

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Amanda Furlin Renosto

**DIMENSIONAMENTO DE PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL
EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO PELO MÉTODO TABULAR DO
EUROCODE 6 PART 1-2:2005**

Santa Maria, RS
2022

Amanda Furlin Renosto

**DIMENSIONAMENTO DE PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO PELO MÉTODO TABULAR DO EUROCODE 6
PART 1-2:2005**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil,
da Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM, RS), como requisito parcial para a
obtenção do grau de **Engenheiro Civil**.

Orientadora: Larissa Degliomini Kirchhof

Santa Maria, RS
2022

Amanda Furlin Renosto

**DIMENSIONAMENTO DE PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO PELO MÉTODO TABULAR DO EUROCODE 6
PART 1-2:2005**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil,
da Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM, RS), como requisito parcial para a
obtenção do grau de **Engenheiro Civil**.

Aprovado em 22 de agosto de 2022:

Larissa Degliuomini Kirchhof, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Gihad Mohamad, Dr. (UFSM)

André Lübeck, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, por todo o amor, suporte, por acreditarem em mim e pelo incentivo na realização dos meus sonhos.

À minha irmã, pela companhia, apoio e carinho repassados ao longo deste período de graduação e sempre presentes em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, professora Larissa D. Kirchhof pela confiança, incentivo e conhecimento repassado ao longo deste período e de toda a graduação.

Agradeço também aos professores Gihad Mohamad e André Lübeck pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

A todos que foram meus professores, por todos os ensinamentos.

Agradeço à toda a minha família pelo incentivo neste período.

Ao meu companheiro Luiz, pela compreensão, carinho e apoio diários.

Aos meus colegas de graduação, Junior, Eduardo, Jéssica, Maira e Leonardo pela amizade e convívio ao longo desta trajetória.

Agradeço também aos engenheiros Carlos Alexander Santestevan Baigorria e Luan Martins pela oportunidade de estagiar na empresa RKS e aos engenheiros Dandara Modesti e Vitor Amorim pelos ensinamentos transmitidos neste período e por todo o carinho.

RESUMO

DIMENSIONAMENTO DE PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO PELO MÉTODO TABULAR DO EUROCODE 6 PART 1-2:2005

AUTORA: Amanda Furlin Renosto

ORIENTADORA: Larissa Degliuomini Kirchhof

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo fortemente utilizado no Brasil por se apresentar como uma alternativa mais econômica e racionalizada para combater o déficit habitacional crescente. Apesar de sua importância no cenário construtivo, ainda não se possui uma normatização nacional referente ao dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio, de forma que o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, recomenda a utilização de normas internacionais como a norma europeia *Eurocode 6 – Design of masonry structures - Part 1-2: General rules – Structural fire design* (2005). Nessa condição excepcional, ou seja, de elevada temperatura, é necessário que os elementos estruturais mantenham-se suportando as cargas aos quais foram projetados por um determinado período de tempo a fim de possibilitarem o resgate e a segurança das vidas humanas. Dessa forma, o presente trabalho visa apresentar um roteiro de cálculo para dimensionar, em situação de incêndio, paredes do pavimento térreo de um edifício modelo de quatro pavimentos, executado em alvenaria estrutural, a partir da aplicação do método tabular proposto no Eurocode 6 Part 1-2:2005, com vistas a se obter a espessura mínima necessária da parede de alvenaria, de acordo com o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF). Os resultados obtidos mostraram que, considerando o critério REI e TRRF = 60 min, todas as paredes do pavimento térreo atenderam os intervalos de espessuras mínimas especificadas pelo Eurocode 6 Part 1-2:2005, estando assegurada, dessa forma, sua resistência ao fogo ao TRRF escolhido.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural. Incêndio. Dimensionamento. Eurocode. Paredes estruturais.

ABSTRACT

DESIGN OF STRUCTURAL MASONRY WALLS IN FIRE BY USING TABULAR METHOD OF EUROCODE 6 PART 1-2:2005

AUTHOR: Amanda Furlin Renosto
ADVISOR: Larissa Degliuomini Kirchhof

The structural masonry is a construction system strongly used in Brazil because it presents itself as a more economical and rationalized alternative to combat the growing housing shortage. Despite its importance in the construction scenario, there is still no national standardization concerning the design of structural masonry in fire situations, so that the São Paulo State Fire Department recommends the use of international standards such as the European standard Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design (2005). In this exceptional condition, that is, of high temperature, it is necessary that the structural elements remain supporting the loads to which they were designed for a certain period of time in order to allow the rescue and safety of human lives. Thus, the present work aims to present a calculation script to the fire design of first floor walls of a four-storey masonry building, by applying the tabular method proposed in Eurocode 6 Part 1-2:2005, in order to obtain the minimum thickness of the masonry wall, according to the Required Time of Fire Resistance (TRRF). The results obtained showed that, considering the REI criterion and TRRF = 60 min, all the walls of the first floor comply by the minimum thickness ranges specified by Eurocode 6 Part 1-2:2005, being assured, thus, its fire resistance to the chosen TRRF.

Keywords: Structural masonry. Fire. Design. Eurocode. Loadbearing walls.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Edifício Monadnock, Chicago, EUA.....	15
Figura 2 – Condomínio Residencial Central Parque da Lapa: (a) edifícios com 4 pavimentos e (b) edifícios com 12 pavimentos.....	16
Figura 3 – Exemplo de construção em alvenaria estrutural de bloco de concreto. ...	18
Figura 4 – Bloco de concreto vazado genérico.	20
Figura 5 – Famílias de blocos de concreto mais comuns na construção civil.	21
Figura 6 – Grande Incêndio de Londres, Reino Unido.	23
Figura 7 – Incêndio dos edifícios (a) Andraus e (b) Joelma.	24
Figura 8 – Tetraedro do fogo.....	26
Figura 9 – Curva temperatura-tempo de um incêndio real.	27
Figura 10 – Curva temperatura-tempo de um incêndio natural.	28
Figura 11 – Curva temperatura-tempo padronizada de incêndio.	29
Figura 12 – Definição de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo.	31
Figura 13 – (a) Fissuração horizontal em parede de alvenaria submetida à compressão e (b) Deformação e fissuração em parede de alvenaria não carregada.	35
Figura 14 – Tipos de análise do projeto estrutural em situação de incêndio.....	39
Figura 15 – Métodos de dimensionamento em função do tipo de análise.....	40
Figura 16 – Critérios de segurança ao fogo de paredes de alvenaria estrutural.	43
Figura 17 – Esquema para a seleção da tabela de dimensionamento do Eurocode 6.	45
Figura 18 – Valores do fator de redução devido as condições de vinculação da parede.	52
Figura 19 – Recomendação para especificação dos materiais de alvenaria estrutural.	55
Figura 20 – Planta baixa arquitetônica do edifício modelo (sem escala).....	57
Figura 21 – Corte esquemático do edifício modelo (sem escala).....	58
Figura 22 – Planta de formas do 2º pavimento do edifício modelo (sem escala).	59
Figura 23 – Fluxograma esquemático para a obtenção do nível de carregamento (α).	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos blocos de concreto vazados.	20
Tabela 2 – Classificação da edificação em Grupos conforme Ocupação/Usos.	32
Tabela 3 – Resistência ao fogo da alvenaria estrutural em função do tipo de bloco e revestimento.	34
Tabela 4 – Redução da resistência e do módulo de elasticidade de pequenas paredes em função da elevação de temperatura.	36
Tabela 5 – Classificação das paredes segundo função e critério.	43
Tabela 6 – Exemplo de tabela utilizada no dimensionamento tabular.	46
Tabela 7 – Numeração dos blocos vazados de concreto da NBR 6136:2016.	48
Tabela 8 – Classificação dos blocos de concreto segundo Eurocode 6 Part 1-1:2005.	48
Tabela 9 – Classificação dos blocos brasileiros em grupos conforme o Eurocode 6.	49
Tabela 10 – Carregamento característico de compressão (N_{E_k}) das paredes do térreo.	60
Tabela 11 – Levantamento das ações em situação de incêndio ($N_{E_d,fi}$).	63
Tabela 12 – Nível de carregamento (α) das paredes analisadas.	65
Tabela 13 – Resultados gerais do dimensionamento das paredes térreas.	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
2	SISTEMA CONSTRUTIVO EM ALVENARIA ESTRUTURAL	15
2.1	BREVE HISTÓRICO	15
2.2	ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS	17
2.3	COMPONENTES DA ALVENARIA ESTRUTURAL	19
2.3.1	Unidades	19
2.3.2	Argamassa	21
2.3.3	Graute	22
2.3.4	Armaduras	22
3	ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	23
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
3.2	MODELOS DE INCÊNDIO	26
3.3	TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF).....	30
3.4	COMPORTAMENTO DA ALVENARIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	32
3.5	NORMATIVAS DE ESTRUTURAS SOB INCÊNDIO NO BRASIL	37
4	DIMENSIONAMENTO DA ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SEGUNDO O EUROCODE 6 PART 1-2:2005	39
4.1	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTOS PELO EUROCODE ..	39
4.2	MÉTODO TABULAR	42
4.2.1	Crítérios de dimensionamento	42
4.2.2	Combinações de ações	44
4.2.3	Definição das tabelas de dimensionamento	45
4.2.3.1	<i>Adaptação dos blocos à realidade brasileira</i>	47
4.2.3.2	<i>Cálculo do nível de carregamento – α</i>	49
5	ESTUDO DE CASO: ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	56
5.1	EDIFÍCIO MODELO	56
5.2	TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO DO EDIFÍCIO MODELO.....	61
5.3	DIMENSIONAMENTO DAS PAREDES CONFORME TRRF ESTIPULADO	61
5.3.1	Definições iniciais	61
5.3.2	Ação atuante em situação de incêndio	62
5.3.3	Nível de carregamento – α	63
5.3.4	Espessura mínima necessária para o TRRF estipulado	65
5.3.5	Resultados gerais do dimensionamento	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
6.1	CONCLUSÕES	68
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	70
	ANEXO A – TEMPOS REQUERIDOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF).	74
	ANEXO B – TABELA N.B.3.2 DO EUROCODE 6 PART 1-2:2005	75

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de pesquisas científicas e a evolução nas indústrias de fabricação de materiais e componentes construtivos, nos últimos anos no Brasil, juntamente com a publicação de normas técnicas específicas, proporcionou confiabilidade e credibilidade suficientes no meio técnico, para a ampliação da utilização do sistema construtivo em alvenaria estrutural, principalmente na área de edificações residenciais (CARVALHO, 2019).

Além disso, a problemática do déficit habitacional no Brasil, que segundo dados divulgados pela Fundação João Pinheiro (2021), no ano de 2019, foi de cerca de 5,8 milhões de moradias, promove o desenvolvimento de políticas públicas voltadas as habitações de interesse social. Nesse cenário, a utilização de processos construtivos, mais racionalizados, economicamente mais acessíveis e que ao mesmo tempo, mantenham o desempenho e a segurança das habitações é imprescindível.

Dessa forma, a alvenaria estrutural vem se popularizando e tornando-se um importante sistema, visto que de forma mais acelerada, proporciona habitações de qualidade a quem tanto precisa. Mesmo com a imensa propagação desse sistema no Brasil, especialmente em edificações multifamiliares, com alta taxa de ocupação, pouco se sabe sobre o comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio e como a segurança do sistema fica comprometida pelo sinistro.

O propósito da segurança contra o fogo é, além de reduzir perdas patrimoniais, majoritariamente evitar o colapso estrutural por um período de tempo suficiente para permitir o resgate das vidas humanas da edificação (MOHAMAD, 2020). Assim, o dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio deve ser desenvolvido de forma eficaz e ampla, e não ser negligenciado devido as dificuldades e a falta de informações, como se percebe no Brasil.

A carência de uma norma técnica brasileira para o dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio, promove, além de um desamparo ao projetista estrutural, a necessidade da utilização da norma europeia *Eurocode 6 – Design of masonry structures - Part 1-2: General rules – Structural fire design* (2005),

conforme menciona o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo na Instrução Técnica “Segurança estrutural contra incêndio” nº 08/2019. Para isso, necessita-se adaptar os edifícios brasileiros aos parâmetros dessa normatização internacional, de forma a possibilitar o correto dimensionamento ao incêndio, que é o que promove a segurança da edificação contra essas ações excepcionais.

O Eurocode 6 Part 1-2:2005 é uma normativa que trata exclusivamente da proteção passiva de estruturas de alvenaria expostas ao fogo, possibilitando o dimensionamento das alvenarias estruturais e também das alvenarias com apenas a função de vedação. Ainda, o código permite a utilização de diferentes métodos de verificação em situação de incêndio, que variam conforme o tipo de análise estrutural empregada, podendo ser aplicados o método avançado, o simplificado e ainda o tabular.

No decorrer deste trabalho será abordado o dimensionamento de paredes de alvenaria estrutural, em situação de incêndio, pelo método tabular desenvolvido no Eurocode 6 Part 1-2:2005. Sendo realizado assim, um roteiro de cálculo, ressaltando todas as informações e considerações necessárias, de forma a tornar o edifício modelo, já projetado à temperatura ambiente, segundo a norma brasileira ABNT NBR 16868:2020 “Alvenaria estrutural - Parte 1: Projeto”, desempenhando, também, resistência estrutural ao fogo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Dimensionar um edifício modelo executado em alvenaria estrutural, em situação de incêndio, utilizando os preceitos do método tabular presente no Eurocode 6 Part 1-2:2005.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo principal seja alcançado é necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- determinar o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) do edifício modelo, segundo as Instruções Técnicas nº 08/2019 e nº 09/2018 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo;
- elaborar um roteiro de cálculo, de forma detalhada, que contenha todas as etapas fundamentais para a determinação da espessura mínima necessária das paredes do pavimento térreo, de acordo com o TRRF estipulado;
- verificar se a espessura das paredes definida no projeto em temperatura ambiente atende a espessura mínima definida em situação de incêndio;
- propor soluções em caso de não atendimento dos requisitos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A alvenaria estrutural vem sendo muito utilizada no Brasil, por tornar a execução de edificações mais rápida, racionalizada e econômica, ao mesmo tempo que proporciona a manutenção da segurança estrutural. Esses são parâmetros cada vez mais buscados por engenheiros e construtoras em suas obras. Assim, torna-se muito importante ao estudante de engenharia conhecer mais sobre esse sistema, seus critérios de dimensionamento e seu desempenho à temperatura ambiente e ao fogo.

Apesar disso, este assunto tem pouco enfoque no currículo atual do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, possuindo-se apenas uma disciplina sobre alvenaria estrutural e somente com o aprendizado de noções básicas do sistema. Além disso, a parte de análise de edificações em situação de incêndio também não é desenvolvida no curso, sendo um tema de extrema relevância aos engenheiros em formação.

Ainda, segundo o artigo 8º da Lei Federal nº 13.425, de 30 de março de 2017, o combate e a prevenção ao incêndio são assuntos que devem ser incluídos nas disciplinas dos cursos de graduação em engenharia no Brasil. Dessa forma, percebe-se a relevância do assunto e como os profissionais da área devem desenvolver conhecimento apropriado para, ao realizarem seus projetos estruturais, ponderarem sobre a proteção das vidas humanas em casos de sinistro.

2 SISTEMA CONSTRUTIVO EM ALVENARIA ESTRUTURAL

2.1 BREVE HISTÓRICO

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), a alvenaria é um sistema muito tradicional, que foi amplamente utilizado pelas antigas civilizações em suas necessidades construtivas. Alguns desses monumentos, como as Pirâmides do Egito e o Coliseu Romano, por exemplo, demonstram a durabilidade desse sistema, ao se manterem íntegros até os dias atuais. Devido a confiabilidade repassada por essas obras, até o início do século XX, acredita-se que a alvenaria foi o material mais empregado em construções pelo mundo (RIZZATTI JUNIOR, 2015).

Ainda, ao final do século XIX, uma obra marcante em alvenaria estrutural, ilustrada na Figura 1, foi o edifício Monadnock, que com dezesseis pavimentos e o escasso conhecimento da época, necessitava de paredes no pavimento térreo de mais de um metro e meio de espessura (MOHAMAD, 2007). As dificuldades de execução das obras devido as dimensões observadas, principalmente em edifícios altos, abriram caminho para a utilização de outros sistemas construtivos como o concreto armado e o aço, que estavam surgindo nesse período (ACCETTI, 1998).

Figura 1 – Edifício Monadnock, Chicago, EUA.



Em comparação, no Brasil, os estudos na área da alvenaria estrutural surgiram em São Paulo, apenas no final da década de 1960 (CAMACHO, 2006). A aplicação pioneira da alvenaria estrutural no país, utilizou blocos de concreto e ocorreu no conjunto habitacional Central Parque da Lapa, em São Paulo, onde no ano de 1966, foram construídos edifícios de quatro pavimentos e seis anos depois, mais quatro edifícios de doze pavimentos, conforme retratado na Figura 2 (RAUBER, 2005).

Figura 2 – Condomínio Residencial Central Parque da Lapa: (a) edifícios com 4 pavimentos e (b) edifícios com 12 pavimentos.



(a)



(b)

Fonte: <https://www.comunidadeconstrucao.com.br/banco-obras/1/alvenaria-estrutural>. Acesso em: 28 maio 2022.

