



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

HELENA ARIAS LARA LEITE

**ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO – PROPOSTA DE AVALIAÇÃO COM
VISTAS À NORMATIZAÇÃO**

CAMPINAS

2018

HELENA ARIAS LARA LEITE

**ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO – PROPOSTA DE AVALIAÇÃO COM
VISTAS À NORMATIZAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil, na área de Estruturas e Geotécnica.

Orientador: Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO OU TESE DEFENDIDA PELA ALUNA HELENA ARIAS LARA LEITE E ORIENTADA PELO PROF. ARMANDO LOPES MORENO JUNIOR

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES, 01-P-04376-2015

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8158-5191>

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

L536a	<p>Leite, Helena Arias Lara, 1990- Alvenaria estrutural em situação de incêndio - Proposta de avaliação com vistas à normatização / Helena Arias Lara Leite. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.</p> <p>Orientador: Armando Lopes Moreno Junior. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.</p> <p>1. Alvenaria estrutural. 2. Incêndios. I. Moreno Junior, Armando Lopes, 1964-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.</p>
-------	---

1 Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Structural masonry submitted to fire - An evaluation proposition aiming towards standardization

Palavras-chave em inglês:

Structural masonry

Fire

Área de concentração: Estruturas e Geotécnica

Titulação: Mestra em Engenharia Civil **Banca examinadora:**

Armando Lopes Moreno Junior [Orientador]

Guilherme Aris Parsekian

Isaías Vizotto

Data de defesa: 30-01-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**Alvenaria Estrutural em Situação de Incêndio – Proposta de
Avaliação com Vistas à Normatização**

Helena Arias Lara Leite

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior
Presidente e Orientador(a)/Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Isaías Vizotto
Universidade Estadual de Campinas

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se
no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 30 de janeiro de 2018

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Rogério e Bel, por me apoiarem nessa empreitada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio moral e financeiro; ao meu orientador, Armando, pelo apoio técnico; à Capes, pelo apoio financeiro.

RESUMO

O Brasil carece de uma legislação sobre alvenaria estrutural em situação de incêndio. Por conta disso, o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (2011) recomenda que se faça esse dimensionamento de acordo com as recomendações do Eurocode 6 (2005) ou norma internacional similar. Com o intuito de subsidiar futuras discussões sobre uma normatização nacional, neste trabalho são apresentados os procedimentos de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio em vigor na África do Sul, nos Estados Unidos, na Austrália, na Nova Zelândia e na Europa. Também são apresentados os principais parâmetros envolvidos na resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto. Uma simulação numérica preliminar foi feita para verificar a influência do tipo de agregado na resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico de um bloco de concreto; e constatou-se que, aparentemente, por alterar a condutividade térmica do bloco, o tipo de agregado influencia sim na resistência ao fogo do mesmo. Ao final, sem deixar ao largo o questionamento da aplicabilidade dessas cinco normas à situação brasileira, por conta das diferenças de materiais utilizados tanto nos blocos quanto nos acabamentos, sugere-se mesclar o que há de interessante nesses códigos internacionais, de forma gradativa, na elaboração de futura norma brasileira sobre o assunto.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural. Incêndio.

ABSTRACT

In Brazil, there is no standard regarding the design of masonry walls in fire situations. According to the Fire Department of São Paulo State (2011), either the Eurocode 6 (2005) or an equally recognized international Standard should be used in such a situation. In this work, design specifications for masonry walls in situation of fire are presented, according to the standard requirements in South Africa, in the United States of America, in Australia, in New Zealand and in Europe. The main parameters involved in masonry walls' fire resistance are also presented. A simulation of a concrete unit with three different aggregate types was made in order to check if the aggregate type has any sort of influence in the fire resistance of the unit, considering the insulation criterion; and it was observed that because it alters the thermal conductivity of the unit, apparently the aggregate type has an influence in its fire resistance. One might question the applicability of these codes in the Brazilian context, due to the different materials the structural units are made of and the rendering applied on the walls. Taking that into account, we suggest that the applicable elements of these international standards should be gradually integrated into the development of a Brazilian standard.

Keywords: Masonry. Fire.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: (a) Subestrutura 1, (b) Subestrutura 2	24
Figura 2 - Superfícies de ruptura para uma parede de 20 cm de espessura, feita com blocos de concreto celular autoclavado (CCA), exposta ao fogo em diferentes períodos de tempo.....	29
Figura 3 – Esquema de termopares.....	30
Figura 4 – Principais etapas para ensaiar os blocos submetidos a altas temperaturas à compressão: a) extração do forno; b) medição da altura do cilindro; c) inserindo o cilindro no isolante térmico; d) execução do ensaio à compressão.	30
Figura 5 – Parede grossa não estrutural (Ensaio 2) após 360 minutos de exposição ao fogo, lado exposto.....	32
Figura 6 – Ruptura da parede no final do Ensaio 3. (a) Lado exposto. (b) Lado não exposto.	33
Figura 7 – Ruptura da parede no Ensaio 4, vista do lado não exposto ao incêndio.	33
Figura 8 – Flecha de uma parede estrutural ao final do ensaio de incêndio.....	39
Figura 9 – Geometria da seção transversal do cerâmico estrutural brasileiro	43
Figura 10 – Geometria da seção transversal de blocos cerâmicos estruturais americanos.....	43
Figura 11 – Esquema de pilar de alvenaria armada.....	47
Figura 12 - Adequabilidade estrutural de uma parede de blocos de concreto	57
Figura 13 - Adequabilidade estrutural para uma parede de blocos cerâmicos de 140 mm de espessura, apoiada em todas as extremidades.	57
Figura 14 – Valores do módulo de elasticidade em função da temperatura a serem usados para se determinar a resistência ao fogo através de cálculos matemáticos	62
Figura 15 – Valores da resistência à compressão em função da temperatura a serem usados para se determinar a resistência ao fogo através de cálculos matemáticos	62
Figura 16 – Ilustração de áreas da alvenaria a temperaturas até θ_1 , entre θ_1 e θ_2 e áreas estruturalmente ineficientes (acima de θ_2).....	69
Figura 17 – Momentos resultantes de excentricidades.....	71
Figura 18 – Comprimento mínimo de paredes enrijecedoras com aberturas	73

Figura 19 – Diagrama das definições usadas na Tabela 13	77
Figura 20 – Criação da interação entre a parte sólida (bloco) e a parte fluida (ar), no software ABAQUS.....	94
Figura 21 – Criação de um incêndio padrão em uma face de um bloco de concreto, no software ABAQUS.....	95
Figura 22 – Amplitudes correspondentes à curva de incêndio-padrão, no software ABAQUS.	96
Figura 23 – Isotermas de um bloco de concreto com agregado granito, submetido a um incêndio padrão em uma das faces, no software ABAQUS.....	97
Figura 24 – Isotermas de um bloco de concreto com agregado calcário, submetido a um incêndio padrão em uma das faces, no software ABAQUS.....	97
Figura 25 – Isotermas de um bloco de concreto com agregado basalto, submetido a um incêndio padrão em uma das faces, no software ABAQUS.....	98
Figura 26 – Falha do critério isolamento térmico para um bloco com agregado calcário no software ABAQUS.....	99
Figura B.1 – Ilustração de áreas da alvenaria a temperaturas até θ_1 , entre θ_1 e θ_2 e áreas estruturalmente ineficientes (acima de θ_2).....	126
Figura B.2 - Adequabilidade estrutural de uma parede de blocos de concreto	130
Figura B.3 - Adequabilidade estrutural para uma parede de blocos cerâmicos de 140 mm de espessura, apoiada em todas as extremidades.	130
Figura C.1 – Geometria da seção transversal do cerâmico estrutural brasileiro	138
Figura C.2 – Geometria da seção transversal de blocos cerâmicos estruturais americanos ...	139
Figura C.3 – Esquema de pilar de alvenaria armada	139
Figura C.4 – Paredes múltiplas.....	143
Figura C.5 – Ilustração de áreas da alvenaria a temperaturas até θ_1 , entre θ_1 e θ_2 e áreas estruturalmente ineficientes (acima de θ_2).....	145
Figura C.6 – Paredes duplas expostas ao fogo	148
Figura C.7 - Adequabilidade estrutural de uma parede de blocos de concreto	149

Figura C.8 - Adequabilidade estrutural para uma parede de blocos cerâmicos de 140 mm de espessura, apoiada em todas as extremidades 149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência ao fogo de blocos de concreto e cerâmico	40
Tabela 2 - Resistência ao fogo para alvenarias.....	42
Tabela 3 – Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural	44
Tabela 4 – Paredes de alvenaria de blocos de concreto.....	46
Tabela 5 - Pilares de alvenaria armada.....	46
Tabela 6 – Vergas de alvenaria armada.....	47
Tabela 7 – Paredes de alvenaria de blocos cerâmicos	47
Tabela 8 - Fator multiplicador da espessura de acabamentos aplicados no lado não exposto ao fogo.....	50
Tabela 9 – Resistência ao fogo atribuída aos materiais de acabamento na face exposta ao fogo de paredes de blocos de concreto ou cerâmica.....	50
Tabela 10 – Índice de esbeltez máximo para adequabilidade estrutural	54
Tabela 11 – Espessura equivalente mínima (mm) de paredes considerando o isolamento térmico	56
Tabela 12 – Mínima espessura equivalente da parede para resistência segundo o critério de isolamento térmico	59
Tabela 13 – Cobrimento mínimo da armadura ou cabo protendido para estabilidade de paredes	60
Tabela 14 - Espessura mínima de paredes carregadas (critério REI) para concreto de agregado normal e leve	65
Tabela 15 - Espessura mínima de paredes carregadas (critério REI) para alvenaria cerâmica	66
Tabela 16 - Valores das temperaturas θ_1 e θ_2 em função dos materiais de execução da parede de alvenaria.....	68
Tabela 17 – Intervalos do coeficiente de deformação final para diferentes tipos de blocos de alvenaria.....	76
Tabela 18 – Coeficiente de rigidez, ρ_t , para paredes enrijecidas por <i>piers</i> (pequenas paredes enrijecedoras).....	77

Tabela 19 – Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF), em minutos.....	79
Tabela 20 – Classificação das edificações quanto à sua ocupação.....	80
Tabela 21 – Espessuras equivalentes dos blocos de concreto brasileiros.....	81
Tabela 22 – Resistência ao fogo dos blocos brasileiros segundo o código sul-africano	82
Tabela 23 – Resistência ao fogo, em minutos, para os blocos de concreto brasileiros, em função do tipo de agregado utilizado em sua fabricação.....	83
Tabela 24 – Resistência ao fogo, em minutos, para uma parede de 3m x 3m feita com blocos de concreto brasileiros, em função da porcentagem de agregados basálticos nos blocos, segundo o critério de adequabilidade estrutural do código australiano	84
Tabela 25 – Resistência ao fogo, em minutos, para os blocos de concreto brasileiros, em função de sua densidade, segundo o critério de isolamento do código australiano	85
Tabela 26 – Resistência ao fogo dos blocos brasileiros segundo o critério de isolamento do código neozelandês.....	86
Tabela 27 – Classificação dos blocos em grupos	87
Tabela 28 – Classificação dos blocos brasileiros em grupos.....	87
Tabela 29 – Resistência ao fogo, em minutos, para o critério EI de blocos de concreto brasileiros	88
Tabela 30 – Resistência ao fogo, em minutos, para o critério REI de blocos de concreto de silicato de cálcio brasileiros.....	89
Tabela 31 – Resistência ao fogo, em minutos, para o critério REI de blocos de concreto brasileiros	89
Tabela 32 – Resistência ao fogo, em minutos, para o critério REI de blocos de concreto celular autoclavado (CCA) brasileiros	90
Tabela 33 – Propriedades térmicas de concretos com diferentes tipos de agregados.	94
Tabela A.1 – Espessuras equivalentes dos blocos de concreto brasileiros.....	113
Tabela A.2 – Paredes de alvenaria de blocos de concreto.....	114
Tabela A.3 - Tempo atribuído aos materiais de acabamento na face exposta ao fogo de paredes de blocos de concreto ou cerâmica	115

Tabela A.4 - Fator multiplicador da espessura de acabamentos aplicados no lado não exposto ao fogo	116
Tabela A.5 – Índice de esbeltez máximo para resistência mecânica (critério R).....	117
Tabela B.1 - Resistência ao fogo de blocos de concreto e cerâmico.....	121
Tabela B.2 - Resistência ao fogo para alvenaria de concreto	122
Tabela B.3 – Paredes de alvenaria de blocos cerâmicos	122
Tabela B.4 - Espessura mínima de paredes carregadas (critério REI) para concreto de agregado normal e leve	125
Tabela C.1 - Resistência ao fogo de blocos de concreto e cerâmico.....	138
Tabela C.2 - Resistência ao fogo para alvenarias	138
Tabela C.3 – Paredes de alvenaria de blocos de concreto	139
Tabela C.4 - Pilares de alvenaria armada	139
Tabela C.5 – Vergas de alvenaria armada	140
Tabela C.6 – Paredes de alvenaria de blocos cerâmicos	140
Tabela C.7 - Fator multiplicador da espessura de acabamentos aplicados no lado não exposto ao fogo	141
Tabela C.8 - Tempo atribuído aos materiais de acabamento na face exposta ao fogo de paredes de blocos de concreto ou cerâmica	142
Tabela C.9 - Espessura mínima de paredes carregadas (critério REI) para concreto denso e leve	144
Tabela C.10 - Espessura mínima de paredes carregadas (critério REI) para alvenaria cerâmica	144
Tabela C.11 - Valores das temperaturas θ_1 e θ_2 em função dos materiais de execução da parede de alvenaria.....	146
Tabela C.12 – Índice de esbeltez máximo para adequabilidade estrutural.....	147
Tabela C.13 – Espessura mínima de paredes considerando o isolamento térmico	147

SUMÁRIO

1	Informações para Biblioteca Digital	3
2	Introdução	19
2.1	Objetivos	20
3	ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	21
3.1	Comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio.....	21
3.2	Recomendações nacionais de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio	40
3.3	CÓDIGO SUL-AFRICANO: SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD (SANS 10145) – CONCRETE MASONRY CONSTRUCTION (2013)	43
3.4	CÓDIGO AMERICANO: ACI/TMS 216.1-14 – 14 – CODE REQUIREMENTS FOR DETERMINING FIRE RESISTANCE OF CONCRETE AND MASONRY CONSTRUCTION ASSEMBLIES (2014)	45
3.4.1	Espessura equivalente mínimas das paredes	45
3.5	CÓDIGO AUSTRALIANO: AUSTRALIAN STANDARD 3700 - MASONRY STRUCTURES (2011).....	51
3.5.1	Dimensionamento de acordo com o método tabular	53
3.5.2	Dimensionamento de acordo com dados experimentais	56
3.6	CÓDIGO NEOZELANDÊS: NEW ZEALAND STANDARD (NZS) 4320 – DESIGN OF REINFORCED CONCRETE MASONRY STRUCTURES (2004).....	58
3.7	CÓDIGO EUROPEU: EUROCODE 6: EN 2005-1.2 – DESIGN OF MASONRY STRUCTURES. PART 1-2 – GENERAL RULES – STRUCTURAL FIRE DESIGN (2005)	63
3.7.1	Avaliação por método tabular	64
3.7.2	Avaliação por métodos de dimensionamento analíticos simplificados...	67
4	Cálculo dos blocos usuais no Brasil de acordo com os métodos descritos nos itens 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7	78

4.1	Segundo o Código Sul-Africano	81
4.2	Segundo o Código Americano	82
4.3	Segundo o Código Australiano.....	83
4.3.1	De acordo com o critério de resistência mecânica	83
4.3.2	De acordo com o critério de isolamento	85
4.4	Segundo o Código Neozelandês.....	85
4.5	Segundo o Código Europeu	86
4.6	Comparação.....	91
5	SIMULAÇÃO NUMÉRICA PRELIMINAR	93
6	Considerações Finais.....	101
7	Referências	105
Anexo A. Alvenaria em Situação de Incêndio: Proposta de Anexo Para NBR 15961		109
	Sumário	109
	Introdução.....	109
A.1	Objetivo	109
A.2	Referências Normativas	110
A.3	Definições.....	110
A.4	Símbolos	111
A.5	Condições Básicas para o Dimensionamento Estrutural.....	111
A.6	Dimensionamento pelo Método Tabelado	112
Anexo B. Artigo apresentado no 3º CILASCI (Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança Contra Incêndio) e publicado em seus anais: Diferentes Legislações para Alvenaria Estrutural em Situação de Incêndio.....		118
	Resumo	118
	Abstract.....	118
B.1	Introdução	119

B.2 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) da Alvenaria	120
B.3 Código Americano: ACI/TMS 216.1-14 – 14 – Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies (2014)	121
B.3.1 Espessuras equivalentes mínimas das paredes.....	121
B.3.2 Paredes múltiplas de alvenaria de blocos de concreto e/ou cerâmica....	124
B.4 Eurocode 6 – EN 1996 – 1-2 (1996).....	124
B.4.1 Avaliação por método tabular	125
B.4.2 Modelo simplificado de cálculo (Anexo C)	125
B.5 Código da Construção Australiano	127
B.5.1 Dimensionamento de acordo com o método tabelado.....	128
B.5.2 Dimensionamento de acordo com dados experimentais	129
B.6 Conclusões.....	131
B.7 Referências	133
Anexo C. Artigo Publicado na Revista Ambiente Construído:	134
Dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio: contribuição à futura normatização nacional	134
<i>Design of masonry walls in situations of fire: a contribution for a future Brazilian standard</i>	<i>134</i>
Resumo	134
Abstract.....	134
C.1 Introdução	135
C.2 Comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio.....	135
C.3 Recomendações nacionais de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio	137
C.4 Código americano: ACI/TMS 216.1-14 (2014)	138
C.4.1 Espessura equivalente mínimas das paredes	138

C.4.2 Espessura equivalente das paredes de alvenaria (T_{ea})	140
C.4.3 Paredes múltiplas de alvenaria de blocos de concreto e/ou cerâmica ...	142
C.5 Código europeu: Eurocode 6 – EN 1996-1.2 (EUROPEAN..., 2005)	143
C.5.1 Avaliação por método tabular	143
C.5.2 Avaliação por métodos de dimensionamento analíticos simplificados ...	145
C.6 Código australiano: AS 3700 (AUSTRALIAN..., 2011)	146
C.6.1 Dimensionamento de acordo com o método tabelado.....	146
C.7 Considerações finais.....	150
C.8 Referências	151

2 INTRODUÇÃO

A resistência ao fogo é o período de tempo em que um elemento estrutural permanece exercendo as funções para as quais foi projetado, sob as circunstâncias de um incêndio.

De modo geral, os procedimentos adotados para o dimensionamento de um elemento estrutural em situação de incêndio englobam a verificação da resistência mecânica (R), da estanqueidade (E) e do isolamento térmico (I). Para obedecer a esses critérios, o elemento estrutural não deve alcançar a ruptura, não deve apresentar trincas ou aberturas suficientes que permitam a passagem de gases ou chamas e não deve apresentar um aumento de temperatura, na face não exposta, acima da temperatura inicial, superior em média a 140°C e em qualquer ponto a 180°C.

Quanto ao tempo em que a edificação deve se manter resistente ao fogo, deve-se ater a limites estabelecidos, a consenso na sociedade, que garantam a fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança, que garantam a segurança das operações de combate ao incêndio e que minimizem danos a edificações adjacentes e à infraestrutura pública (padronizados nacionalmente pela ABNT NBR 14432:2001). Esse tempo é denominado de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).

Para a alvenaria empregada como estrutura, é importante observar que, quase sempre, as paredes devem atender aos três critérios básicos no dimensionamento de estruturas em situação de incêndio. Entretanto, nacionalmente, talvez pela inexistência de procedimentos normatizados de dimensionamento, o que se observa, até então, é que a questão estrutural (R) tem sido colocada em segundo plano, atendo-se somente, quando existentes, às verificações de isolamento térmico (I) e de estanqueidade (E). A questão estrutural não deve ser vista como um item menos importante, pois a estrutura da edificação não deve alcançar a ruptura durante a citada fuga dos usuários.

A normatização nacional sobre o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio é bem atual. Destacam-se a ABNT NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, a ABNT NBR 14432:2000 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos e a ABNT NBR 14323:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Quanto à alvenaria estrutural em situação de incêndio, ainda não existe normatização nacional sobre o assunto. Tal fato justifica a recomendação do Corpo de

Bombeiros do Estado de São Paulo, em sua Instrução Técnica 08/2011, de que seja empregado o *Eurocode 6* (2005) ou norma similar reconhecida internacionalmente.

2.1 Objetivos

Este trabalho tem o intuito de subsidiar futuras discussões sobre uma normatização nacional.

3 ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Nesta seção são apresentados resultados de pesquisas em relação a alvenaria estrutural em situação de incêndio, as recomendações nacionais para seu dimensionamento, e depois, serão apresentadas as recomendações dadas em códigos internacionais. Primeiro aquelas que não levam em consideração o carregamento das paredes (sul-africano e americano), seguidos pelo australiano, que considera o carregamento de forma não explícita, e depois os dois códigos que consideram explicitamente a parede com função estrutural: o neozelandês e, por último, o europeu, o mais completo de todos.

3.1 Comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio

A alvenaria estrutural é composta por componentes de alvenaria (blocos), argamassa de assentamento e eventual armadura de aço. O comportamento resistente ao fogo da alvenaria estrutural depende, logicamente, do comportamento resistente a elevadas temperaturas de cada um desses componentes, isoladamente e em conjunto, considerando-se, ainda, a influência da resistência de um eventual revestimento.

Nacionalmente, ainda se caminha a passos lentos na avaliação do comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio. Pouco se conhece, no país, sobre as propriedades térmicas e mecânicas, sob temperaturas elevadas, dos materiais componentes da alvenaria estrutural. Da mesma forma, quando se avalia resultados existentes sobre o comportamento de paredes de alvenaria em situação de incêndio, pode-se notar a insignificância numérica de resultados nacionais, principalmente de paredes avaliadas sob carga.

Rosemann (2011) ensaiou paredes de alvenaria cerâmica quanto ao isolamento térmico, não carregadas, alternando a presença de revestimentos de argamassa e o preenchimento dos vazios com areia. O autor constatou que as paredes sem revestimento e sem preenchimento apresentaram resistência ao fogo de 106 minutos. Com a aplicação de revestimento de argamassa nas faces da parede, obteve-se um aumento de 80% na resistência ao fogo e, com o preenchimento com areia nos principais vazios dos blocos, o acréscimo verificado foi de 100%. Constatou-se, portanto, que o emprego de revestimentos nas faces e o preenchimento dos vazios com areia representam boas

alternativas, a um custo relativamente baixo, para aumentar a resistência ao fogo de paredes de alvenaria cerâmica. Observa-se que o autor só avaliou a resistência de paredes quanto ao critério de isolamento.

Rigão (2012) ensaiou pequenas paredes de alvenaria cerâmica carregadas (com restrição de deslocamento vertical). Ele constatou que, em relação às argamassas, temperaturas de 900 °C são suficientes para promover sua completa deterioração e que o tipo de agregado nela utilizado tem influência na perda de massa e estabilidade do material. Vale ressaltar que, nos ensaios feitos por esse autor, a taxa de aquecimento do forno não seguiu a curva de incêndio-padrão (ISO 834). Em relação às paredes, foi constatado que houve, no transcorrer do ensaio, devido ao gradiente térmico e à restrição de deslocamento vertical imposta, um aumento de carga considerável. Também se constatou que, em todas as paredes, houve um atraso, a partir do início do ensaio, de aproximadamente 20 minutos, de início do incremento de carga mencionado. Tal atraso ocorreu porque, durante o período inicial do ensaio, as temperaturas do interior da parede e de sua face não aquecida mantiveram-se praticamente inalteradas (por conta de sua inércia térmica) e, portanto, ainda não existiam tensões térmicas significativas na parede.

Internacionalmente, embora muito poucos quando comparados aos existentes para o aço ou para o concreto armado, existem pesquisadores interessados no comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio. A seguir, serão citados resultados observados por alguns deles.

Bailey (2004) afirma que o colapso de uma parede de alvenaria em situação de incêndio, quando ocorre, é geralmente devido aos carregamentos impostos pelas deformações das estruturas ou elementos estruturais adjacentes a ela. O autor ainda lembra que não se deve extrapolar os resultados de ensaios em paredes com menos de três metros de altura para paredes maiores, pois, neste último caso, seu deslocamento lateral a meia-altura (flecha ou deflexão) cresceria devido ao efeito da curvatura térmica e, portanto, elas colapsariam antes de paredes com alturas menores ou iguais a três metros.

Nadjai *et al.* (2006) lembram que estruturas de grandes dimensões são raramente alvos de experimentos, por conta do custo e das limitações físicas dos equipamentos existentes (fornos). Portanto, há pouca evidência experimental relacionando a resistência ao fogo de componentes individuais (blocos ou prismas) à resistência ao fogo da parede. Simulações numéricas apresentam-se como uma solução para as limitações que existem nos experimentos quanto ao tamanho da amostra.

Para Nadjai *et al.* (2006), em elementos de compartimentação, como paredes de alvenaria, o fogo está geralmente em apenas um lado. A parede irá, portanto, curvar-se, devido à expansão térmica diferencial. Esse fato, juntamente com a degradação das propriedades dos materiais, que se inicia em seu lado exposto ao fogo, pode resultar no colapso estrutural da parede, que depende das condições de vinculação de seus apoios, da magnitude de carga nela aplicada e de sua geometria.

Nadjai *et al.* (2006) desenvolveram um modelo em elementos finitos, que levou em consideração as não-linearidades geométrica e do material, e a fissuração e esmagamento usando o critério de falha tensão-deformação para alvenaria sob altas temperaturas. O modelo foi validado de acordo com um ensaio de uma parede de alvenaria cerâmica de dimensões 3 m x 3 m x 90 mm, com carregamento axial, feito por Gnanakrishnan (1989 *apud* Nadjai *et al.*, 2006). No ensaio, a parede possuía restrições de deslocamento e rotação em cima e embaixo, enquanto suas laterais eram livres para a expansão térmica. Com a validação de seu modelo numérico, os autores decidiram simular o efeito de um incêndio em duas subestruturas de um edifício: uma com incêndio em paredes centrais e uma com incêndio em paredes de canto (ver Figura 1, itens a e b, respectivamente). Foi considerado que, em situações reais, pode ocorrer de a parede não estar amarrada em superfícies adjacentes, mas apenas encostada, e os movimentos térmicos podem causar uma acomodação ou separação do contato nos apoios, conforme mostrado em ensaios anteriores. Nas duas subestruturas, foram considerados diferentes cenários: incêndio apenas no primeiro andar, incêndio nos dois andares e incêndio apenas no segundo andar. Foi constatado que a curvatura causada devido ao gradiente térmico de uma parede não foi afetada pela ocorrência de incêndio em uma parede acima ou abaixo. O deslocamento lateral nas paredes superiores foi significativamente maior que o das paredes inferiores uma vez que os níveis de tensão das superiores eram maiores, levando a maiores níveis de deformação. Nos casos em que o incêndio contemplava apenas um compartimento (primeiro e último casos), os deslocamentos nas paredes de cômodo vizinho eram insignificantes.

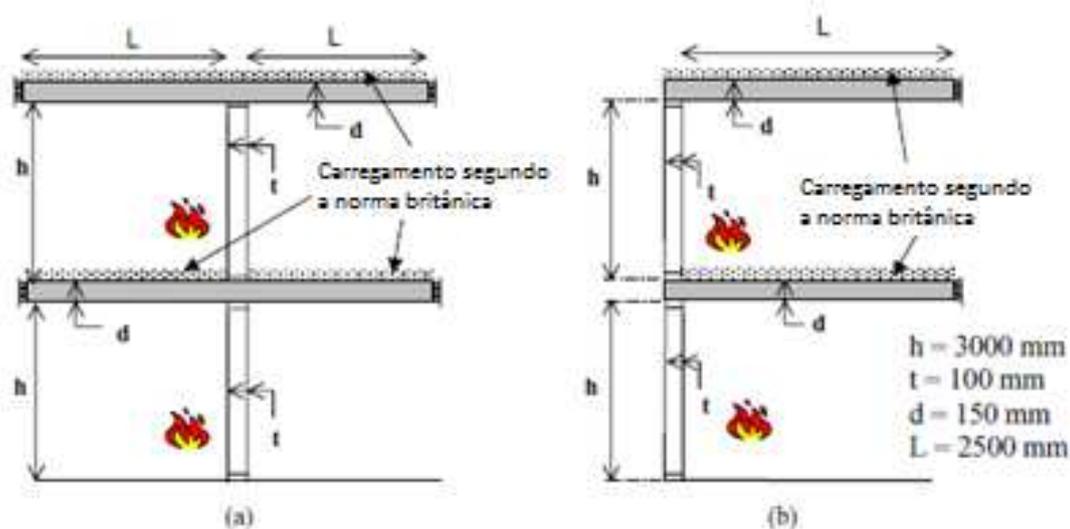


Figura 1: (a) Subestrutura 1, (b) Subestrutura 2

Fonte: Nadjai *et al.* (2006), Figure 13, p. 225 (traduzida para o português).

Nadjai *et al.* (2006) analisaram a subestrutura 1 e constataram que a situação mais crítica é quando o incêndio ocorreu nos dois andares, em que o esmagamento nos apoios da parede inferior provocou a falha desse sistema. A ocorrência de incêndio apenas no andar superior produziu a situação mais favorável, e a falha ocorreu na parede superior pelos efeitos $P-\Delta$. Na subestrutura 2, não foi observada falha por esmagamento (uma vez que a carga aplicada era menor que na subestrutura 1), e em todas as circunstâncias a falha se deu por causa da instabilidade após à curvatura causada pelo gradiente térmico. A situação mais favorável ocorreu quando o incêndio se deu apenas na parede inferior. Os autores concluíram que os estudos descritos por eles sugerem que o comportamento de paredes de alvenaria em situação de incêndio pode ser representado por subestruturas. Para que a previsão de deformações permanentes e esforços residuais resultantes de um incêndio seja possível, deve-se incluir as características de descarregamento da alvenaria. Tal previsão tem uma importância vital para se considerar a integridade estrutural em uma análise pós-incêndio.

Segundo Ingham (2009), sob temperaturas baixas para um incêndio, da ordem de 250°C a 300°C , os danos às paredes de alvenaria ficam geralmente restritos às mudanças de cor, como por exemplo, o avermelhamento de rochas e argamassas compostas por ferro. Entretanto, com a elevação da temperatura, uma parede de alvenaria estrutural sofrerá uma redução progressiva em sua resistência à compressão, por conta, principalmente, da deterioração da argamassa de assentamento. A temperaturas elevadas,

entre 600°C e 800°C, a resistência à compressão da maioria das rochas e argamassas é seriamente comprometida.

Ingham (2009) ainda faz um alerta sobre o eventual colapso das paredes de alvenaria estrutural durante eventual resfriamento com água (o que é usual nas operações de combate ao incêndio). Ao se resfriar com água a alvenaria aquecida pelo fogo, o choque térmico e eventual contração do material pelo resfriamento fazem com que ocorra um intenso panorama de fissuração na parede, com muitas fissuras e bastante abertas, o que pode colaborar, naturalmente, para o colapso da mesma.

Ingham (2009) avisa sobre o provável lascamento explosivo de alguns tipos de blocos cerâmicos quando em situação de incêndio, principalmente os que não são maciços.

Para Ingham (2009), estruturas de alvenaria de pedra ou cerâmica podem ser seriamente afetadas por incêndios. O dano tende a ficar concentrado ao redor de aberturas de portas e janelas, porém nada impede que o mesmo ocorra em outras regiões da parede ou mesmo que seja causado pela expansão ou colapso de outros elementos estruturais de edificação, próximos ou conectados à parede de alvenaria.

Em sua tese de doutorado, Ayala (2010) revisou os principais parâmetros envolvidos na resistência ao fogo de paredes de alvenaria compostas por blocos de concreto de agregados leves. O autor lembra que as propriedades mecânicas e térmicas dos vários elementos que constituem a alvenaria têm uma influência crucial no comportamento de paredes de alvenaria em situação de incêndio.

Sobre a resistência à compressão, Ayala (2010) reforça que há uma evidente redução nessa propriedade quando o material é submetido a altas temperaturas, e que os níveis dessa variação em função da temperatura devem ser obtidos para que se possa prever o comportamento de paredes de alvenaria nessas condições. O *Eurocode 6* (2005) diz que, nos concretos de agregado leve, a redução da resistência à compressão é geralmente menor que nos concretos de agregado normal, por conta, principalmente, de uma combinação das excelentes propriedades térmicas de seus agregados e da pasta de cimento.

Ayala (2010) lembra que a resistência à tração do concreto de agregado leve é reduzida quando o material é submetido a altas temperaturas. Tal redução se dá provavelmente devido à formação de micro e macro fissuras no concreto durante a fase de aquecimento, de acordo com Tanyildizi e Coskun (2008 *apud* Ayala, 2010).

Sobre o módulo de elasticidade, vários estudos sobre seu comportamento em altas temperaturas são citados por Ayala (2010); entre eles, o de Schneider (1988 *apud* Ayala, 2010), em que o autor ressalta a importância de diversos fatores, entre eles a proporção água/cimento, o tipo de agregado, o tipo de cimento, a proporção agregado/cimento, o nível de carregamento, a taxa de aquecimento, a taxa de evaporação, a idade do concreto, o tipo de cura e a selagem para se obter o módulo de elasticidade do concreto em altas temperaturas. De acordo com seus resultados, o concreto de agregado leve atingiu um alto valor residual de módulo de elasticidade, atribuído às excelentes propriedades dos agregados. Foram estudados concretos com vários tipos de agregados, e o módulo de elasticidade de todos eles apresentou uma perda conforme a temperatura aumentou: a 200 °C, o módulo é reduzido para 70 a 80%, a 400 °C, valores de 40 a 50% foram alcançados. Bažant e Kaplan (1996 *apud* Ayala, 2010) associaram essa redução à quebra da aderência na microestrutura do cimento quando as temperaturas aumentam e ao aumento da deformação imediata.

De acordo com Schneider (1988 *apud* Ayala, 2010), agregados leves são bem porosos, portanto têm uma maior habilidade de absorver água, e, por conta disso, sua resistência inicial pode ser significativamente afetada. O teor de umidade também está associado à variação da condutividade térmica em altas temperaturas. Justnes e Hansen (1990 *apud* Ayala, 2010) informam que um alto teor de umidade pode levar a um aumento da pressão nos poros e dos gradientes de temperatura durante um incêndio. E que às vezes o concreto de agregados leves se comporta de um jeito pior que o concreto usual durante um incêndio porque os agregados leves agem como receptáculos de vapor de água. Diversos autores (Loudon, 1979; Kong *et al.*, 1983; Lindgård e Hammer, 2004; Malhotra, 1984; Sancak e Simek, 2008; Masdal e Markussen, 1991; Hammer, 1990; *FIP Manual of Lightweight Aggregate Concrete*, 1983; Jahren, 1993, Schneider, 1983; Jensen *et al.*, 1995; *apud* Ayala, 2010) concordam em dizer que o teor de umidade é um dos principais fatores associados ao concreto na redução da resistência térmica, da condutividade térmica, da resistência mecânica, da permeabilidade, da pressão exercida pelos vapores, etc.; também é uma das principais causas do lascamento explosivo. Além disso, o teor de umidade é o principal fator que influencia a resistência ao fogo do concreto endurecido.

Sobre o coeficiente de expansão térmica, Ayala (2010) ressalta que tal propriedade é influenciada pelo tipo de agregado, mas que para concretos de agregados

leves, esse coeficiente é dominado pelo coeficiente da pasta de cimento, por ser mais rígida.

A condutividade térmica é definida, segundo Ayala (2010), como a propriedade dos materiais de conduzir calor. Em geral, concretos de agregados leves possuem valores mais baixos de condutividade térmica que concretos usuais, devido às propriedades dos agregados. De acordo com Gani (1997 *apud* Ayala, 2010), a condutividade térmica varia com o aumento da temperatura devido ao aumento da porosidade no concreto que ocorre quando a água que preenchia os poros evapora, causando uma desidratação da pasta de cimento. Em um incêndio, esses efeitos produzirão poros na superfície do concreto, os quais resultarão em uma camada que funcionará como isolante térmico, que reduzirá a taxa em que o concreto é aquecido. Na ACI 213 (1987 *apud* Ayala, 2010) está escrito que a condutividade térmica do concreto depende de sua massa e da pasta de cimento, mas que é influenciada pelo tipo de agregado e pelo teor de umidade.

Em dois trabalhos, um de Al Nahhas *et al.* (2007 *apud* Ayala, 2010) e outro de Meyer (2006 *apud* Ayala, 2010), é dito que tanto o formato quanto o material utilizado nos blocos de alvenaria influenciam o comportamento de paredes em um incêndio. Blocos maciços são mais estáveis que blocos vazados, pois são mais homogêneos. Os buracos dos blocos vazados dificultam a passagem de calor do lado quente para o lado frio - essa propriedade reduz o dano causado pelo fogo. Porém há um limite para a quantidade de furos, uma vez que muitos furos podem afetar a capacidade isolante da parede pela falta de material contido nele.

Ayala (2010) ainda diz que há outros aspectos envolvidos na resistência ao fogo de uma parede de alvenaria, muitos que envolvem a resistência ao fogo da argamassa de assentamento. Também deve-se estudar com afinco a aderência entre o bloco e a argamassa.

Ayala (2010) ensaiou corpos de prova de argamassa, blocos maciços de concreto de agregado leve e pequenas paredes de alvenaria (de dimensões 68,5x67x10 cm). O ensaio das paredes não foi com elas carregadas previamente: primeiro elas foram aquecidas a uma taxa de 600 °C/h (ou 10 °C/min) e, ainda dentro do forno, após elas atingirem um equilíbrio térmico (quando todos os termopares registravam o mesmo valor), elas foram carregadas (taxa de carregamento de 10 kN/min) até o colapso. Observou-se, nas pequenas paredes de alvenaria, uma redução em sua resistência à compressão: de 9% a 400 °C, de 19% a 600 °C, de 60% a 700 °C e de 83% a 800°C. Uma

consequência disso foi também a redução de seu módulo de elasticidade: 33% a 200 °C, 40 % a 400 °C, 65% a 600 °C, 89% a 700 °C e 98% a 800 °C. Nas paredes ensaiadas a temperatura ambiente, o colapso ocorreu por uma combinação de cisalhamento e fissuras horizontais largas. Já nas aquecidas, as fissuras na diagonal foram as maneiras de colapso mais observadas. O fenômeno do lascamento explosivo ocorreu nas paredes aquecidas a temperaturas acima de 400 °C, sendo mais intenso conforme essa temperatura aumentava. Notou-se também a expansão térmica, com um efeito mínimo nos espécimes ensaiados a 200 °C e com um efeito mais severo naqueles ensaiados a 700 °C e a 800 °C. Atentou-se que as paredes também sofreram uma mudança em sua coloração, mais nítida naquelas ensaiadas a 800 °C; essa mudança foi do cinza escuro ao quase branco. Nas amostras aquecidas a 700 °C e a 800 °C, o material do bloco sofreu uma deterioração severa que resultou em um derretimento de alguns agregados componentes do bloco, um desses agregados era o vidro.

No ensaio dos blocos, Ayala (2010) nota que eles também sofreram reduções em sua resistência à compressão (28% a 200 °C, 27% a 400 °C, 18 % a 600 °C e 65% a 800 °C). Nota-se que as reduções nos blocos foram maiores que as das paredes, mas que a 600 °C, houve um aumento inesperado, e que a 800 °C, a resistência à compressão do bloco foi abruptamente reduzida. A rigidez dos blocos também foi reduzida com o aumento da temperatura. Também ocorreu lascamento explosivo, expansão térmica e mudança na coloração dos blocos.

Andreini e Sassu (2011) são dois pesquisadores que defendem o bom comportamento da alvenaria em situação de incêndio. Mencionam que grande parte do interesse pela construção em alvenaria se deve à capacidade desse material de isolar um ambiente tanto do fogo em si quanto dos efeitos da fumaça (servindo, então, como paredes de compartimentação). Os autores ainda ressaltam o excelente comportamento, sob elevadas temperaturas, da argamassa de assentamento e de blocos cerâmicos ou de concreto com agregados leves.

