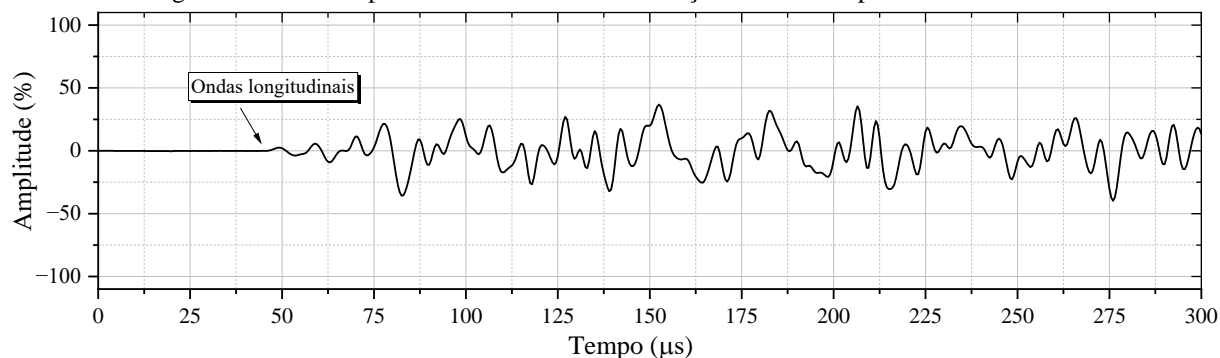
grande maioria dessas medições, principalmente, após a exposição a elevadas temperaturas, não foi possível identificar com precisão o instante de chegada das ondas transversais. Portanto, em relação a essas medidas (diretas na direção da altura e indiretas) serão discutidos apenas os resultados referentes às ondas longitudinais.

Figura 4.29: Perfil típico do sinal de onda na direção da altura em prismas de alvenaria



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 4.30: Perfil típico do sinal de onda de medição indireta em prismas de alvenaria



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Tabela 4.11 são apresentadas as médias dos resultados de V_{Lp} (velocidade longitudinal) e V_{Tp} (velocidade transversal) das medições diretas realizadas nas direções do comprimento e largura nos blocos superiores e inferiores dos prismas, referentes a cada nível de temperatura. Enquanto na Tabela 4.12 estão apresentados os resultados das médias das velocidades longitudinais nas medições indiretas e diretas realizadas em relação à altura dos prismas em diferentes níveis de temperatura.

Observa-se, como esperado, a diminuição das velocidades em decorrência do aumento da temperatura de análise devido à degradação dos materiais, tendo em vista que o mesmo ocorre nos componentes dos prismas (bloco e argamassa) ao serem submetidos a elevação de temperatura. Nota-se que as velocidades obtidas de forma indireta apresentaram maiores coeficientes de variação quando comparadas com as outras medidas, variando de 24,46% a 31,76%. Esse fato está atrelado à variabilidade das condições de interface entre o bloco e a junta

de argamassa, à propagação da onda em dois meios distintos (bloco e argamassa), e à maior dificuldade inerente à execução de medidas de forma indireta.

Tabela 4.11: Velocidades longitudinal e transversal nos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas – comprimento e largura

Temp.	Idade (dias)		Comprimento				Largura			
			V _{Lp,Cθ} (m/s)	Res. (%) ¹	V _{Tp,Cθ} (m/s)	Res. (%) ¹	V _{Lp,Lθ} (m/s)	Res. (%) ¹	V _{Tp,Lθ} (m/s)	Res. (%) ¹
Ambiente	28	Média	4495,93	-	2353,45	-	4617,68	-	2474,52	-
		CV (%)	2,57	-	7,45	-	1,85	-	4,28	-
Ambiente	90	Média	4515,05	-	2458,30	-	4614,57	-	2552,33	-
		CV (%)	2,77	-	5,36	-	1,79	-	4,90	-
200 °C	90	Média	3982,57	89,21	2221,19	95,06	4062,95	89,27	2284,63	92,03
		CV (%)	4,23	4,10	7,31	8,78	3,91	3,85	5,78	7,13
400 °C	90	Média	3035,27	68,31	1747,23	73,07	3200,20	69,61	1755,62	74,55
		CV (%)	5,34	4,75	4,93	7,85	5,26	4,74	7,15	11,30
600 °C	90	Média	1881,62	42,60	1126,67	44,64	2028,71	43,61	1162,43	46,71
		CV (%)	8,20	8,34	9,21	12,12	11,99	11,41	10,27	10,40
800 °C	90	Média	1031,00	23,06	620,08	24,64	1159,81	25,23	656,72	25,58
		CV (%)	9,53	9,22	11,92	11,45	13,08	12,23	12,44	11,70

¹ valor residual em relação aos resultados obtidos antes dos prismas serem levados ao forno.

O índice (θ) representa os resultados obtidos pós-aquecimento, referentes à temperatura indicada na primeira coluna.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 4.12: Velocidades longitudinal nos prismas em elevadas temperaturas – altura e indireta

Temp.	Idade (dias)		Altura		Indireta	
			V _{Lp,Aθ} (m/s)	Res. (%) ¹	V _{Lp,Iθ} (m/s)	Res. (%) ¹
Ambiente	28	Média	4216,14	-	4033,80	-
		CV (%)	2,79	-	5,39	-
Ambiente	90	Média	4259,30	-	4233,89	-
		CV (%)	2,94	-	5,67	-
200 °C	90	Média	2422,14	57,32	2047,85	51,75
		CV (%)	10,22	10,66	25,49	25,25
400 °C	90	Média	1775,54	42,27	1509,19	37,54
		CV (%)	15,89	15,54	24,46	23,44
600 °C	90	Média	1200,88	28,31	753,42	18,45
		CV (%)	15,18	16,27	31,76	32,42
800 °C	90	Média	821,32	19,51	582,14	14,14
		CV (%)	6,89	7,22	26,46	25,39

¹ valor residual em relação aos resultados obtidos antes dos prismas serem levados ao forno.

O índice (θ) representa os resultados obtidos pós-aquecimento, referentes à temperatura indicada na primeira coluna.

Fonte: Elaborado pelo Autor

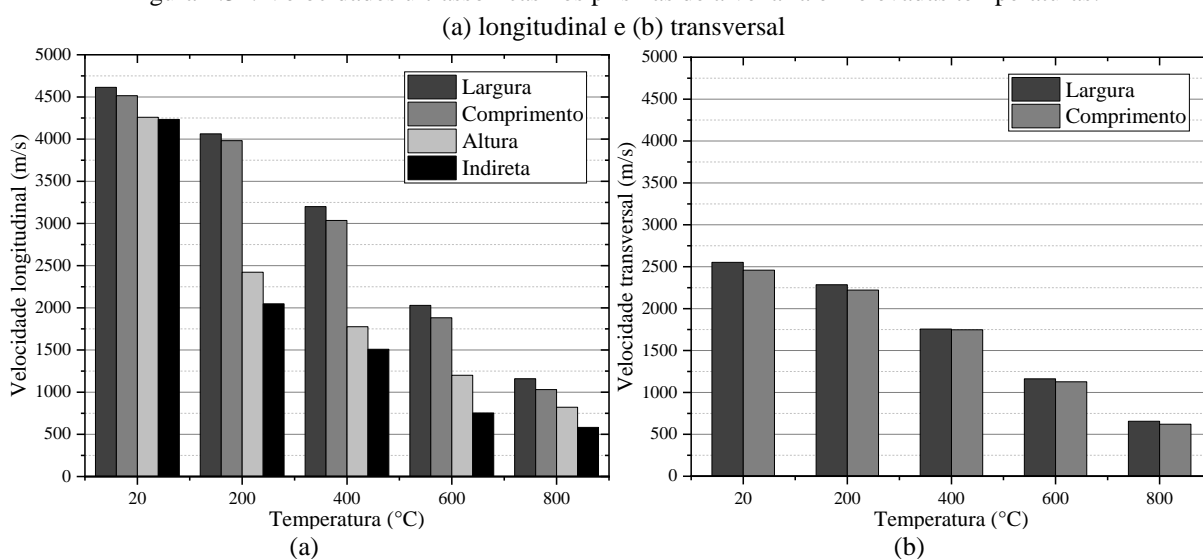
Além disso, é notório que as velocidades das ondas nas medidas em que a propagação ocorreu apenas nos blocos (Tabela 4.11) são significativamente superiores às velocidades das

ondas que percorreram os dois meios. Juntamente com o atraso observado no tempo de propagação das ondas, verificou-se, nessas medições, uma redução na amplitude das ondas (Figura 4.29), o que indica uma clara perda de energia do sinal ultrassônico.

Em McCann e Forde (2001) tal aspecto é atribuído à atenuação das ondas na região da interface entre os blocos de concreto, que se dá, sobretudo, pela presença de fissuras e vazios na junta ou pela delaminação da interface entre a junta e o bloco. Outro ponto a se destacar, segundo Malhotra e Carino (2004), são as reflexões e refrações que ocorrem nas ondas no momento em que atingem a interface, influenciando na atenuação da energia total da onda. Em Aggelis, Momoki e Chai (2009) se menciona ainda, que a presença de rugosidades superficiais na zona de contato entre os materiais favorece a dispersão das ondas, o que também reduz a intensidade do sinal ultrassônico. Esse efeito de atenuação das ondas na região da interface bloco-junta prejudicou a propagação das ondas transversais, as quais, de acordo com Fernandes Neto (2023) são mais sensíveis a variações no meio de propagação por apresentarem um menor comprimento de onda, razão pela qual, como visto nas Figuras 4.29 e 4.30, na maioria das medidas realizadas envolvendo essa região não foi possível identificar com precisão o tempo de chegada das ondas transversais.

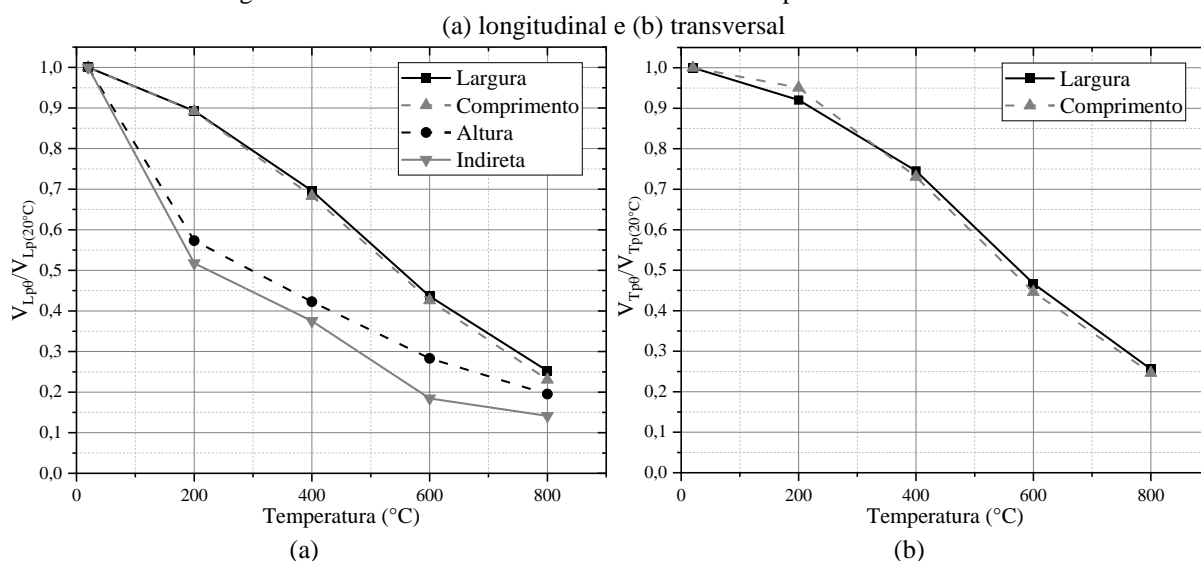
Na Figura 4.31 é ilustrada a variação das velocidades longitudinal e transversal em temperaturas elevadas, tornando-se mais claro os fatos mencionados anteriormente, como a diminuição das velocidades em decorrência do aumento da temperatura, e a diferença significativa entre as medidas que se propagam apenas nos blocos e as que se propagam nos dois componentes dos prismas.

Figura 4.31: Velocidades ultrassônicas nos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas:



As velocidades ultrassônicas dos prismas de alvenaria em termos residuais são apresentadas na Figura 4.32. Percebe-se que as duas velocidades, longitudinal e transversal, se comportam de maneira semelhante diante da elevação da temperatura. Essa redução se assemelha nas medidas realizadas ao longo da largura e comprimento dos blocos constituintes do prisma, diferindo-se nas medidas realizadas na direção da altura e de maneira indireta.

Figura 4.32: Velocidades ultrassônicas residuais nos prismas de alvenaria:



Fonte: Elaborado pelo Autor

Devido ao fato de os prismas de alvenaria estrutural serem elementos heterogêneos, tendo em vista a presença dos blocos e da argamassa na sua composição, torna-se inviável a determinação das propriedades dinâmicas por meio da aplicação das equações desenvolvidas para materiais isotrópicos e heterogêneos utilizadas em capítulos anteriores individualmente para cada componente. Sendo assim, neste capítulo a análise das propriedades dinâmicas se deu apenas nas medidas realizadas na direção do comprimento e da largura nos blocos de concreto superior e inferior dos prismas.

Portanto, de maneira similar às seções anteriores, foi primeiramente determinado o coeficiente de Poisson dinâmico (ν_D) referente à cada ponto de medição por meio da Equação 3.10 apresentada no capítulo 3. Os resultados médios desse parâmetro, obtidos em diferentes níveis de temperatura, estão apresentados na Tabela 4.13.

Foi possível verificar nesses ensaios uma variação muito grande do coeficiente de Poisson dinâmico, tendo valor máximo de 0,31 e mínimo de 0,21. Observou-se também o aumento do coeficiente de variação em decorrência da elevação da temperatura de análise, chegando a 35,77% nos resultados em 800 °C.

Tabela 4.13: Variação do coeficiente de Poisson dinâmico dos blocos constituintes dos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas

Temperatura	Idade (dias)		Comprimento Largura	
			VD _{p,C}	VD _{p,L}
20 °C	28	Média	0,31	0,30
		CV (%)	11,60	7,45
20 °C	90	Média	0,29	0,28
		CV (%)	10,36	8,95
200 °C	90	Média	0,27	0,27
		CV (%)	16,40	12,77
400 °C	90	Média	0,25	0,28
		CV (%)	16,59	15,24
600 °C	90	Média	0,21	0,25
		CV (%)	28,86	17,77
800 °C	90	Média	0,21	0,25
		CV (%)	35,77	24,41

Fonte: Elaborado pelo Autor

A partir das determinações do coeficiente de Poisson dinâmico e aplicação das densidades específicas teóricas demonstradas na seção 3.4, foi possível calcular as propriedades dinâmicas dos blocos associados aos prismas por meio das Equações 2.7 e 2.8.

Na Tabela 4.14 estão apresentados valores referentes aos módulos de elasticidade dinâmico longitudinal (E_{Dp}) e transversal (G_{Dp}), também demonstrados na Figura 4.33.

Tabela 4.14: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal dos blocos de concreto associados aos prismas em elevadas temperaturas

Temperatura / Idade		Comprimento				Largura			
		ED _{p,C0} (GPa)	Res. (%) ¹	GD _{p,C0} (GPa)	Res. (%) ¹	ED _{p,L0} (GPa)	Res. (%) ¹	GD _{p,L0} (GPa)	Res. (%) ¹
Ambiente 28	Média	36,86	-	14,14	-	40,37	-	15,58	-
	CV (%)	12,18	-	14,38	-	7,05	-	8,45	-
Ambiente 90	Média	39,53	-	15,39	-	42,32	-	16,58	-
	CV (%)	8,64	-	10,23	-	7,93	-	9,53	-
200 °C 90	Média	31,21	86,39	12,34	89,26	32,92	81,83	13,03	83,42
	CV (%)	11,89	15,16	13,98	18,15	9,66	11,86	11,40	14,24
400 °C 90	Média	18,40	49,13	7,38	51,03	19,07	51,58	7,47	53,46
	CV (%)	8,83	12,72	9,56	16,40	11,95	19,64	13,76	24,18
600 °C 90	Média	7,31	17,96	3,03	18,85	8,08	19,77	3,23	20,57
	CV (%)	16,90	21,04	18,26	22,49	22,34	21,75	21,42	21,34
800 °C 90	Média	2,17	5,31	0,91	5,62	2,54	5,97	1,02	6,07
	CV (%)	20,58	19,55	22,82	21,93	24,98	19,55	25,67	23,91

¹ valor residual em relação aos resultados obtidos antes dos prismas serem levados ao forno.

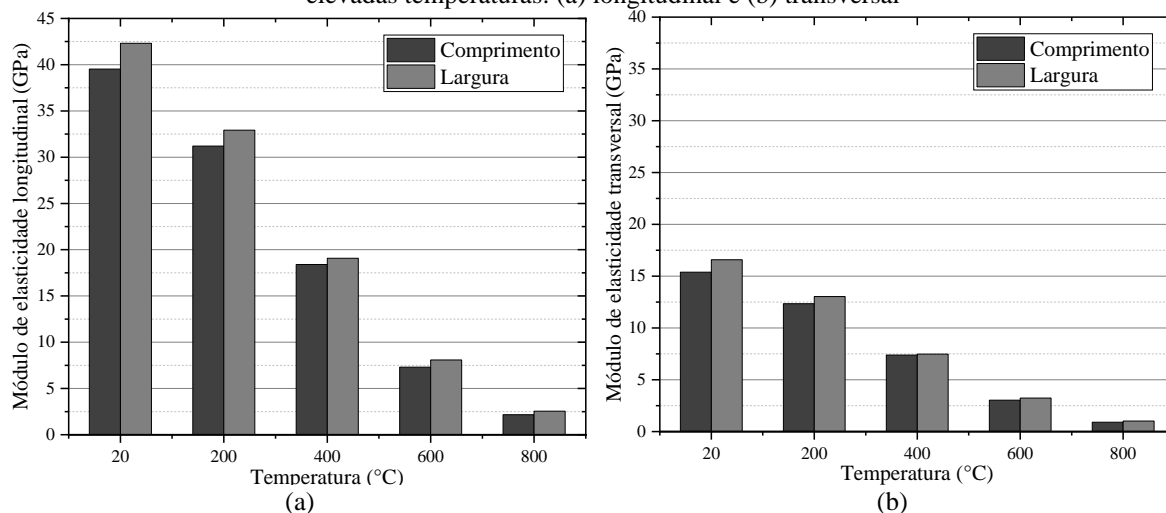
O índice (20°C) representa os resultados obtidos nas medições realizadas antes do aquecimento do corpo de prova.

O índice (0) representa os resultados obtidos pós-aquecimento, referentes à temperatura indicada na primeira coluna.

Fonte: Elaborado pelo Autor

As propriedades dinâmicas, em concordância com as velocidades, diminuem com a elevação da temperatura, como já citado em seções anteriores, tal queda é causada pelo processo de degradação e fissuração do corpo de prova devido à exposição às elevadas temperaturas.

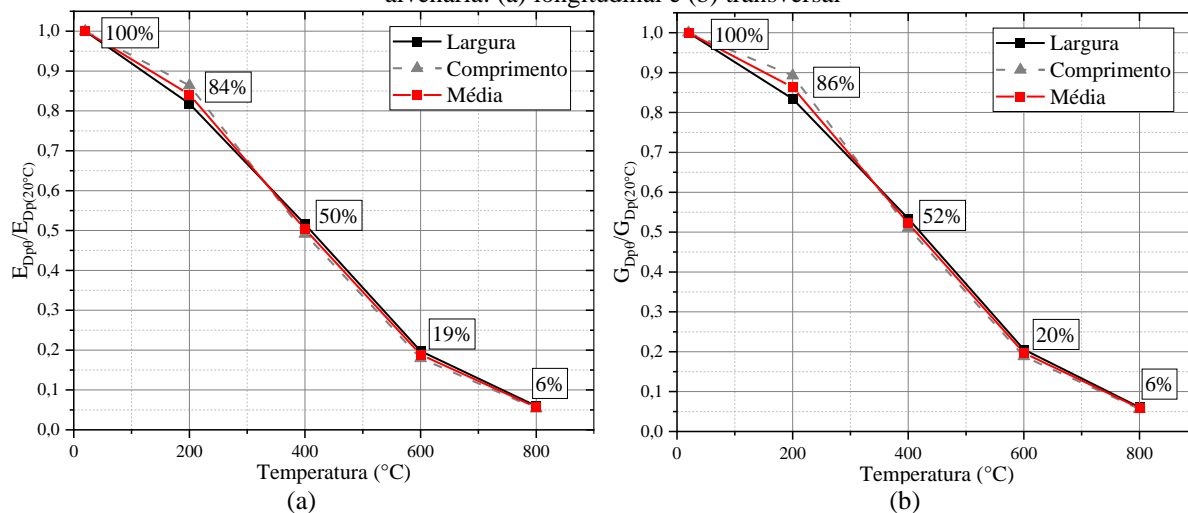
Figura 4.33: Módulos de elasticidade dinâmico dos blocos de concreto associados aos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas: (a) longitudinal e (b) transversal



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 4.34 são apresentadas as propriedades dinâmicas residuais dos blocos em questão. Percebe-se que, em relação à média e às duas direções analisadas (largura e comprimento), os módulos de elasticidade longitudinal e transversal se comportam de maneira semelhante mediante a elevação da temperatura. Em 200 °C, tem-se média dos módulos residuais da ordem de 85%, reduzindo para aproximadamente 50% aos 400 °C, tendo queda brusca aos 600 °C, caindo para cerca de 20%. Aos 800 °C, a média dos módulos residuais é de aproximadamente 6%.

Figura 4.34: Módulos de elasticidade dinâmico residuais dos blocos de concreto associados aos prismas de alvenaria: (a) longitudinal e (b) transversal



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.8 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Os ensaios de resistência à compressão e de determinação do módulo de elasticidade estático dos prismas de alvenaria e dos corpos de prova de argamassa foram realizados na máquina servo-hidráulica Instron Satec®, modelo 300 UTM-HVL, com auxílio do sistema de aquisição de dados System 5000 da Vishay Instruments®, disponível no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE – EESC). Os corpos de prova (prismas e argamassas) foram submetidos aos ensaios em 28 e 90 dias após a sua construção, sendo 6 em temperatura ambiente aos 28 dias, 6 em temperatura ambiente após 90 dias, e 6 por temperatura-alvo (200, 400, 600 e 800 °C), sendo esses realizados em até 15 dias após os ensaios no forno. Ressalta-se ainda que, para verificação da existência de valores espúrios, todas as amostras foram avaliadas segundo teste estatístico de Grubbs (1969).

4.8.1 Argamassa de assentamento

Em se tratando das argamassas de assentamento, o carregamento foi aplicado por meio do controle de deslocamentos a uma velocidade igual a 0,01 mm/s. Para análise da deformabilidade foram utilizados dois clip-gages de base igual a 150 mm, posicionados em lados opostos na região média dos corpos de prova, conforme apresentado na Figura 4.35. Vale ressaltar que antes dos ensaios todos os corpos de prova foram submetidos ao processo de retifica das faces inferior e superior.

Figura 4.35: Ensaio de resistência à compressão nas argamassas



Fonte: Elaborado pelo Autor

Desse modo, foi possível obter as curvas tensão x deformação das argamassas para cada temperatura de interesse, bem como determinar o módulo de elasticidade secante estático (E_s) conforme recomenda o ACI 530-11:2011, verificando o comportamento do trecho limitado por 5% e 33% da tensão de ruptura. O módulo transversal estático (G_s) foi calculado por meio da

relação oriunda da teoria da elasticidade ($G_s = E_s/(2(1+\nu))$), e o coeficiente de Poisson (ν) adotado foi de 0,20.

Na Tabela 4.15 estão apresentadas as médias das resistências à compressão e dos módulos de elasticidade estático longitudinal e transversal dos corpos de prova de argamassa em diferentes níveis de temperatura.

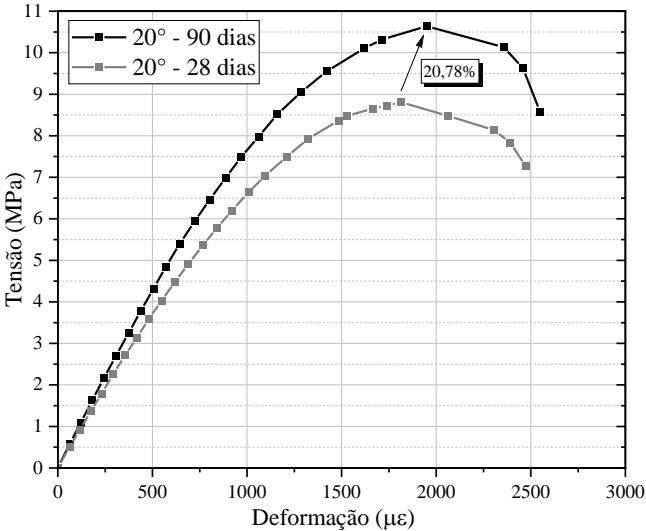
Tabela 4.15: Resistência à compressão e módulo de elasticidade das argamassas de assentamento

Temperatura		Força (kN)	Resistência à compressão f_a (MPa)	E_{sa} (GPa)	G_{sa} (GPa)
20°C (28 dias)	Média	69,18	8,81	7,60	3,17
	CV (%)	7,08	7,08	2,40	2,40
20°C (90 dias)	Média	83,55	10,64	8,54	3,56
	CV (%)	8,98	8,98	6,44	6,44
200°C	Média	73,21	9,32	7,26	3,03
	CV (%)	3,95	3,95	6,08	6,08
400°C	Média	54,26	6,91	3,60	1,50
	CV (%)	5,08	5,08	9,05	9,05
600°C	Média	11,32	1,44	0,07	0,03
	CV (%)	8,74	8,74	17,46	17,46
800°C	Média	0,90	0,11	0,0084	0,0035
	CV (%)	15,85	15,85	26,32	26,32

Fonte: Elaborado pelo Autor

A diferença entre a relação tensão x deformação das argamassas analisadas em 28 dias e 90 dias, referentes a temperatura ambiente, estão explicitadas na Figura 4.36. Percebe-se que a diferença no número de dias de cura representou um aumento significativo de 20,78% na capacidade de resistência do corpo de prova.

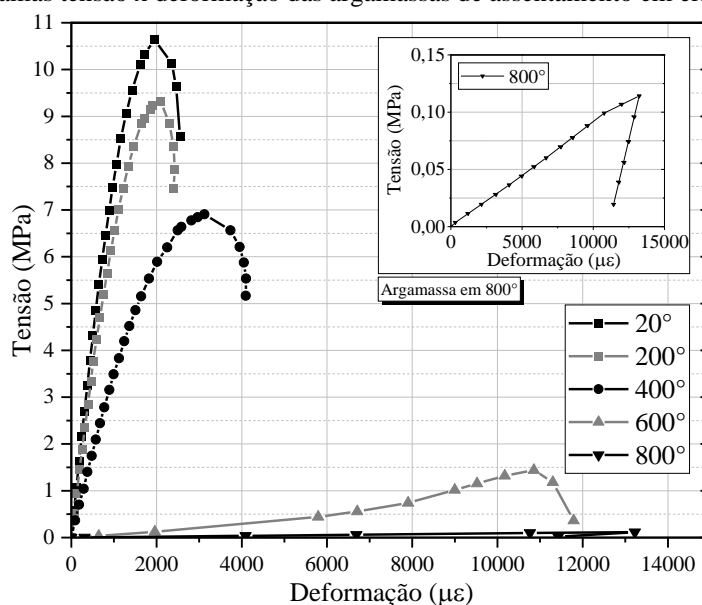
Figura 4.36: Variação da resistência à compressão das argamassas de assentamento em temperatura ambiente



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 4.37 são apresentados os diagramas tensão x deformação das argamassas em diferentes níveis de temperatura. Com o aumento da temperatura, a argamassa perde consideravelmente sua capacidade de resistir à compressão, além de aumentar a sua deformabilidade.

Figura 4.37: Diagramas tensão x deformação das argamassas de assentamento em elevadas temperaturas

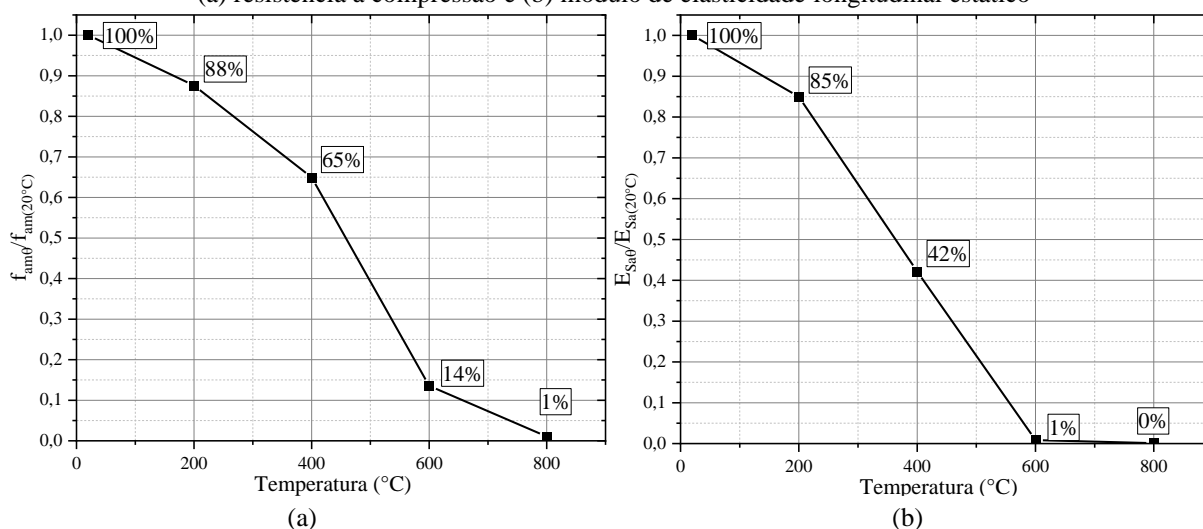


Fonte: Elaborado pelo Autor

Por fim, na Figura 4.38 são apresentadas as curvas residuais da argamassa de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático, expressa em termos de $f_{am\theta}/f_{am(20^{\circ}C)}$ e $E_{Sa\theta}/E_{Sa(20^{\circ}C)}$, respectivamente.

Figura 4.38: Curvas residuais das argamassas de assentamento:

(a) resistência à compressão e (b) módulo de elasticidade longitudinal estático



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em relação à resistência à compressão residual, aos 200 °C se identifica uma pequena redução da resistência para 87,63%, e aos 400 °C o corpo de prova continua a perder capacidade de resistência, chegando aos 64,94%. A partir daí a redução toma uma proporção brusca, sendo de 13,54% em 600 °C, bem como de 1,07% em 800 °C. Essa redução abrupta é causada pelo enfraquecimento gerado pela presença da cal na mistura da argamassa, tendo em vista que entre 400 e 600 °C ocorre o processo de desidratação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que se transforma em óxido de cálcio (CaO), composto químico que sofre expansão durante a fase de resfriamento, fissurando a argamassa e, assim, diminuindo sua capacidade de resistência.

Em se tratando da curva residual do módulo de elasticidade longitudinal estático, observa-se que a elevação de temperatura afeta de forma mais intensa a deformabilidade da argamassa quando comparada à resistência à compressão. Ao atingir os 200 °C, verificou-se um módulo de elasticidade residual de 85%, em 400 °C, sendo o módulo aferido igual a 42,15%. Em 600 °C, percebe-se uma queda abrupta, assim como ocorreu na análise da resistência à compressão, sendo o resíduo de 0,87%. Por fim, aos 800 °C, o módulo residual cai para apenas 0,10%, dado o tamanho nível de degradação da amostra.

4.8.2 Prismas de alvenaria

Em relação aos ensaios realizados nos prismas de alvenaria, o carregamento foi aplicado por meio do controle de deslocamentos a uma velocidade de 0,02 mm/s, a mesma utilizada nos ensaios individuais dos blocos de concreto. Durante os ensaios, os prismas tiveram suas faces superior e inferior regularizadas com placas de forro de fibra mineral, a fim de evitar a concentração de tensões nos principais pontos de aplicação de carregamento.

Para análise da deformabilidade dos prismas foram utilizados quatro transdutores de deslocamentos com curso de 20 cm, posicionados simetricamente nas duas faces longitudinais dos elementos, conforme apresentado na Figura 4.39.