Nesse mesmo período, em outros países, como Estados Unidos, Suíça e Reino Unido a busca por metodologias construtivas alternativas ampliou estudos e testes experimentais em elementos de alvenaria estrutural, dessa forma, possibilitando o desenvolvimento de teorias e critérios de projeto e dimensionamento, que possibilitaram posteriormente, a realização das primeiras normativas técnicas na área (CAMACHO, 2006).

Atualmente, no Brasil, esse sistema construtivo possui notória importância, a sua crescente evolução nas últimas décadas, com a criação da norma brasileira ABNT NBR 15812-1:2010 “Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos – Parte 1: Projetos” e

15961-1:2011 “Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 1: Projeto” e posteriormente sua atualização e junção para a ABNT NBR 16868-1:2020, juntamente com o desenvolvimento de inúmeras pesquisas quanto ao comportamento dos materiais utilizados e com amplos investimentos tecnológicos nas indústrias produtoras de blocos cerâmicos e de concreto, aumentou a credibilidade e confiabilidade da alvenaria estrutural, tornando-a competitiva economicamente e consolidando-a no mercado da construção civil do país (CARVALHO, 2019).

2.2 ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS

A alvenaria estrutural pode ser definida como um processo construtivo, onde o emprego de paredes de alvenaria com blocos modulares e lajes enrijecedoras, concebem resistência e suporte à edificação, devido a, essencialmente, serem dimensionadas por meio de critérios normativos de segurança, racionalização, controle e durabilidade (FRANCO, 1992; MOHAMAD; MACHADO; JANTSCH, 2017).

Segundo Camacho (2006), a alvenaria estrutural é constituída pela união de blocos vazados ou tijolos através de juntas de argamassa, e ainda o emprego de graute e armaduras, gerando um conjunto monolítico. Devido a isso, a parede de alvenaria consegue desempenhar, além da função de vedação como já ocorre nos métodos tradicionais, também a de elemento estrutural resistente, gerando maior facilidade nas construções (CAMACHO, 2006).

De acordo com Mohamad (2020) para que a alvenaria estrutural, conforme seu propósito principal, seja de aplicação racionalizada, faz-se necessário que o projeto arquitetônico seja adaptado para a modulação padrão de bloco especificado, seja ele cerâmico ou de concreto. Além disso, outra prática fundamental, citada pelo mesmo autor, são as amarrações entre as paredes estruturais, visto que com essas vinculações a rigidez e absorção das ações pelas paredes é possibilitada e logo também é, o funcionamento do sistema construtivo como um todo. Na Figura 3, é possível visualizar uma construção em alvenaria estrutural de blocos de concreto.

Figura 3 – Exemplo de construção em alvenaria estrutural de bloco de concreto.



Fonte: <https://www.fepex.com.br/single-post/2018/05/08/sistema-constructivo-2-alvenaria-estrutural>. Acesso em: 05 jun. 2022.

Dessa forma, a racionalização e industrialização construtivas verificadas na alvenaria estrutural, trazem consigo muitos benefícios ao sistema, como maior velocidade na execução, menores improvisações e interferências, redução no uso de materiais, como formas de madeira, aço, concreto e conseqüentemente nos resíduos gerados e por fim a diminuição da mão-de-obra necessária, como a de carpinteiros e armadores, por exemplo (CARVALHO, 2019).

Todos os fatores expostos conduzem à vantajosa redução nos custos da obra, fato que torna a alvenaria hoje, competitiva no mercado da construção civil brasileira quando comparada aos demais sistemas estruturais já consolidados (MOHAMAD, 2007). Ainda, conforme estimativas do mercado da construção, a alvenaria estrutural gera benefícios econômicos de até 20% em edificações menores, com valores decrescentes conforme o aumento do número de pavimentos (PARSEKIAN; MEDEIROS; SIPP, 2018).

2.3 COMPONENTES DA ALVENARIA ESTRUTURAL

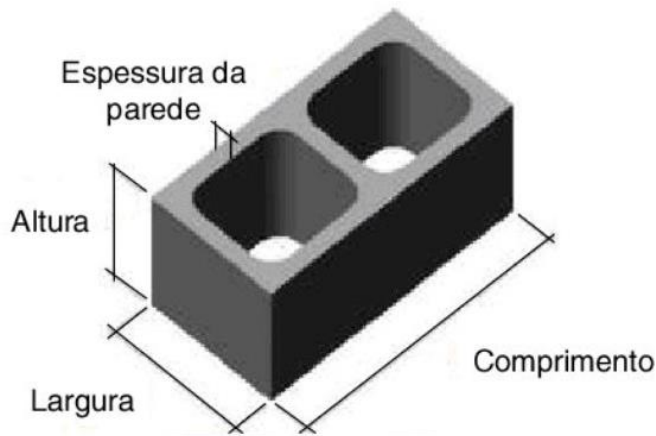
Conforme já mencionado, a alvenaria estrutural é formada através da associação de diferentes componentes estruturais. Dentre eles estão, as unidades ou blocos, a argamassa de assentamento, o graute e as armaduras. A seleção de cada um destes componentes no projeto é muito importante, visto que a resistência da parede de alvenaria, estará associada ao comportamento resistente de cada um deles.

2.3.1 Unidades

As unidades ou blocos são os principais componentes formadores das paredes de alvenaria, visto que representam, conforme descreve Rizzatti Junior (2015), 80 a 95% do seu volume total. Além disso, se destacam por possuírem padrões dimensionais, classificados em diferentes famílias, que possibilitam a modulação das paredes, fato de grande relevância na alvenaria estrutural. Ainda, são muito importantes pois, o tipo de bloco estrutural escolhido no projeto é um dos grandes responsáveis pelo desempenho resistente da parede de alvenaria em si (CARVALHO, 2019).

As unidades podem ser classificadas segundo o material que as compõe, sendo os mais comuns os de concreto e os cerâmicos, além disso, quanto a sua forma, podem ser agrupados em maciços ou vazados e ainda conforme a aplicação, em blocos com função estrutural ou de vedação (CARVALHO, 2019). Terão ênfase neste trabalho os blocos de concreto vazados, ilustrados na Figura 4, que são categorizados dessa forma, por possuírem área líquida igual ou inferior a 75% da área bruta (MOHAMAD, 2020).

Figura 4 – Bloco de concreto vazado genérico.



Fonte: ABNT NBR 6136 (2016).

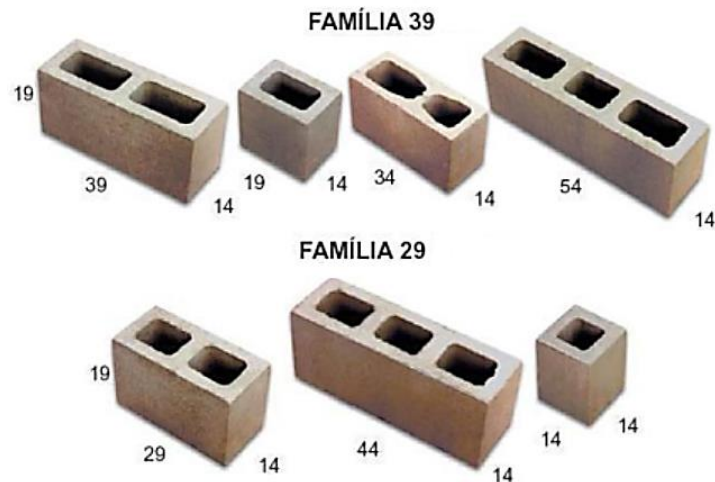
A norma ABNT NBR 6136:2016 “Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos” é a responsável por classificar estes blocos de concreto vazados em diferentes famílias, segundo suas dimensões usuais de fabricação, sendo as mais comuns de utilização nas construções em alvenaria estrutural, presentes na Figura 5. Além disso, esta norma estabelece outras informações relevantes, como a classificação dos blocos em relação as suas resistências características à compressão medidas na área bruta (f_{bk}), valor este que deve ser especificado no projeto estrutural, sendo então possíveis de enquadramento em três classes distintas, demonstradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos blocos de concreto vazados.

Classe	Classificação	Resistência característica à compressão axial (f_{bk}) (MPa)
A	Com função estrutural	$f_{bk} \geq 8,0$
B	Com função estrutural	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$
C	Com ou sem função estrutural	$f_{bk} \geq 3,0$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6136 (2016).

Figura 5 – Famílias de blocos de concreto mais comuns na construção civil.



Fonte: BASTOS (2013) *apud* CARVALHO (2019).

2.3.2 Argamassa

A argamassa de assentamento, apesar de presente em menor volume que os blocos, é de suma importância pois possibilita o comportamento monolítico da parede estrutural através da solidarização dos componentes (CARVALHO, 2019). É formada por cimento, agregado miúdo, água e ainda possíveis adições, desenvolvendo diferentes valores de resistência em função do traço destes materiais (MOHAMAD, 2010). As argamassas de assentamento utilizadas na alvenaria estrutural podem ser classificadas em diferentes tipos, sendo elas as mistas, as semiprontas e as industrializadas (CARVALHO, 2019). No Brasil, observa-se grande adesão às argamassas industrializadas, principalmente as entregues em sacos ou a granel apenas com necessidade de adição de água (CAMACHO, 2006).

Segundo a ABNT NBR 16868-1:2020, norma que especifica recomendações de dimensionamento da alvenaria estrutural, deve-se estipular em projeto o valor da resistência à compressão da argamassa (f_a), ressaltando ainda que este parâmetro é um valor médio, logo com menor fator de segurança embutido do que os valores característicos dos demais componentes. Além disso, a mesma norma considera que este parâmetro deve ser limitado a 1,5 vezes a resistência característica especificada para o bloco (f_{bk}).

2.3.3 Graute

O graute pode ser definido como um concreto ou argamassa de alta fluidez composto por agregados de dimensões menores, que preenche os furos verticais dos blocos, quando necessário (BASTOS, 2021). Sua finalidade é a de garantir a solidarização dos blocos com as armaduras, formando um conjunto monolítico e além disso, onde necessários reforços, o preenchimento dos furos com graute promove aumento da resistência à compressão da parede (MOHAMAD, 2020).

Ainda, conforme menciona Bastos (2021), este componente promove o aumento da resistência da parede de alvenaria à forças laterais, à propagação do som e também ao fogo. Além disso, conforme a ABNT NBR 16868-1:2020, deve ser especificado no projeto estrutural a resistência à compressão característica do graute (f_{gk}), onde conforme a mesma norma, este parâmetro para alvenaria de blocos de concreto vazados deve possuir um valor de, no mínimo, 15 MPa.

2.3.4 Armaduras

As armaduras utilizadas na alvenaria estrutural distribuem-se verticalmente dentro dos furos dos blocos ou horizontalmente nas canaletas e sempre estão envoltas com graute de forma a garantirem o comportamento monolítico do sistema (RIZZATTI JUNIOR, 2015). As armaduras especificadas na alvenaria estrutural são as mesmas utilizadas no concreto armado sendo geralmente aços dos tipos CA-50 e CA-60 (CARVALHO, 2019).

3 ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao longo da história, muitos foram os eventos onde o fogo causou a destruição de habitações e a perda de vidas humanas. Entre os primeiros incêndios registrados estão os de grandes cidades, como o em Roma no ano de 64 e o de Londres em 1666 (Figura 6). O incêndio de Londres durou ao todo sete dias e gerou a perda de mais de 13 mil casas (SILVA, 2012). Segundo Kirchhof (2004), este acontecimento é conhecido por proporcionar o desenvolvimento das primeiras medidas de proteção contra incêndio no mundo.

Figura 6 – Grande Incêndio de Londres, Reino Unido.



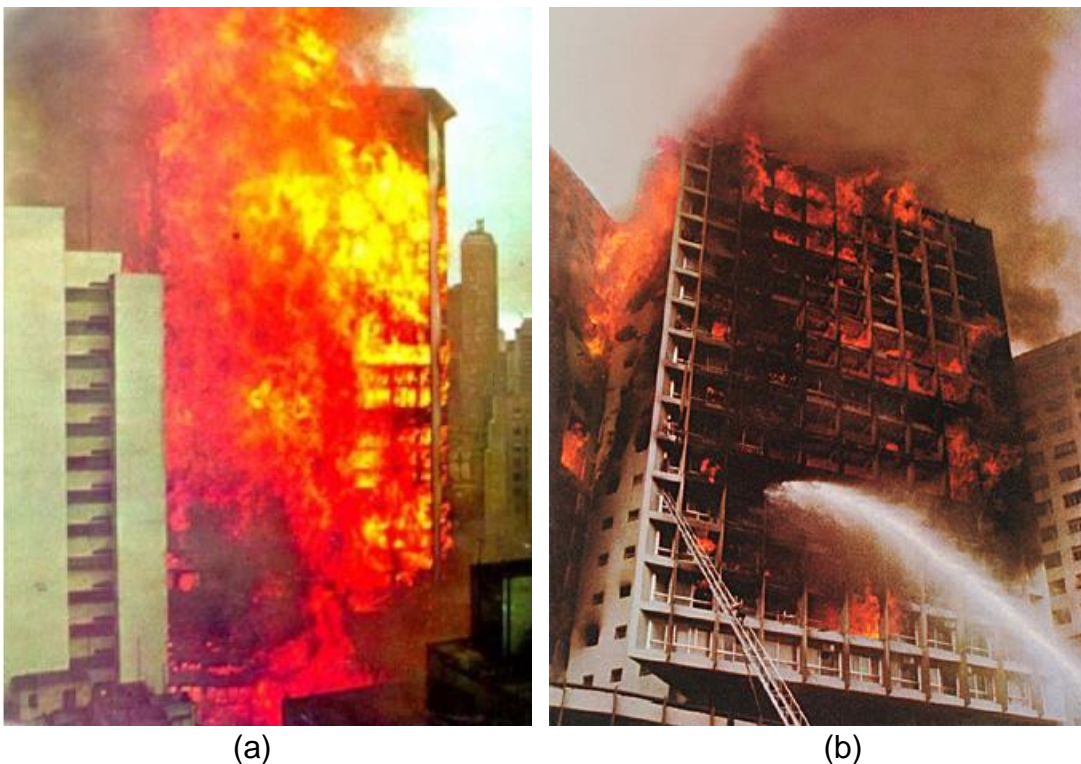
Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Grande_incêndio_de_Londres. Acesso em: 07 jun. 2022.

Ainda, vale ressaltar, que nos Estados Unidos, apesar do grande incêndio na cidade de Chicago em 1871 ter sido o marco inicial desses eventos no país, somente em 1914, três anos após outro incidente, desta vez no prédio da Companhia *Triangle Shirtwaist* vitimizando 146 trabalhadores, que a Associação Nacional de Proteção contra Incêndios (NFPA) desenvolveu a quinta edição do Manual de Proteção Contra

Incêndios e o Comitê de Segurança da Vida, avanços prósperos que enfatizaram a importância da preservação da vida humana, acima da patrimonial na ocorrência destes sinistros (SILVA, 2012).

Conforme ocorreu nos Estados Unidos e em diversos outros países, o tema da segurança contra incêndio, acabou se desenvolvendo concomitante aos desastres que ocorriam na área. Apesar de bem mais recente na história, o mesmo não deixou de acontecer no Brasil. O primeiro incêndio de grandes proporções em um prédio, ocorreu em 1972 em São Paulo, no edifício comercial Andraus que devido a uma sobrecarga no sistema elétrico culminou ao todo em 16 vítimas fatais. Dois anos depois, o mesmo ocorreu no Edifício Joelma, também em São Paulo, que gerou 179 mortos, sabe-se que os dois edifícios, que podem ser observados na Figura 7, não possuíam escadas de emergência (SEITO *et al.*, 2008).

Figura 7 – Incêndio dos edifícios (a) Andraus e (b) Joelma.



Fonte: (a) KIMURA (2009); (b) https://pt.wikipedia.org/wiki/Incêndio_no_Edifício_Joelma. Acesso em: 08 jun. 2022.

As duas tragédias, enfatizaram a importância de estudos na área de segurança contra incêndio e a necessidade de medidas de combate ao fogo em edificações no Brasil, que a partir de então vêm sendo desenvolvidas. Segundo Mohamad (2020), os objetivos principais da segurança contra incêndio são o de minimizar o risco à vida, oriundo da exposição à fumaça, gases tóxicos e a um possível desabamento de elementos construtivos, além de também reduzir perdas materiais, consequentes da destruição parcial ou total da edificação, visto que os elementos estruturais perdem resistência e rigidez quando submetidos a essas ações excepcionais (SILVA, 2012).

Sabe-se ainda que um sistema de segurança ao fogo eficiente é aquele que permite a rápida saída dos ocupantes do local em chamas, devendo para tal, possuir um conjunto de meios de proteção ativos e passivos. Dentre os meios ativos estão aqueles que são acionados em resposta a estímulos do fogo, como por exemplo, chuveiros automáticos e iluminação de emergência, já os meios de proteção passivos, são aqueles incorporados ao sistema construtivo do edifício, como por exemplo, a resistência ao fogo das estruturas (VARGAS; SILVA, 2005).

