

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Lorenzo Sartori Rizzatti

**COMPARAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS DA
NBR 15812-1:2010 E NBR 15961-1:2011
COM OS DO PROJETO DE NORMA DA NBR 16868-1:2020**

Santa Maria, RS
2020

Lorenzo Sartori Rizzatti

COMPARAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS DA NBR 15812-1:2010 E NBR 15961:2011 COM OS DO PROJETO DE NORMA DA NBR 16868-1:2020

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Gihad Mohamad

Santa Maria, RS
2020

Rizzatti, Lorenzo S.
COMPARAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS DA NBR 15812-1:2010 E
NBR 15961:2011 COM OS DO PROJETO DE NORMA DA NBR 16868
1:2020. / Lorenzo S. Rizzatti.- 2020.
159 p.; 30 cm

Orientador: Gihad Mohamad
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2020

1. Engenharia Civil 2. Alvenaria estrutural 3. Normas
técnicas brasileiras I. Mohamad, Gihad II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, LORENZO S. RIZZATTI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Lorenzo Sartori Rizzatti

COMPARAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS DA NBR 15812-1:2010 E NBR 15961:2011 COM OS DO PROJETO DE NORMA DA NBR 16868-1:2020

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Aprovada em 14 de Maio de 2020:

Gihad Mohamad, Dr. UFSM
(Presidente/Orientador)

Emil de Souza Sánchez Filho, Dr. (UFF – RJ)

André Lübeck, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e pela saúde que me propicia ir atrás de meus objetivos.

Não menos importante, agradeço a minha família, meu pai Eduardo, minha mãe Beatriz, minha irmã Pauline e irmão Eduardo, por todo amor, carinho, suporte e incentivo, durante toda a faculdade e na escolha de seguir o caminho da pós graduação.

Reforço o agradecimento a meu pai, Eduardo Rizzatti, meu melhor amigo, professor e exemplo profissional, que me amparou com exemplos, ideias e conselhos durante toda a graduação e pós graduação.

Agradeço a minha avó Neusa e em especial a meu avô Walter Antônio Celso Rizzatti, que Deus o tenha, que foi e ainda é exemplo para mim, sempre incentivando a busca pelo conhecimento e estudo.

Ao meu orientador Gihad Mohamad, por me guiar na elaboração deste trabalho, pela paciência e disponibilidade para com as dúvidas que surgiam.

Agradeço aos colegas engenheiros, pós graduados e amigos Clairson Dutra e Christian Donin, e todos da empresa In Gauge Engineering and Technology, que foram a minha família em Minneapolis, enquanto estava longe de casa, e me apresentaram como funciona a engenharia em outro país.

Por fim, agradeço a todos meus amigos, tanto os que conheci nos tempos de colégio, quanto os que encontrei durante a graduação e pós graduação.

RESUMO

COMPARAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS DA NBR 15812-1:2010 E NBR 15961:2011 COM OS DO PROJETO DE NORMA DA NBR 16868-1:2020

AUTOR: Lorenzo Sartori Rizzatti
ORIENTADOR: Prof. Dr. Gihad Mohamad

Como é conhecido, atualmente há duas normativas vigentes no Brasil que ditam o dimensionamento da alvenaria estrutural, diferentemente dos códigos normativos europeus e americanos, que usam somente uma normativa. Separadas pelo tipo de material do bloco estrutural, há a norma referente aos blocos cerâmicos e a que aborda os blocos de concreto. Assim, a nova norma NBR 16868:2020 – Parte 1: Projeto, que atualmente está em processo de consulta nacional, tem o objetivo de unificar as normativas vigentes no país, para que haja uma única norma que aborda o dimensionamento da alvenaria estrutural.

Este trabalho tem como objetivo principal analisar comparativamente os critérios normativos das normas ABNT NBR 15812 – 1 (2010) Alvenaria estrutural — Blocos cerâmicos Parte 1: Projetos e ABNT NBR 15961 – 1 (2011) Alvenaria estrutural — Blocos de concreto Parte 1: Projetos, com as propostas da primeira parte do projeto de norma da NBR 16868:2020 – Parte 1: Projeto, no intuito de contribuir e subsidiar discussões junto ao meio técnico. Foram analisados os requisitos, propriedades da alvenaria e de seus componentes, segurança e estados limites, ações, valores de cálculo, análise estrutural, deslocamentos, fissuras e dimensionamento.

