

## Dimensionamento de alvenaria estrutural de um edifício multi-pavimentos em situação de incêndio: normatização nacional x internacional

## Design masonry walls in a fire situation for building with multiple floors: national x international standards

*Leonete Cristina de Araújo Ferreira Medeiros Silva(1), Mateus Bruno Silva do Ó(2)*

1 Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), Mossoró, RN, Brasil.

E-mail: leonete.cristina@ufersa.edu.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5195-6374>

2 Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), Mossoró, RN, Brasil.

E-mail: mateus.bruno.2008@hotmail.com

**Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v. 9, n. 2, p. 1-19, julho-dezembro, 2022 - ISSN 2358-6508

[Recebido: março 24, 2020; Aceito: junho 24, 2023]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2022.v9i2.3982>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

## Resumo

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo no qual as paredes exercem função estrutural. A normatização brasileira não contempla requisitos para o dimensionamento do projeto estrutural desse sistema construtivo em situação de incêndio. Assim, o presente trabalho teve como objetivo dimensionar um projeto de um edifício de quatro pavimentos em alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, seguindo os critérios normativos brasileiros e inserindo, onde fosse necessário, aspectos normativos internacionais para incêndios. Foram realizadas as etapas do dimensionamento segundo o método tabular e o método analítico simplificado de cálculo e, além disso, foi feita uma análise comparativa dos principais processos descritos em ambas as normas estudadas. O método tabular mostrou que para as especificidades do projeto a espessura mínima da parede para resistir ao tempo requerido de resistência ao fogo de 30 minutos é de 100 mm, sendo atendida pela espessura utilizada em projeto de 140 mm. O método analítico de cálculo simplificado apresentou uma diferença percentual entre a força resistente de cálculo em situação ambiente e incêndio de cerca de 12,5%. Contudo, verificou-se que a análise da situação de incêndio é de suma importância no dimensionamento podendo este ser um fator decisivo para determinação da resistência do bloco e, portanto, devendo ser acrescida à norma nacional brasileira vigente.

**Palavras-chave:** Alvenaria estrutural. Projeto de estruturas. Resistência ao fogo.

## Abstract

Masonry wall is a constructive system in which the walls have a structural function. Brazilian standards do not include requirements for structural design of this construction system under fire situations. Thus, the present work had as objective to design a building with four floors, following the Brazilian normative criteria, by means of inserting, where there was necessity, European standard criteria. The tabular method and the simplified analytical method were employed. In addition, a comparative analysis of the main processes described in both studied standards were carried out. The tabular method showed that the minimum wall thickness to resist the required time of fire resistance of 30 minutes is 100 mm, which attends the design of 140 mm. The simplified analytical method of calculation resulted a relative difference between the design resistance at ambient temperature and fire situations of about 12.5%. It was concluded that the analysis of structural masonry under fire condition is of paramount importance in the design, which can be a decisive factor in determining the strength of the block and, therefore, should be added to the current Brazilian national standard.

**Keywords:** Masonry walls. Structural design. Fire resistance.

## 1 Introdução

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo bastante tradicional utilizado desde a antiguidade, quando era executada de forma empírica. Com o passar do tempo e os avanços tecnológicos, os métodos de dimensionamento se tornaram mais eficiente e viáveis economicamente. No desenvolvimento do projeto, além das avaliações da transmissão de ações através de tensões nas paredes, também deve-se levar em consideração a resistência da alvenaria em casos excepcionais tais como a situação de incêndio.

A resistência ao fogo de um elemento estrutural é o tempo em que ele permanece exercendo as funções para as quais foi projetado, sob situação de incêndio. Para a alvenaria empregada como estrutura, é importante que as paredes atendam aos três critérios básicos no dimensionamento de estruturas em situação de incêndio, o critério resistência (R), isolamento térmico (I) e estanqueidade (E). No entanto, por falta de normatização nacional relacionada ao assunto nem todos estes critérios são avaliados nos dimensionamentos brasileiros. Sem essas verificações, não há garantias que a estrutura não alcance a ruptura durante o tempo necessário para a fuga dos usuários (LEITE, 2018).

Para empregar a alvenaria como estrutura, é importante que o projetista, ao definir o tipo de material a ser utilizado na edificação conheça sua resistência frente a altas temperaturas, como forma de avaliar o nível de segurança à construção (RIGÃO, 2012).

No estudo de Nadjai *et al.* (2006), verificou-se dificuldade em realizar experimentos em laboratório com tamanho de alvenaria próximo ao real, devido ao custo e ao emprego de equipamentos compatíveis como fornos de tamanho adequado, cuja solução foi o desenvolvimento de um modelo em elementos finitos validado por ensaios em laboratório previamente conhecidos. Foi possível constatar que os modelos de subestruturas escolhidos são capazes de representar o comportamento das paredes de alvenaria estrutural em diferentes níveis sem ser necessário condições ou restrições que fujam da realidade. Também se demonstrou que os resultados sendo aprimorados podem ajudar em uma futura análise estrutural após situação de incêndio.

Ingham (2009) relatou que em temperaturas baixas para um incêndio na ordem de 250 °C a 300 °C, as paredes de alvenaria sofrem danos apenas restritos a mudança de cor. No entanto, com o aumento considerável da temperatura de 600 °C a 800 °C, a resistência à compressão da alvenaria e da argamassa são seriamente comprometidas. Constatou-se, então, que a avaliação dos danos causados a estruturas após situações de incêndio por profissionais capacitados é de suma importância.

Rosemann (2011) analisou experimentalmente através da construção de 4 corpos de prova não carregados com dimensões de 2,70 m 2,60 m e por meio de métodos analíticos – numéricos, paredes de alvenaria estrutural constituídas por blocos cerâmicos em relação a resistência ao fogo, tendo encontrado que as paredes sem revestimento e sem preenchimento apresentam resistência ao fogo de 106 minutos. Já nas que continham, a resistência ao fogo aumentou cerca de 80%. Tendo acréscimo

de areia nas áreas vazadas principais dos blocos, o aumento de resistência ao fogo em relação à alvenaria sem revestimento e sem preenchimento foi de 100%. Considerou-se para o estudo apenas o critério do isolamento térmico.