Devido a isso, é obrigação legal do engenheiro de estruturas compreender como as edificações e seus materiais constituintes irão reagir na exposição ao fogo, de forma a projetarem garantindo a segurança estrutural do edifício em situação de incêndio (SILVA, 2012). Ainda conforme Silva (2012), a segurança estrutural ao fogo da edificação ocorre através da permanência das funções resistentes dos elementos estruturais por um período de tempo requerido, de forma a permitir a preservação das vidas humanas ali existentes.

Antes de se apresentarem maiores detalhes sobre como determinar a segurança ao fogo das estruturas de alvenaria estrutural, por meio do método de dimensionamento tabular, serão relatados conceitos básicos necessários a compreensão do processo, como as definições de tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), dos modelos usuais de incêndio e também as evoluções desta área em pesquisas experimentais no Brasil e no mundo.

3.2 MODELOS DE INCÊNDIO

Seito *et al.* (2008) define o fogo como um processo de combustão formado por quatro elementos básicos, o combustível (material sólido, líquido ou gasoso que sofre a queima), o comburente (oxigênio), uma fonte de calor e a reação em cadeia desses três elementos, que gera tanto a ocorrência como a manutenção do processo. A representação desses componentes é conhecida como Tetraedro do fogo, sendo apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Tetraedro do fogo.



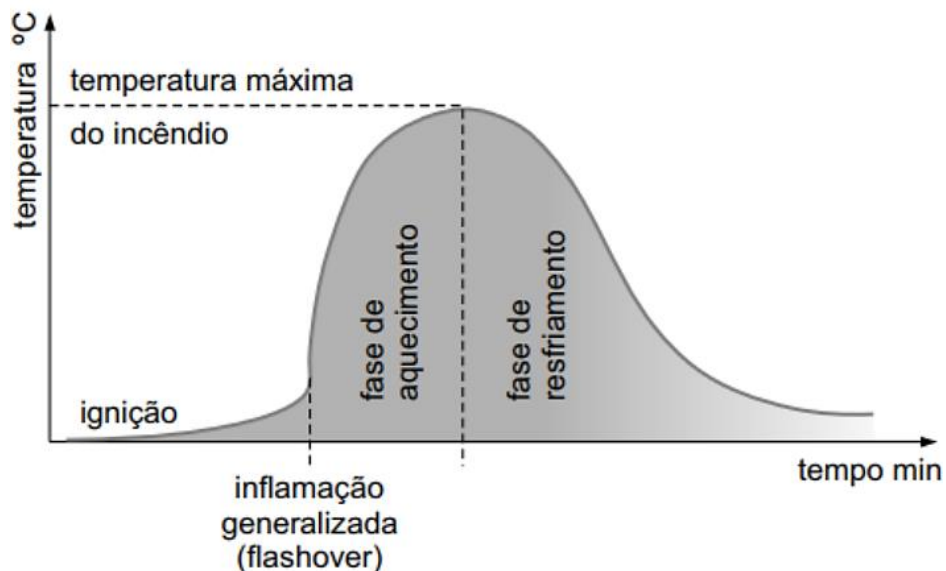
Fonte: Seito *et al.* (2008).

Conforme a ABNT NBR 13860:1997 “Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio”, quando o desenvolvimento do fogo se procede de forma descontrolada no ambiente, ele é definido como um incêndio. Na área da engenharia de estruturas o incêndio pode ser caracterizado por uma curva que associa a temperatura dos gases quentes e o seu tempo de ocorrência (VARGAS; SILVA, 2005). Essa curva, ilustrada na Figura 9, fornece as fases de um incêndio real e é a base para o estudo das estruturas sob o efeito da ação térmica (KIMURA, 2009).

Pode-se notar, através da curva temperatura-tempo, três fases principais durante o desenvolvimento de um incêndio real. No início do processo, ocorre a ignição, onde as temperaturas são baixas e o incêndio é considerado de pequenas

proporções, não gerando riscos aos elementos estruturais. Na sequência ocorre uma elevação brusca de temperatura, conhecida como *flashover* ou instante de inflamação generalizada, nele toda superfície de material combustível presente no compartimento entra em combustão. A partir desse momento inicia-se a fase de aquecimento, na qual o incêndio passa a ser considerado de grandes proporções, influenciando na redução de resistência da estrutura. Finalmente, após todo o material combustível ser consumido e a temperatura de pico ser atingida passa-se a fase de resfriamento com consequente redução gradativa de temperatura (SILVA, 1997).

Figura 9 – Curva temperatura-tempo de um incêndio real.

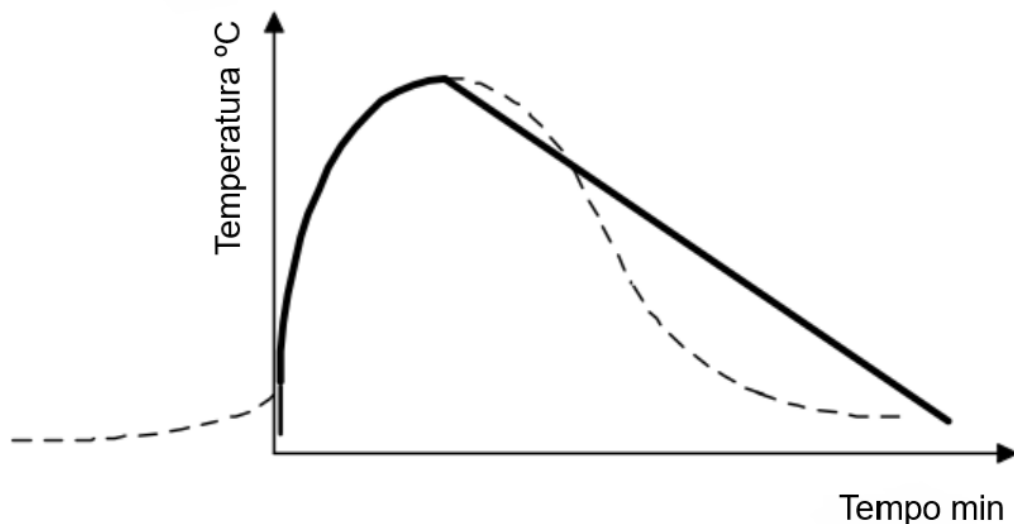


Fonte: VARGAS; SILVA (2005).

Como essa curva representa de forma efetiva o incêndio ela é de difícil obtenção, variando para cada evento de fogo devido as inúmeras variáveis envolvidas no processo, como o tipo de edificação, disposição de aberturas, dentre outras (KIMURA, 2009). Devido a essas adversidades, e também para gerar uma padronização na análise térmica das estruturas ao redor do mundo, desenvolveram-se modelos simplificados de incêndio, dentre eles, estão o modelo de incêndio natural ou paramétrico e o modelo de incêndio padrão ou nominal (CARVALHO, 2019).

No modelo de incêndio natural, também conhecido como paramétrico, a fase inicial de ignição não é considerada, isso se deve as baixas temperaturas atingidas, que não alteram a capacidade resistente da edificação e dessa forma podem ser desprezadas (KIMURA, 2009). Assim, conforme relatado na Figura 10, o modelo inicia no momento de *flashover*, com crescimento exponencial de temperatura até atingir o pico de máximo, a partir disso a temperatura decresce linearmente (CARVALHO, 2019). Segundo Dupim (2019), esse modelo foi elaborado por meio de simulações que apresentaram a variação das temperaturas reais dos gases em um compartimento em chamas ao longo do tempo.

Figura 10 – Curva temperatura-tempo de um incêndio natural.



Fonte: Adaptado de SILVA (1997).

Apesar da existência de curvas mais realistas, que variam conforme o evento de incêndio estudado, como as apresentadas anteriormente, convencionou-se adotar em normativas técnicas que visam dimensionamento de estruturas, o modelo de incêndio-padrão. As curvas padronizadas desse modelo, além de não dependerem de características do ambiente, da carga de incêndio e das propriedades térmicas dos materiais, possuem apenas o ramo ascendente, ou seja, representam somente elevação da temperatura dos gases ao longo do tempo (SILVA, 2012).

Como o presente trabalho se baseia em métodos do código europeu, observa-se que o principal modelo de curva nominal recomendada pelo *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire* (2002), é a curva de incêndio padrão definida pela ISO 834:1975, que é válida para locais onde a carga combustível é predominantemente de materiais celulósicos. Sendo representada pela Equação 3.1:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (3.1)$$

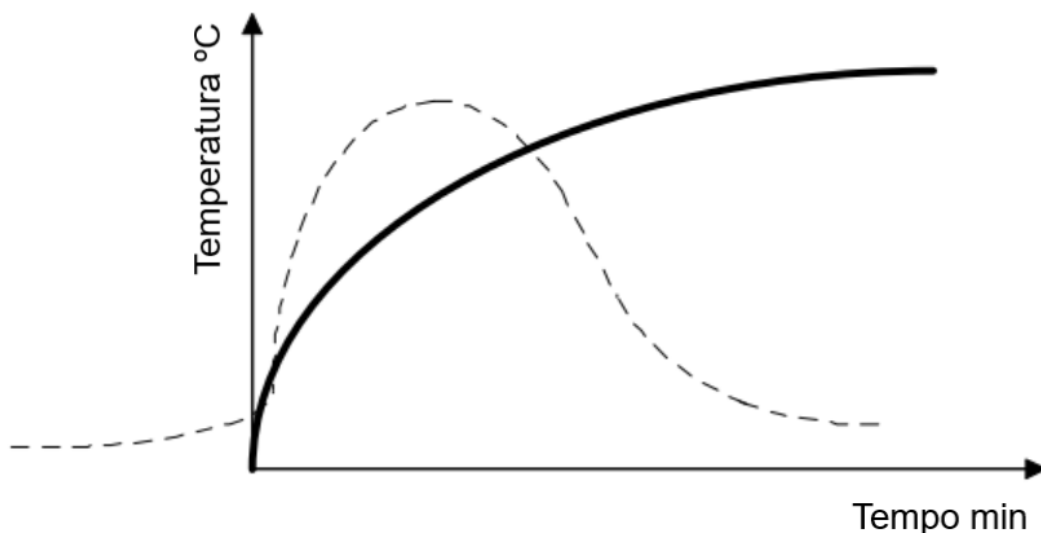
sendo:

θ_g – temperatura dos gases em °C;

t – tempo em minutos.

Na Figura 11 é possível observar a curva padronizada representada pela Equação 3.1, essa curva de incêndio-padrão é utilizada na determinação do TRRF, que será demonstrado na sequência.

Figura 11 – Curva temperatura-tempo padronizada de incêndio.



Fonte: SILVA (1997).

Logo, essas curvas padronizadas são muito importantes, visto que são utilizadas para facilitar procedimentos de ensaio em elementos estruturais e conseqüentemente para avaliar a sua resistência ao fogo (COSTA; SILVA, 2006). Porém, conforme ressaltado por Costa e Silva (2003), conclusões fundamentadas a partir do modelo de incêndio-padrão devem ser elaboradas de forma cautelosa pois ele não representa o comportamento real das estruturas expostas ao fogo.

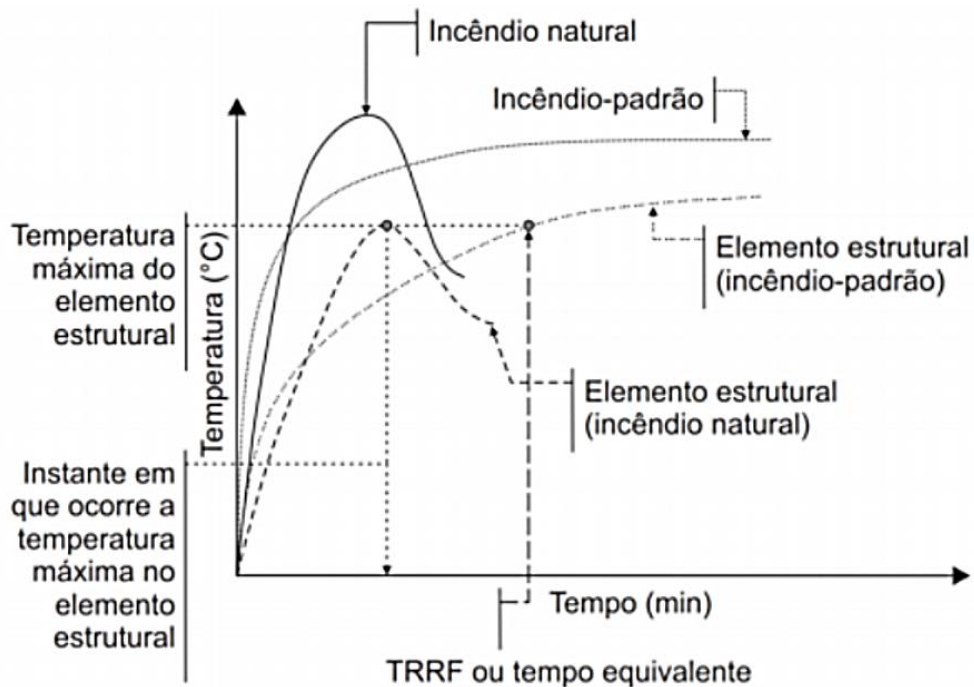
3.3 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF)

Segundo a NBR 14432:2001 “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento”, a resistência ao fogo pode ser definida como uma propriedade da estrutura de resistir a ação térmica por um determinado período de tempo, mantendo sua segurança, estanqueidade e isolamento, quando requeridos. Esse período de tempo mínimo em que o elemento estrutural deve apresentar resistência ao fogo é conhecido como tempo requerido de resistência ao fogo, dado pela sigla “TRRF” e tem como base, o aquecimento por meio da curva do modelo de incêndio-padrão, apresentado no item 3.2.

A definição de TRRF pode ser melhor compreendida, através da Figura 12, como sendo o tempo dado pela curva de incêndio-padrão que equivale ao período em que o elemento estrutural atinge sua temperatura máxima por meio da exposição ao incêndio natural (SILVA, 2008 *apud* RODOVALHO, 2018).

Para verificar sob incêndio os elementos estruturais de um edifício, como no exemplo deste trabalho, as paredes de alvenaria estrutural, deve-se obter os valores tabelados de TRRF conforme determinações da legislação regional vigente ou, na ausência dela, da NBR 14432:2001. As exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos segundo a legislação do Estado do Rio Grande do Sul, são obtidas por meio da Instrução Técnica nº 08/2019 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, a qual será utilizada nesse trabalho.

Figura 12 – Definição de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo.



Fonte: SILVA (2008) *apud* RODOVALHO (2018).

Vale ressaltar que esses tempos requeridos de resistência ao fogo tabelados são valores empíricos, padronizados e estabelecidos de forma consensual pelo meio técnico, sendo estipulados conforme altura e ocupação da edificação, área do pavimento e medidas de proteção ativa disponíveis (SILVA, 2012). Além disso, variam de 30 a 180 minutos, recebendo os maiores valores os edifícios onde observa-se que, em caso de sinistro, o risco às vidas humanas ali presentes é maior.

Para determinar o TRRF da edificação é preciso utilizar a tabela presente na IT 08/2019 do Corpo de Bombeiros de São Paulo, expressa também no Anexo A deste trabalho. Para tal, se faz necessário determinar a altura da edificação e a qual grupo ela pertence segundo o seu propósito de Uso/Ocupação, conforme relatado na Tabela 2. Vale ressaltar ainda, conforme a Instrução Técnica nº 03/2019 “Terminologia de segurança contra incêndio” do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, que a altura da edificação, nesses casos, é a medida do seu ponto de saída para o exterior, também denominado nível de descarga, até o piso do último pavimento habitado, não sendo considerados barriletes, casa de máquinas e pisos sem permanência humana.

Tabela 2 – Classificação da edificação em Grupos conforme Ocupação/Uso.

Grupo	Ocupação/Uso
A	Residencial
B	Serviços de hospedagem
C	Comercial varejista
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos
E	Educacional e cultura física
F	Locais de reunião de público
G	Serviços automotivos
H	Serviços de saúde e institucionais
I	Industrial
J	Depósitos
L	Explosivos
M	Especial

Fonte: Adaptado de IT nº 08 (2019).

Após a obtenção do TRRF da edificação, deve-se verificar se os elementos estruturais com suas dimensões estipuladas em projeto estrutural à temperatura ambiente, atendem a esse tempo exigido de resistência ao fogo. Antes disso, porém, é necessário compreender, mesmo que brevemente, como os elementos portantes que serão analisados neste trabalho se comportam sob elevadas temperaturas.

3.4 COMPORTAMENTO DA ALVENARIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O comportamento resistente à ação térmica da alvenaria estrutural está diretamente associado ao comportamento resistente de cada um de seus componentes formadores (blocos, argamassa, graute e aço), tanto de maneira conjunta como separadamente (LEITE, 2018). Como a alvenaria perde propriedades mecânicas na exposição ao fogo é de suma importância a existência de estudos numéricos e experimentais que avaliem essas alterações, principalmente quando ela está submetida a ação de carregamentos.