Concluiu-se que o projeto de norma da NBR 16868:2020 entra em consulta pública em um momento oportuno, devido ao longo período sem atualizações das normas e seus critérios. Foram introduzidas mudanças efetivas e positivas para o dimensionamento da alvenaria estrutural, porém sem a manutenção de alguns critérios pontuais, os quais caberiam alterações, além de falhas de comunicação entre a normativa e o leitor.

Palavras-chave: alvenaria estrutural, normas, projeto de norma, critérios de dimensionamento.

ABSTRACT

COMPARISON BETWEEN THE NBR 15812-1:2010 AND NBR 15961-1:2011 CRITERIA WITH THE NBR 16868-1:2020 STANDARD PROJECT

AUTHOR: Lorenzo Sartori Rizzatti
ADVISOR: Prof. Dr. Gihad Mohamad

As is known, there are currently two regulations in force in Brazil that dictate the design of structural masonry, differently from European and American normative codes which use only one standard. Separated by the type of material of the structural block, there is the standard for ceramic blocks and the one that addresses concrete blocks. Thus, the new Standard NBR 16868:2020 – Part 1: Project, which is currently in the process of national consultation, aims to unify the regulations in force in the country, so that there is a single standard that addresses the design of structural masonry.

This work has as main objective to comparatively analyze the normative criteria of ABNT NBR 15812 – 1 (2010) Structural masonry - Ceramic blocks Part 1: Projects and ABNT NBR 15961 – 1 (2011) Structural masonry – Concrete blocks Part 1: Projects, with the proposals of the Standard Project of NBR 16868:2020 – Part 1: Project, in order to contribute and subsidize, through examples, the discussions with the technical environment. The requirements, properties of the masonry and its components, safety and limit states, actions, design values, structural analysis, displacements, cracks and dimensioning were analyzed.

It was concluded that the standard design of NBR 16868: 2020 enters public consultation in good time, due to the long period without updates to the standards and their criteria. Effective and positive changes were introduced for the design of structural masonry, but without the maintenance of some specific criteria, which would fit alterations, in addition to communication failures between the regulations and the reader.

Keywords: structural masonry, standards, standard design, design criteria.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – ACI 530-02/ASCE 5-02/TMS 402-02.....	23
Figura 2.2 – Ronan Point tower.....	24
Figura 3.1 – Exemplo de elevação/paginação de uma parede de uma edificação em alvenaria estrutural.....	35
Figura 3.2 – Traços e resistência à compressão média esperada para a argamassa segundo a norma britânica.....	39
Figura 3.3 – Resistência à compressão da argamassa em função dos limites propostos por Lubeck (2016).....	41
Figura 3.4 – Valores para especificação da resistência dos materiais da alvenaria..	46
Figura 3.5 – Resultados da resistência à compressão axial de prismas de De Marco (2016).....	47
Figura 3.6 – Imperfeições geométricas globais.....	55
Figura 3.7 – Disposição das paredes na edificação.....	62
Figura 3.8 – Corte na edificação.....	63
Figura 3.9 – Efeitos de segunda ordem em edificações.....	65
Figura 3.10 – Deslocamentos horizontal causado pela ação do vento.....	67
Figura 3.11 – Solicitações horizontais.....	69
Figura 3.12 – Diagrama de tensões da parede “01”.....	72
Figura 3.13 – Dispersões de ações verticais concentradas e distribuídas.....	73
Figura 3.14 – Carregamento em vigas.....	75
Figura 3.15 – Travamentos laterais transversais.....	79
Figura 3.16 – Valores para o cálculo da altura efetiva.....	80
Figura 3.17 – Valores para o cálculo da altura efetiva da “parede 01”.....	81
Figura 3.18 – Parâmetros para o cálculo da espessura efetiva.....	85
Figura 3.19 – Valores para o cálculo da espessura efetiva da “parede 01”.....	85
Figura 3.20 – Argamassamento total e lateral.....	87
Figura 3.21 – Ação do efeito arco.....	89
Figura 3.22 – Elemento de alvenaria com condição de apoio-apoio.....	91
Figura 3.23 – Dimensões da parede exemplo.....	93
Figura 3.24 – Parede exemplo.....	99
Figura 3.25 – Diagrama de tensões na “parede 01”.....	104
Figura 3.26 – Cargas concentradas.....	106