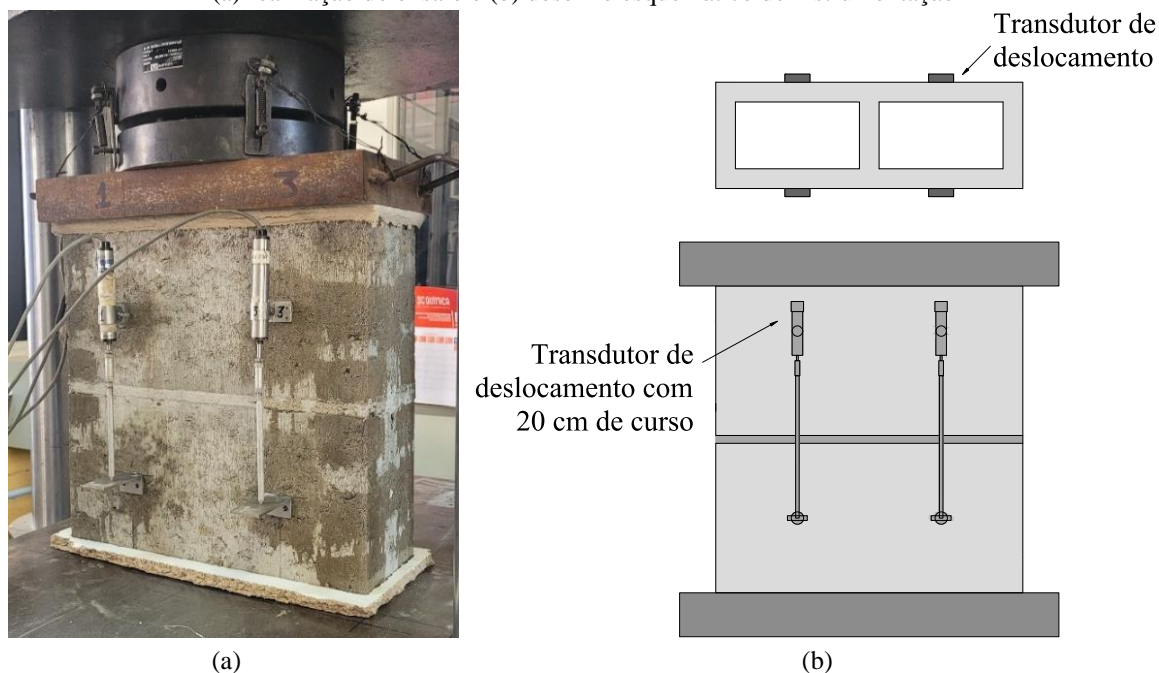
Nesse sentido, obteve-se as curvas tensão x deformação dos prismas em cada nível de temperatura, e determinou-se o módulo de elasticidade secante estático (E_s) conforme recomenda do ABNT NBR 16868-3:2020, utilizando trecho limitado por 5% e 30% da tensão de ruptura. Diferentemente dos blocos e argamassa, para os prismas de alvenaria não se teve interesse em calcular o módulo de elasticidade transversal estático (G_s).

Na Tabela 4.16 estão apresentadas as resistências médias e características à compressão, e os módulos de elasticidade estático longitudinal dos prismas de alvenaria em diferentes níveis de temperatura. Os valores de resistência média foram obtidos a partir da relação da carga de

ruptura com a área bruta da unidade, e a resistência característica dos prismas foi calculada de acordo com o procedimento estabelecido pela ABNT NBR 16868-3:2020.

Figura 4.39: Ensaio de resistência à compressão nos prismas de alvenaria:

(a) realização do ensaio e (b) desenho esquemático de instrumentação



Fonte: Elaborado pelo Autor

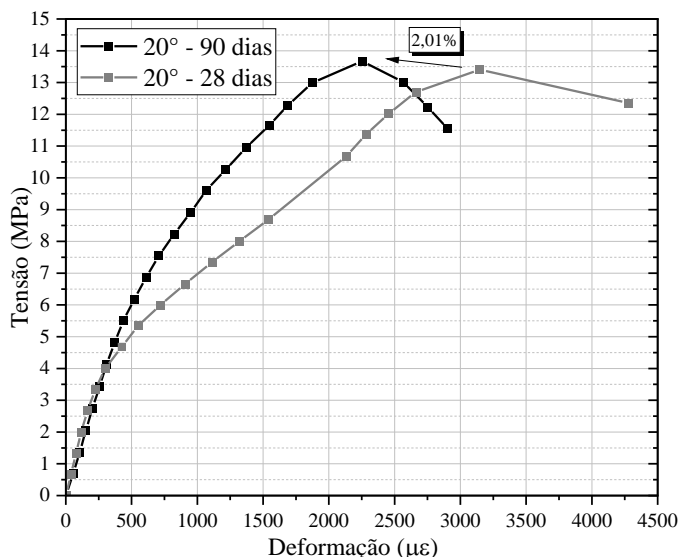
Tabela 4.16: Resistência à compressão e módulo de elasticidade longitudinal dos prismas de alvenaria

Temperatura		Força (kN)	Resistência na Ábruta - f_p (MPa)	E_{sp} (GPa)
20°C (28 dias)	Média	729,25	13,40	13,06
	CV (%)	17,92	17,92	7,34
	f_{pk} (MPa)		10,62	
20°C (90 dias)	Média	743,81	13,67	13,49
	CV (%)	12,42	12,42	5,11
	f_{pk} (MPa)		11,17	
200°C	Média	724,19	13,31	8,08
	CV (%)	14,05	14,05	20,56
	f_{pk} (MPa)		10,69	
400°C	Média	580,30	10,67	2,67
	CV (%)	10,06	10,06	5,36
	f_{pk} (MPa)		8,86	
600°C	Média	426,98	7,85	1,23
	CV (%)	12,08	12,08	15,92
	f_{pk} (MPa)		6,29	
800°C	Média	160,75	2,95	0,31
	CV (%)	15,92	15,92	12,68
	f_{pk} (MPa)		2,88	

Fonte: Elaborado pelo Autor

A diferença entre a relação tensão x deformação dos prismas analisados em 28 dias e 90 dias estão explicitadas na Figura 4.40, na qual se identifica que a diferença no número de dias de cura representou um aumento na tensão de ruptura do prisma de apenas 2,01%.

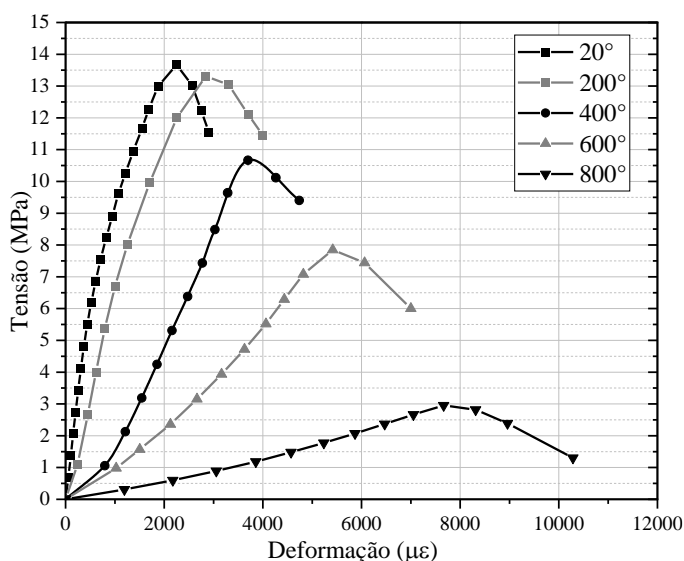
Figura 4.40: Variação da resistência à compressão dos prismas de alvenaria em temperatura ambiente



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 4.41 são apresentados os diagramas “tensão x deformação” dos prismas nos diferentes níveis de temperatura de interesse. Assim como em seus componentes, bloco e argamassa, o aumento da temperatura faz com que o prisma perca consideravelmente sua capacidade de resistência à compressão e rigidez, visto o aumento da deformabilidade.

Figura 4.41: Diagramas tensão x deformação dos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas



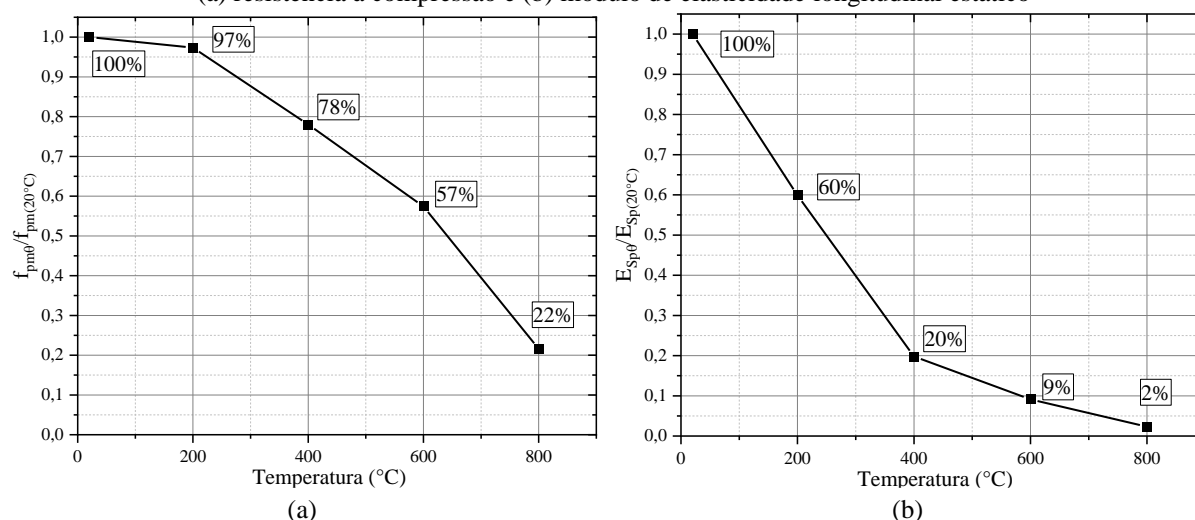
Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 4.42a é apresentada a curva residual de resistência à compressão referentes aos prismas de alvenaria, expressa em termos de $f_{pm\theta}/f_{pm(20^{\circ}C)}$. De modo geral, há pouca perda na capacidade de resistência aos 200 °C, sendo de 97%. A partir dessa temperatura a queda toma proporções maiores, chegando à ordem dos 78% aos 400 °C, 57% aos 600 °C e 22% aos 800 °C.

Na curva residual do módulo de elasticidade estático dos prismas de alvenaria (Figura 4.42b), expressa em termos de $E_{Sp\theta}/E_{Sp(20^{\circ}C)}$, nota-se que, assim como nos blocos e nas argamassas, os efeitos da elevação da temperatura nos prismas são mais intensos na deformabilidade deles, do que na capacidade de resistência à compressão.

Dessa forma, ao atingir a temperatura de 200 °C, verificou-se um módulo de elasticidade residual de aproximadamente 60%, se comportando de forma quase que linear até atingir os 400 °C, sendo da ordem de 20%. Em 600 °C, o resíduo é de 9%, e, por fim, aos 800 °C, o módulo residual cai para apenas 2%.

Figura 4.42: Curvas residuais dos prismas de alvenaria:
(a) resistência à compressão e (b) módulo de elasticidade longitudinal estático



Fonte: Elaborado pelo Autor

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo, serão apresentadas análises e discussões acerca dos resultados obtidos nos programas experimentais I e II, apresentados nos capítulos 3 e 4, respectivamente. Para cada componente de alvenaria estrutural estudado (blocos, argamassas de assentamento e prismas), serão propostas relações entre as propriedades dinâmicas e estáticas, bem como comparações entre as curvas residuais obtidas experimentalmente e as disponíveis em normas e trabalhos científicos.

5.1 BLOCOS DE CONCRETO

Esta seção é dedicada apenas à análise dos resultados obtidos no *Programa experimental I*, referente aos ensaios realizados nos blocos de concreto.

5.1.1 Velocidade de pulso ultrassônico nos blocos de concreto

Na Tabela 3.7 da seção 3.4 são apresentadas as médias das velocidades ultrassônicas por temperatura segundo a direção avaliada, bem como as médias globais, que incluem as medidas aferidas em todas as direções para cada nível de temperatura. Os resultados em questão foram comparados com resultados apresentados em Sombra (2020) e em Amaral *et al.* (2021), conforme demonstrado na Tabela 5.1. Os autores abordaram blocos de concreto com resistência e dimensões nominais iguais às aquelas dos blocos utilizados neste programa experimental. Em Sombra (2020), os ensaios de VPU foram utilizados para caracterização do bloco de concreto em temperatura ambiente, enquanto em Amaral *et al.* (2021), foram utilizados na análise da degradação dos blocos em elevadas temperaturas.

As velocidades ultrassônicas aferidas neste programa experimental em temperatura ambiente resultaram coerentes com as já disponíveis na comunidade científica. As médias das velocidades transversais flutuaram entre 2300 e 2600 m/s, enquanto as longitudinais entre 4300 a 4500 m/s. Destaca-se também, em relação às velocidades longitudinais aferidas nas diferentes direções (altura, comprimento e largura), que há uma similaridade com os resultados divulgados em Sombra (2020), onde também foram constatadas maiores velocidades na direção da largura, seguida da altura e do comprimento. No entanto, em ambos os casos, essa diferença não é estatisticamente significativa.

Em se tratando dos resultados alcançados em elevadas temperaturas, é perceptível a concordância com os publicados em Amaral *et al.* (2021). É importante salientar que, no estudo

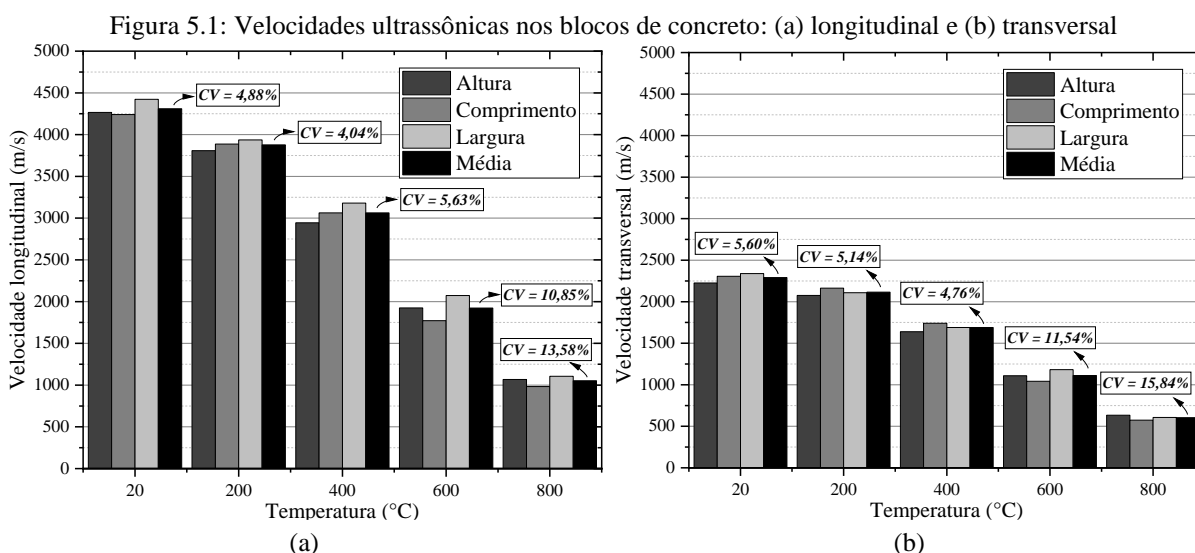
em questão, os blocos de concreto foram submetidos a temperaturas distintas das avaliadas neste programa experimental, sendo 100, 300, 500, 700 e 900 °C, mas seguiram a mesma taxa de aquecimento de 1 °C/min, permanecendo por uma hora na temperatura de interesse.

Tabela 5.1: Comparação entre as velocidades ultrassônicas nos blocos de concreto

Temperatura		Programa experimental		Sombra (2020)		Amaral <i>et al.</i> (2021)	
		V _{Lb} (m/s)	V _{Tb} (m/s)	V _{Lb} (m/s)	V _{Tb} (m/s)	V _{Lb} (m/s)	V _{Tb} (m/s)
20 °C	Altura	4266,51	2225,49	4356,56	2601,10	-	-
	Comprimento	4240,61	2306,72	4306,93	2552,00	-	-
	Largura	4422,68	2338,88	4430,33	2606,10	-	-
	Média	4309,93	2290,36	4376,10	2587,77	4500,00	-
100 °C	Média	-	-	-	-	4500,00	-
200 °C	Média	3877,45	2116,04	-	-	-	-
300 °C	Média	-	-	-	-	3890,00	-
400 °C	Média	3062,31	1689,65	-	-	-	-
500 °C	Média	-	-	-	-	2830,00	-
600 °C	Média	1923,21	1111,00	-	-	-	-
700 °C	Média	-	-	-	-	1520,00	-
800 °C	Média	1051,43	604,19	-	-	-	-
900 °C	Média	-	-	-	-	850,00	-

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os dados das velocidades ultrassônicas longitudinal e transversal deste programa experimental, apresentados na Tabela 3.7 da seção 3.4, estão representados graficamente na Figura 5.1, onde é possível visualizar a variação dessas velocidades nos blocos de concreto em decorrência da elevação de temperatura. Os coeficientes de variação das médias de cada faixa de temperatura estão destacados.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Até a temperatura de 400 °C, as dispersões de ambas as velocidades em relação às médias globais obtidas podem ser consideradas baixas, uma vez que abrangem todas as medidas aferidas (108 por temperatura), nas quais os CVs variaram de 4,04% a 5,60%. Em relação às medições realizadas em 600 e 800 °C, nota-se uma elevação na taxa de dispersão dos resultados, reflexo da maior dificuldade de propagação das ondas ultrassônicas causada pela degradação dos corpos de prova, constando valores de 10,85% a 15,84%. Vale ressaltar, que por se tratar de CVs referentes às médias globais, esses representam com maior fidelidade a heterogeneidade dos blocos de concreto analisados.

Nota-se também o decréscimo das velocidades ultrassônicas em decorrência da elevação de temperatura, tendo em vista que, no processo de aquecimento dos espécimes, a matriz cimentícia e os agregados constituintes dos blocos de concreto sofrem deterioração de maneira gradual ao longo do tempo, o que dificulta a propagação das ondas no material. Por exemplo, em 800 °C as velocidades médias longitudinal e transversal são, respectivamente, iguais a 24,40% e 26,38% das obtidas em temperatura ambiente.

Além disso, é evidente que há uma flutuação nos valores dessas velocidades de acordo com a direção de propagação das ondas, o que se acentua com o aumento da temperatura. Em todas as temperaturas avaliadas, as médias de velocidade das ondas longitudinais na largura dos blocos são superiores às médias nas outras direções. Como já mencionado anteriormente no capítulo 3, isso pode ser justificado devido à largura possuir a menor dimensão dentre as avaliadas, sendo também menor o percurso de onda, o que resulta em uma menor incidência de interferências por conta da heterogeneidade do material. Em se tratando das velocidades transversais, essa relação varia conforme a temperatura de análise, não havendo um padrão definido.

Essa diferença foi analisada do ponto de vista estatístico, visando avaliar a existência de diferenças significativas entre as médias das velocidades ultrassônicas nas direções da altura, comprimento e largura. Para isso foi aplicado os testes estatísticos F e T por temperatura para as medidas tomadas nas diferentes direções dos blocos de concreto, adotando nível de significância de 95%. Em temperatura ambiente, as velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais ao longo de todas as direções foram consideradas estatisticamente iguais, o que corrobora com a adoção da hipótese de isotropia e homogeneidade para os blocos de concreto. No entanto, com o aumento da temperatura, surgem divergências significativas entre as velocidades obtidas nas direções distintas, o que indica que, com a elevação da temperatura as hipóteses adotadas, apesar de serem válidas, se distanciam um pouco da realidade. Na Tabela 5.2 são demonstrados os testes de comparação.

Tabela 5.2: Teste de hipóteses estatístico para as velocidades longitudinais e transversais ao longo da altura, comprimento e largura dos blocos de concreto

Temperatura	Propriedade	Comparação		T	T _{crit}	p-value	Significância
20 °C	V _{Lb}	V _{Lb,A}	V _{Lb,C}	0,239	2,634	0,8161	Não
		V _{Lb,A}	V _{Lb,L}	1,574	2,634	0,1465	Não
		V _{Lb,C}	V _{Lb,L}	1,948	2,634	0,0801	Não
	V _{Tb}	V _{Tb,A}	V _{Tb,C}	1,218	2,634	0,2510	Não
		V _{Tb,A}	V _{Tb,L}	2,613	2,634	0,0259	Não
		V _{Tb,C}	V _{Tb,L}	0,508	2,634	0,6226	Não
200 °C	V _{Lb}	V _{Lb,A}	V _{Lb,C}	2,843	2,634	0,0175	Sim
		V _{Lb,A}	V _{Lb,L}	5,181	2,634	0,0004	Sim
		V _{Lb,C}	V _{Lb,L}	1,523	2,634	0,1588	Não
	V _{Tb}	V _{Tb,A}	V _{Tb,C}	2,613	2,634	0,0259	Não
		V _{Tb,A}	V _{Tb,L}	0,874	2,634	0,4025	Não
		V _{Tb,C}	V _{Tb,L}	2,090	2,634	0,0631	Não
400 °C	V _{Lb}	V _{Lb,A}	V _{Lb,C}	3,244	2,634	0,00881	Sim
		V _{Lb,A}	V _{Lb,L}	6,258	2,634	0,00009	Sim
		V _{Lb,C}	V _{Lb,L}	4,252	2,634	0,00168	Sim
	V _{Tb}	V _{Tb,A}	V _{Tb,C}	7,059	2,634	0,00003	Sim
		V _{Tb,A}	V _{Tb,L}	2,725	2,634	0,02139	Sim
		V _{Tb,C}	V _{Tb,L}	3,086	2,634	0,01152	Sim
600 °C	V _{Lb}	V _{Lb,A}	V _{Lb,C}	3,271	2,634	0,0084	Sim
		V _{Lb,A}	V _{Lb,L}	4,454	2,634	0,0012	Sim
		V _{Lb,C}	V _{Lb,L}	5,858	2,634	0,0002	Sim
	V _{Tb}	V _{Tb,A}	V _{Tb,C}	2,454	2,634	0,0340	Não
		V _{Tb,A}	V _{Tb,L}	4,908	2,634	0,0006	Sim
		V _{Tb,C}	V _{Tb,L}	5,240	2,634	0,0004	Sim
800 °C	V _{Lb}	V _{Lb,A}	V _{Lb,C}	2,330	2,634	0,0421	Não
		V _{Lb,A}	V _{Lb,L}	1,608	2,634	0,1390	Não
		V _{Lb,C}	V _{Lb,L}	3,777	2,634	0,0036	Sim
	V _{Tb}	V _{Tb,A}	V _{Tb,C}	3,278	2,634	0,0083	Sim
		V _{Tb,A}	V _{Tb,L}	1,766	2,634	0,1078	Não
		V _{Tb,C}	V _{Tb,L}	1,707	2,634	0,1186	Não

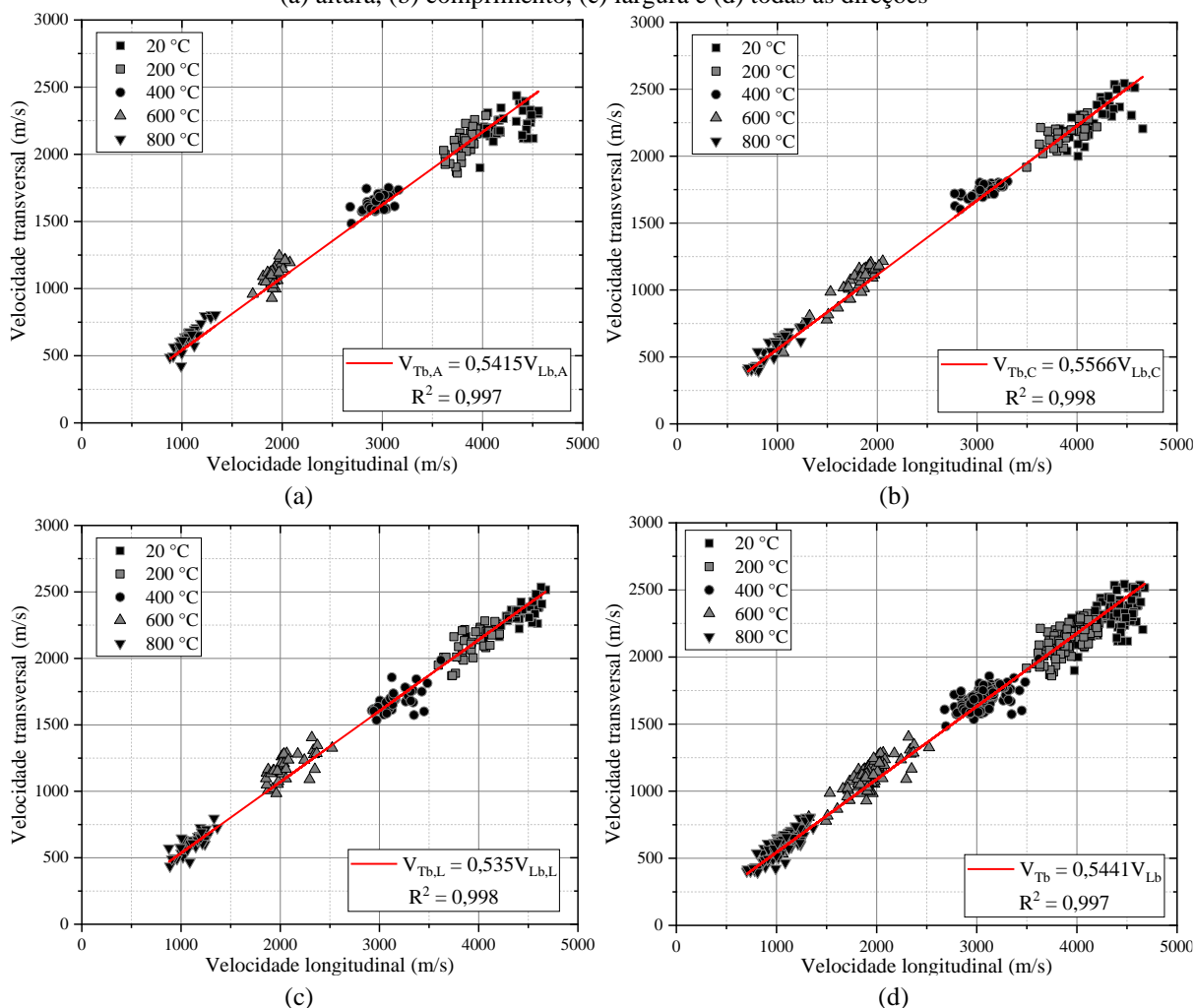
Fonte: Elaborado pelo Autor

Em relação aos blocos expostos à 200 °C, apenas as velocidades longitudinais na direção da altura se mostraram significativamente diferentes em relação às demais direções. Os blocos submetidos à 400 °C, apresentaram diferenças estatísticas nas velocidades transversal e longitudinal entre todas as direções. Em relação às unidades analisadas a 600 °C, apenas as velocidades transversais nas direções da altura e do comprimento não apresentaram divergências significativas entre si. Por fim, em 800 °C, detectou-se significância na diferença entre as velocidades longitudinais do comprimento e da largura, e entre as velocidades transversais da altura e do comprimento.

Após a análise da variação das velocidades nas diferentes direções dos blocos de concreto, foram estabelecidas relações entre as velocidades longitudinais e transversais nas três direções ortogonais, conforme demonstrado na Figura 5.2, incluindo medições realizadas em todos os níveis de temperatura. De maneira geral, é possível observar uma tendência de similaridade entre as relações obtidas, sendo, na direção da altura, a velocidade ultrassônica transversal de aproximadamente 54,15% (Figura 5.2a) da velocidade longitudinal. No comprimento, a relação entre as velocidades é de 55,66% (Figura 5.2b) e na largura, de 53,5% (Figura 5.2c).

Figura 5.2: Relação entre as velocidades longitudinal e transversal nos blocos de concreto:

(a) altura, (b) comprimento, (c) largura e (d) todas as direções



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tendo em vista a semelhança encontrada entre as relações propostas, entendeu-se que uma relação entre as duas velocidades, levando em consideração as medições realizadas em todas as direções e temperaturas de análise, pode ser representativa para os espécimes. Sendo

assim, de acordo com a Figura 5.2d, a velocidade ultrassônica transversal dos blocos de concreto analisados neste trabalho corresponde a aproximadamente 54,41% da velocidade ultrassônica longitudinal.

Em Sombra (2020), apesar de não ter sido explicitamente mencionado, as relações entre as médias das velocidades longitudinal e transversal foram ligeiramente superiores às obtidas neste programa experimental, sendo de 59,71% na altura, 59,25% no comprimento e 58,82% na largura. Em relação à média total, a relação é de 59,13%.

Em se tratando da variação das velocidades de pulso ultrassônico em função da elevação de temperatura, embora tenham sido observadas diferenças entre as velocidades ultrassônicas nas diferentes direções dos espécimes, considerou-se utilizar a média global das velocidades longitudinal e transversal na elaboração dos gráficos residuais das velocidades ultrassônicas dos blocos de concreto.

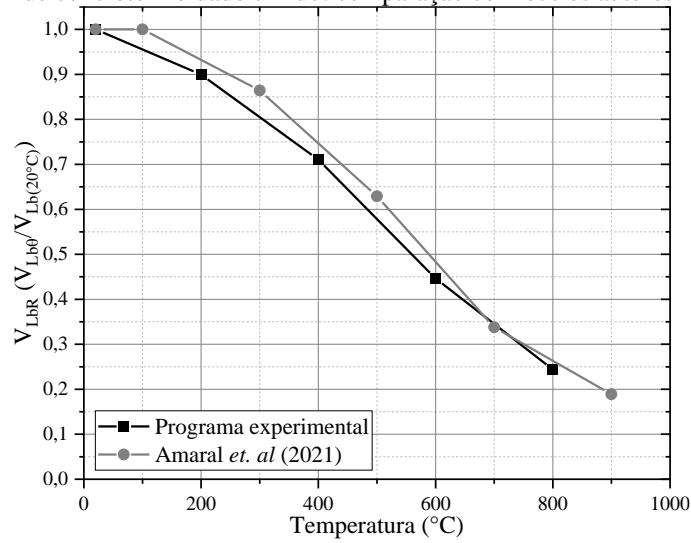
As velocidades ultrassônicas residuais obtidas neste programa experimental foram comparadas com os resultados apresentados em Amaral *et al.* (2021), conforme apresentado na Tabela 5.3. Em Amaral *et al.* (2021), foi verificada a viabilidade da utilização dos ensaios de ultrassom para estimar a deterioração de blocos de concreto estrutural. Os resultados aqui comparados são referentes aos blocos de concreto com resistência de 10 MPa e largura de 14cm. No contexto térmico, os blocos de concreto foram ensaiados a uma taxa de aquecimento de 1°C/min, atingindo temperaturas-alvo de 100, 300, 500, 700 e 900 °C, e permanecendo com a temperatura limite de interesse por uma hora. É perceptível uma semelhança entre os resultados alcançados em ambos.

Tabela 5.3: Comparação entre velocidades residuais longitudinal e transversal nos blocos de concreto e em corpos de prova de concreto moldado úmido

Temperatura	Residual		
	Programa experimental	Amaral <i>et al.</i> (2021)	
	V _{LbR}	V _{TbR}	V _{LbR}
REF. (20 °C)	100,00%	100,00%	100,00%
100 °C	-	-	100,00%
200 °C	89,97%	92,39%	-
300 °C	-	-	86,44%
400 °C	71,05%	73,77%	-
500 °C	-	-	62,89%
600 °C	44,62%	48,51%	-
700 °C	-	-	33,78%
800 °C	24,40%	26,38%	-
900 °C	-	-	18,89%

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5.3: Curvas residuais da velocidade ultrassônica longitudinal nos blocos de concreto e em corpos de prova de concreto moldado úmido: comparação com outros autores

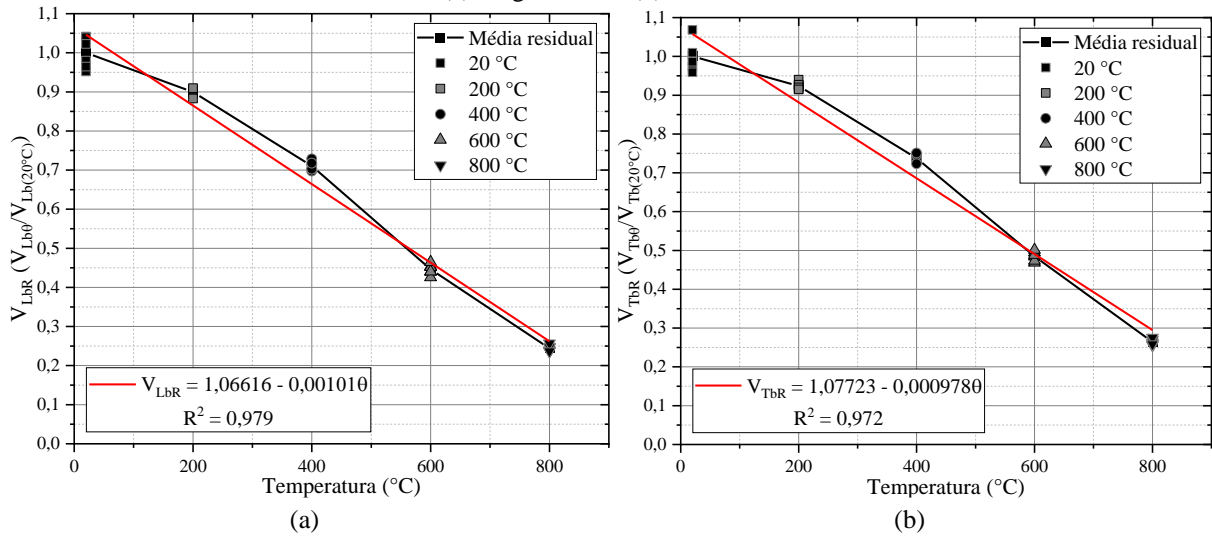


Fonte: Elaborado pelo Autor

Por meio de regressão linear, como ilustrado na Figura 5.4, estabeleceram-se relações entre as médias globais das velocidades ultrassônicas residuais longitudinal (V_{LbR}) e transversal (V_{TbR}) e as temperaturas de análise (θ), conforme explicitado nas Equações 5.1 e 5.2. Percebe-se mediante as equações apresentadas e os dados apresentados na Tabela 5.3, a semelhança que há no decréscimo das velocidades ultrassônicas longitudinal e transversal mediante a elevação de temperatura.