No Brasil, segundo Leite, Moreno Junior e Torres (2016), poucos estudos foram desenvolvidos sobre a análise da alvenaria estrutural em situação de incêndio. Isso

muito se deve ao custo elevado dos equipamentos e materiais necessários para a elaboração de ensaios que sigam as normativas, além do fato de a amostra representativa da parede em análise ser de difícil obtenção e de grande geometria. Devido a isso, observa-se que em muitas pesquisas, os experimentos vêm sendo substituídos pela análise numérica, visto esta depender apenas de recursos computacionais.

Dentre os estudos nacionais, merece destaque o realizado por Rigão (2012), o qual investigou pequenas paredes de alvenaria cerâmica submetidas à compressão, por meio de ensaios experimentais. Nesse estudo a elevação da temperatura no forno não seguiu o modelo de incêndio-padrão e as pequenas paredes foram analisadas com limitação de deslocamento vertical. Segundo constatado por ele, as argamassas se deterioraram completamente ao atingirem a temperatura de 900 °C.

Ainda, mais recentemente, Dupim (2019) realizou experimentos em blocos, prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural com exposição ao fogo em ambas as faces e com o aquecimento do forno seguindo a curva de incêndio-padrão. O autor concluiu que entre as pequenas paredes de 14 cm ensaiadas, as que possuíam blocos de concreto com resistência de 4 MPa à temperatura ambiente, obtiveram uma resistência residual após exposição ao fogo de 14% e as pequenas paredes com blocos de concreto de 10 MPa à temperatura ambiente, resultaram em uma resistência residual da ordem de 13%. Além disso, o autor constatou que as perdas de resistência, frutos da degradação dos materiais em função das altas temperaturas, foram mais elevadas nas pequenas paredes do que nos prismas e nos blocos ensaiados.

Além destes, é válido mencionar o Manual Técnico de Alvenaria (1990), livro nacional que apresenta resultados de ensaios feitos em paredes de alvenaria estrutural empregando diferentes tipos de blocos. Dependendo do tempo de resistência que as alvenarias apresentaram em situação de incêndio, o manual classificou-as em corta-fogo, quando atendem aos critérios de resistência mecânica, estanqueidade e isolamento térmico, em para-chamas, quando obtêm resistência mecânica e estanqueidade e em estáveis ao fogo, quando apenas o critério de

resistência mecânica é atendido. A Tabela 3 apresenta alguns desses resultados para blocos estruturais de 14 cm de espessura.

Tabela 3 – Resistência ao fogo da alvenaria estrutural em função do tipo de bloco e revestimento.

Blocos estruturais	Revestimento	Classificação		
		Corta-fogo	Para-chamas	Estável ao fogo
Concreto	-	1 h	4 h	4 h
Cerâmico	-	1,5 h	2 h	2 h
Cerâmico	1,5 cm	2 h	3 h	3 h
Cerâmico	3 mm (gesso)	2 h	4 h	4 h

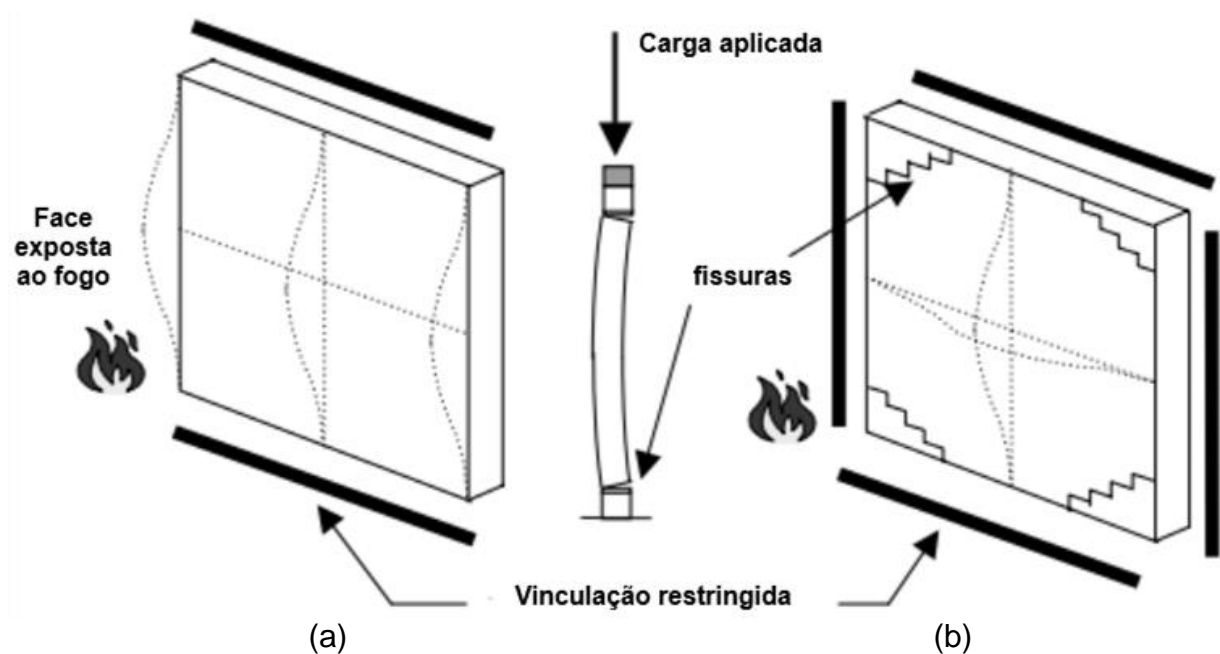
Fonte: Adaptado de ABCI (1990).

Em âmbito internacional, há um número maior de resultados referentes a alvenaria estrutural sob incêndio. Nadjai *et al.* (2006) afirmam que em elementos de compartimentação, como é o caso de paredes de alvenaria, o fogo geralmente encontra-se apenas de um lado da parede, o que promove expansão térmica diferencial, ou seja, a face exposta ao fogo se expande mais rapidamente que a outra face, o que fará com que a parede se curve na direção do aquecimento (Figura 13). Além disso, o autor menciona que a parte em contato com as elevadas temperaturas perderá propriedades mecânicas e a combinação destes processos pode levar a parede estrutural ao colapso.

Ainda, Nadjai *et al.* (2006), desenvolveram análises numéricas térmicas de paredes de alvenaria de blocos de concreto carregadas, formando duas subestruturas com as lajes de concreto armado. A primeira subestrutura, era uma parede interna, com lajes travando-a em ambos os lados e a segunda era formada por uma parede externa com laje apenas de um lado. Nesses estudos, foram considerados vários casos, dentre eles, incêndio apenas no primeiro andar, apenas no segundo andar e em ambos os andares. Assim, os autores notaram que o caso mais crítico ocorreu com o incêndio nos dois andares, onde a estrutura colapsou devido ao esmagamento

dos apoios da parede inferior e também concluíram que o caso mais favorável se procedeu com o incêndio apenas no andar inferior.

Figura 13 – (a) Fissuração horizontal em parede de alvenaria submetida à compressão e (b) Deformação e fissuração em parede de alvenaria não carregada.



Fonte: Adaptado de NADJAI *et al.* (2006).

Ingham (2009) destaca que paredes de alvenaria estrutural sob ação de temperaturas entre 600°C e 800°C perderão resistência à compressão devido, principalmente, à deterioração da argamassa de assentamento. Além disso, o autor menciona que em paredes formadas por blocos cerâmicos, pode ocorrer o fenômeno de lascamento explosivo desse material sob incêndio. Ademais, Ingham (2009) aponta que em situações onde o combate ao fogo é feito sob resfriamento com água, a alvenaria sofre um processo de retração térmica, tendo como consequência o aparecimento de fissuras bastante numerosas que podem resultar na ruína da parede.

Nahhas *et al.* (2007) realizaram análises experimentais e numéricas de paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto celulares, em situação onde o aquecimento seguiu o modelo de incêndio-padrão. No ensaio houve aplicação de

carregamento na parede e foram verificados os deslocamentos verticais e horizontais ao longo da elevação de temperatura. Para a validação do modelo, os autores compararam os resultados experimentais aos obtidos por análise numérica e observaram coerência no aquecimento da parede.

Os estudos realizados por Ayala (2010), também ocorreram em contexto experimental e numérico, porém com ênfase na redução da resistência à compressão de pequenas paredes de alvenaria de tijolos de concreto leve, sob ações térmicas elevadas. Foram modeladas e ensaiadas amostras submetidas a temperaturas de 200, 400, 600, 700 e 800 °C e após o equilíbrio térmico, elas foram carregadas com valores de força crescentes até atingirem o colapso.

O autor observou que conforme acréscimo de temperatura, ocorriam reduções na resistência à compressão e no módulo de elasticidade das pequenas paredes, sendo esses valores apresentados na Tabela 4. Ainda, Ayala (2010) aponta que a ruína das pequenas paredes em temperaturas elevadas ocorreu, principalmente, devido ao processo de abertura de fissuras diagonais e além disso, a partir dos 400 °C ao fenômeno de lascamento explosivo.

Tabela 4 – Redução da resistência e do módulo de elasticidade de pequenas paredes em função da elevação de temperatura.

Temperatura (°C)	Redução da resistência à compressão (%)	Redução do módulo de elasticidade (%)
400	9	40
600	19	65
700	60	89
800	83	98

Fonte: Adaptado de AYALA (2010).

Ainda, é válido mencionar as análises experimentais elaboradas por Nguyen e Meftah (2012) em paredes de alvenaria cerâmica aquecidas conforme o modelo de incêndio-padrão. Foram estudadas duas paredes estruturais e duas paredes com apenas a função de vedação, sendo avaliadas conforme seu desempenho perante

critérios de isolamento térmico, estanqueidade e resistência mecânica. Através dos ensaios, os autores constataram que a resistência ao fogo das paredes não estruturais foi regulada pelo critério de isolamento térmico, e a das paredes estruturais foi dada pela resistência mecânica. Ainda, ressaltam que a redução da resistência ocorreu devido ao efeito de lascamento localizado, o que levou a parede portante ao colapso através dos efeitos de segunda ordem acentuados.

Todos os trabalhos citados demonstram a importância de se realizar estudos que avaliem o comportamento da alvenaria estrutural em situação de elevadas temperaturas, de forma a atribuir segurança às vidas humanas que farão uso deste sistema. Além disso, observa-se como são escassos os estudos nacionais no assunto, conhecendo-se pouco sobre a resistência ao fogo de paredes formadas por blocos, argamassas e demais materiais de construção brasileiros, sendo essa, uma das grandes causas da ausência de uma normatização de dimensionamento em situação de incêndio deste sistema estrutural no país.

3.5 NORMATIVAS DE ESTRUTURAS SOB INCÊNDIO NO BRASIL

Dentre as normas técnicas brasileiras que envolvem estruturas em situação de incêndio é importante citar as seguintes:

- ABNT NBR 14432:2001: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento;
- ABNT NBR 15200:2012: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio;
- ABNT NBR 14323:2013: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio;
- ABNT NBR 5628:2022: Componentes construtivos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo;

É válido esclarecer que a NBR 5628:2022 contempla as prescrições necessárias para a elaboração de ensaios de avaliação de resistência ao fogo de elementos estruturais, considerando entre eles, as paredes de alvenaria. Além disso,

a NBR 14432:2001, já mencionada anteriormente, determina o TRRF necessário aos elementos estruturais em função da classificação de ocupação/uso e da altura da edificação.

Ainda, é relevante mencionar, que mesmo com a existência da NBR 15200:2012 que permite o dimensionamento de estruturas de concreto (simples, armado, protendido e pré-moldado) em situação de incêndio e da NBR 14323:2013 que possibilita o dimensionamento das estruturas de aço e mistas de aço e concreto sob incêndio, no momento atual, ainda não se possui uma norma vigente no Brasil com o mesmo propósito para o sistema construtivo em alvenaria estrutural.

Na inexistência de uma normativa de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio, a Instrução Técnica nº 08/2019 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo recomenda a utilização do Eurocode 6 Part 1-2:2005 ou de normativa similar, reconhecida internacionalmente. O presente trabalho fará uso das prescrições de dimensionamento tabular do Eurocode 6, que é o código mais completo dos internacionalmente vigentes. Porém, é importante mencionar que a alvenaria é um sistema com características bastante diferentes conforme o seu país e região de origem, essas diferenças encontram-se nas espessuras, revestimentos, composições mineralógicas dos materiais e nos parâmetros de cálculo, tanto dos blocos como das paredes, sendo assim, necessárias adaptações, que permitam a aplicação dessa norma internacional aos projetos brasileiros (LEITE, 2018).

Acredita-se que a insuficiência de estudos experimentais na área da alvenaria estrutural e diversos outros fatores correlacionados promovem a inviabilização da normatização nacional. Essa situação é ocasionada pela escassez, devido aos elevados preços de compra, de aparatos técnicos nos laboratórios de pesquisa, como os fornos que promovem aquecimentos de amostras conforme a curva de incêndio-padrão (LEITE, 2018). Este fato, que impede o desenvolvimento de ensaios padronizados em paredes alternando espessuras, revestimentos, blocos e níveis de carregamento, impossibilita a compreensão do comportamento e a avaliação, de forma ampla, da resistência ao fogo das alvenarias estruturais brasileiras.

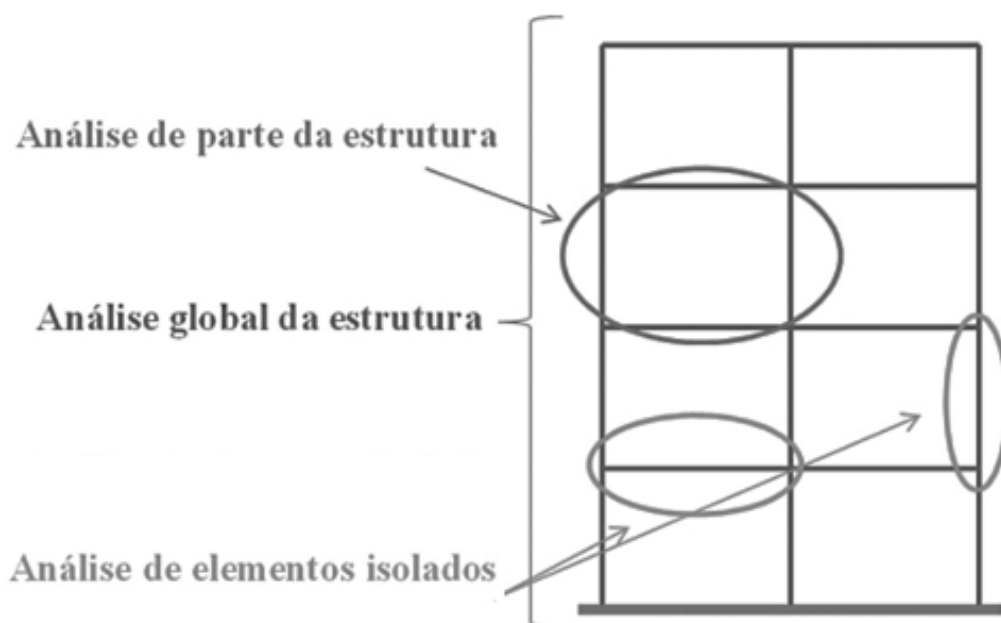
4 DIMENSIONAMENTO DA ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SEGUNDO O EUROCODE 6 PART 1-2:2005

Conforme já mencionado no capítulo anterior, atualmente, é necessário fazer uso da normativa internacional do Eurocode 6 Part 1-2:2005 para dimensionar paredes de alvenaria com funções estruturais, sob incêndio no Brasil. Dessa forma, nesse capítulo, será abordado sobre os métodos de dimensionamento, enfatizando de forma detalhada, sobre a aplicação do método tabular na verificação das paredes estruturais, descrevendo todas as suas etapas e parâmetros de cálculo.

4.1 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTOS PELO EUROCODE

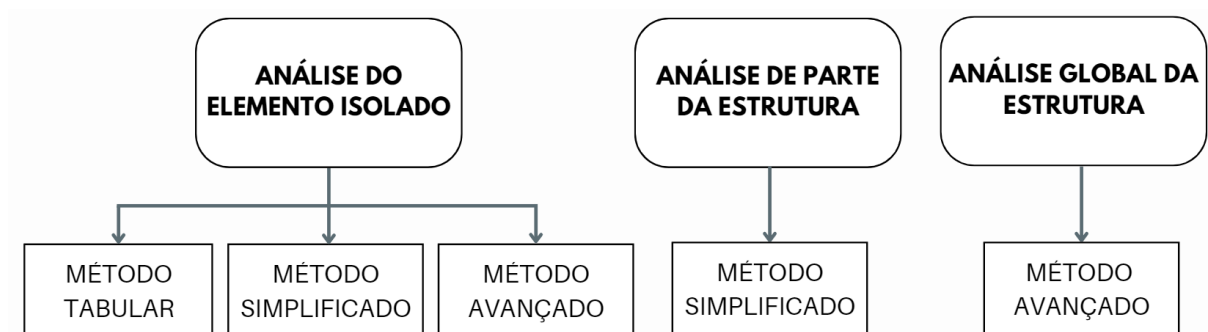
Segundo Eurocode 6 Part 1-2:2005, a verificação do projeto estrutural na situação de exposição ao fogo, pode ser realizada em diferentes níveis de análise, sendo eles, em ordem crescente de complexidade: a avaliação dos elementos estruturais de forma isolada; a verificação de parte da estrutura; e a análise global. Esses procedimentos de análise são ilustrados na Figura 14.