Andreini e Sassu (2011) apresentaram um modelo analítico para prever a resistência mecânica de painéis de alvenaria sob a ação combinada de compressão e de flexão, na presença de fogo agindo em um lado. Eles ressaltam que os métodos analíticos prescritos no *Eurocode 6* (2005) dependem do conhecimento da tensão e resistência à compressão últimas em função da temperatura, bem como dos principais parâmetros térmicos (condutividade, calor específico e densidade), que são significativamente influenciados pela umidade do bloco, e, portanto, tais métodos devem ser utilizados com

cautela. O método que eles propuseram visa definir os diagramas de momento fletor e força normal para paredes sujeitas à força normal excêntrica e expostas ao fogo em um lado. Para tanto, é necessário primeiro determinar a distribuição de temperatura por toda a parede, e, ao se conhecer as leis que governam a diminuição da resistência do material e da rigidez axial em função da temperatura, as regiões de deformação da parede podem ser calculadas em função da curvatura. E, por fim, baseados nas isotermas já calculadas e na relação tensão-deformação-temperatura, pode-se definir as superfícies de ruptura no plano momento - força normal (M-N) para o tempo de exposição ao fogo. Na Figura 2, pode-se observar as superfícies de ruptura para uma parede de 20 cm de espessura, feita com blocos de concreto celular autoclavado (CCA), exposta ao fogo em diferentes períodos de tempo. Tal método representa não só uma extensão dos procedimentos introduzidos no *Eurocode 6* (2005), mas também uma alternativa a eles, a qual pode ser adaptada para qualquer tipo de alvenaria, desde que as curvas de tensão-deformação e propriedades térmicas em função da temperatura sejam conhecidas.

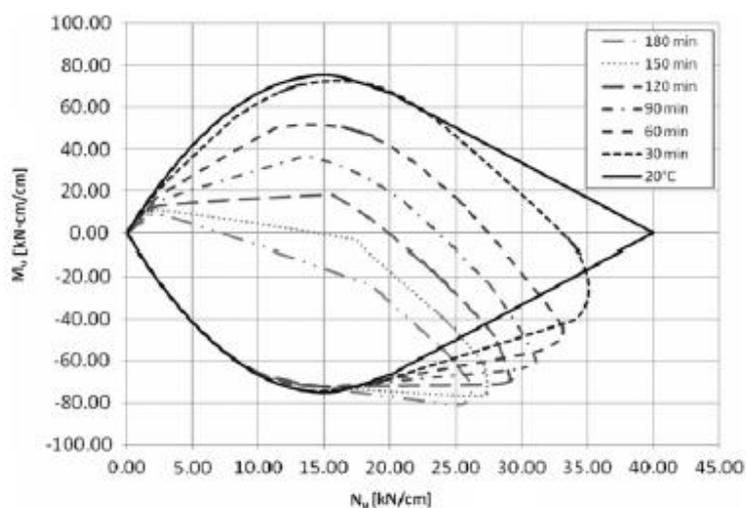


Figura 2 - Superfícies de ruptura para uma parede de 20 cm de espessura, feita com blocos de concreto celular autoclavado (CCA), exposta ao fogo em diferentes períodos de tempo.

Fonte: Andreini e Sassu (2011), Figure 22, p. 448.

Andreini *et al.* (2012) fizeram diversos experimentos em laboratório a fim de determinar as propriedades mecânicas de alguns materiais de alvenaria em relação à temperatura. Foram ensaiados cilindros (de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) de materiais como argila, concreto de agregado leve, concreto celular autoclavado (CCA) e argamassa em temperaturas variando de 20 a 700 °C. Primeiramente, foram determinadas

as propriedades mecânicas – a curva de tensão-deformação até o colapso - desses materiais em temperatura e umidade ambientes. Ao aquecer os materiais no forno, foi incluída uma etapa de transição no experimento, que consistia em, após a confirmação de que o cilindro apresentava uma distribuição de temperatura uniforme (controlada por oito termopares, de acordo com a Figura 3), o mesmo era retirado do forno e colocado em um isolante térmico, com temperatura de 200°C, para minimizar a perda de calor. Por fim, os testes para se verificar as propriedades mecânicas após a exposição a altas temperaturas foram feitos, como se pode observar na Figura 4.

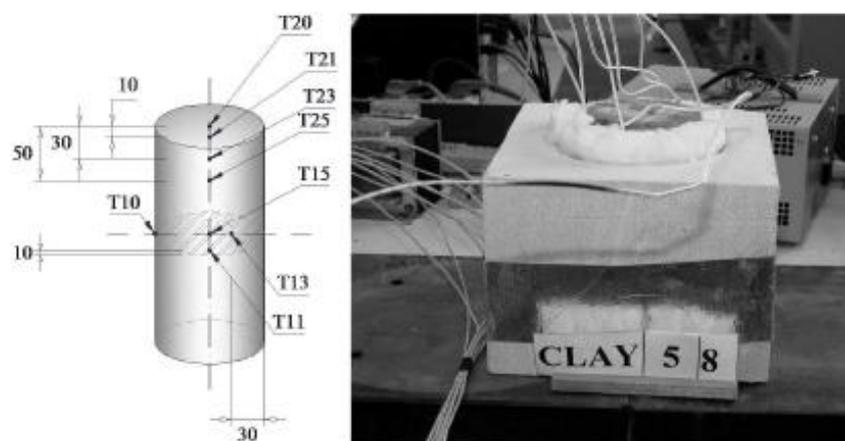


Figura 3 – Esquema de termopares.

Fonte: Andreini *et al.* (2012), Figure 2 (a), p. 44.

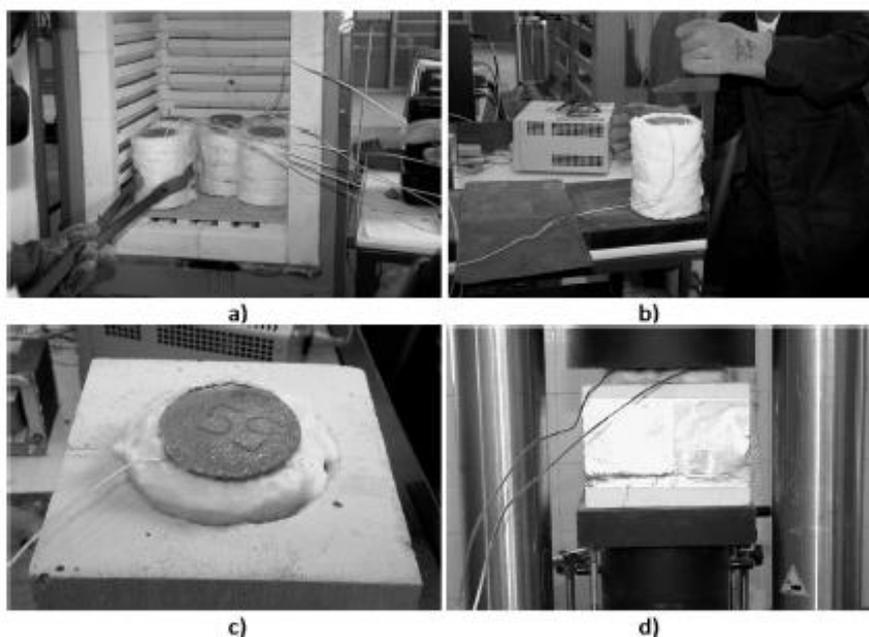


Figura 4 – Principais etapas para ensaiar os blocos submetidos a altas temperaturas à compressão: a) extração do forno; b) medição da altura do cilindro; c) inserindo o cilindro no isolante térmico; d) execução do ensaio à compressão.

Fonte: Andreini *et al.* (2012), Figure 4, p. 46.

Como foram ensaiados cilindros submetidos a várias temperaturas diferentes, foi possível obter, para cada propriedade (para cada espécime ensaiado, foram obtidos a deformação térmica ε_{th} , o coeficiente de expansão linear α_{th} , a força resistente à compressão f_c , a deformação última ε_{cu0} e o módulo de elasticidade tangente-secante à curva tensão/deformação para valores correspondentes à 40% do f_c de cada cilindro) desejada, um polinômio de terceiro grau que a representasse em função da temperatura. Também foram obtidas curvas – através de um modelo matemático denominado “modelo pilha” - que simulam o comportamento de painéis de alvenaria (seu módulo de Young aparente), levando em conta o efeito dos blocos e da argamassa, em relação à temperatura. Os autores, no entanto, lembram que essa dedução feita com experimentos em materiais isolados não leva em conta verdadeiramente a interação entre blocos e argamassa, tornando necessária, portanto, a realização de experimentos mais completos de paredes de alvenaria. Com os experimentos feitos pelos autores, o que se pode observar são que as tendências da resistência à compressão e deformação axial em função da temperatura observadas nos diferentes materiais podem fornecer informações úteis para o projeto que leva em conta tensões de compressão.

Nguyen e Meftah (2012) lembram que a resistência ao fogo da maioria das paredes de alvenaria pode ser determinada através de ensaios em laboratório ou por métodos semi-empíricos que, por sua vez, são quase sempre muito conservadores, resultando em estruturas menos eficientes. Uma alternativa, segundo os mesmos autores, seria adotar um modelo de cálculo baseado em modelagem computacional avançada; sendo possível, nesse caso, a consideração de cenários específicos de incêndios, geometrias diferentes das padronizadas e processos complexos de degradação dos materiais, como o lascamento explosivo.

Nguyen e Meftah (2012) ressaltam, ainda, que modelos numéricos sofisticados requerem resultados experimentais específicos para obter dados quanto às propriedades mecânicas e térmicas dos materiais. Resultados de ensaios usuais de caracterização dos materiais podem ser insuficientes para validar uma simulação numérica avançada. Em seu trabalho, os autores ensaiaram quatro paredes de alvenaria cerâmica, de 3 m de altura por 3 m de largura, com diferentes espessuras; duas não estruturais: uma fina (10 cm de espessura – Ensaio 1) e uma grossa (20 cm de espessura – Ensaio 2); e duas estruturais, com 20 cm de espessura, carregadas uniformemente. Uma parede estrutural foi carregada com 130 kN/m (Ensaio 3) e a outra com 90 kN/m (Ensaio 4).

No Ensaio 1, a parede se mantém intacta por 240 minutos, porém o critério de isolamento térmico é atingido muito antes disso: aos 43 minutos. No Ensaio 2, ocorreu um lascamento explosivo superficial e generalizado na face exposta ao fogo (Figura 5), iniciado na zona central da parede após 20 minutos de aquecimento, que se propagou uniformemente até os cantos e acabou após mais 15 minutos. O critério de isolamento foi atingido após 104 minutos.



Figura 5 – Parede grossa não estrutural (Ensaio 2) após 360 minutos de exposição ao fogo, lado exposto.

Fonte: Nguyen e Meftah (2012), Figure 3, p. 58.

No Ensaio 3, a parede falha estruturalmente após 136 minutos, porém antes disso apresenta um princípio de lascamento explosivo em sua parte inferior após 15 minutos de ensaio (Figura 6 (a)). Também ocorreu, surpreendentemente, um outro lascamento explosivo superficial no lado não exposto da parede (Figura 6 (b)). Esse lascamento não causou nenhum buraco na parede, e, portanto, sua integridade foi mantida. O critério de isolamento não foi atingido. No Ensaio 4, a parede atinge o colapso após 60 minutos devido a ocorrência de um lascamento explosivo que se propagou através de sua espessura (Figura 7).

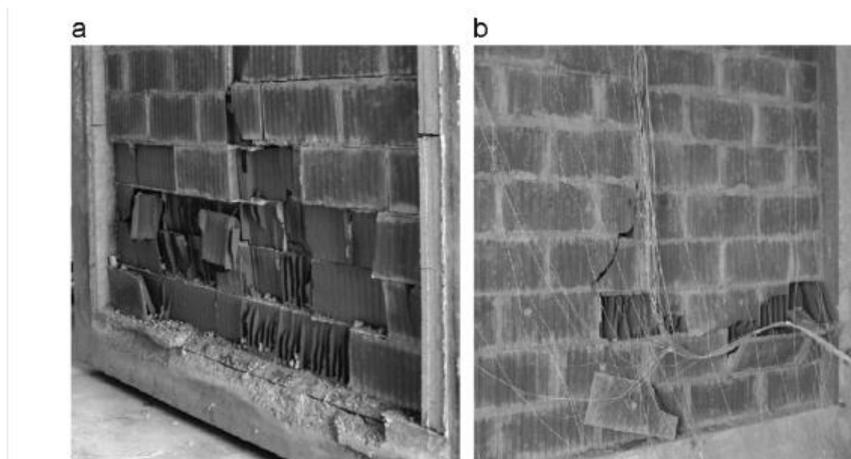


Figura 6 – Ruptura da parede no final do Ensaio 3. (a) Lado exposto. (b) Lado não exposto.

Fonte: Nguyen e Meftah (2012), Figure 4, p. 59.

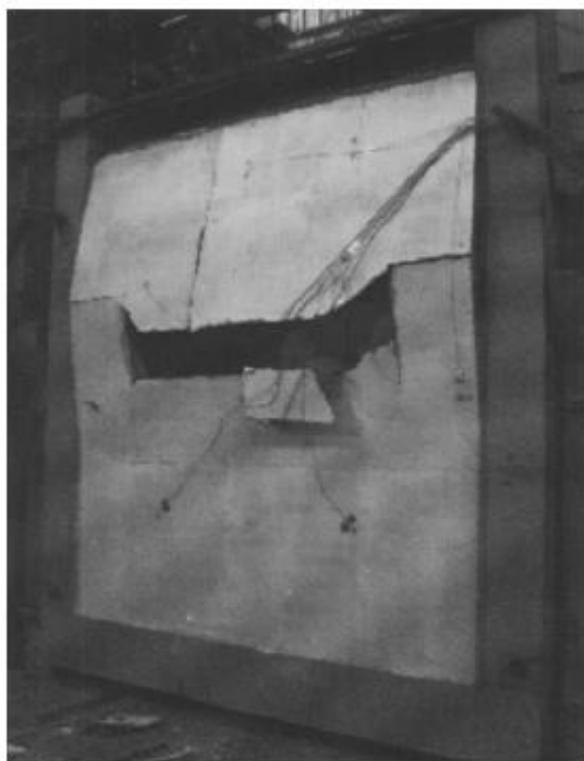


Figura 7 – Ruptura da parede no Ensaio 4, vista do lado não exposto ao incêndio.

Fonte: Nguyen e Meftah (2012), Figure 5, p. 59.

Apesar de ela ser igual à parede usada no Ensaio 3, e menos carregada, sua resistência ao fogo foi menor. Isso porque na parede 4 foi utilizada uma junta fina ao se assentar os blocos, que influenciou negativamente no resultado alcançado. Algumas tendências foram observadas: as paredes não estruturais não apresentaram instabilidade estrutural, e quando sua espessura excede um limite (de espessura maior que 12-14cm),

pode ocorrer lascamento explosivo, o qual não se propaga por toda a espessura da parede e, portanto, não interfere em sua resistência mecânica, tendo o isolamento térmico como critério-chave para seu dimensionamento. Para paredes grossas e estruturais com juntas de argamassa tradicional ou adesiva, a perda da estabilidade estrutural (que se dá por um lascamento explosivo localizado e profundo) é o fator determinante para a determinação de sua resistência ao fogo. Nas paredes com juntas finas, o lascamento explosivo é mais severo, fazendo com que a integridade/estanqueidade seja atingida antes mesmo da perda de sua estabilidade estrutural.

Russo e Sciarretta (2012) fizeram uma investigação experimental das propriedades mecânicas da alvenaria de blocos cerâmicos após a exposição a altas temperaturas. O modelo físico adotado teve a intenção de representar tanto paredes novas quanto velhas. Os autores decidiram focar somente na temperatura máxima, e fixaram a taxa de aquecimento e a duração da exposição para simular uma exposição acidental com rápido aquecimento e um curto período de tempo de exposição a temperaturas no intervalo entre 20 e 750 °C. Dois valores de temperatura máxima foram considerados, 300 e 600 °C, que representam um nível baixo e médio de altas temperaturas. A taxa de aquecimento foi fixada em 19 °C/min e a duração na temperatura máxima de exposição foi fixada em 1 h. Para simular o caso de uma parede exposta ao fogo em somente um lado, as amostras foram revestidas com mantas térmicas que só deixavam uma face livre. Uma condição de resfriamento lenta, que consistia em desligar o forno após o término da duração da exposição e abrir a porta após 12 horas, simulava uma auto-extinção do incêndio. Observou-se que após a exposição a 300 °C, as faces expostas das amostras de alvenaria não apresentaram quase nenhum dano, somente alguns destacamentos nas interfaces bloco/argamassa; já após a exposição a 600 °C, fissuras e microfissuras em todos os materiais eram claramente visíveis. Foram feitos ensaios de compressão axial, com controle do deslocamento, e compressão diagonal nas amostras para caracterizar a alvenaria quanto à compressão e o cisalhamento. Cinco amostras expostas ao fogo e três não-expostas foram empregadas em cada tipo de ensaio. No teste de compressão axial, foram observadas fissuras na argamassa das juntas centrais. Em seguida, destacamentos superficiais de blocos na superfície exposta das amostras F3 (expostas a 300 °C) e principalmente F6 (expostas a 600 °C) foram observados. A diminuição da resistência à compressão pode ser considerada relevante nas amostras F6. Os diagramas de tensão/deformação mostraram uma longa tendência descendente nos dois casos de exposição, levando a valores altos de deformação última. No teste de compressão

diagonal, pôde-se observar, a princípio, uma prevalência na fissuração da interface bloco/argamassa. Fissuras verticais nos blocos foram praticamente ausentes nas amostras F6. A queda na resistência à compressão após a exposição a 600 °C é considerável, e constatou-se que a resistência ao cisalhamento diminui bastante mesmo após a exposição a 300 °C. Todas as amostras expostas tiveram um enorme aumento da deformação para o valor máximo de tensão. Pode-se observar, ainda, que as diferenças na resistência à compressão e na rigidez da alvenaria permanecem relativamente pequenas se comparadas com as de seus componentes.

Russo e Sciarretta (2013) lembram que, na Itália, foram feitos vários testes, nos anos 90, em paredes de alvenaria feitas com diversos tipos de blocos cerâmicos, diferentes entre si quanto à densidade e percentual de vazios, e foi constatado que em todos os casos, mesmo com espessuras diferentes, a falha ocorreu pelo critério I (isolamento), de acordo com três tipos básicos de comportamento dependentes da inércia térmica (Equação 1).

$$\alpha = \lambda \rho c_p \quad (1),$$

onde α é a inércia térmica, λ a condutividade térmica, ρ a densidade do material e c_p o calor específico à pressão constante.

No primeiro caso, nas paredes com baixa inércia térmica (espessura de 6 a 8 cm e percentual de vazios maior que 45%), a temperatura no lado não-exposto ao fogo começou a crescer após mais ou menos 10 minutos do início dos ensaios, proporcionalmente ao acréscimo de temperatura no forno, atingindo a falha para o critério REI (resistência mecânica, estanqueidade e isolamento) em 30 a 60 minutos. No segundo caso, nas paredes de média inércia térmica (espessura de 12 a 16 cm e percentual de vazios maior que 45%), a temperatura no lado não-exposto ao fogo começou a crescer após mais ou menos 20 minutos do início dos ensaios, um pouco antes de ela atingir 100 °C, a evaporação da água a forçou a manter-se constante por 15 a 30 minutos, até sua total evaporação, atingindo a falha para o critério REI em 120 minutos. No último caso, nas paredes de alta inércia térmica (espessura maior que 16 cm), a temperatura no lado não exposto ao fogo começa a crescer após mais ou menos 60 minutos do início dos ensaios, em seguida, o efeito combinado da inércia térmica e migração de água a mantém num estado constante. Sua resistência corresponde a 180 minutos pelo critério REI.

Sobre os critérios de isolamento e integridade serem os que falham primeiro, os autores creem que isso seja uma consequência de um dano físico induzido pelo fogo,

especialmente o desenvolvimento de microfissuras, cujos efeitos na rigidez residual e na distribuição de tensão/deformação necessitam ser avaliados.

Sobre as propriedades dos materiais que compõem uma parede de alvenaria, Russo e Sciarretta (2013) defendem que, sob o ponto de vista do engenheiro responsável por avaliar a capacidade da estrutura durante ou após uma exposição a altas temperaturas, a informação essencial a ser adquirida é sobre o comportamento à compressão da parede, e seu comportamento ao cisalhamento pode ser importante quando se considera a resistência da estrutura a sismos. Os autores analisaram dados referentes ao comportamento de diversas propriedades expostas e após a exposição a altas temperaturas. Os autores lembram que a condição residual do material (após a exposição a altas temperaturas) é afetada não só pelo máximo valor da temperatura e taxa de aquecimento, mas também pela duração da exposição à máxima temperatura e como se deu o resfriamento do material.

Para o módulo de elasticidade, os dados analisados por Russo e Sciarretta (2013) apontam uma tendência geral desta propriedade decrescer com o aumento da temperatura. De um ponto de vista mecânico, isso provavelmente é reflexo da ação de danos nos materiais, como, por exemplo, o desenvolvimento de microfissuras. Argamassas de cimento e blocos de concreto seguem essa tendência. No entanto, há um conflito em relação ao comportamento de tijolos e blocos cerâmicos vazados: enquanto os dados do *Eurocode* corroboram tal tendência, Nguyen *et al.* (2009 *apud* Russo e Sciarretta, 2013) registraram um aumento considerável (chegando a três vezes o valor original) na rigidez de tijolos e blocos cerâmicos vazados, que pode ser notado entre 200 e 750 °C, seguido por uma queda brusca até que, a 1000 °C, seu módulo de elasticidade pode ser considerado nulo. Tais dados contrastantes podem ser por conta das diferenças da composição e dos processos de produção (em especial a temperatura de cozimento) dos blocos cerâmicos. Analisando o comportamento residual dos materiais após uma exposição a uma temperatura de 300 °C, os autores observaram que há um acréscimo inicial seguido de uma diminuição no módulo de elasticidade residual de blocos, mas que a argamassa de cimento mostra uma tendência clara de diminuição desse valor.

Russo e Sciarretta (2013) ainda analisaram a resistência a compressão, e, sobre essa propriedade, observaram que não se pode observar uma tendência específica, porém fica claro que a partir dos 500 °C há uma queda generalizada. Há, novamente, um conflito apontado por Nguyen *et al.* (2009 *apud* Russo e Sciarretta, 2013) nos blocos cerâmicos, que indica um pico de mais de duas vezes a resistência original por volta de

400 °C. Pelo contrário, o *Eurocode* indica um declínio contínuo de tal propriedade para blocos cerâmicos, e um aumento seguido de um decréscimo aos 400 °C para blocos de concreto leves e blocos de concreto com silicato de cálcio. Para argamassas de cimento, pode-se observar que sua resistência à compressão decresce com o aumento da temperatura, sendo que aos 300 °C, o material perde por volta de 50% de sua resistência original. A resistência à compressão residual cai entre 300 e 600 °C. Blocos cerâmicos têm sua resistência diminuída conforme a temperatura de exposição aumenta. Para a argamassa, a maioria dos dados mostra um acréscimo na gama inicial de temperaturas e uma queda para temperaturas maiores que 300 °C. Todos os dados apontam para a redução significativa da resistência à compressão residual devido ao resfriamento por água, que fica mais drástica com o aumento das temperaturas de exposição, e isso é um excelente argumento para a utilização de outros métodos de extinção de incêndio.

Sobre a relação tensão/deformação na compressão, Russo e Sciarretta (2013) observam que uma queda na resistência à compressão está geralmente associada a um aumento na deformação conforme a temperatura aumenta. No entanto, outra vez, Nguyen *et al.* (2009 *apud* Russo e Sciarretta, 2013) mostram que blocos cerâmicos vazados não seguem esse comportamento: sua resistência à compressão cresce consideravelmente e, conseqüentemente, a deformação diminui para temperaturas entre 150 e 750 °C. Analisando o comportamento residual dos materiais, pôde-se observar que há uma clara influência da temperatura na curva de tensão/deformação mesmo após uma exposição a 300 °C. O fenômeno mais impressionante é o crescimento notável na deformação última (referida como deformação pós-pico na metade da tensão de pico), que cresce de 51% depois de 300 °C para 158% após uma exposição a 600 °C; por outro lado, a diminuição no módulo de elasticidade e resistência à compressão se tornam evidentes aos 600 °C. Tal resultado foi interpretado como um aumento fictício da capacidade de deformação pós-pico, que deve ser considerado como um resultado de uma diferente distribuição de tensões internas nas amostras que ocorre por causa das microfissuras induzidas pelo calor.

Gnanakrishnan e Lawther (1990 *apud* Russo e Sciarretta, 2013) apontaram que a capacidade de isolamento de paredes de alvenaria cresce conforme a quantidade de água e a espessura específica dos blocos (ou seja, espessura x volume preenchido). A presença de vazios causa uma descontinuidade na condução de calor, e a falha desse critério em paredes feitas com blocos de alta capacidade isolante pode se dar devido às propriedades da argamassa. Sobre o critério de estanqueidade, os autores lembram que ele afeta a maioria das paredes de blocos de concreto, por conta do fenômeno de redução

que começa aos 150 °C, blocos cerâmicos vazados também são suscetíveis à perda de integridade e podem mostrar princípios de *spalling*, no entanto, é bem difícil que a falha desse critério seja alcançada antes que a do critério de isolamento. Sobre o critério de resistência mecânica, os autores ressaltam que, geralmente, durante condições de alta temperatura, paredes estruturais não sofrem esmagamento; na verdade, o colapso quase sempre se dá devido ao deslocamento horizontal (curvatura ou flecha) causado pelo aumento da temperatura em um lado da mesma, e que tal colapso geralmente ocorre quando o deslocamento horizontal (flecha) no meio da parede é mais ou menos igual a 80% da espessura dela.

Em outro trabalho recente, Nguyen e Meftah (2014), relatam que a alvenaria de blocos cerâmicos ainda ocupa uma parcela importante no mercado de construção civil em diversos países, pois apresenta soluções construtivas de baixo custo. Propõem blocos de alvenaria cada vez mais resistentes ao fogo como soluções para melhorar a resistência ao fogo do conjunto (parede).

Nguyen e Meftah (2014) ressaltam que modelos bidimensionais podem até simular satisfatoriamente o comportamento ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Entretanto, em paredes onde o lascamento explosivo tem grande probabilidade de ocorrência, como é o caso de paredes estruturais feitas com blocos vazados, a ruptura local é um fator importante que governa o comportamento ao fogo da alvenaria e, portanto, não deve ser ignorada em simulações numéricas.

Há uma ressalva a ser feita em relação à utilização de resultados de ensaios para a determinação da resistência ao fogo de paredes. Os ensaios devem ser realizados sob condições definidas em norma. Algumas condições que devem ser respeitadas referem-se ao carregamento e à taxa de aquecimento, além do critério utilizado para a determinação da resistência ao fogo do elemento. Dumont *et al.* (2016) observam uma inconsistência no sistema europeu de ensaios e classificação de elementos estruturais em situação de incêndio. Na Europa, o procedimento para se classificar os elementos construtivos em relação à sua resistência ao fogo possui duas etapas. Na primeira delas, os ensaios são realizados por um laboratório que possui certificação internacional. Cada ensaio gera um relatório. Na segunda etapa, os relatórios dos ensaios são analisados e uma banca gera um relatório de classificação dos elementos estruturais. Os resultados dessa classificação que são utilizados no processo construtivo. Para elementos com função estrutural, há uma inconsistência entre a norma de ensaios e a norma de classificação. Ambas as normas limitam valores para a flecha (em mm) medida durante

o ensaio e a taxa de deformação (em mm/min), no entanto, os dois códigos diferem na combinação desses dois critérios: para a norma de ensaios, a falha ocorre quando um dos dois critérios é atingido; já para a norma de classificação, a falha ocorre quando os dois critérios são atingidos. Essa diferenciação entre as duas normas pode causar uma certa confusão, e, como foi analisado no artigo de Dumont *et. al.* (2016), uma inconsistência pode até mudar a classificação de um elemento estrutural quanto à sua resistência ao fogo, dependendo do critério de falha utilizado. Os autores sugerem que a norma de classificação se adeque à norma de ensaios em seu critério de falha, pois a última é mais recente e mais conservadora (porque, de acordo com ela, basta um critério ser atingido, ou seja, a resistência ao fogo da estrutura é menor). A Figura 8 mostra a flecha de uma parede estrutural ao final do ensaio de incêndio.



Figura 8 – Flecha de uma parede estrutural ao final do ensaio de incêndio.

Fonte: Dumont *et al.* (2016), Figure 6, p. 4573.

Após a apresentação dos resultados de pesquisa envolvendo a alvenaria estrutural sob elevadas temperaturas, ressalta-se, mais uma vez, a importância da normatização nacional para procedimentos de dimensionamento desse material em situação de incêndio. Tais procedimentos devem ser discutidos à luz de aspectos voltados ao sistema construtivo e materiais de uso corrente em nosso país. A seguir, serão expostas as recomendações para dimensionamento de alvenaria estrutural em situação de incêndio no Brasil e no exterior.

3.2 Recomendações nacionais de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio

Na inexistência de um código nacional sobre o dimensionamento de alvenaria estrutural em situação de incêndio, o meio técnico, como referência, costuma ter por base algumas publicações já tradicionais no setor. Pode-se citar, por exemplo, o Manual Técnico de Alvenaria (1990), onde são apresentados resultados de alguns ensaios realizados em paredes de alvenaria estrutural segundo a ABNT NBR 5628:1977. A partir dos resultados obtidos, as paredes de alvenaria, executadas com diferentes blocos estruturais, foram categorizadas em *corta-fogo* (enquanto atenderem aos requisitos de resistência mecânica, estanqueidade e isolamento térmico), *para-chamas* (enquanto atenderem aos requisitos de resistência mecânica e estanqueidade) e *estável ao fogo* (enquanto atenderem apenas ao requisito de resistência mecânica). A Tabela 1 apresenta os valores divulgados na citada referência. Durante muito tempo, essa tabela foi uma das únicas referências nacionais para a verificação da alvenaria estrutural em situação de incêndio.

Tabela 1 - Resistência ao fogo de blocos de concreto e cerâmico

Bloco	Espessura (cm)	Revestimento	Características		
			Corta-fogo	Para chamas	Estável ao fogo
Concreto vedação	19	Argamassa 2 cm na face exposta ao fogo	4 h	-	-
Concreto estrutural	14	-	1 h	4 h	4 h
Cerâmico vedação	9	1,5 em cada face	1,5 h	2 h	2 h
Cerâmico estrutural	14	Gesso 3 mm na face exposta ao fogo	2 h	4 h	4 h
Cerâmico estrutural	14	-	1,5 h	2 h	2 h
Cerâmico estrutural	14	1,5 cm em cada face	2 h	3 h	3 h

Fonte: ABCI, 1990, p. 140 (adaptado).

Pode-se citar também o Manual de Desempenho para Alvenaria de Blocos de Concreto da Associação Brasileira de Cimento Portland (2014), onde são apresentados

resultados de ensaios de pequenas paredes de alvenaria com e sem revestimento e concluiu-se que elas podem ser consideradas como corta-fogo, pois resistiram a uma temperatura de $900^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por um período de tempo superior a 240 min (4 horas). No entanto, somente uma das paredes foi ensaiada com uma carga axial de 12 tf, as demais foram ensaiadas sem carga. Suas dimensões (80 x 80 cm) não atenderam as dimensões mínimas (2,5 x 2,5 m) previstas em norma nacional de parede quanto ao tamanho de corpo de prova.

No Manual de Desempenho de Sistemas de alvenaria com blocos cerâmicos Pauluzzi (2016), foram apresentados alguns resultados de ensaios em paredes de alvenaria cerâmica. Foram ensaiadas paredes com blocos de 19x19x29 cm e com 14x19x29 cm, ambas com altura de 3 metros e comprimento de 3,15 metros. Os ensaios foram feitos com uma carga de 24 tf, pois o objetivo era avaliar a resistência ao fogo de uma parede com função estrutural. As duas paredes foram classificadas como corta-fogo com o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) de 240 minutos (4 horas) - CF240 - porque atenderam as exigências de estabilidade, isolamento térmico e estanqueidade.

Outra referência nacional importante na verificação da alvenaria estrutural em situação de incêndio é a Instrução Técnica 08/2011 (IT-08) – Resistência ao Fogo dos Elementos de Construção, do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (2011), que, em seu anexo B, mostra resultados de alguns ensaios realizados em paredes de alvenaria. Vale ressaltar que, apesar de ser a tabela utilizada pelos projetistas brasileiros, os ensaios nela reproduzidos foram feitos sem carga. A Tabela 2 reproduz os resultados.

Tabela 2 - Resistência ao fogo para alvenarias

			Resistência ao fogo (horas)			
Paredes ensaiadas		Espessura do revestimento (cm)	Duração do ensaio (min)	Integridade	Estanqueidade	Isolamento térmico
Tijolos de barro cozido	Meio tijolo sem rev.	-	120	≥ 2	≥ 2	1 1/2
	Um tijolo sem rev.	-	395	≥ 6	≥ 6	≥ 6
	Meio tijolo com rev.	2,5	300	≥ 4	≥ 4	4
	Um tijolo com rev.	2,5	300	≥ 6	≥ 6	≥ 5
Blocos vazados de concreto (2 furos)	14 cm sem rev.	-	100	$\geq 1,5$	$\geq 1,5$	1 1/2
	19 cm sem rev.	-	120	≥ 2	≥ 2	1 1/2
	14 cm com rev.	1,5	150	≥ 2	≥ 2	2
	19 cm com rev.	1,5	185	≥ 3	≥ 3	3
Tijolos cerâmicos de 8 furos	Meio tijolo com rev.	1	150	≥ 2	≥ 2	2
	Um tijolo com rev.	1	300	≥ 4	≥ 4	≥ 4

Fonte: IT-08 de São Paulo, 2011, Anexo B, p.199 (adaptado).

Quanto à falta de normatização nacional sobre o assunto, a IT-08 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (2011) explica ainda que, nesse caso, devem ser seguidas as recomendações do *Eurocode 6* (2005) ou de norma similar reconhecida internacionalmente. Entretanto, uma ressalva a essa recomendação deve ser feita. Deve ser questionada a aplicabilidade de normas internacionais à realidade nacional, uma vez que a geometria de blocos pode variar de país para país, conforme o exemplo mostrado

nas Figuras 9 e 10, e os materiais utilizados, tanto nos blocos quanto nos revestimentos, também apresentam divergências, de país para país, em relação às suas propriedades térmicas e mecânicas.

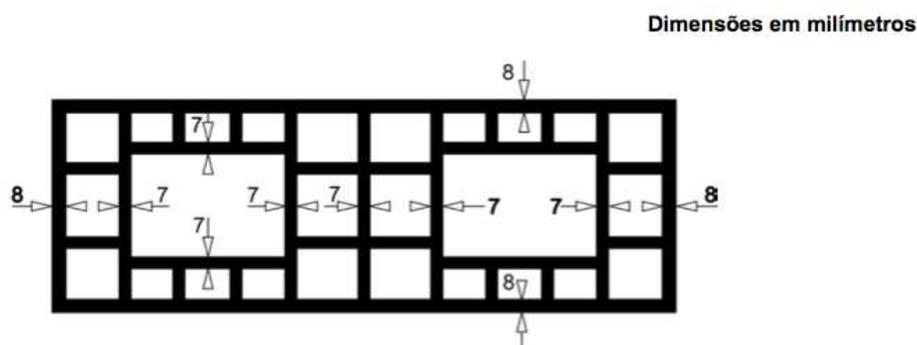


Figura 9 – Geometria da seção transversal do cerâmico estrutural brasileiro

Fonte: ABNT NBR 15270-2:2005, p.6.

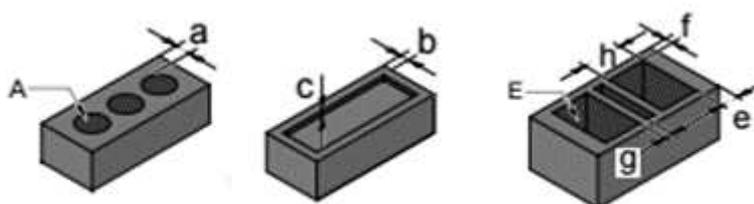


Figura 10 – Geometria da seção transversal de blocos cerâmicos estruturais americanos

Fonte: <http://www.gobrick.com/portals/25/docs/technical%20notes/tn9a.pdf>, acessado em 14/08/15.

Antes dos códigos internacionais serem apresentados, é importante ressaltar mais uma peculiaridade brasileira: o cálculo da espessura equivalente. Enquanto a maioria dos códigos apresenta tal cálculo em função do volume líquido do bloco, a espessura equivalente dada na ABNT NBR 6136:2014 (Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural) é a soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos (em mm) dividida pelo comprimento nominal do bloco (em metros lineares).

3.3 CÓDIGO SUL-AFRICANO: SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD (SANS 10145) – CONCRETE MASONRY CONSTRUCTION (2013)

A resistência ao fogo de uma parede de alvenaria de concreto depende se a mesma é estrutural ou não, se os blocos são vazados ou maciços e depende da geologia

dos agregados utilizados na fabricação dos mesmos. Revestir a parede com argamassa melhora sua resistência ao fogo.

Um bloco vazado pode ser considerado como um bloco que contém furos (cavidades) entre 25% e 60% de seu volume bruto. A maioria dos blocos de concreto brasileiros, se feitos com as maiores dimensões possíveis de furos, se encaixa nessa categoria. Já um bloco maciço é um bloco que não contém furos (cavidades) ou que os contém, desde que não excedam 25% de seu volume bruto.

Para os blocos vazados, a resistência ao fogo é expressa em função da espessura equivalente da parede, calculada de acordo com a Equação 2:

$$Espessura\ equivalente = \frac{Volume\ líquido\ do\ bloco}{Comprimento\ do\ bloco\ x\ Altura\ do\ bloco} \quad (2)$$

O critério utilizado por essa norma é apenas o critério de isolamento térmico, como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural

Construção	Espessura (sem revestimento), em mm para a resistência ao fogo, em min				
	240	120	90	60	30
Alvenaria de blocos maciços feitos com agregados Classe I ¹ :					
a) Sem revestimento	190	150	90	90	90
b) Com revestimento* de VG**	150	90	90	90	90
Alvenaria de blocos maciços feitos com agregados Classe 2 ² :					
a) Sem revestimento	-	200	150	150	150
b) Com revestimento* de VG**	150	150	150	150	90
Blocos vazados ³					
a) Sem revestimento	Não recomendado			90	90
b) Com revestimento*	Não recomendado			73	73

¹ Agregados Classe I: um agregado áspero de espuma de escórias, pedra-pomes, escória de alto-forno, clínquer bem queimado, agregado calcário triturado, e tijolos triturados ou demais produtos cerâmicos triturados (incluindo argila expandida).

² Agregados Classe II: um agregado áspero de pedra, cascalho ou qualquer rocha natural triturada além das que formam agregado calcário.

³ Aplicável apenas em blocos vazados que formam uma parede não possuindo mais que uma célula em nenhum plano vertical por toda sua espessura.

* Onde a argamassa contribui para a resistência ao fogo da parede, ela deve ser aplicada sobre uma ripa de metal tão fixada à parede que impeça que a argamassa se descole da parede num incêndio. Os valores na tabela se aplicam somente a argamassas de espessuras superiores a 12 mm, aplicadas no lado da parede exposto ao incêndio.

** VG: uma argamassa de vermiculita e gesso, misturadas em uma proporção de V:G entre o intervalo de 1,5:1 a 2:1.

*** Espessura equivalente: a espessura que seria obtida se a mesma quantidade de concreto de um bloco vazado fosse condensada de forma a tornar o bloco maciço (Equação 2).

(Fonte: SANS 10145, Table 4 *apud* Concrete Masonry Manual (2007), Table 2.3, p.12).

3.4 CÓDIGO AMERICANO: ACI/TMS 216.1-14 – 14 – CODE REQUIREMENTS FOR DETERMINING FIRE RESISTANCE OF CONCRETE AND MASONRY CONSTRUCTION ASSEMBLIES (2014)

Este código normativo apresenta procedimentos de dimensionamento de estruturas de concreto e de alvenaria em situação de incêndio. As paredes de alvenaria estrutural são verificadas em função da garantia de valores mínimos para a sua espessura efetiva. A espessura equivalente mínima é determinada em função do tipo de elemento de alvenaria (bloco) e do tempo requerido de resistência ao fogo. No cálculo da espessura efetiva são considerados parâmetros como o tipo de acabamento e a configuração de vazios do bloco.

3.4.1 Espessura equivalente mínimas das paredes

As espessuras equivalentes mínimas das paredes, pilares e vergas de alvenaria de blocos de concreto e para as paredes de blocos cerâmicos, necessárias para resistência ao fogo de 0,5 a 4 horas, são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 4, 5, 6 e 7.

Tabela 4 – Paredes de alvenaria de blocos de concreto

Mínima espessura equivalente T_{ea} (cm), em função da resistência ao fogo requerida * **							
Tipo de agregado empregado no Bloco	½ hora	¾ hora	1 hora	1 ½ horas	2 horas	3 horas	4 horas
Cascalho de calcário ou silício	5,1	6,1	7,1	9,1	10,7	13,5	15,7
Pedra calcária, cinzas ou escória resfriada a ar	4,8	5,8	6,9	8,6	10,2	12,7	15,0
Argila expandida, xisto expandido ou ardósia expandida	4,6	5,6	6,6	8,4	9,1	11,2	13,0
Escória expandida ou pedra-pomes	3,8	4,8	5,3	6,9	8,1	10,2	11,9

* Resistências entre os períodos listados devem ser determinadas por meio de interpolação linear baseada na espessura equivalente da parede de alvenaria de concreto

** Espessuras mínimas equivalentes correspondentes à resistência ao fogo para blocos feitos com combinações de agregados devem ser determinadas por interpolação linear, baseada na porcentagem do volume de cada agregado utilizado em sua fabricação.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14, Table 5.1a, p.21 (convertida para cm).