No estudo de Rigão (2012), pequenas paredes de alvenaria estrutural e seus componentes frente a altas temperaturas foram ensaiadas, utilizando fornos adaptados para a finalidade desejada, a fim de verificar o nível de degradação de cada material separadamente, o aumento da carga em pequenas paredes devido à elevação da temperatura, além da resistência residual da alvenaria e seus componentes expostos a altas temperaturas. As paredes tiveram bom desempenho frente a altas temperaturas, apresentando baixo nível de fissuração e mantendo a estabilidade estrutural. A resistência inicial média dos corpos de prova foram de 5,3 MPa. À temperatura de 400°C, permaneceram íntegras e as argamassas apresentaram resistência residual de 4 Mpa. Já à 900°C, argamassas de diferentes resistências tiveram seus materiais completamente deteriorados.

Os procedimentos de dimensionamento de alvenaria estrutural foram apresentados para países como África do Sul, Estados Unidos, Austrália, Nova Zelândia e na Europa. Demonstrou-se também os principais parâmetros que envolvem a resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural constituídas de blocos de concreto. Foi realizada uma simulação numérica para verificar a influência do tipo de agregado na resistência ao fogo utilizando o critério do isolamento térmico de um bloco de concreto. Constatou-se que por alterar a condutividade térmica do bloco o tipo de agregado tem influência na resistência ao fogo dos blocos. Por fim foi sugerido, por conta da diversidade de materiais e dimensões tanto dos blocos como dos revestimentos utilizados nas cinco normas estudadas, que fosse feita uma mescla dos principais pontos que se adaptem a realidade brasileira para contribuir numa futura revisão de norma (LEITE, 2018).

As pesquisas mostram que o principal foco envolve determinar parâmetros representativos para dimensionar ou avaliar as edificações de alvenaria estrutural em situação de incêndio seja por métodos de cálculos computacionais ou por métodos experimentais (NADJAI *et al.*, 2006; INGHAM, 2009; ROSEMANN, 2011; RIGÃO, 2012; LEITE, 2018). As pesquisas relacionadas com o dimensionamento da alvenaria estrutural abordam metodologias de cálculo de normas internacionais que levam em consideração os tipos de materiais e dimensões peculiares para os elementos de cada região. Estes estudos são fundamentais para o desenvolvimento de um método de cálculo que seja viável a realidade dos materiais e dimensões dos blocos utilizados no Brasil. Sendo assim, é necessária uma ampla análise dos resultados destes trabalhos para que sejam aplicados em dimensionamentos dentro da realidade brasileira.

Pouco tem se desenvolvido na avaliação do desempenho das alvenarias frente ao fogo, pois muitos ensaios de resistência ao fogo das alvenarias são feitos com paredes sem cargas moldadas em laboratório, não apresentando resultados sobre a sua capacidade portante, visto que não simulam de maneira adequada o comportamento real, quando elas estão sob carregamento axial em situação de incêndio (PURKISS, 2007).

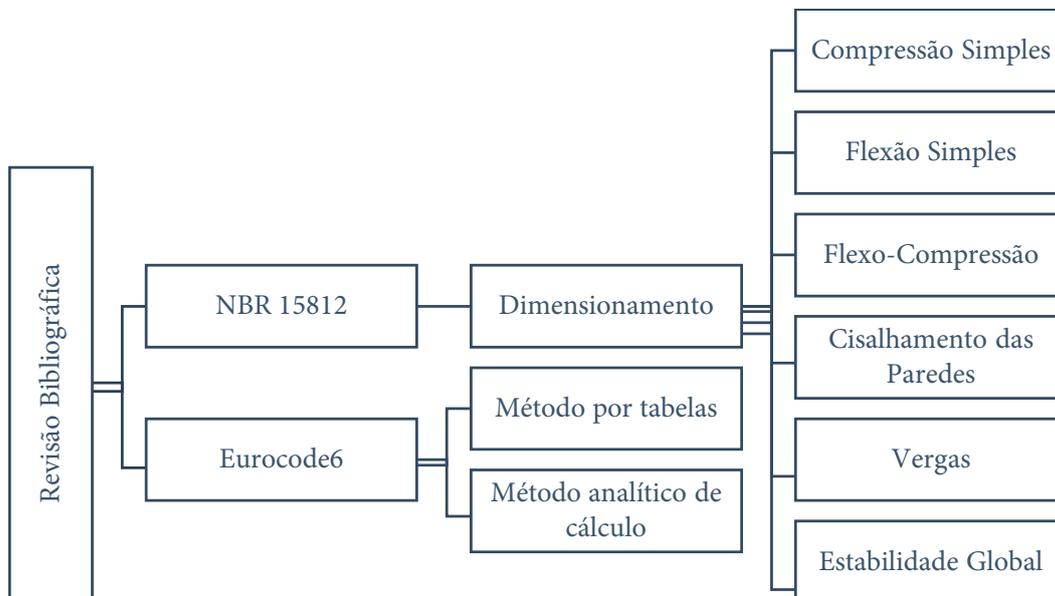
Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo principal verificar quais impactos a consideração da situação de incêndio provoca no projeto de alvenaria estrutural composta blocos cerâmicos, sendo realizado por meio de um estudo de caso de um projeto de um edifício de quatro pavimentos.

## 2 Metodologia

Para verificar os impactos que a situação de incêndio pode causar no projeto de alvenaria estrutural, foi desenvolvido um estudo de caso do dimensionamento para um edifício residencial multifamiliar de quatro pavimentos, em fase de anteprojeto, contendo os desenhos de planta baixa e um corte transversal.

Numa etapa inicial foi realizada a verificação das normas nacionais nos que diz respeito à consideração da resposta desse sistema construtivo em situações de incêndio. À medida que o trabalho foi sendo desenvolvido, detectou-se que o dimensionamento mais adequado, prezando pela segurança, deveria levar em conta uma combinação de requisitos normativos nacionais e internacionais. Desta forma, a partir do anteprojeto pré-estabelecido e da bibliografia consultada, foi elaborado um projeto da estrutura que emprega as normas brasileiras ABNT NBR 15812:2010 e do Eurocode (*European Committee For Standardization*) pertinentes, nos pontos em que as normas nacionais não apresentavam os requisitos de incêndio necessários para o projeto desenvolvido. A metodologia descrita pode ser visualizada no esquema demonstrado na Figura 1:

**Figura 1** – Etapas do dimensionamento



Fonte: Autoria própria, 2019.