Figura 14 – Tipos de análise do projeto estrutural em situação de incêndio.



Cada um desses níveis de análise da estrutura, possibilitam a utilização de diferentes métodos de dimensionamento, que podem ser, o método tabular, o método simplificado de cálculo ou o método avançado de cálculo, todos baseados na exposição do elemento a curva de incêndio-padrão, dada pela Equação 3.1, apresentada no Capítulo 3. Quanto mais complexo o nível de análise da estrutura mais complexos também os métodos de avaliação de resistência ao fogo passíveis de serem utilizados. Essa relação entre os métodos de verificação e o nível de análise, são ilustrados na Figura 15.

Figura 15 – Métodos de dimensionamento em função do tipo de análise.



Fonte: Autora.

Conforme observa-se na Figura 15, ao realizar a análise das paredes de alvenaria estrutural de forma isolada, é possível dimensioná-las ao fogo utilizando qualquer um dos três métodos, sendo o mais simples e mais utilizado, o método tabular. Ainda, para analisar uma parte da estrutura, ou seja, um sistema formado por mais de uma parede, no mínimo deve-se utilizar um método simplificado de cálculo e para realizar a análise da estrutura como um todo, é necessário utilizar o método avançado.

O método simplificado de cálculo, é um método de verificação analítico, onde é necessário obter as distribuições de temperatura da estrutura analisada em situação de incêndio-padrão, para posterior determinação da sua perda de seção resistente (CARVALHO, 2019). Essas isotermas de temperatura da seção transversal do elemento são obtidas por meio de ensaios laboratoriais. Em virtude disso, o método é

de difícil utilização no Brasil, visto que, conforme já mencionado, há poucos laboratórios nacionais que possuem fornos capazes de realizar os ensaios em escala real. Além disso, esse método só é válido para paredes formadas pela combinação de blocos e argamassas mencionados na norma.

De forma similar, o método avançado de cálculo também é embasado na verificação analítica da estrutura, porém, é mais completo que o anterior, visto que necessita de modelagens numéricas em programas específicos de computador, para a representação do comportamento físico fundamental dos materiais da estrutura sob incêndio (ALBUQUERQUE, 2012). Este método conduz a análises mais realistas do desempenho da alvenaria estrutural em situação de incêndio, porém é muito complexo e demanda muito tempo de trabalho, o que dificulta sua utilização nos escritórios de engenharia. Além disso, nele é possível utilizar, na exposição da estrutura ao fogo, curvas de temperatura-tempo diferentes da curva do modelo de incêndio-padrão.

Já o método tabular é um método bastante prático e simples e é muito utilizado para a verificação de paredes isoladas. Nele, a determinação da resistência da parede estrutural sob incêndio, é realizada por meio de tabelas que determinam espessuras mínimas em função do tempo requerido de resistência ao fogo pré-estabelecido para o edifício.

Portanto, pela praticidade, o método tabular é o mais utilizado por projetistas para verificar, em forma de proteção passiva, as paredes de alvenaria portantes em situação de incêndio. Além disso, ele é o método mais bem descrito na normativa do Eurocode 6 Part 1-2:2005, logo mais facilmente compreendido pelos profissionais de engenharia. A seguir, serão descritas e apresentadas as etapas para a aplicação do método tabular em paredes de alvenaria estrutural, sob a ação do fogo.

4.2 MÉTODO TABULAR

4.2.1 Critérios de dimensionamento

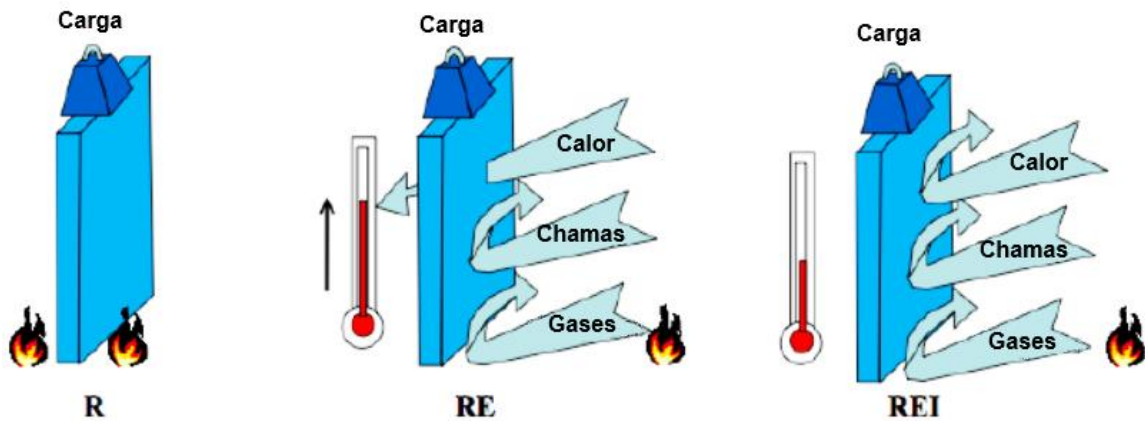
Inicialmente, se faz necessário compreender algumas das classificações e definições utilizadas no Eurocode 6 Part 1-2:2005 para analisar a segurança ao fogo das paredes de alvenaria. Segundo exposição ao modelo de incêndio-padrão, alguns critérios devem ser atendidos por elas, conforme sua função, sendo eles:

- R – Resistência mecânica: este critério é satisfeito quando a capacidade de suporte de carga da parede é mantida, durante um período de tempo requerido de exposição ao incêndio-padrão;
- I – Isolamento térmico: é atendido quando a temperatura máxima em qualquer ponto da superfície exposta ao fogo não excede 180 °C e a temperatura média nesta mesma superfície não seja superior a 140 °C;
- E – Estanqueidade: o critério é satisfeito quando é impedida a passagem de gases e chamas através da parede;
- M – Impacto mecânico: é atendido quando o elemento resiste a aplicação de um carregamento horizontal concentrado com características prescritas em norma durante exposição ao fogo.

Para dimensionar a alvenaria estrutural, os três primeiros critérios descritos são considerados básicos em caso de exposição ao fogo, podendo ser melhor compreendidos através da Figura 16 (CARVALHO, 2019).

A necessidade de atendimento aos critérios expostos, depende da função exercida pela parede na edificação. Ela pode desempenhar a função de suporte de carga, como é o caso das paredes que formam o sistema construtivo de alvenaria estrutural, evitando o colapso com o critério de resistência mecânica (R) e ainda, a parede pode possuir a função de separação, conforme menciona o Eurocode 6 (2005), mais conhecida nacionalmente como função de compartimentação, dessa forma, necessitando dos critérios de isolamento térmico (I) e de estanqueidade (E) da parede.

Figura 16 – Critérios de segurança ao fogo de paredes de alvenaria estrutural.



Fonte: Adaptado de CARVALHO (2019).

Assim, a norma propôs classificações conforme as funções construtivas das paredes e os critérios que devem ser atendidos por elas em situação de incêndio. Portanto, as tabelas de dimensionamento apresentadas, foram elaboradas para esses agrupamentos específicos, sendo necessário assim, conhecer a classificação da parede para iniciar sua verificação ao fogo. A Tabela 5 mostra essas categorias indicadas em norma.

Tabela 5 – Classificação das paredes segundo função e critério.

Função da parede	Critério
Estrutural apenas	R
Separação apenas	EI
Estrutural e separação	REI
Estrutural, separação e impacto mecânico	REI-M
Separação e impacto mecânico	EI-M

Fonte: Adaptado de EUROCODE 6 PART 1-2 (2005).

4.2.2 Combinações de ações

A obtenção das ações atuantes na estrutura em situação de incêndio, pelo método tabular, é bastante simples, sendo seus efeitos considerados constantes durante toda a exposição ao fogo (MOHAMAD, 2020). O valor da força normal atuante de cálculo em situação de incêndio ($N_{E_d,fi}$) é obtido por meio da Equação 4.1, que relaciona a força normal atuante em temperatura ambiente (N_{E_d}), com um fator de redução do carregamento devido à exposição ao fogo (η_{fi}).

$$N_{E_d,fi} = \eta_{fi} \cdot N_{E_d} \quad (4.1)$$

sendo:

N_{E_d} – valor da força normal atuante de cálculo em temperatura ambiente;

η_{fi} – fator de redução do nível de carregamento de projeto em situação de incêndio.

O fator de redução das ações (η_{fi}) é dado pela seguinte equação:

$$\eta_{fi} = \frac{N_{G,k} + \Psi_{fi} N_{Q1,k}}{\gamma_g N_{G,k} + \gamma_{q,1} N_{Q1,k}} \quad (4.2)$$

sendo:

$N_{G,k}$ – valor característico da ação permanente;

$N_{Q1,k}$ – valor característico da ação variável principal;

γ_g – fator de ponderação das ações permanentes;

$\gamma_{q,1}$ – fator de ponderação da ação variável principal;

Ψ_{fi} – fator de combinação para valores frequentes.

O Eurocode 6 (2005) permite utilizar o η_{fi} igual a 0,65, como uma alternativa mais simplificada para o cálculo das ações. Dessa forma, o carregamento vertical de compressão das paredes estruturais em temperatura ambiente será minorado em 35% do seu valor em temperatura ambiente para resultar no carregamento atribuído à situação de exposição ao fogo da parede em análise, ou seja:

$$N_{E_d,fi} = 0,65 \cdot N_{E_d} \quad (4.3)$$

sendo:

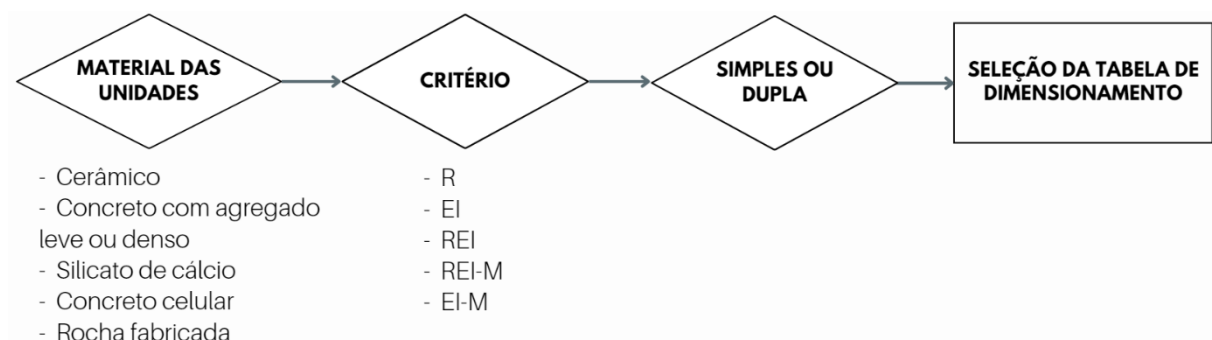
N_{E_d} – valor da força normal atuante de cálculo em temperatura ambiente.

4.2.3 Definição das tabelas de dimensionamento

Para verificar as paredes de alvenaria em situação de incêndio deve-se utilizar as tabelas presentes no Anexo B do Eurocode 6 Part 1-2:2005. Estas tabelas determinam a espessura mínima necessária da parede (t_F) para o período de resistência ao fogo requerido ($t_{fi,d}$). Faz-se necessário conhecer e calcular diversos parâmetros anteriormente, para o correto dimensionamento da parede, através da escolha de uma das 32 tabelas existentes no código.

As tabelas são divididas, inicialmente, conforme ilustrado na Figura 17, segundo o tipo de material das unidades utilizadas na parede, podendo ser alvenaria cerâmica, de concreto com agregado leve ou denso, de silicato de cálcio, de concreto celular ou de rocha fabricada. Após isso, deve-se conhecer a classificação da parede segundo o seu critério de dimensionamento, já explicado anteriormente e também se ela é de proposta simples ou dupla, geralmente nos projetos brasileiros paredes duplas não são utilizadas.

Figura 17 – Esquema para a seleção da tabela de dimensionamento do Eurocode 6.



Fonte: Autora.

Após a seleção da tabela correta a ser utilizada no dimensionamento, a partir da definição dos parâmetros apresentados na Figura 17, ainda é necessário determinar outros parâmetros contidos na tabela selecionada, tais como o grupo, resistência à compressão (f_b) e densidade (ρ) dos blocos utilizados na parede e o nível de carregamento (α), que será explicado posteriormente de forma detalhada. Definidos todos esses parâmetros, basta associar as linhas e colunas com essas informações para determinar a espessura mínima necessária da parede para o tempo de resistência ao fogo requerido. Para uma melhor compreensão, a Tabela 6 reproduz uma das tabelas do Eurocode 6 utilizadas no dimensionamento das paredes de alvenaria em situação de incêndio.

Tabela 6 – Exemplo de tabela utilizada no dimensionamento tabular.

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 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: EUROCODE 6 PART 1-2 (2005) *apud* LEITE; MORENO JÚNIOR; TORRES (2016).

É válido ressaltar, conforme se observa na Tabela 6, que as espessuras mínimas das paredes de alvenaria podem ser representadas em valores únicos ou em intervalos de valores. A representação dos intervalos válidos é feita através de uma barra entre os valores. Por exemplo, a designação de “90/100” significa que a

espessura da parede, segundo a norma, deve estar entre os valores de 90 e 100 mm para o correto dimensionamento.

Ainda, é necessário expor que as espessuras mínimas determinadas nas primeiras linhas de cada classificação, sem os parênteses, são os valores recomendados de espessura da parede bruta, excluindo quaisquer acabamentos. Já os valores das linhas de baixo, ou seja, ou valores de espessura representados entre parênteses, são os valores recomendados considerando que a parede possua revestimento de 1 cm em ambas as fases (EUROCODE 6 PART 1-2, 2005).

4.2.3.1 Adaptação dos blocos à realidade brasileira

Para realizar o processo de dimensionamento, um dos parâmetros a se determinar é o grupo ao qual o bloco de alvenaria estrutural brasileiro se encontra considerando a classificação de blocos do Eurocode 6 (2005). Neste trabalho, a adaptação será feita apenas para os blocos de concreto vazados, visto que estes estarão presentes no projeto modelo que será dimensionado posteriormente. Ainda, deve-se ressaltar que a norma europeia também separa internamente nas tabelas os blocos de concreto segundo o agregado constituinte ser denso ou leve, porém como no Brasil os mais comumente utilizados são os blocos com agregado denso, conhecido nacionalmente como agregado normal, estes serão enfatizados aqui.

Conforme já mencionado no Capítulo 2 deste trabalho, os blocos de concreto vazados brasileiros são designados, através da ABNR NBR 6136:2016, em diferentes tipos ou famílias conforme sua classe de resistência e suas dimensões padrão, vale ressaltar que todos eles possuem furos na vertical. Na dissertação de mestrado de Leite (2018) todos os blocos vazados presentes na norma brasileira foram ordenados em números conforme sua classe e dimensões, originando a Tabela 7.

Para ser possível adaptar estes blocos brasileiros ao padrão europeu, é necessário conhecer a classificação do *Eurocode 6 – Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures* (2005), para os blocos de concreto. A norma, ordena as unidades desenvolvidas

internacionalmente em grupos conforme o tipo de material em que são constituídos e o seu volume de vazios total, sendo esta classificação visível na Tabela 8.

Tabela 7 – Numeração dos blocos vazados de concreto da NBR 6136:2016.

Classe	Numeração	Largura (cm)	Altura (cm)	Comprimento (cm)
A	1	19	19	39
	2	14	19	39
	3	14	19	29
B	4	19	19	39
	5	14	19	39
	6	14	19	29
C	7	19	19	39
	8	14	19	39
	9	14	19	29
	10	11,5	19	39
	11	11,5	19	24
	12	11,5	19	36,5
	13	9	19	39
	14	9	19	29
	15	6,5	19	39

Fonte: Adaptado de LEITE (2018).

Tabela 8 – Classificação dos blocos de concreto segundo Eurocode 6 Part 1-1:2005.

	Materiais e limites para blocos de alvenaria				
	Grupo 1	Blocos	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
			Furos verticais		Furos horizontais
Volume total de vazios (% do vol. bruto)	≤ 25	Cerâmicos	$> 25 ; \leq 55$	$\geq 25 ; \leq 70$	$> 25 ; \leq 70$
		Silicato de Cálcio	$> 25 ; \leq 55$	Não utilizado	Não utilizado
		Concreto	$> 25 ; \leq 60$	$> 25 ; \leq 70$	$> 25 ; \leq 50$

Fonte: Adaptado de EUROCODE 6 PART 1-1 (2005).

A partir dessas informações, Leite (2018) determinou o volume de vazios dos blocos brasileiros e classificou-os nos grupos determinados pelo Eurocode 6 Part 1-1:2005, possibilitando assim, a formação da Tabela 9, que de maneira simples, adapta

os blocos de concreto brasileiros aos diferentes grupos de blocos de concreto do Eurocode 6 (2005), necessários ao dimensionamento pelo método tabular. Observa-se que a maioria dos blocos brasileiros se enquadram no Grupo 2 da classificação de blocos do Eurocode 6 Part 1-1:2005.