De acordo com Wilson (2018), a diferença entre pedra calcária e cascalho de calcário está no formato. O cascalho é mais arredondado, enquanto a pedra apresenta um formato mais irregular, com várias arestas.

Segundo Silva (2015), quando termicamente expandidas, algumas rochas apresentam mudanças em algumas propriedades.

Tabela 5 - Pilares de alvenaria armada

Resistência ao fogo, horas	1	2	3	4
Dimensões nominais mínimas do pilar (cm) *	20,3	25,4	30,5	35,6

* Cobrimento da armadura: 5,1 cm

Fonte: ACI/TMS 216.1-14, Table 5.1b, p.21 (convertida para cm).

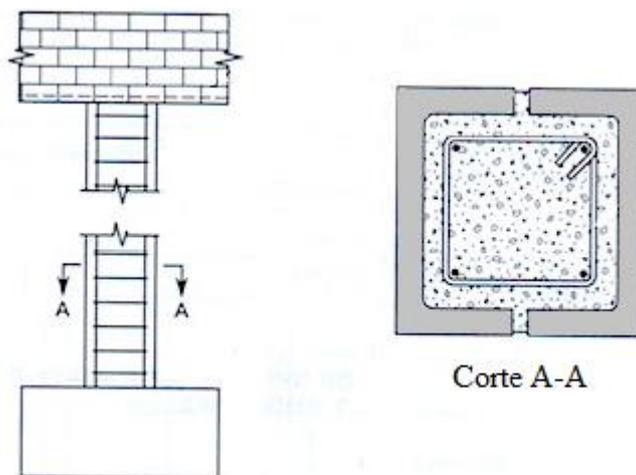


Figura 11 – Esquema de pilar de alvenaria armada

Fonte: <http://www.avant-garde-engineering.com/mc19.pdf>, acessado em 11/08/15.

Tabela 6 – Vergas de alvenaria armada

Espessura nominal das vergas (cm)	Espessura mínima necessária do cobrimento da armadura (cm) para resistência ao fogo especificada			
	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas
15,2	3,8	5,1	NP	NP
20,3	3,8	3,8	4,4	7,6
25,4 ou mais	3,8	3,8	3,8	4,4

Nota: NP = não permitido sem uma análise mais detalhada

Fonte: ACI/TMS 216.1-14, Table 5.1c, p.21 (convertida para cm).

Tabela 7 – Paredes de alvenaria de blocos cerâmicos

Tipo de material	Mínima espessura equivalente T_{ea} (cm), em função da resistência ao fogo requerida *			
	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas
Tijolo maciço de barro ou xisto	6,9	9,7	12,4	15,2
Bloco vazado ou telha de barro ou xisto, sem preenchimento	5,8	8,6	10,9	12,7
Bloco vazado ou telha de barro ou xisto, grauteada ou preenchido com materiais específicos	7,6	11,2	14,0	16,8

* Cálculos entre as horas tabeladas devem ser determinados por interpolação linear

Fonte: ACI/TMS 216.1-14, Table 6.3.1, p. 27 (convertida em cm).

3.4.1.1 Espessura equivalente das paredes de alvenaria (T_{ea})

A espessura equivalente de uma parede de alvenaria, T_{ea} , é a soma entre a espessura equivalente do bloco, T_e , e a espessura equivalente de seu acabamento, T_{ef} . Ou seja:

$$T_{ea} = T_e + T_{ef} \quad (3)$$

Onde:

T_{ea} = espessura equivalente de uma parede de alvenaria;

T_e = espessura equivalente do bloco;

T_{ef} = espessura equivalente do acabamento;

3.4.1.2 Determinação da espessura equivalente do bloco (T_e)

A espessura equivalente do bloco é tomada como:

$$T_e = \frac{V_n}{LH} \quad (4)$$

Onde:

V_n = volume líquido do bloco;

L = comprimento do bloco;

H = altura do bloco.

Paredes não grauteadas ou parcialmente grauteadas: a espessura equivalente, T_e , deverá ser determinada pela Equação 4, em função do volume líquido do bloco.

Construções totalmente grauteadas: a espessura equivalente, T_e , deverá ser a própria espessura do bloco.

Blocos vazados preenchidos com material solto: a espessura equivalente, T_e , deverá ser a própria espessura do bloco quando o material de preenchimento for areia, cascalho, brita, escória, pedra-pomes, xisto expandido, argila expandida, ardósia expandida, cinzas volantes expandidas, cinzas, perlita ou vermiculita.

3.4.1.3 *Determinação da espessura equivalente do acabamento das paredes (T_{ef})*

O tipo de material e espessura empregados no acabamento das paredes de alvenaria contribuem para aumentar a resistência ao fogo desses elementos.

No caso de acabamento aplicado na face não exposta ao fogo da parede, sua espessura deve ser ajustada por um fator (Tabela 8), que leva em conta tanto os materiais empregados na fabricação do bloco (parede), quanto o material do próprio acabamento. Essa espessura ajustada para o acabamento (T_{ef}) deve ser somada a espessura equivalente do bloco de concreto (T_e) para a obtenção da espessura equivalente da parede (T_{ea}), que será empregada para a obtenção da resistência ao fogo, de acordo com a Tabela 4, para paredes de alvenaria de blocos de concreto, ou de acordo com a Tabela 7, para paredes de alvenaria de blocos cerâmicos.

Paredes de alvenaria de concreto ou cerâmica, com acabamentos aplicados na face exposta ao fogo, terão sua resistência ao fogo incrementado pela resistência ao fogo atribuído ao acabamento (Tabela 9), calculada isoladamente.

Paredes com acabamentos diferentes em suas faces de provável exposição ao fogo devem ser duplamente verificadas, com cada uma de suas faces adotada como sendo a face de exposição ao fogo. A resistência ao fogo dessa parede deve ser tomada como a menor das resistências obtidas nos cálculos isolados.

Quando os acabamentos (no caso de aplicação em ambas as faces) contribuem para a resistência ao fogo do conjunto, deve-se limitar essa contribuição total (ambos os acabamentos) à metade da contribuição atribuída à parede sem acabamento.

Tabela 8 - Fator multiplicador da espessura de acabamentos aplicados no lado não exposto ao fogo

Tipo de material usado na laje ou parede	Tipo de acabamento aplicado à laje ou parede			
	Reboco de cimento Portland e areia* ou ladrilho hidráulico	Reboco de gesso e areia	Reboco de gesso com vermiculita ou perlita	<i>Drywall</i> (Gesso acartonado)
Parede de alvenaria de concreto				
Alvenaria de concreto - Silicioso, calcário, cal, cinzas, escória de alto forno resfriada a ar	1,00	1,25	1,75	3,00
Alvenaria de concreto - feito com 80% ou mais de xisto expandido, ardósia expandida, argila expandida, escória expandida ou pedra-pomes.	0,75	1,00	1,25	2,25
Parede de alvenaria cerâmica				
Alvenaria cerâmica - Maciça	1,00	1,25	1,75	3,00
Alvenaria cerâmica – Vazada	0,75	1,00	1,50	2,25

* Para argamassa de cimento Portland e areia com espessura de 1,6cm ou inferior, aplicada diretamente na parede, em seu lado não exposto ao fogo, o fator multiplicador deverá ser 1,0.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14, Table7.2.2, p. 27.

Tabela 9 – Resistência ao fogo atribuída aos materiais de acabamento na face exposta ao fogo de paredes de blocos de concreto ou cerâmica

Acabamento	Tempo (min)
------------	-------------

Drywall (gesso acartonado)	
3/8 pol. (9,5 mm)	10
1/2 pol. (12,7 mm)	15
5/8 pol. (15,9 mm)	20
Duas camadas de 3/8 pol. (Duas camadas de 9,5 mm)	25
Uma camada de 3/8 pol. (9,5 mm) e uma camada de 1/2 pol. (12,7 mm)	35
Duas camadas de 1/2 pol. (Duas camadas de 12,7 mm)	40
Drywall tipo "X" (resistente ao fogo)	
1/2 pol. (12,7 mm)	25
5/8 pol. (15,9 mm)	40
Argamassa de cimento Portland e areia aplicada diretamente sobre o concreto ou alvenaria*	
Argamassa de cimento Portland e areia sobre tela de metal	
3/4 pol. (19 mm)	20
7/8 pol. (22,2 mm)	25
1 pol. (25,4 mm)	30
Argamassa de gesso e areia sobre ripas de gesso de 3/8 pol.	
1/2 pol. (12,7 mm)	35
5/8 pol. (15,9 mm)	40
3/4 pol. (19 mm)	50
Argamassa de gesso e areia sobre tela de metal	
3/4 pol. (19 mm)	50
7/8 pol. (22,2 mm)	60
1 pol. (25,4 mm)	80

*Para fins de determinação da contribuição da argamassa de cimento Portland e areia para a espessura equivalente do concreto ou alvenaria para usos nas tabelas 3 e 4 (3.1 e 4.1 do código), será permitido o uso da espessura real da argamassa ou 5/8 pol., o menor entre os dois.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14, Table 7.2.3, p. 28 (valores em mm acrescentados).

3.5 CÓDIGO AUSTRALIANO: AUSTRALIAN STANDARD 3700 - MASONRY STRUCTURES (2011)

O código australiano é um dos únicos códigos, dentre os abordados, que leva em conta, explicitamente, todos os três critérios para o dimensionamento de estruturas de

alvenaria em situação de incêndio (resistência mecânica, isolamento térmico e estanqueidade).

São especificados níveis de resistência ao fogo (*Fire Resistance Levels* – FRLs) para as paredes, em função de critérios ligados à adequabilidade estrutural (estabilidade contra o colapso), integridade/estanqueidade (capacidade resistente à fissuração excessiva e passagem de gases e chamas) e isolamento térmico (capacidade resistente à passagem de calor).

Os fatores que afetam a integridade/estanqueidade da parede incluem a espessura dos blocos de alvenaria e os materiais utilizados em sua fabricação.

O isolamento térmico da parede é afetado pela densidade e composição dos blocos, pela espessura dos blocos, por quaisquer acabamentos ou revestimentos aplicados sobre a parede e pela existência, ou não, de grauteamento.

A adequabilidade estrutural de uma parede é afetada pela expansão térmica do material utilizado na fabricação dos blocos de alvenaria, das vinculações das paredes em suas extremidades e de sua esbelteza (verificada de acordo com seu índice, S_{rf} – *slenderness ratio on fire resistance*), que, por sua vez, depende da espessura da parede e do distanciamento entre seus apoios verticais e horizontais.

A norma australiana dá duas opções ao projetista de paredes de alvenaria sujeitas a incêndios: projetar a estrutura para os critérios de adequabilidade estrutural, integridade e isolamento térmico, respeitando os limites tabelados de espessura e esbelteza da parede e cobrimento de armadura; ou projetar a estrutura com base em resultados de ensaio em laboratório, utilizando, por exemplo, ábacos de dimensionamento fornecidos pelos fabricantes de blocos daquele país.

Vale ressaltar que não são especificados níveis de carregamento das paredes, e, portanto, aparentemente não são consideradas as paredes estruturais nessa norma. No entanto, Byrne (1979) analisou alguns ensaios feitos em Sidney. Foram ensaiadas 14 paredes de 3 m de comprimento por 9 centímetros de espessura e com quatro diferentes alturas: 2,1 m, 2,4 m, 2,7 m e 3,0 m. As paredes de 2,1 e 2,7 metros de altura foram ensaiadas somente com um nível de carregamento, 50 %. Foram ensaiadas seis paredes de 2,4 metros de altura, cada uma com um nível de carregamento: 125 %, 100 %, 75 %, 50 %, 25 % e 12,5 %; o mesmo foi feito para as paredes de 3 metros de altura. O nível de carregamento é uma porcentagem da força solicitante de cálculo máxima a meia altura da parede, de acordo com a norma australiana de 1974.

Primeiro foram analisadas as diferenças no período de tempo de colapso em relação ao nível de carregamento da parede e foi constatado que, nas paredes de 3 metros de altura, não houve uma variação grande nas resistências ao fogo das seis paredes ensaiadas, sendo observada uma tendência de as paredes menos carregadas resistirem a um incêndio por um período de tempo maior do que as paredes mais carregadas. Por outro lado, notaram-se diferenças significativas entre os períodos de tempo de colapso das seis paredes de 2,4 metros de altura: não só o período de tempo mais longo foi quase o dobro do mais curto como também as diferenças entre os períodos de tempo dos ensaios sucessivos foram por volta de 30 minutos. O autor notou também que o período de tempo de colapso das paredes de 2,4 metros de altura foi bem maior que o das paredes de 3 metros de altura; o período de tempo da parede de 2,1 metros de altura foi ainda maior que os mencionados anteriormente e o período de tempo de colapso da parede de 2,7 metros de altura ficou entre o das paredes de 2,4 e 3 metros de altura. Portanto, chegou-se à conclusão que o período de tempo de colapso da parede é inversamente proporcional a seu índice de esbeltez (ou a sua altura). Isso ocorreu porque as paredes mais altas eram esbeltas a ponto de a flecha devido aos efeitos térmicos atingir rapidamente a flecha crítica, onde ocorre o colapso. Em paredes menos esbeltas, a flecha crítica não é atingida tão rapidamente, e há um período em que a carga aplicada reduz a taxa de deformação. Também se observou que a flecha crítica é maior nas paredes mais esbeltas do que nas menos, o que pode ser explicado pelo fato de as paredes menos esbeltas, que demoram mais para deformar-se, sofrem uma maior perda em sua resistência à tração devido a uma maior exposição ao incêndio e, portanto, entram em colapso com deflexões menores.

Portanto, apesar de aparentemente não se considerar as paredes com função estrutural no código australiano, nota-se que o nível de carregamento foi considerado na elaboração da tabela de índice de esbeltez máximo para a adequabilidade estrutural (Tabela 10). O valor do nível, porém, não foi especificado.

3.5.1 Dimensionamento de acordo com o método tabular

Esta especificação foi feita pela norma australiana, AS 3700 (2011) e, segundo o Manual M55 (2012), é bastante conservadora. Os limites das tabelas são representativos para qualquer tipo de alvenaria fabricada na Austrália, incluindo as que apresentam má adequabilidade estrutural e baixo isolamento térmico.

Para se dimensionar uma parede de acordo com o critério (FRL) de adequabilidade estrutural, utilizando os valores tabelados, seu índice de esbeltez não deverá exceder o valor de referência da Tabela 10. Se a esbeltez da parede é maior que a máxima permitida, a parede deverá ser recalculada com uma espessura maior. Pode-se também modificar o arranjo estrutural de forma a aumentar a rigidez do elemento, introduzindo novas restrições (travamentos) na parede. Essa abordagem de dimensionamento considerada pelo código australiano, em que se considera a esbeltez das paredes, ou seja, considera-se a função estrutural das mesmas, é, até então, a mais interessante de se aplicar à realidade brasileira.

Tabela 10 – Índice de esbeltez máximo para adequabilidade estrutural

Tipo de bloco	Resistência ao fogo (min)					
	30	60	90	120	180	240
1 Alvenaria não armada						
(i) Blocos cerâmicos	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
(ii) Blocos de silicato de cálcio com agregado basáltico						
(A) menos de 45% de todos os agregados	20,5	19,0	18,0	17,5	16,5	15,5
(B) pelo menos 45% de todos os agregados	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
(iii) Blocos de concreto com agregados basálticos						
(A) menos de 45% de todos os agregados	19,5	18,0	17,0	16,0	15,5	15,0
(B) pelo menos 45% de todos os agregados	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
2 Alvenaria armada	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0

Fonte: AS 3700 (2011), Table 6.1, p. 57 (traduzida para o português).

O índice de esbeltez é definido pelas Equações de 5 a 7, função do tipo de vinculação da parede.

Paredes que não possuem apoio nas laterais têm o índice de esbeltez definido pela Equação 5.

$$S_{rf} = \frac{a_{vf} \cdot H}{t} \quad (5)$$

Paredes que possuem apoios em uma ou duas laterais têm seu índice de esbeltez calculado pelo menor valor dado nas Equações 5 a 7.

$$S_{rf} = \frac{0,7}{t} \sqrt{a_{vf} \cdot H \cdot a_k \cdot L} \quad (6)$$

$$S_{rf} = a_k \frac{L}{t} \quad (7)$$

onde:

S_{rf} = índice de esbeltez da parede em situação de incêndio;

a_{vf} = igual a 0,75 se o elemento possui apoios em toda sua extensão lateral.

Caso não existia tal restrição, o valor a ser adotado é 2,0;

H = altura do membro entre os travamentos verticais da parede;

t = espessura total da parede.

a_k = no caso de a parede possuir apoios superior e inferior, o coeficiente vale 1,0. No caso de a parede possuir somente apoio inferior, o coeficiente vale 2,5;

L = comprimento da parede entre as faces laterais restringidas ou o comprimento de uma parede com travamento lateral em apenas uma de suas extremidades. No caso de juntas prumo ou no caso de paredes com aberturas, o comprimento é medido até a junta ou abertura.

Para o dimensionamento de acordo com o critério de isolamento, deve-se, também, determinar a espessura equivalente da parede. Tal cálculo é feito da seguinte maneira:

- para paredes feitas com blocos que apresentam uma proporção de vazios que não supera 30% de seu volume, a espessura equivalente deve ser a própria espessura do bloco;
- quando a proporção de vazios supera 30% de seu volume bruto, a espessura equivalente deve ser o volume líquido do bloco dividido pela área da face exposta ao fogo do bloco.

Os limites para a espessura mínima da parede se encontram na Tabela 11. O código australiano não menciona o efeito do revestimento da parede em sua resistência ao fogo.

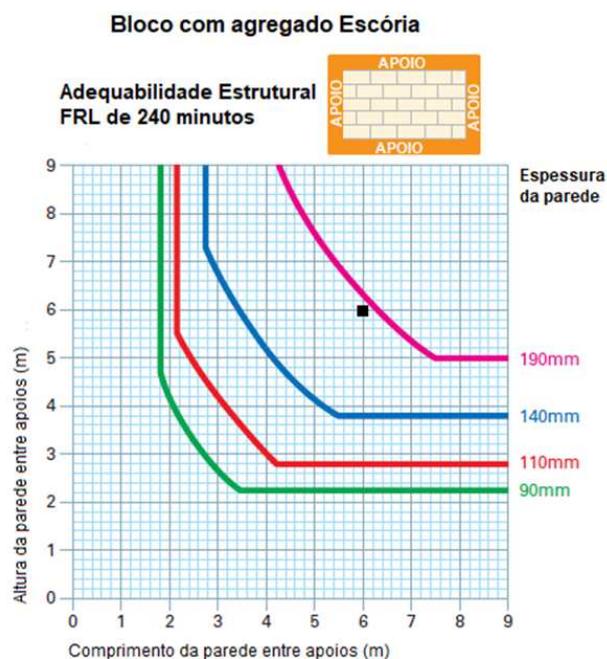
Tabela 11 – Espessura equivalente mínima (mm) de paredes considerando o isolamento térmico

Tipo de bloco	Resistência ao fogo (min)					
	30	60	90	120	180	240
Cerâmico	60	90	110	130	160	180
Silicato de cálcio	50	70	90	110	135	160
Concreto com densidade:						
(a) superior a 1800 kg/m ³	55	80	100	120	150	180
(b) igual ou inferior a 1800 kg/m ³	55	75	90	110	135	160

Fonte: AS 3700 (2011), Table 6.3, p. 61.

3.5.2 Dimensionamento de acordo com dados experimentais

Uma opção ao dimensionamento anterior é o dimensionamento através de ábacos fornecidos, geralmente, pelos fabricantes de blocos australianos. Os fabricantes de blocos fornecem grupos de ábacos que oferecem a possibilidade de verificação rápida do critério de adequabilidade estrutural. Nesses ábacos, os demais critérios (estanqueidade e isolamento térmico) já estão considerados. Basta, então, ajustar a espessura da parede para que o critério adequabilidade estrutural também seja satisfeito. Tal procedimento é ilustrado pelas Figuras 12 e 13. A Figura 12 é para alvenaria de blocos de concreto e a Figura 13, para alvenaria de blocos cerâmicos.

**Exemplo:**

1. Selecionar o material apropriado do bloco
2. Selecionar a página apropriada com adequabilidade estrutural para o tempo requerido (240 minutos no exemplo)
3. Selecionar o gráfico apropriado para o critério de restrições (apoios) da parede (no exemplo, apoio em ambos os lados, em cima e embaixo)
4. Plotar a intersecção da altura da parede e comprimento da parede no gráfico (6 m de altura x 6 m de comprimento no exemplo)
5. O resultado DEVE ESTAR ABAIXO da linha colorida indicada para a espessura escolhida para a alvenaria (no exemplo, o resultado está acima da linha para blocos de 140 mm, mas abaixo da linha para blocos de 190 mm; portanto, os blocos de 190 mm são adequados).

Figura 12 - Adequabilidade estrutural de uma parede de blocos de concreto

Fonte: BORAL MASONRY, p. C11 (Adaptada).

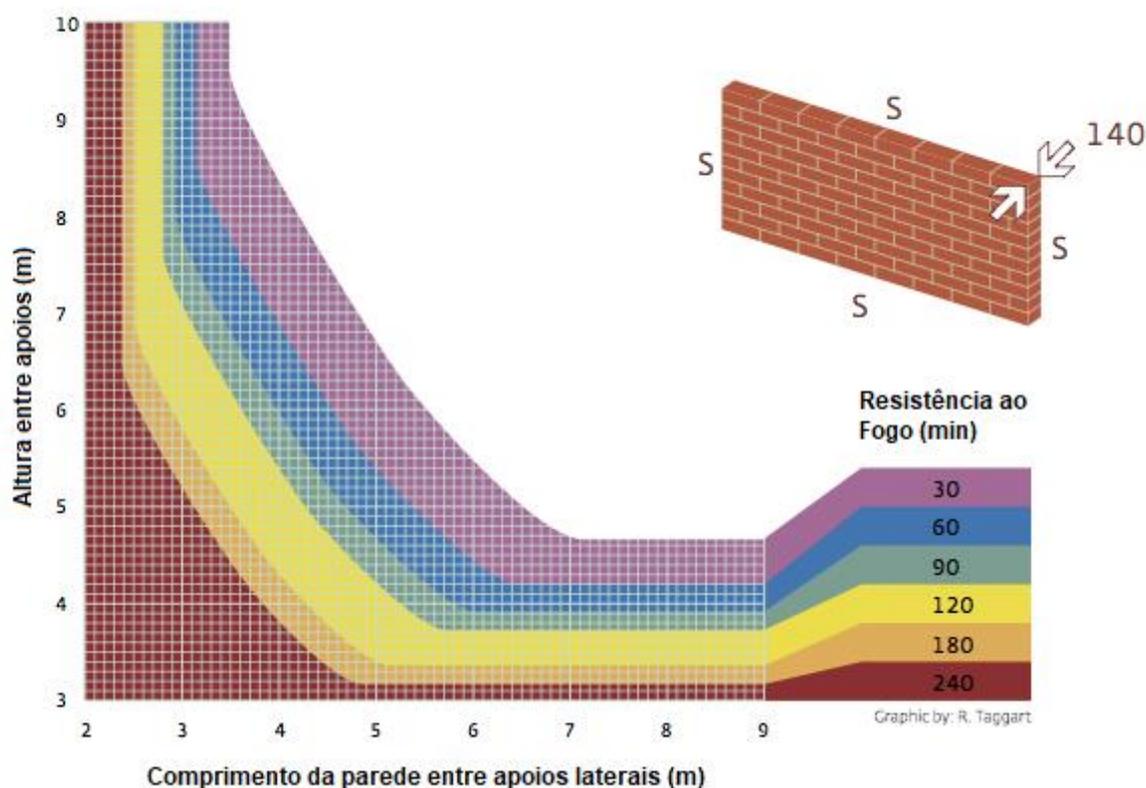


Figura 13 - Adequabilidade estrutural para uma parede de blocos cerâmicos de 140 mm de espessura, apoiada em todas as extremidades.

Fonte: TORRES, 2012, p.47 (traduzida para o português).

Pela Figura 13, pode-se perceber que, uma parede de alvenaria cerâmica, apoiada em todas as extremidades, com seis metros de comprimento e quatro de altura, resiste a um incêndio durante sessenta minutos, quando se considera o critério de adequabilidade estrutural.

Deve-se prestar bastante atenção nos ábacos fornecidos pelos fabricantes de blocos, pois a grande maioria deles contempla paredes de vedação. É o caso dos dois exemplos acima (Figuras 12 e 13), onde não se especifica níveis de carregamento das paredes.

3.6 CÓDIGO NEOZELANDÊS: NEW ZEALAND STANDARD (NZS) 4320 – DESIGN OF REINFORCED CONCRETE MASONRY STRUCTURES (2004)

Assim como o código australiano, o neozelandês também leva em consideração os três critérios para o dimensionamento de uma estrutura de alvenaria em situação de incêndio: isolamento, integridade (adequabilidade) e estabilidade.

Porém, diferente do australiano, este código leva em conta explicitamente a função estrutural da parede.

O critério de isolamento térmico deve ser considerado de acordo com a Tabela 12 se a espessura equivalente da parede não for menor que a do valor correspondente na tabela. A espessura equivalente da parede a ser usada na Tabela 12 deve ser tomada da seguinte maneira:

- Para paredes maciças, a espessura real
- Para paredes parcialmente preenchidas, a espessura equivalente corresponde à área líquida da seção transversal dividida por seu comprimento.

Tabela 12 – Mínima espessura equivalente da parede para resistência segundo o critério de isolamento térmico

Resistência ao fogo (minutos)	Espessura equivalente para diferentes tipos de agregados (mm)		
	Agregados Tipo A	Agregados Tipo B	Agregados Tipo C
30	50	45	40
60	75	70	55
90	95	90	70
120	110	105	80
180	140	135	105
240	165	160	120

Nota:
Tipos de agregado:
A – quartzo, grauvaque, basalto e todas as demais não listadas
B – dacito, fonolito, andesito, riolito, calcário
C – pedra-pomes e agregados leves selecionados

Fonte: NZS 4230 (2004), p.39, Table 5.1 (traduzida para português).

O critério de integridade/estanqueidade estrutural será satisfeito se os critérios de isolamento térmico e estabilidade também o forem.

O critério de estabilidade para uma parede apoiada nos dois lados será satisfeito se:

- A parede cumpre as recomendações de dimensões, forças normais e critérios de resistência da norma NZS 3101.
- A espessura equivalente da parede não for menor que a espessura da Tabela 12.
- Se $N^* \leq 0,03 f'_m A_g$ e h_{we}/t_w não for maior que 50;
- Se $N^* > 0,03 f'_m A_g$:
 - h_{we}/t_w não deve ser maior que 20 e
 - o cobrimento da armadura ou cabo protendido (em relação à face exposta ao fogo) não deve ser menor que o dado na Tabela 13.

Onde:

N^* é a carga axial de cálculo para o estado limite último à meia altura da parede, em N.

f'_m é o valor da força resistente à compressão, de cálculo, do bloco, em MPa

A_g é a área bruta da seção transversal, em mm^2 .

h_{we} é a altura efetiva da parede, em mm

t_w é a espessura da parede, em mm

Se a parede tiver apoio superior e inferior, apenas, h_{we} deve ser tomado como:

- 1,0 h_{wu} se nenhum apoio restringir a rotação
- 0,85 h_{wu} se um dos apoios restringir a rotação
- 0,70 h_{wu} se os dois apoios restringirem a rotação.

Onde a restrição a rotação no apoio, se existir, for provocada por um componente fora do ambiente em chamas (incluindo uma continuação da parede)

Onde

h_{wu} é a altura da parede, em mm

Se a parede possuir apoios superior, inferior e nas laterais, h_{we} deve ser determinado:

- De acordo com o previsto para a parede que possui apoios superior e inferior, se $h_{wu} \geq L_L$, ou

- Substituindo-se h_{wu} por L_L nas determinações para parede que possui apoios superior e inferior se $h_{wu} > L_L$, a restrição à rotação determinada pelos apoios na direção de L_L

Onde

L_L é a distância entre os centros dos apoios laterais, em mm

Tabela 13 – Cobrimento mínimo da armadura ou cabo protendido para estabilidade de paredes

Resistência ao fogo (minutos)	Revestimento, c (mm)	
	Para armadura	Para cabo protendido
30	20	30
60	20	30
90	35	30
120	40	30
180	45	35
240	50	50

Fonte: NZS 4230 (2004), p.40, Table 5.2 (traduzida para português)

A resistência ao fogo das paredes pode ser incrementada pela aplicação de materiais isolantes na face exposta ao fogo. As maneiras aceitas de isolamento incluem:

(a) Espessuras de 1:4 de concreto de vermiculita ou de 1:4 de concreto de perlita, adequadamente aderidos à alvenaria de concreto

(b) Argamassa de gesso e vermiculita ou de gesso e perlita, ambas misturadas na proporção de 0,16 m³ de agregado para 100 kg de gesso, ou adicionada e propriamente aderida ao bloco ou aplicada com um spray ou espátula in situ.

(c) Qualquer outro material adequado para se resistir ao fogo.

Para os materiais citados acima, a espessura mínima para os adicionar como isolantes pode ser tomada como a diferença entre o revestimento necessário ou espessura efetiva e o revestimento existente ou espessura efetiva, multiplicado por:

- 0,75 para os materiais especificados acima em (a) e (b)
- Um fator para os materiais especificados acima em (c), proveniente de ensaios nos quais a diferença mencionada no parágrafo anterior se encontra dentro do intervalo de espessuras isolantes ensaiadas
- A espessura calculada arredondada para o número superior múltiplo de 5 mm mais próximo

Quando o reforço aplicado via spray ou espátula exceder 10 mm, o material deve ser reforçado para prevenir seu descolamento durante a exposição ao fogo.

Pode-se, também, calcular a resistência ao fogo em paredes através de resultados de ensaios ou por modelos matemáticos, como o da Recomendação Técnica BRANZ número 8, usado por essa norma. Foram elaborados gráficos baseados em tal recomendação, conforme as Figuras 14 e 15.

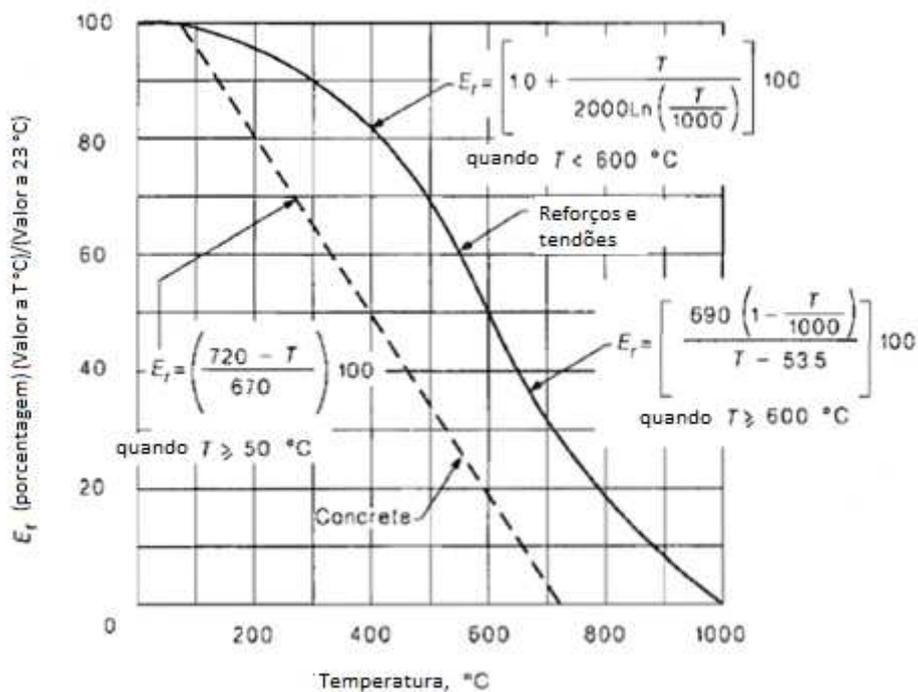


Figura 14 – Valores do módulo de elasticidade em função da temperatura a serem usados para se determinar a resistência ao fogo através de cálculos matemáticos

Fonte: NZS 4230 (2004), p.47, Figure 5.4 (traduzida para o português).

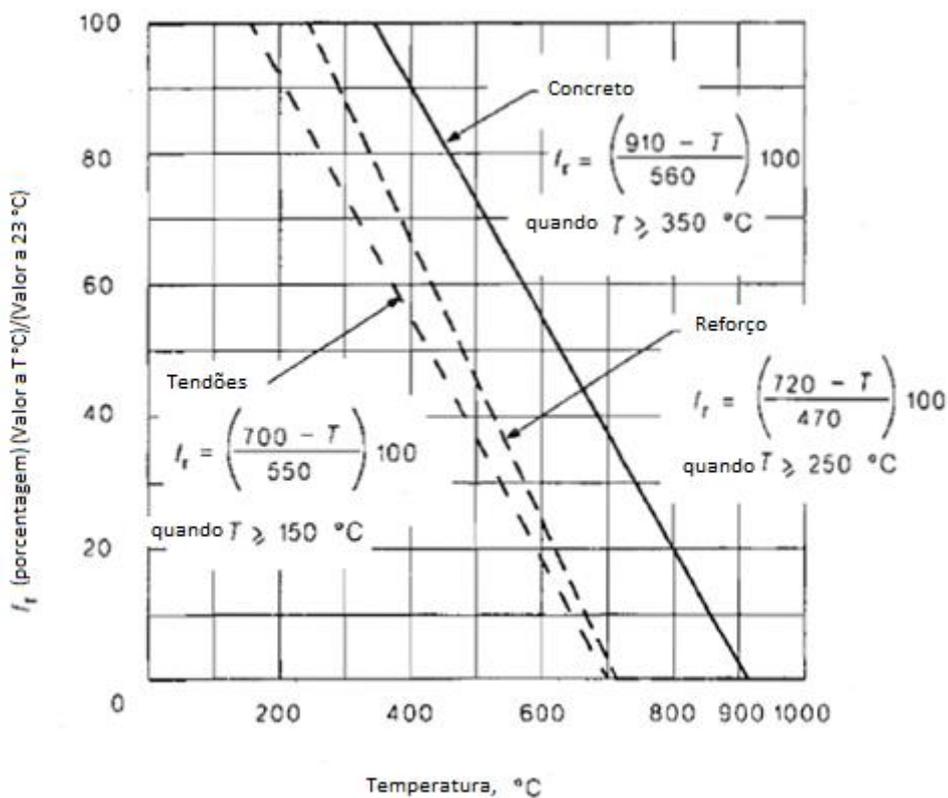


Figura 15 – Valores da resistência à compressão em função da temperatura a serem usados para se determinar a resistência ao fogo através de cálculos matemáticos

Fonte: NZS 4230 (2004), p.48, Figure 5.5 (traduzida para o português).

3.7 CÓDIGO EUROPEU: EUROCODE 6: EN 2005-1.2 – DESIGN OF MASONRY STRUCTURES. PART 1-2 – GENERAL RULES – STRUCTURAL FIRE DESIGN (2005)

O código europeu especifica as exigências necessárias a serem cumpridas no dimensionamento de estruturas em alvenaria em situação de incêndio.

É o código mais completo quando se fala de dimensionamento de paredes estruturais, pois especifica o nível de carregamento.

Para determinação da resistência ao fogo deve-se conhecer o tipo de bloco empregado, os materiais componentes dos blocos e o tipo de revestimento a ser aplicado.

Assim como em outras normas descritas, para a exposição ao fogo as estruturas devem cumprir os critérios de resistência mecânica (R), de estanqueidade (E) e de isolamento térmico (I). Observa-se a adição de um novo critério, o impacto mecânico (M). Tais critérios, com base nas funções previstas para a parede de alvenaria na edificação, podem ser agrupados na classificação a seguir:

-Paredes com função resistente unicamente: critério R

-Paredes com função de isolamento térmico e estanqueidade: critérios EI

-Paredes com função resistente, de isolamento térmico e de estanqueidade: critério REI

-Paredes com função resistente, de isolamento térmico, de estanqueidade e de resistência a impactos mecânicos: critérios REI-M

-Paredes com função de isolamento térmico, de estanqueidade e de resistência a impactos mecânicos: critérios EI-M

O código europeu não considera as condições de uso de ocupação das construções.

A avaliação das paredes de alvenaria estrutural em situação de incêndio pode ser feita através de ensaios em laboratório, por métodos de dimensionamento analíticos simplificados, por tabelas ou por modelos numéricos feitos em softwares como *Abaqus*, *Ansys*, etc.

3.7.1 Avaliação por método tabular

As tabelas estão contidas no Anexo B do código e fornecem a espessura mínima necessária da parede de alvenaria para a resistência ao fogo requerida.

As tabelas são divididas, inicialmente, pela função da parede na edificação (critérios de resistência ao fogo) e pelo tipo de material do bloco da parede (cerâmica, concreto com agregado leve ou agregado normal, concreto celular, etc.). A seguir, cada tabela é dividida em função da resistência à compressão dos blocos (f_b), em função da densidade dos blocos (ρ) e, por fim, em função da relação entre a força solicitante de cálculo da parede em situação de incêndio e a força resistente de compressão de cálculo (α – nível de carregamento, que é a razão entre a força solicitante à compressão de cálculo e a força resistente à compressão de cálculo da parede). Para ilustrar, abaixo estão algumas tabelas do código europeu.

Tabela 14 - Espessura mínima de paredes carregadas (critério REI) para concreto de agregado normal e leve

Nº da linha	Propriedades dos materiais Resistência à compressão (f_b) [N/mm ²] Densidade (ρ) [kg/m ³]	Mínima espessura (mm) t_f para a resistência ao fogo (minutos) para a classificação REI						
		30	45	60	90	120	180	240
1	Blocos do Grupo 1 Argamassa: uso geral, camada fina, leve							
1.1	Agregado leve $2 \leq f_b \leq 15$ $400 \leq \rho \leq 1600$							
1.1.1	$\alpha \leq 1,0$	90/170	90/170	90/170	100/170	100/190	140/240	150/300
1.1.2		(90/140)	(90/140)	(90/140)	(90/140)	(90/170)	(100/190)	(100/240)
1.1.3	$\alpha \leq 0,6$	70/140	70/140	70/140	90/170	90/170	100/190	100/240
1.1.4		(60/100)	(60/100)	(60/100)	(70/100)	(70/140)	(90/170)	(90/190)
1.2	Agregado normal $6 \leq f_b \leq 35$ $1200 \leq \rho \leq 2400$							
1.2.1	$\alpha \leq 1,0$	90/170	90/170	90/170	90/170	100/190	140/240	150/300
1.2.2		(90/140)	(100/140)	(90/140)	(90/140)	(90/170)	(100/190)	(100/240)
1.2.3	$\alpha \leq 0,6$	70/140	90/140	70/140	90/170	90/170	100/190	140/240
1.2.4		(60/100)	(70/100)	(70/100)	(70/100)	(70/140)	(90/170)	(100/190)

Fonte: EN 1996 1-2, Table N.B.3.2, p. 50 (traduzida para o português).

Tabela 15 - Espessura mínima de paredes carregadas (critério REI) para alvenaria cerâmica

Nº da linha	Propriedades dos materiais Resistência à compressão (f_b) [N/mm ²] Densidade (ρ) [kg/m ³]	Mínima espessura (mm) t_f para a resistência ao fogo (minutos) para a classificação REI						
		30	45	60	90	120	180	240
1S	Blocos do Grupo 1S							
1S.1	$5 \leq f_b \leq 75$ argamassa de uso geral $5 \leq f_b \leq 50$ camada fina de argamassa $1000 \leq \rho \leq 14400$							
1S.1.1	$\alpha \leq 1,0$	90	90	90	100	100/140	170/190	170/190
1S.1.2		(70/90)	(70/90)	(70/90)	(70/90)	(90/140)	(110/140)	(170/190)
1S.1.3	$\alpha \leq 0,6$	90	90	90	100	100/140	170	170
1S.1.4		(70/90)	(70/90)	(70/90)	(70/90)	(100/140)	(110/140)	(140/170)
1	Blocos do Grupo 1 Argamassa: uso geral, camada fina, leve							
1.2	$5 \leq f_b \leq 75$ $800 \leq \rho \leq 2400$							
1.2.1	$\alpha \leq 1,0$	90/100	90/100	90/100	100/170	140/170	170/190	190/210
1.2.2		(70/90)	(70/90)	(70/90)	(70/90)	(100/140)	(110/170)	(170/190)
1.2.3	$\alpha \leq 0,6$	90/100	90/100	90/100	100/140	140/170	140/170	190/200
1.2.4		(70/90)	(70/90)	(70/90)	(70/90)	(100/140)	(110/170)	(170/190)

Fonte: EN 1996 1-2, Table N.B.1.2, p. 32 (traduzida para o português).