Figura 5.4: Curvas residuais das velocidades ultrassônicas nos blocos de concreto:

(a) longitudinal e (b) transversal



Fonte: Elaborado pelo Autor

$$V_{LbR} = 1,06616 - 0,00101\theta \quad (5.1)$$

$$V_{TbR} = 1,07723 - 0,000978\theta \quad (5.2)$$

Dessa forma, é possível estimar as velocidades de pulso ultrassônico por meio da temperatura à qual o corpo de prova foi exposto, ou, de modo inverso, determinar a temperatura à qual o espécime foi submetido a partir da medida residual da VPU. Essa abordagem permite inferir outras informações importantes, como a rigidez e a resistência à compressão dos blocos de concreto. Vale ressaltar que o coeficiente de determinação (R^2) encontrado para as seguintes relações é referente a todos os pontos do gráfico e não à média residual.

5.1.2 Propriedades mecânicas dinâmicas dos blocos de concreto

A adoção da hipótese de homogeneidade e isotropia dos blocos de concreto neste trabalho viabilizou a determinação das propriedades mecânicas dinâmicas dos espécimes em temperatura ambiente e elevadas temperaturas por meio das Equações 2.7 e 2.8, as quais envolvem uma das variáveis fundamentais relacionada ao material analisado, o coeficiente de Poisson dinâmico (ν_D), determinado pela Equação 5.3.

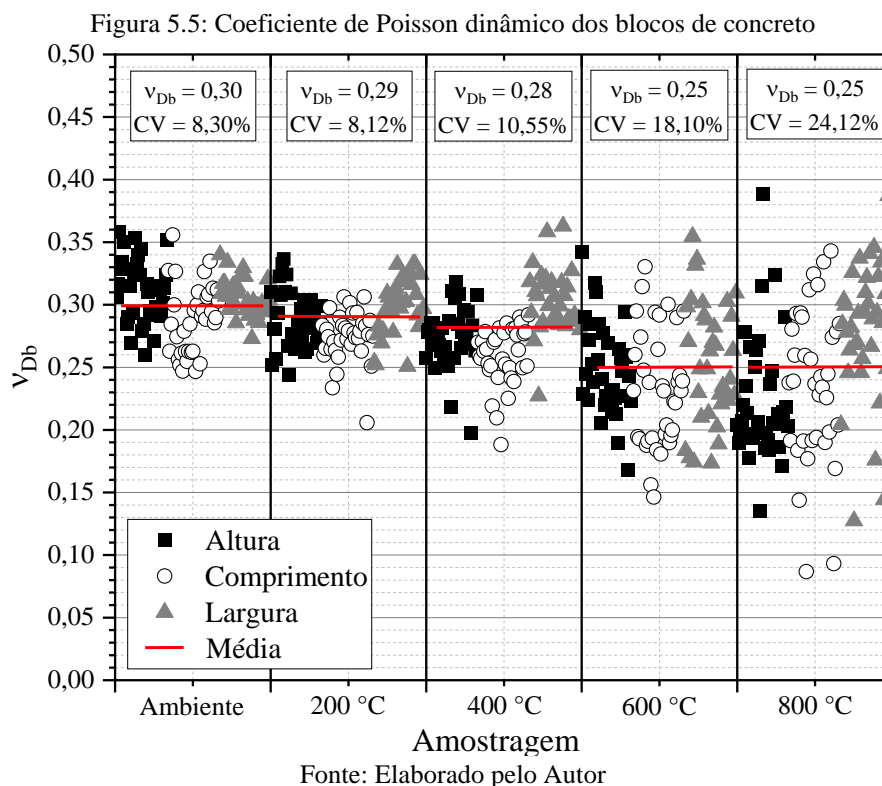
$$\nu_D = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} \quad (5.3)$$

A Equação 5.3 revela de maneira clara que o coeficiente de Poisson dinâmico do material está diretamente relacionado à diferença entre a velocidade longitudinal (V_L) e a velocidade transversal (V_T) aferida em uma medição, mostrando-se como uma variável importante na análise dessa relação entre as duas velocidades ultrassônicas analisadas.

Na Figura 5.5 estão apresentados os valores do coeficiente de Poisson dinâmico (ν_{Db}) obtidos em cada ponto medido nos blocos de concreto, distinguindo-os entre as diferentes direções e níveis de temperatura, estando em destaque a média e o coeficiente de variação logrados em cada temperatura de análise. É notório o aumento da dispersão dos valores de ν_{Db} em resposta à elevação da temperatura, fato esse já observado na análise dos resultados das velocidades ultrassônicas, tendo em vista a relação direta entre os dois parâmetros (Equação 5.3). Dessa forma, é possível observar novamente a evidência da heterogeneidade do material mediante a elevação da temperatura.

Adotou-se um coeficiente de Poisson dinâmico médio (ν_{Db}) abrangendo todas as direções avaliadas por nível de temperatura. Isso se deve ao fato de que as médias obtidas em cada direção demonstraram valores semelhantes, conforme ilustrado na Figura 5.5 e destacado

na Tabela 3.6 do capítulo 3. Em geral, esses valores variaram entre 0,30 e 0,25 nas diferentes temperaturas avaliadas.



Em Sombra (2020), o Poisson dinâmico estimado foi de 0,24, valor um pouco inferior ao apurado neste programa experimental, mas se assemelham pelo fato de sobrepujarem o equivalente estático, que é usualmente tomado como 0,20 para blocos de concreto, conforme ABNT NBR 16868-1:2020.

Em Fernandes Neto (2023) é destacada a superioridade do coeficiente de Poisson dinâmico auferido por meio do ensaio de ultrassom em relação ao obtido mediante ensaios estáticos, uma vez que, nos ensaios dinâmicos os corpos de provas são submetidos a níveis reduzidos de tensão e deformação, sendo essa propriedade correspondente ao trecho inicial da curva “tensão x deformação”. Por outro lado, as propriedades calculadas por meio de ensaios estáticos envolvem um trecho da curva em que, geralmente, o material já apresenta um certo grau de danificação.

Após a estimativa dos coeficientes de Poisson dinâmico, foram definidos os módulos de elasticidade dinâmico longitudinais e transversais dos blocos, os quais estão descritos em sua totalidade na Tabela 3.7, estando o resumo das médias totais obtidas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal dos blocos de concreto em elevadas temperaturas

Temperatura		Média Total	
		E_{Db} (GPa)	G_{Db} (GPa)
20 °C	Média	34,74	13,36
	CV (%)	10,20	11,13
200 °C	Média	28,72	11,17
	CV (%)	9,21	10,12
400 °C	Média	17,64	6,90
	CV (%)	9,23	9,58
600 °C	Média	7,35	2,96
	CV (%)	20,47	21,32
800 °C	Média	2,15	0,87
	CV (%)	28,83	30,51

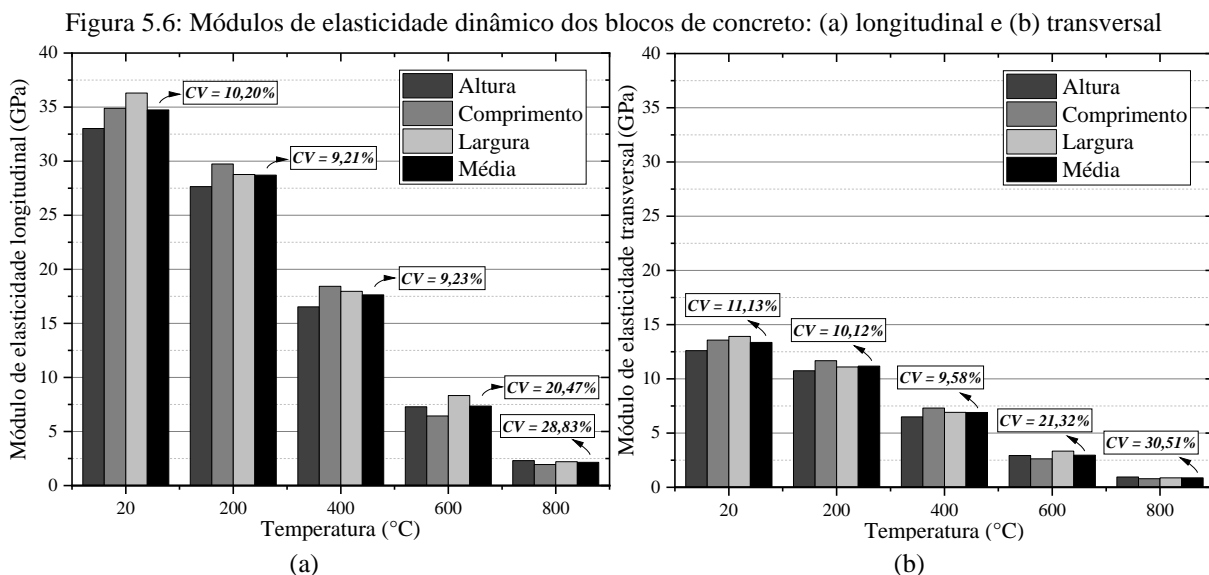
Fonte: Elaborado pelo Autor

Em relação aos resultados obtidos em temperatura ambiente, a média dos módulos de elasticidade dinâmico longitudinal (E_{Db}) e transversal (G_{Db}) foram iguais a 34,74 GPa e 13,36 GPa, respectivamente. Ao comparar os valores com os publicados em Sombra (2020), observa-se que as propriedades mecânicas dinâmicas obtidas neste programa experimental foram inferiores em relação à última referência, que obteve 38,24 GPa para o E_{Db} e 15,53 GPa em relação ao G_{Db} . Essa diferença pode ser justificada pela distinção em relação ao coeficiente de Poisson dinâmico aferido em cada trabalho, bem como o fato de que o autor utilizou um Poisson dinâmico médio para o cálculo das propriedades dinâmicas, enquanto neste trabalho, as propriedades dinâmicas foram determinadas localmente. Sendo assim, o cálculo das propriedades foi baseado no ν_D aferido em cada ponto da malha prevista para ensaio. Tal fato também influenciou no aumento dos coeficientes de variação, que flutuam de 9,21% a 11,13% até 400 °C. A partir daí, em 600 e 800 °C, os CVs aumentam de forma abrupta, chegando a 30,51%, influenciados pela alta dispersão observada no tempo de chegada das ondas longitudinal e transversal, consequência da degradação dos corpos de prova estudados.

Na Figura 5.6 os módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal estão representados graficamente, permitindo a visualização da variação das propriedades mencionadas em decorrência da elevação da temperatura, sendo destacados os coeficientes de variação das médias de cada faixa de temperatura.

Assim como ocorrido nas velocidades ultrassônicas, nota-se o declínio das propriedades mecânicas dinâmicas devido à elevação da temperatura, tendo em vista a deterioração progressiva do material causada pelo aquecimento dos espécimes. Além disso, observa-se que os módulos dinâmicos variam conforme a direção de propagação das ondas, o que se acentuou

com o aumento da temperatura, o que era esperado, uma vez que isso reflete o que já fora discutido em relação às velocidades das ondas ultrassônicas.



Fonte: Elaborado pelo Autor

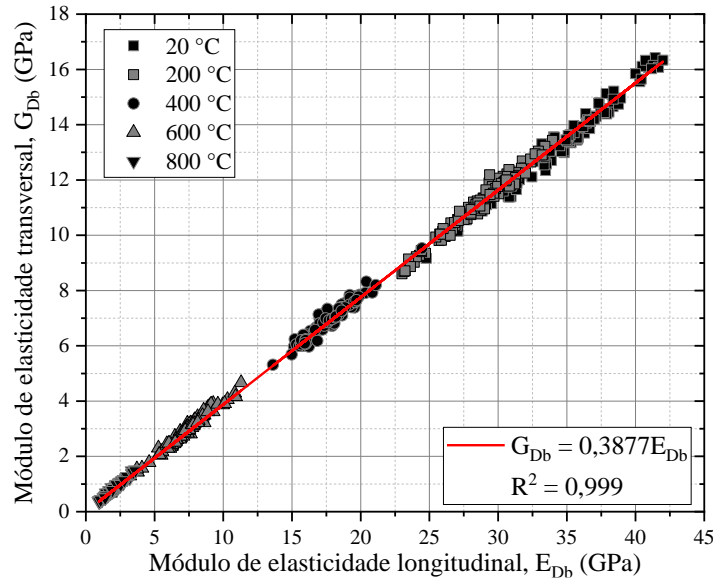
Essa variação observada nas diferentes direções ortogonais foi examinada sob a perspectiva estatística. Para isso foram aplicados os testes estatísticos F e T, por temperatura, para os módulos de elasticidades dinâmicos aferidos em cada direção dos blocos de concreto, adotando nível de significância de 95%. Em condições de temperatura ambiente, as propriedades dinâmicas em todas as direções foram consideradas estatisticamente iguais, o que atesta que a aplicação das hipóteses de isotropia e homogeneidade é válida para os blocos de concreto em temperatura ambiente. Apesar disso, com o aumento da temperatura, surgiram divergências significativas entre as propriedades obtidas em direções distintas. O que indica que com a elevação da temperatura as hipóteses adotadas se distanciam um pouco da realidade, sendo evidenciada a heterogeneidade e anisotropia do material.

Apesar das diferenças mencionadas no parágrafo anterior, no presente trabalho, optou-se por considerar a permanência das hipóteses adotadas mesmo em elevadas temperaturas. Sendo assim, estabeleceram-se relações entre as propriedades dinâmicas e a elevação de temperatura, bem como com os resultados obtidos por meio dos ensaios mecânicos estáticos.

Na Figura 5.7 é plotada a relação entre os módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal dos blocos de concreto, onde fica explícita as hipóteses de isotropia e homogeneidade adotadas para este trabalho, de modo que entre os dois módulos dinâmicos é possível estabelecer uma relação linear, respeitando a Equação 5.4 advinda da teoria da elasticidade. Sendo possível estimar, a partir da relação encontrada, um coeficiente de Poisson

dinâmico global para o bloco de concreto (ν_{Db}), envolvendo as diferentes temperaturas e direções avaliadas do espécime, conforme indicado na Equação 5.5.

Figura 5.7: Relação entre os módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal dos blocos de concreto



Fonte: Elaborado pelo Autor

$$E_{Db} = 2G_{Db}(1 + \nu_{Db}) \quad (5.4)$$

$$E_{Db} = 2G_{Db}(1 + \nu_{Db}) \rightarrow E_{Db} = 2 \cdot 0,3877E_{Db}(1 + \nu_{Db}) \rightarrow \nu_{Db} = 0,289 \quad (5.5)$$

Além disso, foi determinada uma relação em termos residuais para os módulos de elasticidade longitudinal e transversal em função da variação de temperatura. Para tanto, as médias globais das propriedades dinâmicas em cada nível de temperatura foram consideradas representativas para os blocos de concreto na elaboração das curvas residuais das propriedades em questão.

Na Tabela 5.5 estão denotadas as propriedades dinâmicas residuais, onde é claramente observada a semelhança nos valores residuais dos módulos de elasticidade dinâmicos longitudinal (E_{DbR}) e transversal (G_{DbR}). Diante dessa similaridade, foi adotada uma única equação, por meio de regressão linear, para expressar a variação dessas propriedades em termos residuais mediante à mudança de temperatura, conforme demonstrado na Figura 5.8, e explicitado na Equação 5.6.

Observa-se também maior tendência de redução dos módulos dinâmicos em comparação com as velocidades ultrassônicas, tendo redução (segundo a função estabelecida) de aproximadamente 25% a cada 200 °C, enquanto as velocidades decrescem em média a uma taxa de cerca de 20% a cada 200 °C. A partir das relações estabelecidas para os blocos de

concreto deste estudo, torna-se possível estimar o E_{Db} e o G_{Db} por meio da temperatura à qual o corpo de prova foi submetido. Da mesma forma, é possível proceder inversamente, determinando a temperatura por meio da medida residual dos módulos dinâmicos.

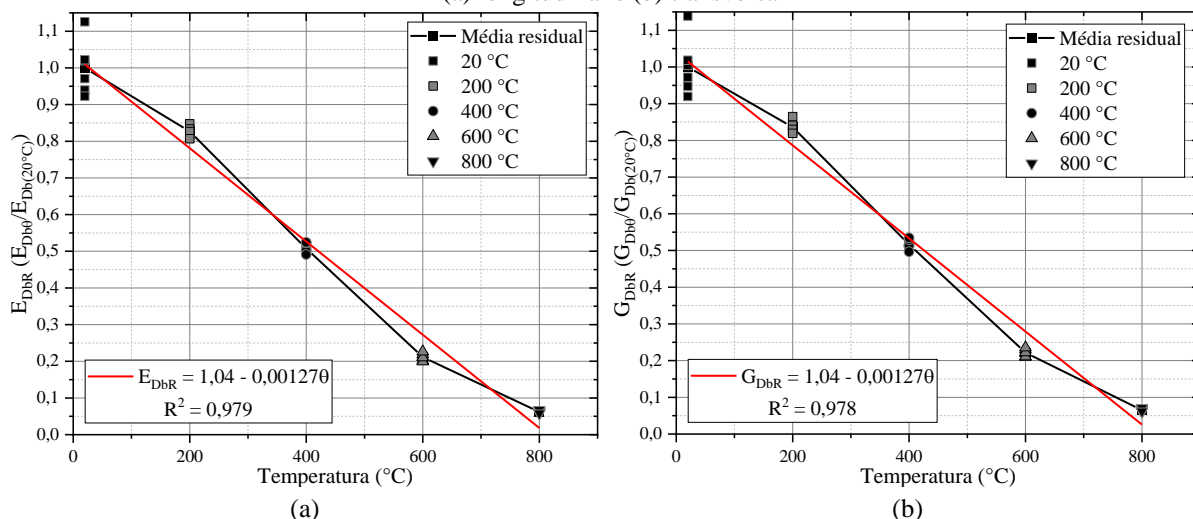
Tabela 5.5: Propriedades dinâmicas residuais dos blocos de concreto

Temperatura	Residual	
	E_{DbR}	G_{DbR}
REF. (20 °C)	100%	100%
200 °C	82,66%	83,61%
400 °C	50,77%	51,66%
600 °C	21,16%	22,16%
800 °C	6,19%	6,51%

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5.8: Curvas residuais dos módulos de elasticidade dinâmico dos blocos de concreto:

(a) longitudinal e (b) transversal



Fonte: Elaborado pelo Autor

$$E_{DbR} = G_{DbR} = 1,04 - 0,00127\theta \quad (5.6)$$

5.1.3 Propriedades mecânicas estáticas dos blocos de concreto

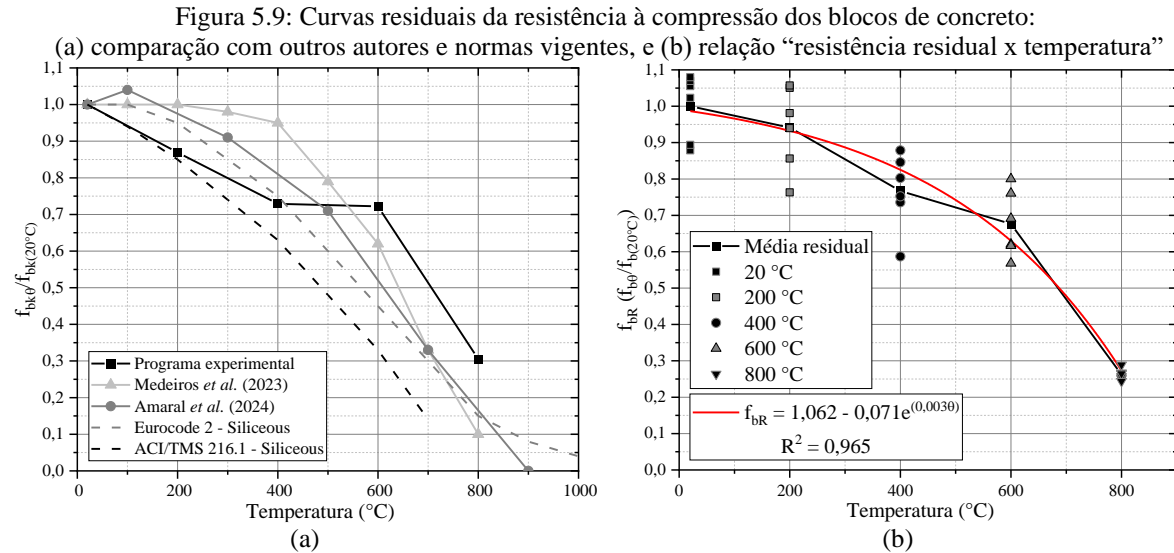
Os resultados de resistência característica à compressão residual dos blocos de concreto ($f_{bk\theta}/f_{bk(20^{\circ}C)}$) deste programa experimental foram comparados com os apresentados em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2023) e em Amaral *et al.* (2024), os quais investigaram blocos de concreto constituídos de agregados silicosos e com geometria e processo de fabricação similares aos dos blocos analisados neste trabalho. Além disso, foram realizadas comparações com as normas Eurocode 2 (2004) e ACI/TMS 216.1:2014, que fornecem curvas de redução da resistência característica do concreto moldado úmido. Esses resultados estão detalhados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Comparação entre a resistência característica à compressão residual dos blocos de concreto

Temperatura	Residual				
	Programa experimental	Medeiros <i>et al.</i> (2023)	Amaral <i>et al.</i> (2024)	ACI/TMS 216.1:2014	Eurocode 2 (2004)
	$f_{bk\theta}/f_{bk(20^{\circ}C)}$	$f_{bk\theta}/f_{bk(20^{\circ}C)}$	$f_{bk\theta}/f_{bk(20^{\circ}C)}$	$f_{bk\theta}/f_{bk(20^{\circ}C)}$	$f_{bk\theta}/f_{bk(20^{\circ}C)}$
REF. (20 °C)	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
100 °C	-	100,00%	104,00%	94,00%	100,00%
200 °C	86,92%	100,00%	-	85,00%	95,00%
300 °C	-	98,00%	91,00%	74,00%	85,00%
400 °C	72,92%	95,00%	-	63,00%	75,00%
500 °C	-	79,00%	71,00%	48,00%	60,00%
600 °C	72,21%	62,00%	-	33,00%	45,00%
700 °C	-	33,00%	33,00%	14,00%	30,00%
800 °C	30,50%	10,00%	-	-	15,00%
900 °C	-	-	0,00%	-	8,00%
1000 °C	-	-	-	-	4,00%

Fonte: Elaborado pelo Autor

A ACI/TMS 216.1:2014 apresenta curvas residuais baseadas no tipo de agregado e na carga aplicada, ao passo que as curvas do Eurocode 2 (2004) não detalham o regime de carregamento, abordando apenas o tipo de agregado. Para efeito de comparação, foi selecionada a curva residual do ACI/TMS 216.1:2014 que corresponde ao concreto com agregados silicosos, aquecidos sem carregamento e rompidos após o resfriamento. Em relação ao Eurocode 2 (2004), a curva residual utilizada para comparação também se refere ao concreto com agregados silicosos. Na Figura 5.9a, as curvas residuais são apresentadas, onde é possível perceber as semelhanças e diferenças no comportamento residual entre os blocos de concreto deste programa experimental e os daqueles autores mencionados. Além do estabelecimento de comparação com as curvas propostas pelas normas citadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em Amaral *et al.* (2024), percebe-se um pequeno acréscimo de resistência entre a temperatura ambiente e os 200 °C. Enquanto que, nessa faixa de temperatura, a curva do presente programa experimental apresentou um comportamento bastante semelhante ao do ACI/TMS 216.1:2014, tendo perdido cerca de 17% da sua resistência à compressão. Em 400°C, a resistência residual se assemelha com a denotada no Eurocode 2 (2004), sendo de aproximadamente 73%. Nesse mesmo nível de temperatura, Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2023) apresentaram valores de resistência residual bem superiores aos demais.

Em 600°C, a resistência característica residual é similar à de 400°C, apresentando-se um pouco superior à resistência residual da referência citada anteriormente, sendo aproximadamente 72% da resistência inicial. A partir desse nível de temperatura, é possível notar uma diminuição drástica em todas as curvas apresentadas, em 800 °C, por exemplo, a resistência característica residual chega a 30,50% neste trabalho, 10% em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2023), e a cerca de 15% em Amaral *et al.* (2024) e no Eurocode 2 (2004). Vale ressaltar que a ACI/TMS 216.1:2014 só apresenta valores de resistência até 700°C, e que, em todas as temperaturas analisadas, a resistência residual é inferior às outras curvas.

Dada a ausência de experimentos à 100 °C neste programa experimental, não foi possível constatar o aumento de resistência à compressão nessa faixa de temperatura, observados em Amaral *et al.* (2024). Conforme mencionado pelos autores, no início do aquecimento do concreto, ou seja, até 100°C, ocorre a perda de água capilar do material, resultando em pequenas tensões, e um aumento na hidratação do cimento. Dessa forma, uma vez que os blocos de concreto são fabricados com uma mistura mais seca e apresentam, consequentemente, maior porosidade do que o concreto moldado úmido, as tensões iniciais são menores e os efeitos da hidratação do cimento são mais pronunciados, o que pode justificar o aumento da resistência residual à compressão.

Para temperaturas acima de 400 °C, observa-se uma queda significativa na resistência à compressão residual nas curvas mostradas na Figura 5.9. Isso ocorre pelos agregados silicosos apresentarem uma maior perda de resistência entre 500 e 700 °C. Nessa faixa de temperatura, especificamente 573 °C, o quartzo expande-se devido a uma transformação polimórfica, contribuindo assim para o aumento das tensões internas e da fissuração do material, o que reflete na perda de resistência à compressão e rigidez do corpo de prova.

De modo geral, é possível constatar que mediante à elevação da temperatura, os blocos de concreto sofrem uma deterioração tardia da resistência residual, se comparados ao concreto moldado úmido. Conforme apontado em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2023), esta constatação é atribuída à zona de transição na interface do concreto. Em Mehta e Monteiro

(2008), é mencionado que a presença de microfissuras é um fator crucial para a baixa resistência da zona de transição. Em se tratando dos blocos de concreto, a zona de transição é menos suscetível à fissuração quando sujeita à influência de tensões de tração provocadas por movimentos diferenciais entre o agregado e a pasta de cimento hidratada, uma vez que possuem agregados de menor granulometria, um baixo consumo de cimento e água, e um processo de fabricação industrial que garante melhor adensamento (MEDEIROS; PARSEKIAN; MORENO JUNIOR, 2023).

Na Figura 5.9b, é ilustrada, a partir de uma função exponencial explicitada na Equação 5.7, uma relação entre a resistência residual dos blocos de concreto (f_{bR}) e a temperatura (θ). Nota-se que a curva apresentada nesta figura é diferente da utilizada na comparação com os outros autores, uma vez que essa representa a resistência média à compressão.

$$f_{bR} = 1,062 - 0,071e^{0,003\theta} \quad (5.7)$$

No que diz respeito ao módulo de elasticidade estático dos blocos de concreto, os resultados deste programa experimental foram comparados com os apresentados nas referências citadas anteriormente. Na Tabela 5.7, são apresentados os valores em termos residuais, ilustrados na Figura 5.10a. Nota-se que a tendência de diminuição da rigidez denotada pelos autores é semelhante à observada neste programa experimental. Foi estabelecida uma relação exponencial ($R^2 = 0,893$) para o módulo de elasticidade estático residual dos blocos de concreto (E_{sbR}) em função da variação da temperatura (Equação 5.8), como ilustrado na Figura 5.10b.

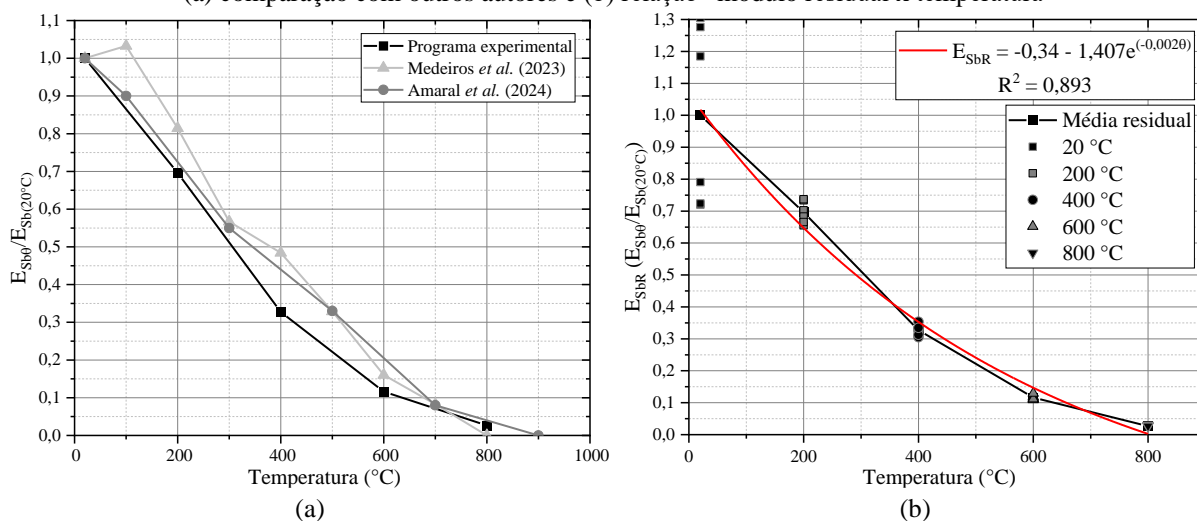
Tabela 5.7: Comparação entre o módulo de elasticidade longitudinal estático residual dos blocos de concreto

Temperatura	Residual		
	Programa experimental	Medeiros <i>et al.</i> (2023)	Amaral <i>et al.</i> (2024)
	E_{sb}	E_{sb}	E_{sb}
REF. (20 °C)	100,00%	100,00%	100,00%
100 °C	-	100,00%	90,00%
200 °C	69,62%	81,45%	-
300 °C	-	56,71%	55,00%
400 °C	32,72%	48,42%	-
500 °C	-	32,89%	33,00%
600 °C	11,61%	16,05%	-
700 °C	-	8,29%	8,00%
800 °C	2,65%	0,00%	-
900 °C	-	-	0,00%
1000 °C	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5.10: Curvas residuais do módulo de elasticidade longitudinal estático dos blocos de concreto:

(a) comparação com outros autores e (b) relação “módulo residual x temperatura”



Fonte: Elaborado pelo Autor

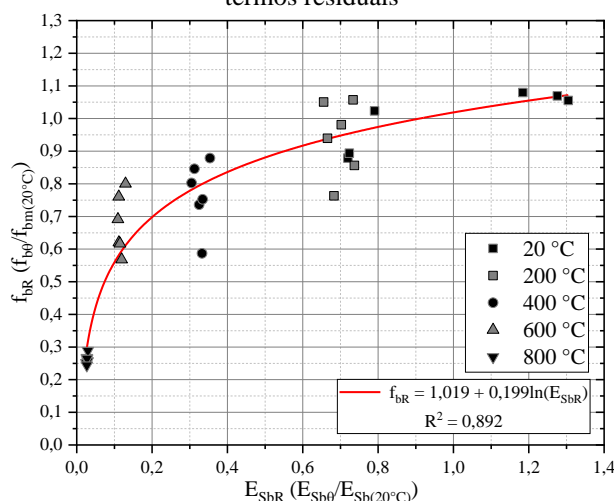
$$E_{SbR} = -0,34 + 1,407e^{-0,002\theta} \quad (5.8)$$

Em comparação com a resistência à compressão, o módulo de elasticidade se mostrou mais suscetível à temperatura, tendo perdido cerca de 70% do valor de referência à 400 $^\circ C$, chegando a 2,65% da resistência residual em 800 $^\circ C$. Diante dessa constatação, é ressaltada em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2023) e em Amaral *et al.* (2024) a preocupação para com a estabilidade das edificações em alvenaria estrutural pós-fogo, pois, embora a resistência dos blocos não tenha sofrido grandes danos até os 400 $^\circ C$ (76,70%), para esta temperatura o módulo de deformação já fora reduzido para mais da metade (32,72%).