Tabela 9 – Classificação dos blocos brasileiros em grupos conforme o Eurocode 6.

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

Fonte: Adaptado de LEITE (2018).

4.2.3.2 Cálculo do nível de carregamento – α

O nível de carregamento da parede de alvenaria estrutural (α) é o último parâmetro que deve ser estabelecido para posterior determinação da espessura mínima necessária da parede, conforme exemplo apresentado na Tabela 6. O valor de alfa de acordo com o Eurocode 6 Part 1-2:2005, pode ser classificado em dois possíveis intervalos de valores, sendo eles: $\alpha \leq 1,0$ e $\alpha \leq 0,6$. Cada um destes intervalos é indicado em uma linha distinta da tabela, gerando diferentes valores de espessura para a parede.

Este parâmetro alfa é determinado por meio da razão entre a força normal atuante de cálculo em situação de incêndio ($N_{E_d,fi}$) e a força normal resistente de cálculo da parede à temperatura ambiente (N_{R_d}), conforme a Equação 4.6:

$$\alpha = \frac{N_{E_d,fi}}{N_{R_d}} \quad (4.6)$$

A força normal resistente em situação de incêndio ($N_{E_d,fi}$), já foi explicada anteriormente no item 4.1.2 deste trabalho.

Logo, deve-se conhecer o valor de cálculo da força normal resistente da parede à temperatura ambiente (N_{R_d}) para a determinação do nível de carregamento (α). Este valor é descrito na norma europeia *Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 3: Simplified calculation methods for unreinforced masonry structures* (2006), através da Equação 4.7:

$$N_{R_d} = \phi_s \cdot f_d \cdot A \quad (4.7)$$

sendo:

ϕ_s – fator de redução de capacidade que incorpora efeitos de esbeltez e excentricidade de carregamento;

f_d – resistência à compressão de projeto da alvenaria;

A – área da seção bruta horizontal carregada da parede.

A área da seção bruta horizontal carregada da parede (A) é a própria área superior total da parede carregada, sendo calculada pela multiplicação da espessura da parede pelo seu comprimento total.

O fator de redução devido a esbeltez (ϕ_s) pode ser determinado por meio da Equação 4.8, também obtida do Eurocode 6 Part 3:2006, para paredes intermediárias:

$$\phi_s = 0,85 - 0,0011 \left(\frac{h_{ef}}{t_{ef}} \right)^2 \quad (4.8)$$

sendo:

h_{ef} – altura efetiva da parede;

t_{ef} – espessura efetiva da parede.

É válido ressaltar que para paredes de proposta simples, as mais utilizadas no Brasil, o valor da espessura efetiva da parede (t_{ef}) é igual ao da sua espessura bruta (t), ou seja, a dimensão da largura do bloco de concreto especificado em projeto. Já o valor da altura efetiva da parede (h_{ef}) deve ser determinado através da Equação 4.9, também especificada pela normativa do Eurocode 6 Part 3:2006.

$$h_{ef} = \rho_n \cdot h \quad (4.9)$$

sendo:

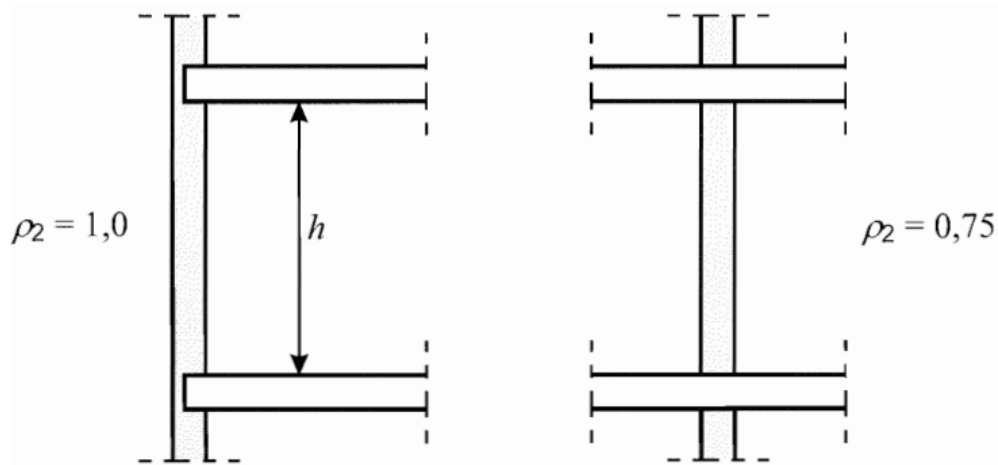
h – altura do andar;

ρ_n – fator de redução que depende das condições de vinculação da parede.

Logo, para determinar a altura efetiva da parede (h_{ef}), deve-se primeiramente observar as condições de vinculação de suas bordas (ρ_n). O Eurocode 6 Part 3:2006 determina que para paredes com restrição de rotação e deslocamento lateral nas bordas inferior e superior $\rho_n = \rho_2$, possui-se dois valores possíveis de ρ_2 em norma, sendo eles: $\rho_2 = 1,0$ se a parede for contínua entre pavimentos e $\rho_2 = 0,75$, para o caso de a parede ser restringida pelas lajes e não contínua, realidade mais comum nos prédios brasileiros. Esses dois casos de restrição podem ser melhor compreendidos através da Figura 18.

Dessa forma, é possível calcular o fator de redução ϕ_s , um dos parâmetros necessários à Equação 4.7 para a obtenção do valor de cálculo da força normal resistente da parede à temperatura ambiente (N_{R_d}).

Figura 18 – Valores do fator de redução devido as condições de vinculação da parede.



Fonte: EUROCODE 6 PART 3 (2006).

O último parâmetro da Equação 4.7 que precisa ser determinado é a resistência à compressão de cálculo da alvenaria (f_d), que pode ser obtida através da Equação 4.10:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (4.10)$$

sendo:

f_k – resistência à compressão característica da alvenaria;

γ_M – fator relevante parcial dos materiais.

O fator relevante parcial dos materiais (γ_M), conforme menciona o item 2.4.3 do Eurocode 6 Part 1-1:2005, é função do material constituinte da alvenaria e também de classes, relacionadas com o controle executivo dos materiais em obra. Os valores de γ_M variam de 1,15 a 3,0, sendo de difícil determinação, visto que as classes de controle de execução são determinadas internamente pelos países europeus e não se possuem maiores informações sobre elas no código. Dessa forma, utilizou-se o valor de $\gamma_M = 1,5$ que é designado para a primeira classe de controle de execução presente no Eurocode 6 Part 1-1:2005.

A utilização deste valor pode ser vista como razoável, devido à presença, na normativa brasileira de dimensionamento de alvenaria estrutural, ABNT NBR 16868-1: 2020, do coeficiente ponderador das resistências γ_m , que para combinações últimas excepcionais de alvenaria estrutural também possui o valor de 1,5, sendo esta ação excepcional a própria situação de incêndio da estrutura. O γ_m da norma brasileira possui a mesma função do γ_M do Eurocode, a de minorar as resistências características e dessa forma, transformá-las em resistências de cálculo.

Por fim, ainda é necessário determinar o fator resistência à compressão característica da alvenaria (f_k) para a obtenção da resistência da parede (N_{Rd}), que conforme se observa no Eurocode 6 Part 1-1:2005, depende da resistência dos blocos e da argamassa, através da Equação 4.11.

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3} \quad (4.11)$$

sendo:

f_b – resistência à compressão média normalizada das unidades;

f_m – resistência à compressão média da argamassa;

K – constante dada pela tabela 3.3 do Eurocode 6 Part 1-1:2005.

A resistência à compressão média das unidades (f_b) de acordo com o Eurocode 6 Part 1-1:2005 é uma resistência referente a um quantil de 50% da distribuição de densidade de probabilidade dos blocos produzidos. Porém no Brasil, este parâmetro é substituído pela resistência característica dos blocos à compressão (f_{bk}), dado como um valor referente ao quantil de 5% da distribuição de densidade de probabilidade dos blocos. Como a resistência da alvenaria é muito dependente da resistência do bloco, o fato descrito anteriormente torna impraticável a utilização da Equação 4.11 para a determinação da resistência da alvenaria brasileira, visto que seria necessário estipular um valor de resistência média sem uma base sólida por trás deste dado.

Dessa forma, para facilitar a adaptação do projeto estrutural brasileiro às referências do Eurocode 6 Part 1-2:2005, a Equação 4.11 será substituída pela

Equação 4.12, presente na normativa brasileira ABNT NBR 16868-1:2020, que determina o valor de resistência característica da alvenaria (f_k), através da relação:

$$f_k = 0,7 \cdot f_{pk} \quad (4.12)$$

sendo:

f_{pk} – resistência à compressão característica do prisma.

Esta adaptação é possível, pois ao se realizar o projeto estrutural de alvenaria brasileiro, deve-se especificar, conforme a necessidade da estrutura, valores de resistência característica dos blocos (f_{bk}), de resistência da argamassa (f_a), de resistência característica do graute (f_{gk}) e também se determina a resistência necessária do prisma (f_{pk}). O prisma pode ser definido como um corpo de prova formado pela união de dois blocos através de uma junta de argamassa, sendo um parâmetro muito importante visto que se relaciona com a resistência característica à compressão da alvenaria (f_k).

Além disso, a ABNT NBR 16868-1:2020, traz em seu Anexo F, uma tabela com valores de referência para a especificação das resistências dos materiais em função da resistência do bloco. Essa tabela é utilizada por calculistas estruturais para a determinação da resistência do prisma (f_{pk}) a partir da resistência especificada para o bloco de concreto (f_{bk}), por meio da relação f_{pk}/f_{bk} . Uma parte reduzida dessa tabela com valores de referência para o bloco de concreto vazado de 14 cm de espessura por 39 cm de comprimento, pode ser observada na Figura 19.

Figura 19 – Recomendação para especificação dos materiais de alvenaria estrutural.

f_{bk}	f_a	f_{gk}			f_{pk}	f_{pk}^*	Espessura mínima de parede do bloco mm
MPa			f_{pk}/f_{bk}	f_{pk}^*/f_{pk}	MPa		
3,0	4,0	15,0	0,80	2,00	2,4	4,8	25
4,0	4,0	15,0	0,80	2,00	3,2	6,4	25
6,0	6,0	15,0	0,75	1,75	4,5	7,9	25

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16868-1 (2020).

5 ESTUDO DE CASO: ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

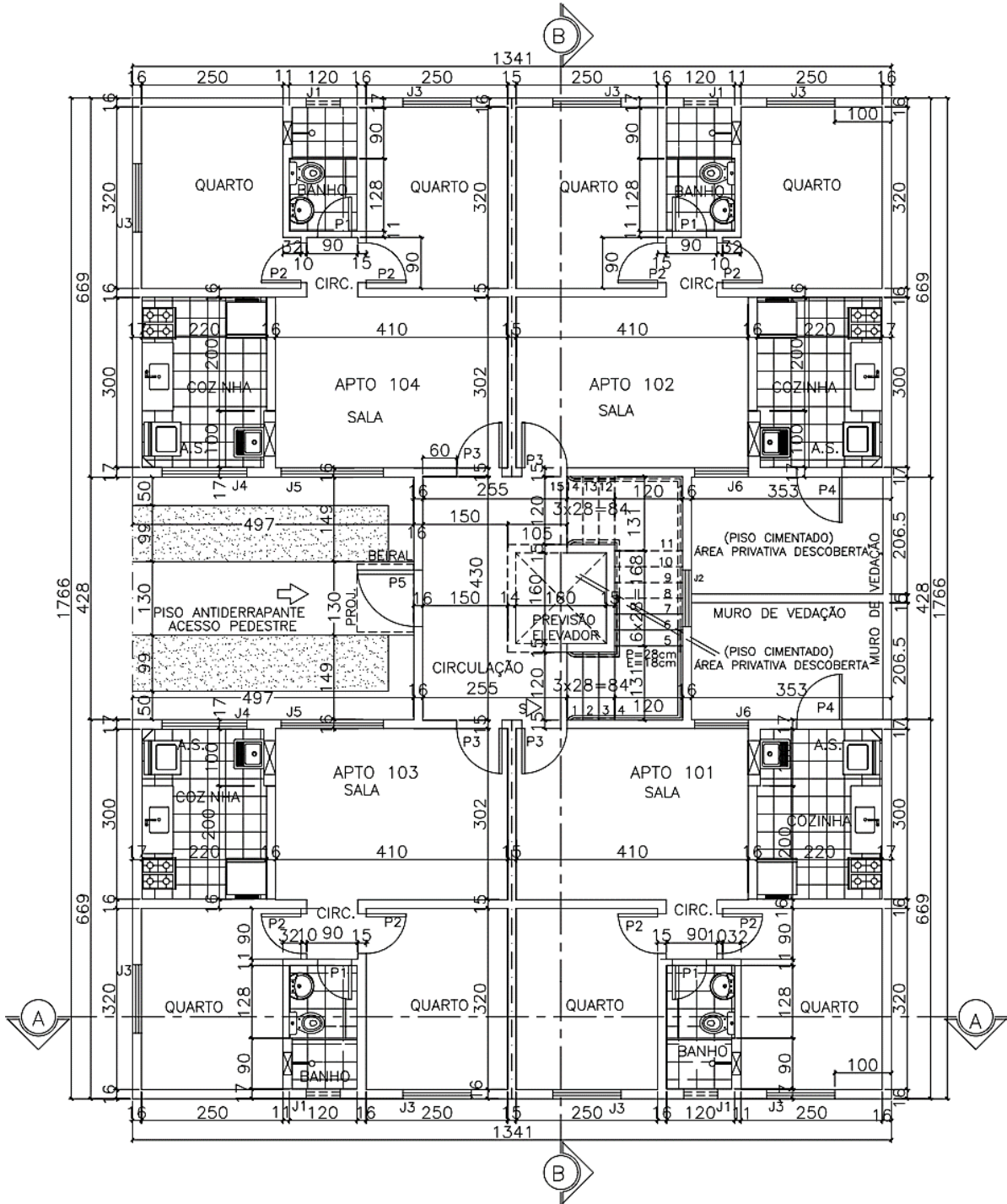
Neste capítulo, inicialmente será apresentado o projeto estrutural e arquitetônico do edifício modelo e também o carregamento característico total das paredes térreas. Na sequência será iniciado o dimensionamento em situação de incêndio, por meio da definição do TRRF e também de um roteiro de cálculo bastante detalhado com a apresentação e análise dos resultados obtidos ao final do capítulo.

5.1 EDIFÍCIO MODELO

O edifício modelo que será utilizado para demonstrar o dimensionamento em situação de incêndio das paredes de alvenaria estrutural é de uso residencial e possui no total quatro pavimentos. Este já se encontra dimensionado à temperatura ambiente em conformidade com a ABNT NBR 16868-1:2020.

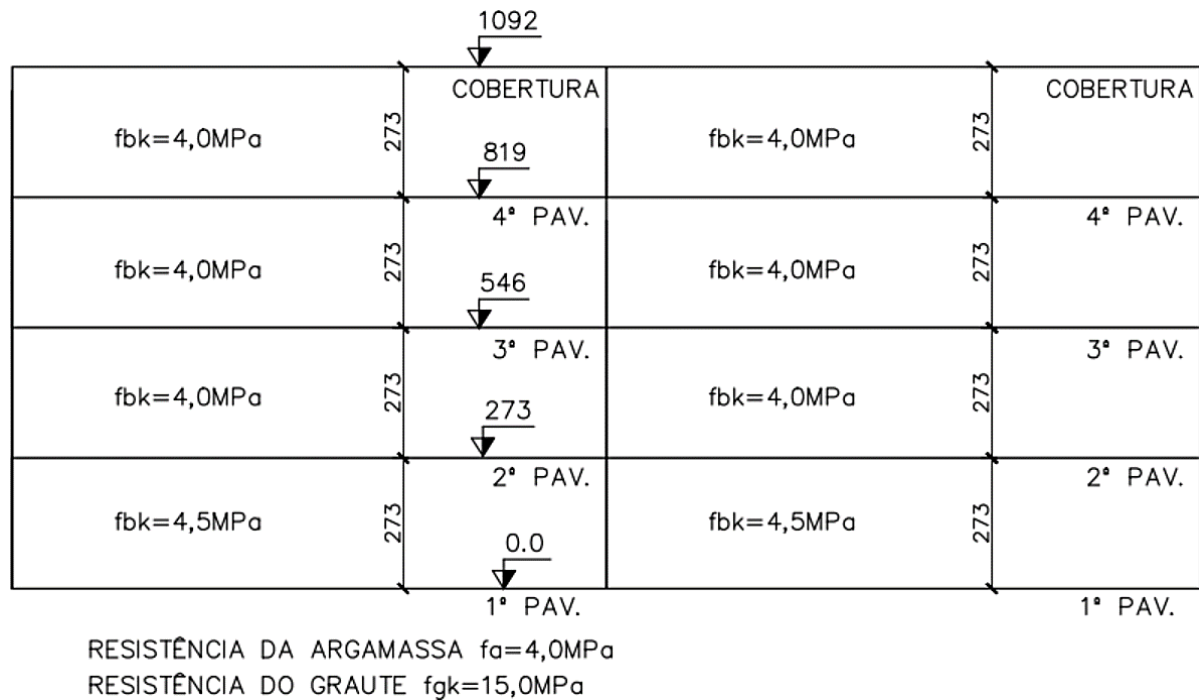
Este edifício segue representado, através da Figura 20, pela planta baixa arquitetônica. Na sequência, será ilustrado o projeto estrutural, por meio do corte esquemático da Figura 21, que possui especificados parâmetros de resistência em situação normal e também através da Figura 22 com a representação da planta de formas do 2º pavimento, onde se apresenta a identificação e numeração das paredes que serão dimensionadas.