As espessuras mínimas são indicadas nessas tabelas em valores únicos ou em intervalos recomendados. O intervalo recomendado é expresso por espessuras separadas por uma barra. Como exemplo, a indicação “90/100”, na tabela, representa a recomendação de que a espessura mínima a se adotar para a parede deve estar entre 90 mm e 100 mm.

Meyer (2012), em um Workshop da Comissão do Eurocode, ao analisar as recomendações europeias de dimensionamento de estruturas em situação de incêndio, observou que, ao se definir um código europeu unificado, não foi possível atingir um acordo final sobre os dados tabelados principalmente por conta das diferentes visões sobre

os métodos de ensaio e poucas fontes sobre as condições de contorno nesses ensaios. Foram definidos intervalos de possíveis valores. Esses intervalos, de acordo com Chudyba e Matysek (2013), podem gerar confusões no dimensionamento, porque são muito amplos.

Da mesma forma, as espessuras mínimas (ou intervalos) são expressas, na tabela, com a opção de se empregar, ou não, acabamentos adequados às exigências do código. Valores entre parênteses representam as espessuras mínimas (ou intervalos de espessuras) recomendadas para paredes com acabamentos adequados às exigências do código (acabamentos com espessura mínima de 10 mm nas duas faces de uma parede simples, ou na face exposta ao fogo em uma parede dupla).

3.7.2 Avaliação por métodos de dimensionamento analíticos simplificados

O código em questão restringe o dimensionamento de paredes de alvenaria estrutural em situação de incêndio pelo método simplificado às paredes executadas com blocos e argamassas específicos (Tabela 16).

O método simplificado, basicamente, consiste na determinação de duas isotermas da seção, uma para temperatura θ_1 (temperatura até a qual se pode considerar resistência à compressão residual da alvenaria) e outra para temperatura θ_2 (temperatura acima da qual se pode considerar como nula a resistência à compressão da alvenaria). A partir do traçado dessas isotermas na seção transversal, a parede é avaliada, em situação de incêndio, com a seção reduzida (toda a área da seção com temperatura acima de θ_2 descartada) e com parte da seção já reduzida com resistência à compressão menor do que aquela obtida em situação ambiente (região da seção transversal com temperaturas entre θ_1 e θ_2). Nota-se que, a partir de 100°C, a maioria dos blocos já apresenta redução em sua capacidade resistente. A Figura 16 exemplifica esse procedimento para o caso de um pilar em alvenaria estrutural.

Tabela 16 - Valores das temperaturas θ_1 e θ_2 em função dos materiais de execução da parede de alvenaria

Blocos de alvenaria e argamassa (superfície desprotegida)	Temperatura (°C)	
	θ_2	θ_1
Blocos cerâmicos com argamassa comum	600	100
Blocos de silicato de cálcio com uma fina camada de argamassa	500	100
Bloco de agregado leve (pedra-pomes) com argamassa comum	400	100
Bloco de agregado normal com argamassa comum	500	100
Bloco celular auto clavado com uma fina camada de argamassa	700	200

Fonte: BS EN 1996 1-2, 2005, p.67 (traduzida para o português).

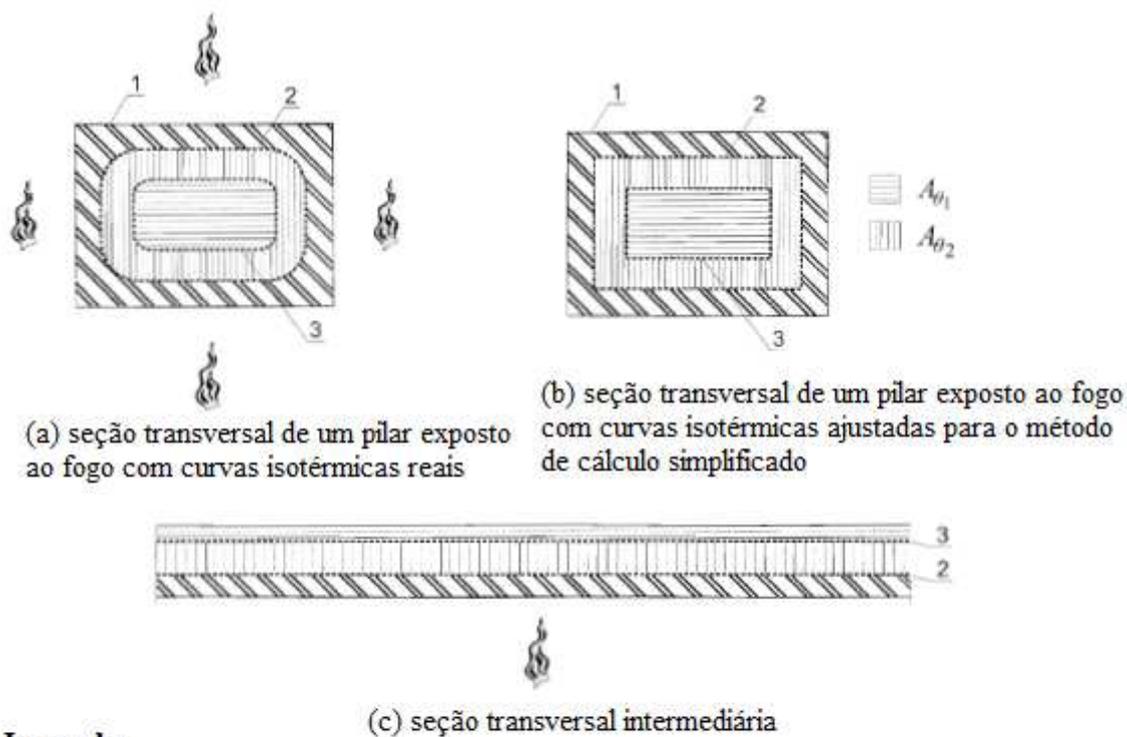


Figura 16 – Ilustração de áreas da alvenaria a temperaturas até θ_1 , entre θ_1 e θ_2 e áreas estruturalmente ineficientes (acima de θ_2)

Fonte: EN 1996 1-2, Figure C.1, p. 66 (traduzida para o português).

A verificação da seção é feita no Estado Limite Último e as ações são combinadas de acordo com as recomendações usuais do código (similar ao que ocorre com procedimentos já consagrados para o concreto ou para o aço).

No Estado Limite Último, para a situação de incêndio, o valor da força vertical solicitante de cálculo em uma parede ou pilar deve ser menor ou igual ao valor da força vertical resistente de cálculo da parede ou pilar.

$$N_{Sd} \leq N_{Rd,fi\theta_2} \quad (8)$$

O valor da força vertical resistente de cálculo de uma parede ou pilar é dada por:

$$N_{Rd,fi\theta_2} = \Phi(f_{d\theta_1}A_{\theta_1} + f_{d\theta_2}A_{\theta_2}) \quad (9)$$

Onde:

A = área total de alvenaria

A_{θ_1} = área de alvenaria até θ_1

A_{θ_2} = área de alvenaria entre θ_1 e θ_2

θ_1 = temperatura até a qual pode-se utilizar a capacidade resistente da alvenaria

θ_2 = temperatura acima da qual o material é desprezado

N_{Sd} = valor da força vertical solicitante de cálculo

$N_{Rd,fi\theta_2}$ = valor da força vertical resistente de cálculo, em situação de incêndio

$f_{d\theta_1}$ = resistência à compressão, de cálculo, da alvenaria até θ_1

$f_{d\theta_2}$ = resistência à compressão, de cálculo, da alvenaria entre θ_1 e θ_2

$e_{\Delta\theta}$ = excentricidade devido à variação de temperatura na alvenaria, calculada conforme o item 2.7.2.1.

Φ = fator de minoração da capacidade portante da parede que leva em consideração eventual excentricidade adicional $e_{\Delta\theta}$, calculado conforme o item 2.7.2.2.

Observa-se que a distribuição de temperaturas (isotermas) na seção transversal da parede ou pilar de alvenaria, ao longo do período de tempo de exposição ao fogo do elemento, deve ser obtida através de ensaio do elemento em laboratório ou a partir de uma base de dados (tabelas de isotermas) confiável.

3.7.2.1 Cálculo da excentricidade devido à variação de temperatura na alvenaria, $e_{\Delta\theta}$

A excentricidade, $e_{\Delta\theta}$, devido a variação de temperatura na parede ou pilar de alvenaria, para uso no método simplificado de cálculo pode ser obtida a partir da equação:

$$e_{\Delta\theta} = \frac{1}{8} h_{ef}^2 \frac{\alpha_t (\theta_2 - 20)}{t_{Fr}} \leq h_{ef} / 20 \quad (10)$$

Com: $e_{\Delta\theta} = 0$, quando se considera todas as faces do elemento sob ação do fogo

E:

θ_2 = temperatura acima da qual despreza-se a resistência à compressão do material, em °C

h_{ef} = altura efetiva da parede, calculada conforme item 2.7.2.2.1.

α_t = coeficiente de expansão térmica

t_{Fr} = espessura da seção transversal cuja temperatura não exceda θ_2

3.7.2.2 Cálculo do fator de minoração da capacidade portante, Φ

Φ é o fator de minoração da capacidade portante, que pode ser Φ_i , nas partes superior ou inferior da parede, e Φ_m , na metade da parede:

$$\Phi_i = 1 - 2 \frac{e_i}{t} \quad (11)$$

onde:

e_i é a excentricidade nas partes superior ou inferior da parede, o que for aplicável, calculada usando a Equação 12:

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_{id}} + e_{he} + e_{inic} \geq 0,05 t \quad (12)$$

M_{id} é o valor de cálculo do momento fletor nas partes superior ou inferior da parede, resultado da excentricidade da carga do piso no apoio (ver Figura 17)

N_{id} é o valor de cálculo da carga vertical na parte superior ou inferior da parede, se existir

e_{he} é a excentricidade na parte superior ou inferior da parede, se existir, resultante de cargas horizontais (como, por exemplo, o vento)

e_{inic} é a excentricidade inicial que possui o mesmo sinal de e_i

t é a espessura da parede

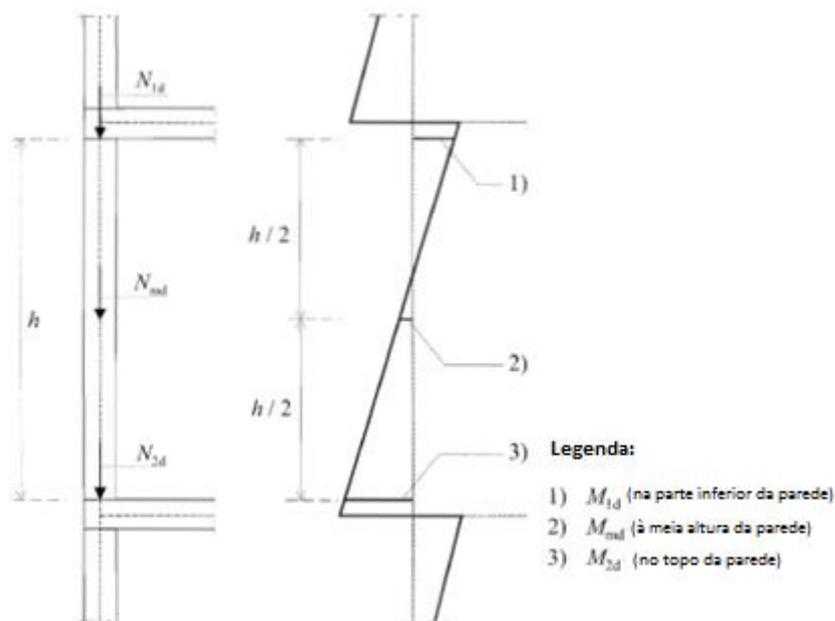


Figura 17 – Momentos resultantes de excentricidades

Fonte: EN 1996 1-1, Figure 6.1, p. 66 (traduzida para o português).

Usando-se uma simplificação dos princípios gerais relatados anteriormente, o fator de redução no meio da parede, Φ_m , pode ser determinado usando e_{mk} , onde:

e_{mk} é a excentricidade na metade da altura da parede, calculada de acordo com as Equações 13 e 14

$$e_{mk} = e_m + e_k \geq 0,05 t \quad (13)$$

$$e_m = \frac{M_{md}}{N_{md}} + e_{hm} + e_{inic} \quad (14)$$

e_m é a excentricidade devido às cargas

M_{md} é o valor de cálculo do maior momento no meio da parede, resultado dos momentos das partes superior e inferior da mesma (ver Figura 17), incluindo uma eventual carga aplicada na face da parede (como, por exemplo, um suporte)

N_{md} é o valor de cálculo da carga vertical na metade da parede, incluindo uma eventual carga aplicada na face da parede (como, por exemplo, um suporte)

e_{hm} é a excentricidade no meio da parede resultante de cargas horizontais (como, por exemplo, o vento). A inclusão de e_{hm} depende da combinação de ações usada na verificação, seu sinal deve ser levado em conta.

e_{inic} é a excentricidade inicial que possui o mesmo sinal de e_m

h_{ef} é a altura efetiva da parede, obtida conforme o item 2.7.2.2.1, ou a condição de contorno ou rigidez apropriada

e_k é a excentricidade devido à deformação, calculada de acordo com o item 2.7.2.2.2.

3.7.2.2.1 Cálculo da altura efetiva da parede, h_{ef}

A altura efetiva de uma parede estrutural deve ser tomada levando-se em conta a rigidez relativa dos elementos da estrutura conectados à parede e a eficiência dessas conexões. Uma parede pode se tornar mais rígida com pisos, ou tetos, paredes perpendiculares bem amarradas, ou qualquer outro elemento estrutural rígido ao qual a parede está conectada. A parede pode ser considerada como enrijecida numa junção vertical se não se espera que ocorram fissuras entre a parede e sua parede enrijecedora (quando ambas as paredes são feitas com materiais que possuem um comportamento semelhante na deformação, se forem aproximadamente igualmente carregadas, se são construídas ao mesmo tempo e são amarradas entre si e movimentação diferencial entre as paredes não é esperada) ou se a ligação entre a parede e sua parede enrijecedora resiste às tensões e forças de compressão através de amarras ou quaisquer outros meios adequados.

Paredes enrijecedoras devem ter um comprimento de pelo menos um quinto de sua altura livre e possuir uma espessura de pelo menos 0,3 vezes a espessura efetiva da parede a ser enrijecida. Se a parede enrijecedora possuir aberturas, o comprimento mínimo da parede entre aberturas deve ser de acordo com o mostrado na Figura 18, e a parede enrijecedora deve ainda possuir um comprimento adicional, de pelo menos um quinto de seu pé-direito, entre cada abertura e o fim da parede.

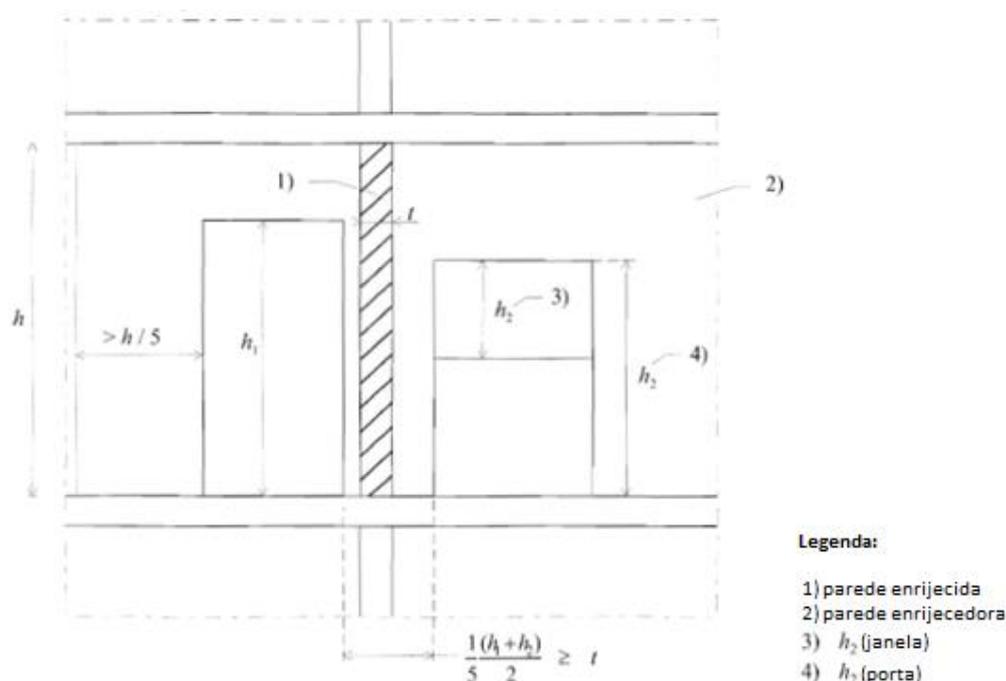


Figura 18 – Comprimento mínimo de paredes enrijecedoras com aberturas

Fonte: EN 1996 1-1, Figure 5.1, p. 53 (traduzida para o português).

Paredes também podem ser enrijecidas por outros elementos desde que estes possuam rigidez equivalente à rigidez de uma parede de alvenaria enrijecedora e que eles sejam ancorados ou amarrados à parede, e as amarras sejam projetadas para resistir às tensões e forças de compressão que existirão. Paredes enrijecidas em dois pontos, com $l \geq 30 t$, ou paredes enrijecidas em um ponto, com $l \geq 15 t$, onde l é o comprimento da parede, entre as paredes enrijecedoras ou uma beirada e t é a espessura da parede enrijecida, devem ser tratadas como paredes apoiadas nas partes superior e inferior apenas.

Se a parede enrijecida for enfraquecida por ranhuras verticais, a espessura reduzida da parede deve ser usada no lugar de t , ou deve-se assumir uma borda livre no lugar da ranhura vertical. Deve-se assumir sempre uma borda livre quando a espessura da parede remanescente após a formação da ranhura vertical for menor que metade da espessura da parede.

Em paredes com aberturas que possuem uma altura maior que $\frac{1}{4}$ da altura da parede ou uma largura maior que $\frac{1}{4}$ do comprimento da parede ou uma área de mais de $\frac{1}{10}$ da área total da parede, deve-se considerar borda livre na borda da abertura para se determinar a altura efetiva.

A altura efetiva de uma parede deve ser tomada como:

$$h_{ef} = \rho_n h \quad (15)$$

onde:

h_{ef} é a altura efetiva da parede;

h é a altura livre do da parede;

ρ_n é um fator de redução onde $n = 2, 3$ ou 4 dependendo da restrição nas bordas ou enrijecimento da parede.

O fator de redução, ρ_n , pode ser:

- Para paredes apoiadas nas partes superior e inferior por pisos ou lajes de concreto armado que se estendem dos dois lados no mesmo nível ou por um piso de concreto armado que se estende em um lado e suporta pelo menos $2/3$ da espessura da parede:

$$\rho_2 = 0,75 \quad (16)$$

A menos que a excentricidade da carga na parte superior da parede seja maior que $0,25$ vezes sua espessura, nesse caso,

$$\rho_2 = 1,0 \quad (17)$$

- Para paredes apoiadas nas partes superior e inferior por pisos ou lajes de madeira que se estendem dos dois lados no mesmo nível ou por piso de madeira que se estenda de um lado apoiando pelo menos $2/3$ da espessura da parede, mas não menos que 85 mm:

$$\rho_2 = 1,0 \quad (18)$$

- Para paredes apoiadas nas partes superior e inferior e enrijecidas verticalmente em uma borda (e com uma borda livre):

Quando $h \leq 3,5 l$

$$\rho_3 = \frac{1}{1 + \left[\frac{\rho_2 h}{3l} \right]^2} \rho_2 \quad (19)$$

com ρ_2 calculado nas Equações 16, 17 ou 18, o que for apropriado

Quando $h > 3,5 l$

$$\rho_3 = \frac{1,5 l}{h} \geq 0,3 \quad (20)$$

onde:

l é o comprimento da parede

- Para paredes apoiadas nas partes superior e inferior e enrijecidas verticalmente em dois pontos:

Quando $h \leq 1,15 l$, com ρ_2 das Equações 16, 17 ou 18, o que se aplicar:

$$\rho_4 = \frac{1}{1 + \left[\frac{\rho_2 h}{l} \right]^2} \rho_2 \quad (21)$$

Quando $h > 1,15 l$

$$\rho_4 = \frac{0,5 l}{h} \quad (22)$$

onde:

l é o comprimento da parede

3.7.2.2.2 Cálculo da excentricidade devido à deformação, e_k

A excentricidade devido à deformação, e_k , é calculada de acordo com a equação a seguir:

$$e_k = 0,002 \phi_\infty \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \sqrt{t_{em}} \quad (23)$$

t_{ef} é a espessura efetiva da parede, calculada de acordo com o item 2.7.2.2.1

ϕ_∞ é o coeficiente de deformação final, obtido através da avaliação de resultados de ensaios, determinado através da seguinte Equação:

$$\phi_\infty = \varepsilon_{c\infty} / \varepsilon_{el} \quad (24)$$

Onde

$\varepsilon_{c\infty}$ é a deformação final e

$$\varepsilon_{cl} = \sigma / E \quad (25)$$

Para paredes com índice de esbeltez menor ou igual a λ_c , a excentricidade devido à deformação, e_k , pode ser tomada como zero.

O valor recomendado de λ_c é 15.

O Eurocode 6 (2005) tabelou os intervalos de valores de ϕ_∞ para diferentes tipos de blocos de alvenaria:

Tabela 17 – Intervalos do coeficiente de deformação final para diferentes tipos de blocos de alvenaria

Tipo de bloco de alvenaria		Coeficiente de deformação final, ϕ_{∞}
Cerâmico		0,5 a 1,5
Silicato de cálcio		1,0 a 2,0
Concreto de agregado normal		1,0 a 2,0
Concreto leve		1,0 a 3,0
Concreto celular autoclavado (CCA)		0,5 a 1,5
Pedra Natural	Magmática	Esse valor geralmente é muito baixo
	Sedimentar	
	Metamórfica	

Fonte: EN 1996 1-1, 3.7.4(2), p. 45.

3.7.2.2.2.1 Cálculo da espessura efetiva da parede, t_{ef}

A espessura efetiva, t_{ef} , de uma parede simples e de uma parede dupla deve ser tomada como a espessura real da parede, t .

A espessura efetiva de uma parede enrijecida por *piers* (pequenas paredes enrijecedoras – ver Figura 19) deve ser obtida de acordo com a Equação 26:

$$t_{ef} = \rho_t \cdot t \quad (26)$$

Onde:

ρ_t é um coeficiente obtido na Tabela 18

t é a espessura da parede

Tabela 18 – Coeficiente de rigidez, ρ_t , para paredes enrijecidas por *piers* (pequenas paredes enrijecedoras)

Razão entre o espaçamento do píer (centro a centro) com a largura do píer	Razão da profundidade do píer com a espessura da parede na qual ele está inserido		
	1	2	3
6	1,0	1,4	2,0
10	1,0	1,2	1,4
20	1,0	1,0	1,0

Nota: a interpolação linear entre os valores dados nessa Tabela é permitida

Fonte: EN 1996 1-1, Table 5.1, p. 56.

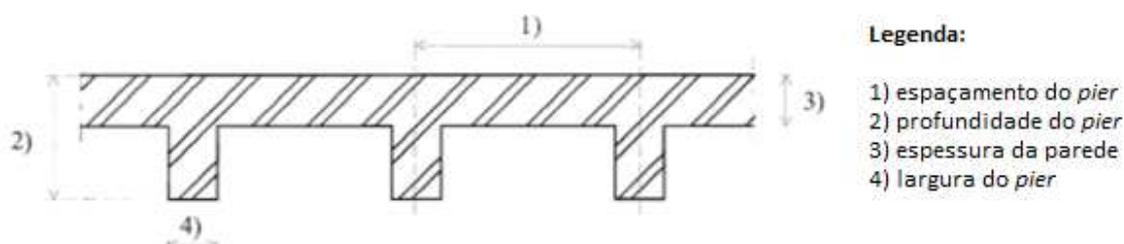


Figura 19 – Diagrama das definições usadas na Tabela 13

Fonte: EN 1996 1-1, Figure 5.2, p. 56.

4 CÁLCULO DOS BLOCOS USUAIS NO BRASIL DE ACORDO COM OS MÉTODOS DESCRITOS NOS ITENS 2.4, 2.5, 2.6 E 2.7

O Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) é o período de tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento quando sujeito ao incêndio padrão. O TRRF é dado, no Brasil, pela NBR 14432 (2000) e também pela IT-08 (2011). A diferença entre as tabelas das duas referências é a altura da edificação. A primeira contempla edificações de classe P1 (menor que 6 metros de altura) a P5 (entre 30 e 80 metros de altura), já a segunda contempla até a classe P8 (entre 150 e 250 metros de altura). Considerou-se apenas a tabela dada na NBR 14432, porque ela contempla as alturas usuais para construções em alvenaria estrutural. Observou-se que o TRRF varia de 30 a 120 minutos, dependendo da ocupação e altura da edificação.

Abaixo, na Tabela 19, encontram-se os TRRFs, em minuto, para edificações de diferentes ocupações e de diferentes classes (alturas). Os períodos de tempo entre parênteses podem ser usados em subsolo nos quais a área bruta de cada pavimento seja menor ou igual a 500 m² e em edificações nas quais cada pavimento acima do solo tenha área menor ou igual a 750 m².

Tabela 19 – Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF), em minutos

Ocupação/Usos	Divisão	Altura da edificação				
		Classe P ₁ h _s ≤ 6 m	Classe P ₂ 6 m < h _s ≤ 12 m	Classe P ₃ 12 m < h _s ≤ 23 m	Classe P ₄ 23 m < h _s ≤ 30 m	Classe P ₅ 30 m < h _s ≤ 80 m
Residencial	A-1 a A-3	30	30	60	90	120
Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	30	60 (30)	60	90	120
Comercial varejista	C-1 a C-3	60 (30)	60 (30)	60	90	120
Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	30	60 (30)	60	90	120
Educacional e cultura física	E-1 a E-6	30	30	60	90	120
Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	60 (30)	60	60	90	120
Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	30	60 (30)	60	90	120
	G-1 e G-2 abertos lateralmente	30	30	30	30	60
Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	30	60	60	90	120
Industrial	I-1	30	30	60	90	120
	I-2	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
Depósitos	J-1	30	30	30	30	60
	J-2	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Fonte: NBR 14432, 2000, p. 7, Tabela A.1 (adaptado).

Na Tabela 20 encontram-se as classificações das edificações conforme sua ocupação.

Tabela 20 – Classificação das edificações quanto à sua ocupação

Ocupação/uso	Divisão	Descrição
Residencial	A-1	Habitações unifamiliares
	A-2	Habitações multifamiliares
	A-3	Habitações coletivas
Serviços de hospedagem	B-1	Hotéis e assemelhados
	B-2	Hotéis residenciais
Comercial varejista	C-1	Comércio em geral, de pequeno porte
	C-2	Comércio de grande e médio porte
	C-3	Centros comerciais
Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1	Locais para prestação de serviços profissionais ou condução de negócios
	D-2	Agências bancárias
	D-3	Serviços de reparação (exceto os classificados em G e I)
Educativa e cultura física	E-1	Escolas em geral
	E-2	Escolas especiais
	E-3	Espaço para cultura física
	E-4	Centros de treinamento profissional
	E-5	Pré-escolas
	E-6	Escolas para portadores de deficiências
Locais de reunião pública	F-1	Locais onde há objetos de valor inestimável
	F-2	Templos e auditórios
	F-3	Centros esportivos
	F-4	Estações e terminais de passageiros
	F-5	Locais de produção e apresentação de artes cênicas
	F-6	Clubes sociais
	F-7	Construções provisórias
	F-8	Locais para refeições
Serviços automotivos	G-1	Garagens sem acesso de público e sem abastecimento
	G-2	Garagens com acesso de público e sem abastecimento
	G-3	Locais dotados de abastecimento de combustível
	G-4	Serviços de conservação, manutenção e reparos

	G-5	Serviços de manutenção em veículos de grande porte e retificadoras em geral
Serviços de saúde e institucionais	H-1	Hospitais veterinários e assemelhados
	H-2	Locais onde pessoas requerem cuidados especiais por limitações físicas ou mentais
	H-3	Hospitais e assemelhados
	H-4	Prédios e instalações vinculadas às forças armadas, polícias civil e militar
	H-5	Locais onde a liberdade das pessoas sofre restrições
Industrial, comercial de médio e alto risco, atacadista	I-1	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados ou depositados apresentem médio potencial de incêndio
	I-2	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados e/ou depositados apresentem grande potencial de incêndio
Depósitos	J-1	Depósitos de baixo risco de incêndio
	J-2	Depósitos de médio e alto risco de incêndio

Fonte: NBR 14432, 2000, p. 8, Tabela B.1 (adaptado).

De acordo com o observado nas Tabelas 19 e 20, considerou-se o TRRF de 120 minutos para os blocos brasileiros.

4.1 Segundo o Código Sul-Africano

Primeiramente, determinou-se a espessura equivalente (diferente da espessura equivalente dada na NBR 6136, 2014) dos blocos, de acordo com o expresso na Tabela 21, a seguir.

Tabela 21 – Espessuras equivalentes dos blocos de concreto brasileiros

Classe	Número do Bloco	Largura (cm)	Altura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura equivalente do bloco (cm)
--------	-----------------	--------------	-------------	------------------	-------------------------------------

A	1	19	19	39	8,82
	2	14	19	39	6,73
	3	14	19	29	7,33
B	4	19	19	39	8,82
	5	14	19	39	6,73
	6	14	19	29	7,33
C	7	19	19	39	5,73
	8	14	19	39	5,04
	9	14	19	29	5,54
	10	11,5	19	39	4,69
	11	11,5	19	24	5,38
	12	11,5	19	36,5	4,77
	13	9	19	39	4,35
	14	9	19	29	4,61
	15	6,5	19	39	3,40

O código sul-africano separa as paredes em blocos vazados e blocos maciços. Para os blocos vazados (realidade brasileira), a resistência ao fogo se dá conforme a seguir:

Tabela 22 – Resistência ao fogo dos blocos brasileiros segundo o código sul-africano

Número do Bloco	Espessura equivalente do bloco (cm)	Resistência ao fogo (min), com revestimento no lado exposto ao fogo com argamassa de pelo menos 12 mm
1	8,82	60
2	6,73	Não possui resistência
3	7,33	60
4	8,82	60
5	6,73	Não possui resistência
6	7,33	60
7	5,73	Não possui resistência
8	5,04	Não possui resistência
9	5,54	Não possui resistência
10	4,69	Não possui resistência
11	5,38	Não possui resistência
12	4,77	Não possui resistência
13	4,35	Não possui resistência
14	4,61	Não possui resistência
15	3,40	Não possui resistência

Nota-se que, segundo esse código, as paredes vazadas praticamente não resistem a um incêndio, de fato, a tabela nele contida foca em paredes de blocos maciços – todos os blocos brasileiros foram considerados vazados. Além disso, os blocos que apresentaram alguma resistência não atingiram o TRRF de 120 minutos.

4.2 Segundo o Código Americano

Com a espessura equivalente (Tabela 21), pôde-se determinar a resistência ao fogo de cada bloco, composto por diferentes tipos de agregados. Esses valores foram determinados através de interpolação linear (Tabela 23). Foram determinadas as espessuras somente para os blocos, sem contar a existência de revestimento na face exposta ou não ao fogo.

Tabela 23 – Resistência ao fogo, em minutos, para os blocos de concreto brasileiros, em função do tipo de agregado utilizado em sua fabricação

Número do Bloco, de acordo com a Tabela 21	Tipo de Agregado			
	Cascalho de calcário ou silício	Pedra calcária, cinzas ou escória resfriada a ar	Argila expandida, xisto expandido ou ardósia expandida	Escória expandida ou pedra-pomes
1	86	94	108	141
2	54	58	62	87
3	63	68	72	101
4	86	94	108	141
5	54	58	62	87
6	63	68	72	101
7	39	44	47	68
8	< 30	34	37	52
9	37	41	44	64
10	< 30	< 30	31	43
11	34	39	42	61
12	< 30	30	33	45
13	< 30	< 30	< 30	38
14	< 30	< 30	30	42
15	< 30	< 30	< 30	< 30

Observou-se que, de acordo com o código americano, apenas os blocos 1 e 4 (19x19x39 cm das Classes A e B) fabricados com agregados do tipo escória expandida ou pedra-pomes atenderam ao TRRF de 120 minutos.

4.3 Segundo o Código Australiano

4.3.1 De acordo com o critério de resistência mecânica

Para fazer o dimensionamento de acordo com o critério de resistência mecânica (adequabilidade estrutural), considerou-se que a parede a ser calculada possui 3 metros de largura por 3 metros de comprimento, com apoios superior, inferior e em uma lateral (ou nas duas, para esse cálculo não importa) e o apoio se estende por toda a extensão lateral da parede.

Com essas considerações, calculou-se a resistência de uma parede (Tabela 24).

Tabela 24 – Resistência ao fogo, em minutos, para uma parede de 3m x 3m feita com blocos de concreto brasileiros, em função da porcentagem de agregados basálticos nos blocos, segundo o critério de adequabilidade estrutural do código australiano

Número do Bloco, de acordo com a Tabela 21	Paredes com blocos de concreto com agregados basálticos que representem menos de 45% de todos os agregados	Paredes com blocos de concreto com agregados basálticos que representem pelo menos 45% de todos os agregados
1	240	240
2	240	240
3	240	240
4	240	240
5	240	240
6	240	240
7	240	240
8	240	240
9	240	240
10	120	240
11	120	240
12	120	240
13	< 30	90
14	< 30	90
15	< 30	< 30

Os blocos de 1 a 12 apresentaram resistência ao fogo igual ou superior ao TRRF de 120 minutos.

4.3.2 De acordo com o critério de isolamento

Tabela 25 – Resistência ao fogo, em minutos, para os blocos de concreto brasileiros, em função de sua densidade, segundo o critério de isolamento do código australiano

Número do Bloco, de acordo com a Tabela 21	Paredes com blocos de concreto com densidade superior a 1800 kg/m ³	Paredes com blocos de concreto com densidade igual ou inferior a 1800 kg/m ³
1	60	60
2	30	30
3	30	30
4	60	60
5	30	30
6	30	30
7	30	30
8	< 30	< 30
9	30	30
10	< 30	< 30
11	< 30	< 30
12	< 30	< 30
13	< 30	< 30
14	< 30	< 30
15	< 30	< 30

Para o critério de isolamento térmico, nenhum bloco apresentou resistência superior ao TRRF.

4.4 Segundo o Código Neozelandês

O código neozelandês também separa a resistência ao fogo segundo o critério de isolamento e segundo os critérios de estanqueidade/adequabilidade estrutural. No entanto, para se fazer o cálculo de acordo com o segundo método, é relevante o conhecimento de valores de carga e, portanto, num primeiro instante, só se fará o cálculo para o critério de isolamento, disponível na Tabela 26.

Tabela 26 – Resistência ao fogo dos blocos brasileiros segundo o critério de isolamento do código neozelandês

Número do Bloco	Espessura equivalente do bloco (cm)	Resistência ao fogo (min), para blocos feitos com agregados tipo A	Resistência ao fogo (min), para blocos feitos com agregados tipo B	Resistência ao fogo (min), para blocos feitos com agregados tipo C
1	8,82	60	60	90
2	6,73	30	30	60
3	7,33	30	60	60
4	8,82	60	60	90
5	6,73	30	30	60
6	7,33	30	30	90
7	5,73	30	30	60
8	5,04	30	30	30
9	5,54	30	30	60
10	4,69	< 30	30	30
11	5,38	30	30	30
12	4,77	< 30	30	30
13	4,35	< 30	< 30	30
14	4,61	< 30	30	30
15	3,40	< 30	< 30	< 30

Nota:

Tipos de agregado:

A – quartzo, grauvaque, basalto e todas as demais não listadas

B – dacito, fonolito, andesito, riolito, calcário

C – pedra-pomes e agregados leves selecionados

De acordo com esse método de cálculo, nenhum bloco atinge o TRRF de 120 minutos.

4.5 Segundo o Código Europeu

As tabelas são divididas, inicialmente, pela função da parede na edificação (critérios de resistência ao fogo) e pelo tipo de material do bloco da parede (cerâmica, concreto com agregado leve ou agregado normal, concreto celular, etc.). A seguir, cada tabela é dividida em função da resistência à compressão dos blocos (f_b), em função da densidade dos blocos (ρ) e, por fim, em função da relação entre as solicitações de cálculo da parede em situação de incêndio e as solicitações de cálculo em situação normal (α).

Também são divididas por grupos de blocos, classificados de acordo com seu tipo de material e volume de vazios, conforme a Tabela 27:

Tabela 27 – Classificação dos blocos em grupos

	Materiais e limites para blocos de alvenaria				
	Grupo 1 (todos os materiais)		Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
		Blocos	Furos verticais		Furos horizontais
Volume de todos os vazios (% do volume bruto)	≤ 25	Cerâmicos	> 25; ≤ 55	≥ 25; ≤ 70	> 25; ≤ 70
		Silicato de cálcio	> 25; ≤ 55	Não usado	Não usado
		Concreto	> 25; ≤ 60	> 25; ≤ 70	> 25; ≤ 50
Obs.: Os blocos de concreto celular autoclavado (CCA) são considerados do Grupo 1.					

Fonte: Eurocode 6 1.1 (2005), p. 31, Table 3.1 (traduzida para o português e adaptada)

Calculou-se o volume de vazios dos blocos da Tabela 21 e os mesmos foram classificados em grupos de acordo com o descrito na Tabela 27, e essas informações estão contidas na Tabela 28.

Tabela 28 – Classificação dos blocos brasileiros em grupos

Classe	Número do Bloco	% de vazios	Classificação para blocos de silicato de cálcio	Classificação para blocos de concreto
A	1	54	Grupo 2	Grupo 2
	2	52	Grupo 2	Grupo 2
	3	48	Grupo 2	Grupo 2
B	4	54	Grupo 2	Grupo 2
	5	52	Grupo 2	Grupo 2
	6	48	Grupo 2	Grupo 2
C	7	70	Não usado	Grupo 3
	8	64	Não usado	Grupo 3
	9	60	Não usado	Grupo 3
	10	59	Não usado	Grupo 2
	11	53	Grupo 2	Grupo 2
	12	59	Não usado	Grupo 2
	13	52	Grupo 2	Grupo 2
	14	49	Grupo 2	Grupo 2
	15	48	Grupo 2	Grupo 2

As tabelas do Eurocode também apresentam limites mínimos de resistência dos blocos. A NBR 6136 dita que os blocos da Classe A devem ter $f_{bk} \geq 8,0$ MPa, os blocos da Classe B devem ter $4,0 \text{ MPa} \leq f_{bk} \leq 8,0 \text{ MPa}$ e os blocos da Classe C devem ter $f_{bk} \geq 3,0$ MPa. Fazendo-se a intersecção dessas disposições da NBR com os limites de f_b das Tabelas do Eurocode, alguns blocos não foram considerados em alguns cálculos.

Os valores de resistência ao fogo de alvenaria concreto com blocos de silicato de cálcio, de concreto e de concreto celular autoclavado (CCA), em minutos, de acordo com os critérios de estanqueidade e isolamento (EI) e resistência, estanqueidade e isolamento (REI), estão dispostos nas Tabelas 29 a 32, a seguir.

Tabela 29 – Resistência ao fogo, em minutos, para o critério EI de blocos de concreto brasileiros

Classe	Número do Bloco	Material do bloco				
		Silicato de cálcio	Concreto		Concreto celular autoclavado (CCA)	
			Agregado leve $2 \leq f_b \leq 15$ $240 \leq \rho \leq 1200$	Agregado normal $6 \leq f_b \leq 35$ $720 \leq \rho \leq 1650$	$350 \leq \rho \leq 500$	$500 \leq \rho \leq 1000$
A	1	240	240	240	240	240
	2	240	240	240	240	240
	3	240	240	240	240	240
B	4	240	240	240	240	240
	5	240	240	240	240	240
	6	240	240	240	240	240
C	7	f_b fora do intervalo dado na NBR 6136	Valor não especificado	f_b fora do intervalo dado na NBR 6136	240	240
	8		Valor não especificado		240	240
	9		Valor não especificado		240	240
	10		180		240	240
	11		180		240	240
	12		180		240	240
	13		90		180	180
	14		90		180	180
	15		90		90	120

Na Tabela 29, as paredes não têm função estrutural, somente foram considerados os critérios de estanqueidade e isolamento térmico. De acordo com eles, praticamente todos os blocos brasileiros que tiveram valores especificados atenderam ao TRRF de 120 minutos. As tabelas a seguir já contemplam a função estrutural das paredes, com níveis de carregamento (α) de 100 ou 60%.