Em Medeiros, Parsekian e Moreno Junior (2023), é mencionado que a redução acelerada no módulo de elasticidade dos blocos é explicada pela microestrutura da zona de transição na interface, que tem grande influência na rigidez do concreto. No material compósito, a zona de transição é uma ponte entre dois elementos: a matriz argamassa e as partículas de agregado graúdo. A rigidez do compósito é reduzida devido às microfissuras e vazios na zona de transição, que não permitem que a tensão seja transferida. Dessa forma, devido à microfissuração provocada pela exposição a altas temperaturas, o módulo de elasticidade do concreto decresce mais rapidamente do que a sua resistência à compressão.

Também foi estabelecida uma correlação entre a resistência à compressão (f_{bR}) e o módulo de elasticidade estático residual (E_{SbR}), por meio de uma função logarítmica descrita na Equação 5.9, como mostra a Figura 5.11.

Figura 5.11: Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos blocos de concreto em termos residuais



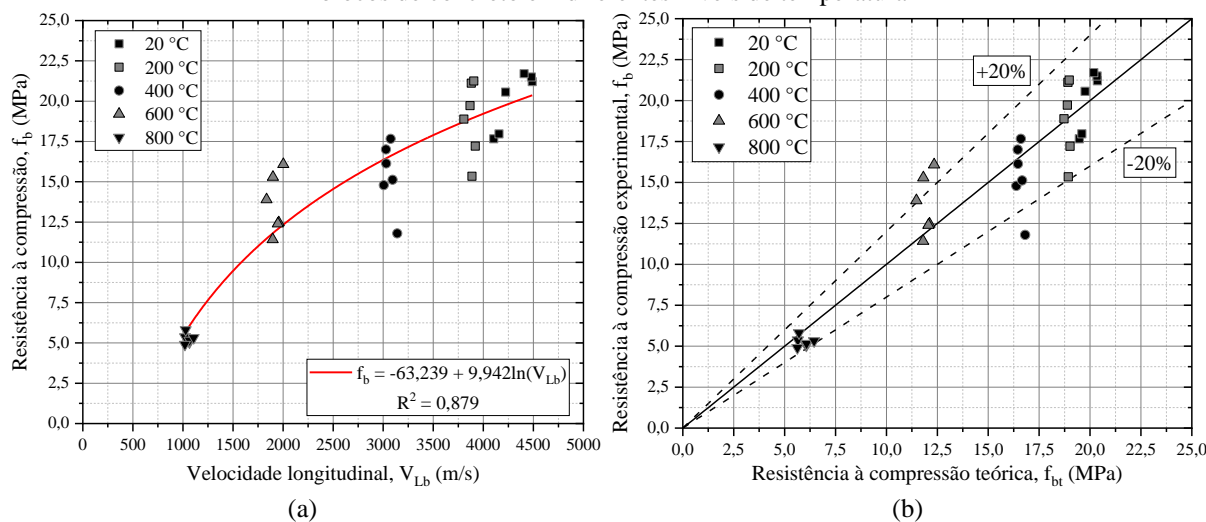
Fonte: Elaborado pelo Autor

$$f_{bR} = 1,019 + 0,199 \ln(E_{SbR}) \quad (5.9)$$

5.1.4 Relação entre as velocidades de pulso ultrassônico e propriedades mecânicas estáticas dos blocos de concreto

Com base nos resultados obtidos em relação às propriedades mecânicas estáticas, verificou-se uma relação promissora dessas propriedades com as velocidades de pulso ultrassônico logradas nos ensaios de ultrassom, bem como com as propriedades mecânicas dinâmicas. Na Figura 5.12a a velocidade longitudinal de pulso ultrassônico e a resistência à compressão dos blocos de concreto estão relacionadas por meio de uma equação logarítmica, que, por sua vez, teve um coeficiente de determinação igual a 0,879.

Figura 5.12: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e a resistência à compressão dos blocos de concreto em diferentes níveis de temperatura



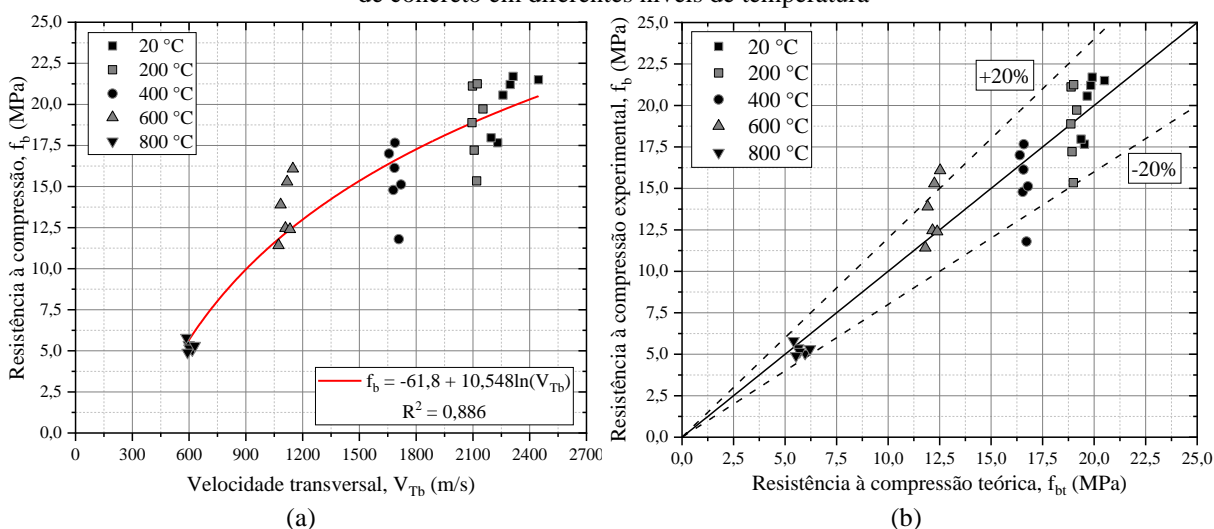
Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 5.12b é indicada uma correlação satisfatória entre os resultados de resistência teóricos estimados a partir da relação estabelecida, com aqueles obtidos experimentalmente por meio dos ensaios mecânicos destrutivos, com representação dos resultados segundo uma margem de erro de $\pm 20\%$.

Em se tratando da velocidade de pulso ultrassônico transversal, a relação encontrada com a resistência à compressão é ilustrada na Figura 5.13a, apresentando coeficiente de determinação igual a 0,886. Na Figura 5.13b, os resultados teóricos de resistência à compressão também são comparados com os obtidos experimentalmente, demonstrando que em uma margem de erro de $\pm 20\%$ os resultados estão coerentes.

Como se pode observar, as relações entre as velocidades longitudinal e transversal e a resistência à compressão dos blocos de concreto apresentaram coeficientes de determinação razoáveis e coerência nos resultados em uma margem de erro de $\pm 20\%$, demonstrando que a utilização dos ensaios não destrutivos pode ser eficiente na mensuração da resistência à compressão dos blocos de concreto em elevadas temperaturas.

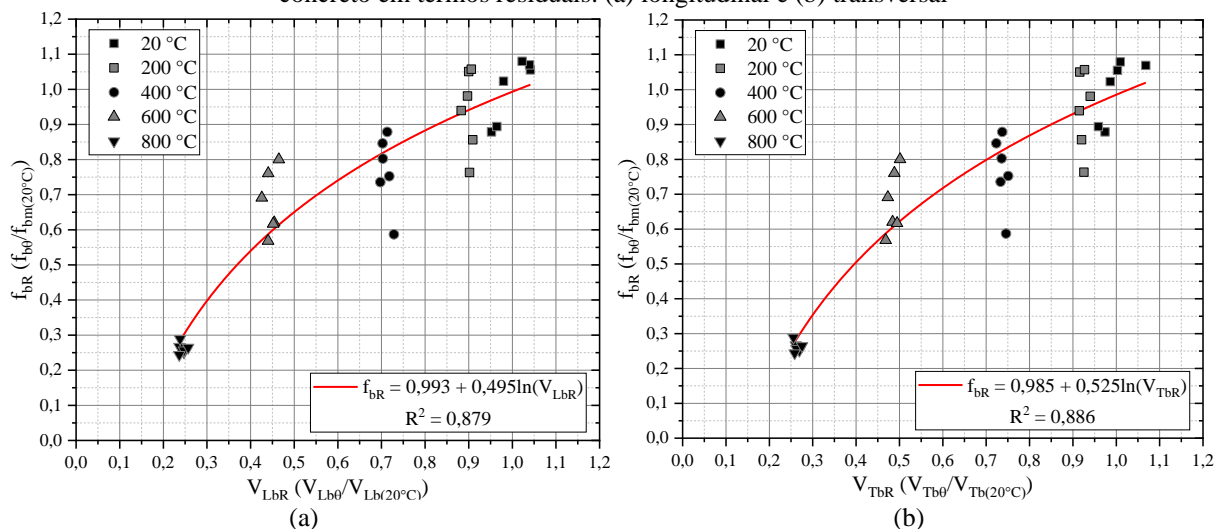
Figura 5.13: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico transversal e a resistência à compressão dos blocos de concreto em diferentes níveis de temperatura



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tendo em vista que o presente trabalho aborda experimentos em elevadas temperaturas, e que, neste contexto, usualmente as variáveis são tratadas de maneira residual, foram propostas relações envolvendo as velocidades ultrassônicas e a resistência à compressão (f_{bR}) em termos residuais, o que é explicitado nas Equações 5.10 e 5.11, e ilustrado graficamente na Figura 5.14. A relação proposta também foi necessária para termos de comparação com os resultados de outros autores.

Figura 5.14: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão dos blocos de concreto em termos residuais: (a) longitudinal e (b) transversal



Fonte: Elaborado pelo Autor

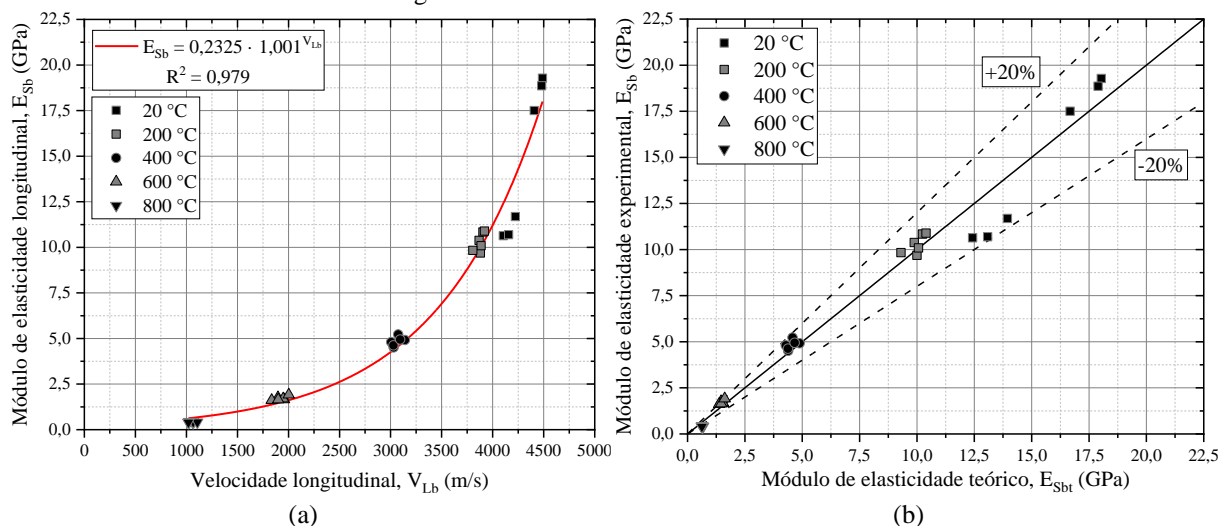
$$f_{bR} = 0,993 + 0,495 \ln(V_{LbR}) \quad (5.10)$$

$$f_{bR} = 0,985 + 0,525 \ln(V_{TbR}) \quad (5.11)$$

Na seção 5.1.3, foi discutido como o módulo de elasticidade estático do bloco de concreto se mostrou mais suscetível à elevação da temperatura em relação à sua resistência à compressão. Dessa forma, considerou-se relevante a possibilidade de estimar essa propriedade por meio das velocidades de pulso ultrassônico longitudinal e transversal.

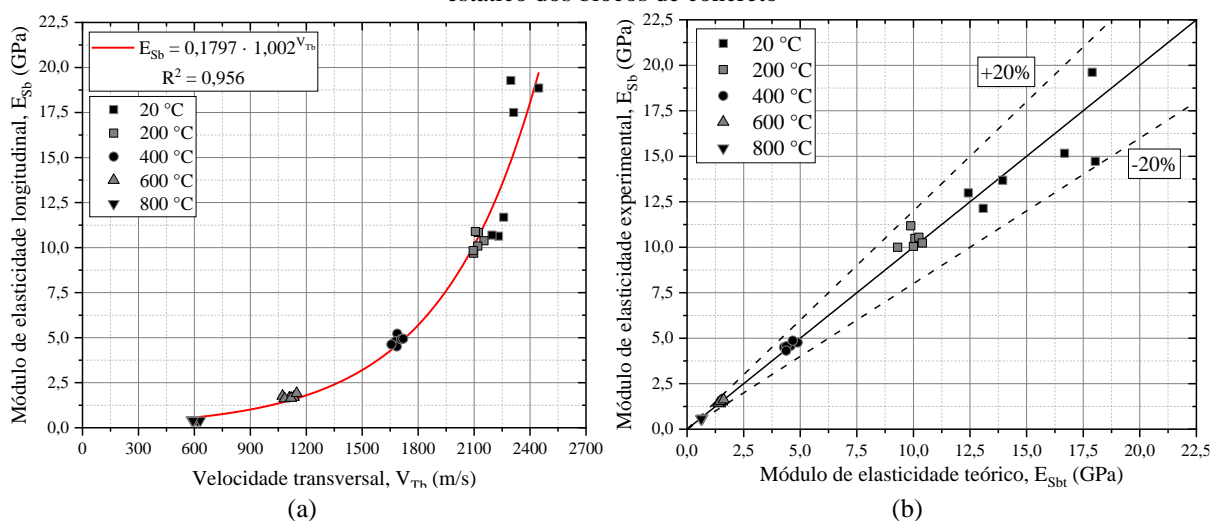
Nas Figuras 5.15 e 5.16 estão ilustradas, respectivamente, as relações entre as velocidades ultrassônicas longitudinal e transversal e o módulo de elasticidade estático longitudinal, por meio de funções exponenciais.

Figura 5.15: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e o módulo de elasticidade longitudinal estático dos blocos de concreto



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5.16: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico transversal e o módulo de elasticidade longitudinal estático dos blocos de concreto



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em ambas as relações apresentadas, os resultados dos módulos de elasticidade longitudinal estático teóricos, obtidos por meio das equações propostas, são comparados com os obtidos experimentalmente, de acordo com a margem de erro de $\pm 20\%$.

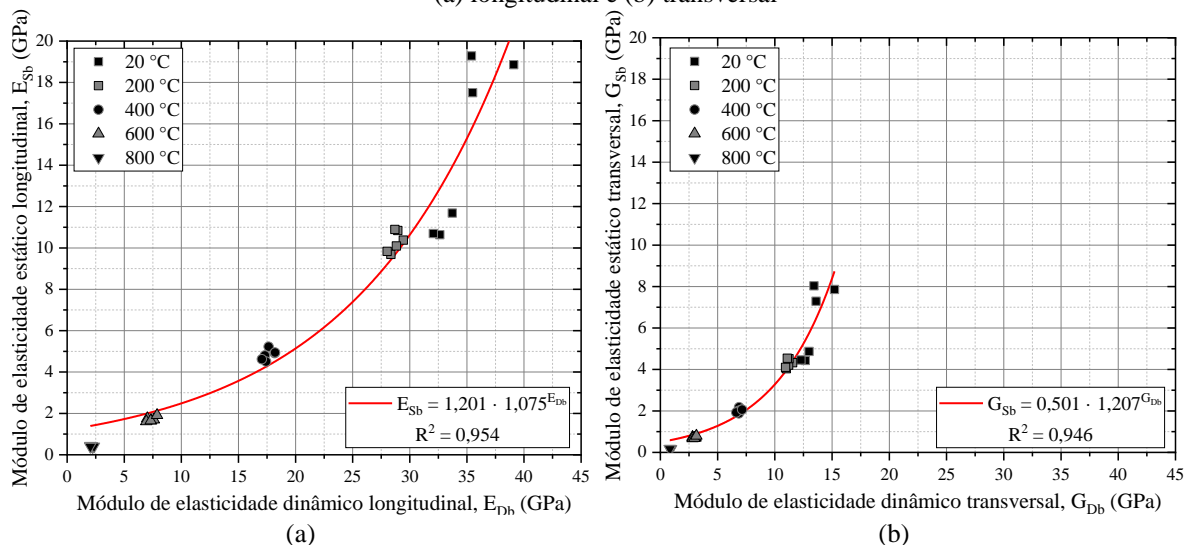
Em suma, as duas relações propostas apresentaram coeficientes de determinação iguais a 0,979 e 0,956, respectivamente, além de valores coerentes com a margem de erro adotada. Sendo assim, demonstram-se como funções eficientes na estimativa do módulo de elasticidade estático a partir dos parâmetros obtidos por meio da realização dos ensaios de ultrassom, ou seja, as velocidades ultrassônicas.

Por fim, conforme ilustrado na Figura 5.17, foram estabelecidas relações entre os módulos de elasticidade longitudinais e transversais, dinâmicos e estáticos, sendo essas curvas representadas por funções exponenciais, o que proporcionou a obtenção de um coeficiente de determinação igual a 0,954 e 0,946, respectivamente. Destaca-se que o módulo de elasticidade transversal estático foi calculado utilizando a expressão derivada da teoria da elasticidade ($G_s = E_s/2(1+\nu)$), onde o coeficiente de Poisson (ν) foi fixado em 0,20, conforme especificado pela ABNT NBR 16868-1:2020 para blocos de concreto.

Percebe-se, ao comparar os módulos de elasticidade dinâmico e estático, que o módulo dinâmico sempre se sobrepõe ao estático. Isso pode ser atribuído à menor mobilização de deformações que ocorre nos ensaios dinâmicos, estando o material com nível de danificação praticamente nulo. Em geral, em temperatura ambiente, o módulo estático dos blocos de concreto equivaleu em média a 42% do dinâmico. A 200 °C, essa proporção diminuiu para 35%; a 400 °C, para 27%; a 600 °C, para 23%; e a 800 °C, para 19%.

Figura 5.17: Relação entre propriedades mecânicas dinâmicas e estáticas dos blocos de concreto:

(a) longitudinal e (b) transversal



Fonte: Elaborado pelo Autor

Avaliando as relações apresentadas nesta seção, nota-se a viabilidade do uso de relações empíricas que possibilitam a utilização do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico, para a previsão de propriedades mecânicas dos blocos, tais como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade longitudinal estático, seja em temperatura ambiente ou pós-aquecimento. Na Tabela 5.8 estão resumidas todas as relações obtidas neste tópico 5.1.

Tabela 5.8: Relações obtidas para os blocos de concreto

Relação	Função	R^2
$V_{Tb} \times V_{Lb}$	$V_{Tb} = 0,5441V_{Lb}$	0,997
$V_{LbR} \times \theta$	$V_{LbR} = 1,06616 - 0,00101\theta$	0,979
$V_{TbR} \times \theta$	$V_{TbR} = 1,07723 - 0,000978\theta$	0,972
$G_{Db} \times E_{Db}$	$G_{Db} = 0,3877E_{Db}$	0,999
$E_{DbR} \times \theta$	$E_{DbR} = 1,04 - 0,00127\theta$	0,979
$G_{DbR} \times \theta$	$G_{DbR} = 1,04 - 0,00127\theta$	0,978
$f_{bR} \times \theta$	$f_{bR} = 1,062 - 0,071e^{0,003\theta}$	0,965
$E_{SbR} \times \theta$	$E_{SbR} = -0,34 + 1,407e^{-0,002\theta}$	0,893
$f_{bR} \times E_{SbR}$	$f_{bR} = 1,019 + 0,199 \ln(E_{SbR})$	0,892
$f_b \times V_{Lb}$	$f_b = -63,239 + 9,942 \ln(V_{Lb})$	0,879
$f_b \times V_{Tb}$	$f_b = -61,8 + 10,548 \ln(V_{Tb})$	0,886
$f_{bR} \times V_{LbR}$	$f_{bR} = 0,993 + 0,495 \ln(V_{LbR})$	0,879
$f_{bR} \times V_{TbR}$	$f_{bR} = 0,985 + 0,525 \ln(V_{TbR})$	0,886
$E_{Sb} \times V_{Lb}$	$E_{Sb} = 0,2325 \cdot 1,001^{V_{Lb}}$	0,979
$E_{Sb} \times V_{Tb}$	$E_{Sb} = 0,1797 \cdot 1,002^{V_{Tb}}$	0,956
$E_{Sb} \times E_{Db}$	$E_{Sb} = 1,201 \cdot 1,075^{E_{Db}}$	0,954
$G_{Sb} \times G_{Db}$	$G_{Sb} = 0,501 \cdot 1,207^{G_{Db}}$	0,946

Fonte: Elaborado pelo Autor

ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

Nesta seção, são analisados os resultados obtidos no *Programa Experimental II*, os quais dizem respeito aos ensaios realizados nos corpos de prova de argamassa de assentamento.

5.1.5 Velocidade de pulso ultrassônico das argamassas

Na Tabela 4.8 da seção 4.7.1 são apresentadas as médias das velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais para cada nível de temperatura avaliado. Esses resultados foram comparados com os publicados em Moura *et al.* (2024), onde fora realizado um programa experimental em contexto térmico em argamassas de assentamento convencionais e industrializadas.

Para fins de comparação, foram selecionados dois traços das argamassas convencionais (com cal) presentes no trabalho. Um deles, denominado “ML”, apresenta resistência média à compressão em temperatura ambiente de 9,32 MPa. O outro, denominado “HL”, possui resistência média de 17,08 MPa.

Na Tabela 5.9, as médias das velocidades ultrassônicas das argamassas são comparadas. Ressalta-se que, no trabalho mencionado, a taxa de aquecimento foi de 4 °C/min, e o tempo de permanência na temperatura alvo de 60 minutos.

Tabela 5.9: Comparação entre velocidades ultrassônicas nas argamassas de assentamento

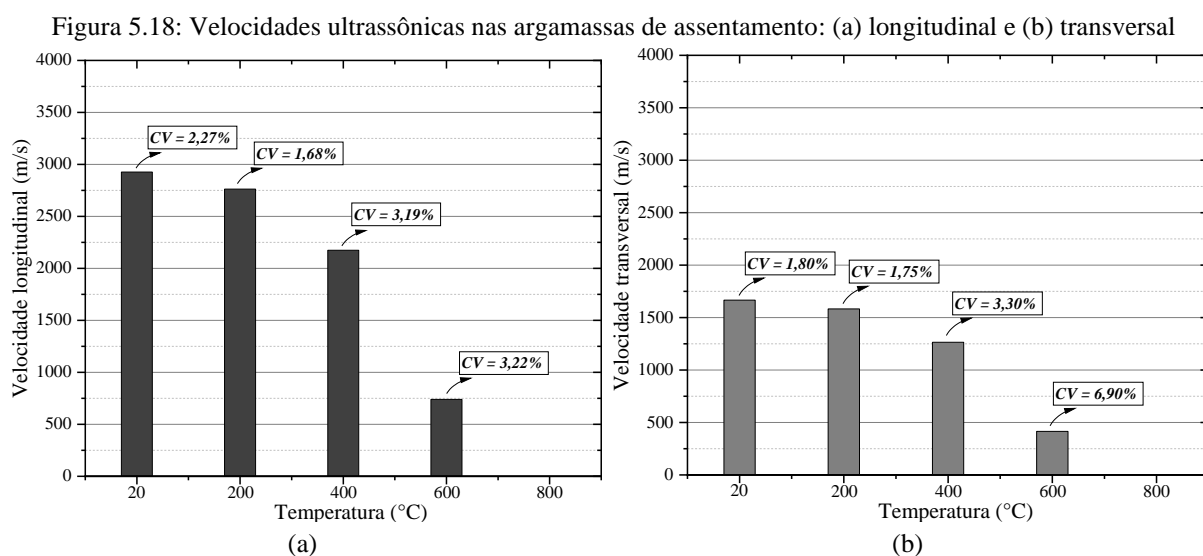
Temperatura	Programa experimental		Moura <i>et al.</i> (2024) - ML		Moura <i>et al.</i> (2024) - HL	
	V _{La}	V _{Ta}	V _{La}	V _{Ta}	V _{La}	V _{Ta}
	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
20 °C	2926,85	1666,18	3028,00	-	3437,00	-
200 °C	2762,47	1582,71	2444,00	-	3002,00	-
400 °C	2173,95	1264,74	1763,00	-	2264,00	-
600 °C	739,67	414,74	705,00	-	910,00	-
800 °C	0,00	0,00	424,00	-	644,00	-

Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se uma superioridade das velocidades longitudinais deste programa experimental em comparação ao traço “ML” analisado em Moura *et al.* (2024), com exceção do valor registrado em temperatura ambiente. Em contrapartida, o traço “HL” mostrou-se superior em todos os níveis de temperatura em relação às velocidades longitudinais. Os autores

realizaram ensaios nos corpos de prova submetidos a 800 °C, diferentemente deste programa experimental, no qual não foi possível realizá-los devido à degradação da argamassa.

Os dados apresentados na Tabela 4.8 da seção 4.7.1 são retomados na Figura 5.18, ilustrando a variação das velocidades ultrassônicas nas argamassas de assentamento conforme a elevação da temperatura, estando em destaque os coeficientes de variação para cada faixa de temperatura.

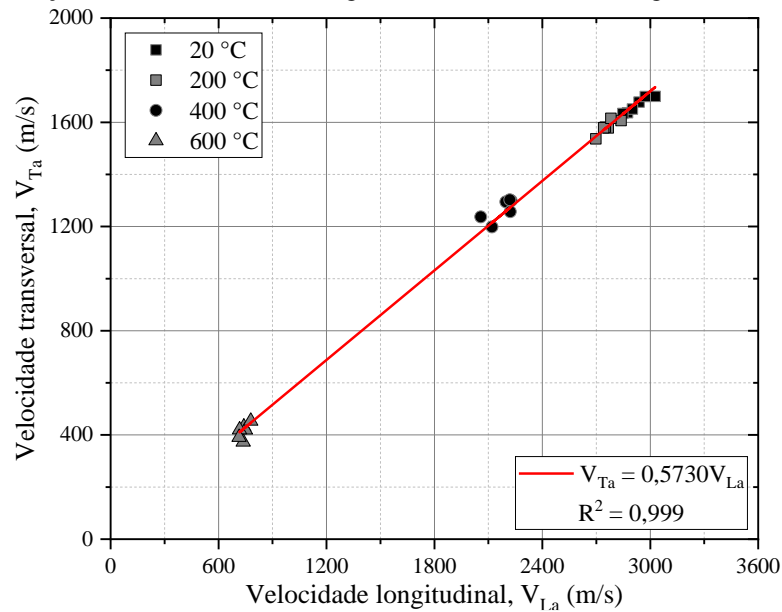


Fonte: Elaborado pelo Autor

O declínio das velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais em função do aumento da temperatura é evidente, refletindo a deterioração progressiva do material e o aumento da presença de fissuras. Além disso, destaca-se a baixa dispersão dos resultados obtidos, variando de 1,80% a 3,30%, exceto pelo coeficiente de variação da velocidade transversal a 600 °C, que alcançou 6,90%. Como mencionado anteriormente, a 800 °C, os ensaios de ultrassom não puderam ser realizados devido à degradação dos corpos de prova, que impediu a passagem da onda ultrassônica, sendo essa dissipada totalmente antes de alcançar o outro transdutor.

Foi estabelecida uma relação linear entre as velocidades longitudinais e transversais nas argamassas de assentamento, conforme demonstrado na Figura 5.19. A relação abrangeu as medições realizadas em todos os níveis de temperatura. De maneira geral, de acordo com a equação proposta, verifica-se que a velocidade ultrassônica transversal representa 57,31% da velocidade longitudinal. O coeficiente de determinação obtido é de 0,999, indicando uma correlação interessante entre as variáveis.

Figura 5.19: Relação entre as velocidades longitudinal e transversal nas argamassas de assentamento



Fonte: Elaborado pelo Autor

As velocidades ultrassônicas residuais obtidas neste programa experimental foram comparadas com aquelas obtidas em Moura *et al.* (2024), como demonstrado na Tabela 5.10. As curvas residuais correspondentes estão exibidas na Figura 5.20.

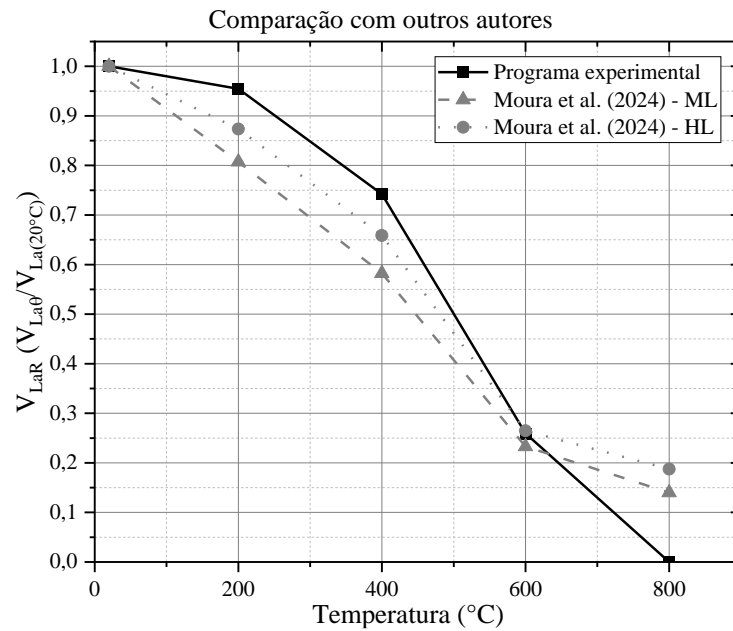
Observa-se que, em termos de velocidade longitudinal residual, os resultados obtidos neste programa experimental mantiveram-se superiores aos dos dois traços de argamassas dispostos em Moura *et al.* (2024). Nota-se também que o nível de temperatura em que as argamassas distintas apresentaram maior semelhança foi de 600 °C, com variação entre 23,28% a 26,48%. Outro ponto a se destacar é que a maior queda na velocidade residual em todas as argamassas ocorreu entre as temperaturas de 400 e 600 °C. Isso pode ser atribuído à presença da cal na mistura das argamassas, uma vez que nessa faixa de temperatura ocorre o processo de desidratação do hidróxido de cálcio, resultando em fissuração e maior degradação do material, o que dificulta a propagação das ondas.

Tabela 5.10: Comparação entre velocidades residuais longitudinal e transversal nas argamassas de assentamento

Temperatura	Residual			
	Programa experimental		Moura <i>et al.</i> (2024) - ML	Moura <i>et al.</i> (2024) - HL
	V _{LaR}	V _{TaR}	V _{LaR}	V _{LaR}
REF. (20 °C)	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
200 °C	95,46%	96,11%	80,71%	87,34%
400 °C	74,21%	75,05%	58,22%	65,87%
600 °C	25,95%	26,06%	23,28%	26,48%
800 °C	0,00%	0,00%	14,00%	18,74%

Fonte: Elaborado pelo Autor

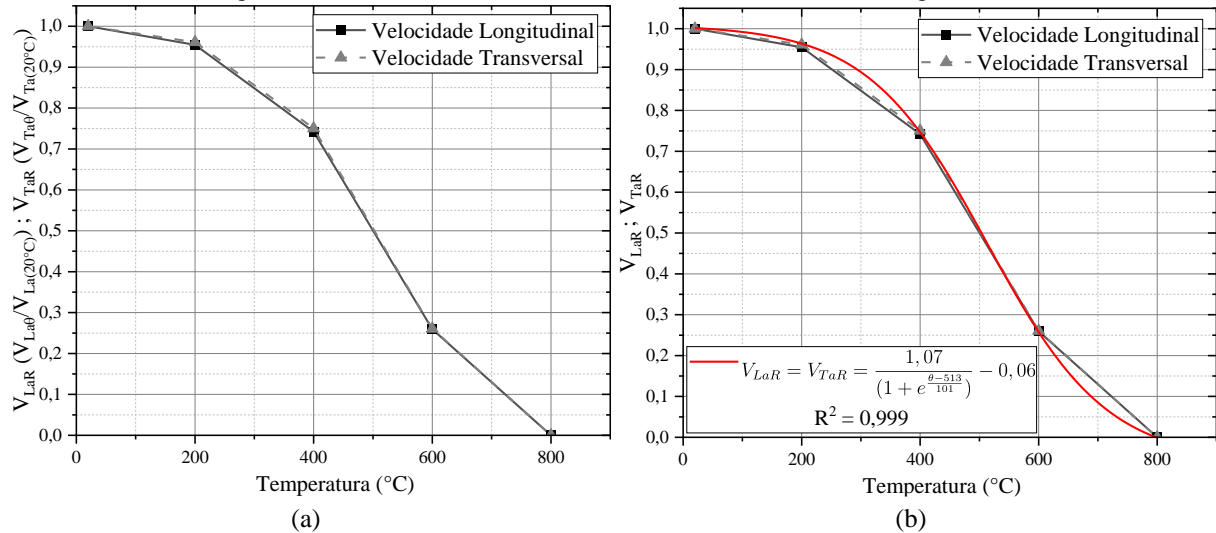
Figura 5.20: Curvas residuais da velocidade ultrassônica longitudinal nas argamassas de assentamento:



Fonte: Elaborado pelo Autor

Devido a semelhança entre as curvas residuais das velocidades de pulso ultrassônico longitudinal (V_{LaR}) e transversal (V_{TaR}), evidenciada na Figura 5.21a e na relação linear demonstrada na Figura 5.19, adotou-se uma única equação (função sigmoide) que relaciona, em termos residuais, a variação dessas velocidades em função da elevação de temperatura (θ), conforme ilustrado na Figura 5.21b, e expressado na Equação 5.12.