Figura 20 – Planta baixa arquitetônica do edifício modelo (sem escala).



Fonte: Autora.

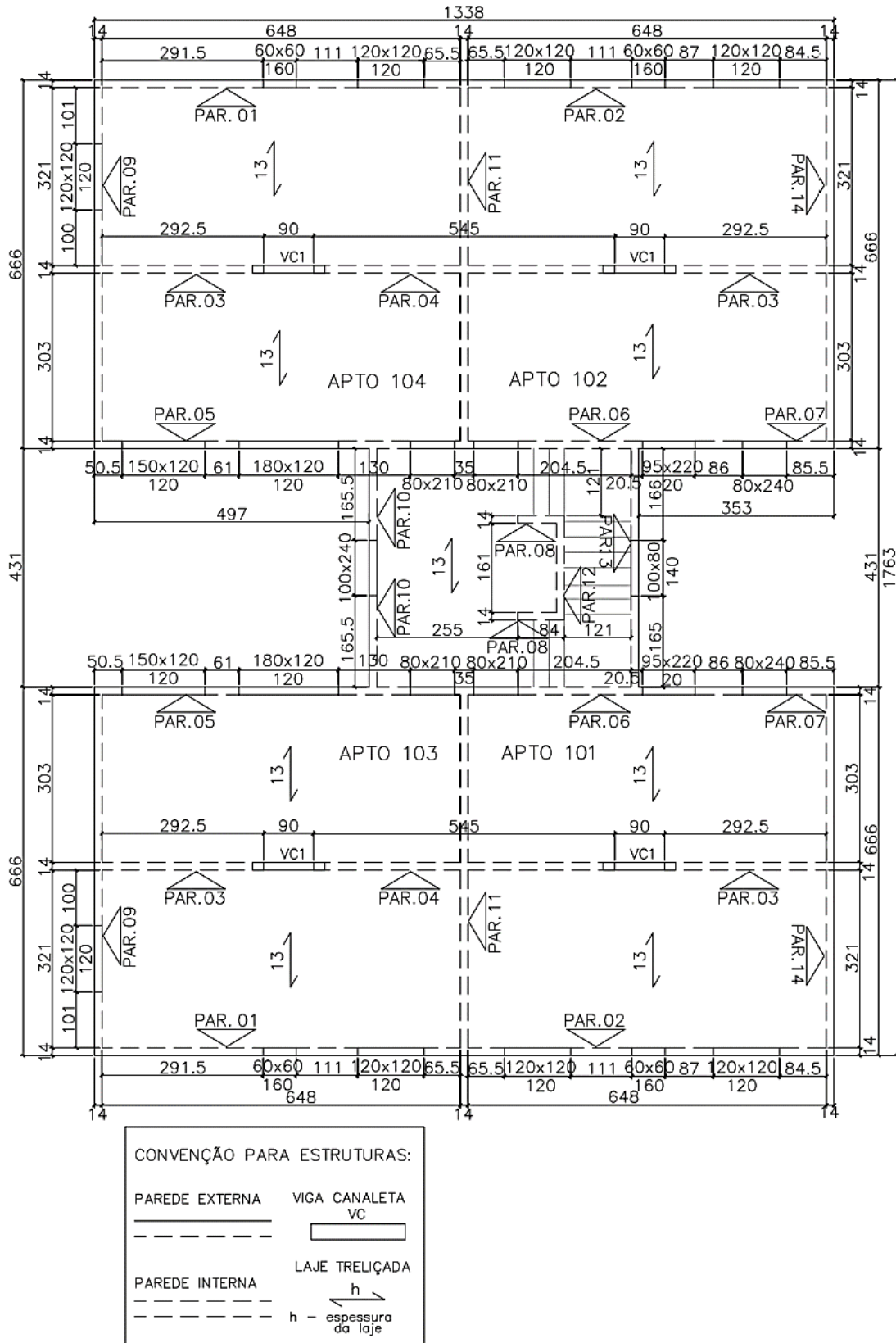
Figura 21 – Corte esquemático do edifício modelo (sem escala).



Fonte: Autora.

É válido ressaltar que a planta de formas estruturais do 2º pavimento, Figura 22, representa as lajes do 2º pavimento e as paredes do 1º pavimento, também chamado de térreo. A planta de formas deste pavimento foi a apresentada neste trabalho tendo em vista a realização do dimensionamento apenas das paredes do térreo. Essa escolha advém do fato de por serem as paredes mais solicitadas de toda edificação, elas acabarão por resultar nas espessuras mínimas mais críticas de dimensionamento, gerando a situação mais desfavorável de projeto para o dimensionamento das paredes em situação de incêndio, sendo válida também, dessa forma, para as paredes dos pavimentos acima. Isso se deve principalmente ao fato de que, no Brasil, há uma tendência de manter-se a mesma espessura das paredes estruturais entre pavimentos e assim, o dimensionamento das demais paredes estaria à favor da segurança considerando a situação mais crítica.

Figura 22 – Planta de formas do 2º pavimento do edifício modelo (sem escala).



Fonte: Autora.

A seguir, são apresentadas algumas informações importantes ao dimensionamento em situação de incêndio das paredes do térreo do edifício modelo:

- Pé-direito arquitetônico ou altura do andar (h): 2,60 m
- Espessura efetiva das paredes (t_{ef}): 14 cm
- Dimensões do bloco de concreto estrutural especificado: 14 x 19 x 39 cm
- Resistência característica do bloco (f_{bk}): 4,5 MPa
- Relação f_{pk}/f_{bk} : 0,8

Além disso, foram determinadas as cargas características de compressão atuantes nas paredes (N_{E_k}), por meio do método de paredes isoladas. O parâmetro N_{E_k} obtido para cada uma das 14 paredes térreas pode ser visualizado na Tabela 10, sendo este o resultado da soma do carregamento permanente e acidental advindo das reações das lajes e do peso próprio das paredes.

Tabela 10 – Carregamento característico de compressão (N_{E_k}) das paredes do térreo.

Parede	Reação da laje (kN/m)	Peso próprio da parede (kN/m)	Carga nominal de compressão (N_{E_k}) (kN/m)
01	68,63	34,09	102,72
02	81,39	40,93	122,32
03	83,72	23,47	107,19
04	75,13	23,35	98,48
05	100,96	49,33	150,29
06	104,70	56,52	161,22
07	59,54	24,09	83,63
08	66,42	22,57	88,99
09	13,24	28,75	41,98
10	19,42	26,78	46,20
11	17,54	25,00	42,54
12	12,20	22,57	34,77
13	13,85	26,78	40,63
14	18,75	50,94	69,69

Fonte: Autora.

5.2 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO DO EDIFÍCIO MODELO

Inicialmente, deve-se determinar o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) necessário ao edifício modelo, que também deve ser assegurado aos seus elementos estruturais, as paredes de alvenaria. Para isso, faz-se necessário, conforme já mencionado, utilizar a tabela presente na Instrução Técnica nº 08/2019 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, presente também no Anexo A deste trabalho.

Anteriormente à utilização da tabela, alguns parâmetros devem ser determinados, sendo eles o grupo e a altura da edificação. Segundo a Tabela 2, apresentada anteriormente no capítulo 3 deste trabalho, o edifício se enquadra, ao apresentar proposta de ocupação/uso residencial, no grupo A. Além disso, a altura da edificação, segundo o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo é de 8,19 m, sendo esta medida do piso do último pavimento habitado até o piso de saída para o exterior. Com estes dados, é possível entrar na tabela, presente no Anexo A deste trabalho e determinar o TRRF mínimo de 30 min para as paredes de alvenaria do edifício modelo.

Ainda, deve-se ressaltar que conforme a Instrução Técnica nº 09/2018 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo intitulada “Compartimentação horizontal e compartimentação vertical”, as paredes divisórias entre apartamentos residenciais e entre apartamentos e áreas comuns, devem possuir TRRF de no mínimo 60 min. Dessa forma, para facilitar os cálculos, mantendo o dimensionamento a favor da segurança, se utilizará o TRRF de 60 min para todas as paredes térreas.

5.3 DIMENSIONAMENTO DAS PAREDES CONFORME TRRF ESTIPULADO

5.3.1 Definições iniciais

O material dos blocos para todas as paredes térreas é de concreto com agregado denso, o que resulta na utilização das tabelas que iniciam com a definição

N.B.3. Ainda, a parede é de proposta simples, como todas as demais do projeto modelo.

Além disso, o critério de dimensionamento para as paredes em análise deve ser o critério REI, necessitando-se a manutenção da resistência mecânica, do isolamento térmico e da estanqueidade da parede em situação de incêndio. Todos esses dados auxiliam na escolha da Tabela N.B.3.2 do Eurocode 6 Part 1-2:2005, para a verificação das paredes térreas, a qual encontra-se para consulta no Anexo B deste trabalho.

Em relação ao bloco utilizado nas paredes térreas, houve a necessidade de se fazer uma adaptação, conforme explicitado no item 4.2.3.1 do capítulo 4. De acordo com as dimensões e resistência característica do bloco (ver item 5.1), a NBR 6136:2016 o classifica como uma unidade pertencente a Classe B. Portanto comparando-se com as unidades apresentados na Tabela 9, é possível classificá-lo como um bloco do Grupo 2 do Eurocode 6 Part 1-1:2005.

Por fim, é importante salientar que, para exemplificar a aplicação do método tabular de forma detalhada, foram escolhidas duas paredes (05 e 14), visto que cada uma apresentou uma classificação diferente de nível de carregamento (α) conforme o Eurocode 6 Part 1-2:2005. A partir do apresentado para essas duas paredes, é possível reproduzir, de forma muito similar, o dimensionamento de todas as demais. Ainda, ressalta-se que ao final deste capítulo, será apresentado um quadro-resumo contendo o dimensionamento de todas as paredes do térreo.

5.3.2 Ação atuante em situação de incêndio

A Tabela 11 apresenta o levantamento das forças atuantes em situação de incêndio ($N_{E_d,fi}$) para as duas paredes analisadas, a partir da carga característica de compressão (N_{E_k}) apresentada na Tabela 10. Essas definições também são válidas para a obtenção da ação atuante sob incêndio das demais paredes térreas.

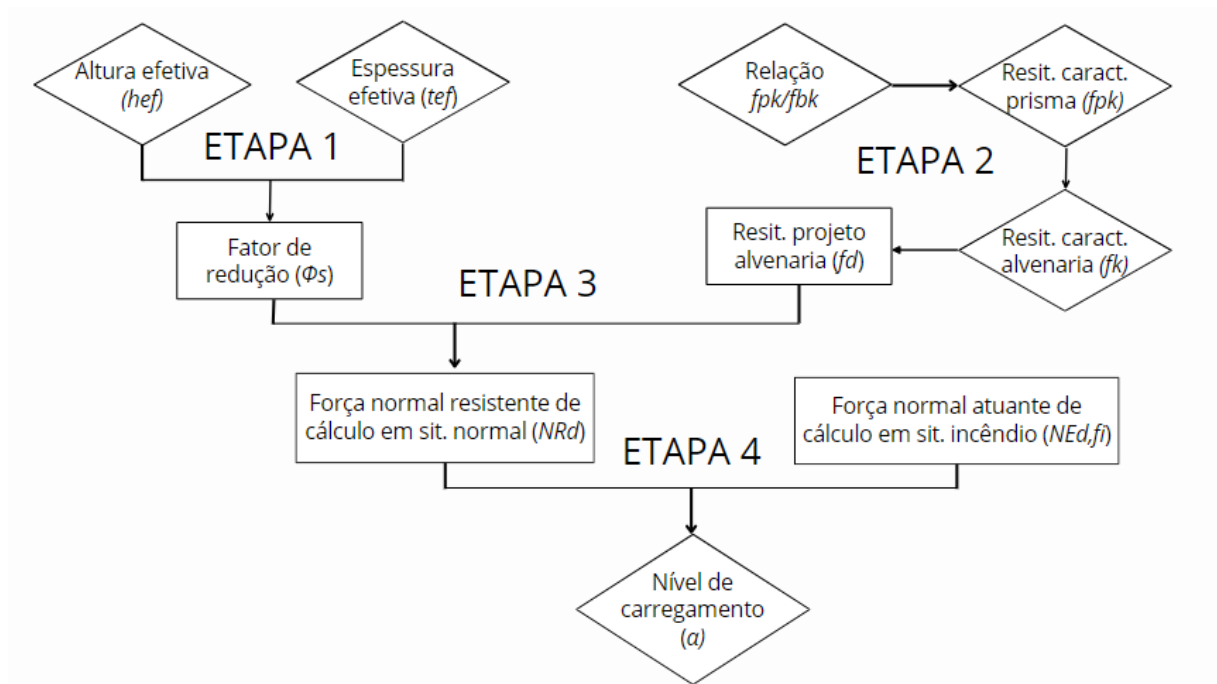
Tabela 11 – Levantamento das ações em situação de incêndio ($N_{Ed,fi}$).

Parede	N_{Ek} (kN/m)	$N_{Ed} = 1,4 N_{Ek}$ (kN/m)	$N_{Ed,fi} = 0,65 N_{Ed}$ (kN/m)
05	150,29	210,41	136,76
14	69,69	97,57	63,42

Fonte: Autora.

5.3.3 Nível de carregamento – α

A Figura 23 ilustra um fluxograma esquemático das etapas necessárias para a obtenção do nível de carregamento (α). Salienta-se que as etapas 1 a 3 são exatamente iguais tanto para as paredes em análise (05 e 14), como também para as demais paredes do pavimento térreo, e, portanto, os cálculos necessários serão apresentados de forma única.

Figura 23 – Fluxograma esquemático para a obtenção do nível de carregamento (α).

Fonte: Autora.

Na etapa 1, inicialmente, faz-se necessário determinar a altura efetiva da parede (h_{ef}) através da altura do andar (h) de 2,60 m (ver item 5.1). A partir do valor de h_{ef} e da espessura efetiva da parede (t_{ef}), que possui 0,14 m e pode ser observada no item 5.1, é possível calcular o fator de redução ϕ_s , conforme apresentado a seguir:

$$h_{ef} = 0,75 \cdot 2,60 = 1,95 \text{ m} \quad (5.1)$$

$$\phi_s = 0,85 - 0,0011 \left(\frac{1,95}{0,14} \right)^2 = 0,637 \quad (5.2)$$

Na etapa 2, é necessária a determinação da resistência do prisma, obtida por meio da relação f_{pk}/f_{bk} , utilizada durante a elaboração do projeto em temperatura ambiente. Após se conhecer a relação f_{pk}/f_{bk} , determina-se a resistência característica da alvenaria (f_k) e, na sequência, a resistência à compressão de projeto da alvenaria (f_d) como segue:

$$f_{pk} = 0,8 f_{bk} = 0,8 \cdot 4,5 = 3,60 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

$$f_k = 0,7 \cdot 3,60 = 2,52 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

$$f_d = \frac{2,52}{1,5} = 1,68 \text{ MPa} \quad (5.5)$$

Na etapa 3, a partir da multiplicação de ϕ_s por f_d e ainda pela área da seção bruta carregada da parede (A), onde esta última será substituída pela espessura da parede (t_{ef}), é possível calcular a força normal resistente de cálculo da parede (N_{R_d}). Portanto, a força resistente de cálculo à temperatura ambiente para todas as paredes térreas é:

$$N_{R_d} = 0,637 \cdot 1,68 \cdot 140 = 149,82 \text{ kN/m} \quad (5.6)$$

Finalmente, na etapa 4, consegue-se definir o nível de carregamento da parede (α) a partir da relação entre a força normal solicitante de cálculo em situação de incêndio ($N_{E_{d,fi}}$), apresentada anteriormente na Tabela 11, e a força normal resistente

de cálculo à temperatura ambiente (N_{Rd}). A Tabela 12 apresenta o valor de α para as duas paredes analisadas, juntamente com a classificação deste parâmetro segundo o Eurocode 6 Part 1-2:2005.

Tabela 12 – Nível de carregamento (α) das paredes analisadas.

Parede	$N_{Ed,fi}$ (kN/m)	N_{Rd} (kN/m)	$\alpha = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}}$	Classificação de α conforme Eurocode 6 Part 1-2:2005
05	136,76	149,82	0,913	$\leq 1,0$
14	63,42		0,423	$\leq 0,6$

Fonte: Autora.

5.3.4 Espessura mínima necessária para o TRRF estipulado

Definidos o grupo dos blocos, o tipo de agregado, o nível de carregamento (α) e o TRRF, encontra-se a espessura mínima necessária das paredes, utilizando-se a Tabela N.B.3.2 do Eurocode 6 Part 1-2:2005, presente no Anexo B deste trabalho.