Tabela 30 – Resistência ao fogo, em minutos, para o critério REI de blocos de concreto de silicato de cálcio brasileiros

Classe	Número do Bloco	Silicato de cálcio			
		Argamassa geral $6 \leq f_b \leq 35$ $700 \leq \rho \leq 1600$		Argamassa fina $6 \leq f_b \leq 35$ $700 \leq \rho \leq 1600$	
		$\alpha \leq 1,0$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha \leq 1,0$	$\alpha \leq 0,6$
A	1	90	120	90	120
	2	90	120	90	120
	3	90	120	90	120
B	4	90	120	90	120
	5	90	120	90	120
	6	90	120	90	120
C	7	f_b fora do intervalo dado na NBR 6136			
	8				
	9				
	10				
	11				
	12				
	13				
	14				
15					

Os blocos brasileiros das classes A e B, em paredes com níveis de carregamento iguais ou inferiores a 60% atenderam ao TRRF de 120 minutos. Os mesmos blocos com um nível de carregamento entre 60 e 100% não resistiram os 120 minutos prescritos na NBR 14432 (2000).

Tabela 31 – Resistência ao fogo, em minutos, para o critério REI de blocos de concreto brasileiros

Classe	Número do Bloco	Concreto
--------	-----------------	----------

		Agregado leve $2 \leq f_b \leq 8$ $400 \leq \rho \leq 1400$		Agregado normal $6 \leq f_b \leq 35$ $1400 \leq \rho \leq 2000$	
		$\alpha \leq 1,0$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha \leq 1,0$	$\alpha \leq 0,6$
A	1	f_b fora do intervalo dado na NBR 6136		120	120
	2			120	120
	3			120	120
B	4	120	120	120	120
	5	120	120	120	120
	6	120	120	120	120
C	7	Valor não especificado		f_b fora do intervalo dado na NBR 6136	
	8				
	9				
	10	120	120		
	11	120	120		
	12	120	120		
	13	30	90		
	14	30	90		
15	30	90			

Os blocos brasileiros de 1 a 12 que tiveram valores especificados atenderam ao TRRF de 120 minutos.

Tabela 32 – Resistência ao fogo, em minutos, para o critério REI de blocos de concreto celular autoclavado (CCA) brasileiros

Classe	Número do Bloco	Concreto celular autoclavado (CCA)			
		$2 \leq f_b \leq 4$ $350 \leq \rho \leq 500$		$4 < f_b \leq 8$ $500 \leq \rho \leq 1000$	
		$\alpha \leq 1,0$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha \leq 1,0$	$\alpha \leq 0,6$
A	1	f_b fora do intervalo dado na NBR 6136		f_b fora do intervalo dado na NBR 6136	
	2				
	3				
B	4	f_b fora do intervalo dado na NBR 6136		240	240
	5			180	180
	6			180	180
C	7	240	240	f_b fora do intervalo dado na NBR 6136	
	8	180	180		
	9	180	180		
	10	120	120		
	11	120	120		
	12	120	120		
	13	120	120		
	14	120	120		
15	< 30	< 30			

Os blocos brasileiros de 1 a 14 que tiveram os valores de resistência ao fogo especificados atenderam aos 120 minutos de TRRF.

4.6 Comparação

Primeiramente estipulou-se um valor de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) de 120 minutos, para ver se os blocos brasileiros, ao serem calculados de acordo com as especificações dos cinco códigos estudados, iriam ou não atingi-lo.

O código sul-africano, por ter foco em blocos maciços, apresentou resistências muito conservadoras e incompatíveis com quaisquer outros códigos estudados neste trabalho. Não se recomenda basear em tal código o cálculo de resistência ao fogo de estruturas de alvenaria de blocos de concreto, até porque, além da incompatibilidade na classificação dos blocos, não há especificações para a consideração de paredes estruturais. Nenhum bloco brasileiro, de acordo com a norma vigente na África do Sul, atinge o TRRF desejado,

Pode-se notar que o código americano é totalmente focado no critério do isolamento. Como tal, ele é mais conservador que os códigos europeu, australiano e neozelandês, e, ao contrário desses outros, ele não considera níveis de carregamento das paredes e, portanto, também não se recomenda utilizá-lo no cálculo de paredes brasileiras. Além disso, somente os blocos 1 e 4 (19x19x30 cm Classe A e 19x19x39 cm Classe B) com agregados tipo escória expandida ou pedra-pomes passariam no TRRF de 120 minutos.

O código australiano, pelo critério de resistência para uma parede de 3 metros de altura por 3 metros de comprimento, provou-se compatível com o método tabular para os critérios REI, do código europeu. Tal fato também pode ser utilizado para comprovar que, apesar do código australiano não informar o nível de carregamento, ele considera, implicitamente, a função estrutural da parede ao definir limites para seu índice de esbeltez. Para o critério de isolamento, as resistências apresentadas foram compatíveis com as apresentadas pelos códigos americano e neozelandês. Quanto ao TRRF, para o critério de isolamento, nenhum bloco passou; e para o critério de resistência, passaram os blocos 1 a 12.

O código neozelandês, para o critério de isolamento, provou-se compatível com o critério de isolamento do código australiano, um pouco mais conservador que o código americano, mas compatível com ele, e, portanto, mais conservador que o método

tabular do código europeu para o critério EI. Pelo critério de isolamento, nenhum bloco atingiu o TRRF de 120 minutos e, portanto, também não se recomenda usar esse código para o dimensionamento de paredes brasileiras de alvenaria em situação de incêndio.

O código europeu, pelo método tabular, é bem menos conservador que os códigos americano e neozelandês (nos critérios de isolamento). Suas tabelas não são tão fáceis de se ver, já que elas apresentam intervalos de espessuras mínimas para resistir ao fogo por um determinado período de tempo, porém, em muitas dessas tabelas, os mesmos intervalos se repetem em diferentes faixas de resistência ao fogo. Optou-se por utilizar a maior resistência ao fogo de uma determinada espessura de bloco, e, por conta dessa opção, conforme já mencionado, esse código ficou menos conservador que os demais. Mesmo assim, ele especifica níveis de carregamento das paredes e, portanto, as considera como estruturais. Considerando o critério REI, vários blocos feitos com diferentes tipos de agregados atingiram o TRRF de 120 minutos, principalmente os das Classes A e B, quando a parede possui um nível de carregamento igual ou inferior a 60%. É o código mais recomendado para se utilizar no Brasil, enquanto não há norma nacional sobre o assunto.

5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA PRELIMINAR

Idealmente, as isothermas de um de concreto submetido a um incêndio-padrão em uma das faces devem ser modeladas numericamente, no software *Abaqus* ou similar.

Com esse mapeamento das isothermas, deve-se complementar a proposta feita para a NBR 15961, que consta no Anexo B do presente trabalho, baseada no método simplificado do *Eurocode 6* (2005, exposto no item 2.7.2). Também pode-se aplicar o mesmo para blocos brasileiros com o mapeamento de isothermas obtido pela modelagem numérica.

Foi feito um modelo numérico preliminar de um bloco de concreto, de 19 cm x 19 cm x 39 cm, com um incêndio padrão em sua superfície.

Os vazios do bloco foram simulados como um fluido, representando uma massa de ar, com as seguintes propriedades:

- Condutividade térmica: 0,023 W/(m²K)
- Densidade: 1,2 kg/m³
- Calor específico: 1008 J/(kg°C)
- Viscosidade: 1,983*10⁻⁵ m²/s

O restante do bloco foi simulado como um sólido. Criou-se uma interação entre as duas partes do bloco (a sólida e a fluida), conforme representado na Figura 20.

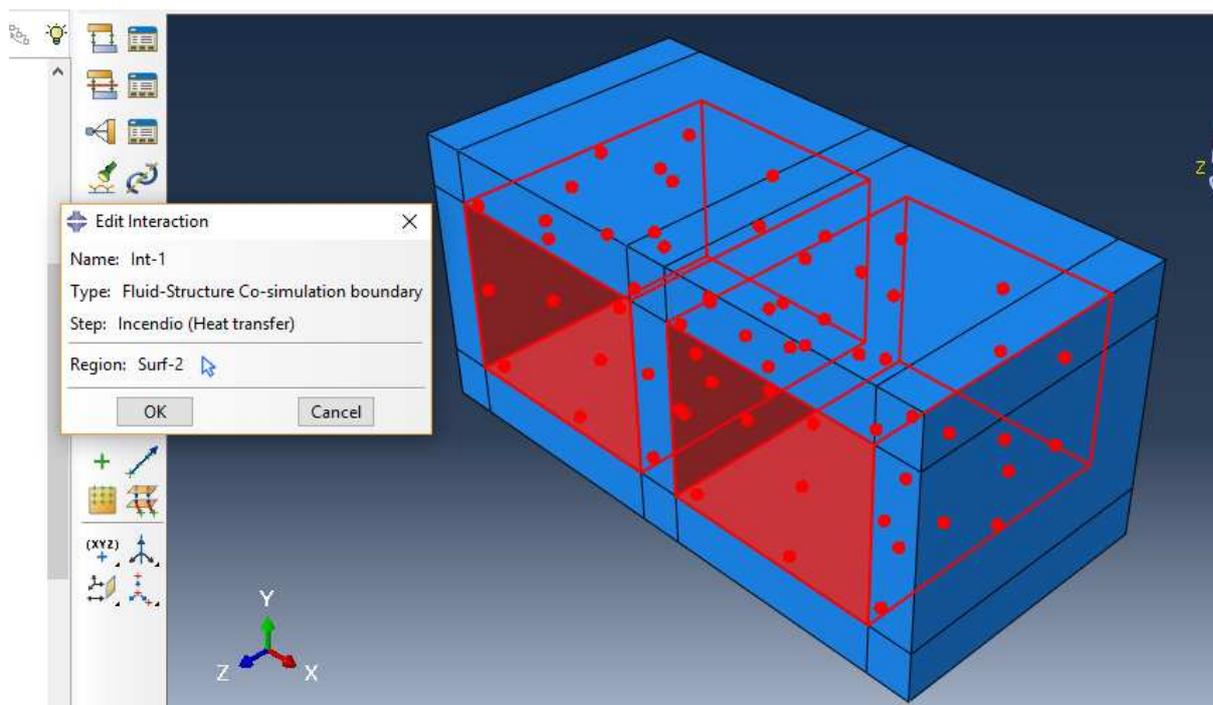


Figura 20 – Criação da interação entre a parte sólida (bloco) e a parte fluida (ar), no software ABAQUS.

Conforme visto no capítulo de revisão bibliográfica, são muitas as variáveis envolvidas em uma simulação. Optou-se por variar somente o tipo de agregado do bloco e, conseqüentemente, as propriedades por ele influenciadas, para observar possíveis diferenças no comportamento do mesmo frente a um incêndio.

Algumas propriedades do concreto dependem do tipo de agregado. Decidiu-se por fazer três modelos preliminares, diferenciando os agregados utilizados: um modelo com granito, um com calcário e um com basalto.

Na Tabela 33, seguem algumas propriedades que diferem de acordo com o tipo de agregado utilizado:

Tabela 33 – Propriedades térmicas de concretos com diferentes tipos de agregados.

Agregado	Granito	Calcário	Basalto
Densidade (kg/m³)	2420	2450	2520
Condutividade térmica (W/(mK))	2,6	3,2	2,0
Coefficiente de expansão térmica linear (10⁻⁶ °C⁻¹)	8,6	6,1	8,6 *

* Neville (2011) não cita o coeficiente de expansão térmica linear para concretos com agregado basáltico, porém outras fontes, como Naik *et al.* (2011), colocam esse agregado no mesmo patamar que o do granito.

Fonte: Neville (2011) (informações adaptadas para uma tabela).

Os valores da condutividade térmica correspondem a um teor de umidade de 8%.

Segundo os FIB-CEB Bulletins N° 145, N° 174, N° 208; além do ECCS-MC e de Schleich (1982, 1987, 1991, 2001 e 2005, respectivamente, *apud* Costa, 2011), para modelos simples de cálculo, o calor específico pode ser considerado independente da temperatura, de valor constante igual a $c_p = 1000 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$, em concretos de agregados silicosos ou calcários.

Criou-se um incêndio em apenas uma das faces do bloco, conforme se observa em vermelho na Figura 21 a seguir:

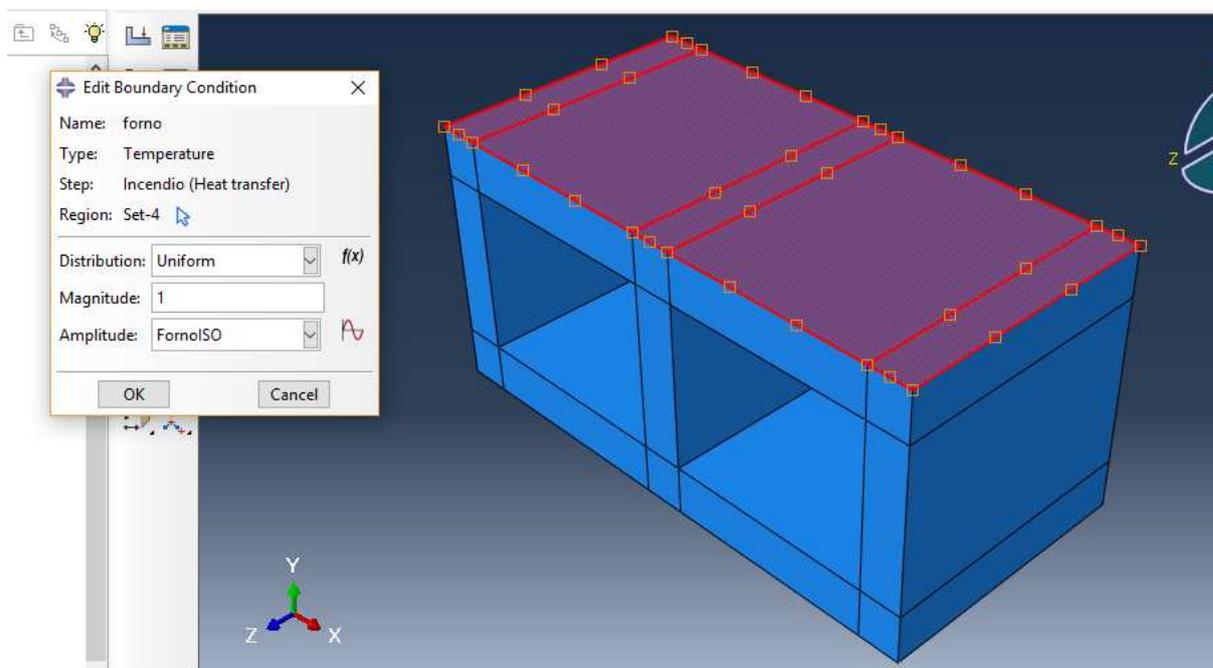


Figura 21 – Criação de um incêndio padrão em uma face de um bloco de concreto, no software ABAQUS.

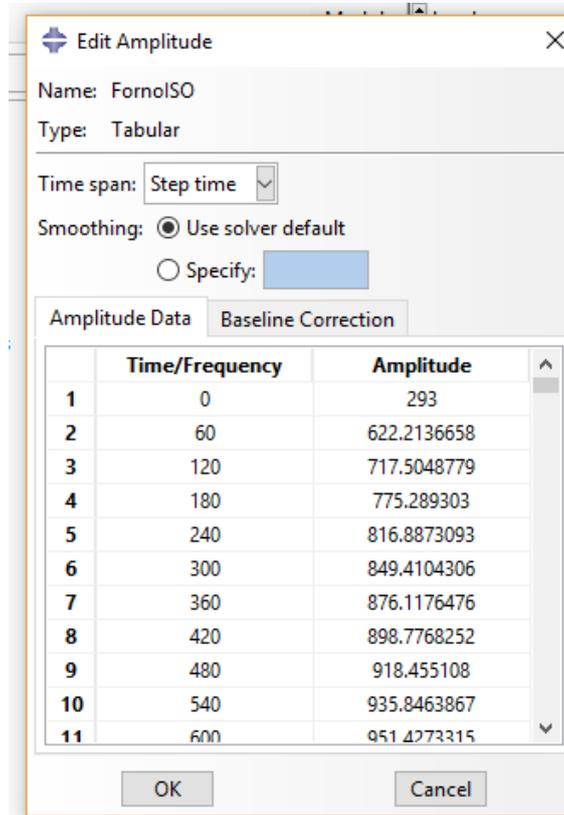
O incêndio criado seguiu a curva de incêndio padrão, dada pela norma ISO 834 (1999) e reproduzida pela Equação 27, cuja temperatura foi tabelada para incrementos de tempo de 60 em 60 segundos, conforme ilustrado pela Figura 22:

$$\theta = 345 * \log(8t + 1) + 20^\circ\text{C} \quad (27)$$

Onde:

θ é a temperatura, em °C;

t é o tempo, em minutos.



	Time/Frequency	Amplitude
1	0	293
2	60	622.2136658
3	120	717.5048779
4	180	775.289303
5	240	816.8873093
6	300	849.4104306
7	360	876.1176476
8	420	898.7768252
9	480	918.455108
10	540	935.8463867
11	600	951.4273315

Figura 22 – Amplitudes correspondentes à curva de incêndio-padrão, no software ABAQUS.

A duração das três simulações foi de 4 horas, pois era este o limite dado nas tabelas de recomendações nacionais, como a da IT-08 (2011).

Abaixo, nas Figuras 23, 24 e 25, são apresentados os resultados da variável Temperatura para concretos com granito, calcário e basalto, respectivamente.

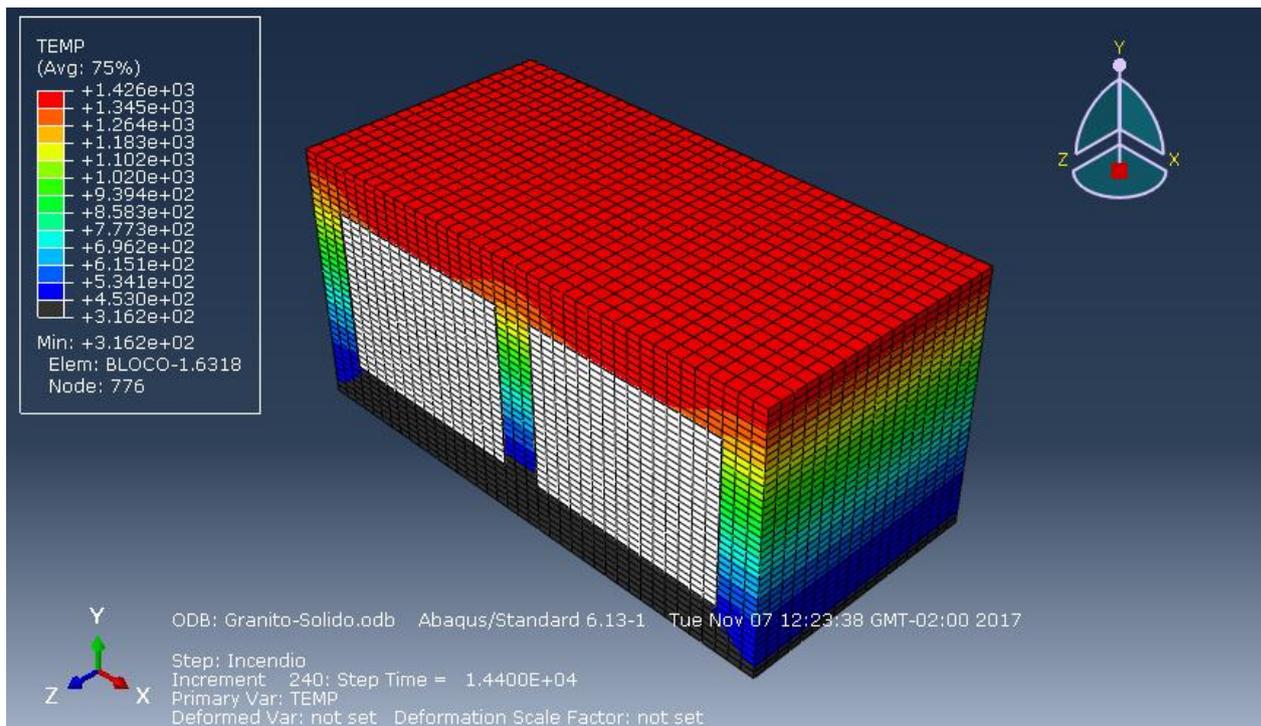


Figura 23 – Isothermas de um bloco de concreto com agregado granito, submetido a um incêndio padrão em uma das faces, no software ABAQUS.

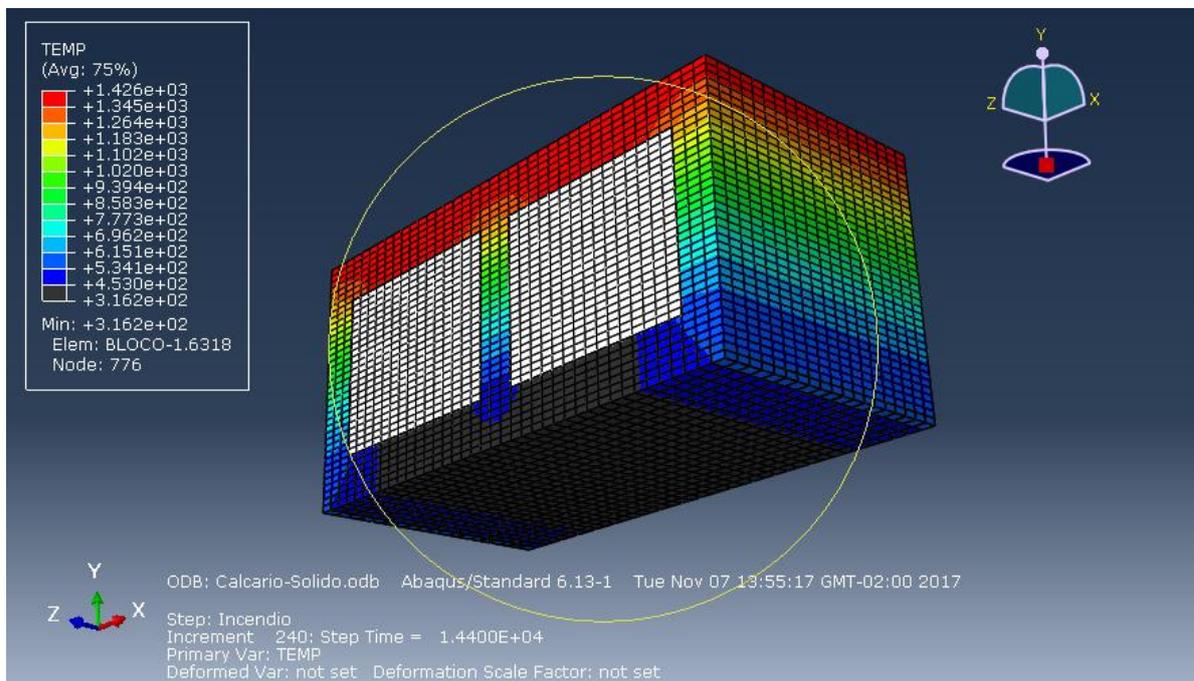


Figura 24 – Isothermas de um bloco de concreto com agregado calcário, submetido a um incêndio padrão em uma das faces, no software ABAQUS.

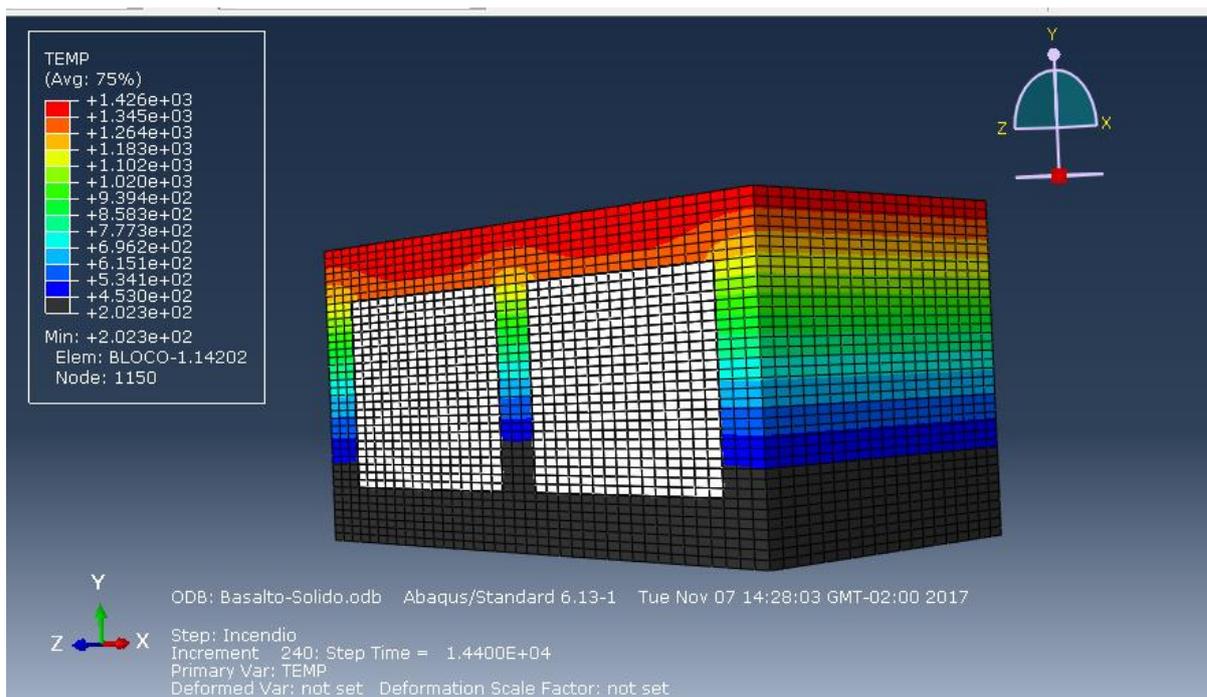


Figura 25 – Isotermas de um bloco de concreto com agregado basalto, submetido a um incêndio padrão em uma das faces, no software ABAQUS.

Para o bloco feito com agregado granito (Figura 23), após quatro horas de incêndio (o que pode ser observado no texto em branco na parte de baixo da imagem, onde está escrito “Step time = 1.4400E+04”, ou seja, após 14400 segundos, ou 4 horas), o critério de isolamento térmico não falhou, pois os 453 K (180 °C) não atingiram a face não exposta ao fogo.

Para o bloco feito com agregado calcário (Figura 24), após quatro horas de incêndio, o critério de isolamento térmico falhou, pois, na face não exposta ao fogo, já se pode observar duas faixas isotérmicas, com temperatura de 453 K (180 °C). Vale ressaltar que a condutividade térmica do concreto com agregado calcário é maior que a do concreto com agregado granito, fator que influenciou na falha do critério isolamento. Na Figura 26, abaixo, pode-se observar que, para o bloco com agregado calcário, o critério isolamento falha no instante $t = 13260$ segundos = 3 horas e 41 minutos.

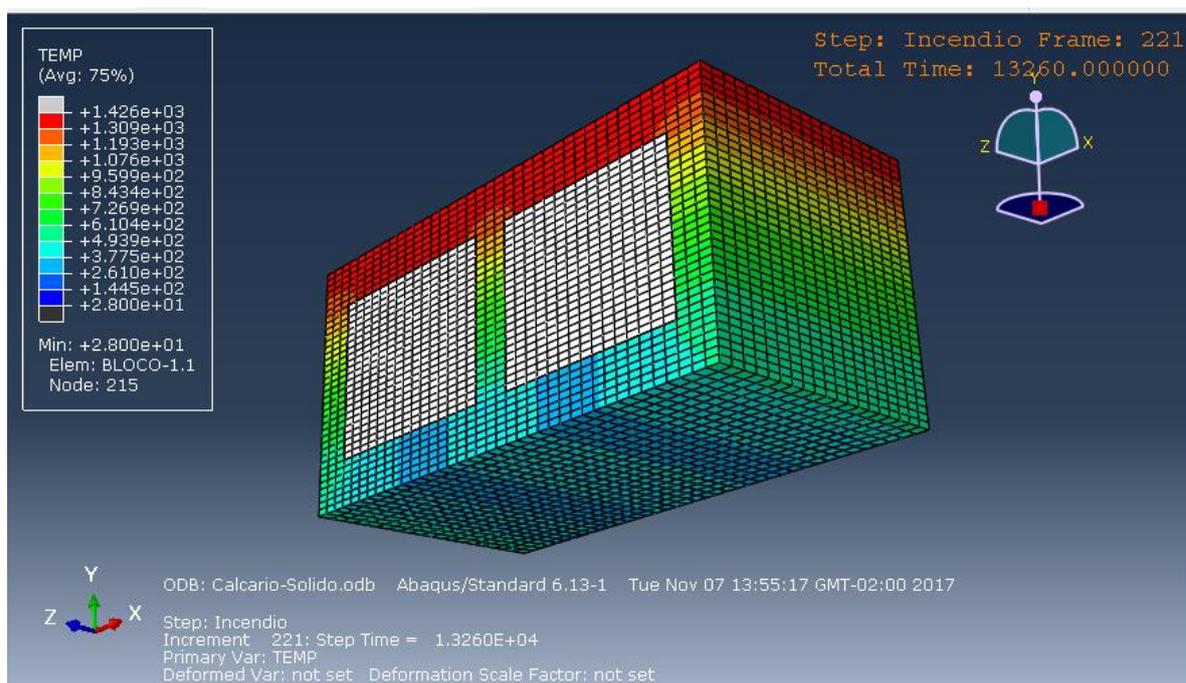


Figura 26 – Falha do critério isolamento térmico para um bloco com agregado calcário no software ABAQUS.

Para o bloco com agregado basalto (Figura 25), assim como o com agregado granito, após quatro horas de incêndio, o critério isolamento térmico não apresentou falhas.

A simulação feita foi bem rudimentar, onde não foi considerada a carga, não foi considerada a interação bloco/argamassa/bloco e também não foi considerado qualquer tipo de revestimento. Considerando todas essas limitações, não se pode tirar nenhuma conclusão definitiva, porém pode-se observar que os resultados apontam para uma possível influência do tipo de agregado na resistência ao fogo de uma parede, por conta da influência que o tipo de agregado tem sobre a condutividade térmica do bloco.

Os resultados encontrados nessas simulações rudimentares também parecem seguir a linha dos resultados de ensaios dados nas referências nacionais apresentadas na seção 2.2 deste trabalho. Todos os resultados daquela seção permearam os 240 minutos (4 horas), porém nessas foram ensaiadas paredes, não blocos isolados. As referências nacionais citam o período de tempo de 240 minutos, porém o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo dado tanto na NBR 14432 (2000) quanto na IT-08 (2011) não ultrapassa os 120 minutos, ou seja, de acordo com a

simulação preliminar, todos os blocos (isolados e sem carregamento) não apresentam falhas no critério isolamento térmico.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Incêndios muitas vezes são inevitáveis na construção civil, e as estruturas não devem entrar em colapso antes que ocorra sua total evacuação, pois a prioridade maior é poupar vidas. Em segundo plano, deve-se minimizar o dano estrutural. Para isso, existe a normatização de segurança das estruturas em situação de incêndio. No entanto, não há, no país, normatização para alvenaria estrutural nessa situação, e, portanto, a consulta a normas internacionalmente respeitadas sobre o assunto continua sendo necessária.

Neste trabalho, com intuito de subsidiar futura normatização nacional, foram apresentados os procedimentos de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio de acordo com a norma sul-africana, a americana, a australiana, a neozelandesa e a europeia.

O código sul-africano foca principalmente em blocos maciços, e os define como aqueles em que os vazios não excedam 25% de seu volume bruto. No entanto, para a realidade brasileira, utilizando os maiores furos possíveis em blocos, estes acabam se encaixando na categoria de blocos vazados, o que provou ser um grande problema ao se tentar aplicar tal código, já que sua resistência ao fogo é praticamente desprezível. Não deixa de ser um código conservador também em relação aos blocos maciços, além de levar em conta somente o critério do isolamento no cálculo da resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural. Como pesquisa se provou interessante, porém não se recomenda utilizá-lo como base para um cálculo no Brasil, devido aos motivos acima citados. Também vale ressaltar que o código não menciona níveis de carregamento, e, portanto, não se pode extrapolar suas especificações para paredes estruturais, carregadas, somente utilizando-as para as paredes de vedação. Sua aplicação no Brasil, portanto, não é interessante.

A norma americana fornece tabelas de espessuras equivalentes mínimas para que paredes de alvenaria resistam a um incêndio durante um determinado tempo. Tais tabelas estão divididas pelo tipo de agregado utilizado nos blocos. Ela também leva em conta o efeito de diferentes tipos de acabamentos nas paredes, se ele está no lado exposto ao fogo ou no outro lado. É bem completa quando se considera critérios de isolamento térmico ou de estanqueidade, deixando a desejar no quesito resistência mecânica. Não apresenta procedimentos analíticos de dimensionamento, simplificados ou não, de forma a considerar o critério de resistência mecânica no dimensionamento de paredes em

alvenaria estrutural. Também não apresenta níveis de carregamento das paredes, e, portanto, não se pode usá-la para dimensionar paredes estruturais.

O código australiano leva em conta o índice de esbeltez da parede na verificação de sua resistência ao fogo, ou seja, é um dos únicos códigos, dentre os citados, que considera o aspecto estrutural da parede, apesar de não explicitar os níveis de carregamento. O dimensionamento considerando o critério de resistência parece ser a melhor forma para se dimensionar a alvenaria estrutural em situação de incêndio no Brasil, enquanto não há norma nacional. Os fabricantes de blocos apresentam ábacos baseados em resultados de ensaio das paredes em laboratório, que são bem intuitivos para se usar em paredes de vedação (já que nos ábacos não se explicita o nível de carregamento das paredes, nem seu índice de esbeltez).

O código neozelandês, assim como o australiano, também leva em conta o critério de estabilidade (resistência) da parede. No entanto, aparentemente, a maneira como esse critério é trabalhado se mostra mais refinada no primeiro código que no segundo, por conta da inclusão do carregamento de cálculo em sua formulação. Assim como o código americano, o neozelandês também leva em conta o efeito do acabamento na resistência ao fogo de uma parede, mas de forma um pouco menos completa. E assim como o código europeu, também sugere métodos de cálculos avançados ou resultados de ensaios, mas o europeu segue sendo o único dentre os estudados a sugerir um método simplificado de cálculo.

A norma europeia, das cinco avaliadas, é a mais completa. Apresenta procedimento tabular que leva em conta os três critérios de resistência ao fogo das paredes e mais um, o impacto mecânico nas paredes. Entretanto, possui algumas limitações quanto aos materiais de acabamento e nesse quesito não é tão completa quanto a norma americana, porém é a melhor norma para paredes estruturais em situação de incêndio. Apresenta também uma proposta de dimensionamento segundo método analítico que é bastante coerente, similar ao que já é feito para o concreto armado. O método em si não é complexo, porém, para utilizá-lo, são necessários resultados de ensaios em laboratório ou modelagem numérica (feita com auxílio de softwares como *Abaqus*, *Ansys*, etc.) para determinar a distribuição de temperatura em um bloco em função do período de tempo de exposição ao fogo do mesmo.

Os principais parâmetros que influenciam na resistência ao fogo de uma parede foram levantados para que eles possam ser considerados em uma futura simulação numérica.

Uma simulação preliminar de um bloco de concreto foi feita, para três diferentes tipos de agregados: granito, calcário e basalto, variando somente os parâmetros diretamente influenciados pelo tipo de agregado, como densidade e condutividade térmica, a fim de se observar o critério isolamento térmico. Constatou-se que, aparentemente, o tipo de agregado, por alterar a condutividade térmica do bloco, influencia na resistência do bloco.

Sobre a aplicabilidade das normas internacionais à realidade brasileira, sabe-se que cada país possui especificações de geometria, capacidade resistente e espessura a serem respeitadas pela indústria de blocos estruturais. Além disso, existem variações, de país para país, das composições mineralógicas das rochas utilizadas como agregado e também dos revestimentos usuais. O que se sugere, portanto, é a elaboração de uma norma brasileira sobre o assunto que possa mesclar o que existe de mais interessante nas outras normas aqui apresentadas.

À primeira vista, pareceu interessante sugerir começar o processo para uma norma brasileira com resultados de ensaios de blocos isolados, com vários tipos de acabamentos, a fim de se propor uma verificação do critério isolamento térmico (I) semelhante à americana. No entanto, considerando que no Brasil há uma enorme preferência pelo método construtivo da alvenaria estrutural, não se julga inteligente propor algo que ignore o nível de carregamento da parede. Portanto, para a elaboração de um código brasileiro, é pertinente fazer estudos já com a função estrutural das paredes, começando-se, por exemplo, com modelagem numérica das mesmas, e, ao se obter as isotermas, fazer uma proposta semelhante à do método simplificado da norma europeia.

Para validar a proposta feita com simulação numérica, resultados de ensaios são necessários. São pouquíssimos os laboratórios equipados para ensaios de paredes carregadas em situação de incêndio, no entanto, como constatou Ayala (2010), paredes de dimensões menores podem ser usadas para emular o comportamento de paredes reais. Portanto pode-se fazer ensaios completos, com dimensões do corpo de prova bem menores, a fim de se validar os resultados obtidos por modelagem numérica.

Finalmente, ensaios de paredes de alvenaria, carregadas (com diferentes níveis de carregamento), em situação de incêndio deverão ser feitos, uma vez que, no país, é recente a instalação de um primeiro forno apto para tais ensaios (na UNISINOS, no Rio Grande do Sul), para que tabelas completas (como as europeias) sejam elaboradas e ábacos semelhantes aos australianos, porém com a inclusão do nível de carregamento

das paredes, possam ser montados e assim, finalmente, serão reunidas informações suficientes para balizar uma primeira normatização nacional sobre o tema.

Ainda haverá espaço para a aplicação de revestimentos e/ou outras modificações para que se constate a eficácia de tais procedimentos no aumento da resistência ao fogo das paredes como um todo.

7 REFERÊNCIAS

1. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI/TMS 216.1-14: Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies**. U.S.A., 2014.
2. ANDREINI, M.; DE FALCO, A.; SASSU, M. Experiences and Analysis on Masonry Materials Subjected to High Temperatures. In: 15th INTERNATIONAL BRICK AND BLOCK MASONRY CONFERENCE, 10., 2012, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** Braga: Universidade do Minho, 2012. Disponível em: <<http://www.hms.civil.uminho.pt/events/ibmac2012/2B2.pdf>>. Acesso em: 28/09/2016.
3. Andreini, M.; Sassu, M. Mechanical behaviour of full unit masonry panels under fire action. **Fire Safety Journal**, v. 46, 440 – 450, 2011.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE BLOCOS DE CONCRETO. **Alvenaria de Blocos de Concreto: Guia para atendimento à Norma ABNT 15575**, 2014, 40p.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA. **Manual técnico de alvenaria**. São Paulo, SP: A Associação, Projeto Editores Associados, 1990. 275 p.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628: Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 2001.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2001.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 2012.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270 - 2: Componentes cerâmicos - Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos**. Rio de Janeiro, 2005.

11. ASTM – American Society for Testing Materials. **ASTM C140 – 11a – Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units**. U.S.A., 2011. 17p.
12. AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3700-2011: Masonry Structures**. Sydney, Australia, 2011.
13. AYALA, F. R. R. **Mechanical Properties and Structural Behaviour of Masonry at Elevated Temperatures**. 2010. 294p. Tese de Doutorado (Engenharia e Ciências Físicas) - University of Manchester, 2010.
14. Bailey, C. Structural fire design: Core or specialist subject? **The Structural Engineer**, v. 82, n. 9, 32 – 38, 2004.
15. BORAL MASONRY. Masonry Design Guide. In:_____. **Structural, fire and Acoustics. Book 1**. Victoria, Australia, 2009.
16. BRICK INDUSTRY ASSOCIATION. Specifications for and Classification of Brick. Disponível em: <http://www.gobrick.com/portals/25/docs/technical%20notes/tn9a.pdf>. Acesso em 14/08/15.
17. Byrne, S. M. Fire Resistance of load-bearing masonry walls. **Fire Technology**, v. 15, issue 3, 180 – 188, 1979.
18. CHARALAMBIDES, J. E. Design of Masonry Columns. Disponível em: <http://www.avant-garde-engineering.com/mc19.pdf>. Acesso em: 11/08/15.
19. Chudyba, K.; Matysek, P. Methods for Determining Masonry Walls Fire Resistance. **Technical Transactions, Civil Engineering Issue**, 1-B (6), 3-14, 2013.
20. CONCRETE MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Concrete Masonry Manual**. South Africa, 2007. 114p.
21. CONCRETE MASONRY ASSOCIATION OF AUSTRALIA. Manual M55 – Design and construction of concrete masonry buildings. In:_____. **Part B, Chapter 4, Fire**. Australia, 2012. 52p.
22. Costa, Carla Neves. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. São Paulo. Universidade de São Paulo, 2008, 724p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil.
23. Dumont, F.; Wellens, E.; Gernay, T.; Franssen, J. Loadbearing capacity criteria in fire resistance testing. **Materials and Structures**, v. 49, 4565-4581, 2016.

24. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6: EN 2005-1.1: Design of Masonry Structures. Part 1-1: General Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures.** Brussels, 2005.
25. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6: EN 2005-1.2: Design of Masonry Structures. Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design.** Brussels, 2005.
26. Ingham, J. Forensic engineering of fire-damaged structures. **Proceedings of ICE**, v. 162, 12 - 17, 2012.
27. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION (ISO). **Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction – Part 1: General Requirements.** ISO 834. Geneva: ISO/TC, 1999.
28. MEYER, U. Fire Resistance Assessment of Masonry Structures. In: WORKSHOP 'STRUCTURAL FIRE DESIGN OF BUILDINGS ACCORDING TO THE EUROCODE', 2012, Brussels. *Anais eletrônicos...* Disponível em: <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/2012_11_WS_fire/presentations/07-MEYER-EC-FireDesign-WS.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2017.
29. Nadjai, A.; O’Gara, M.; Ali, F.; Jurgen, R. Compartment Masonry Walls in Fire Situations. **Fire Technology**, v. 42, 211-231, 2006.
30. Naik, T. R.; Kraus, R. N.; Kumar, R. Influence of Types of Coarse Aggregates on the Coefficient of Thermal Expansion of Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, April 2011, 467-472, 2011.
31. Neville, A. M. *Properties of Concrete*. 5th edition. Essex: Pearson, 2011.
32. NEW ZEALAND STANDARD. **NZS 4320: Design of reinforced concrete masonry structures.** New Zealand, 2004.
33. Nguyen, T. D.; Meftah, F. Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. Part 1: Experimental analysis. **Fire Safety Journal**, v. 52, 55-64, 2012.
34. Nguyen, T. D.; Meftah, F. Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire. Part 2: 3D finite element modelling and spalling assessment. **Fire Safety Journal**, v. 66, 35-45, 2014.
35. PAULUZZI PRODUTOS CERÂMICOS LTDA. *Desempenho: Sistemas de alvenaria com blocos cerâmicos Pauluzzi.* Sapucaia do Sul, 2016. 57p.
36. POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO, Corpo de Bombeiros. **Instrução Técnica nº 08/2011: Resistência ao fogo dos elementos de**

- construção**. Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, São Paulo, 2011.
37. RIGÃO, Alessandro Onofre. **Comportamento de Pequenas Paredes de Alvenaria Estrutural Frente a Altas Temperaturas**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 142p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
38. 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**, v.40, 855 – 864, 2007.
39. ROSEMANN, Fernando. **Resistência ao Fogo de Paredes de Alvenaria Estrutural de Blocos Cerâmicos pelo Critério de Isolamento Térmico**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. 160p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
40. Russo, S.; Sciarretta, F. Experimental and Theoretical Investigation on Masonry after High Temperature Exposure. **Experimental Mechanics**, v. 52, 341 – 359, 2012.
41. Russo, S.; Sciarretta, F. Masonry exposed to high temperatures: Mechanical behaviour and properties – An overview. **Fire Safety Journal**, v. 55, 69 – 86, 2013.
42. Silva, Rafaela de Kássia Rodrigues e. Propostas de Aproveitamento de Resíduos de Ardósia da Cidade de Pompéu, Minas Gerais. **Revista Intercâmbio**, v. VI, 86-95, 2015.
43. TORRES, D. L. **Alvenaria estrutural em situação de incêndio – Proposta de verificação**. 2012. 68 p. Exame de qualificação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 2012.
44. WILSON, IAN. Gravel vs. Limestone. Disponível em:
<https://www.hunker.com/13425074/gravel-vs-limestone>. Acesso em 28/01/18.

ANEXO A. ALVENARIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: PROPOSTA DE ANEXO PARA NBR 15961

Helena Arias Lara Leite*, Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior*

* Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (almoreno@fec.unicamp.br)

SUMÁRIO

Introdução

A.1 Objetivo

A.2 Referências normativas

A.3 Definições

A.4 Símbolos

A.5 Preceitos para o dimensionamento da alvenaria em situação de incêndio

A.6 Método tabular

INTRODUÇÃO

Este documento se aplica às estruturas de alvenaria em situação de incêndio, as quais devem ser projetadas e construídas de modo a manterem-se resistentes ao fogo durante o tempo de exposição especificado em projeto. A proposta contempla a avaliação por método tabular. A comprovação da resistência ao fogo de estruturas de alvenaria em Laboratórios nacionais ou internacionais é permitida, bem como o emprego dos métodos avançados de dimensionamento propostos nos códigos normativos internacionais aqui referenciados.

A.1 OBJETIVO

A.1.1 Este anexo à Norma de Alvenaria Estrutural norteia o dimensionamento de estruturas de alvenaria em situação de incêndio.

A.1.2 Entende-se por dimensionamento em situação de incêndio a verificação dos elementos estruturais quanto à resistência mecânica e estabilidade em temperatura elevada. Quando exigido em projeto, os elementos estruturais devem, também, ser verificados em relação à estanqueidade às chamas e gases quentes e ao isolamento

térmico. A estrutura deve resistir ao incêndio tempo suficiente para garantir a fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança, garantir a segurança das operações de combate ao incêndio e minimizar danos à própria edificação, a edificações adjacentes e à infraestrutura pública (propagação do incêndio).

A.2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS

A.2.1 Os códigos normativos relacionados a seguir contêm disposições que, por meio de referência nesse texto, constituem prescrições válidas para o presente anexo de Norma:

NBR 5628 – Componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo, 2001.

NBR 6136 – Bloco vazado de concreto simples para alvenaria - Requisitos. 2014.

NBR 15961-1 – Alvenaria estrutural – Blocos de concreto. Parte 1: Projeto. 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI/TMS 216.1-14: Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies. U.S.A., 2014.

AUSTRALIAN STANDARD. AS 3700-2011: Masonry Structures. Sydney, Australia, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 6: EN 2005-1.2: Design of Masonry Structures. Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design. Brussels, 2005.

A.3 DEFINIÇÕES

Para os efeitos da presente Norma, aplicam-se as seguintes definições:

A.3.1 Incêndio-padrão: Elevação padronizada de temperatura em função do tempo, definida na NBR 5628 e dada pela seguinte expressão:

$$\theta_g = \theta_o + 345 \log(8t + 1)$$

Onde: t é o tempo expresso em minutos, θ_o é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento em graus Celsius, geralmente tomada igual a 20°C, e θ_g é a temperatura dos gases em graus Celsius no instante t considerado.

A.3.2 Resistência ao fogo: Tempo durante o qual um elemento estrutural, estando sob a ação do incêndio padrão, não sofre colapso estrutural, não apresenta aquecimento excessivo da parte não exposta ao fogo e não apresenta fissuras que permitam a passagem de gases quentes ou chamas para o ambiente não exposto ao fogo.

A.4 SÍMBOLOS

T_{ea} é a espessura equivalente de uma parede de alvenaria;

T_e é a espessura equivalente do bloco;

T_{ef} é a espessura equivalente do acabamento;

V_n é o volume líquido do bloco;

l_b é o comprimento do bloco;

h_b é a altura do bloco;

S_{rf} é o índice de esbeltez da parede em situação de incêndio;

a_{vf} é um fator que depende das condições de vinculação da parede;

H é a altura da parede;

t é a espessura total da parede.

a_k é outro fator que depende das condições de vinculação da parede;

L é o comprimento da parede entre as faces laterais restringidas ou o comprimento de uma parede com travamento lateral em apenas uma de suas extremidades.

A.5 CONDIÇÕES BÁSICAS PARA O DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

A.5.1 Para o dimensionamento de estruturas de alvenaria em situação de incêndio, deve-se levar em conta três critérios: resistência mecânica (R), estanqueidade (E) e isolamento térmico (I).

A.5.1.1 Para obedecer ao critério R, a estrutura não deverá alcançar a ruptura em situação de incêndio, com tensões atuantes inferiores às permitidas por normatização nacional em vigor, com esforços atuantes e resistentes resultantes da combinação de ações dita como excepcional.

A.5.1.2 Para obedecer ao critério E, a estrutura não deve apresentar trincas ou aberturas suficientes que permitam a passagem de gases ou chamas.

A.5.1.3 Para obedecer ao critério I, a estrutura não deve apresentar um aumento de temperatura, na face não exposta, superior em média a 140 °C e em qualquer ponto a 180 °C.

A.6 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO TABELADO

A.6.1 Dimensionamento quanto aos critérios I e E

A.6.1.1 A espessura equivalente de uma parede de alvenaria, T_{ea} , é a soma entre a espessura equivalente do bloco, T_e , e a espessura equivalente de seu acabamento, T_{ef} . Ou seja:

$$T_{ea} = T_e + T_{ef}$$

Onde:

T_{ea} = espessura equivalente de uma parede de alvenaria;

T_e = espessura equivalente do bloco;

T_{ef} = espessura equivalente do acabamento;

A.6.1.2 A espessura equivalente do bloco é tomada como:

$$T_e = \frac{V_n}{l_b h_b}$$

Onde:

V_n = volume líquido do bloco;

l_b = comprimento do bloco;

h_b = altura do bloco.

A.6.1.3 Em *paredes não grauteadas ou parcialmente grauteadas*, a espessura equivalente, T_e , deverá ser determinada pela Equação dada em A.6.1.1, em função do volume líquido do bloco.

A.6.1.4 Em *construções totalmente grauteadas*, a espessura equivalente, T_e , deverá ser a própria espessura do bloco.

A.6.1.5 Em *blocos vazados preenchidos com material solto*, a espessura equivalente, T_e , deverá ser a própria espessura do bloco quando o material de preenchimento for areia, brita 0 ou brita 1, argila expandida, cinzas volantes expandidas, cinzas, perlita ou vermiculita.

A.6.1.6 Para os blocos de concreto que seguem as especificações da ABNT NBR 6136, suas espessuras equivalentes de acordo com a Equação dada em A.6.1.2 são apresentadas na Tabela A.1. Essas espessuras equivalentes são as menores possíveis.

Tabela A.1 – Espessuras equivalentes dos blocos de concreto brasileiros

Classe	Largura (cm)	Altura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura equivalente do bloco (cm)
A	19	19	39	8,82
	14	19	39	6,73
	14	19	29	7,33
B	19	19	39	8,82
	14	19	39	6,73
	14	19	29	7,33
C	19	19	39	5,73
	14	19	39	5,04
	14	19	29	5,54
	11,5	19	39	4,69
	11,5	19	24	5,38
	11,5	19	36,5	4,77
	9	19	39	4,35
	9	19	29	4,61
	6,5	19	39	3,40

A.6.1.7 Para o cálculo da espessura do acabamento, T_a , deve-se levar em conta se o mesmo se encontra na face exposta ao fogo ou na parte não exposta.

A.6.1.8 Quando o acabamento se encontra na face exposta ao fogo, a espessura equivalente da parede (T_{ea}) será igual à espessura equivalente do bloco (T_e). Seu tempo de resistência ao fogo, que pode ser observado na Tabela A.2, deverá ser somado ao tempo de resistência do acabamento, que se encontra na Tabela A.3.

A.6.1.9 Quando o acabamento se encontra na face não exposta ao fogo, sua espessura deve ser ajustada por um fator que se encontra na Tabela A.4. Essa espessura ajustada

(T_a) deverá ser somada à espessura equivalente do bloco (T_e) para que a espessura equivalente da parede (T_{ea}) seja encontrada.

Tabela A.2 – Paredes de alvenaria de blocos de concreto

Tipo de agregado empregado no Bloco	Mínima espessura equivalente T_{ea} , em função do tempo requerido de resistência ao fogo (cm) * **						
	½ hora	¾ hora	1 hora	1 ½ horas	2 horas	3 horas	4 horas
Cascalho de calcário ou silício	5,1	6,1	7,1	9,1	10,7	13,5	15,7
Pedra calcária, cinzas ou escória resfriada ao ar	4,8	5,8	6,9	8,6	10,2	12,7	15,0
Argila expandida, xisto expandido ou ardósia expandida	4,6	5,6	6,6	8,4	9,1	11,2	13,0
Escória expandida ou pedrapomes	3,8	4,8	5,3	6,9	8,1	10,2	11,9

* Resistências entre os períodos listados devem ser determinadas por meio de interpolação linear baseada na espessura equivalente da parede de alvenaria de concreto

** Espessuras mínimas equivalentes correspondentes à resistência ao fogo para blocos feitos com combinações de agregados devem ser determinadas por interpolação linear, baseada na porcentagem do volume de cada agregado utilizado em sua fabricação.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14, Table 5.1a, p.21 (convertida para cm)

Tabela A.3 - Tempo atribuído aos materiais de acabamento na face exposta ao fogo de paredes de blocos de concreto ou cerâmica

Acabamento	Tempo (min)
Drywall (gesso acartonado)	
3/8 pol. (9,5 mm)	10
1/2 pol. (12,7 mm)	15
5/8 pol. (15,9 mm)	20
Duas camadas de 3/8 pol. (Duas camadas de 9,5 mm)	25
Uma camada de 3/8 pol. (9,5 mm) e uma camada de 1/2 pol. (12,7 mm)	35
Duas camadas de 1/2 pol. (Duas camadas de 12,7 mm)	40
Drywall tipo "X" (resistente ao fogo)	
1/2 pol. (12,7 mm)	25
5/8 pol. (15,9 mm)	40
Argamassa de cimento Portland e areia aplicada diretamente sobre o concreto ou alvenaria*	
Argamassa de cimento Portland e areia sobre tela de metal	
3/4 pol. (19 mm)	20
7/8 pol. (22,2 mm)	25
1 pol. (25,4 mm)	30
Argamassa de gesso e areia sobre ripas de gesso de 3/8 pol.	
1/2 pol. (12,7 mm)	35
5/8 pol. (15,9 mm)	40
3/4 pol. (19 mm)	50
Argamassa de gesso e areia sobre tela de metal	
3/4 pol. (19 mm)	50
7/8 pol. (22,2 mm)	60
1 pol. (25,4 mm)	80

*Para fins de determinação da contribuição da argamassa de cimento Portland e areia para a espessura equivalente da alvenaria para usos na tabela X.2 (3.1 do código), será permitido o uso da espessura real da argamassa ou 5/8 pol., o menor entre os dois.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14, Table 7.2.3, p. 28 (valores em mm acrescentados)

Tabela A.4 - Fator multiplicador da espessura de acabamentos aplicados no lado não exposto ao fogo

Tipo de material usado na laje ou parede	Tipo de acabamento aplicado à laje ou parede			
	Reboco de cimento Portland e areia* ou ladrilho hidráulico	Reboco de gesso e areia	Reboco de gesso com vermiculita ou perlita	Drywall (Gesso acartonado)
Parede de alvenaria de concreto				
Alvenaria de concreto - Silicioso, calcário, cal, cinzas, escória de alto forno resfriada a ar	1,00	1,25	1,75	3,00
Alvenaria de concreto - feito com 80% ou mais de xisto expandido, ardósia expandida, argila expandida, escória expandida ou pedra-pomes.	0,75	1,00	1,25	2,25

* Para argamassa de cimento Portland e areia com espessura de 1,6cm ou inferior, aplicada diretamente na parede, em seu lado não exposto ao fogo, o fator multiplicador deverá ser 1.0.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14, Table 7.2.2, p. 27

A.6.1.10 Paredes com acabamentos diferentes em suas faces de provável exposição ao fogo devem ser duplamente verificadas, com cada uma de suas faces adotada como sendo a face de exposição ao fogo. A resistência ao fogo dessa parede deve ser tomada como o menor dos tempos obtidos nos cálculos isolados.

A.6.1.11 Quando os acabamentos (no caso de aplicação em ambas as faces) contribuem para a resistência ao fogo do conjunto, deve-se limitar essa contribuição total (ambos os acabamentos) à metade da contribuição atribuída à parede sem acabamento.

A.6.2 Dimensionamento quanto ao critério R

A.6.2.1 Para se calcular a resistência ao fogo de acordo com o critério (R), calcula-se o índice de esbeltez da parede (Equações dadas em A.6.2.2 e em A.6.2.3) e o mesmo não deverá exceder os valores indicados na Tabela A.5.

A.6.2.2 Paredes que não possuem apoios nas laterais têm o índice de esbeltez definido pela equação abaixo:

$$S_{rf} = \frac{a_{vf} \cdot H}{t}$$

A.6.2.3 Paredes que possuem apoios em apenas uma ou nas duas laterais têm seu índice de esbeltez calculado pelo menor dos obtidos com as Equações dadas em A.6.2.2 e A.6.2.3.

$$S_{rf} = \frac{0,7}{t} \sqrt{a_{vf} \cdot H \cdot a_k \cdot L}$$

$$S_{rf} = a_k \frac{L}{t}$$

onde:

S_{rf} = índice de esbeltez da parede em situação de incêndio;

a_{vf} = igual a 0,75 se o elemento possui apoios em toda sua extensão lateral. Caso não exista tal restrição, o valor a ser adotado é 2,0;

H = altura entre travamentos verticais da parede;

t = espessura total da parede.

a_k = no caso de a parede possuir apoios superior e inferior, o coeficiente vale 1,0. No caso de a parede possuir somente apoio inferior, o coeficiente vale 2,5;

L = comprimento da parede entre as faces laterais restringidas ou o comprimento de uma parede com travamento lateral em apenas uma de suas extremidades. No caso de juntas prumo ou no caso de paredes com aberturas, o comprimento é medido até a junta ou abertura.

Tabela A.5 – Índice de esbeltez máximo para resistência mecânica (critério R)

Tipo de bloco	Tempo de resistência ao fogo (min)					
	30	60	90	120	180	240
1 Alvenaria não armada						
(iv) Blocos de argila	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
(v) Blocos de silicato de cálcio com agregado basáltico						
(C) menos de 45% de todos os agregados	20,5	19,0	18,0	17,5	16,5	15,5
(D) pelo menos 45% de todos os agregados	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
(vi) Blocos de concreto com agregados basálticos						
(C) menos de 45% de todos os agregados	19,5	18,0	17,0	16,0	15,5	15,0
(D) pelo menos 45% de todos os agregados	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
2 Alvenaria armada						
	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0

Fonte: AS 3700 (2011), Table 6.1, p. 57 (traduzida para o português)

ANEXO B. ARTIGO APRESENTADO NO 3º CILASCI (CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO SOBRE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO) E PUBLICADO EM SEUS ANAIS: DIFERENTES LEGISLAÇÕES PARA ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Arias Lara Leite, Helena¹, Lopes Moreno Junior, Armando², Luis Torres, Daniel³

1: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

helenaalleite@gmail.com

2: almoreno@fec.unicamp.br

3: dltorres@gmail.com

RESUMO

A alvenaria estrutural tem se tornado uma solução cada vez mais comum no Brasil. A possibilidade de ocorrência de incêndios em construções desse tipo não deve, portanto, ser ignorada. O Brasil carece de uma legislação sobre alvenaria estrutural em situação de incêndio. Na falta dela, o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (2011) recomenda que se faça este dimensionamento de acordo com as recomendações do *Eurocode 6* (1996) ou norma internacional similar. Neste artigo são apresentados os procedimentos de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio em vigor nos Estados Unidos, na Europa e na Austrália. Ao final, sugere-se mesclar o que há de interessante nestes três códigos internacionais, de forma gradativa, na elaboração de futura norma brasileira sobre o assunto.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural. Incêndio. Norma. Resistência ao fogo.

ABSTRACT

Masonry has become a more and more common solution in Brazil. Therefore, one shall not ignore that a fire might occur. Brazil lacks a legislation regarding the design of masonry walls during fire action. According to the Fire Department of the state of São Paulo (2011), this design shall be made based on the Eurocode 6 (1996) or similar international Standard. Specifications for designing masonry walls during fire action are presented in this article, according to the standard requirements in the United States of America, Europe and Australia. In order to elaborate a Brazilian standard regarding the matter, it would be interesting to merge the peculiarities in these three international standards, gradually.

Keywords: Structural masonry. Fire. Standard. Fire resistance.

B.1 INTRODUÇÃO

Segundo Moreno Junior e Molina (2012, p.38), “a resistência ao fogo é definida como a capacidade de um elemento estrutural permanecer um determinado tempo exercendo as funções para as quais foi projetado sob as circunstâncias de um incêndio”.

De modo geral, os procedimentos adotados de dimensionamento de um elemento estrutural em situação de incêndio, englobam a verificação da resistência mecânica (R), da estanqueidade (E) e do isolamento (I). Deste modo, respectivamente, a estrutura não deve alcançar a ruptura, não deve apresentar trincas ou aberturas suficientes que permitam a passagem de gases ou chamas (indicados pela combustão de um chumaço de algodão, conforme estabelecido na ABNT NBR 5628:2001) e não deve apresentar, na face não exposta ao fogo, temperaturas superiores à valores limites estabelecidos (a temperatura média nesta face deve ser inferior a 140°C e em qualquer ponto não pode ultrapassar 180°C).

Com as estruturas em alvenaria não deveria ser diferente, devendo-se garantir que sejam resistentes ao fogo. Um incêndio adjacente a uma parede de alvenaria fará com que a face da parede exposta ao fogo expanda, enquanto a face que não está exposta permanecerá com suas dimensões originais. Essa expansão diferencial fará com que a parede se curve, provocando fissuras que permitem a passagem de chamas ou gases, resultando no colapso do elemento quando as tensões atuantes ultrapassarem os limites de resistência do material enfraquecido pelo aquecimento. Adicionalmente, o calor pode ser transmitido através da parede e incinerar materiais inflamáveis a ela adjacentes.

Não se deve ignorar a possibilidade de ocorrência de incêndios em edificações com estruturas de alvenaria. No caso da alvenaria empregada como estrutura, é importante observar que, quase sempre, as paredes devem atender aos três critérios básicos para o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio. Entretanto, nacionalmente, o que se observa, até então, é que a questão estrutural (R) tem sido colocada em segundo plano, atendo-se somente, quando existentes, às verificações de isolamento (I) e de estanqueidade (E). A questão estrutural não deve ser vista como um item menos importante, pois a estrutura da edificação não deve alcançar a ruptura durante a citada fuga dos usuários.

A normatização nacional sobre o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio é bem atual. Destacam-se a ABNT NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, a ABNT NBR 14432:2001 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos e a ABNT NBR 14323:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Quanto à alvenaria estrutural em situação de incêndio, nada ainda foi feito, nacionalmente, neste sentido. Tal fato justifica a recomendação do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, em sua Instrução Técnica 08/2011, de que seja empregado o Eurocode 6 (1996) ou norma similar reconhecida internacionalmente.

Como contribuição, na forma de subsídios à futura normatização nacional sobre o tema, neste artigo são apresentados os procedimentos para o dimensionamento de construções

de alvenaria em situação de incêndio vigentes nos Estados Unidos, na Europa e na Austrália.

B.2 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF) DA ALVENARIA

O TRRF, de acordo com a NBR 14432:2001, é o tempo mínimo que um elemento estrutural ou elemento de compartimentação resiste a um dos critérios pré-estabelecidos durante um incêndio. Os tempos estabelecidos para elementos de compartimentação são determinados experimentalmente, simulando o incêndio-padrão, e devem garantir que seja possível a fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança, segurança das operações de combate ao incêndio e minimização dos danos a edificações adjacentes e à infraestrutura pública.

No Manual Técnico de Alvenaria (1990) são apresentados resultados de alguns ensaios realizados segundo a NBR 5628:1977.

A partir dos dados obtidos através do ensaio das paredes, os elementos foram categorizados em corta-fogo (enquanto atenderem aos requisitos de resistência mecânica, estanqueidade e isolamento térmico), para-chamas (enquanto atenderem aos requisitos de resistência mecânica e estanqueidade) e estável ao fogo (enquanto atenderem apenas ao requisito de resistência mecânica).

A Tabela B.1 apresenta os valores divulgados no livro.

Tabela B.1 - Resistência ao fogo de blocos de concreto e cerâmico

Bloco	Espessura (cm)	Revestimento	Características		
			Corta-fogo	Para chamas	Estável ao fogo
Concreto vedação	19	Argamassa 2 cm na face exposta ao fogo	4h	-	-
Concreto estrutural	14	-	1h	4h	4h
Cerâmico vedação	9	1,5 em cada face	1,5h	2h	2h
Cerâmico estrutural	14	Gesso 3 mm na face exposta ao fogo	2h	4h	4h
Cerâmico estrutural	14	-	1,5h	2h	2h
Cerâmico estrutural	14	1,5 cm em cada face	2h	3h	3h

Fonte: ABCI, 1990, p. 140 (adaptado).

B.3 CÓDIGO AMERICANO: ACI/TMS 216.1-14 – 14 – CODE REQUIREMENTS FOR DETERMINING FIRE RESISTANCE OF CONCRETE AND MASONRY CONSTRUCTION ASSEMBLIES (2014)

Este código apresenta procedimentos de projeto e análise para determinar a resistência ao fogo de estruturas de concreto e alvenaria em situação de incêndio.

B.3.1 Espessuras equivalentes mínimas das paredes

As espessuras equivalentes mínimas das paredes de alvenaria de blocos de concreto e para as paredes de blocos cerâmicos, necessárias para tempos de resistência ao fogo de 0,5 a 4 horas, são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas B.2 e B.3.

Tabela B.2 - Resistência ao fogo para alvenaria de concreto

Mínima espessura equivalente T_{ea} para classificação de resistência ao fogo (cm)							
* **							
Tipo de agregado	½ hora	¾ hora	1 hora	1 ½ horas	2 horas	3 horas	4 horas
Cascalho de calcário ou silício	5,1	6,1	7,1	9,1	10,7	13,5	15,7
Pedra calcária, cinzas ou escória resfriada a ar	4,8	5,8	6,9	8,6	10,2	12,7	15,0
Argila expandida, xisto expandido ou ardósia expandida	4,6	5,6	6,6	8,4	9,1	11,2	13,0
Escória expandida ou pedra-pomes	3,8	4,8	5,3	6,9	8,1	10,2	11,9

* Resistências entre os períodos listados devem ser determinadas por meio de interpolação linear baseada na espessura equivalente da parede de alvenaria de concreto; ** Espessuras mínimas equivalentes correspondentes à resistência ao fogo para blocos feitos com combinações de agregados devem ser determinadas por interpolação linear, baseada na porcentagem do volume de cada agregado utilizado em sua fabricação.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14, Table 5.1a, p.21 (convertida para cm)

Tabela B.3 – Paredes de alvenaria de blocos cerâmicos

Mínima espessura equivalente T_{ea}, em função do tempo requerido de resistência ao fogo (cm) *				
Tipo de material	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas
Bloco maciço de barro ou xisto	6,9	9,7	12,4	15,2
Bloco vazado ou telha de barro ou xisto, sem preenchimento	5,8	8,6	10,9	12,7
Bloco vazado ou telha de barro ou xisto, grauteada ou preenchido com materiais específicos	7,6	11,2	14,0	16,8

* Cálculos entre as horas tabeladas devem ser determinados por interpolação linear

Fonte: ACI/TMS 216.1-14, Table 6.3.1, p. 27 (convertida em cm)

B.3.1.1 Espessura equivalente das paredes de alvenaria (T_{ea})

A espessura equivalente de uma parede de alvenaria, T_{ea} , é a soma entre a espessura equivalente do bloco, T_e , e a espessura equivalente de seu acabamento, T_{ef} . Ou seja:

$$T_{ea} = T_e + T_{ef} \quad (\text{B.1})$$

Onde:

T_{ea} = espessura equivalente de uma parede de alvenaria; T_e = espessura equivalente do bloco; T_{ef} = espessura equivalente do acabamento;

B.3.1.2 Determinação da espessura equivalente do bloco (T_e)

A espessura equivalente do bloco é tomada como:

$$T_e = \frac{V_n}{LH} \quad (\text{B.2})$$

Onde:

V_n = volume líquido do bloco; L = comprimento do bloco; H = altura do bloco.

Em *paredes não grauteadas ou parcialmente grauteadas*, a espessura equivalente, T_e , deverá ser determinada pela Equação (B.2), em função do volume líquido do bloco; em *construções totalmente grauteadas*, a espessura equivalente, T_e , deverá ser a própria espessura do bloco.

Para *blocos vazados preenchidos com material solto*, a espessura equivalente, T_e , deverá ser a própria espessura do bloco quando o material de preenchimento for areia, cascalho, brita, escória, pedra-pomes, xisto expandido, argila expandida, ardósia expandida, cinzas volantes expandidas, cinzas, perlita ou vermiculita.

B.3.1.3 Determinação da espessura equivalente do acabamento nas paredes (T_{ef})

O tipo de material e espessura empregados no acabamento das paredes de alvenaria contribuem para aumentar a resistência ao fogo destes elementos.

No caso de acabamento aplicado na face não exposta ao fogo da parede, sua espessura deve ser ajustada por um fator, que leva em conta tanto os materiais empregados na fabricação do bloco (parede), quanto o material do próprio acabamento. Esta espessura ajustada para o acabamento (T_{ef}) deve ser somada a espessura equivalente do bloco de concreto (T_e) para a obtenção da espessura equivalente da parede (T_{ea}), que será empregada para a obtenção da resistência ao fogo de acordo com a Tabela B.2, para paredes de alvenaria de blocos de concreto, ou de acordo com a Tabela B.3, para paredes de alvenaria de blocos cerâmicos.

Paredes de alvenaria de concreto ou cerâmica, com acabamentos aplicados na face exposta ao fogo, terão seu tempo de resistência ao fogo incrementado pelo tempo, calculado isoladamente, de resistência ao fogo atribuído ao acabamento.

Paredes com acabamentos diferentes em suas faces de provável exposição ao fogo devem ser duplamente verificadas, com cada uma de suas faces adotada como sendo a face de exposição ao fogo. A resistência ao fogo desta parede deve ser tomada como o menor dos tempos obtidos destes cálculos isolados.

Quando os acabamentos (no caso de aplicação em ambas as faces) contribuem para a resistência ao fogo do conjunto, deve-se limitar essa contribuição total (ambos os acabamentos) à metade da contribuição atribuída a parede sem acabamento.

B.3.2 Paredes múltiplas de alvenaria de blocos de concreto e/ou cerâmica

Para paredes múltiplas, a resistência ao fogo deve ser calculada considerando-se a resistência de cada parede do conjunto e também a influência de eventual espaço entre elas, de acordo com a Equação (B.3), válida para combinações de paredes de alvenaria de concreto, alvenaria cerâmica, ou uma combinação desses dois materiais.

$$R = (R_1^{0,59} + R_2^{0,59} + \dots + R_n^{0,59} + A_1 + A_2 + \dots + A_n)^{1,7} \quad (B.3)$$

Onde R_1, R_2, \dots, R_n representam a resistência ao fogo das camadas 1, 2, ..., n, respectivamente, em horas; e $A_1 = A_2 = A_n = 0,30$, um fator que leva em consideração o espaço entre as paredes (preenchido com ar), com valores entre 1,27cm e 8,89cm.

Para os valores de R_1, R_2, \dots, R_n , usar a Tabela B.3 para alvenaria cerâmica, ou a Tabela B.2 para alvenaria de concreto.

B.4 EUROCODE 6 – EN 1996 – 1-2 (1996)

O *Eurocode 6* é o código europeu que especifica as exigências necessárias a serem cumpridas no dimensionamento de estruturas em situação de incêndio para alvenaria estrutural.

Para determinação do tempo de resistência ao fogo deve-se conhecer o tipo de bloco empregado, os materiais componentes dos blocos e o tipo de revestimento a ser aplicado.

Assim como em outras normas descritas, para a exposição ao fogo, as estruturas devem cumprir os critérios R (resistência mecânica), E (integridade), I (isolamento) e M (impacto mecânico). Para suporte de carga unicamente: critério R; para função separadora: critérios EI; para função separadora e de suporte de carga: critérios REI; para suporte de carga, função separadora e resistência ao impacto mecânico: critérios REI-M; para função separadora e resistência ao impacto mecânico: critérios EI-M. Para o dimensionamento, a avaliação poderá ser feita através de ensaio, por tabelas ou métodos de cálculo.

B.4.1 Avaliação por método tabular

As tabelas estão contidas no Anexo B do código e fornecem a espessura mínima necessária da parede de alvenaria para o tempo de resistência ao fogo requerido. Para ilustrar, abaixo se encontra uma das tabelas do código europeu.

Tabela B.4 - Espessura mínima de paredes carregadas (critério REI) para concreto de agregado normal e leve

Nº da linha	Propriedades dos materiais Resistência à compressão (f_b) [N/mm ²] Densidade (ρ) [kg/m ³]	Mínima espessura (mm) t_f para o tempo (minutos) de resistência ao fogo para a classificação REI						
		30	45	60	90	120	180	240
1	Blocos do Grupo 1 Argamassa: uso geral, camada fina, leve							
1.1	Agregado leve $2 \leq f_b \leq 15$ $400 \leq \rho \leq 1600$							
1.1.1	$\alpha \leq 1,0$	90/170	90/170	90/170	100/170	100/190	140/240	150/300
1.1.2		(90/140)	(90/140)	(90/140)	(90/140)	(90/170)	(100/190)	(100/240)
1.1.3	$\alpha \leq 0,6$	70/140	70/140	70/140	90/170	90/170	100/190	100/240
1.1.4		(60/100)	(60/100)	(60/100)	(70/100)	(70/140)	(90/170)	(90/190)
1.2	Agregado normal $6 \leq f_b \leq 35$ $1200 \leq \rho \leq 2400$							
1.2.1	$\alpha \leq 1,0$	90/170	90/170	90/170	90/170	100/190	140/240	150/300
1.2.2		(90/140)	(100/140)	(90/140)	(90/140)	(90/170)	(100/190)	(100/240)
1.2.3	$\alpha \leq 0,6$	70/140	90/140	70/140	90/170	90/170	100/190	140/240
1.2.4		(60/100)	(70/100)	(70/100)	(70/100)	(70/140)	(90/170)	(100/190)

Fonte: EN 1996 1-2, Table N.B.3.2, p. 50 (traduzida para o português).

A espessura que consta na tabela é da alvenaria, sem acabamentos. A primeira linha do par de linhas define a resistência para paredes sem um acabamento adequado. Valores entre parênteses na segunda linha do par de linhas são para as paredes com um acabamento adequado às exigências do Eurocode, com espessura mínima de 10mm nas duas faces de uma parede simples, ou na face exposta ao fogo em uma parede dupla.

B.4.2 Modelo simplificado de cálculo (Anexo C)

É possível o dimensionamento pelo modelo simplificado para blocos cerâmicos, de silicato de cálcio, de concreto de agregado normal, de concreto de agregado leve e de concreto celular auto clavado com as propriedades (resistência, densidade seca) descritas

no *Eurocode*. O método simplificado é válido para paredes de alvenaria e pilares expostos ao incêndio padrão construídos com determinados tipos de bloco e combinações de argamassa.

No método simplificado de cálculo, a capacidade de suporte de carga é determinada pelas condições limites sobre a seção transversal residual da alvenaria para períodos de exposição ao fogo utilizando a carga a uma temperatura normal.

Procedimento

(1) Determinar o perfil de temperatura da seção transversal, qual parte é ineficiente (seção transversal ineficiente – ver Figura B.1) e qual é a seção transversal residual, calcular a capacidade resistente no estado limite último da seção transversal residual e verificar que esta é maior que a necessária para a devida combinação de ações.

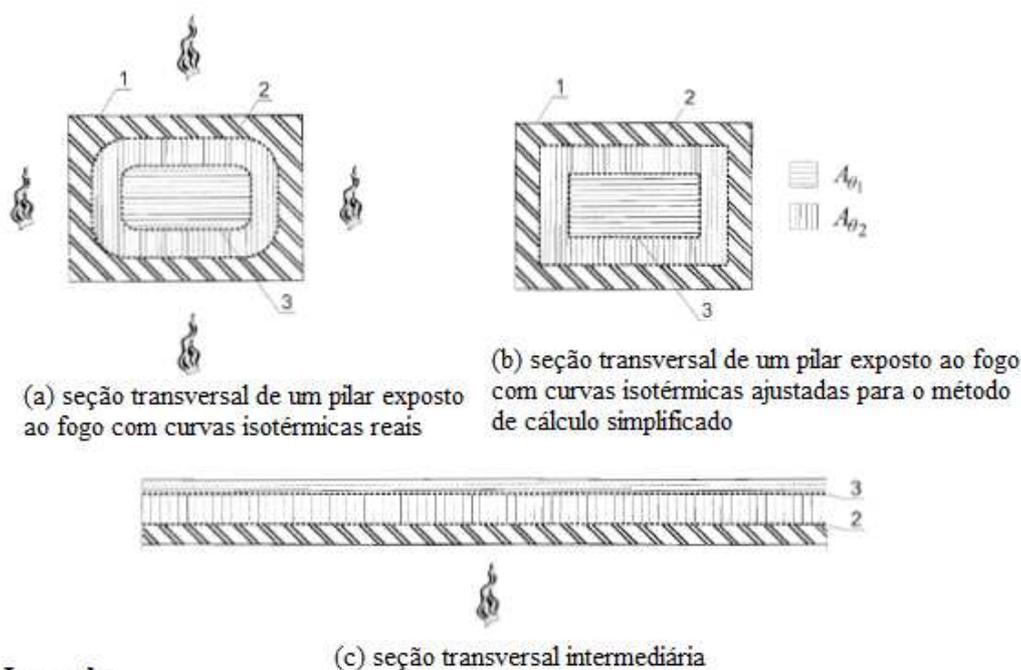


Figura B.1 – Ilustração de áreas da alvenaria a temperaturas até θ_1 , entre θ_1 e θ_2 e áreas estruturalmente ineficientes (acima de θ_2)

Fonte: EN 1996 1-2, Figure C.1, p. 66 (traduzida para o português)

(2) No estado limite para a situação de incêndio, o valor de projeto da carga vertical aplicada em uma parede ou pilar deve ser menor ou igual ao valor de projeto de resistência da parede ou pilar.

$$N_{Ed} \leq N_{Rd,fi\theta_2} \quad (B.4)$$

(3) O valor de projeto da resistência vertical de uma parede ou coluna é dado por:

$$N_{Rd,fi\theta_2} = \Phi(f_{d\theta_1}A_{\theta_1} + f_{d\theta_2}A_{\theta_2}) \quad (B.5)$$

onde:

A = área total de alvenaria; A_{θ_1} = área de alvenaria até θ_1 ; A_{θ_2} = área de alvenaria entre θ_1 e θ_2 ; θ_1 = temperatura até a qual pode-se utilizar a capacidade resistente da alvenaria; θ_2 = temperatura acima da qual o material é desprezado; N_{Ed} = valor da força vertical solicitante de cálculo; $N_{Rd,fi\theta_2}$ = valor da força vertical resistente de cálculo, em situação de incêndio; $f_{d\theta_1}$ = resistência à compressão, de cálculo, da alvenaria até θ_1 ; $f_{d\theta_2}$ = resistência à compressão, de cálculo, da alvenaria entre θ_1 e θ_2 ; $e_{\Delta\theta}$ = excentricidade devido à variação de temperatura na alvenaria; Φ = fator de minoração da capacidade portante da parede que leva em consideração eventual excentricidade adicional $e_{\Delta\theta}$.

(4) A distribuição de temperatura através de uma seção da alvenaria e a temperatura à qual a alvenaria se torna ineficaz, como uma função do tempo de exposição ao fogo, deve ser obtida através de resultados de ensaios ou a partir de uma base de dados de resultados de ensaios.

A excentricidade, $e_{\Delta\theta}$, devido à carga de incêndio, para uso no método simplificado de cálculo pode ser obtida a partir dos resultados de ensaios ou a partir da equação:

$$e_{\Delta\theta} = \frac{1}{8} h_{ef}^2 \frac{\alpha_t(\theta_2 - 20)}{t_{Fr}} \leq h_{ef}/20 \quad (B.6)$$

$e_{\Delta\theta} = 0$ quando se considera todas as faces do elemento sob ação do fogo; θ_2 = temperatura acima da qual o material não tem força residual, em °C; h_{ef} = altura efetiva da parede; α_t = coeficiente de expansão térmica; t_{Fr} = espessura da seção transversal cuja temperatura não exceda θ_2 .

Existe uma tabela no *Eurocode* onde são apresentados os valores das temperaturas θ_1 e θ_2 em função do material da alvenaria (blocos de concreto com um certo tipo de agregado, blocos cerâmicos, etc.).

B.5 CÓDIGO DA CONSTRUÇÃO AUSTRALIANO

O código australiano é o único código, dentre os abordados, que leva em conta todos os três critérios para o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio.

Nele é especificado que as paredes devem atingir certos níveis de resistência ao fogo (*Fire Resistance Levels* – FRLs) para adequabilidade estrutural (estabilidade contra o colapso), integridade/estanqueidade (resistência à fissuração excessiva e passagem de gases e chamas) e isolamento (resistência à passagem de calor).