Figura 5.21: Curvas residuais das velocidades ultrassônicas nas argamassas



Fonte: Elaborado pelo Autor

$$V_{LaR} = V_{TaR} = \frac{1,07}{\left(1 + e^{\frac{(\theta-513)}{101}}\right)} - 0,06 \quad (5.12)$$

Dessa forma, torna-se viável estimar a VPU com base na temperatura à qual o corpo de prova foi exposto, possibilitando inferir outras informações importantes, como a resistência à compressão das argamassas de assentamento.

5.1.6 Propriedades mecânicas dinâmicas das argamassas

Conforme mencionado no tópico 4.7.1 do capítulo 4, foram determinadas as propriedades mecânicas dinâmicas das argamassas, considerando o material (argamassa) como homogêneo, contínuo e isotrópico. Inicialmente, foram calculados os coeficientes de Poisson dinâmicos (ν_D), conforme a Equação 5.3. Em seguida, foram determinados os módulos de elasticidade longitudinal e transversal das argamassas de assentamento.

Adotou-se um coeficiente de Poisson dinâmico médio da argamassa (ν_{Da}) por nível de temperatura, conforme indicado na Tabela 5.11. Em geral, esses valores se mantiveram consistentes nas diferentes temperaturas avaliadas, variando de 0,24 a 0,27. Esses resultados são coerentes, considerando que se trata de uma propriedade dinâmica, com uma tendência a ser ligeiramente superior aos valores de coeficiente de Poisson estático. Por exemplo, em Anson e Newman (1966) foram relatados coeficientes de Poisson variando entre 0,17 e 0,23 para argamassas com resistência à compressão entre 9,1 e 14 MPa, enquanto em Lübeck (2016), foi observado um coeficiente médio igual a 0,22 em argamassas com resistência à compressão de 13,5 MPa. Em relação à propriedade dinâmica, em Fernandes Neto (2023) foi obtido um coeficiente Poisson dinâmico médio de 0,26 em temperatura ambiente considerando todas os três traços de argamassas avaliados pelo autor, que possuíam resistências de 9,72 a 13,11 MPa.

Tabela 5.11: Média das propriedades dinâmicas das argamassas de assentamento em elevadas temperaturas

Temperatura		ν_{Da}	E_{Da} (GPa)	G_{Da} (GPa)
20 °C	Média	0,26	16,69	6,62
	CV (%)	2,02	3,82	3,60
200 °C	Média	0,26	14,67	5,84
	CV (%)	2,62	3,33	3,48
400 °C	Média	0,24	9,35	3,76
	CV (%)	7,71	6,17	6,53
600 °C	Média	0,27	1,05	0,41
	CV (%)	12,84	11,53	13,66

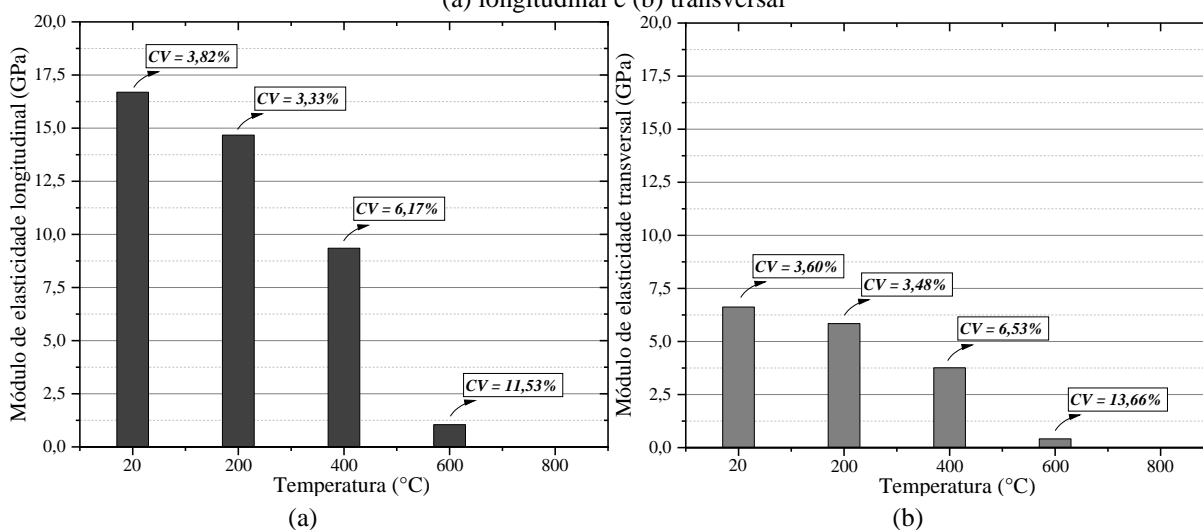
Fonte: Elaborado pelo Autor

Após a determinação dos coeficientes de Poisson dinâmico, os módulos de elasticidade longitudinais e transversais das argamassas de assentamento foram estabelecidos, estando apresentado também na Tabela 5.11 as médias em cada temperatura. Nota-se que, em todas as propriedades analisadas, à medida que a temperatura de análise aumenta, os coeficientes de variação também aumentam, chegando à ordem de 13% aos 600°C. Isso indica a maior dificuldade e variabilidade encontrada na realização dos ensaios nos corpos de prova submetidos a elevadas temperaturas, uma vez que nessas condições, o corpo de prova se torna mais fragilizado devido à presença de fissuras.

Em relação aos resultados obtidos em temperatura ambiente, a média do módulo de elasticidade longitudinal (E_{Db}) foi igual a 16,69 GPa, enquanto a do módulo de elasticidade dinâmico transversal (G_{Db}) foi de 6,62 GPa. Ao comparar esses valores com os publicados em Fernandes Neto (2023), observa-se que as médias das propriedades mecânicas dinâmicas obtidas neste programa experimental foram inferiores às do autor, que obteve para um traço de argamassa correspondente, valores de 18,41 GPa para o E_{Db} e 7,35 GPa para o G_{Db} .

Na Figura 5.22 os resultados estão representados graficamente, permitindo a visualização da variação das propriedades mencionadas em resposta ao aumento da temperatura. Destacando-se, especialmente, os coeficientes de variação em cada faixa de temperatura. Da mesma forma que o observado nas velocidades ultrassônicas, percebe-se uma diminuição nas propriedades mecânicas dinâmicas devido à elevação da temperatura.

Figura 5.22: Módulos de elasticidade dinâmico das argamassas de assentamento: (a) longitudinal e (b) transversal

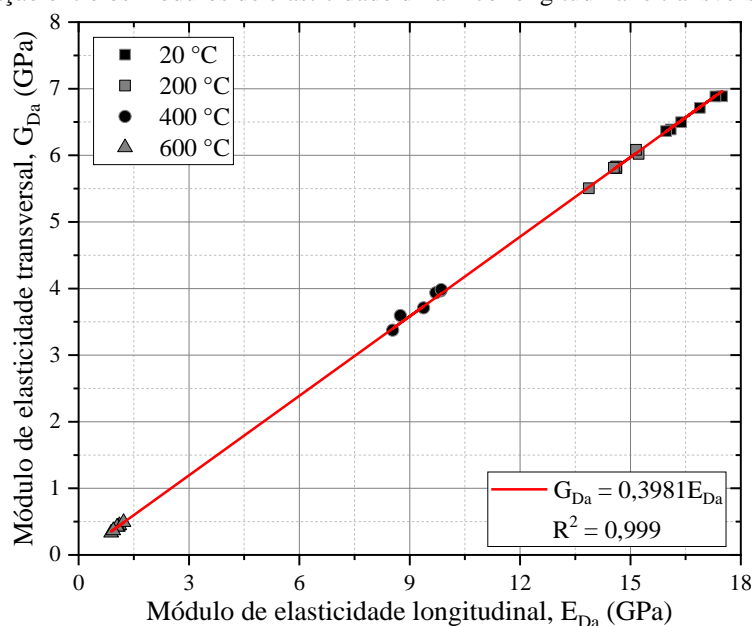


Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 5.23, é apresentada a relação entre os módulos de elasticidade dinâmicos longitudinal e transversal das argamassas, sendo possível identificar com clareza as hipóteses

de isotropia e homogeneidade adotadas, havendo claramente uma relação linear entre os dois módulos dinâmicos. Com base na relação observada para as argamassas analisadas, o módulo de elasticidade dinâmico transversal corresponde a 39,81% do equivalente longitudinal. Além disso, é possível estimar, com base nessa relação, um coeficiente de Poisson dinâmico global para as argamassas de assentamento (ν_{Da}), englobando as diferentes temperaturas avaliadas do espécime, conforme indicado na Equação 5.13.

Figura 5.23: Relação entre os módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal das argamassas



Fonte: Elaborado pelo Autor

$$E_{Da} = 2G_{Da}(1 + \nu_{Da}) \rightarrow E_{Da} = 2 \cdot 0,3981E_{Da}(1 + \nu_{Da}) \rightarrow \nu_{Da} = 0,256 \quad (5.13)$$

Adicionalmente, foi estabelecida uma relação para os módulos de elasticidade longitudinal e transversal em termos residuais, considerando a variação de temperatura. Na Tabela 5.12, encontram-se as propriedades dinâmicas residuais, as quais são representadas graficamente na Figura 5.24.

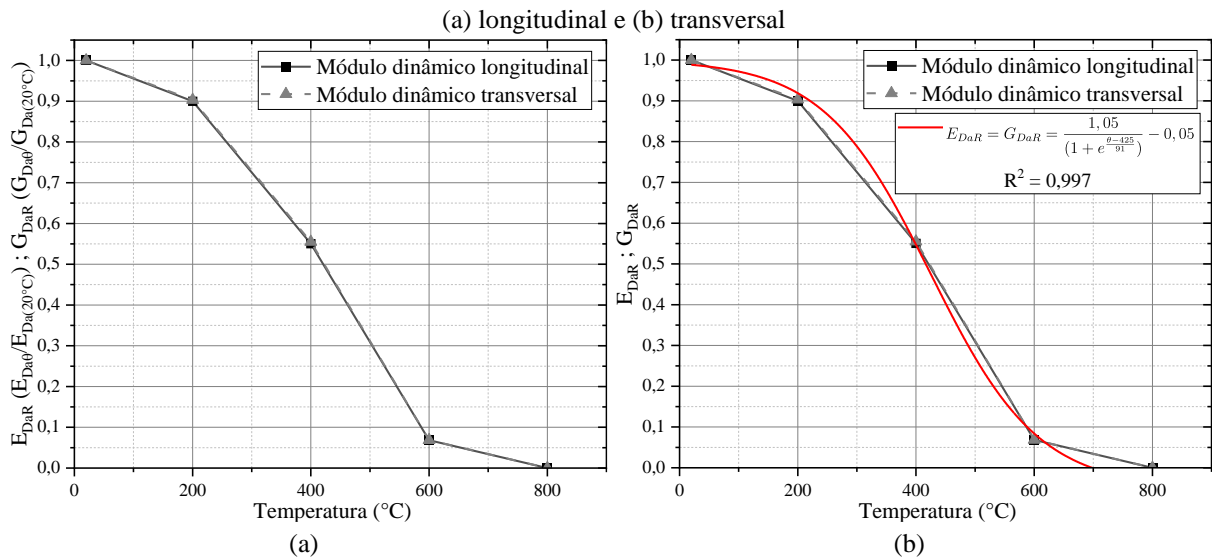
Tabela 5.12: Propriedades dinâmicas residuais das argamassas de assentamento

Temperatura	Residual	
	E_{Da}	G_{Da}
REF. (20 °C)	100%	100%
200 °C	89,99%	90,33%
400 °C	55,07%	55,49%
600 °C	6,82%	6,86%
800 °C	0,00%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se uma tendência de maior redução nos módulos de elasticidade dinâmicos em comparação com as velocidades ultrassônicas. Além disso, é perceptível que ambas as propriedades dinâmicas reduzem de maneira bastante semelhante com o aumento da temperatura, devido a isso foi estabelecida apenas uma relação para o regimento da variação das duas propriedades dinâmicas residuais frente à elevação da temperatura, conforme demonstrado na Figura 5.24b e explicitado na Equação 5.14.

Figura 5.24: Curvas residuais dos módulos de elasticidade dinâmico das argamassas de assentamento:



Fonte: Elaborado pelo Autor

$$E_{DaR} = G_{DaR} = \frac{1,05}{\left(1 + e^{\frac{(\theta-425)}{91}}\right)} - 0,05 \quad (5.14)$$

Em relação à Equação 5.14, valem:

E_{DaR} – Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico residual das argamassas;

G_{DaR} – Módulo de elasticidade transversal dinâmico residual das argamassas.

Dessa forma, é possível estimar os módulos de elasticidade dinâmico longitudinal (E_{Da}) e transversal (G_{Da}) de acordo com a temperatura à qual o corpo de prova foi submetido. Alternativamente, é possível proceder de maneira inversa, determinando a temperatura por meio da medida residual dos módulos dinâmicos.

5.1.7 Propriedades mecânicas estáticas das argamassas

Os resultados de resistência à compressão residual obtidos neste programa experimental foram comparados com os publicados em Amaral *et al.* (2024) e em Moura *et al.* (2024), conforme demonstrado na Tabela 5.13. Esses resultados referem-se a ensaios térmicos realizados em corpos de prova cilíndricos de argamassa com presença de cal em sua composição.

Tabela 5.13: Comparação entre resistências à compressão residuais das argamassas de assentamento

Temperatura	Residual			
	Programa experimental	Amaral <i>et al.</i> (2024)	Moura <i>et al.</i> (2024) - ML	Moura <i>et al.</i> (2024) - HL
	$f_{a\theta}/f_a(20^\circ\text{C})$	$f_{a\theta}/f_a(20^\circ\text{C})$	$f_{a\theta}/f_a(20^\circ\text{C})$	$f_{a\theta}/f_a(20^\circ\text{C})$
REF. (20 °C)	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
100 °C	-	98,00%	-	-
200 °C	87,63%	97,00%	109,44%	99,53%
300 °C	-	79,00%	-	-
400 °C	64,94%	72,00%	70,17%	69,32%
500 °C	-	38,00%	-	-
600 °C	13,54%	-	33,26%	41,63%
700 °C	-	0,00%	-	-
800 °C	1,07%	-	14,06%	17,68%
900 °C	-	-	-	-
1000 °C	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo Autor

As curvas residuais são apresentadas na Figura 5.25a, revelando notáveis similaridades no comportamento entre as argamassas avaliadas, especialmente entre aquela do presente estudo e a investigada em Amaral *et al.* (2024). Ambas foram submetidas às mesmas condições de elevação de temperatura (1 °C/min), e mantidas na temperatura alvo por 60 minutos. Em contrapartida, em Moura *et al.* (2024), onde houve processo de aquecimento mais rápido dos corpos de prova (taxa de 4 °C/min), foram reportados valores residuais mais elevados. Em um dos traços de argamassa analisados em Moura *et al.* (2024), inclusive, notou-se um incremento na capacidade de resistência a 200 °C (ML), fenômeno não observado nos outros casos.

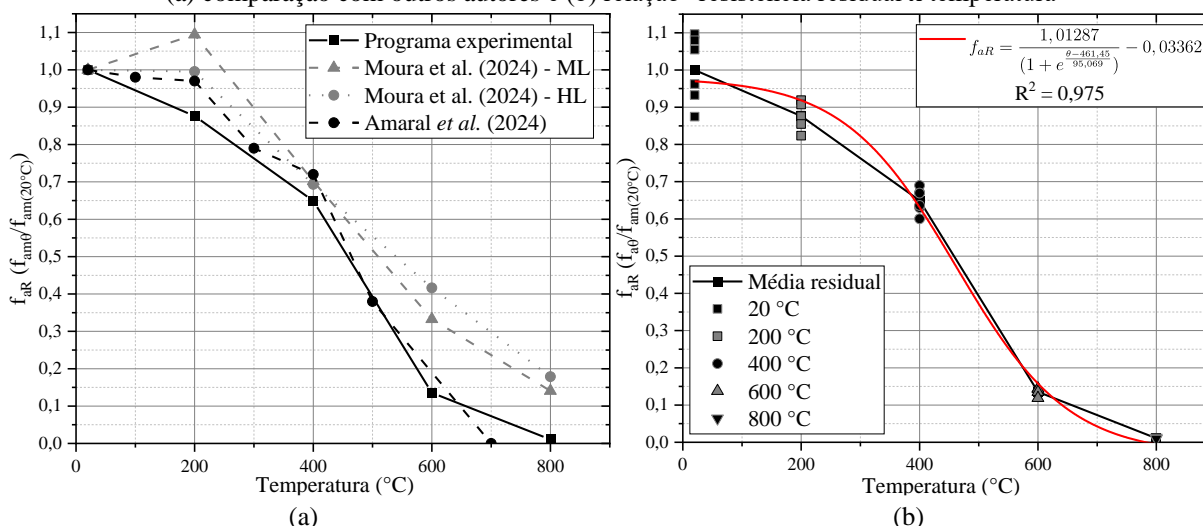
Em todos os estudos analisados, é claramente observada uma redução acentuada na resistência a partir dos 400 °C. Esse declínio abrupto é ocasionado pelo enfraquecimento induzido pela presença da cal na mistura da argamassa, tendo em vista que entre 400 e 600 °C, ocorre o processo de desidratação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que se converte em óxido

de cálcio (CaO). Esse último composto químico sofre expansão durante o resfriamento, resultando em fissuras na argamassa e, conseqüentemente, reduzindo sua capacidade resistente.

Outro aspecto relevante a destacar é que, a partir dos 600 °C, as resistências residuais apresentadas tanto neste programa experimental quanto em Amaral *et al.* (2024) são mínimas. No presente trabalho, a resistência residual medida foi de apenas 1,07% em 800 °C. Em relação a Amaral *et al.* (2024), observou-se que em 700 °C não foi possível obter resistência à compressão da argamassa. Em contrapartida, em Moura *et al.* (2024), foram registrados valores maiores nessa faixa de temperatura, com resistências residuais de 14,06% e 17,68% aos 800°C.

Figura 5.25: Curvas residuais da resistência à compressão das argamassas de assentamento:

(a) comparação com outros autores e (b) relação “resistência residual x temperatura”



Fonte: Elaborado pelo Autor

Foi estabelecida uma relação entre a resistência residual das argamassas de assentamento (f_{RR}) e a temperatura (θ), utilizando uma função sigmoide com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,975, conforme demonstrado na Figura 5.25b e expresso na Equação 5.15. Dessa forma, torna-se possível estimar a resistência residual à compressão da argamassa de assentamento com base na temperatura à qual o espécime foi exposto.

$$f_{RR} = \frac{1,01287}{\left(1 + e^{\frac{(\theta - 461,45)}{95,069}}\right)} - 0,03362 \quad (5.15)$$

Quanto ao módulo de elasticidade estático, os resultados deste programa experimental foram comparados com os apresentados em Amaral *et al.* (2024). Os valores em termos residuais são apresentados na Tabela 5.14 e ilustrados na Figura 5.26a.

Tabela 5.14: Comparação entre o módulo de elasticidade longitudinal estático residual das argamassas de assentamento

Temperatura	Residual	
	Programa experimental	Amaral <i>et al.</i> (2024)
	E_{Sa}	E_{Sa}
REF. (20 °C)	100,00%	100,00%
100 °C	-	106,00%
200 °C	85,00%	75,00%
300 °C	-	56,00%
400 °C	42,15%	32,00%
500 °C	-	6,00%
600 °C	0,87%	-
700 °C	-	0,00%
800 °C	0,10%	-
900 °C	-	-
1000 °C	-	-

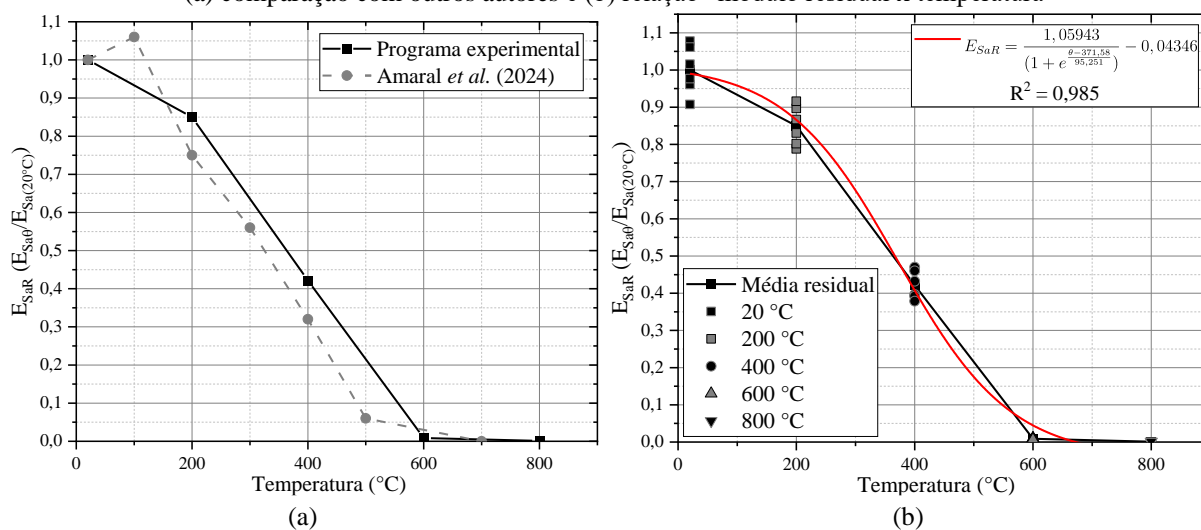
Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se que a tendência de diminuição da rigidez denotada pelos autores é semelhante à deste programa experimental. Destaca-se que em Amaral *et al.* (2024) foi observado um aumento da rigidez da argamassa em 100 °C, temperatura não avaliada neste programa experimental. A partir dos resultados apresentados, nota-se uma diminuição acentuada no módulo de deformação residual relacionada ao aumento da temperatura, indicando uma sensibilidade maior à elevação térmica em comparação com a resistência à compressão, o que também foi observado nos blocos de concreto. No contexto deste programa experimental, verifica-se que a 400 °C há uma redução de cerca de 60% em relação ao valor de referência, ao passo que em Amaral *et al.* (2024) essa redução é de aproximadamente 70%. A 700 °C, esses autores não obtiveram valores de resistência residual, enquanto neste trabalho, em 800 °C, foi identificado uma resistência residual de 0,10%, um valor considerado insignificante.

Foi estabelecida uma relação com uma função sigmoide, cujo coeficiente de determinação é igual a 0,985, para o módulo de elasticidade estático residual das argamassas (E_{SaR}) em função da temperatura, conforme descrito na Equação 5.16 e demonstrado na Figura 5.26b. Sendo assim, é possível estimar o módulo de elasticidade estático da argamassa de assentamento por meio da temperatura registrada.

$$E_{SaR} = \frac{1,05943}{\left(1 + e^{\frac{(\theta - 371,58)}{95,251}}\right)} - 0,04346 \quad (5.16)$$

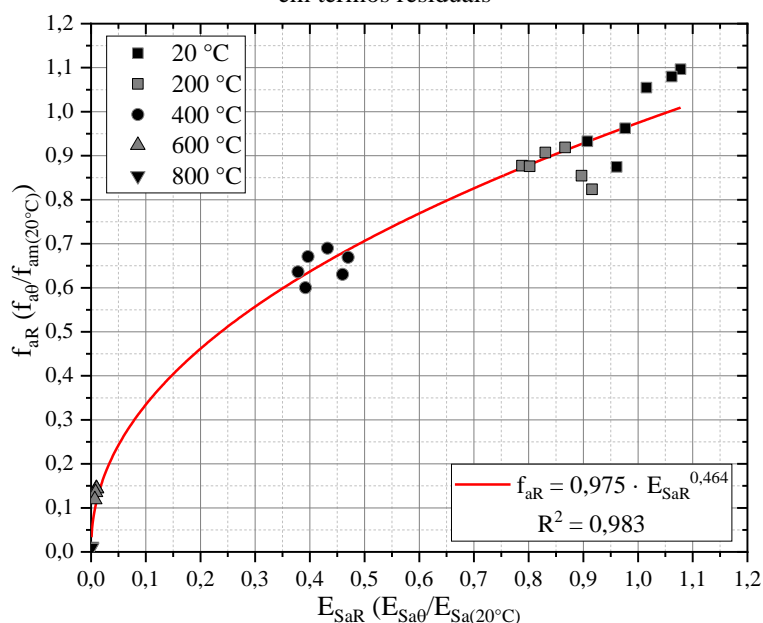
Figura 5.26: Curvas residuais do módulo de elasticidade longitudinal estático das argamassas de assentamento: (a) comparação com outros autores e (b) relação “módulo residual x temperatura”



Fonte: Elaborado pelo Autor

Foi determinada, ainda, uma correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático residual das argamassas de assentamento, por meio de uma função potência, descrita na Equação 5.17 e demonstrada na Figura 5.27. O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi igual a 0,983, indicando uma relação satisfatória entre as propriedades.

Figura 5.27: Relação entre a resistência à compressão e módulo de elasticidade das argamassas de assentamento em termos residuais



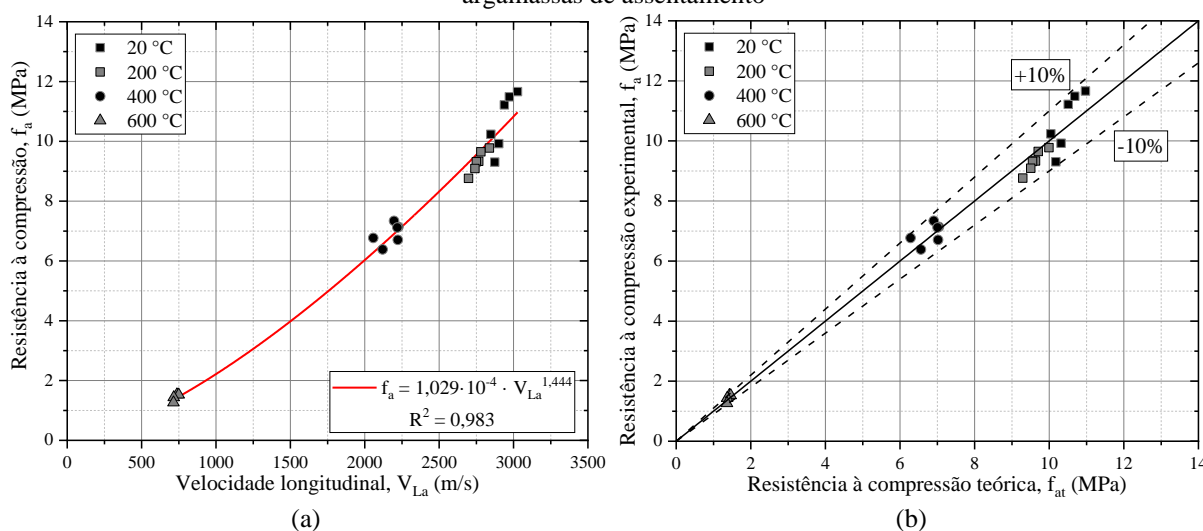
Fonte: Elaborado pelo Autor

$$f_{aR} = 0,975 \cdot E_{SaR}^{0,464} \quad (5.17)$$

5.1.8 Relação entre as velocidades de pulso ultrassônico e propriedades mecânicas estáticas das argamassas de assentamento

Nesta seção são apresentadas as relações obtidas entre as propriedades mecânicas estáticas e as propriedades mecânicas dinâmicas. Na Figura 5.28a, observa-se que a velocidade longitudinal de pulso ultrassônico e a resistência à compressão das argamassas de assentamento são relacionadas por meio de uma função potência, apresentando um coeficiente de determinação igual a 0,983.

Figura 5.28: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e a resistência à compressão das argamassas de assentamento



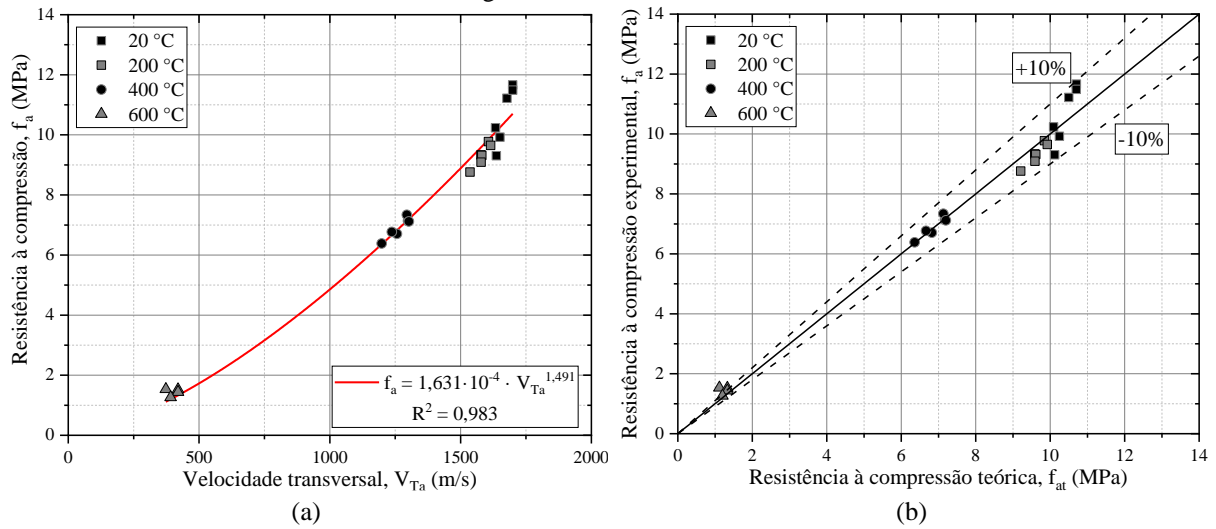
Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 5.28b, é apresentada uma comparação entre os valores teóricos de resistência estimados por meio da equação proposta e os resultados obtidos experimentalmente. Essa relação é apresentada com uma margem de erro de $\pm 10\%$, demonstrando uma correspondência satisfatória entre os dados teóricos e experimentais.

A relação entre a velocidade de pulso ultrassônico transversal e a resistência à compressão é ilustrada na Figura 5.29a, com um coeficiente de determinação de 0,983. Na Figura 5.29b, os resultados teóricos e experimentais de resistência à compressão são comparados, mostrando uma coerência dentro de uma margem de erro de $\pm 10\%$.

As análises de correlação revelam que as relações entre as velocidades longitudinal e transversal e a resistência à compressão das argamassas de assentamento apresentaram coeficientes de determinação elevados, juntamente com uma consistência nos resultados dentro de uma margem de erro de $\pm 10\%$. Consequentemente, os ensaios não destrutivos demonstraram eficácia na avaliação da resistência à compressão das argamassas de assentamento.