A estrutura estudada possui quatro pavimentos sendo térreo mais três, pela simetria da edificação tem-se que todos os pavimentos resultaram no mesmo dimensionamento.

Todo os cálculos foram feitos a partir de métodos de apresentados por Parsekian e Soares (2010) e implementados os processos de cálculos apresentados no Eurocode6 Part 1.2 (2005) para a avaliação da alvenaria estrutural em situação de incêndio.

A edificação foi dividida em grupos de acordo com a localização de cada parede tendo como parâmetro de divisão a descontinuidade pela presença dos vãos das esquadrias. A Tabela 1 apresentada as características geométricas dos materiais considerados na elaboração do projeto e o respectivo agrupamento das paredes.

**Tabela 1** – Descrição dos parâmetros empregados na edificação do estudo de caso

Grupo de Paredes	Paredes	Espessura dos Blocos Cerâmicos (cm)	Altura das Paredes (m)
G1	PX1, PY1, PX6	14	2,8
G2	PX2 , PY2	14	2,8
G3	PX3, PY3, PX5	14	2,8
G4	PX4, PY4, PX7, PY6, PX10, PX8	14	2,8
G5	PY5, PY8, PY7, PX9	14	2,8

Para o dimensionamento completo da edificação foram avaliadas todas as ações verticais e horizontais exercidas. A partir dos esforços obtidos foi possível dimensionar os elementos de alvenaria a compressão simples, flexo-compressão, flexão simples, cisalhamento e estabilidade global da estrutura. Os desenhos referentes ao projeto foram desenvolvidos no software Autocad® e o dimensionamento utilizando planilhas eletrônica do Excel® 2016.

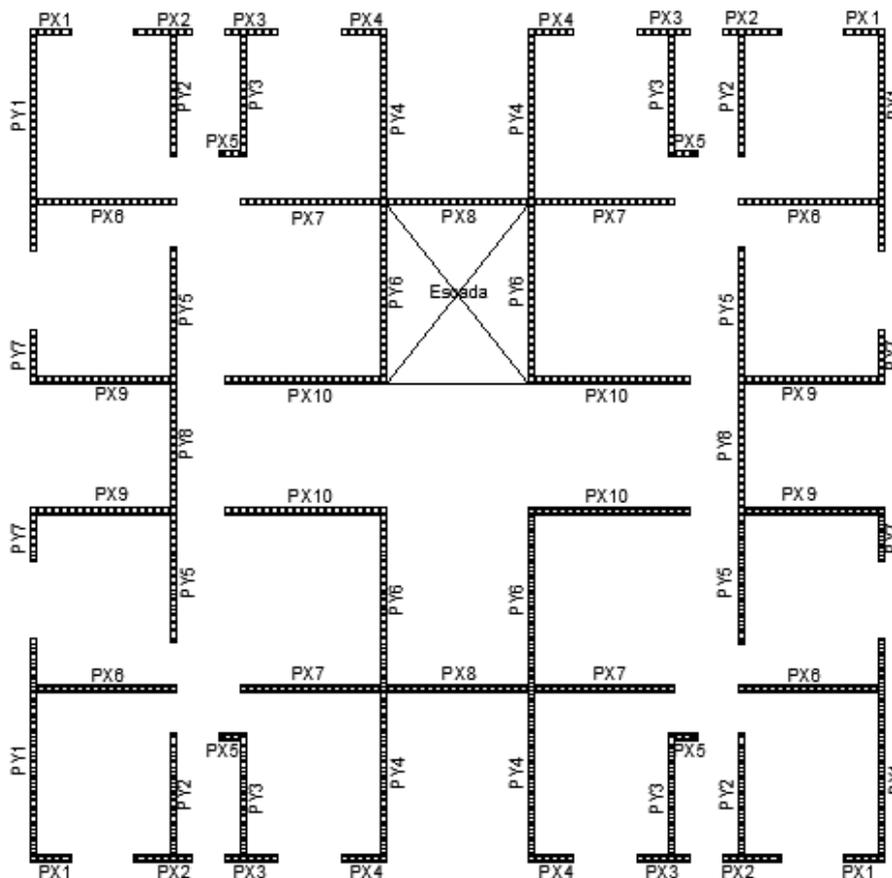
Após realizado o dimensionamento, foram tecidas as discussões acerca das implicações detectadas ao longo do processo, sendo apresentadas em forma de gráficos, desenhos e tabelas comparativas.

### 3 Resultados e Discussões

O conjunto de normas brasileiras não contempla todos os itens necessários para analisar o comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio, o que direciona o dimensionamento ao emprego de normas estrangeiras. Dessa forma, cada item da presente seção explicitará em quais aspectos cada uma delas foi considerada, em cada etapa do dimensionamento do projeto.

A planta baixa da primeira fiada do projeto desenvolvido para o dimensionamento pode ser visualizada na Figura 2. Foi especificado que a estrutura como composta por blocos estruturais cerâmicos e lajes pré-moldadas de concreto armado.

**Figura 2** – Planta baixa de primeira fiada do projeto de alvenaria estrutural



Fonte: Autoria própria, 2019.

A partir da análise das ações verticais obteve-se uma carga distribuída para cada grupo de paredes, para o grupo G1 esse esforço foi de 38,42 kN/m, para o G2 de 48,78 kN/m, para o G3 de 50,16 kN/m, para o G4 de 56,34 kN/m e para o G5 de 43,69 kN/m. Após o dimensionamento de compressão simples chegou-se ao resultado de um bloco com resistência a compressão de 4,5 MPa para suportar aos esforços solicitantes.

Após a realização do dimensionamento da estrutura apresentada, seguindo o processo de cálculo da norma NBR 15812 (ABNT, 2010), e seguindo parâmetros do Eurocode 6 Part 1.2 (2005), é possível chegar a conclusões comparativas principalmente quanto a situação de incêndio na estrutura. As seguintes subseções apresentam a análise comparativa entre os processos e parâmetros no cálculo da alvenaria estrutural.

### 3.1 Comparativo das ações verticais de cálculo

As cargas atuantes sobre a estrutura são especificadas pelas normas NBR 6120 (ABNT, 1980) e Eurocode1 (2001). O peso específico da alvenaria revestida foi considerado de 15kN/m<sup>3</sup> de acordo com parâmetros de ambas as normas chegando a uma carga de 5,88kN/m<sup>2</sup>, obtido a partir da multiplicação da altura da parede pela espessura do bloco e pelo peso específico da parede revestida.