O FRL (*Fire Resistance Level* – nível de resistência ao fogo) para a adequabilidade estrutural de uma parede é uma medida da sua capacidade de permanecer; o FRL para a integridade/estanqueidade de uma parede é uma medida de sua habilidade para resistir à passagem de chamas e gases através de fissuras; e o FRL para o isolamento de uma parede é uma medida de sua habilidade para resistir à passagem de calor do lado que faceia o

ambiente onde está ocorrendo o incêndio até o outro lado, que fazia o ambiente onde este não está ocorrendo.

A especificação dos blocos é feita por três diferentes números, por exemplo, FRL 60/120/120. O primeiro número representa o tempo de resistência considerando a adequabilidade estrutural. O segundo número representa o tempo limite de integridade/estanqueidade. O terceiro número está relacionado ao tempo de isolamento máximo do bloco. Para atender às condições da norma, a alvenaria deve sempre ter nível de isolamento igual ou superior ao limite requerido pelo critério de integridade/estanqueidade.

O comportamento dos materiais de alvenaria pode ser determinado ou por meio de ensaios ou pelas tabelas da norma australiana.

A norma australiana (AS 3700) dá duas opções ao projetista de paredes de alvenaria sujeitas à incêndios: projetar a estrutura para os critérios de adequabilidade estrutural, integridade e isolamento, respeitando os limites tabelados de esbeltez, cobrimento de armadura e espessura; ou projetar a estrutura para os critérios de adequabilidade estrutural, integridade e isolamento utilizando dados de ensaios.

As tabelas da AS 3700, bastante conservadoras, estão divididas em diferentes tipos de blocos e preveem blocos com mais de 45% de agregados basálticos e densidade abaixo de 1800 kg/m³. Os limites dessas tabelas são representativos para qualquer tipo de alvenaria fabricada na Austrália, incluindo aquelas que apresentam má adequabilidade estrutural e baixo isolamento.

B.5.1 Dimensionamento de acordo com o método tabelado

Para se dimensionar uma parede de acordo com o critério (FRL) de adequabilidade estrutural utilizando os valores tabelados, o índice de esbeltez não deverá exceder a um valor de referência tabelado. Se a esbeltez da parede é maior que a máxima permitida, a parede deverá ser recalculada com uma espessura maior. Pode-se também modificar o arranjo estrutural de forma a aumentar a rigidez do elemento, introduzindo novas restrições (travamentos) na parede.

O índice de esbeltez é definido pelas Equações (B.7) a (B.9), função do tipo de vinculação da parede.

Paredes que não possuem apoio nas laterais têm o índice de esbeltez definido pela Equação (B.7).

$$S_{rf} = \frac{a_{vf} \cdot H}{t} \quad (B.7)$$

Paredes que possuem apoios em apenas uma ou nas duas laterais têm seu índice de esbeltez calculado pelo menor valor dado nas Equações (B.7) a (B.9).

$$S_{rf} = \frac{0,7}{t} \sqrt{a_{vf} \cdot H \cdot a_k \cdot L} \quad (B.8)$$

$$S_{rf} = a_k \frac{L}{t} \quad (B.9)$$

onde:

S_{rf} = índice de esbeltez da parede em situação de incêndio; a_{vf} = igual a 0,75 se o elemento possui apoios em toda sua extensão lateral. Caso não existia tal restrição, o valor a ser adotado é 2,0; H = altura do membro entre os travamentos verticais da parede; t = espessura total da parede. Para paredes duplas ou com cavidades, a espessura da parede deverá atender ao disposto em B.5.1.1; a_k = no caso de a parede possuir apoios superior e inferior, o coeficiente vale 1,0. No caso de a parede possuir somente apoio inferior, o coeficiente vale 2,5; L = comprimento da parede entre as faces laterais restringidas ou o comprimento de uma parede com travamento lateral em apenas uma de suas extremidades. No caso de juntas prumo ou no caso de paredes com aberturas, o comprimento é medido até a junta ou abertura.

Existem também valores tabelados para a verificação do isolamento térmico.

B.5.1.1 Paredes duplas ou com Cavidades

Quando as duas paredes possuem carregamento axial, com valores que não diferem 10% um do outro, incluindo o caso de ambas as paredes não possuírem carregamento algum, o índice de esbeltez deve ser baseado em dois terços da soma das espessuras das duas paredes e das condições de apoio da parede não exposta ao fogo. Se as duas paredes forem constituídas por blocos de diferentes tipos, o cálculo para adequabilidade estrutural deverá ser baseado no material menos resistente.

Para os demais casos, o índice de esbeltez deve ser baseado na espessura e condições de apoio da parede mais carregada.

B.5.2 Dimensionamento de acordo com dados experimentais

Com relação ao dimensionamento, os fabricantes de blocos fornecem tabelas de dimensionamento, nas quais se leva em conta o tempo de resistência de isolamento em função do tipo de agregado utilizado na fabricação dos blocos.

O procedimento de dimensionamento das alvenarias em situação de incêndio pelo método tabelado, proposto por fabricantes australianos, é apresentado nas Figuras B.2 e B.3. A Figura B.2 é para alvenaria de concreto e a B.3, para alvenaria cerâmica.

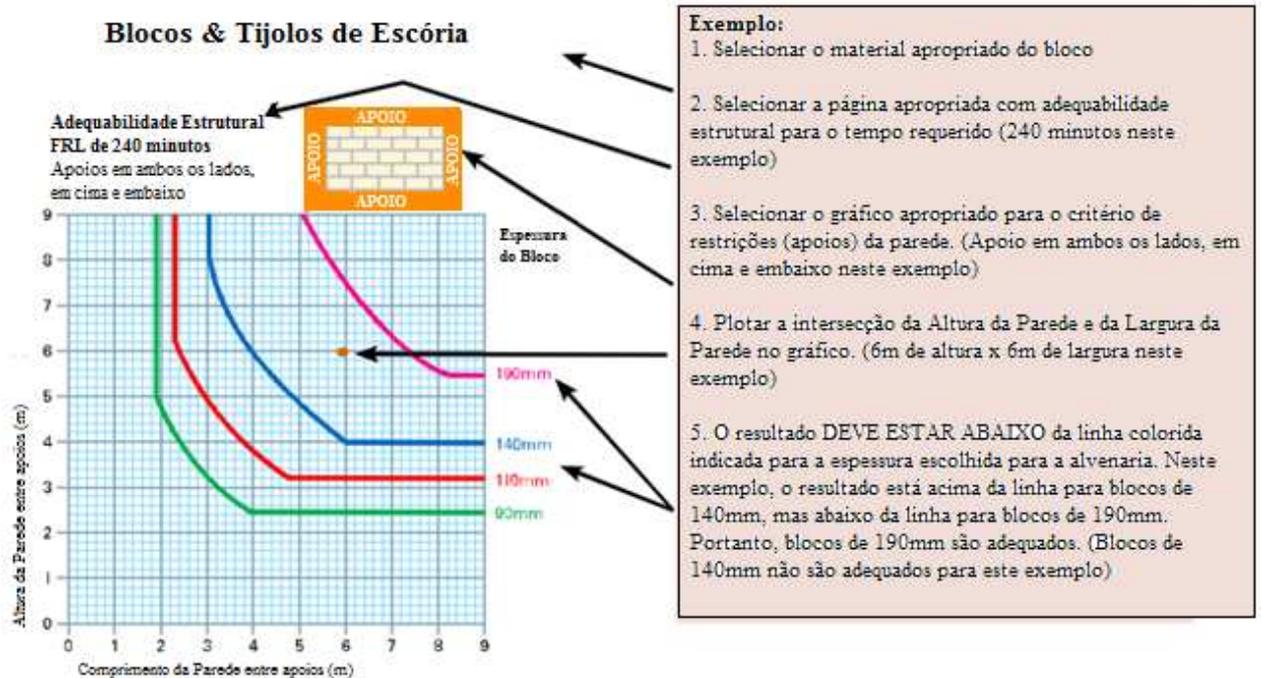


Figura B.2 - Adequabilidade estrutural de uma parede de blocos de concreto

Fonte: TORRES, 2012, p. 46 (traduzida para o português)

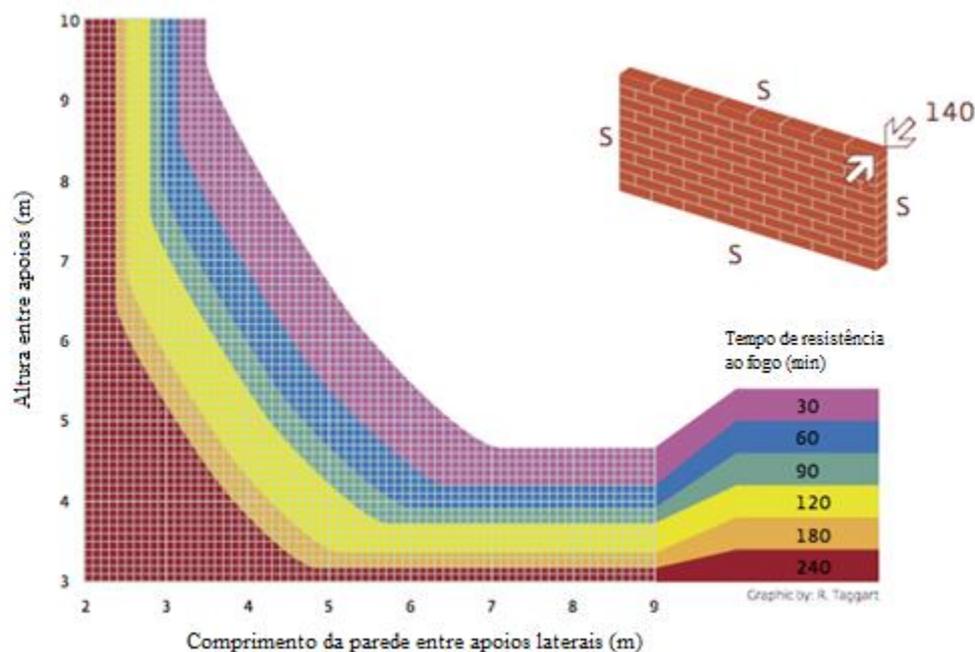


Figura B.3 - Adequabilidade estrutural para uma parede de blocos cerâmicos de 140 mm de espessura, apoiada em todas as extremidades.

Fonte: TORRES, 2012, p.47 (traduzida para o português)

Pela Figura B.3, pode-se perceber que, uma parede de alvenaria cerâmica, apoiada em todas as extremidades, com sete metros de comprimento e quatro de altura, resiste a um incêndio durante sessenta minutos, considerando o critério de adequabilidade estrutural.

B.6 CONCLUSÕES

Incêndios muitas vezes são inevitáveis na construção civil, e as estruturas não devem entrar em colapso antes que ocorra sua total evacuação, pois a prioridade maior é poupar vidas. Em segundo plano, porém não menos importante, o dano estrutural deve ser minimizado. Para isto existe a normatização de segurança das estruturas em situação de incêndio. O país carece, no entanto, de normatização própria, e a consulta a normas internacionalmente respeitadas se torna necessária.

Neste trabalho, foram apresentados os procedimentos de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio de acordo com a norma americana, a europeia e a australiana.

A norma americana fornece tabelas de espessuras mínimas para que paredes de alvenaria resistam a um incêndio durante um determinado tempo. Essas tabelas estão divididas pelo tipo de agregado utilizado nos blocos. Ela também leva em conta o efeito de diferentes tipos de acabamentos nas paredes, se ele está no lado exposto ao fogo ou no outro lado. É bem completa quando se considera critérios de isolamento ou de estanqueidade, deixando a desejar no quesito resistência. Não apresenta procedimentos analíticos de dimensionamento, simplificados ou não, de forma a considerar o critério de resistência no dimensionamento de paredes em alvenaria estrutural.

A norma europeia, das três avaliadas, é a mais completa. Apresenta procedimento tabular que leva em conta os três critérios de resistência ao fogo das paredes e mais um, o impacto mecânico nas paredes. Entretanto, tem algumas limitações quanto aos materiais de acabamento e neste quesito não é tão completa quando a norma americana. Apresenta também uma proposta de dimensionamento segundo método analítico que é bastante coerente, similar ao que já é feito para o concreto armado. O método em si não é complexo, porém, para utilizá-lo, são necessários resultados de ensaios em laboratório para determinar a distribuição de temperatura em um bloco em função do tempo de exposição ao fogo do mesmo. O Brasil carece de uma base de dados de resultados de ensaios. Acredita-se que, uma vez ensaiados diversos blocos, pode-se propor um modelo numérico de mapeamento de sua temperatura e, com ele, um método de cálculo semelhante ao apresentado no *Eurocode 6* (1996) poderá ser utilizado.

O código australiano leva em conta o índice de esbeltez da parede na verificação de sua resistência ao fogo, ou seja, é o único código, dentre os citados, que considera verdadeiramente, este aspecto. Entretanto, mais do que esta constatação, o que se julgou deveras interessante foi o fato de que o uso dos ábacos fornecidos por fabricantes de blocos, baseados em resultados de ensaio das paredes em laboratório, tornou-se rapidamente intuitivo.

É imperativa a elaboração de uma normatização nacional. O que se sugere, portanto, é a elaboração de uma norma brasileira sobre o assunto que possa mesclar o que há de interessante nessas outras normas. Inicialmente, por conta da deficiência de equipamentos para ensaiar paredes carregadas, ensaios de blocos isolados e com diferentes tipos de acabamentos podem ser realizados, para que tabelas semelhantes às americanas sejam

elaboradas, de forma que se possa calcular estruturas de alvenaria em situação de incêndio considerando pelo menos o critério de isolamento térmico.

Em seguida, pode-se mapear a temperatura nos blocos, montar e validar um modelo numérico, para que se possa utilizar um método de cálculo simplificado semelhante ao do *Eurocode*.

Finalmente, quando seja concreta a possibilidade de se ensaiar paredes de alvenaria carregadas em situação de incêndio, ábacos semelhantes aos australianos poderão ser montados e assim, finalmente, serão reunidas informações suficientes para balizar uma primeira normatização nacional sobre o tema.

B.7 REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI/TMS 216.1-14: Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies.** U.S.A., 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA. **Manual técnico de alvenaria.** São Paulo, SP: A Associação, Projeto Editores Associados, 1990. 275 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628: Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270 - 2: Componentes cerâmicos - Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3700-2011: Masonry Structures.** Sydney, Australia, 2011.

CONCRETE MASONRY ASSOCIATION OF AUSTRALIA. Manual M55 – Design and construction of concrete masonry buildings. In:_____. **Part B, Chapter 4, Fire.** Australia, 2012. 52p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6: EN 1996-1.2: Design of Masonry Structures. Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design.** Brussels, 2005.

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*, Porto Alegre, v.12, n.4, p. 37-53, out./dez. 2012.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO, Corpo de Bombeiros. **Instrução Técnica nº 08/2011: Resistência ao fogo dos elementos de construção.** Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, São Paulo, 2011.

TORRES, D. L. **Alvenaria estrutural em situação de incêndio – Proposta de verificação.** 2012. 68 p. Exame de qualificação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 2012.

ANEXO C. ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA AMBIENTE CONSTRUÍDO:

Dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio: contribuição à futura normatização nacional

Design of masonry walls in situations of fire: a contribution for a future Brazilian standard

Helena Arias Lara Leite
Armando Lopes Moreno Júnior
Daniel Luis Torres

RESUMO

O Brasil carece de uma legislação sobre alvenaria estrutural em situação de incêndio. Por conta disso, o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (2011) recomenda que se faça esse dimensionamento de acordo com as recomendações do Eurocode 6 (2005) ou norma internacional similar. Com o intuito de subsidiar futuras discussões sobre uma normatização nacional, neste artigo são apresentados os procedimentos de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio em vigor nos Estados Unidos, na Europa e na Austrália. Ao final, sem deixar ao largo o questionamento da aplicabilidade dessas três normas à situação brasileira, por conta das diferenças de materiais utilizados tanto nos blocos quanto nos acabamentos, sugere-se mesclar o que há de interessante nesses três códigos internacionais, de forma gradativa, na elaboração de futura norma brasileira sobre o assunto.

Palavras-chaves: Alvenaria estrutural. Incêndio. Norma. Resistência ao fogo.

ABSTRACT

Helena Arias Lara Leite

Universidade Estadual de Campinas

Campinas - SP - Brasil

Armando Lopes Moreno Junior

Universidade Estadual de Campinas

Campinas - SP - Brasil

In Brazil, there is no standard regarding the design of masonry walls in fire situations. According to the Fire Department of the state of São Paulo (2011), either the Eurocode 6 (2005) or an equally recognized international Standard should be used in such a situation. In this article, design specifications for masonry walls in situation of fire are presented, according to the standard requirements in the United States of America, Europe and Australia. One might question the applicability of these codes in the Brazilian context, due to the different materials the structural units are made of and the rendering applied on the walls. Taking that into account, we suggest that the applicable elements of the three international standards should be gradually integrated into the development of a Brazilian standard.

Keywords: Masonry. Fire. Standard. Fire resistance.

C.1 INTRODUÇÃO

A resistência ao fogo é a capacidade de um elemento estrutural permanecer exercendo as funções para as quais foi projetado durante um determinado tempo, sob as circunstâncias de um incêndio.

De modo geral, os procedimentos adotados de dimensionamento de um elemento estrutural em situação de incêndio, englobam a verificação da resistência mecânica (R), da estanqueidade (E) e do isolamento térmico (I). Para obedecer a esses critérios, a estrutura não deve alcançar a ruptura, não deve apresentar trincas ou aberturas suficientes que permitam a passagem de gases ou chamas e não deve apresentar um aumento de temperatura, na face não exposta, acima da temperatura inicial, superior em média a 140°C e em qualquer ponto a 180°C.

Quanto ao tempo em que a edificação deve se manter resistente ao fogo, deve-se ater a limites estabelecidos, a consenso na sociedade, que garantam a fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança, que garantam a segurança das operações de combate ao incêndio e que minimizem danos a edificações adjacentes e à infraestrutura pública (padronizados nacionalmente pela NBR 14432 (ABNT, 2001)).

Para a alvenaria empregada como estrutura, é importante observar que, quase sempre, as paredes devem atender aos três critérios básicos para o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio. Entretanto, nacionalmente, talvez pela inexistência de procedimentos normatizados de dimensionamento, o que se observa, até então, é que a questão estrutural (R) tem sido colocada em segundo plano, atendo-se somente, quando existentes, às verificações de isolamento térmico (I) e de estanqueidade (E). A questão estrutural não deve ser vista como um item menos importante, pois a estrutura da edificação não deve alcançar a ruptura durante a citada fuga dos usuários.

A normatização nacional sobre o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio é bem atual. Destacam-se a NBR 15200 (ABNT, 2012) – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, a NBR 14432 (ABNT, 2001) – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos e a NBR 14323 (ABNT, 2013) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Quanto à alvenaria estrutural em situação de incêndio, ainda não existe normatização nacional sobre o assunto. Tal fato justifica a recomendação do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, em sua Instrução Técnica 08/2011 (POLÍCIA..., 2011), de

que seja empregado o *Eurocode 6* (EUROPEAN..., 2005) ou norma similar reconhecida internacionalmente.

Com o intuito de subsidiar futuras discussões sobre uma normatização nacional, neste artigo são apresentados os procedimentos de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio em vigor nos Estados Unidos, na Europa e na Austrália.

C.2 COMPORTAMENTO DA ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A alvenaria estrutural é composta por elementos de alvenaria (blocos cerâmicos ou de concreto), argamassa de assentamento, eventual armadura de aço e eventual revestimento (acabamentos). O comportamento resistente ao fogo da alvenaria estrutural depende, logicamente, do comportamento resistente a elevadas temperaturas de cada um desses materiais, isoladamente e em conjunto.

Nacionalmente, ainda se caminha a passos lentos na avaliação do comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio. Pouco se conhece, no país, sobre as propriedades térmicas e mecânicas, sob temperaturas elevadas, dos materiais componentes da alvenaria estrutural. Da mesma forma, quando se avalia resultados existentes sobre o comportamento de paredes de alvenaria em situação de incêndio, nota-se, além da insignificância numérica de resultados nacionais, a inexistência de resultados de paredes avaliadas sob carga.

Rosemann (2011) ensaiou paredes de alvenaria cerâmica quanto ao isolamento térmico, não carregadas, alternando a presença de revestimentos de argamassa e o preenchimento dos vazios com areia. O autor constatou que as paredes sem revestimento e sem preenchimento apresentaram resistência ao fogo de 106 minutos. Com a aplicação de revestimento de argamassa nas faces da parede, obteve-se um aumento de 80% na resistência ao fogo e, com o preenchimento com areia nos principais vazios dos blocos, o acréscimo verificado foi de 100%. Constatou-se, portanto, que o emprego de revestimentos nas faces e o preenchimento dos vazios com areia representam boas alternativas, a um custo relativamente baixo, para aumentar a resistência ao fogo de paredes de alvenaria cerâmica.

Rigão (2012) ensaiou pequenas paredes carregadas de alvenaria cerâmica (com restrição de deslocamento na vertical). Ele constatou que, em relação às argamassas, temperaturas de 900 °C são

suficientes para promover sua completa deterioração e que o tipo de agregado nela utilizado tem influência na perda de massa e estabilidade do material. Vale ressaltar que, nos ensaios feitos por esse autor, a taxa de aquecimento do forno não seguiu a curva de incêndio-padrão (INTERNATIONAL..., 1999). Em relação às paredes, foi constatado que houve, no transcorrer do ensaio, devido ao gradiente térmico e à restrição de deslocamento vertical imposta, um aumento de carga considerável. Também se constatou que, em todas as paredes, houve um atraso, a partir do início do ensaio, de aproximadamente 20 minutos, de início do incremento de carga mencionado. Tal atraso ocorreu porque, durante o período inicial do ensaio, as temperaturas do meio da parede e de sua face não aquecida mantiveram-se praticamente inalteradas e, portanto, ainda não haviam tensões térmicas significativas na parede.

Internacionalmente, embora muito poucos quando comparados aos existentes para o aço ou para o concreto armado, existem pesquisadores interessados no comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio. A seguir, serão citados resultados observados por alguns deles.

Bailey (2004) afirma que o colapso de uma parede de alvenaria em situação de incêndio, quando ocorre, é geralmente devido aos carregamentos impostos pelas deformações das estruturas ou elementos estruturais adjacentes a ela. O autor ainda lembra que não se deve extrapolar os resultados de ensaios em paredes com menos de três metros de altura para paredes maiores, pois, neste último caso, seu deslocamento lateral a meia-altura cresceria devido ao efeito da curvatura térmica e, portanto, elas colapsariam antes de paredes com alturas menores ou iguais a três metros.

Nadjai *et al.* (2006) lembram que estruturas de grandes dimensões são raramente alvos de experimentos, por conta do custo e das limitações físicas dos equipamentos existentes (fornos). Portanto, há pouca evidência experimental relacionando a resistência ao fogo de elementos individuais (blocos ou prismas) à resistência ao fogo da parede. Simulações numéricas apresentam-se como uma solução para as limitações que existem nos experimentos quanto ao tamanho da amostra.

Para Nadjai *et al.* (2006), em elementos de compartimentação, como paredes de alvenaria, o fogo está geralmente em apenas um lado. A parede irá, portanto, curvar-se, devido à expansão térmica diferencial. Esse fato, juntamente com a degradação das propriedades dos materiais, que se inicia em seu lado exposto ao fogo, pode resultar no colapso estrutural da parede, que depende das condições de

vinculação de seus apoios, da magnitude de carga nela aplicada e de sua geometria.

Segundo Ingham (2009), sob temperaturas baixas para um incêndio, da ordem de 250°C a 300 °C, os danos às paredes de alvenaria ficam geralmente restritos às mudanças de cor, como por exemplo, o avermelhamento de rochas e argamassas compostas por ferro. Entretanto, com a elevação da temperatura, uma parede de alvenaria estrutural sofrerá uma redução progressiva em sua resistência à compressão, por conta, principalmente, da deterioração da argamassa de assentamento. A temperaturas elevadas, entre 600°C e 800°C, a resistência à compressão da maioria das rochas e argamassas é seriamente comprometida.

Ingham (2009) ainda faz um alerta sobre o eventual colapso das paredes de alvenaria estrutural durante eventual resfriamento com água (o que é usual nas operações de combate ao incêndio). Ao se resfriar com água a alvenaria aquecida pelo fogo, o choque térmico e eventual contração do material pelo resfriamento fazem com que ocorra um intenso panorama de fissuração na parede, com muitas fissuras e bastante abertas, o que pode colaborar, naturalmente, para o colapso da parede.

Ingham (2009) avisa sobre o provável lascamento explosivo de alguns tipos de blocos cerâmicos quando em situação de incêndio, principalmente os que não são maciços.

Para Ingham (2009), estruturas de alvenaria de pedra ou cerâmica podem ser seriamente afetadas por incêndios. O dano tende a ficar concentrado ao redor de aberturas de portas e janelas, porém nada impede que o mesmo ocorra em outras regiões da parede ou mesmo que seja causado pela expansão ou colapso de outros elementos estruturais de edificação, próximos ou conectados à parede de alvenaria.

Andreini e Sassu (2011) são dois pesquisadores que defendem o bom comportamento da alvenaria em situação de incêndio. Mencionam que grande parte do interesse pela construção em alvenaria se deve à capacidade desse material de isolar um ambiente tanto do fogo em si quanto dos efeitos da fumaça (servindo, então, como paredes de compartimentação). Os autores ainda ressaltam o excelente comportamento, sob elevadas temperaturas, da argamassa de assentamento e de blocos de alvenaria feitos com argila ou concreto com agregados leves.

Nguyen e Meftah (2012) lembram que a resistência ao fogo da maioria das paredes de alvenaria pode ser determinada através de ensaios em laboratório ou por métodos semi-empíricos que, por sua vez, são quase sempre muito conservadores, resultando

em estruturas mais caras. Uma alternativa, segundo os mesmos autores, seria adotar um modelo de cálculo baseado em modelagem computacional avançada; sendo possível, nesse caso, a consideração de cenários específicos de incêndios, geometrias diferentes das padronizadas e processos complexos de degradação dos materiais, como o lascamento explosivo.

Nguyen e Meftah (2012) ressaltam, ainda, que modelos numéricos sofisticados requerem resultados experimentais específicos para obter dados quanto às propriedades mecânicas e térmicas dos materiais. Resultados de ensaios usuais de caracterização dos materiais podem ser insuficientes para validar uma simulação numérica avançada. Em seu trabalho, os autores ensaiaram quatro paredes de alvenaria e chegaram a algumas conclusões gerais importantes: em paredes grossas (de espessura maior que 12-14 cm) e estruturais, pode ocorrer lascamento explosivo, o qual não se propaga por toda a espessura da parede e, portanto, não interfere em sua resistência mecânica. O critério-chave para o dimensionamento da parede continuará a ser o isolamento térmico (I).

Em outro trabalho recente, Nguyen e Meftah (2014), relatam que a alvenaria de blocos cerâmicos ainda ocupa uma parcela importante no mercado de construção civil em diversos países, pois apresenta soluções construtivas de baixo custo. Propõem blocos de alvenaria cada vez mais resistentes ao fogo como soluções para melhorar a resistência ao fogo do conjunto (parede).

Nguyen e Meftah (2014) ressaltam que modelos bidimensionais podem até simular satisfatoriamente o comportamento ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Entretanto, em paredes onde o lascamento explosivo tem grande probabilidade de ocorrência, como é o caso de paredes estruturais feitas com blocos vazados, a ruptura local é um fator importante que governa o comportamento ao fogo da alvenaria e, portanto, não deve ser ignorada em simulações numéricas.

Após a apresentação dos resultados de pesquisa envolvendo a alvenaria estrutural sob elevadas temperaturas, ressalta-se, mais uma vez, a importância da normatização nacional para procedimentos de dimensionamento desse material em situação de incêndio. Tais procedimentos devem ser discutidos à luz de aspectos voltados ao sistema construtivo e materiais de uso corrente em nosso país. A seguir, serão expostas as recomendações para dimensionamento de alvenaria estrutural em situação de incêndio no Brasil e no exterior.

C.3 RECOMENDAÇÕES NACIONAIS DE DIMENSIONAMENTO DA ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Na inexistência de um código nacional sobre o dimensionamento de alvenaria estrutural em situação de incêndio, o meio técnico, como referência, costuma ter por base algumas publicações já tradicionais no setor. Pode-se citar, por exemplo, o Manual Técnico de Alvenaria (ASSOCIAÇÃO..., 1990), onde são apresentados resultados de alguns ensaios realizados em paredes de alvenaria estrutural segundo a NBR 5628. A partir dos resultados obtidos, as paredes de alvenaria, executadas com diferentes blocos estruturais, foram categorizadas em *corta-fogo* (enquanto atenderem aos requisitos de resistência mecânica, estanqueidade e isolamento térmico), *para-chamas* (enquanto atenderem aos requisitos de resistência mecânica e estanqueidade) e *estável ao fogo* (enquanto atenderem apenas ao requisito de resistência mecânica).

A Tabela C.1 apresenta os valores divulgados na citada referência.

Durante muito tempo, a tabela anterior foi uma das únicas referências nacionais para a verificação da alvenaria estrutural em situação de incêndio.

Pode-se citar também o Manual de Desempenho para Alvenaria de Blocos de Concreto da Associação Brasileira de Cimento Portland e Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto (2014), onde são apresentados resultados de ensaios de pequenas paredes de alvenaria com e sem revestimento e concluiu-se que elas podem ser consideradas como *corta-fogo*, pois resistiram a uma temperatura de $900^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por um tempo superior a 240 min (4 horas). No entanto, essas paredes foram ensaiadas sem carga e suas dimensões não atenderam às mínimas previstas em norma nacional de parede quanto ao tamanho de corpo de prova.

Outra referência nacional importante na verificação da alvenaria estrutural em situação de incêndio é a Instrução Técnica 08/2011 (IT-08) – Resistência ao Fogo dos Elementos de Construção, do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo ((POLÍCIA..., 2011), que, em seu anexo B, mostra resultados de alguns ensaios realizados em paredes de alvenaria. A Tabela C.2 reproduz os resultados.

Quanto à falta de normatização nacional sobre o assunto, a IT-08 do Corpo de Bombeiros do Estado

de São Paulo (POLÍCIA..., 2011) explica ainda que, nesse caso, devem ser seguidas as recomendações do *Eurocode 6* (EUROPEAN..., 2005) ou de norma similar reconhecida internacionalmente. Entretanto, uma ressalva a essa recomendação deve ser feita. Deve ser questionada a aplicabilidade de normas internacionais à realidade nacional uma vez que a geometria de blocos pode variar de país para país, conforme o exemplo mostrado nas Figuras C.1 e C.2, e os materiais utilizados, tanto nos blocos quanto nos revestimentos, também apresentam divergências, de país para país, em relação às suas propriedades térmicas e mecânicas.

C.4 CÓDIGO AMERICANO:

ACI/TMS 216.1-14 (2014)

Este código normativo apresenta procedimentos de dimensionamento de estruturas de concreto e de alvenaria em situação de incêndio. As paredes de alvenaria estrutural são verificadas em função da

garantia de valores mínimos para a espessura efetiva das paredes. A espessura equivalente mínima é determinada em função do tipo de elemento de alvenaria (bloco) e do tempo requerido de resistência ao fogo. No cálculo da espessura efetiva são considerados parâmetros como o tipo de acabamento e a configuração de vazios do bloco.

C.4.1 Espessura equivalente mínimas das paredes

As espessuras equivalentes mínimas das paredes, pilares e vergas de alvenaria de blocos de concreto e para as paredes de blocos cerâmicos, necessárias para tempos de resistência ao fogo de 0,5 a 4 horas, são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas C.3, C.4, C.5 e C.6. A Figura C.3 mostra um esquema de pilar de alvenaria armada, para um melhor entendimento da Tabela C.4.

Tabela C.1 - Resistência ao fogo de blocos de concreto e cerâmico

Bloco	Espessura (cm)	Revestimento	Características		
			Corta-fogo	Para chamas	Estável ao fogo
Concreto vedação	19	Argamassa 2 cm na face exposta ao fogo	4 h	-	-
Concreto estrutural	14	-	1 h	4 h	4 h
Cerâmico vedação	9	1,5 em cada face	1,5 h	2 h	2 h
Cerâmico estrutural	14	Gesso 3 mm na face exposta ao fogo	2 h	4 h	4 h
Cerâmico estrutural	14	-	1,5 h	2 h	2 h
Cerâmico estrutural	14	1,5 cm em cada face	2 h	3 h	3 h

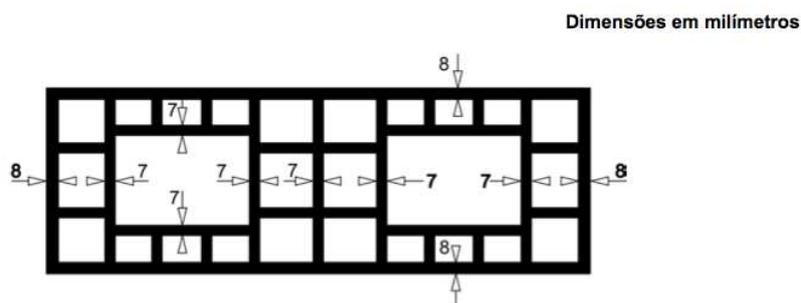
Fonte: adaptado de ABCI (ASSOCIAÇÃO..., 1990, p. 140).

Tabela C.2 - Resistência ao fogo para alvenarias

Paredes ensaiadas	Espessura do revestimento (cm)	Duração do ensaio (min)	Tempo de atendimento aos critérios de resistência ao fogo (horas)			
			Integridade	Estanqueidade	Isolamento térmico	
Tijolos de barro cozido	Meio tijolo sem rev.	-	120	≥2	≥2	1 1/2
	Um tijolo sem rev.	-	395	≥6	≥6	≥6
	Meio tijolo com rev.	2,5	300	≥4	≥4	4
	Um tijolo com rev.	2,5	300	≥6	≥6	≥5
Blocos vazados de concreto (2 furos)	14 cm sem rev.	-	100	≥1,5	≥1,5	1 1/2
	19 cm sem rev.	-	120	≥2	≥2	1 1/2
	14 cm com rev.	1,5	150	≥2	≥2	2
	19 cm com rev.	1,5	185	≥3	≥3	3
Tijolos cerâmicos de 8 furos	Meio tijolo com rev.	1	150	≥2	≥2	2
	Um tijolo com rev.	1	300	≥4	≥4	≥4

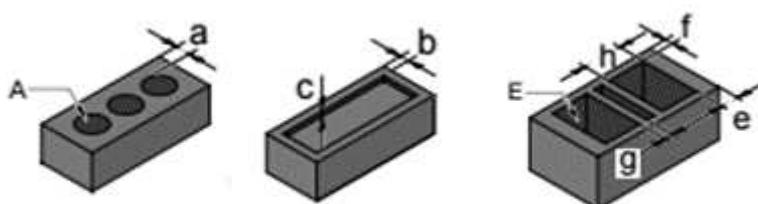
Fonte: adaptado de IT-08 (POLÍCIA..., 2011, p. 199).

Figura C.1 – Geometria da seção transversal do cerâmico estrutural brasileiro



Fonte: NBR 15270-2 (ABNT, 2005, p. 6).

Figura C.2 – Geometria da seção transversal de blocos cerâmicos estruturais americanos



Fonte: Brick Industry Association (2015).

Tabela C.3 – Paredes de alvenaria de blocos de concreto

Tipo de agregado empregado no Bloco	Mínima espessura equivalente T_{ea} , em função do tempo requerido de resistência ao fogo (cm) * **						
	½ hora	¾ hora	1 hora	1 ½ horas	2 horas	3 horas	4 horas
Cascalho de calcário ou silício	5,1	6,1	7,1	9,1	10,7	13,5	15,7
Pedra calcária, cinzas ou escória resfriada a ar	4,8	5,8	6,9	8,6	10,2	12,7	15,0
Argila expandida, xisto expandido ou ardósia expandida	4,6	5,6	6,6	8,4	9,1	11,2	13,0
Escória expandida ou pedrapomes	3,8	4,8	5,3	6,9	8,1	10,2	11,9

Nota: *resistências entre os períodos listados devem ser determinadas por meio de interpolação linear baseada na espessura equivalente da parede de alvenaria de concreto; e

** Espessuras mínimas equivalentes correspondentes à resistência ao fogo para blocos feitos com combinações de agregados devem ser determinadas por interpolação linear, baseada na porcentagem do volume de cada agregado utilizado em sua fabricação.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14 (AMERICAN..., 2014, p. 21) (convertida para cm).

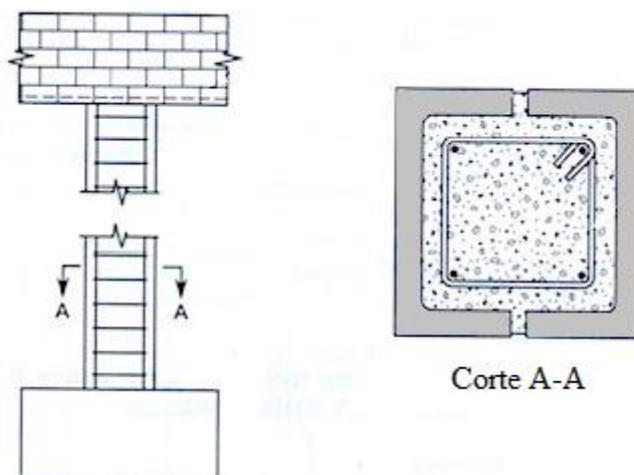
Tabela C.4 - Pilares de alvenaria armada

Resistência ao fogo, horas	1	2	3	4
Dimensões nominais mínimas do pilar (cm) *	20,3	25,4	30,5	35,6

Nota: *cobrimento da armadura: 5,1 cm.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14 (AMERICAN..., 2014, p. 21) (convertida para cm).

Figura C.3 – Esquema de pilar de alvenaria armada



Fonte: Charalambides (2015).

Tabela C.5 – Vergas de alvenaria armada

Espessura nominal das vergas (cm)	Espessura mínima necessária do cobrimento da armadura para resistir ao tempo especificado (cm)			
	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas
15,2	3,8	5,1	NP	NP
20,3	3,8	3,8	4,4	7,6
25,4 ou mais	3,8	3,8	3,8	4,4

Nota: NP = Não permitido sem uma análise mais detalhada.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14 (ASSOCIATION..., 2014, p. 21) (convertida para cm).

Tabela C.6 – Paredes de alvenaria de blocos cerâmicos

Tipo de material	Mínima espessura equivalente T_{ea} , em função do tempo requerido de resistência ao fogo (cm) *			
	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas
Tijolo maciço de barro ou xisto	6,9	9,7	12,4	15,2
Bloco vazado ou telha de barro ou xisto, sem preenchimento	5,8	8,6	10,9	12,7
Bloco vazado ou telha de barro ou xisto, grauteada ou preenchido com materiais específicos	7,6	11,2	14,0	16,8

Nota: *cálculos entre as horas tabeladas devem ser determinados por interpolação linear.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14 (ASSOCIATION..., 2014, p. 27) (convertida em cm).

C.4.2 Espessura equivalente das paredes de alvenaria (T_{ea})

A espessura equivalente de uma parede de alvenaria, T_{ea} , é a soma entre a espessura equivalente do bloco, T_e , e a espessura equivalente de seu acabamento, T_{ef} . Ou seja (Eq. C.1):

$$T_{ea} = T_e + T_{ef} \quad \text{Eq. C.1}$$

Onde:

T_{ea} = espessura equivalente de uma parede de alvenaria;

T_e = espessura equivalente do bloco; e

T_{ef} = espessura equivalente do acabamento.

C.4.2.1 Determinação da espessura equivalente do bloco (T_e)

A espessura equivalente do bloco é tomada como (Eq. C.2):

$$T_e = \frac{V_n}{LH} \quad \text{Eq. C.2}$$

Onde:

V_n = volume líquido do bloco;

L = comprimento do bloco; e

H = altura do bloco.

Paredes não grauteadas ou parcialmente grauteadas: a espessura equivalente, T_e , deverá ser determinada pela Equação C.2, em função do volume líquido do bloco.

Construções totalmente grauteadas: a espessura equivalente, T_e , deverá ser a própria espessura do bloco.

Blocos vazados preenchidos com material solto: a espessura equivalente, T_e , deverá ser a própria espessura do bloco quando o material de preenchimento for areia, cascalho, brita, escória, pedra-pomes, xisto expandido, argila expandida, ardósia expandida, cinzas volantes expandidas, cinzas, perlita ou vermiculita.

C.4.2.2 Determinação da espessura equivalente do acabamento das paredes (T_{ef})

O tipo de material e espessura empregados no acabamento das paredes de alvenaria contribuem para aumentar a resistência ao fogo desses elementos.