Figura 5.29: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico transversal e a resistência à compressão das argamassas de assentamento



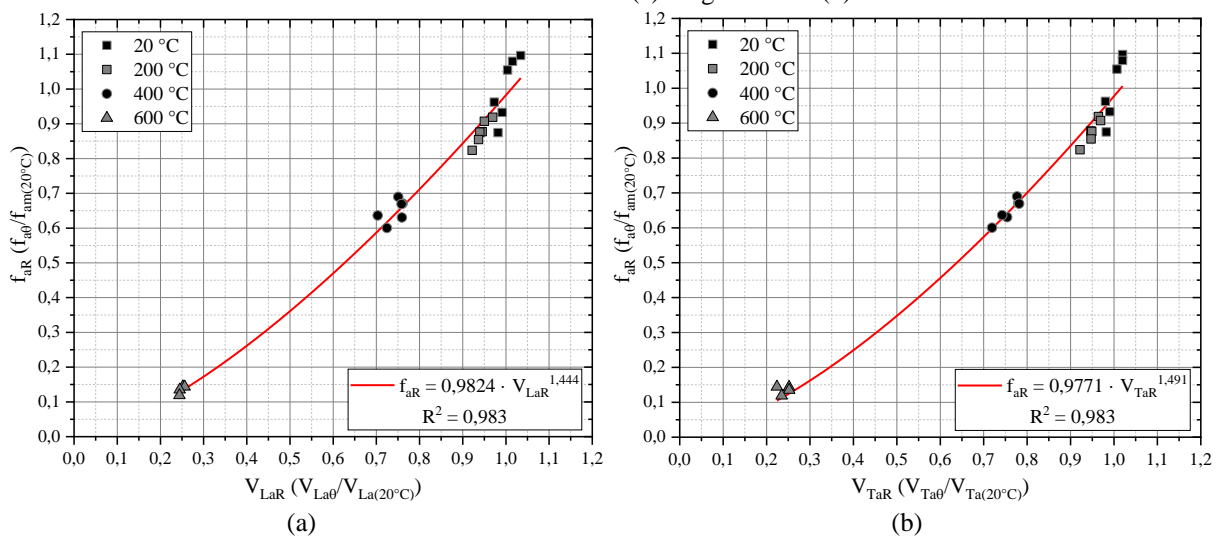
Fonte: Elaborado pelo Autor

As relações mencionadas também foram estabelecidas em termos residuais, para viabilizar a comparação com as relações propostas em Moura *et al.* (2024), conforme descrito nas Equações 5.18 e 5.19, e ilustrado graficamente na Figura 5.30.

$$f_{aR} = 0,9824 \cdot V_{LaR}^{1,444} \quad (5.18)$$

$$f_{aR} = 0,9771 \cdot V_{TaR}^{1,491} \quad (5.19)$$

Figura 5.30: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão das argamassas de assentamento em termos residuais: (a) longitudinal e (b) transversal



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Tabela 5.15 e Figura 5.31, são comparadas as relações entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e a resistência à compressão das argamassas deste programa

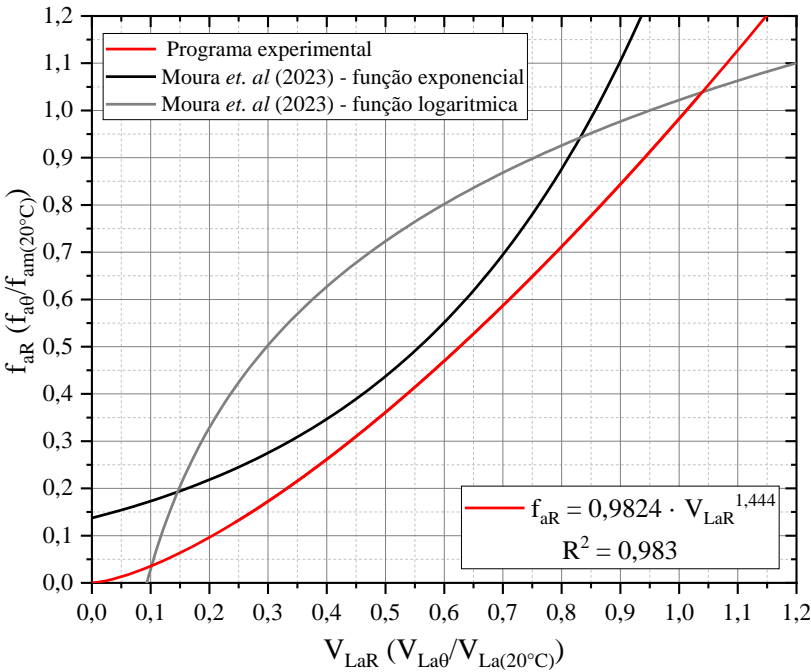
experimental e as apresentadas em Moura *et al.* (2024), onde fora proposta tanto uma equação logarítmica quanto uma exponencial para descrever essa relação, as quais são específicas para argamassas com cal em sua composição.

Tabela 5.15: Relações entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e a resistência à compressão das argamassas de assentamento em termos residuais

Autor	Função	Coefficiente de determinação (R ²)
Programa experimental	$f_{aR} = 0,9824 \cdot V_{LaR}^{1,444}$	0,983
Moura <i>et al.</i> (2024)	$f_{aR} = 0,1373e^{2,3166V_{LaR}}$	0,7826
Moura <i>et al.</i> (2024)	$f_{aR} = 1,022 + 0,431 \ln(V_{LaR})$	0,9528

Fonte: Elaborado pelo Autor

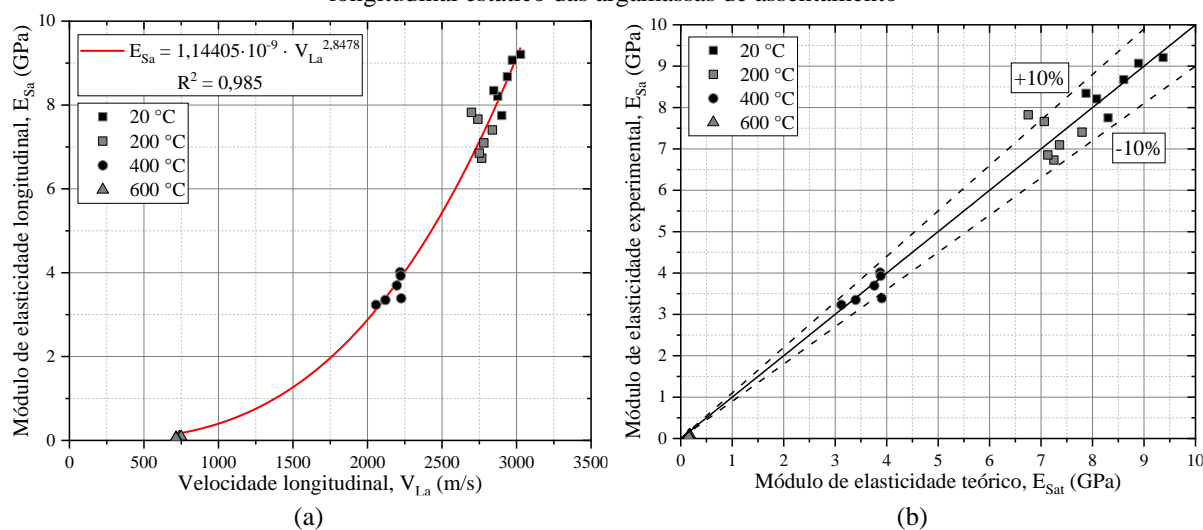
Figura 5.31: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e a resistência à compressão das argamassas de assentamento em termos residuais: comparação com outros autores



Fonte: Elaborado pelo Autor

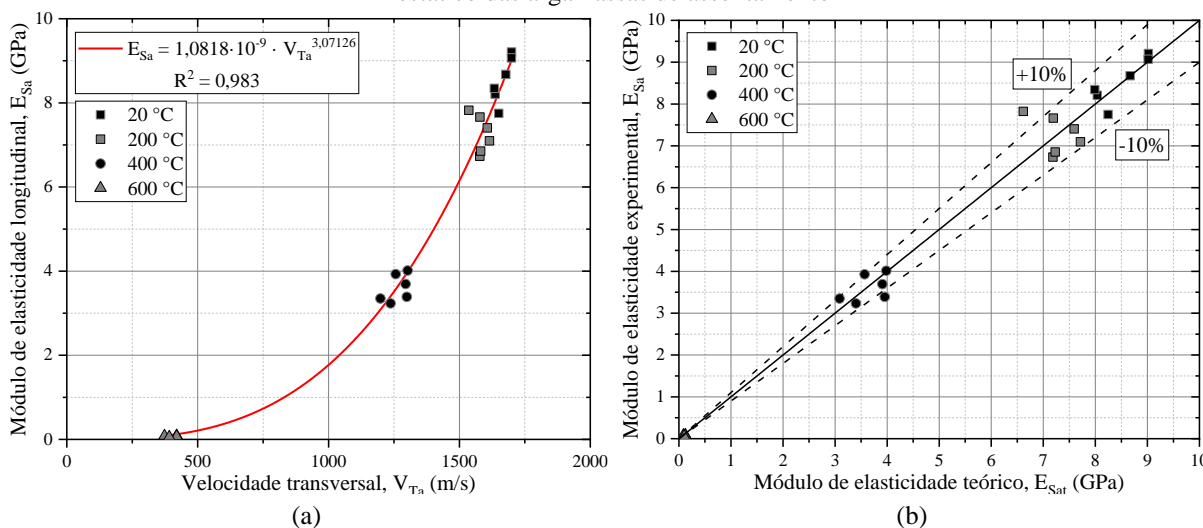
Nas Figuras 5.32 e 5.33, são ilustradas, respectivamente, as relações entre as velocidades ultrassônicas longitudinal e transversal e o módulo de elasticidade estático longitudinal, por meio de funções potência. Em ambas as relações, os resultados teóricos dos módulos de elasticidade longitudinal estático, calculados utilizando as equações propostas, são comparados com os resultados experimentais, com uma margem de erro de $\pm 10\%$.

Figura 5.32: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e o módulo de elasticidade longitudinal estático das argamassas de assentamento



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5.33: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico transversal e o módulo de elasticidade longitudinal estático das argamassas de assentamento

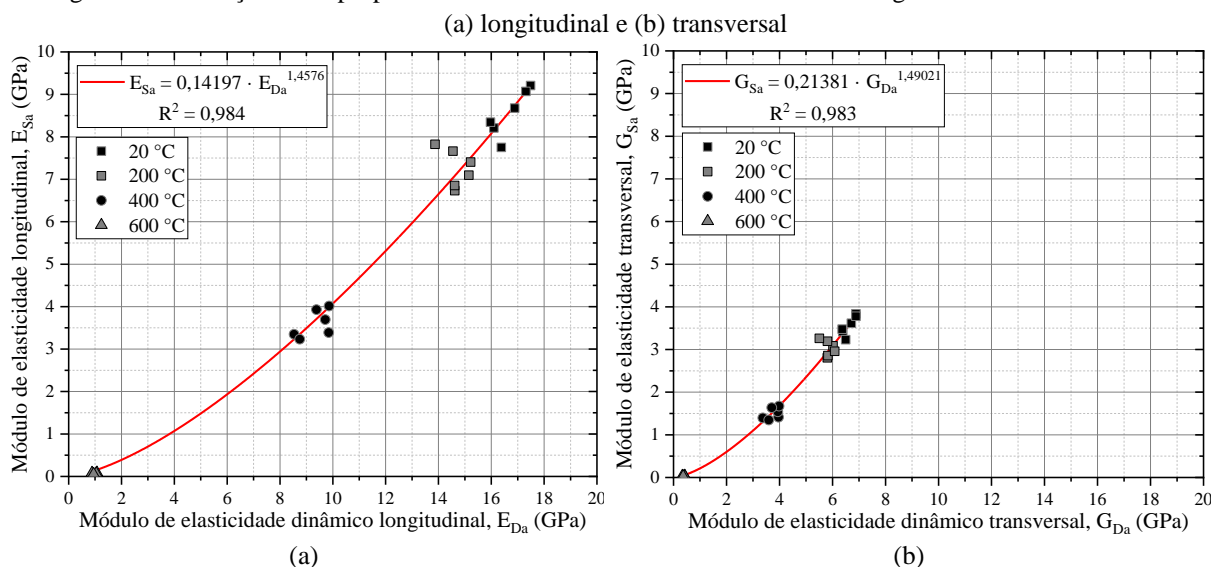


Fonte: Elaborado pelo Autor

Em resumo, as relações propostas exibiram coeficientes de determinação iguais a 0,985 e 0,983, respectivamente, e valores em consonância com a margem de erro adotada ($\pm 10\%$). Portanto, elas se mostram como modelos eficazes para estimar o módulo de elasticidade estático por meio de ensaios de ultrassom.

Por fim, como ilustrado na Figura 5.34, foram estabelecidas relações entre os módulos de elasticidade longitudinais e transversais, tanto dinâmicos quanto estáticos. Essas relações também foram estabelecidas por funções do tipo potência, o que proporcionou a obtenção de coeficientes de determinação iguais a 0,984 e 0,983, respectivamente, evidenciando a eficácia das relações propostas na previsão dos módulos de elasticidade estáticos.

Figura 5.34: Relação entre propriedades mecânicas dinâmicas e estáticas das argamassas de assentamento:



Fonte: Elaborado pelo Autor

Ao comparar o módulo de elasticidade dinâmico com o módulo de elasticidade estático obtido dos ensaios mecânicos, observa-se que o dinâmico se mostrou em média 52% superior ao estático, em temperatura ambiente. A 200 °C, essa relação foi de 50%; a 400 °C, de 38% e a 600 °C, de 8%. Conforme comentado previamente, essa tendência é atribuída ao fato de que o módulo de elasticidade dinâmico reflete uma mobilização mínima das deformações no corpo de prova, quando o nível de danificação do material é praticamente nulo.

Ao examinar as relações destacadas nesta seção, fica clara a viabilidade da utilização de relações empíricas para previsão das propriedades mecânicas das argamassas por meio do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico, seja em temperatura ambiente ou pós-aquecimento. Na Tabela 5.16 estão resumidas todas as relações obtidas neste subcapítulo 0.

Tabela 5.16: Relações obtidas para as argamassas de assentamento

Relação	Função	R ²
$V_{Ta} \times V_{La}$	$V_{Ta} = 0,5730V_{La}$	0,999
$V_{LaR}; V_{TaR} \times \theta$	$V_{LaR} = V_{TaR} = \frac{1,07}{\left(1 + e^{\frac{(\theta-513)}{101}}\right)} - 0,06$	0,999
$G_{Da} \times E_{Da}$	$G_{Da} = 0,3981E_{Da}$	0,999
$E_{DaR}; G_{DaR} \times \theta$	$E_{DaR} = G_{DaR} = \frac{1,05}{\left(1 + e^{\frac{(\theta-425)}{91}}\right)} - 0,05$	0,997
$f_{aR} \times \theta$	$f_{aR} = \frac{1,01287}{\left(1 + e^{\frac{(\theta-461,45)}{95,069}}\right)} - 0,03362$	0,975

$E_{SaR} \times \theta$	$E_{SaR} = \frac{1,05943}{\left(1 + e^{\frac{(\theta - 371,58)}{95,251}}\right)} - 0,04346$	0,985
$f_{aR} \times E_{SaR}$	$f_{aR} = 0,975 \cdot E_{SaR}^{0,464}$	0,983
$f_a \times V_{La}$	$f_a = 1,029 \cdot 10^{-4} \cdot V_{La}^{1,444}$	0,983
$f_a \times V_{Ta}$	$f_a = 1,631 \cdot 10^{-4} \cdot V_{Ta}^{1,491}$	0,983
$f_{aR} \times V_{LaR}$	$f_{aR} = 0,9824 \cdot V_{LaR}^{1,444}$	0,983
$f_{aR} \times V_{TaR}$	$f_{aR} = 0,9771 \cdot V_{TaR}^{1,491}$	0,983
$E_{Sa} \times V_{La}$	$E_{Sa} = 1,14405 \cdot 10^{-9} \cdot V_{La}^{2,8478}$	0,985
$E_{Sa} \times V_{Ta}$	$E_{Sa} = 1,0818 \cdot 10^{-9} \cdot V_{Ta}^{3,07126}$	0,983
$E_{Sa} \times E_{Da}$	$E_{Sa} = 0,14197 \cdot E_{Da}^{1,4576}$	0,984
$G_{Sa} \times G_{Da}$	$G_{Sa} = 0,21381 \cdot G_{Da}^{1,49021}$	0,983

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.2 PRISMAS DE ALVENARIA

Esta seção é dedicada à análise dos resultados obtidos no *Programa experimental II*, referente aos ensaios realizados nos prismas de alvenaria.

5.2.1 Velocidade de pulso ultrassônico nos prismas de alvenaria

Conforme mencionado no capítulo 4, especificamente na seção 4.7.2, foram conduzidas medições de pulso ultrassônico nas três dimensões do prisma de alvenaria: altura, comprimento e largura. Inicialmente, são abordados apenas os resultados das medições realizadas no comprimento e na largura dos prismas, sendo essas medidas referentes exclusivamente aos blocos de concreto que constituem os prismas. Nas Tabelas 5.17 e 5.18, são apresentadas as médias das velocidades ultrassônicas correspondentes aos blocos superiores e inferiores que constituem os prismas de alvenaria, respectivamente.

No que concerne aos blocos superiores (Tabela 5.17), a média das velocidades ultrassônicas ao longo do comprimento de um bloco foi obtida a partir das medidas C₁, C₂, C₃, C₇, C₈ e C₉. Em relação à média das velocidades ao longo da largura, essa foi calculada com base nas medidas L₁, L₂, L₃, L₇, L₈ e L₉. Em relação aos blocos inferiores, apresentados na Tabela 5.18, as medidas utilizadas para o cálculo da média das velocidades no comprimento foram C₄, C₅, C₆, C₁₀, C₁₁ e C₁₂, enquanto as medidas L₄, L₅, L₆, L₁₀, L₁₁ e L₁₂, foram utilizadas para calcular a média das velocidades na largura (consulte a Figura 4.27).

Tabela 5.17: Velocidades longitudinal e transversal nos blocos de concreto superiores dos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas

Temperatura		Bloco Superior					
		Comprimento		Largura		Média total	
		V _{Lp,Cs} (m/s)	V _{Tp,Cs} (m/s)	V _{Lp,Ls} (m/s)	V _{Tp,Ls} (m/s)	V _{Lps} (m/s)	V _{Tps} (m/s)
20 °C	Média	4556,21	2491,34	4618,97	2560,41	4587,59	2525,88
	CV (%)	1,67	3,47	1,36	4,30	1,20	3,10
200 °C	Média	3884,21	2185,27	3974,29	2221,56	3929,25	2203,42
	CV (%)	2,59	6,53	3,13	5,56	2,09	4,14
400 °C	Média	2993,33	1707,55	3145,65	1708,73	3069,49	1708,14
	CV (%)	4,50	5,22	4,90	7,39	3,36	4,70
600 °C	Média	1778,02	1087,92	1908,23	1090,91	1843,13	1089,42
	CV (%)	4,35	6,73	4,08	6,00	2,92	4,80
800 °C	Média	1040,94	629,86	1162,71	649,86	1101,83	639,86
	CV (%)	10,17	12,10	11,95	12,00	8,50	9,16

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 5.18: Velocidades longitudinal e transversal nos blocos de concreto inferiores dos prismas de alvenaria em elevadas temperaturas

Temperatura		Bloco Inferior					
		Comprimento		Largura		Média total	
		V _{Lp,Ci} (m/s)	V _{Tp,Ci} (m/s)	V _{Lp,Li} (m/s)	V _{Tp,Li} (m/s)	V _{Lpi} (m/s)	V _{Tpi} (m/s)
20 °C	Média	4473,90	2425,26	4610,16	2544,25	4542,03	2484,76
	CV (%)	3,35	6,58	2,15	5,47	2,35	4,68
200 °C	Média	4080,93	2257,10	4151,61	2347,70	4116,27	2302,40
	CV (%)	4,08	7,72	3,36	4,65	3,13	5,20
400 °C	Média	3077,20	1786,92	3254,74	1802,50	3165,97	1794,71
	CV (%)	5,79	3,49	5,12	5,96	4,85	3,77
600 °C	Média	1985,22	1165,42	2149,18	1233,95	2067,20	1199,69
	CV (%)	7,17	9,93	13,49	9,62	9,60	6,39
800 °C	Média	1021,06	610,29	1156,91	663,58	1088,98	636,94
	CV (%)	8,86	11,68	14,29	12,93	8,48	7,12

Fonte: Elaborado pelo Autor

Com base nos resultados obtidos, é perceptível uma diferença entre as velocidades longitudinal e transversal aferidas nos blocos superior e inferior dos prismas. À temperatura ambiente e a 800 °C, os blocos superiores dos prismas apresentaram valores mais elevados em comparação aos inferiores. No entanto, essa tendência se inverteu nas temperaturas de 200, 400 e 600 °C, onde foram registrados valores de velocidade mais elevados nos blocos inferiores.

Essa diferença observada foi analisada estatisticamente para avaliar a existência de diferenças significativas entre as médias das velocidades ultrassônicas nos blocos superiores e inferiores dos prismas. Para isso, foram aplicados os testes estatísticos F e T, com um nível de

significância de 95%. Os resultados dos testes de comparação estão apresentados na Tabela 5.19. Nas temperaturas ambiente e 800 °C, as velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais nos dois blocos foram consideradas estatisticamente idênticas. A 200 °C, foram verificadas diferenças significativas apenas nas velocidades longitudinais. Por outro lado, a 600 e 400 °C, constatou-se diferença estatística entre as médias das velocidades longitudinal e transversal nos dois blocos.

Tabela 5.19: Teste de hipóteses estatístico para as velocidades longitudinais e transversais ao longo dos blocos de concreto constituintes dos prismas de alvenaria

Temperatura	Propriedade	Comparação	T	T _{crit}	p-value	Significância
20 °C	V _{Lp}	V _{Lps} V _{Lpi}	1,880	2,634	0,0895	Não
	V _{Tp}	V _{Tps} V _{Tpi}	1,055	2,634	0,3164	Não
200 °C	V _{Lp}	V _{Lps} V _{Lpi}	4,361	2,634	0,0014	Sim
	V _{Tp}	V _{Tps} V _{Tpi}	2,144	2,634	0,0577	Não
400 °C	V _{Lp}	V _{Lps} V _{Lpi}	2,814	2,634	0,02270	Sim
	V _{Tp}	V _{Tps} V _{Tpi}	5,021	2,634	0,00103	Sim
600 °C	V _{Lp}	V _{Lps} V _{Lpi}	8,832	2,634	0,000005	Sim
	V _{Tp}	V _{Tps} V _{Tpi}	6,071	2,634	0,0001	Sim
800 °C	V _{Lp}	V _{Lps} V _{Lpi}	0,416	2,634	0,6864	Não
	V _{Tp}	V _{Tps} V _{Tpi}	0,135	2,634	0,8951	Não

V_{Lps}: Velocidade longitudinal nos blocos superiores dos prismas; V_{Tps}: Velocidade transversal nos blocos superiores dos prismas;
V_{Lpi}: Velocidade longitudinal nos blocos inferiores dos prismas; V_{Tpi}: Velocidade transversal nos blocos inferiores dos prismas;

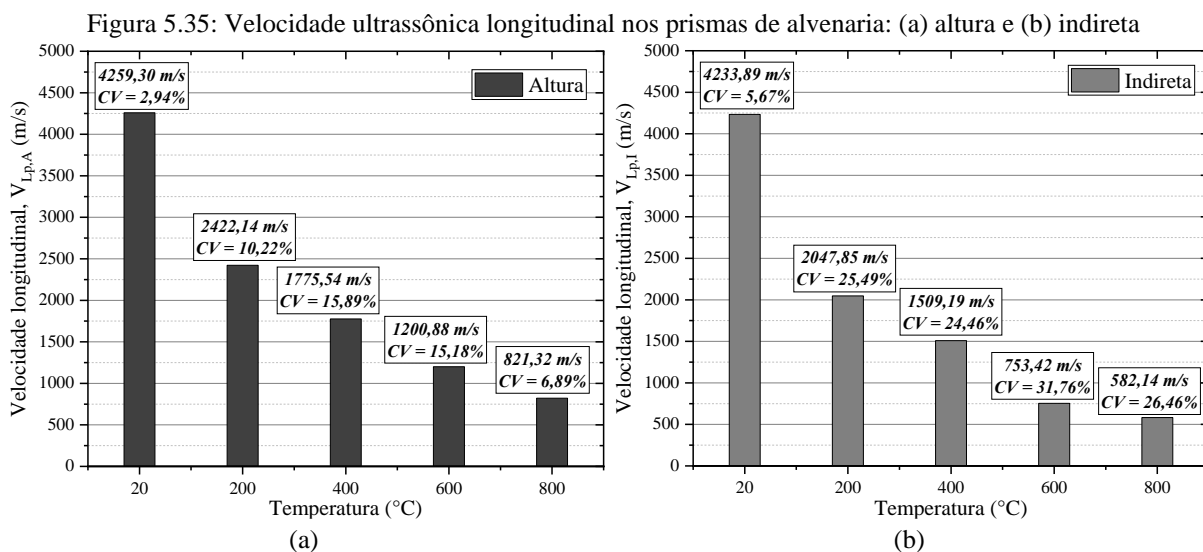
Fonte: Elaborado pelo Autor

A disparidade constatada nas velocidades dos blocos de concreto superiores e inferiores em elevadas temperaturas pode ser atribuída à variação de temperatura constatada no interior do forno, conforme ilustrado na Figura 4.12. A análise dos termopares revelou temperaturas mais elevadas na parte superior do forno, sujeitando os blocos superiores a condições térmicas ligeiramente mais rigorosas do que os blocos inferiores.

Como resultado, os blocos superiores se tornam mais suscetíveis à degradação e, conseqüentemente, apresentam velocidades menores em comparação aos blocos inferiores. Entretanto, a 800 °C, a diferença entre as temperaturas no interior do forno não se traduziu em uma diferença significativa nas velocidades ultrassônicas aferidas. Tal aspecto pode ser atribuído à longa extensão do tempo de ensaio neste nível de temperatura, favorecendo a homogeneização da temperatura interna e, por conseguinte, minimizando as diferenças entre as temperaturas dos gases superior e inferior.

Quanto às demais medidas realizadas nos prismas, tais como na direção da altura e as medidas indiretas, retomando os dados apresentados na Tabela 4.12 da seção 4.7.2, as velocidades ultrassônicas longitudinais aferidas são ilustradas na Figura 5.35. Nessa

representação, são destacados para cada faixa de temperatura, os valores médios das velocidades longitudinais e seus respectivos coeficientes de variação.



Fonte: Elaborado pelo Autor

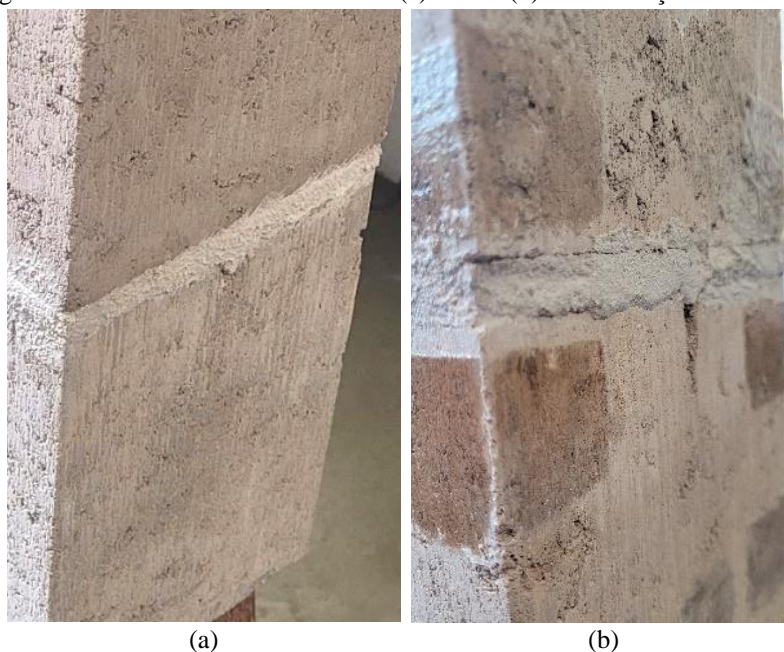
É evidente que as velocidades das ondas nas medidas indiretas e na direção da altura, ou seja, medidas em que as ondas atravessaram ambos os componentes do prisma (blocos e argamassa), foram consideravelmente inferiores em comparação às velocidades das ondas que percorreram apenas os blocos.

Conforme discutido em capítulo anterior, tal fato é atribuído à atenuação das ondas que ocorre na região da interface entre os blocos de concreto. Em McCann e Forde (2001), é ressaltada a significativa influência da presença de vazios, fissuras e delaminação na interface entre a junta e o bloco, na atenuação e no atraso na propagação das ondas. Isso ocorre porque, por se propagarem apenas em meio material, as ondas precisam percorrer caminhos mais longos até alcançarem o transdutor receptor.

Além disso, percebe-se que essas medidas apresentaram coeficientes de variação mais elevados, o que pode ser atribuído à grande variabilidade nas condições da interface entre os blocos e a junta de argamassa. De acordo com Fernandes Neto (2023), essas condições são influenciadas por diversos fatores, como a qualidade da construção dos prismas, a precisão na execução do assentamento dos blocos, a rugosidade superficial na região de conexão entre o bloco e a junta, entre outros. Nas medidas indiretas, observou-se uma variabilidade ainda mais pronunciada devido às dificuldades inerentes à sua realização e à propagação da onda.

Na Figura 5.36, são apresentadas as condições da interface entre blocos e junta que impactaram diretamente na propagação das ondas ultrassônicas, assim como na ampliação da variabilidade dos resultados obtidos.

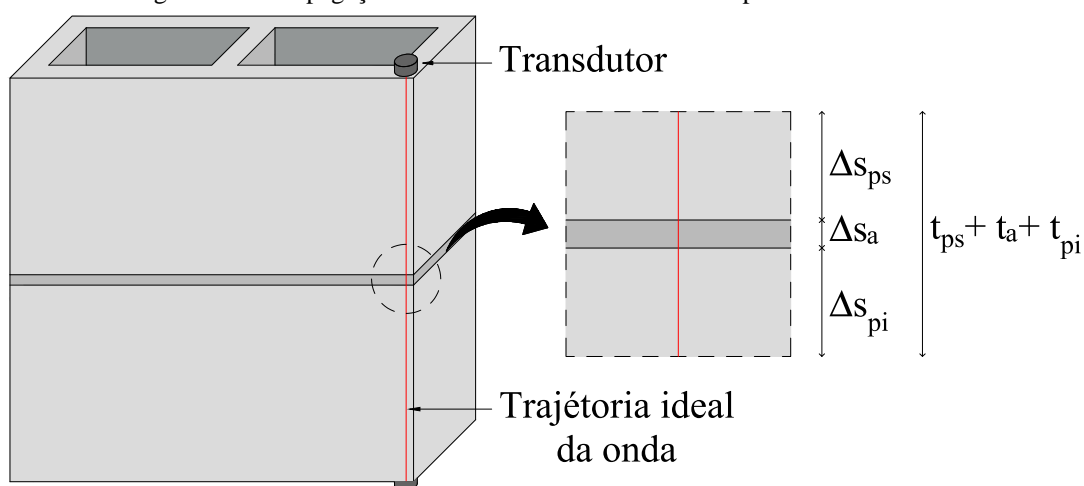
Figura 5.36: Junta de assentamento em (a) boas e (b) más condições de interface



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com o objetivo de analisar de forma mais precisa o aumento no tempo de propagação e a consequente diminuição das velocidades aferidas nas ondas que percorrem a interface entre os blocos e a junta de argamassa, foi idealizado um elemento típico de alvenaria estrutural como referência (Figura 5.37), seguindo a metodologia realizada em Fernandes Neto (2023) no contexto de prismas de alvenaria compostos por blocos cerâmicos.

Figura 5.37: Propagação teórica de onda ultrassônica em prisma de alvenaria



Fonte: Adaptado de Fernandes Neto (2023)

Neste elemento, o autor pressupõe a propagação ideal de uma onda ultrassônica, portanto, uma interface perfeita entre os materiais, sem presença de fissuras, vazios ou rugosidade superficial na ligação, a fim de desprezar os efeitos da reflexão, refração e dispersão

da onda, os quais contribuem com o aumento do tempo de propagação da onda. Nesse sistema idealizado, as velocidades longitudinais na direção da altura foram estimadas e comparadas com as obtidas experimentalmente.