Conforme já comentado anteriormente, utilizou-se blocos do Grupo 2 confeccionados com agregado denso/normal e TRRF = 60 min. Portanto, devido a diferença na classificação do nível de carregamento ($\alpha \leq 1,0$ e $\alpha \leq 0,6$), o intervalo de espessuras mínimas necessárias ao desempenho das paredes 05 e 14, em situação de incêndio, encontra-se entre 10/17 e 10/14 cm, respectivamente, considerando paredes sem acabamentos.

5.3.5 Resultados gerais do dimensionamento

A Tabela 13 apresenta os resultados de todas as paredes do pavimento térreo, seguindo-se o mesmo roteiro de cálculo descrito nos itens anteriores.

Tabela 13 – Resultados gerais do dimensionamento das paredes térreas.

Parâmetros	Paredes													
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
$N_{E_k}(kN/m)$	102,72	122,32	107,19	98,48	150,29	161,22	83,63	88,99	41,98	46,20	42,54	34,77	40,63	69,69
$N_{E_d}(kN/m)$	143,81	171,25	150,07	137,87	210,41	225,71	117,08	124,59	58,77	64,68	59,56	48,68	56,88	97,57
$N_{E_{d,fi}}(kN/m)$	93,48	111,31	97,54	89,62	136,76	146,71	76,10	80,98	38,20	42,04	38,71	31,64	36,97	63,42
$h_{ef}(cm)$	1,95													
ϕ_s	0,637													
Unidades	Concreto com agregado denso do Grupo 2													
$f_{bk}(MPa)$	4,50													
$f_{pk}(MPa)$	3,60													
$f_k(MPa)$	2,52													
$f_d(MPa)$	1,68													
$N_{R_d}(kN/m)$	149,82													
Critério	REI													
TRRF (min)	60													
$t = t_{ef}(cm)$	14													
α	0,624	0,743	0,651	0,598	0,913	0,979	0,508	0,541	0,255	0,281	0,258	0,211	0,247	0,423
Relação de α	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	$\leq 0,6$	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$
$t_F(cm)$	10/17	10/17	10/17	10/14	10/17	10/17	10/14	10/14	10/14	10/14	10/14	10/14	10/14	10/14
Verificação	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok

Fonte: Autora.

Logo, por meio da análise da Tabela 13, é possível verificar que o intervalo de espessuras necessárias para as paredes, em caso de solicitação ao fogo (t_F), se enquadra no valor de espessura de dimensionamento das paredes em situação normal ($t = t_{ef}$). As dimensões recomendadas pelo Eurocode 6 Part 1-2:2005, dependendo do nível de carregamento (α) variaram entre espessuras de 10/14 e 10/17 cm, ambas coincidindo com a espessura de projeto da parede ($t = t_{ef}$) de 14 cm, valor dado pela largura do bloco de concreto de projeto, segundo ABNT NBR 16868:2020. Dessa forma, todas as paredes encontram-se em conformidade com a verificação segundo critério REI do Eurocode 6 Part 1-2:2005 em situação de incêndio, para um TRRF de 60 min.

Além disso, conforme já citado, o dimensionamento foi realizado apenas para as paredes do térreo, visto elas apresentarem a situação mais crítica de carregamento e, portanto, também de espessura mínima. Além disso, pôde-se observar por meio dos resultados obtidos neste trabalho e também através do estudo de Medeiros, Parsekian e Moreno Jr. (2019), que uma forma de aumentar ainda mais a praticidade do método para o engenheiro projetista, é realizar apenas o dimensionamento da parede térrea mais carregada e aplicar a dimensão recomendada para as demais paredes do projeto.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A ampla utilização do sistema em alvenaria estrutural no Brasil, clama pelo desenvolvimento de projetos estruturais com características de segurança que enquadrem todas as possíveis situações que venham a solicitar a estrutura durante sua vida útil, incluindo nelas a situação de incêndio. Deste modo, é necessário que os elementos estruturais mantenham sua resistência, por um período de tempo requerido (TRRF), possibilitando a fuga dos ocupantes da edificação em caso de sinistro.

Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo dimensionar paredes térreas de um edifício modelo, executado em alvenaria estrutural, sob ação térmica, através do método tabular da norma europeia Eurocode 6 Part 1-2:2005. Assim, realizou-se ao longo do trabalho, um roteiro de cálculo bastante detalhado, de forma a auxiliar a área técnica e científica na interpretação do código e na efetiva verificação em projeto, da espessura mínima necessária da parede, conforme TRRF estipulado.

Em relação à espessura mínima necessária da parede em situação de incêndio, observou-se que todas as paredes dimensionadas em temperatura ambiente atenderam com segurança esse requisito, sem a necessidade de se propor alguma solução, como por exemplo, o aumento da espessura da parede, em caso de não atendimento.

Ainda, observou-se que a aplicação do método tabular do Eurocode 6 Part 1-2:2005 dá margem para uma grande variabilidade, tanto no intervalo de espessura da parede, quanto no valor de TRRF. No presente estudo, o intervalo de espessuras para atendimento chegou a variar entre 10 a 17 cm em algumas paredes, para o TRRF estipulado. Para TRRFs maiores, a partir de 120 min, em alguns casos, a variação do intervalo de espessura chega a 10 cm. Além disso, notou-se que a espessura utilizada no trabalho (14 cm) atenderia, desde o TRRF de 30 min até 180 min. Este intervalo amplo no valor de TRRF, deve-se ao fato deste parâmetro não corresponder ao tempo de resistência ao fogo do elemento estrutural e sim representar um valor tabelado que varia conforme a altura e o uso/ocupação da edificação analisada.

Deve-se ressaltar ainda, que a principal dificuldade encontrada no trabalho foi a adaptação necessária de materiais e parâmetros de cálculo, da norma brasileira ABNT NBR 16868-1:2020, para as normas europeias. Destaca-se que os materiais, projetos e métodos construtivos variam de país para país, de modo que, acredita-se que apenas uma normativa nacional poderá apresentar resultados mais realistas e precisos ao cotidiano brasileiro.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para implementar em trabalhos a serem desenvolvidos futuramente na área, tem-se:

- realizar o dimensionamento, em situação de incêndio, das paredes dos demais pavimentos do edifício modelo, utilizando o método tabular do Eurocode 6 Part 1-2:2005;

- aplicar o método tabular do Eurocode 6 Part 1-2:2005 em projetos de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos;

- realizar o dimensionamento, em situação de incêndio, das paredes do projeto modelo, utilizando os demais métodos preconizados pela normativa do Eurocode 6 Part 1-2:2005.

REFERÊNCIAS

- ACCETTI, K. M. **Contribuições ao projeto estrutural de edifícios em alvenaria**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- ALBUQUERQUE, G. B. de M. L. de. **Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA (ABCI). **Manual técnico de alvenaria**. São Paulo: Projeto Editores Associados, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5628: **Componentes construtivos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6136: **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13860: **Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 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 (ABNT). NBR 14432: **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15200: **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16868-1: **Alvenaria estrutural – Parte 1: Projeto**. Rio de Janeiro, 2020.
- AYALA, F. R. R. **Mechanical properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures**. Tese (Doutorado) – The University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, 2010.
- BASTOS, P. S. S. **Alvenaria Estrutural**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2021.
- BRASIL. **Lei Federal Nº 13.425, de 30 de março de 2017**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13425.htm>. Acesso em: 18 maio 2022.

CAMACHO, J. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2006.

CARVALHO, P. R. de O. **Análise numérica de pequenas paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto em situação de incêndio: ênfase no comportamento térmico e termoestrutural**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais**. *In*: Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. Anais. EPUSP, São Paulo, 2003.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio**. *In*: Seminário Internacional NUTAU – Inovações tecnológicas e Sustentabilidade. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Anais. São Paulo, 2006.

DUPIM, R. H. **Resistência residual de compressão de blocos, prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto submetidos à situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 1: EN 1991-1.2: Actions on structures, Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire**. Brussels, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6: EN 1996-1.1: Design of masonry structures, Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures**. Brussels, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6: EN 1996-1.2: Design of masonry structures, Part 1-2: General rules: Structural fire design**. Brussels, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6: EN 1996-3: Design of masonry structures, Part 3: Simplified calculation methods for unreinforced masonry structures**. Brussels, 2006.

FRANCO, L. S. **Aplicação de diretrizes de racionalização construtiva para a evolução tecnológica dos processos construtivos em alvenaria estrutural não armada**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Relatório Déficit Habitacional no Brasil 2016-2019**. Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <<http://fjp.mg.gov.br/deficit-habitacional-no-brasil/>>. Acesso em: 19 maio 2022.

INGHAM, J. Forensic engineering of fire-damaged structures. **ICE Proceedings Civil Engineering**, v.162, p. 12-17, 2009.

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

KIRCHHOF, L. D. **Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

LEITE, H. A. L. **Alvenaria estrutural em situação de incêndio – Proposta de avaliação com vistas à normatização**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2018.

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

MEDEIROS, W.; PARSEKIAN G.; MORENO JR. A. **Critical analysis of codes and standards of structural fire desing of masonry structures**. *In*: The thirteenth North American masonry conference. Salt Lake City, Utah, USA, p 215-226, 2019.

MOHAMAD, G. **Construções em Alvenaria Estrutural: materiais, projeto e desempenho**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2020.

MOHAMAD, G.; MACHADO, D. W. N.; JANTSCH, A. C. A. **Alvenaria estrutural: Construindo o Conhecimento**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2017.

MOHAMAD, G. **Mecanismo de ruptura da alvenaria de blocos à compressão**. 199 p. Tese (Doutorado) - Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2007.

NADJAI, A. *et al.* Compartment masonry walls in fire situations. **Fire Technology**, v.42, n.3, p. 211-231, 2006.

NAHHAS, F. A. *et al.* **Resistance to fire of walls constituted by hollow blocks: Experiments and termal modeling**. Science Direct. Applied Thermal Engineering 27, p. 258-267, 2007.

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

PARSEKIAN, G. A.; MEDEIROS, W. A.; SIPP, G. High-rise concrete and clay block masonry building in Brazil. **Mauerwerk – European Journal of Masonry**. p. 260-272, 2018.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO – CORPO DE BOMBEIROS. **Instrução técnica Nº 03** – Terminologia de segurança contra incêndio. 32 p. São Paulo, 2019.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO – CORPO DE BOMBEIROS. **Instrução técnica Nº 08** – Segurança estrutural contra incêndio. 11 p. São Paulo, 2019.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO – CORPO DE BOMBEIROS. **Instrução técnica Nº 09** – Compartimentação horizontal e compartimentação vertical. 16 p. São Paulo, 2018.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. 1. ed. São Paulo: Editora Pini, 2003.

RAUBER, F. C. **Contribuições ao projeto arquitetônico de edifícios em alvenaria estrutural**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

RIGÃO, A. O. **Comportamento de pequenas paredes de alvenaria estrutural frente a altas temperaturas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

RIZZATTI JUNIOR, E. **Modulação, paginação e cálculo de um edifício em alvenaria estrutural**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

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

SEITO, A. I. *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SILVA, V. P. **Estruturas de Aço em Situação de Incêndio**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2012.

VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. **Resistência ao fogo das estruturas de aço**. Rio de Janeiro: IBS/CBSA, 2005. (Série Manual de Construção em Aço).

ANEXO A – TEMPOS REQUERIDOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF).

Grupo	Ocupação/Use	Divisão	Profundidade do subsolo h_s		Altura da edificação h							
			Classe S_2 $h_s > 10m$	Classe S_1 $h_s \leq 10m$	Classe P_1	Classe P_2	Classe P_3	Classe P_4	Classe P_5	Classe P_6	Classe P_7	Classe P_8
					$h \leq 6m$	$6m < h \leq 12m$	$12m < h \leq 23m$	$23m < h \leq 30m$	$30m < h \leq 80m$	$80m < h \leq 120m$	$120m < h \leq 150m$	$150m < h \leq 250m$
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60	30	30	60	90	120	120	150	180
	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	60	60	90	120	150	180	180	180
C	Comercial varejista	C-1	90	60	60	60	90	120	150	150	150	180
		C-2 e C-3	90	60	60	60	90	120	150	150	150	180
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-4	90	60	30	60	90	120	120	150	150	180
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60	30	30	60	90	120	120	150	180
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6, F-8, F-10 e F-11	90	60	60	60	90	120	120	150	180	-
		F-3, F-4 e F-7	90	60	Ver item A.2.3.3.		30	60	60	90	120	-
		F-9	90	60	60	60	90	120	-	-	-	-
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60	60	60	90	120	120	150	150	180
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60	30	30	60	90	120	120	150	150
		H-1 e H-4	90	60	60	60	90	120	120	150	180	180
H	Serviços de saúde e institucionais	H-2, H-3, H-5 e H6	90	60	60	60	90	120	120	150	180	180
		I-1	90	60	30	30	60	90	120	-	-	-
I	Industrial	I-2	120	90	30	30	60	90	120	120	-	-
		I-3	120	90	60	60	90	120	120	-	-	-
		J-1	60	30	Ver item A.2.3.4.		30	30	60	-	-	-
J	Depósitos	J-2	90	60	60	60	90	120	120	150	180	180
		J-3	90	60	60	60	90	120	120	150	180	180
		J-4	120	90	60	60	90	120	120	150	180	180
		L-1, L-2 e L-3	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
L	Explosivos	M-1	150	150	120	120	120	120	120	120	120	120
		M-2	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
		M-3	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
		M-4	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
		M-5	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
M	Especial	K-1	120	90	90	90	120	120	120	150	150	150
		K-2	120	90	90	90	120	120	120	150	150	150
K	Energia	K-1	120	90	90	90	120	120	120	150	150	150

NOTAS:

- 1) Casos não enquadrados serão definidos pelo SSCI do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo;
- 2) O TRRF dos subsolos e sobressolos não pode ser inferior ao TRRF dos pavimentos situados acima do solo (ver item 5.12);
- 3) Para indústria ou depósito com inflamáveis, considerar I-3 e J-4, respectivamente.

ANEXO B – TABELA N.B.3.2 DO EUROCODE 6 PART 1-2:2005.

Nº da linha	Propriedade dos materiais: Resistência do bloco (f_b) [N/mm ²] Densidade (ρ) [kg/m ³]	Mínima espessura (mm) t_f para a resistência ao fogo (min) $t_{f,i,d}$ 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		90/170	90/170	90/170	100/170	100/190	140/240	150/300
1.1.2	$\alpha \leq 1,0$	(90/140)	(90/140)	(90/140)	(90/140)	(90/170)	(100/190)	(100/240)
1.1.3		70/140	70/140	70/140	90/170	90/170	100/190	100/240
1.1.4	$\alpha \leq 0,6$	(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		90/170	90/170	90/170	90/170	100/190	140/240	150/300
1.2.2	$\alpha \leq 1,0$	(90/140)	(90/140)	(90/140)	(90/140)	(90/170)	(100/190)	(100/240)
1.2.3		70/140	90/140	70/140	90/170	90/170	100/190	140/240
1.2.4	$\alpha \leq 0,6$	(60/100)	(70/100)	(70/100)	(70/100)	(70/140)	(90/170)	(100/190)
2	Blocos do Grupo 2 Argamassa: uso geral, camada fina, leve							
2.1	Agregado leve $2 \leq f_b \leq 15$ $240 \leq \rho \leq 1200$							
2.1.1		90/170	100/170	100/170	100/170	100/190	140/240	150/300
2.1.2	$\alpha \leq 1,0$	(90/140)	(90/140)	(90/140)	(90/140)	(100/170)	(140/190)	(140/240)
2.1.3		70/140	70/140	90/140	90/170	100/170	125/190	140/240
2.1.4	$\alpha \leq 0,6$	(70/100)	(70/100)	(70/100)	(70/100)	(90/140)	(100/170)	(125/190)
2.2	Agregado denso $6 \leq f_b \leq 35$ $720 \leq \rho \leq 1650$							
2.2.1		90/170	100/170	100/170	100/170	100/190	140/240	150/300
2.2.2	$\alpha \leq 1,0$	(90/140)	(90/140)	(90/140)	(100/140)	(100/170)	(140/190)	(150/240)
2.2.3		90/140	90/140	100/140	100/170	100/170	140/190	150/240
2.2.4	$\alpha \leq 0,6$	(70/100)	(90/100)	(90/100)	(90/100)	(100/140)	(125/170)	(140/190)
3	Blocos do Grupo 3 Argamassa: uso geral, camada fina, leve							
3.1	Agregado leve $2 \leq f_b \leq 10$ $160 \leq \rho \leq 1000$							
3.1.1		-	-	-	-	-	-	-
3.1.2	$\alpha \leq 1,0$	-	-	-	-	-	-	-
3.1.3		-	-	-	-	-	-	-
3.1.4	$\alpha \leq 0,6$	-	-	-	-	-	-	-
3.2	Agregado denso $6 \leq f_b \leq 20$ $480 \leq \rho \leq 1000$							
3.2.1		-	-	-	140	140/200	200	-
3.2.2	$\alpha \leq 1,0$	-	-	-	-	-	-	-
3.2.3		-	-	-	-	-	-	-
3.2.4	$\alpha \leq 0,6$	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Traduzido de Eurocode 6 Part 1-2 (2005).