O peso próprio da laje foi obtido através de suas dimensões e o peso específico do concreto armado que para as duas normas é igual a  $25\text{kN/m}^3$ , resultando em uma carga  $Q$  equivalente a  $20\text{kN/m}^2$ , para o revestimento foi utilizada argamassa de cimento e areia que a norma europeia recomenda o peso específico com valor entre  $19$  a  $23\text{kN/m}^3$ . Já a brasileira recomenda um valor de  $21\text{kN/m}^3$ , adotou-se o valor da norma brasileira. Quanto às cargas variáveis, para edifícios residências é recomendado uma sobrecarga de  $1,5$  a  $2,0\text{kN/m}^2$  para ambas as normas, sendo adotado o primeiro valor.

Existem diferenças nos coeficientes de ponderação para combinação normais de ação e nos coeficientes de segurança para materiais. Enquanto para a norma NBR:15812 (ABNT, 2010) os coeficientes de majoração para as cargas permanentes e variáveis são iguais a  $1,4$  nas duas situações, para edifícios que as cargas acidentais não superem  $5\text{kN/m}^2$ , a norma europeia Eurocode 6 Part 1.2 (2005) diferencia estes valores, sendo  $1,35$  para ação permanente e  $1,5$  para ações variáveis. Em relação aos coeficientes de segurança para alvenaria e aço a norma brasileira considera o valor de  $2$  e de  $1,15$  respectivamente, já a europeia recomenda a utilizar de  $1,7$  a  $3$  para a alvenaria, dependendo da categoria de execução e da categoria do controle de produção das unidades de alvenaria e  $1,15$  para o aço. Desta forma, os valores dos coeficientes de cálculo são apresentados na Tabela 2, para cada norma. Os coeficientes de segurança empregados no presente trabalho foram os recomendados pela norma brasileira. O uso da norma europeia deu-se apenas para as considerações da situação de incêndio.

**Tabela 2** – Comparativo dos coeficientes

Norma	Ações permanentes ( $\gamma_g$ )	Ações variáveis ( $\gamma_q$ )	Coeficiente de ponderação da alvenaria ( $\gamma_m$ )	Coeficiente de ponderação do aço ( $\gamma_m$ )
NBR 15.812 <sup>(1)</sup>	1,40	1,40	2,00	1,15
Eurocode 6 <sup>(2)</sup>	1,35	1,50	1,70 a 3,00	1,15

Fonte: <sup>(1)</sup>ABNT, 2010; <sup>(2)</sup>Eurocode, 2005.

### 3.2 Comparativo das ações horizontais

As cargas horizontais podem ser devidas ao vento e ao desaprumo, para obter os parâmetros necessários para determinação das ações devidos ao vento, realizou-se o procedimento abordado na NBR 6123 (ABNT, 1988). Devendo ser realizado tanto para a norma brasileira quanto para a europeia pois é feito em função de parâmetros relacionados a região que está sendo estudada, assim para este parâmetro não existe diferença entre as duas normas estudadas. O desaprumo é definido para ambas as normas da mesma forma, ou seja, quando a estrutura está desviada de um ângulo  $\phi = \left(\frac{1}{100\sqrt{H}}\right)$ , onde  $H$  é a altura total da edificação. A norma europeia determina que os valores de cálculo das ações horizontais não devem ser inferiores aos valores de cálculo

das forças horizontais devidas ao desaprumo. Portanto, segundo o Euroce6 (2005), não se deve somar os efeitos do desaprumo aos do vento.

### 3.3 Comparativo do dimensionamento de compressão simples

O índice de esbeltez é a relação entre a altura efetiva da parede e sua espessura efetiva. Segundo a norma NBR 15812 (ABNT, 2010), o limite para o índice é de 24 para paredes não armadas e 30 para paredes armadas. Para o Eurocode6 (2005) o índice de esbeltez máximo não pode ultrapassar 27.

Para o dimensionamento a compressão simples, ambas as normas estudadas recomendam analisar a força normal resistente de cálculo a partir da área da seção resistente, a resistência a compressão de cálculo da alvenaria e o fator de redução. A principal diferença para a determinação a compressão simples entre as normas é que para a NBR 15812 (ABNT, 2010), este fator é obtido a partir da equação  $R = \left[1 - \left(\frac{\lambda}{40}\right)^3\right]$  já, para a Eurocode6 (2005), o fator de redução é obtido através da equação  $\phi_s = 0,85 - 0,0011\left(\frac{h_{ef}}{t_{ef}}\right)^2$ , sendo ambas as equações em função do índice de esbeltez. Sendo empregada a equação da norma brasileira e obtendo-se um valor de 0,875 para o fator de redução.

### 3.4 Comparação do dimensionamento de vergas

Para ambas as normas, o dimensionamento das vergas depende de fatores como momento gerado pelo carregamento distribuído, altura, vão efetivo, espessura, tipo de aço utilizado e resistência do bloco grauteado. Os procedimentos de cálculo das normas brasileira e europeia são análogos, mudando apenas os coeficientes de majoração das cargas e os de segurança para os materiais. O processo de cálculo envolve grandezas como peso próprio da verga, peso próprio da cinta, peso da alvenaria, carga da laje e vão efetivo para se obter um valor do momento fletor máximo, módulo de deformação e resistência ao cisalhamento.

### 3.5 Comparativo do dimensionamento de flexo-compressão

A norma brasileira NBR 15812 (ABNT, 2010) estabelece que a flexo-compressão deve ser dimensionada a partir da comparação entre os esforços solicitantes e resistentes de normal e momento fletor, considerando a área da seção resistente, mínimo módulo de resistência à flexão da seção resistente, coeficiente redutor devido a esbeltez do elemento e o fator 1,5 que ajusta a resistência à compressão na flexão. Caso exista tensão de tração, a norma recomenda que seu valor máximo deva ser menor ou igual a resistência de tração da alvenaria. A principal diferença entre a norma brasileira e a europeia é que segundo o Eurocode6 (2005) a resistência a tração da alvenaria é considerada nula.