No caso de acabamento aplicado na face não exposta ao fogo da parede, sua espessura deve ser ajustada por um fator (Tabela C.7), que leva em conta tanto os materiais empregados na fabricação do bloco (parede), quanto o material do próprio acabamento. Essa espessura ajustada para o acabamento (T_{ef}) deve ser somada a espessura equivalente do bloco de concreto (T_e) para a obtenção da espessura equivalente da parede (T_{ca}), que será empregada para a obtenção da resistência ao fogo, de acordo com a Tabela C.3, para paredes de alvenaria de blocos de concreto, ou de acordo com a Tabela C.6, para paredes de alvenaria de blocos cerâmicos.

Paredes de alvenaria de concreto ou cerâmica, com acabamentos aplicados na face exposta ao fogo, terão seu tempo de resistência ao fogo incrementado pelo tempo, calculado isoladamente, de resistência ao fogo atribuído ao acabamento (Tabela C.8).

Paredes com acabamentos diferentes em suas faces de provável exposição ao fogo devem ser duplamente verificadas, com cada uma de suas faces adotada como sendo a face de exposição ao fogo. A resistência ao fogo dessa parede deve ser tomada como o menor dos tempos obtidos nos cálculos isolados.

Quando os acabamentos (no caso de aplicação em ambas as faces) contribuem para a resistência ao fogo do conjunto, deve-se limitar essa contribuição total (ambos os acabamentos) à metade da contribuição atribuída à parede sem acabamento.

Tabela C.7 - Fator multiplicador da espessura de acabamentos aplicados no lado não exposto ao fogo

Tipo de material usado na laje ou parede	Tipo de acabamento aplicado à laje ou parede			
	Reboco de cimento Portland e areia* ou ladrilho hidráulico	Reboco de gesso e areia	Reboco de gesso com vermiculita ou perlita	Drywall (Gesso acartonado)
Parede de alvenaria de concreto				
Alvenaria de concreto - Silicioso, calcário, cal, cinzas, escória de alto forno resfriada a ar	1,00	1,25	1,75	3,00
Alvenaria de concreto - feito com 80% ou mais de xisto expandido, ardósia expandida, argila expandida, escória expandida ou pedra-pomes.	0,75	1,00	1,25	2,25
Parede de alvenaria cerâmica				
Alvenaria de barro - tijolo maciço de argila ou xisto	1,00	1,25	1,75	3,00
Alvenaria de barro - bloco vazado ou telha de argila ou xisto	0,75	1,00	1,50	2,25

Nota: *para argamassa de cimento Portland e areia com espessura de 1,6cm ou inferior, aplicada diretamente na parede, em seu lado não exposto ao fogo, o fator multiplicador deverá ser 1.0.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14 (ASSOCIATION..., 2014, p. 27).

Tabela C.8 - Tempo atribuído aos materiais de acabamento na face exposta ao fogo de paredes de blocos de concreto ou cerâmica

Acabamento	Tempo (min)
Drywall (gesso acartonado)	
3/8 pol. (9,5 mm)	10
1/2 pol. (12,7 mm)	15
5/8 pol. (15,9 mm)	20
Duas camadas de 3/8 pol. (Duas camadas de 9,5 mm)	25
Uma camada de 3/8 pol. (9,5 mm) e uma camada de 1/2 pol. (12,7 mm)	35
Duas camadas de 1/2 pol. (Duas camadas de 12,7 mm)	40
Drywall tipo "X" (resistente ao fogo)	
1/2 pol. (12,7 mm)	25
5/8 pol. (15,9 mm)	40
Argamassa de cimento Portland e areia aplicada diretamente sobre o concreto ou alvenaria*	
Argamassa de cimento Portland e areia sobre tela de metal	
3/4 pol. (19 mm)	20
7/8 pol. (22,2 mm)	25
1 pol. (25,4 mm)	30
Argamassa de gesso e areia sobre ripas de gesso de 3/8 pol.	
1/2 pol. (12,7 mm)	35
5/8 pol. (15,9 mm)	40
3/4 pol. (19 mm)	50
Argamassa de gesso e areia sobre tela de metal	
3/4 pol. (19 mm)	50
7/8 pol. (22,2 mm)	60
1 pol. (25,4 mm)	80

Nota: *para fins de determinação da contribuição da argamassa de cimento Portland e areia para a espessura equivalente do concreto ou alvenaria para usos nas tabelas 3 e 4 (3.1 e 4.1 do código), será permitido o uso da espessura real da argamassa ou 5/8 pol., o menor entre os dois.

Fonte: ACI/TMS 216.1-14 (ASSOCIATION..., 2014, p. 28, *tradução nossa*) (valores em mm acrescentados).

C.4.3 Paredes múltiplas de alvenaria de blocos de concreto e/ou cerâmica

A resistência ao fogo de uma única parede de alvenaria deve ser determinada de acordo com a Tabela 3, para o caso de paredes de blocos de concreto, e de acordo com a Tabela C.6, para o caso de paredes de blocos cerâmicos. No caso de paredes múltiplas (Figura C.4), a resistência ao fogo deve ser calculada considerando-se a resistência ao fogo de cada parede do conjunto e também a influência de eventual espaço entre elas, de acordo com a Equação 3, válida para combinações de paredes de alvenaria de concreto, alvenaria cerâmica, ou uma combinação desses dois materiais.

$$R = (R_1^{0,59} + R_2^{0,59} + \dots + R_n^{0,59} + A_1 + A_2 + \dots + A_n)^{1,7} \quad \text{Eq. C.3}$$

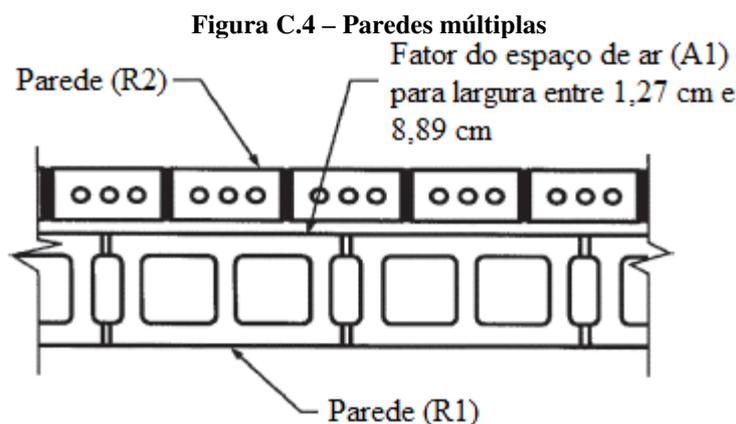
Onde:

R_1, R_2, \dots, R_n representam a resistência ao fogo das camadas 1, 2, ..., n, respectivamente, em horas; e

$A_1 = A_2 = A_n = 0,30$, um fator que leva em consideração o espaço entre as paredes (preenchido com ar), com valores entre 1,27cm e 8,89cm.

Para os valores de R_1, R_2, \dots, R_n , usar a Tabela C.6 para alvenaria cerâmica, ou a Tabela C.3 para alvenaria de concreto.

É importante ressaltar que, caso o espaço entre as paredes seja maior que 8,89cm, nem o espaço de ar, nem a parede que se encontra mais externamente a ele (em relação ao incêndio), e nem as paredes na sequência poderão ser consideradas como elementos resistentes ao incêndio. Caso o espaço seja menor que 1,27cm, as duas (ou mais) paredes deverão ser consideradas como uma só, sem considerar o ar entre elas como um elemento resistente.



R1 = tempo de resistência ao fogo da parede 1

R2 = tempo de resistência ao fogo da parede 2

A1 = fator do espaço de ar = 0.3

Fonte: ACI/TMS216.1-14 (ASSOCIATION..., 2014, p. 22, tradução nossa).

C.5 CÓDIGO EUROPEU:

EUROCODE 6 – EN 1996-1.2

(EUROPEAN..., 2005)

O código europeu especifica as exigências necessárias a serem cumpridas no dimensionamento de estruturas em alvenaria em situação de incêndio.

Para determinação do tempo de resistência ao fogo deve-se conhecer o tipo de bloco empregado, os materiais componentes dos blocos e o tipo de revestimento a ser aplicado.

Assim como em outras normas descritas, para a exposição ao fogo as estruturas devem cumprir os critérios de resistência mecânica (R), de estanqueidade (E) e de isolamento térmico (I). Observa-se a adição de um novo critério, o impacto mecânico (M). Tais critérios, com base nas funções previstas para a parede de alvenaria na edificação, podem ser agrupados na classificação a seguir:

paredes com função resistente unicamente: critério R;

paredes com função de isolamento térmico e estanqueidade: critérios EI;

paredes com função resistente, de isolamento térmico e de estanqueidade: critério REI;

paredes com função resistente, de isolamento térmico, de estanqueidade e de resistência a impactos mecânicos: critérios REI-M; e

paredes com função de isolamento térmico, de estanqueidade e de resistência a impactos mecânicos: critérios EI-M.

A avaliação das paredes de alvenaria estrutural em situação de incêndio pode ser feita através de ensaios em laboratório, por métodos de dimensionamento analíticos simplificados, por tabelas ou por modelos numéricos feitos em softwares como *Abaqus*, *Ansys*, etc.

C.5.1 Avaliação por método tabular

As tabelas estão contidas no Anexo B do código e fornecem a espessura mínima necessária da parede de alvenaria para o tempo de resistência ao fogo requerido.

As tabelas são divididas, inicialmente, pela função da parede na edificação (critérios de resistência ao fogo) e pelo tipo de material do bloco da parede (cerâmica, concreto com agregado leve ou agregado denso, concreto celular, etc.). A seguir, cada tabela é dividida em função da resistência à compressão dos blocos (f_b), em função da densidade dos blocos (ρ) e, por fim, em função da relação entre as solicitações de cálculo da parede em situação de incêndio e as solicitações de cálculo em situação normal (α).

Para ilustrar, abaixo estão algumas tabelas do código europeu, representadas pelas Tabelas C.9 e C.10.

As espessuras mínimas são indicadas nessas tabelas em valores únicos ou em intervalos recomendados. O intervalo recomendado é expresso por espessuras separadas por uma barra. Como exemplo, a indicação “90/100”, na tabela, representa a recomendação de que a espessura mínima a se adotar para a parede deve estar entre 90 mm e 100 mm.

Tabela C.9 - Espessura mínima de paredes carregadas (critério REI) para concreto denso e leve

Nº da linha	Propriedades dos materiais Resistência à compressão (f_b) [N/mm ²] Densidade (ρ) [kg/m ³]	Mínima espessura (mm) t_r para o tempo (minutos) de resistência ao fogo para a classificação REI						
		30	45	60	90	120	180	240
1	Blocos do Grupo 1 Argamassa: uso geral, camada fina, leve							
1.1	Agregado leve $2 \leq f_b \leq 15$ $400 \leq \rho \leq 1600$							
1.1.1	$\alpha \leq 1,0$	90/170	90/170	90/170	100/170	100/190	140/240	150/300
1.1.2		(90/140)	(90/140)	(90/140)	(90/140)	(90/170)	(100/190)	(100/240)
1.1.3	$\alpha \leq 0,6$	70/140	70/140	70/140	90/170	90/170	100/190	100/240
1.1.4		(60/100)	(60/100)	(60/100)	(70/100)	(70/140)	(90/170)	(90/190)
1.2	Agregado denso $6 \leq f_b \leq 35$ $1200 \leq \rho \leq 2400$							
1.2.1	$\alpha \leq 1,0$	90/170	90/170	90/170	90/170	100/190	140/240	150/300
1.2.2		(90/140)	(100/140)	(90/140)	(90/140)	(90/170)	(100/190)	(100/240)
1.2.3	$\alpha \leq 0,6$	70/140	90/140	70/140	90/170	90/170	100/190	140/240
1.2.4		(60/100)	(70/100)	(70/100)	(70/100)	(70/140)	(90/170)	(100/190)

Fonte: EN 1996 1-2, (p. 50, tradução nossa).

Tabela C.10 - Espessura mínima de paredes carregadas (critério REI) para alvenaria cerâmica

Nº da linha	Propriedades dos materiais Resistência à compressão (f_b) [N/mm ²] Densidade (ρ) [kg/m ³]	Mínima espessura (mm) t_r para o tempo (minutos) de resistência ao fogo para a classificação REI						
		30	45	60	90	120	180	240
1S	Blocos do Grupo 1S							
1S.1	$5 \leq f_b \leq 75$ argamassa de uso geral $5 \leq f_b \leq 50$ camada fina de argamassa $1000 \leq \rho \leq 14400$							
1S.1.1	$\alpha \leq 1,0$	90	90	90	100	100/140	170/190	170/190
1S.1.2		(70/90)	(70/90)	(70/90)	(70/90)	(90/140)	(110/140)	(170/190)
1S.1.3	$\alpha \leq 0,6$	90	90	90	100	100/140	170	170
1S.1.4		(70/90)	(70/90)	(70/90)	(70/90)	(100/140)	(110/140)	(140/170)
1	Blocos do Grupo 1 Argamassa: uso geral, camada fina, leve							
1.2	$5 \leq f_b \leq 75$ $800 \leq \rho \leq 2400$							
1.2.1	$\alpha \leq 1,0$	90/100	90/100	90/100	100/170	140/170	170/190	190/210
1.2.2		(70/90)	(70/90)	(70/90)	(70/90)	(100/140)	(110/170)	(170/190)
1.2.3	$\alpha \leq 0,6$	90/100	90/100	90/100	100/140	140/170	140/170	190/200
1.2.4		(70/90)	(70/90)	(70/90)	(70/90)	(100/140)	(110/170)	(170/190)

Fonte: EN 1996 1-2, (p. 32, tradução nossa).

Da mesma forma, as espessuras mínimas (ou intervalos) são expressas, na tabela, com a opção de se empregar, ou não, acabamentos adequados às exigências do código. Valores entre parênteses representam as espessuras mínimas (ou intervalos de espessuras) recomendadas para paredes com acabamentos adequados às exigências do código

(acabamentos com espessura mínima de 10 mm nas duas faces de uma parede simples, ou na face exposta ao fogo em uma parede dupla).

C.5.2 Avaliação por métodos de dimensionamento analíticos simplificados

O código em questão restringe o dimensionamento de paredes de alvenaria estrutural em situação de incêndio pelo método simplificado às paredes executadas com blocos e argamassas específicos (Tabela C.11).

O método simplificado, basicamente, consiste na determinação de duas isotermas da seção, uma para temperatura θ_1 (temperatura até a qual se pode considerar resistência à compressão residual da alvenaria) e outra para temperatura θ_2 (temperatura acima da qual se pode considerar como nula a resistência à compressão da alvenaria). A partir do traçado dessas isotermas na seção transversal, a parede é avaliada, em situação de incêndio, com a seção reduzida (toda a área da seção com temperatura acima de θ_2 descartada) e com parte da seção já reduzida com resistência à compressão menor do que aquela obtida em situação ambiente (região da seção transversal com temperaturas entre θ_1 e θ_2). A Figura 5 exemplifica esse procedimento para o caso de um pilar em alvenaria estrutural.

A verificação da seção é feita no Estado Limite Último e as ações são combinadas de acordo com as recomendações usuais do código (similar ao que ocorre com procedimentos já consagrados para o concreto ou para o aço).

No Estado Limite Último, para a situação de incêndio, o valor da força vertical solicitante de

cálculo em uma parede ou pilar deve ser menor ou igual ao valor da força vertical resistente de cálculo da parede ou pilar (Eq. C.4).

$$N_{Sd} \leq N_{Rd,fi\theta_2} \quad \text{Eq. C.4}$$

O valor da força vertical resistente de cálculo de uma parede ou pilar é dada por (Eq. C.5):

$$N_{Rd,fi\theta_2} = \Phi (f_{d\theta_1} A_{\theta_1} + f_{d\theta_2} A_{\theta_2}) \quad \text{Eq. C.5}$$

Onde:

A = área total de alvenaria

A_{θ_1} = área de alvenaria até θ_1

A_{θ_2} = área de alvenaria entre θ_1 e θ_2

θ_1 = temperatura até a qual pode-se utilizar a capacidade resistente da alvenaria

θ_2 = temperatura acima da qual o material é desprezado

N_{Sd} = valor da força vertical solicitante de cálculo

$N_{Rd,fi\theta_2}$ = valor da força vertical resistente de cálculo, em situação de incêndio

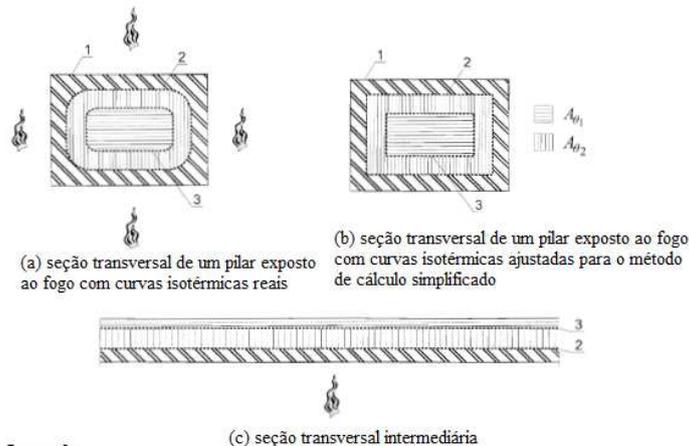
$f_{d\theta_1}$ = resistência à compressão, de cálculo, da alvenaria até θ_1

$f_{d\theta_2}$ = resistência à compressão, de cálculo, da alvenaria entre θ_1 e θ_2

$e_{\Delta\theta}$ = excentricidade devido à variação de temperatura na alvenaria

Φ = fator de minoração da capacidade portante da parede que leva em consideração eventual excentricidade adicional $e_{\Delta\theta}$

Figura C.5 – Ilustração de áreas da alvenaria a temperaturas até θ_1 , entre θ_1 e θ_2 e áreas estruturalmente ineficientes (acima de θ_2)



Legenda

- 1 limite da seção transversal original
- 2 curva isotérmica para $\theta = \theta_2$
- 3 curva isotérmica para $\theta = \theta_1$

Fonte: EN 1996 1-2, (p. 66, tradução nossa).

Tabela C.11 - Valores das temperaturas θ_1 e θ_2 em função dos materiais de execução da parede de alvenaria

Blocos de alvenaria e argamassa (superfície desprotegida)	Temperatura (°C)	
	θ_2	θ_1
Blocos cerâmicos com argamassa comum	600	100
Blocos de silicato de cálcio com uma fina camada de argamassa	500	100
Bloco de agregado leve (pedra-pomes) com argamassa comum	400	100
Bloco de agregado denso com argamassa comum	500	100
Bloco celular auto clavado com uma fina camada de argamassa	700	200

Fonte: BS EN 1996 1-2 (2005, p. 67, tradução nossa).

A excentricidade, $e_{\Delta\theta}$, devido a variação de temperatura na parede ou pilar de alvenaria, para uso no método simplificado de cálculo pode ser obtida a partir da Equação C.6:

$$e_{\Delta\theta} = \frac{1}{8} h_{ef}^2 \frac{\alpha_t(\theta_2 - 20)}{t_{Fr}} \leq h_{ef}/20 \quad \text{Eq. C.6}$$

Onde:

$e_{\Delta\theta} = 0$, quando se considera todas as faces do elemento sob ação do fogo;

θ_2 = temperatura acima da qual despreza-se a resistência à compressão do material, em °C;

h_{ef} = altura efetiva da parede;

α_t = coeficiente de expansão térmica; e

t_{Fr} = espessura da seção transversal cuja temperatura não exceda θ_2 .

Por fim, observa-se que a distribuição de temperaturas (isotermas) na seção transversal da parede ou pilar de alvenaria, ao longo do tempo de exposição ao fogo do elemento, deve ser obtida através de ensaio do elemento em laboratório ou a partir de uma base de dados (tabelas de isotermas) confiável.

C.6 CÓDIGO AUSTRALIANO: AS 3700 (AUSTRALIAN..., 2011)

O código australiano é o único código, dentre os abordados, que leva em conta, explicitamente, todos os três critérios para o dimensionamento de estruturas de alvenaria em situação de incêndio (resistência mecânica, isolamento térmico e estanqueidade).

São especificados níveis de resistência ao fogo (*Fire Resistance Levels* – FRLs) para as paredes, em função de critérios ligados à adequabilidade estrutural (estabilidade contra o colapso), integridade/estanqueidade (capacidade resistente à fissuração excessiva e passagem de gases e chamas)

e isolamento térmico (capacidade resistente à passagem de calor).

Os fatores que afetam a integridade/estanqueidade da parede incluem a espessura dos blocos de alvenaria e os materiais utilizados em sua fabricação.

O isolamento térmico da parede é afetado pela densidade e composição dos blocos, pela espessura dos blocos, por quaisquer acabamentos ou revestimentos aplicados sobre a parede e pela existência, ou não, de grauteamento.

A adequabilidade estrutural de uma parede é afetada pela expansão térmica do material utilizado na fabricação dos blocos de alvenaria, das vinculações das paredes em suas extremidades e de sua esbeltez (verificada de acordo com seu índice, S_{rf} – *slenderness ratio on fire resistance*), que, por sua vez, depende da espessura da parede e do distanciamento entre seus apoios verticais e horizontais.

A norma australiana dá duas opções ao projetista de paredes de alvenaria sujeitas a incêndios: projetar a estrutura para os critérios de adequabilidade estrutural, integridade e isolamento térmico, respeitando os limites tabelados de espessura e esbeltez da parede e cobrimento de armadura; ou projetar a estrutura com base em resultados de ensaio em laboratório, com ábacos de dimensionamento fornecidos pelos fabricantes de blocos daquele país.

C.6.1 Dimensionamento de acordo com o método tabelado

Esta especificação foi feita pela norma australiana, AS 3700 (AUSTRALIAN..., 2011) e, segundo o Manual M55 (CONCRETE..., 2012), é bastante conservadora. Os limites das tabelas são representativos para qualquer tipo de alvenaria fabricada na Austrália, incluindo as que apresentam

má adequabilidade estrutural e baixo isolamento térmico.

Para se dimensionar uma parede de acordo com o critério (FRL) de adequabilidade estrutural, utilizando os valores tabelados, seu índice de esbeltez não deverá exceder o valor de referência da Tabela C.12. Se a esbeltez da parede é maior que a máxima permitida, a parede deverá ser recalculada com uma espessura maior. Pode-se também modificar o arranjo estrutural de forma a aumentar a rigidez do elemento, introduzindo novas restrições (travamentos) na parede.

O índice de esbeltez é definido pelas Equações de C.7 a C.9, função do tipo de vinculação da parede.

Paredes que não possuem apoio nas laterais têm o índice de esbeltez definido pela Equação C.7.

$$S_{rf} = \frac{a_{vf} \cdot H}{t} \quad \text{Eq. C.7}$$

Paredes que possuem apoios em apenas uma ou nas duas laterais têm seu índice de esbeltez calculado pelo menor valor dado nas Equações C.7 a C.9.

$$S_{rf} = \frac{0,7}{t} \sqrt{a_{vf} \cdot H \cdot a_k \cdot L} \quad \text{Eq. C.8}$$

$$S_{rf} = a_k \frac{L}{t} \quad \text{Eq. C.9}$$

Onde:

S_{rf} = índice de esbeltez da parede em situação de incêndio;

a_{vf} = igual a 0,75 se o elemento possui apoios em toda sua extensão lateral. Caso não existia tal restrição, o valor a ser adotado é 2,0;

H = altura do membro entre os travamentos verticais da parede;

t = espessura total da parede. Para paredes duplas ou com cavidades, a espessura da parede deverá atender ao disposto em C.6.1.1;

a_k = no caso de a parede possuir apoios superior e inferior, o coeficiente vale 1,0. No caso de a parede possuir somente apoio inferior, o coeficiente vale 2,5; e

L = comprimento da parede entre as faces laterais restringidas ou o comprimento de uma parede com travamento lateral em apenas uma de suas extremidades. No caso de juntas prumo ou no caso de paredes com aberturas, o comprimento é medido até a junta ou abertura.

Existem também valores tabelados para a verificação do isolamento térmico, de acordo com o exposto na Tabela C.13.

Tabela C.12 – Índice de esbeltez máximo para adequabilidade estrutural

Tipo de bloco	Tempo de resistência ao fogo (min)					
	30	60	90	120	180	240
1 Alvenaria não armada						
(vii) Blocos de argila	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
(viii) Blocos de silicato de cálcio com agregado basáltico						
(E) menos de 45% de todos os agregados	20,5	19,0	18,0	17,5	16,5	15,5
(F) pelo menos 45% de todos os agregados	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
(ix) Blocos de concreto com agregados basálticos						
(E) menos de 45% de todos os agregados	19,5	18,0	17,0	16,0	15,5	15,0
(F) pelo menos 45% de todos os agregados	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
2 Alvenaria armada						
	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0

Fonte: AS 3700 (AUSTRALIAN..., 2011, p. 57, tradução nossa).

Tabela C.13 – Espessura mínima de paredes considerando o isolamento térmico

Tipo de bloco	Tempo de resistência ao fogo (min)					
	30	60	90	120	180	240
Argila	60	90	110	130	160	180
Silicato de cálcio	50	70	90	110	135	160
Concreto com densidade:						
(c) superior a 1800 kg/m ³	55	80	100	120	150	180
(d) igual ou inferior a 1800 kg/m ³	55	75	90	110	135	160

Fonte: AS 3700 (AUSTRALIAN..., 2011, p. 61, tradução nossa).

C.6.1.1 Paredes Duplas ou com Cavidades

(a) quando as duas paredes possuem carregamento axial, com valores que não diferem 10% um do outro, incluindo o caso de ambas as paredes não possuírem carregamento algum, o índice de esbeltez deve ser baseado em dois terços da soma das espessuras das duas paredes e das condições de apoio da parede não exposta ao fogo. (Figura C.6a); e

para os demais casos, o índice de esbeltez deve ser baseado na espessura e condições de apoio da parede mais carregada (Figura C.6b).

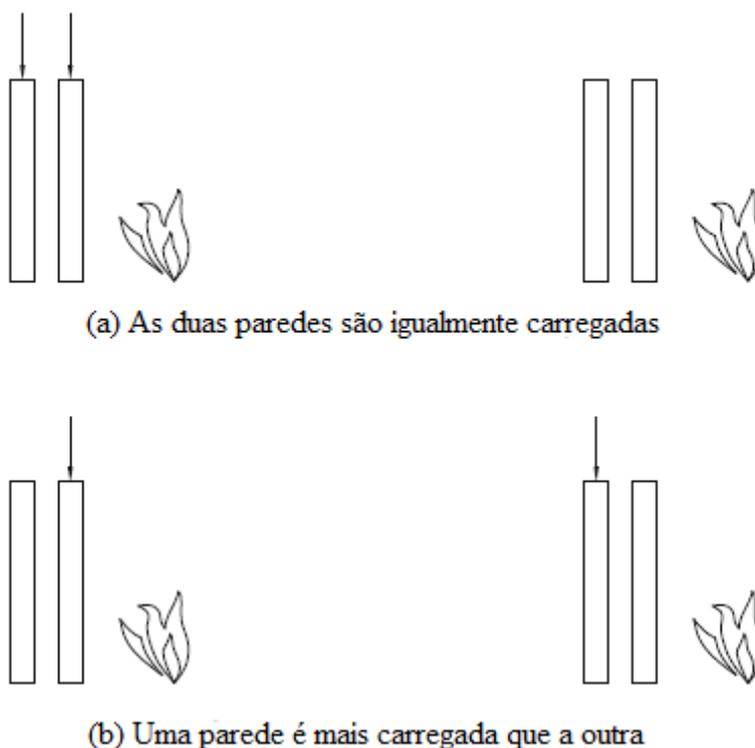
Se as duas paredes forem constituídas por blocos de diferentes tipos e seu índice de esbeltez for determinado pelo item (a), o cálculo para adequabilidade estrutural deverá ser baseado no material menos resistente.

C.6.1.2 Dimensionamento de acordo com dados experimentais

Uma opção ao dimensionamento anterior é o dimensionamento através de ábacos fornecidos, geralmente, pelos fabricantes de blocos australianos. Os fabricantes de blocos fornecem grupos de ábacos que oferecem a possibilidade de verificação rápida do critério de adequabilidade estrutural. Nesses ábacos, os demais critérios (estanqueidade e isolamento térmico) já estão considerados. Basta, então, ajustar a espessura da parede para que o critério adequabilidade estrutural também seja satisfeito. Tal procedimento é ilustrado pelas Figuras C.7 e C.8. A Figura C.7 é para alvenaria de blocos de concreto e a C.8, para alvenaria de blocos cerâmicos.

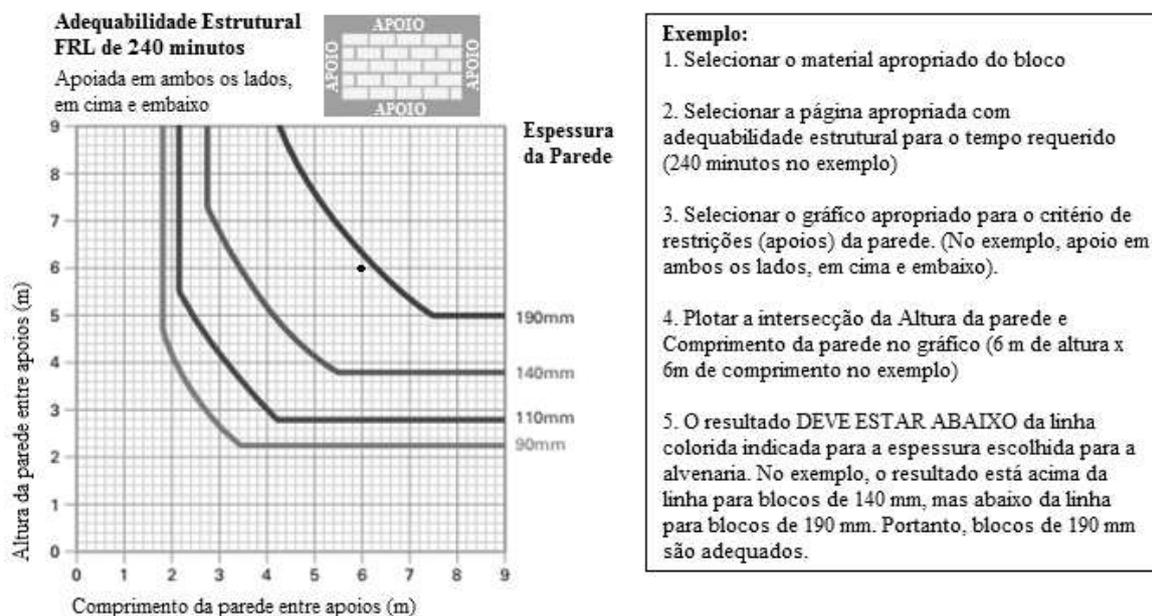
Pela Figura C.8, pode-se perceber que, uma parede de alvenaria cerâmica, apoiada em todas as extremidades, com seis metros de comprimento e quatro de altura, resiste a um incêndio durante sessenta minutos, quando se considera o critério de adequabilidade estrutural.

Figura C.6 – Paredes duplas expostas ao fogo



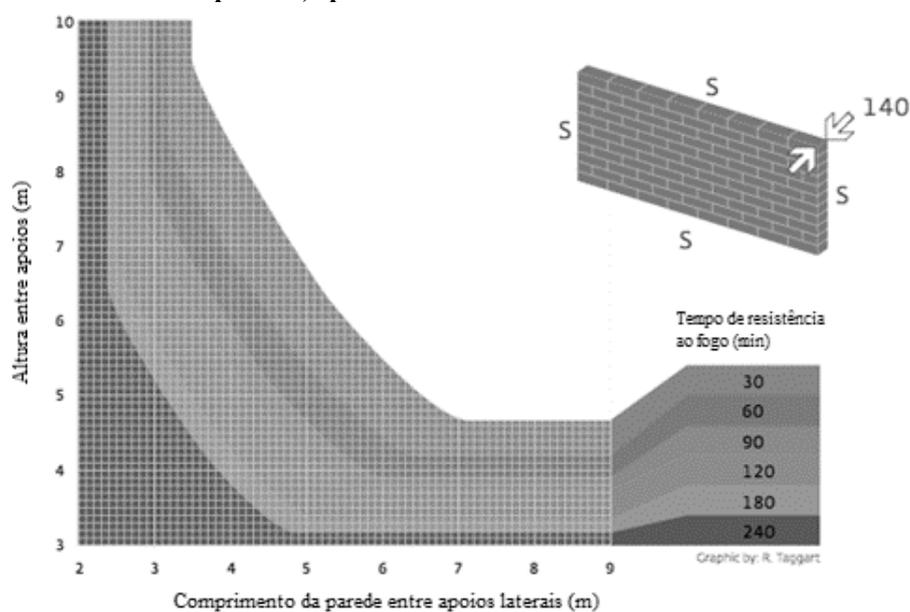
Fonte: AS 3700 (AUSTRALIAN..., 2011, p. 56, tradução nossa).

Figura C.7 - Adequabilidade estrutural de uma parede de blocos de concreto
Blocos de Escória



Fonte: adaptado de Boral Masonry ano (2009, p. C11).

Figura C.8 - Adequabilidade estrutural para uma parede de blocos cerâmicos de 140 mm de espessura, apoiada em todas as extremidades



Fonte: Torres (2012, p. 47, tradução nossa).

C.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Incêndios muitas vezes são inevitáveis na construção civil, e as estruturas não devem entrar em colapso antes que ocorra sua total evacuação, pois a prioridade maior é poupar vidas. Em segundo plano, deve-se minimizar o dano estrutural. Para isso, existe a normatização de segurança das estruturas em situação de incêndio. No entanto, não há, no país, normatização para alvenaria estrutural nessa situação, e, portanto, a consulta a normas internacionalmente respeitadas sobre o assunto continua sendo necessária.

Neste trabalho, com intuito de subsidiar futura normatização nacional, foram apresentados os procedimentos de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio de acordo com a norma americana, a europeia e a australiana.

A norma americana fornece tabelas de espessuras mínimas para que paredes de alvenaria resistam a um incêndio durante um determinado tempo. Tais tabelas estão divididas pelo tipo de agregado utilizado nos blocos. Ela também leva em conta o efeito de diferentes tipos de acabamentos nas paredes, se ele está no lado exposto ao fogo ou no outro lado. É bem completa quando se considera critérios de isolamento térmico ou de estanqueidade, deixando a desejar no quesito resistência mecânica. Não apresenta procedimentos analíticos de dimensionamento, simplificados ou não, de forma a considerar o critério de resistência mecânica no dimensionamento de paredes em alvenaria estrutural.

A norma europeia, das três avaliadas, é a mais completa. Apresenta procedimento tabular que leva em conta os três critérios de resistência ao fogo das paredes e mais um, o impacto mecânico nas paredes. Entretanto, possui algumas limitações quanto aos materiais de acabamento e nesse quesito não é tão completa quanto a norma americana. Apresenta também uma proposta de dimensionamento segundo método analítico que é bastante coerente, similar ao que já é feito para o concreto armado. O método em si não é complexo, porém, para utilizá-lo, são necessários resultados de ensaios em laboratório para determinar a distribuição de temperatura em um bloco em função do tempo de exposição ao fogo do mesmo. Existe a possibilidade, também, de determinação dessas isotermas do bloco por modelos numéricos feitos em softwares como *Abaqus*, *Ansys*, etc.

O código australiano leva em conta o índice de esbeltez da parede na verificação de sua resistência ao fogo, ou seja, é o único código, dentre os citados, que considera verdadeiramente tal aspecto. Entretanto, mais do que a

constatação, o que se julgou deveras interessante foi o fato de que o uso dos ábacos fornecidos por fabricantes de blocos, baseados em resultados de ensaio das paredes em laboratório, tornou-se rapidamente intuitivo.

Sobre a aplicabilidade das normas internacionais à realidade brasileira, sabe-se que cada país possui especificações de geometria, capacidade resistente e espessura a serem respeitadas pela indústria de blocos estruturais. Além disso, existem variações, de país para país, das composições mineralógicas das rochas utilizadas como agregado e também dos revestimentos usuais. O que se sugere, portanto, é a elaboração de uma norma brasileira sobre o assunto que possa mesclar o que existe de mais interessante nas outras normas aqui apresentadas.

Inicialmente, por conta ainda do insipiente parque de equipamentos em laboratórios nacionais aptos à avaliação de paredes carregadas, ensaios de blocos isolados e com diferentes tipos de acabamentos podem ser realizados, para que tabelas semelhantes às americanas sejam elaboradas, de forma que se possam calcular estruturas de alvenaria em situação de incêndio considerando pelo menos o critério de isolamento térmico (I). Para conseguir isso, a melhor alternativa seria a união dos poucos laboratórios nacionais equipados para avaliar, em conjunto, todos os blocos usuais de nosso país.

Em seguida, o próximo passo seria o mapeamento das isotermas de todos os blocos usuais de nosso país. A simulação numérica é o caminho mais rápido e adequado para esse fim. Ressalta-se que, para o mapeamento de isotermas, é necessário a obtenção de inúmeras propriedades térmicas para os blocos usuais de nosso país, as quais seriam obtidas, também, no citado esforço conjunto entre os poucos laboratórios nacionais equipados para tal caracterização. Com isso, um método de cálculo simplificado semelhante ao do *Eurocode 6* (EUROPEAN..., 2005), apresentado neste trabalho, poderia ser empregado para avaliação da resistência mecânica da parede (R) em situação de incêndio.

Finalmente, ensaios de paredes de alvenaria, carregadas, em situação de incêndio deverão ser feitos, uma vez que, no país, é recente a instalação de um primeiro forno apto para tais ensaios (na UNISINOS, no Rio Grande do Sul), para que ábacos semelhantes aos australianos possam ser montados e assim, finalmente, serão reunidas informações suficientes para balizar uma primeira normatização nacional sobre o tema.

C.8 REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI/TMS 216.1**: code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies. Michigan, 2014.
- ANDREINI, M.; SASSU, M. Mechanical Behaviour of Full Unit Masonry Panels Under Fire Action. **Fire Safety Journal**, v. 46, n. 7, p. 440–450, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE BLOCOS DE CONCRETO. **Alvenaria de Blocos de Concreto**: guia para atendimento à Norma ABNT 15575. São Paulo, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA. **Manual Técnico de Alvenaria**. São Paulo: A Associação, Projeto Editores Associados, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações: procedimento. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2**: componentes cerâmicos: blocos cerâmicos para alvenaria estrutural: terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3700-2011**: Masonry Structures. Sydney, 2011.
- BAILEY, C. Structural Fire Design: core or specialist subject? **The Structural Engineer**, v. 82, n. 9, p. 32–38, 2004.
- CONCRETE MASONRY ASSOCIATION OF AUSTRALIA. Part B, Chapter 4, Fire. In: CONCRETE MASONRY ASSOCIATION OF AUSTRALIA. **Manual M55**: design and construction of concrete masonry buildings. Australia, 2012.
- BORAL MASONRY. Structural, Fire and Acoustics. In: BORAL MASONRY. **Masonry Design Guide**. Victoria, 2009. Book 1.
- BRICK INDUSTRY ASSOCIATION. **Specifications for and Classification of Brick**. Disponível em: <<http://www.gobrick.com/portals/25/docs/technical%20notes/tn9a.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2015.
- CHARALAMBIDES, J. E. **Design of Masonry Columns**. Disponível em: <<http://www.avant-garde-engineering.com/mc19.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2015.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6: EN 2005-1.2**: design of masonry structures: part 1-2: general rules: structural fire design. Brussels, 2005.
- INGHAM, J. Forensic Engineering of Fire-Damaged Structures. **ICE**, v. 162, p. 12-17, 2009.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1**: fire-resistance tests: elements of building construction: part 1: general requirements. Geneva, 2015.
- NADJAI, A. *et al.* Compartment Masonry Walls in Fire Situations. **Fire Technology**, v. 42, n. 3, p. 211-231, 2006.
- NGUYEN, T. D.; MEFTAH, F. Behavior of Clay Hollow-Brick Masonry Walls During Fire: part 1: experimental analysis. **Fire Safety Journal**, v. 52, p. 55-64, 2012.
- NGUYEN, T. D.; MEFTAH, F. Behavior of Hollow Clay Brick Masonry Walls During Fire: part 2: 3D finite element modelling and spalling assessment. **Fire Safety Journal**, v. 66, p. 35-45, 2014.
- POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO, Corpo de Bombeiros. **Instrução Técnica nº 08/2011**: resistência ao fogo dos elementos de construção. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2011.
- RIGÃO, A. O. **Comportamento de Pequenas Paredes de Alvenaria Estrutural Frente a Altas Temperaturas**. Santa Maria, 2012. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, São Maria, 2012.
- ROSEMANN, F. **Resistência ao Fogo de Paredes de Alvenaria Estrutural de Blocos Cerâmicos pelo Critério de Isolamento Térmico**. Florianópolis, 2011. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- TORRES, D. L. **Alvenaria Estrutural em Situação de Incêndio**: proposta de verificação.

Campinas, 2012. 68 f. Qualificação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.