Prosseguindo com a metodologia adotada em Fernandes Neto (2023) e, portanto, considerando que a propagação da onda percorre ambos os materiais, é sabido que o tempo de propagação de uma onda ultrassônica em um prisma de alvenaria (t_p) é determinado pela soma do tempo necessário para a onda atravessar os blocos superior (t_{ps}) e inferior (t_{pi}) do prisma, bem como cruzar as juntas de argamassa (t_a), como expresso na Equação 5.20.

$$t_p = t_{ps} + t_a + t_{pi} \quad (5.20)$$

Tendo em vista que o tempo de propagação de uma onda ultrassônica está relacionado a velocidade de propagação da onda e a distância percorrida por ela, ao utilizar essa relação na Equação 5.20 e rearranjar os termos, é possível obter uma expressão que relaciona a velocidade teórica nos prismas às velocidades dos seus materiais constituintes e à distância percorrida pelas ondas em cada um desses materiais, conforme demonstrado por meio da Equação 5.21.

$$V_{Lp-teo} = \frac{V_{Lp,As} V_{La} V_{Lp,Ai} (\Delta s_{ps} + \Delta s_a + \Delta s_{pi})}{\Delta s_{ps} (V_{La} V_{Lp,Ai}) + \Delta s_a (V_{Lp,As} V_{Lp,Ai}) + \Delta s_{pi} (V_{Lp,As} V_{La})} \quad (5.21)$$

Em relação à Equação 5.21, valem:

V_{Lp-teo} – Velocidade ultrassônica longitudinal teórica na direção da altura dos prismas;

$V_{Lp,As}$ – Velocidade ultrassônica longitudinal ao longo da altura dos blocos superiores dos prismas;

$V_{Lp,Ai}$ – Velocidade ultrassônica longitudinal ao longo da altura dos blocos inferiores dos prismas;

V_{La} – Velocidade ultrassônica longitudinal da argamassa de assentamento;

Δs_{ps} – Distância percorrida pelas ondas nos blocos superiores dos prismas;

Δs_a – Distância percorrida pelas ondas nas juntas de argamassa;

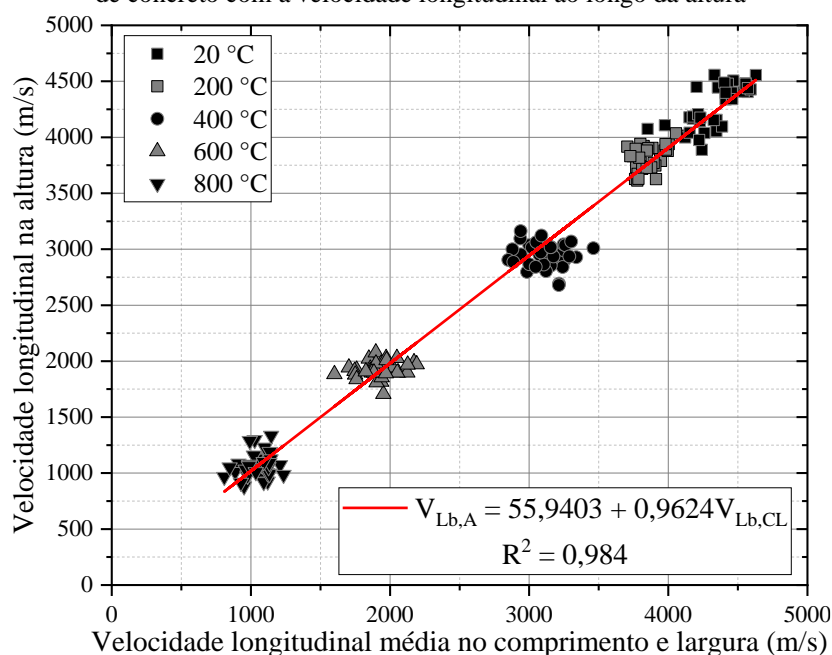
Δs_{pi} – Distância percorrida pelas ondas nos blocos inferiores dos prismas.

A necessidade da consideração de duas velocidades distintas para os blocos superior ($V_{Lp,As}$) e inferior ($V_{Lp,Ai}$) dos prismas surgiu das constatações anteriores, que revelaram diferenças estatisticamente significativas entre as leituras realizadas em ambos os blocos.

Conforme mencionado anteriormente, esses blocos foram avaliados somente nas direções da largura e do comprimento. Portanto, as velocidades ultrassônicas ao longo da altura para os blocos inferior e superior dos prismas foram estimadas com base em uma relação estabelecida com os resultados referentes aos blocos do *Programa experimental I*, conforme ilustrado na Figura 5.38, e descrita por meio da Equação 5.22.

$$V_{Lb,A} = 55,9403 + 0,9624V_{Lb,CL} \quad (5.22)$$

Figura 5.38: Relação entre a média das velocidades longitudinal ao longo do comprimento e largura dos blocos de concreto com a velocidade longitudinal ao longo da altura

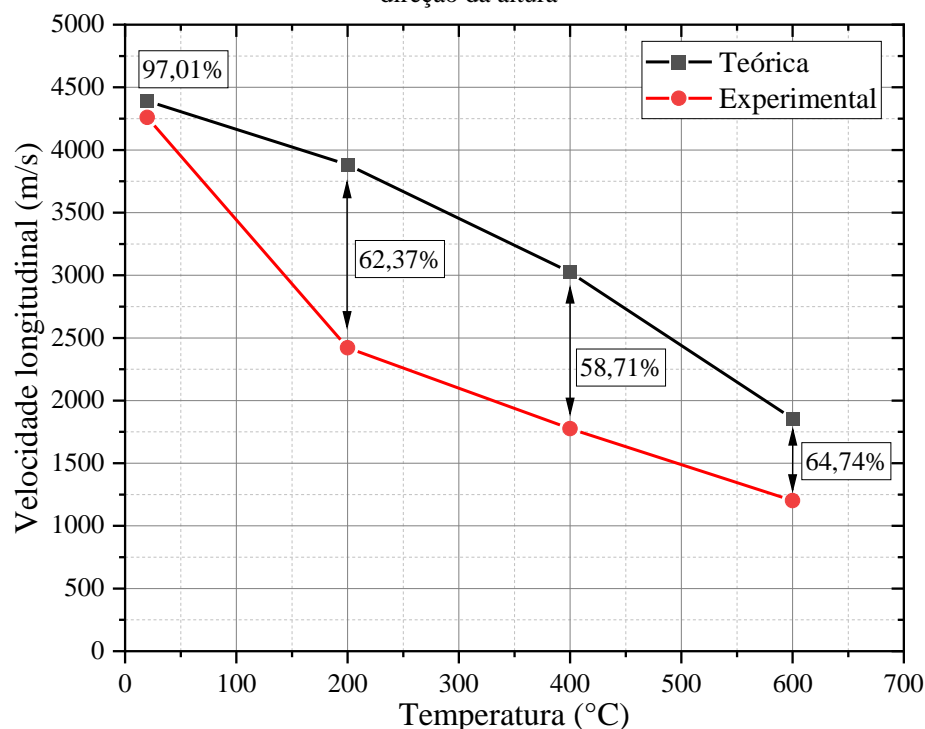


Dessa forma, ao substituir os resultados obtidos para as velocidades ultrassônicas longitudinais ao longo da altura dos blocos de concreto inferior e superior, bem como dos corpos de prova de argamassa, e levando em consideração as respectivas distâncias percorridas pela onda em cada um desses materiais, pode-se definir a velocidade de propagação longitudinal teórica. Esta velocidade teórica é então comparada com as medidas experimentais, conforme apresentado na Figura 5.39.

Nota-se que as velocidades ultrassônicas obtidas experimentalmente nos prismas são inferiores às teóricas, principalmente em elevadas temperaturas. Em temperatura ambiente, a velocidade média real nos prismas foi aproximadamente 97,01% da velocidade média teórica. Entretanto, em temperaturas de 200, 400 e 600 °C, esses valores diminuíram para 62,37%, 58,71% e 64,74% da velocidade teórica, respectivamente. É importante salientar que, a 800 °C,

não foi possível estimar velocidades teóricas devido à falta de referência de velocidade longitudinal nas argamassas a essa temperatura.

Figura 5.39: Comparação entre as velocidades longitudinais teórica e experimental dos prismas de alvenaria na direção da altura



Fonte: Elaborado pelo Autor

Dado que a velocidade teórica foi determinada sem levar em conta a presença de vazios e delaminações na interface entre os blocos e a argamassa, a redução observada nas velocidades visa elucidar a relevância desses elementos (vazios e delaminações), bem como dos efeitos da reflexão, refração e dispersão das ondas nessa região, na diminuição da velocidade do pulso ultrassônico e na atenuação das ondas ultrassônicas nos prismas de alvenaria. Percebe-se que nas medidas realizadas em temperatura ambiente os efeitos foram mínimos, o que se alterou nas medidas tomadas em temperaturas elevadas, tendo em vista que, após os ensaios térmicos, os prismas apresentaram fissuras, principalmente nas regiões da junta de argamassa.

Comparando os resultados com os apresentados em Fernandes Neto (2023), referentes à análise de prismas constituídos por dois blocos cerâmicos em temperatura ambiente, observa-se também a inferioridade das velocidades médias experimentais em relação às teóricas. No entanto, nos corpos de prova do autor o efeito de atenuação das ondas foi mais preponderante, uma vez que para três séries distintas de argamassa de assentamento utilizadas nos prismas, o autor chegou a diferenças de 92,33%, 87,54% e 78,43% entre as velocidades obtidas experimentalmente e as teóricas.

Na Tabela 5.20, as velocidades mencionadas são apresentadas em seus termos residuais, sendo apresentadas na Figura 5.40 funções do tipo exponenciais que relacionam as velocidades residuais na direção da altura e as obtidas de maneira indireta com a temperatura, as quais estão explicitadas nas Equações 5.23 e 5.24.

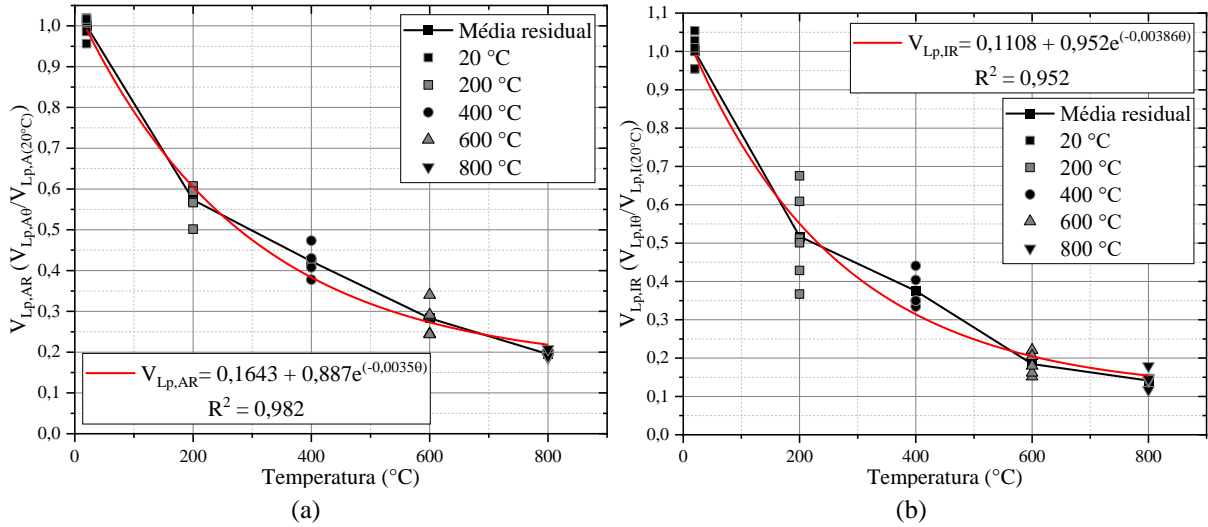
Tabela 5.20: Velocidades residuais longitudinal na direção da altura e obtidas de maneira indireta nos prismas de alvenaria

Temperatura	Residual	
	$V_{Lp,AR}$	$V_{Lp,IR}$
REF. (20 °C)	100%	100%
200 °C	57,32%	51,75%
400 °C	42,27%	37,54%
600 °C	28,31%	18,45%
800 °C	19,51%	14,14%

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5.40: Curvas residuais das velocidades ultrassônicas nos prismas de alvenaria:

(a) na altura e (b) obtidas de maneira indireta



Fonte: Elaborado pelo Autor

$$V_{Lp,AR} = 0,1643 + 0,887e^{(-0,0035\theta)} \quad (5.23)$$

$$V_{Lp,IR} = 0,1108 + 0,952e^{(-0,00386\theta)} \quad (5.24)$$

5.2.2 Propriedades mecânicas estáticas dos prismas de alvenaria

Na Tabela 5.21, são apresentadas as propriedades mecânicas dos prismas obtidas nos ensaios estáticos, incluindo a resistência média à compressão e módulo de elasticidade longitudinal estático, os quais também foram expressos em termos residuais.

Tabela 5.21: Propriedades mecânicas estáticas dos prismas de alvenaria

Temperatura	Resistência à compressão		Módulo de elasticidade estático	
	$f_{pm\theta}$ (MPa)	$\frac{f_{pm\theta}}{f_{pm(20^{\circ}C)}}$	$E_{Sp\theta}$ (GPa)	$\frac{E_{Sp\theta}}{E_{Sp(20^{\circ}C)}}$
REF. (20 °C)	13,67	100,00%	13,49	100,00%
200 °C	13,31	97,36%	8,08	59,89%
400 °C	10,67	78,02%	2,67	19,80%
600 °C	7,85	57,40%	1,23	9,11%
800 °C	2,95	21,61%	0,31	2,31%

Fonte: Elaborado pelo Autor

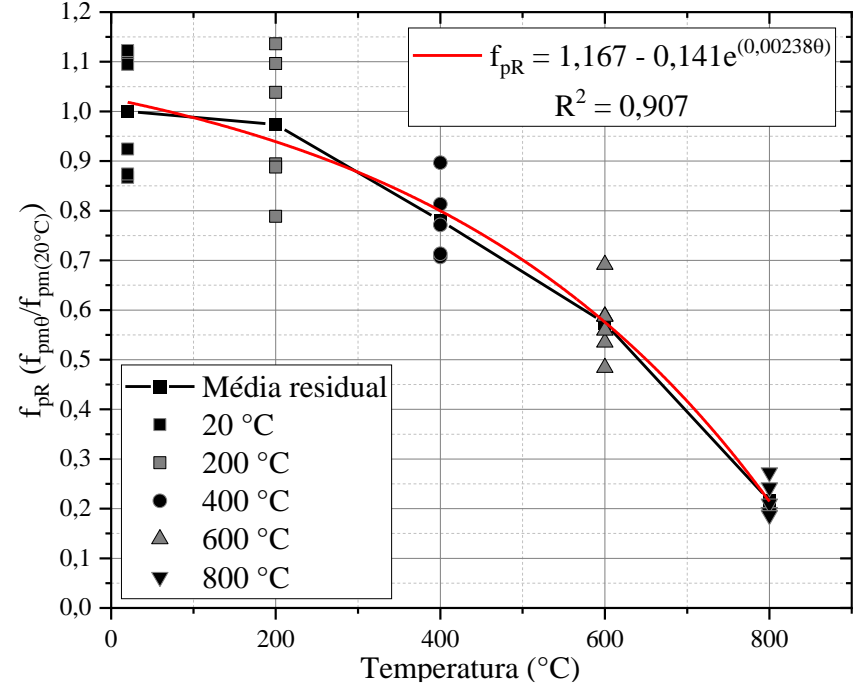
Observa-se claramente que, ao passo que a temperatura aumenta, tanto a resistência à compressão quanto o módulo de elasticidade decaem, sendo esse último de maneira mais acentuada, aspectos esses já observados nos ensaios realizados individualmente nos blocos de concreto e corpos de prova de argamassa.

Uma relação entre a resistência residual dos prismas de alvenaria (f_{pR}) e a elevação da temperatura (θ) foi estabelecida utilizando uma regressão não linear exponencial, obtendo-se por meio desta um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,907, conforme expresso na Equação 5.25 e demonstrado na Figura 5.41.

$$f_{pR} = 1,167 - 0,141e^{0,00238\theta}$$

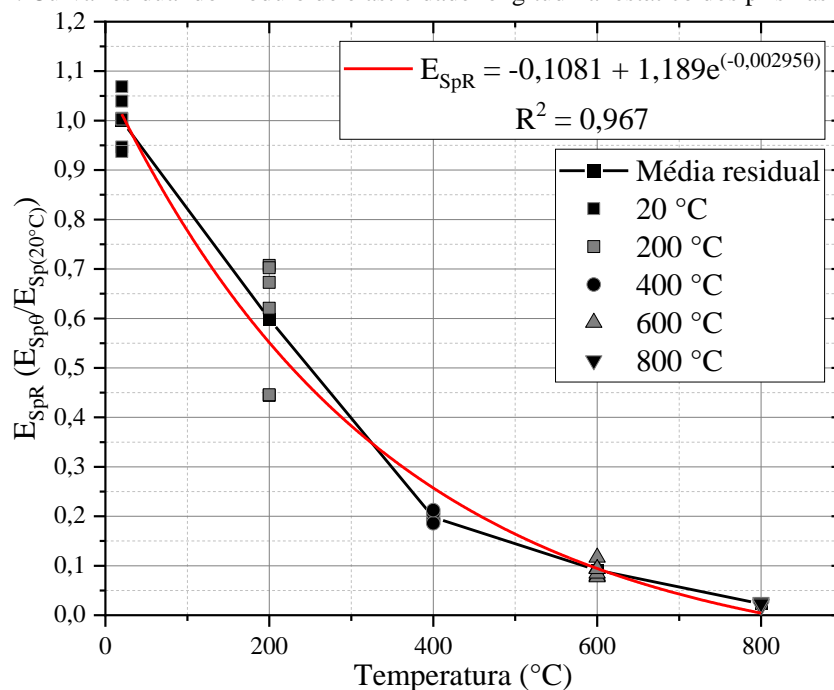
(5.25)

Figura 5.41: Curva residual de resistência à compressão dos prismas de alvenaria



Além disso, também foram relacionados o módulo de elasticidade estático residual (E_{SpR}) com a temperatura, conforme está ilustrado nas Figuras 5.42 e descrito na Equação 5.26.

Figura 5.42: Curva residual do módulo de elasticidade longitudinal estático dos prismas de alvenaria



Fonte: Elaborado pelo Autor

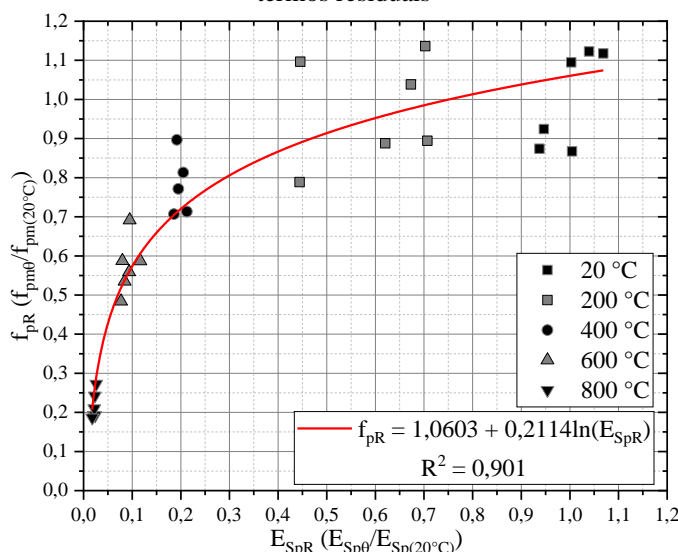
$$E_{SpR} = -0,1081 + 1,189e^{-0,00295\theta} \quad (5.26)$$

Como já observado individualmente nos materiais constituintes dos prismas – blocos de concreto e argamassa de assentamento – é notável que o módulo de elasticidade se apresenta como uma propriedade estática mais sensível à elevação da temperatura do que a resistência à compressão, apresentando, desde os 400 °C, uma resistência residual abaixo de 20%.

Foi determinada ainda uma relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático residuais por meio de uma equação logarítmica, conforme demonstrado na Figura 5.43 e descrito na Equação 5.27.

No que diz respeito à resistência à compressão dos prismas de alvenaria, é frequente estimar essa propriedade mecânica com base nas características individuais de seus elementos. Portanto, com base nos resultados obtidos, foram propostas duas abordagens distintas: uma se baseia apenas na resistência à compressão dos blocos de concreto (Equações 5.28 e 5.29), e outra considera tanto os blocos de concreto quanto a argamassa (Equação 5.30).

Figura 5.43: Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos prismas de alvenaria em termos residuais



Fonte: Elaborado pelo Autor

$$f_{pR} = 1,0603 + 0,2114 \ln(E_{SpR}) \quad (5.27)$$

$$f_p = 0,69f_b, \text{ para } 20, 200 \text{ e } 400 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.28)$$

$$f_p = 0,57f_b, \text{ para } 600 \text{ e } 800 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.29)$$

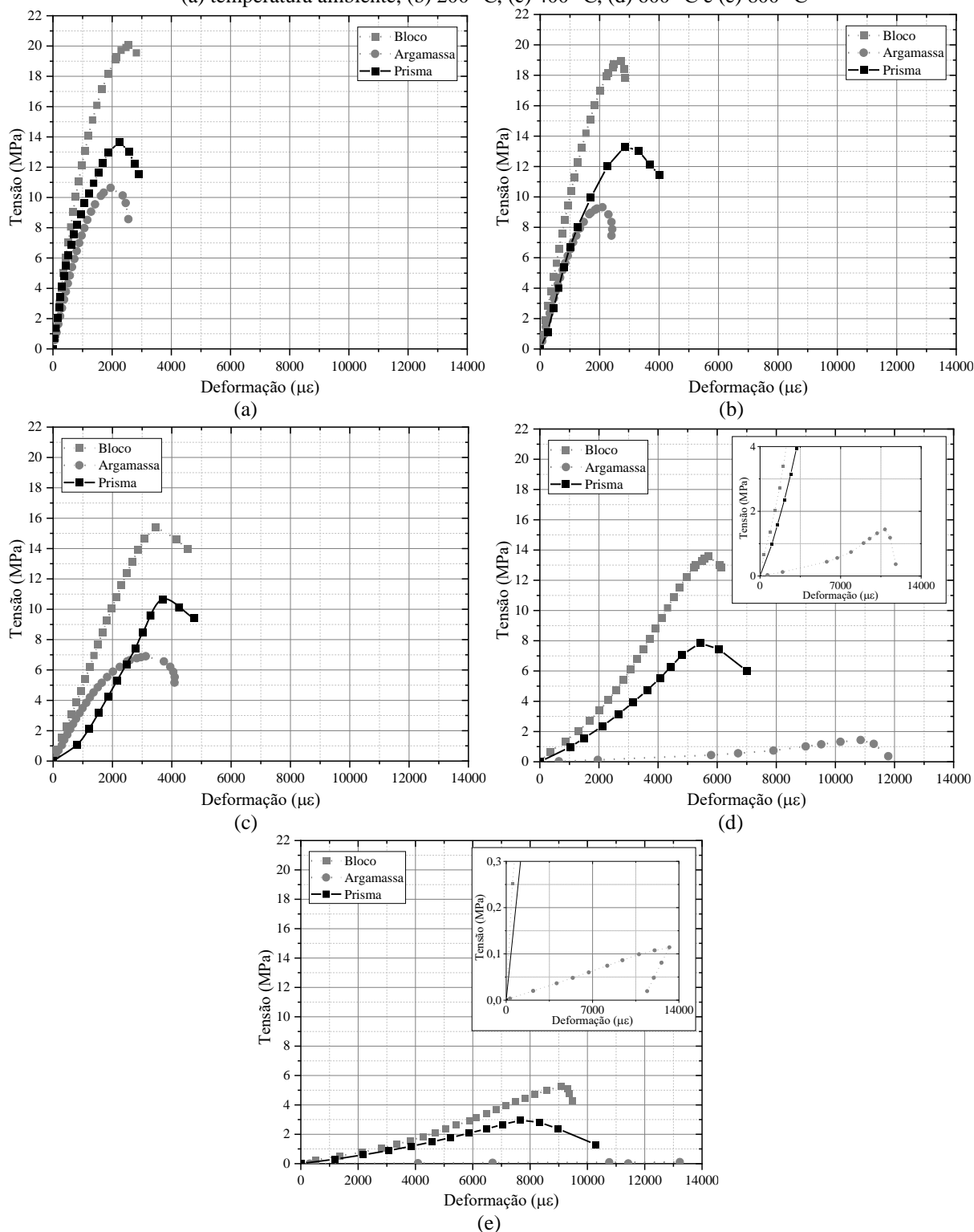
$$f_p = 1,02f_b^{0,78} f_a^{0,1} \quad (5.30)$$

Na Tabela F.1 da ABNT NBR 16868-1:2020, ilustrada na Tabela 2.3 deste trabalho, é estipulada que, para as classes de resistência empregadas neste trabalho, a relação entre a resistência à compressão do prisma e do bloco de concreto (f_p/f_b) deve ser igual a 0,70, conforme ocorreu neste programa experimental (Equação 5.28) para os prismas avaliados em temperaturas ambiente, 200 e 400 °C. Contudo, em se tratando das temperaturas de 600 e 800 °C, notou-se uma diminuição na influência da resistência à compressão dos blocos na resistência dos prismas, sendo reduzida a aproximadamente 57%. Essa redução está associada à queda abrupta na resistência de ambos os materiais constituintes dos prismas de alvenaria dentro dessa faixa de temperatura.

Em relação à Equação 5.30, é evidente que as unidades de alvenaria exercem uma influência predominante sobre as argamassas no que diz respeito à resistência à compressão dos prismas de alvenaria. Isso se evidencia pelo fato de que na equação proposta, a resistência à compressão dos blocos (f_b) é elevada a um coeficiente maior do que a da argamassa (f_a). Tal constatação corrobora com o que fora destacado em Ramalho e Corrêa (2003) acerca do papel fundamental dos blocos de alvenaria na determinação das características de resistência na alvenaria estrutural, enquanto a argamassa, por sua vez, não influi de forma tão significativa na resistência à compressão, embora seja muito importante na deformabilidade do sistema.

Na Figura 5.44, a influência dos materiais constituintes dos prismas de alvenaria em seu comportamento mecânico é ilustrada, a qual compara as curvas de “tensão x deformação” dos blocos, argamassas e prismas tanto em temperatura ambiente quanto em elevadas temperaturas.

Figura 5.44: Comparação entre os diagramas “tensão x deformação” dos elementos de alvenaria:
(a) temperatura ambiente, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C e (e) 800 °C



Fonte: Elaborado pelo Autor

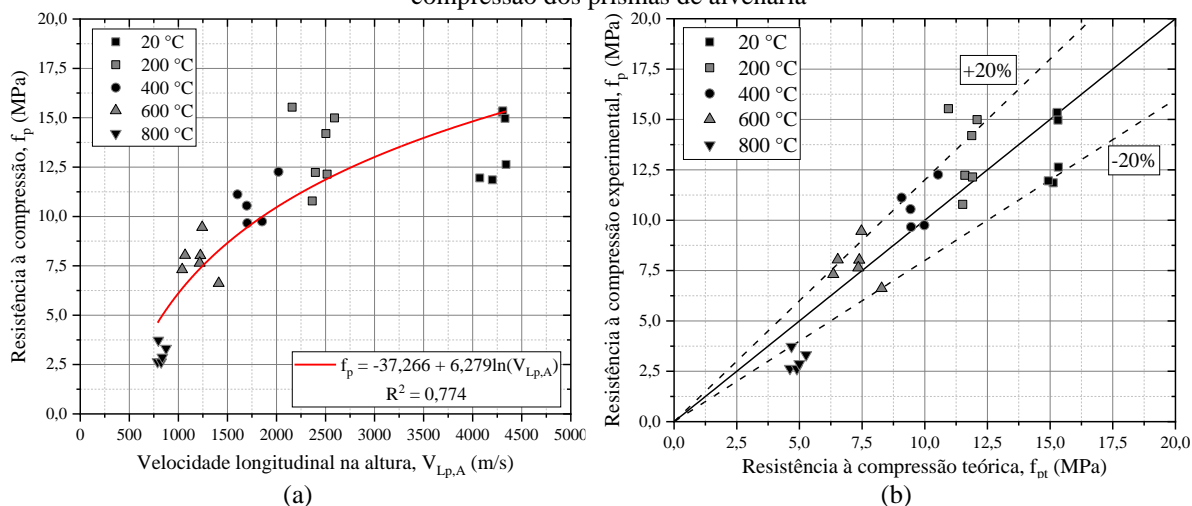
De modo geral, percebe-se que em termos de capacidade de carga e rigidez, os prismas apresentam consistentemente maior capacidade de resistência e rigidez em comparação com as argamassas, porém menor em relação às unidades de alvenaria. No que diz respeito à deformação, até os 400 °C, os prismas exibem maior deformabilidade em relação à ambos os elementos, no entanto, em 600 e 800 °C, a argamassa demonstra um acréscimo significativo em sua deformação, tornando-se o elemento de maior deformabilidade entre os três.

Além disso, após 600 °C, pode-se notar uma não linearidade inicial nas curvas “tensão x deformação” das argamassas, o que influenciou também na rigidez dos próprios prismas. Em Fernandes Neto *et al.* (2022), em que foi estudado o comportamento das argamassas de assentamento em elevadas temperaturas, também foi notado essa não linearidade inicial, sendo esse comportamento atribuído à acomodação de vazios pré-existentes e microfissuras originadas durante o processo de aquecimento e cura pós-fogo. Em Bošnjak *et al.* (2020) tal não linearidade também é notada nos ensaios realizados em prismas de alvenaria compostos por tijolos de silicato de cálcio, principalmente em temperaturas a partir 600 °C.

5.2.3 Relação entre as velocidades de pulso ultrassônico e propriedades mecânicas estáticas dos prismas de alvenaria

Com base nos resultados obtidos em relação às propriedades mecânicas estáticas, buscou-se estabelecer uma correlação com as velocidades longitudinais de pulso ultrassônico. Na Figura 5.45a, é demonstrada a relação entre a velocidade longitudinal de pulso ultrassônico na direção da altura e a resistência à compressão dos prismas por meio de uma equação logarítmica, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,774.

Figura 5.45: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal na direção da altura e a resistência à compressão dos prismas de alvenaria

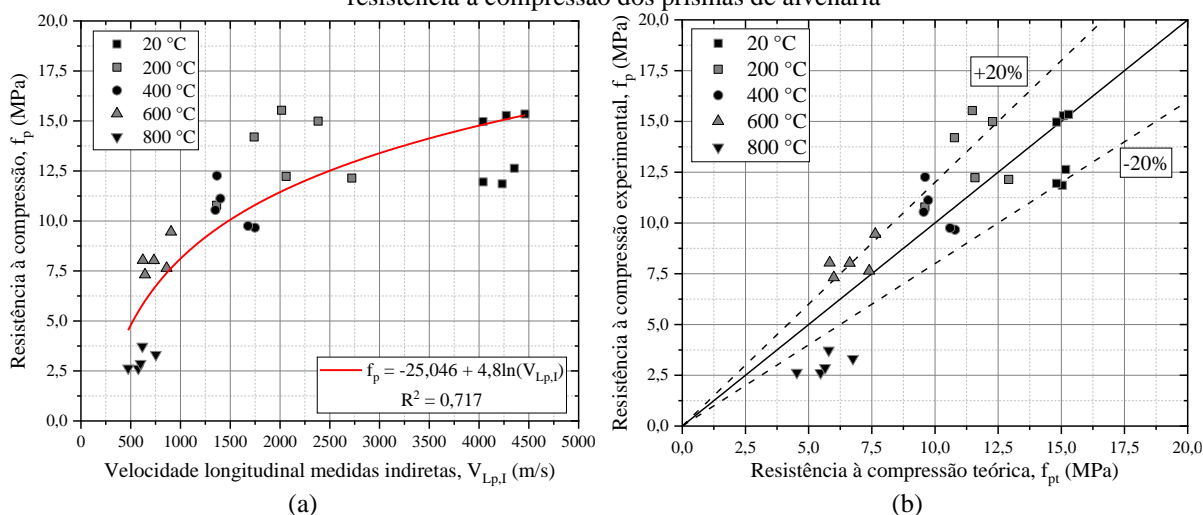


Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 5.45b, é apresentada uma comparação entre os valores teóricos de resistência à compressão estimados por meio da relação logarítmica estabelecida e os resultados obtidos experimentalmente. Essa relação é apresentada com uma margem de erro de $\pm 20\%$, demonstrando uma correspondência razoável entre os dados teóricos e experimentais, sendo constatadas uma menor precisão na estimativa dos resultados referentes a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Uma relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal das medidas aferidas de forma indireta e a resistência à compressão dos prismas é ilustrada na Figura 5.46a, com um coeficiente de determinação de 0,717. A comparação entre os resultados teóricos e experimentais de resistência à compressão obtidos é apresentada na Figura 5.46b, com uma margem de erro de $\pm 20\%$, constatando maiores divergências em relação à equação proposta com base nas velocidades de onda aferidas na altura dos prismas.