### 3.6 Comparativo do dimensionamento de cisalhamento nas paredes

Os procedimentos de cálculo de ambas as normas estudadas são bem semelhantes por considerar variáveis como o valor de solitação de cálculo, largura e altura útil da seção transversal da parede e a resistência característica ao cisalhamento das paredes, além dos coeficientes de majoração e de segurança dos materiais. A principal diferença entre a NBR 15812 (ABNT, 2010) para o Eurocode6 (2005) em relação ao cisalhamento das paredes é a forma de obter a resistência característica ao cisalhamento, uma vez que os parâmetros utilizados são dependentes da resistência a compressão da argamassa que muda de acordo com o tipo de material utilizado em cada região.

### 3.7 Impacto da situação de incêndio aplicado no dimensionamento

O Eurocode 6 (2005) é a norma mais completa em relação ao dimensionamento de paredes estruturais, pois especifica o nível de carregamento, para aplicar no dimensionamento a situação de incêndio (LEITE, 2018). O Eurocode 6 (2005) parte 1-2 estabelece que as paredes devem atender aos critérios R (resistência), E (integridade), I (isolamento) e M (impacto mecânico). Dentro destes critérios as paredes podem ser divididas em somente carga (critério E), separando apenas (critérios EI), separação e suporte de cargas (critérios REI), carga, separação e impacto mecânico (critérios REI-M), impacto de separação e mecânico (critérios EI-M).

Segundo o Eurocode 6 (2005) parte 1-2, o critério R é considerado satisfeito quando a função de suporte de carga é mantida durante todo o tempo de exposição ao fogo, o critério I é considerado satisfeito quando a temperatura média da face não exposta é inferior a 140 K, e o aumento máximo de temperatura em qualquer ponto dessa superfície não exceda 180 K. O critério E é considerado satisfeito quando a passagem de chamas e gases é impedido pelo elemento de alvenaria. A norma estabelece também que quando for necessário um elemento de separação vertical, com ou sem função estrutural para atender a uma exigência de resistência ao impacto, (critério M), o elemento deve resistir a aplicação da carga concentrada horizontal especificada em norma competente.

A avaliação das paredes de alvenaria estrutural em situação de incêndio deve ser feita segundo o Eurocode 6 (2005) parte 1-2 por métodos analíticos de cálculos simplificado, avançado ou tabela. Para este trabalho foram aplicados os métodos por tabela e analítico de cálculo simplificado, considerando os elementos de alvenaria como de mesmo material que os especificados na norma europeia.

Para aplicar os métodos descritos na norma europeia é necessário obter o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), esse é o período de tempo mínimo necessário de resistência ao fogo de um elemento quando submetido a incêndio padrão. O TRRF é obtido no Brasil por meio da NBR 14432 (ABNT, 2000). Na Tabela 2 encontram-se os TRRFs para edificações de diferentes classes (alturas) e tipos de ocupação.

**Tabela 2** – Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF)

Ocupação/ Uso	Divisão	Altura da edificação				
		Classe P2 hs ≤ 6 m	Classe P2 6m < hs ≤ 12 m	Classe P2 12m < hs ≤ 23 m	Classe P2 23m < hs ≤ 30 m	Classe P2 30m < hs ≤ 80 m
Residencial	A1 a A3	30	30	60	90	120
Serviços de hospedagem	B1 a BA3	30	60 (30)	60	90	120
Comercial varejista	C1 a C3	60 (30)	60 (30)	60	90	120
Industrial	I1	30	30	60	90	120
	I2	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120

NOTAS: Hs (altura); Valores em minutos.

Fonte: Adaptado da Tabela A,1 NBR 14432 (ABNT, 2001, p. 7).

Como a edificação estudada é residencial e apresenta uma altura total entre 6 e 12m, o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) vale 30 minutos. A partir deste dado pode-se estabelecer parâmetros segundo o Eurocode 6 Part 1.2 para o dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio.

### 3.8 Avaliação por método tabular

As tabelas analisadas estão dispostas no anexo B do Eurocode 6 (2005) parte 1-2 e estabelecem a espessura mínima da alvenaria para resistir ao tempo requerido ao incêndio.

As tabelas são apresentadas em função dos critérios de resistência ao fogo descritos anteriormente e pelo tipo de material pelo o qual é constituído o bloco. A Tabela 3 a seguir é dividida em função da resistência a compressão dos blocos ( $f_b$ ), em função da densidade dos blocos ( $\rho$ ) e em função da relação entre a força solicitante de cálculo da parede em situação de incêndio e a força resistente de compressão de cálculo ( $\alpha$ ). Foi levado em conta algumas considerações para a aplicação deste método como por exemplo que a densidade e o material do bloco utilizado no projeto fossem os mesmos que os descritos no Eurocode 6 (2005).

Considerando o critério REI contempla todas as paredes e que o bloco utilizado no projeto esteja entre a resistência a compressão e a densidade descritos na Tabela 3, é possível analisar a espessura mínima do projeto para resistir ao tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) de 30 minutos como descrito anteriormente, dependendo apenas da relação entre a solicitação e a resistência de cálculo ( $\alpha$ ), que foi obtida a partir dos resultados do projeto elaborado e tem o valor de 0,46 sendo assim a espessura mínima para que a parede resista ao fogo é de 100 mm, satisfeita pela espessura utilizada em projeto de 140 mm.

O valor da relação entre a sollicitação e a resistência de cálculo ( $\alpha$ ) foi calculado a partir da divisão da carga sollicitante no grupo de paredes mais carregado, que a partir da análise das ações verticais obteve-se o valor de 890,78 kN, pela resistência de cálculo dimensionada para este grupo que foi de 1943,72 kN.

**Tabela 3** – Espessura mínima de paredes carregadas (critério REI)  
para alvenaria cerâmica

N.º da linha	Propriedade dos materiais	Mínima espessura (mm) $t_f$ para a resistência ao fogo (minutos) para a classificação REI						
		30	45	60	90	120	180	240
2		Blocos do Grupo 2 Argamassa de uso geral, camada fina						
2.1		$5 \leq f_b \leq 35$ $800 < \rho \leq 2200$						
2.1.1	$\alpha \leq 1$	100	100	100	140/170	170/240	nvg	nvg
2.1.2		(100)	(100)	(100)	(100)	(100/140)		
2.1.3	$\alpha \leq 0,6$	100	100	100	100/140	170	nvg	nvg
2.1.4		(100)	(100)	(100)	(100)	(100/140)		

NOTA:

Resistência à compressão ( $f_b$ ) [N/mm<sup>2</sup>];

Densidade ( $\rho$ ) [kg/m<sup>3</sup>];

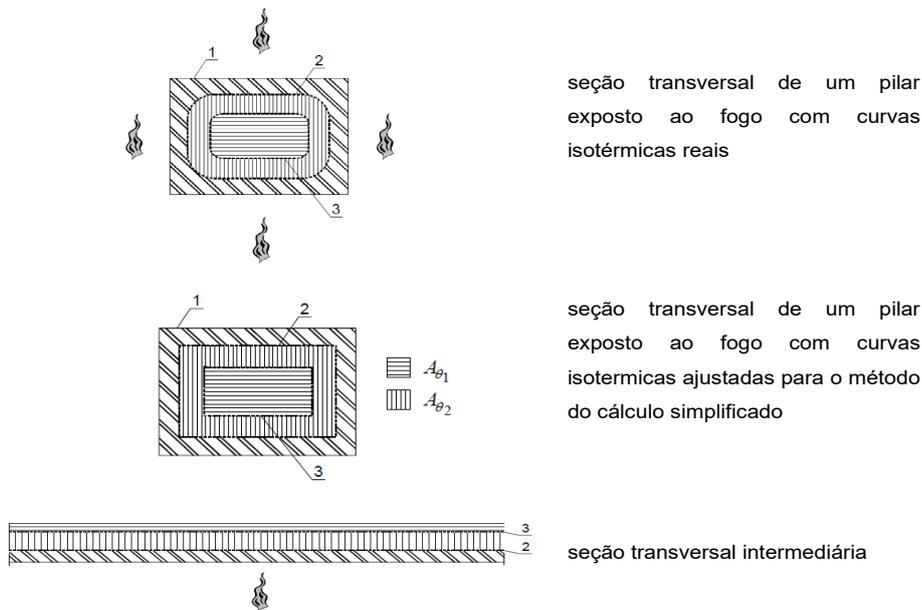
A maioria dos blocos de alvenaria estrutural brasileiros se enquadram no grupo 2 desta classificação (LEITE, 2018).

Fonte: Adaptado e traduzido para o português do Eurocode 6 (2005, Tabela N.B.1.6, p. 41).

### 3.9 Dimensionamento por método analítico simplificado de cálculo

O método de cálculo simplificado consiste na determinação de duas isotermas da seção transversal da parede de alvenaria estrutural, uma para a temperatura  $\theta_1$  (temperatura até a qual pode-se considerar a resistência à compressão residual da alvenaria) que, para o tipo de alvenaria e argamassa utilizados, a norma determinar ser 100°C e outra para a temperatura  $\theta_2$  (temperatura acima da qual pode-se considerar nula a resistência a compressão da alvenaria) que a norma determina ser para o tipo de bloco e argamassa utilizados de 600°C. A partir do traçado das isotermas, a seção transversal da parede pode ser avaliada em situação de incêndio, com a seção reduzida, ou seja, toda a área da seção transversal acima de  $\theta_2$  desconsiderada, conforme ilustrado na Figura 2. Com parte da seção já reduzida e com resistência à compressão menor que obtida à temperatura ambiente, representa-se a área da seção transversal entre  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , em que se observa uma perda da capacidade resistente dos blocos a partir de 100°C (LEITE, 2018).

**Figura 2** – Ilustração de áreas da alvenaria a temperaturas até  $\theta_1$ , entre  $\theta_1$  e  $\theta_2$  e áreas estruturalmente ineficientes (acima de  $\theta_2$ ).



**Fonte:** Adaptado e traduzido para o português do Eurocode6 (2005, Figure C.1, p. 65).

Para a verificação da seção no Estado limite Último, para situação de incêndio, o Eurocode 6 (2005) parte 1-2 estabelece que o valor da força vertical solicitante de cálculo em uma parede ou pilar deve ser menor ou igual ao valor da força vertical resistente de cálculo da parede ou pilar, sendo expressa pela equação 1:

$$N_{sd} \leq N_{Rd,fi\theta_2} \quad \text{Eq. 1}$$

O valor da força vertical resistente de cálculo de uma parede é dado pela equação 2:

$$N_{Rd,fi\theta_2} = \Phi(f_{d\theta_1}A_{\theta_1} + f_{d\theta_2}A_{\theta_2}) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

$A$ : área total de alvenaria;

$A_{\theta_1}$ : área de alvenaria até  $\theta_1$ ;

$A_{\theta_2}$ : área de alvenaria entre  $\theta_1$  e  $\theta_2$ ;

$N_{sd}$ : valor da força vertical solicitante de cálculo;

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

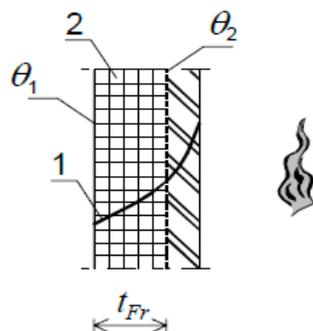
$f_{d\theta_1}$ : resistência à compressão, de cálculo, da alvenaria até  $\theta_1$ ;

$f_{d\theta_2}$ : resistência à compressão, de cálculo, da alvenaria entre  $\theta_1$  e  $\theta_2$ ;

$\Phi$ : fator de minoração da capacidade portante da parede que leva em consideração eventual excentricidade adicional  $e\Delta\theta$ .

Foram feitas algumas considerações em relação as áreas  $A_{\theta_1}$  e  $A_{\theta_2}$ , considerando para efeito prático a soma das mesmas como a área residual após situação de incêndio, como apresentado na Figura 4.

**Figura 4** – Ilustração da espessura residual pós situação de incêndio



**Fonte:** Adaptado e traduzido para o português do Eurocode6 (2005, Figure C.2, p. 66).

A excentricidade devido à variação de temperatura na alvenaria é determinada empregando-se a equação 3:

$$e_{\Delta\theta} = \frac{1}{8} h_{ef}^2 \frac{\alpha_t (\theta_2 - 20)}{t_{FR}} \leq h_{ef} / 20 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

$e_{\Delta\theta}$ : excentricidade devido à variação de temperatura na alvenaria;

$\theta_2$ : temperatura acima da qual despreza-se a resistência à compressão do material, em °C;

$h_{ef}$ : altura efetiva da parede;

$\alpha_t$ : coeficiente de expansão térmica;

$t_{FR}$ : espessura da seção transversal cuja temperatura não exceda  $\theta_2$ .