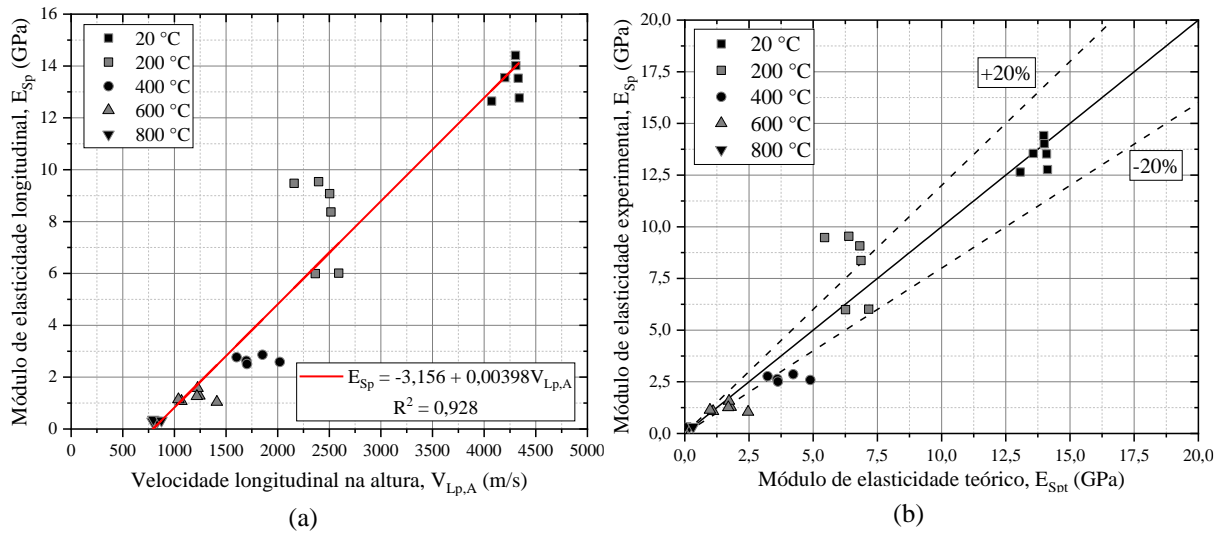
Figura 5.46: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal aferidos de forma indireta e a resistência à compressão dos prismas de alvenaria



Fonte: Elaborado pelo Autor

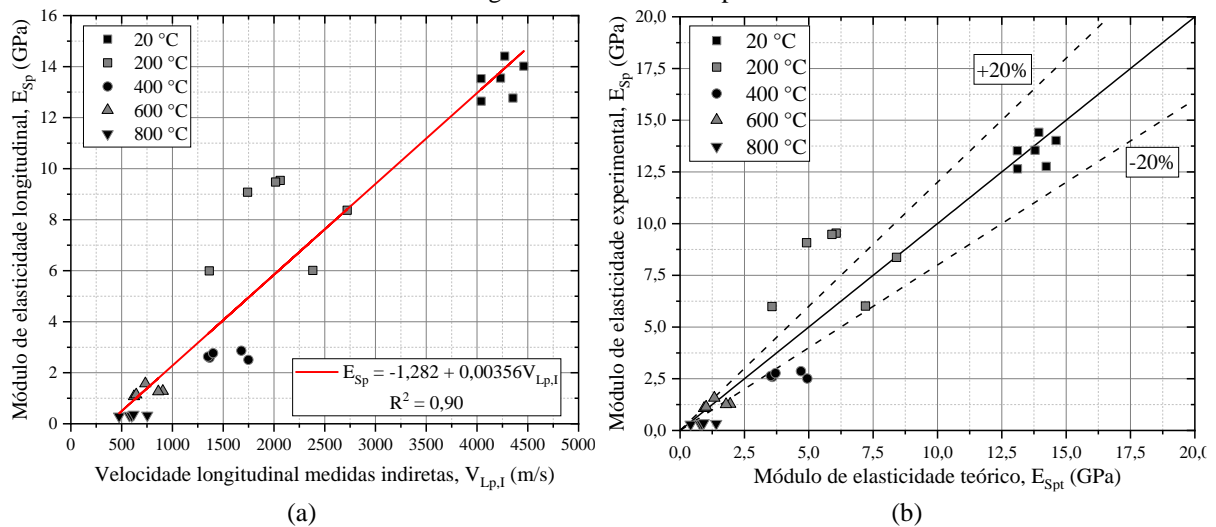
Nas Figuras 5.47 e 5.48, são representadas, respectivamente, as relações entre as velocidades ultrassônicas longitudinal na direção da altura e obtidas de maneira indireta com o módulo de elasticidade estático. Em ambas as relações, os resultados teóricos da propriedade estática são calculados utilizando as equações propostas, e comparados com os resultados experimentais, dentro de uma margem de erro de $\pm 20\%$.

Figura 5.47: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal na direção da altura e o módulo de elasticidade longitudinal estático dos prismas de alvenaria



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5.48: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal aferidos de forma indireta e o módulo de elasticidade longitudinal estático dos prismas de alvenaria



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em suma, ambas as relações propostas demonstraram coeficientes de determinação interessantes, atingindo 0,928 e 0,90, respectivamente. Isso sugere que é possível estabelecer relações mais precisas entre as velocidades ultrassônicas nos prismas e o módulo de elasticidade estático do que com a resistência à compressão.

Nas relações demonstradas anteriormente, é possível discutir melhor sobre a influência da interface entre os blocos de concreto e a junta de argamassa nas características de deformabilidade dos prismas, assim como nas velocidades ultrassônicas, uma vez que, de acordo com Fernandes Neto (2023), as mesmas falhas como fissuras, vazios e delaminações presentes nessa região que favorecem a atenuação e redução da VPU, também possibilitam uma

maior acomodação das deformações dos prismas quando submetidos à carregamentos. Portanto quanto maior a deformabilidade, menor a rigidez e as velocidades aferidas no corpo de prova, como demonstrado anteriormente.

As relações destacadas nesta seção, viabilizam a utilização de relações empíricas para prever propriedades mecânicas dos prismas de alvenaria por meio de ensaios de velocidade de pulso ultrassônico, seja em temperatura ambiente ou pós-aquecimento. Na Tabela 5.22 estão resumidas todas as relações obtidas neste subcapítulo 5.2.

Tabela 5.22: Relações obtidas para os prismas de alvenaria

Relação	Função	R ²
$V_{Lp,AR} \times \theta$	$V_{Lp,AR} = 0,1643 + 0,887e^{(-0,0035\theta)}$	0,982
$V_{Lp,IR} \times \theta$	$V_{Lp,IR} = 0,1108 + 0,952e^{(-0,00386\theta)}$	0,952
$f_{pR} \times \theta$	$f_{pR} = 1,167 - 0,141e^{0,00238\theta}$	0,907
$E_{SpR} \times \theta$	$E_{SpR} = -0,1081 + 1,189e^{-0,00295\theta}$	0,967
$f_{pR} \times E_{SpR}$	$f_{pR} = 1,0603 + 0,2114 \ln(E_{SpR})$	0,901
$f_p \times V_{Lp,A}$	$f_p = -37,266 + 6,279 \ln(V_{Lp,A})$	0,774
$f_p \times V_{Lp,I}$	$f_p = -25,046 + 4,8 \ln(V_{Lp,I})$	0,717
$E_{Sp} \times V_{Lp,A}$	$E_{SpR} = -3,156 + 0,00398V_{Lp,A}$	0,928
$E_{Sp} \times V_{Lp,I}$	$E_{SpR} = -1,282 + 0,00356V_{Lp,I}$	0,90

Fonte: Elaborado pelo Autor

6 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões extraídas do programa experimental conduzido neste estudo, que visou investigar o comportamento mecânico de elementos de alvenaria sob elevadas temperaturas, utilizando ensaios não destrutivos ultrassônicos e ensaios estáticos. Além das conclusões, são apresentadas sugestões para direcionar futuros trabalhos acadêmicos.

As principais conclusões deste trabalho foram divididas em quatro compilados distintos: conclusões gerais, conclusões acerca dos ensaios em blocos de concreto, dos ensaios em argamassas de assentamento e dos ensaios em prismas de alvenaria.

Em relação aos fenômenos gerais observados em todos os corpos de prova analisados e à metodologia de ensaio adotada, destacam-se:

- a) Após os ensaios térmicos, observaram-se alterações na coloração e textura dos corpos de prova, indicando mudanças físico-químicas devido à exposição a elevadas temperaturas. A descrição dessas características é importante para identificação da temperatura à qual o espécime foi exposto, podendo ser uma informação relevante na avaliação e recuperação de estruturas pós incêndio;
- b) O isolamento dos corpos de prova com plástico-filme foi eficaz na preservação dos espécimes após os ensaios térmicos, minimizando os efeitos da reidratação e evitando a formação de fissuras e maior degradação durante o armazenamento para futuros ensaios. Exceto pelas argamassas expostas a 600 e 800 °C, que apresentaram bastante fissuras logo após o resfriamento, as quais evoluíram apesar da adoção do isolamento;
- c) A aplicação de pulsos ultrassônicos em várias regiões e direções dos corpos de prova (blocos e prismas) possibilitou o mapeamento da VPU em toda a estrutura do espécime, permitindo uma avaliação mais abrangente e íntegra. As medições realizadas em diferentes temperaturas de análise mostraram que as velocidades ultrassônicas longitudinal e transversal são sensíveis às degradações causadas pela elevação de temperatura nos corpos de provas;
- d) Além da redução da VPU, a degradação dos corpos de prova é evidenciada pelos maiores coeficientes de variação observados nos resultados dos ensaios de ultrassom em espécimes submetidos a temperaturas mais severas, como 600 e 800 °C.

- e) Nos ensaios estáticos de resistência à compressão, blocos de concreto, argamassas de assentamento e prismas de alvenaria apresentaram uma redução em sua capacidade resistente e rigidez em virtude da elevação da temperatura;
- f) As curvas residuais apresentadas neste estudo indicam que a deformabilidade dos materiais é mais sensível ao aumento da temperatura do que a resistência à compressão, levantando preocupações quanto à estabilidade do sistema estrutural em situação de incêndio, dada a significativa degradação da rigidez do sistema;
- g) Foram estabelecidas relações analíticas entre os parâmetros obtidos por ensaios dinâmicos e estáticos, indicando a viabilidade da utilização dos resultados dos ensaios de ultrassom para estimar propriedades mecânicas estáticas.

Em relação aos ensaios realizados com blocos de concreto, as seguintes conclusões foram alcançadas:

- a) Quanto aos ensaios térmicos realizados nos blocos de concreto, a 200 °C, esses mantiveram características visuais similares ao seu estado original. A partir dos 400 °C, foram observados tons rosáceos, intensificados aos 600 °C, devido à presença de constituintes ferrosos nos agregados. A 800 °C, ocorreu uma mudança de coloração para tons de cinza claro, acompanhada de uma textura quebradiça e pulverulenta;
- b) Em temperatura ambiente, as velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais foram estatisticamente iguais em todas as direções, corroborando a hipótese de isotropia e homogeneidade nos blocos de concreto. No entanto, com o aumento da temperatura, surgiram divergências significativas entre as velocidades nas direções distintas, o que também foi observado na análise dos módulos de elasticidade dinâmicos, sugerindo que, embora as hipóteses adotadas sejam válidas, elas se distanciam um pouco da realidade com o aumento da temperatura;
- c) Em relação à resistência à compressão residual, notou-se uma deterioração tardia dos blocos de concreto deste programa experimental em comparação com as curvas apresentadas nas normas do Eurocode 2 (2004) e ACI/TMS 216.1:2014 para concreto moldado úmido. Após 600°C, observou-se uma queda abrupta na resistência, atingindo apenas 26% de resistência residual a 800 °C. O que está relacionado à expansão do quartzo, que ocorre por volta de 570 °C, e à desidratação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) na mesma faixa de temperatura;

- d) Equações logarítmicas foram preferíveis para relacionar as velocidades ultrassônicas com a resistência à compressão dos blocos de concreto, enquanto funções de potência foram utilizadas para determinar o módulo de elasticidade a partir das velocidades.

Quanto aos resultados obtidos nos ensaios realizados com as argamassas de assentamento, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- a) Nas argamassas submetidas a 600 e 800 °C, foram constatadas maior incidência de fissuras devido aos processos de carbonatação e reidratação. A 800 °C, a degradação dos espécimes foi tão intensa que inviabilizou os ensaios de ultrassom, pois a onda não conseguia se propagar ao longo do corpo de prova, dissipando-se antes de atravessá-lo;
- b) As velocidades ultrassônicas nos corpos de prova de argamassa apresentaram a menor variabilidade entre os elementos envolvidos neste trabalho, sendo o maior coeficiente de variação registrado em 6,90% para as velocidades transversais a 600 °C. Isso está associado ao fato de que nas argamassas foram realizadas medidas em apenas uma direção, além da maior homogeneidade desses corpos de prova, que não possuem agregados graúdos;
- c) As curvas residuais das velocidades de pulso ultrassônico longitudinal e transversal nas argamassas de assentamento são bastante semelhantes, permitindo estabelecer apenas uma equação (função sigmoide) para representar o declínio de ambas com o aumento da temperatura. O mesmo padrão foi observado nas propriedades dinâmicas associadas (módulos de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal);
- d) Observa-se uma queda acentuada na resistência à compressão das argamassas a partir dos 400 °C, devido ao enfraquecimento induzido pela presença da cal na mistura da argamassa. Entre 400 e 600 °C, ocorre a desidratação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que se converte em óxido de cálcio (CaO), que se expande durante o resfriamento, resultando em fissuras e redução significativa da resistência;
- e) A significativa degradação dos corpos de prova a partir de 400 °C também é indicada pelos baixos valores residuais dos módulos de elasticidade estática, registrados em 600 e 800 °C, sendo 0,87% e 0,10%, respectivamente.

Em relação aos resultados observados nos ensaios realizados com prismas de alvenaria, infere-se que:

- a) Ao final dos ensaios térmicos, observou-se uma fragilização significativa na região das juntas de argamassa, levando, em alguns casos, ao descolamento das juntas em relação

aos blocos, afetando bastante no aumento da variabilidade dos resultados ultrassônicos obtidos na direção da altura dos prismas e de maneira indireta;

- b) Nas medições de ultrassom nos blocos inferior e superior dos prismas de alvenaria, foi possível constatar que nas temperaturas ambiente e 800 °C, ambas as velocidades ultrassônicas foram consideradas estatisticamente idênticas. A 200, 600 e 400 °C, constatou-se diferença estatística entre as médias das velocidades ultrassônicas nos dois blocos. Essa disparidade pode ser atribuída à variação de temperatura constatada no interior do forno durante os ensaios;
- c) As velocidades das ondas na direção da altura e medidas de forma indireta, nas quais as ondas atravessaram ambos os componentes do prisma, foram consideravelmente inferiores do que aquelas que percorreram apenas os blocos. Essa diferença é atribuída à presença de vazios e delaminações na interface entre os blocos e a argamassa, juntamente com os efeitos da reflexão, refração e dispersão das ondas nessas regiões. Esses fenômenos culminam na atenuação e no aumento do tempo de propagação das ondas na interface entre os blocos de concreto, resultando também em coeficientes de variação mais elevados devido à grande variabilidade nas condições da interface;
- d) Mediante comparações com velocidades teóricas, percebe-se que nas medidas realizadas em temperatura ambiente a influência da presença de vazios e delaminações na interface entre os blocos e a argamassa foram mínimos, o que se alterou em temperaturas elevadas, tendo em vista as diferenças da ordem de 58,71% a 64,74% entre as velocidades teóricas e as obtidas experimentalmente;
- e) Nos ensaios mecânicos estáticos, a resistência à compressão dos prismas em todos os níveis de temperatura ficou abaixo da resistência dos blocos de concreto e acima da resistência da argamassa de assentamento. A relação proposta no estudo evidencia a predominância das unidades de alvenaria sobre as argamassas na influência da resistência à compressão dos prismas de alvenaria;
- f) Equações logarítmicas foram mais adequadas para relacionar as velocidades ultrassônicas com a resistência à compressão dos prismas, enquanto funções lineares foram preferíveis para determinar o módulo de elasticidade a partir das velocidades.

Finalmente, ratifica-se que as discussões e os resultados apresentados neste estudo enriquecem o conhecimento científico que tem sido construído referente ao comportamento de elementos da alvenaria estrutural constituída por blocos de concreto submetidos a elevadas temperaturas. Além disso, auxiliam na compreensão de aspectos importantes relacionados à

avaliação ultrassônica dos elementos da alvenaria estrutural, a saber, blocos de concreto, argamassa de assentamento e prismas de alvenaria, tanto em temperatura ambiente quanto em elevadas temperaturas. Isso engloba a análise da variação das velocidades ultrassônicas ao longo das diferentes direções ortogonais dos blocos e prismas, em decorrência da temperatura de análise; a utilização dos ensaios de ultrassom para verificar a degradação dos elementos de alvenaria devido à exposição a temperaturas elevadas; e a investigação dos fatores que influenciam na propagação das ondas ultrassônicas nos prismas de alvenaria.

Adicionalmente, relações teóricas apresentadas neste estudo são prospectadas para serem aplicadas em blocos de concreto, argamassas de assentamento e prismas de alvenaria estrutural em temperaturas ambiente ou elevadas, facilitando a previsão de suas propriedades mecânicas em situações em que os ensaios estáticos normatizados são inviáveis.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- a) Explorar a metodologia apresentada neste trabalho para avaliar blocos de alvenaria estrutural de materiais diversos em elevadas temperaturas, como por exemplo blocos cerâmicos, ou até mesmo blocos de concreto constituídos de agregados diferentes;
- b) Realizar ensaios com a adição de revestimentos nos elementos de alvenaria, a fim de analisar a influência destes no comportamento mecânico sob elevadas temperaturas;
- c) Realizar ensaios de ultrassom considerando anisotropia dos blocos de concreto em cada nível de temperatura, a fim de obter as constantes elásticas e as propriedades dinâmicas do elemento;
- d) Realizar simulação numérica visando replicar os experimentos propostos e os comportamentos observados neste programa experimental, permitindo testar variações na metodologia de ensaio, como por exemplo, utilização de diferentes taxas de elevação de temperatura, e observar a partir daí os fenômenos associados a essas mudanças.

REFERÊNCIAS

- AGGELIS, D. G.; MOMOKI, S.; CHAI, H. Surface wave dispersion in large concrete structures. **NDT and E International**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 304–307, 2009.
- AKCA, A. H.; ÖZYURT, N. Effects of re-curing on residual mechanical properties of concrete after high temperature exposure. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 159, p. 540–552, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.005>.
- AL NAHHAS, F. *et al.* Resistance to fire of walls constituted by hollow blocks: Experiments and thermal modeling. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 258–267, 2007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431106001359>.
- ALEXAKIS, E. *et al.* NDT as a monitoring tool of the works progress and the assessment of materials and rehabilitation interventions at the Holy Aedicule of the Holy Sepulchre. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 189, p. 512–526, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818321664>.
- AMARAL, R. O. *et al.* Análise da degradação dos blocos de concreto em elevadas temperaturas com o uso do ensaio de ultrassom. *In:* , 2021, Belo Horizonte. **6º CILASCI**. Belo Horizonte: CILASCI, 2021. p. 1–12.
- AMARAL, R. O. *et al.* Residual mechanical resistance of concrete blocks and laying mortars after high temperatures. **Fire and Materials**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 324–337, 2024.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI-530: Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures**. Detroit, Michigan: ACI, 2011.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI/TMS 216.1: Code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies**. Farmington Hills: ACI/TMS, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C140/C140M: Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units**. ASTM International, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597-16: Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete**. ASTM International, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E119 - 20: Fire Tests of Building Construction and Materials**. ASTM International, 2020.
- ANSON, M.; NEWMAN, K. The effect of mix proportions and method of testing on Poisson's ratio for mortars and concretes. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 18, n. 56, p. 115–130, 1966. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/mac.1966.18.56.115>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10636-1: Componentes construtivos não estruturais - Ensaio de resistência ao fogo Parte 1: Paredes e divisórias de compartimentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281-2: Argamassas inorgânicas - Requisitos e métodos de ensaios - Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-1: Alvenaria Estrutural - Parte 1: Projeto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-2: Alvenaria Estrutural - Parte 2: Execução e controle.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-3: Alvenaria Estrutural - Parte 3: Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868: Alvenaria estrutural.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16965: Ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos - Diretrizes gerais.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Solos e Rochas - Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3700-2018: Masonry Structures**. Sydney, 2018.

AYALA, F. R. R. **Mechanical properties and structural behavior of masonry at elevated temperatures**. 2010. 249 f. Thesis - The University of Manchester, Manchester, 2010.

BERTOLDO, C.; GORSKI, R. K. S.; GONÇALVES, R. Evaluation of Elastic Anisotropy of Concrete Using Ultrasound Wave Propagation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 1–9, 2020.

BOŠNJAK, J. *et al.* Experimental and numerical studies on masonry after exposure to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 230, p. 116926, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116926>.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5628 - Code of practice for structural use of masonry. Part 1: Unreinforced masonry**. Londres, Inglaterra: 2005.

BROZOVSKY, J. Evaluation of frost resistance of calcium silicate masonry units with ultrasonic pulse and resonance methods. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, [s. l.], v. 50, n. 10, p. 607 – 615, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1134/S1061830914100039>.

BUCHANAN, A. H.; ABU, A. K. **Structural design for fire safety**. 2. ed. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd, 2017.

CENTER OF FIRE STATISTICS (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF FIRE AND RESCUE SERVICES). **World fire statistics**. [S. l.], 2022. Disponível em: https://www.ctif.org/sites/default/files/2022-08/CTIF_Report27_ESG_0.pdf. Acesso em: 6 out. 2022.

COLVILLE, J.; MILTENBERGER, M. A.; WOLDE-TINSAE, A. M. Hollow concrete masonry modulus of elasticity. **6th North American Masonry Conference**, Philadelphia, Pennsylvania, p. 1195–1208, 1993.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR - MATO GROSSO DO SUL. **Edifício Joelma**. Mato Grosso do Sul, 2018. Disponível em: <http://www.bombeiros.ms.gov.br/completou-44-anos-nesta-quinta-feira-um-dos-fatos-mais-assustadores-da-historia-do-brasil-que-foi-o-incendio-no-edificio-joelma-em-sao-paulo/edificio-joelma/>. Acesso em: 6 out. 2022.

DILEK, U. Ultrasonic Pulse Velocity in Nondestructive Evaluation of Low Quality and Damaged Concrete and Masonry Construction. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 337–344, 2007. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2007\)21:5\(337\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2007)21:5(337)).

DIONÍSIO, A. *et al.* Evaluation of combined effects of real-fire and natural environment in a building granite. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 277, p. 15–24, 2021.

DUPIM, R. H. **Análise da resistência residual de compressão de blocos, prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto submetidos à situação de incêndio**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-22082019-125341/>.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-2: Actions on Structures Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire**. Bruxelas: Eurocode 2, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2: Design of Concrete Structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design**. Bruxelas: Eurocode 2, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1996-1.1: Design of masonry structures. Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures**. Bruxelas: Eurocode 6, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1996-1.2: Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design**. Bruxelas: Eurocode 6, 2005.

FARINHA, C. B.; BRITO, J.; VEIGA, R. Assessment of glass fibre reinforced polymer waste reuse as filler in mortars. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 210, p. 1579–1594, 2019.

FENACOR. **45 anos do incêndio no edifício Andraus**. [S. l.], 2017. Disponível em: <http://www.fenacor.org.br/premiodejornalismo/conteudo/materias/3798/k4n0ur2b.zcd.pdf>. Acesso em: 6 out. 2022.

FERNANDES NETO, J. A. D. **Avaliação ultrassônica de elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos na ausência e presença de tensões uniaxiais de compressão**. 2023. 198 f. Tese (Doutorado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023. Disponível em: https://producaocientifica.eesc.usp.br/producao/2023DO_JoseAnchietaDamascenoFernandesNeto.pdf.

FERNANDES NETO, J. A. D. *et al.* Effects of post-fire curing on the residual mechanical behavior of cement-lime masonry mortars. **Construction and Building Materials**, Univ Sao Paulo, Sch Engn Sao Carlos, Ave Trabalhador Saocarlenso 400, BR-13566590 Sao Carlos, SP, Brazil, v. 327, 2022.

FERNANDES NETO, J. A. D. **Estudo experimental do comportamento de elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos em situação de incêndio**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-10082020-084728/>.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P.E. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 255–259, 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946504000307>.

GOMES, N. S. **A resistência das paredes de alvenaria**. 1983. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

GONDIM, R. M. L. **Investigação do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria estrutural formados por blocos de concreto**. 2022. 185 f. Tese (Doutorado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

GRUBBS, F. E. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. **Technometrics**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 1, 1969. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1266761?origin=crossref>.

GÜNAYDIN, M. *et al.* Structural condition assessment of a historical masonry school building using experimental and numerical methods. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 1083 – 1113, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13349-022-00597-x>.

HAACH, V. G.; VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P. B. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 6, p. 2980–2987, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011>.

HARTMANN, R; BURKERT, T. Non-loadbearing partitions of unfired clay masonry - Fire behaviour tests. **MAUERWERK**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 26–37, 2018.

HENRY, M.; SUZUKI, M.; KATO, Y. Behavior of Fire-Damaged Mortar under Variable Recuring Conditions. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 108, n. 3, p. 281–289, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.14359/51682493>.

INSTITUTO SPRINKLER BRASIL. **Notícias de incêndios publicadas pela imprensa de 2012 a 2022**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://sprinklerbrasil.org.br/estatisticas-gerais/>. Acesso em: 5 out. 2022.

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

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

IŞIK, N.; HALIFEOĞLU, F. M.; İPEK, S. Nondestructive testing techniques to evaluate the structural damage of historical city walls. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 253, 2020.

JARFEL. **Tudo sobre Blocos de Concreto**. [S. l.], 2018. Disponível em:

<https://www.jarfel.com.br/informativos/tudo-sobre-blocos-de-concreto/>. Acesso em: 30 mar. 2024.

KHALIQ, W.; BASHIR, M. F. High temperature mechanical and material properties of burnt masonry bricks. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, NICE (SCEE), National University of Sciences and Technology (NUST), Islamabad, 44000, Pakistan, v. 49, n. 12, p. 5195–5208, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0854-0>.

KIMURA, E. F. A. **Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio**. 2009. 225 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

KIRAN, T. *et al.* Performance of clay masonry prisms with light weight plaster exposed to standard fire exposure. **Fire and Materials**, Department of Civil Engineering, Karunya Institute of Technology and Sciences, Coimbatore, Índia, v. 47, n. 1, p. 99–119, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fam.3081>.

KODUR, V. K. R.; HARMATHY, T. Z. Properties of Building Materials. *In*: SFPE HANDBOOK OF FIRE PROTECTION ENGINEERING. New York, NY: Springer New York, 2016. p. 277–324. *E-book*. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-2565-0_9.

KOU, S.; ZHAN, B.; POON, C. Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. **CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, v. 36, p. 566–571, 2012.

LEAL, D. F. **Análise experimental e numérica sobre alvenaria estrutural de blocos de concreto, com e sem revestimento, em situação de incêndio**. 2022. Tese (Doutorado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

LÜBECK, A. **Comportamento mecânico e influência da argamassa no modo de ruptura da alvenaria estrutural**. 2016. 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

MAKOOND, N. *et al.* Relationship between the static and dynamic elastic modulus of brick masonry constituents. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 259, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820323916>.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2. ed. FL: CRC Press, 2004.

MARVILA, M. T. *et al.* Correlation between the properties of structural clay blocks obtained by destructive tests and Ultrasonic Pulse Tests. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 26, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710219304590>.

MCCANN, D. M.; FORDE, M. C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. **NDT & E International**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 71–84, 2001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869500000323>.

MEDEIROS, W. A. **Comportamento de blocos estruturais de concreto com diferentes**

agregados sob altas temperaturas. 2022. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A.; MORENO JUNIOR, A. L. Residual mechanical properties of hollow concrete blocks with different aggregate types after exposure to high temperatures. **Construction and Building Materials**, Federal University of São Carlos, Dept. of Civil Engineering, Rod. Washington Luis, KM 235, SP, São Carlos, Brazil, v. 377, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131085>.

MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A.; MORENO JUNIOR, A. L. Test methodology for determining the mechanical properties of concrete blocks at high temperatures. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 55, n. 2, p. 61, 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, properties and materials.** New York: McGraw-Hill, 2008.

MESQUITA, E. *et al.* Non-destructive characterization of ancient clay brick walls by indirect ultrasonic measurements. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 19, p. 172–180, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710218300147>.

MOHAMAD, G. **Mecanismo de ruptura da alvenaria de blocos à compressão.** 2007. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil/Estruturas) - Universidade do Minho, Guimarães, 2007.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. A Ação do fogo sobre os componentes do concreto. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 47–55, 2011. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/4057>.

MORENO JUNIOR, A. L.; MOLINA, J. C. Considerações de interesse sobre a avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio: contribuições à revisão da NBR 5628:2001. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 37–53, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000400004>.

MOURA, M. A. N. *et al.* Post-fire prediction of residual compressive strength of mortars using ultrasonic testing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 416, n. August 2023, 2024.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION - NFPA. **All about fire.** [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/Press-Room/Reporters-Guide-to-Fire-and-NFPA/All-about-fire>. Acesso em: 6 out. 2022.

NOOR-E-KHUDA, Sarkar; ALBERMANI, Faris. Mechanical properties of clay masonry units: Destructive and ultrasonic testing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 219, p. 111–120, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.166>.

NUNES, J. M. B. **Uma abordagem numérica e analítica para determinação da temperatura e do momento fletor crítico em vigas de aço em situação de incêndio.** 2005. 186 f. Tese (Doutorado em estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

OLIVEIRA, L. M. F. **Estudo teórico e experimental do comportamento das interfaces verticais de paredes interconectadas de alvenaria estrutural.** 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-30072014-085747/>.

OLIVEIRA, R. G. *et al.* Experimental and numerical analysis on the structural fire behaviour of three-cell hollowed concrete masonry walls. **Engineering Structures**, Civil Engineering Department, Coimbra University, Portugal, v. 228, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111439>.

OLIVEIRA, R.; BRITO, J.; VEIGA, R. Reduction of the cement content in rendering mortars with fine glass aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 95, p. 75–88, 2015.

OLIVEIRA JUNIOR, V. **Recomendações para projeto de edifícios em alvenaria estrutural**. 1992. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

PACHTA, V.; KONOPI, S.; STEFANIDOU, M. The influence of brick dust and crushed brick on the properties of lime-based mortars exposed at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, Laboratory of Building Materials, School of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, PO Box:482, Thessaloniki, 54124, Greece, v. 296, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123743>.

PARSEKIAN, G. A.; MEDEIROS, W. A.; SIPP, G. High-rise concrete and clay block masonry building in Brazil. **Mauerwerk**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 260–272, 2018.

PHAM, D. T. *et al.* Test of loaded and unloaded natural stone masonry walls exposed to fire. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 84 avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne, Marne-la-Vallée Cedex 2, 77447, France, v. 55, n. 9, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02058-9>.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO - CORPO DE BOMBEIROS. **Instrução Técnica N° 08/2018 - Segurança estrutural contra incêndio**. São Paulo: 2018.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo: Pini, 2003.

RAMESH, M.; AZENHA, M.; LOURENÇO, P. B. Mechanical properties of lime–cement masonry mortars in their early ages. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 1–14, 2019.

REGOBELLO, R. **Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-13042007-101042/>.

RESENDE, R. M. L. G. **Avaliação dos efeitos da danificação e da acustoelasticidade sobre a velocidade de pulso ultrassônico em corpos de prova de concreto submetidos a compressão uniaxial**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-21052018-121753/>.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and applications Part 2: Stress-strain relation. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 40, n. 9, p. 855–864, 2007.

RODOVALHO, F. S. **Simulação numérica de blocos e prismas de alvenaria em situação de**

incêndio. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-27082018-123952/>.

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

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

SAJID, Sikandar H *et al.* Strength estimation of concrete masonry units using stress-wave methods. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 163, p. 518–528, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817324443>.

SCHIAVON, K. F. B. **Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SEITO, A. I. *et al.* **A segurança contra incêndios no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SILVA, V. P. Considerações sobre as normas brasileiras de estruturas em situação de incêndio. **Revista Incêndio**, São Paulo, p. 52–57, 2007.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. São Paulo: Blusher, 2012.

SOARES, M. M. M. **Especificação, execução e controle de alvenaria estrutural em blocos cerâmicos de acordo com a NBR 15812**. 2011. 188 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

SOMBRA, T. N. **Aplicação do ensaio de ressonância acústica na caracterização mecânica de unidades de alvenaria estrutural**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

SOMBRA, T. N.; HAACH, V. G. Application of Acoustic Tests for the Mechanical Characterization of Hollow Masonry Units. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 34, n. 6, 2022.

STANCATO, A. C.; BERALDO, A. L. Portland Cement-Residues-Polymers Composites and Its Application to the Hollow Blocks Manufacturing. **Open Journal of Composite Materials**, [s. l.], v. 03, n. 01, p. 1–6, 2013.

VASANELLI, E. *et al.* A non destructive testing method for masonry by using UPV and cross validation procedure. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [s. l.], v. 53, n. 6, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01568-8>.

VASANELLI, E. *et al.* High temperature effects on the properties of a high porosity calcareous stone building material. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [s. l.], v. 26, n. 13, p. 6733–6745, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1960897>.

WANG, Y. C. **Steel and Composite Structures**. 1. ed. London: CRC Press, 2002. *E-book*. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781482267693>.

WU, Y. *et al.* Monitoring the Deterioration of Masonry Relics at a UNESCO World Heritage Site. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 25, n. 8, p. 3097 – 3106, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1716-z>.

YAN, R. *et al.* Comparative evaluation of fire resistance of partition wall blocks prepared with waste materials. **Journal of Cleaner Production**, Department of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China, v. 182, p. 156–165, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.020>.

ZHANG, Y *et al.* Impact factors analysis on the thermal performance of hollow block wall. **Energy and Buildings**, Southeast Univ, Sch Energy & Environm, Nanjing 210096, Jiangsu, Peoples R China, v. 75, p. 330–341, 2014.

ZIELIŃSKA, Monika; RUCKA, Magdalena. Non-destructive assessment of masonry pillars using ultrasonic tomography. **Materials**, [s. l.], v. 11, n. 12, p. 1–16, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma11122543>.