A excentricidade  $e_{\Delta\theta}$  pode ser considerada zero, quando todas as faces do elemento estiverem sob ação de fogo. O fator de minoração da capacidade portante ( $\Phi$ ) é dado pela equação 4:

$$\Phi = 1 - 2 \frac{e_i}{t} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

$e_i$ : excentricidade nas partes superior ou inferior da parede;

$t$ : espessura da parede.

A excentricidade nas partes superior ou inferior da parede é calculada a partir de:

$$e_i = \frac{M_{di}}{N_{di}} + e_{he} + e_{mic} \geq 0,05 t \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

$M_{di}$ : valor de cálculo do momento fletor solicitante nas partes superior e inferior da parede;

$N_{di}$ : valor de cálculo da carga vertical solicitante nas partes superior e inferior da parede;

$e_{he}$ : excentricidade na parte superior e inferior da parede;

$e_{inic}$ : excentricidade inicial;

$t$ : espessura da parede.

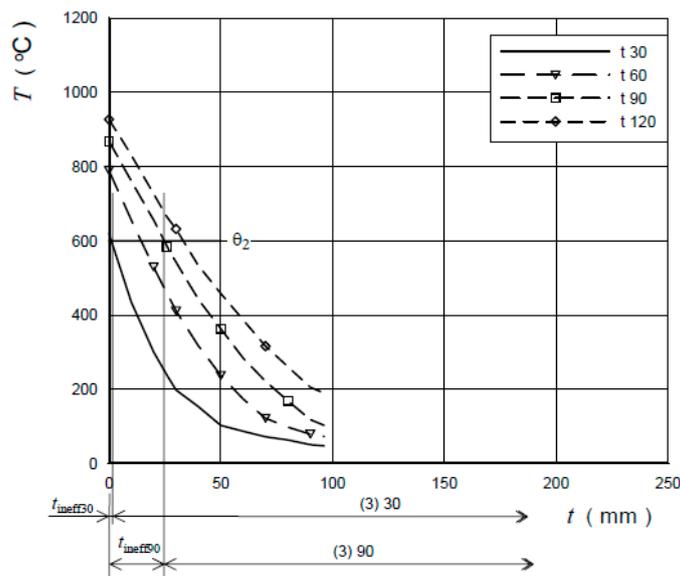
Essas variáveis não foram empregadas neste trabalho, pois a norma estudada estabelece uma alternativa para essa consideração, tratando-se apenas da apresentação das mesmas para demonstrar a aplicação completa do método, os demais parâmetros exigem ensaios experimentais para serem obtidos, sendo considerada a excentricidade nas partes superior ou inferior da parede como 0,05 da espessura da parede.

### **3.10 Aplicação do método analítico de cálculo simplificado no dimensionamento**

Para implementar a verificação da situação de incêndio no dimensionamento de acordo com a NBR 15812 (ABNT, 2010), foram feitas algumas considerações de cálculo, visto que, para a aplicação fidedigna do método descrito no Eurocode 6 (2005) parte 1-2 seriam necessários ensaios laboratoriais e que os elementos e argamassas utilizados no projeto de alvenaria brasileiro tivessem o mesmo tipo de material e dimensões especificados na norma europeia.

A área residual total da seção transversal da alvenaria foi obtida a partir de um gráfico de isotermas descrito no anexo C do Eurocode6 (2005) parte 1-2 e ilustrado na Figura 5. Nele são apresentados valores de temperaturas e espessuras para determinados tempos de exposição ao fogo.

**Figura 5** – Gráfico para obtenção da espessura ineficiente, alvenaria cerâmica, densidade bruta de 1000 a 2000 kg/m<sup>3</sup>

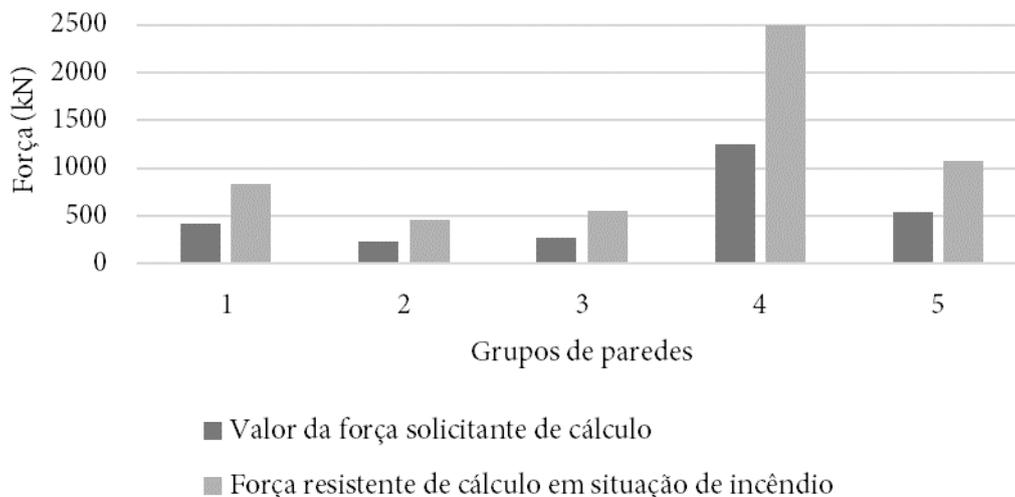


**Fonte:** Adaptado e traduzido para o português do Eurocode6 (2005, Figura C.3(a), p. 67).

Com o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) apresentado no quadro 3 e a temperatura a qual a resistência a compressão da alvenaria pode ser considerada nula ( $\theta_2$ ), pode-se determinar então a espessura ineficiente da seção transversal da alvenaria que, como pode-se observar na Figura 5, é aproximadamente de 2 mm. Com isso é possível determinar a área residual resistente da alvenaria em situação de incêndio, multiplicando essa espessura pelo comprimento total da parede e diminuindo o valor da área total da seção transversal. O valor obtido para o projeto da área residual para cada grupo de paredes foi no G1 de 1,0594 m<sup>2</sup>, no G2 de 0,4624 m<sup>2</sup>, no G3 de 0,5331 m<sup>2</sup>, no G4 de 2,1502 m<sup>2</sup> e no G5 de 1,1914 m<sup>2</sup>.

A partir destes parâmetros foi possível obter o valor da força vertical resistente de cálculo da alvenaria, sendo considerado os grupos de paredes utilizados no projeto para a análise, o resultado da comparação entre a força resistente e a solicitante estão dispostos na Figura 6.

**Figura 6** – Gráfico comparativo entre força resistente e solicitante de cálculo  
Comparativo entre força resistente e solicitante de cálculo

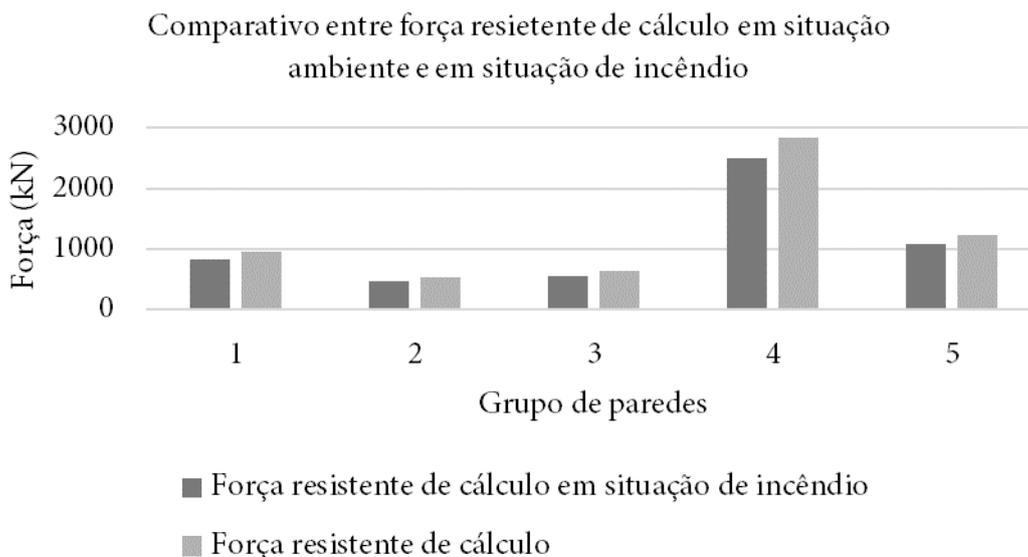


Fonte: Autoria própria, 2019.

Como pode-se observar na Figura 6, o valor da força resistente em situação de incêndio para todos os grupos é maior que a força solicitante de cálculo, mostrando assim que, em situação de incêndio, considerando um TRRF de 30 minutos, a estrutura permaneceria cumprindo sua função estrutural.

Outra situação a ser analisada é a perda de resistência do elemento de alvenaria em situação de incêndio. A Figura 7 mostra o comparativo entre a força resistente de cálculo em situação de incêndio e a força resistente de cálculo à temperatura ambiente.

**Figura 7** – Gráfico comparativo entre força resistente de cálculo em situação ambiente e em situação de incêndio



Fonte: Autoria própria, 2019.

Observou-se uma diminuição percentual de aproximadamente 12,5 por cento em relação a força resistente à temperatura ambiente. Se levarmos em consideração apenas a área perdida em situação de incêndio o aumento percentual na resistência a compressão do bloco deve ser na ordem de 2,9% em relação ao mesmo bloco em situação ambiente. Essa porcentagem é obtida dividindo-se a carga solicitante pela área calculada a partir da isoterma.

#### 4 Considerações finais

As normas estudadas possuem métodos de dimensionamento semelhantes, apresentando apenas algumas diferenças nas considerações de cálculo e nos valores dos coeficientes de matérias e de majoração, além da situação de incêndio ainda não considerada na normatização brasileira.

Verificou-se que, aplicando o método tabular apresentado na norma europeia, obteve-se uma espessura mínima de 100 mm para a edificação estudada, condição esta já satisfeita, pela espessura utilizada em projeto de 140 mm.

O método analítico simplificado de cálculo apresentou resultados que comprovam a relevância de se levar em consideração a situação de incêndio, demonstrando que a resistência do bloco reduziu cerca de 12,5% em 30 minutos de exposição ao fogo a uma temperatura de 600 °C. ainda assim, a estrutura apresentou uma capacidade resistente maior que a solicitante.

Os resultados demonstraram a necessidade de considerar a ação do incêndio no dimensionamento da alvenaria estrutural. Para esse estudo, normas internacionais foram empregadas, o que exigiu algumas simplificações e adequações, já que alguns parâmetros precisam de informações dos materiais empregados no país. Assim, a atualização da norma nacional aponta para a necessidade de pesquisas futuras relacionadas às propriedades térmicas e termomecânicas dos materiais, quanto na modelagem e processos de dimensionamento.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS. *NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. 1 ed. Rio de Janeiro, 1980. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS. *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. 1 ed. Rio de Janeiro, 1988. 66 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS. *NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento*. 1 ed. Rio de Janeiro, 2000. 14p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS. *NBR 15812: Alvenaria estrutural - Blocos cerâmicos Parte 1: projetos*. 1 ed. Rio de Janeiro, 2010. 41 p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *EUROCODE 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. 1 ed. Brussels: Butterworth-heinemann, 2002. 47 p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Eurocode 6: EN 2005-1.2: design of masonry structures: part 1-2: general rules: structural fire design*. Brussels, 2005.
- INGHAM, Jeremy. Forensic engineering of fire-damaged structures. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, v. 162, n. 5, p. 12-17, May 2009. Thomas Telford Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/cien.2009.162.5.12>.
- LEITE, Helena Arias Lara. *Alvenaria estrutural em situação de incêndio – proposta de avaliação com vistas à normatização*. 2018. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.
- NADJAI, A. *et al.* Compartment Masonry Walls in Fire Situations. *Fire Technology*, v. 42, n. 3, p.211-231, 24 abr. 2006. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-006-7509-6>.
- PARSEKIAN, Guilherme Aris; SOARES, Márcia Melo. *Alvenaria Estrutural em Blocos Cerâmicos*. São Paulo: O Nome da Rosa, 2010. 240 p.
- PURKISS, John A. *Fire Safety Engineering Design of Structures*. 2. ed. Great Britain: Butterworth-heinemann, 2007. 389 p.
- RIGÃO, Alessandro Onofre. *Comportamento de pequenas paredes de alvenaria estrutural frente a altas temperaturas*. 2012. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- ROSEMANN, Fernando. *Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos pelo critério de isolamento térmico*. 2011. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.