Figura 3.27 – Área de ação das cargas concentradas.....	107
Figura 3.28 – Diagrama de tensões para alvenaria não armada.....	108
Figura 3.29 – Diagrama de deformações e tensões para a alvenaria armada.....	108
Figura 3.30 – Tipos de blocos usados por Sipp e Parsekian (2018).....	110
Figura 3.31 – Medidas internas das ranhuras ideais.....	111
Figura 3.32 – Detalhes para vigas altas.....	113
Figura 3.33 – Flexo-compressão, seção retangular.....	121
Figura 3.34 – Solicitações atuantes na “parede 01”.....	123
Figura 3.35 – Diagrama de tensões da parede “01”.....	124
Figura 3.36 – Dimensões para o dimensionamento da “parede 01”.....	127
Figura 3.37 – Características do painel para cálculo de h_{ef} de faixas intermediárias.....	129
Figura 3.38 – Armadura intermediária para vigas com quatro ou mais fiadas.....	135
Figura 3.39 – Detalhe da armadura de laje maciça sobre apoios.....	136
Figura 3.40 – Detalhe contra colapso progressivo em painéis de lajes pré-moldadas sem ligação.....	137
Figura 3.41 – Detalhe contra colapso progressivo em painéis de lajes pré-moldadas sem ligação (armadura negativa maior que $1,5 \text{ cm}^2/\text{m}$).....	138
Figura 3.42 – Posição sugerida da força diagonal resultante para o dimensionamento dos elementos do pórtico.....	144
Figura 3.43 – Erros de tradução das siglas apontados nas equações.....	146
Figura 3.44 – Dimensões limites de painéis armados.....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Traços e propriedades esperadas para cada classe de argamassa segundo a norma norte-americana.....	38
Tabela 3.2 – Propriedades da alvenaria.....	43
Tabela 3.3 – Valores do coeficiente de ponderação (γ_m).....	45
Tabela 3.4 – Fator de eficiência médio e característico de ensaios aos 28 dias.....	49
Tabela 3.5 – Valores característicos da resistência à tração na flexão (f_{tk}).....	51
Tabela 3.6 – Valores característicos da resistência ao cisalhamento em juntas horizontais de paredes (f_{vk}).....	52
Tabela 3.7 – Coeficientes de redução das ações variáveis para ELU.....	58
Tabela 3.8: Coeficientes de ponderação para ELU.....	58
Tabela 3.9 – Combinações de ações segundo a norma britânica.....	59
Tabela 3.10 – Combinações de ações segundo a norma canadense.....	60
Tabela 3.11 – Determinação do coeficiente de arrasto.....	66
Tabela 3.12 – Velocidades características de vento e pressão dinâmica de vento na direção do vento.....	68
Tabela 3.13 – Combinações de ações segundo a BS 5925-1:1992.....	71
Tabela 3.14 – Combinações de ações segundo a NBR 16868:2020.....	71
Tabela 3.15 – Valores para cálculo da espessura efetiva.....	84
Tabela 3.16 – Valores máximos para o índice de esbeltez.....	90
Tabela 3.17 – Valores máximos de espaçamento entre juntas verticais de controle.....	96
Tabela 3.18 – Resultados obtidos por Sipp e Parsekian (2018).....	110
Tabela 3.19 – Valores do coeficiente j	122
Tabela 3.20 – Valores máximos de diâmetro e espaçamento de armadura de alta passiva de aderência.....	134

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

Letras minúsculas

- a – distância ou dimensão
- b – largura
- d – altura útil
- e – excentricidade
- e_x – excentricidade resultante do plano de flexão
- f_s – tensão normal da armadura longitudinal
- f_d – resistência à compressão simples de cálculo da alvenaria
- f_k – resistência característica à compressão simples da alvenaria
- f_{pk} – resistência característica de compressão simples do prisma
- f_{ppk} – resistência característica de compressão simples da pequena parede
- f_{tk} – resistência característica de tração na flexão
- f_{td} – resistência de cálculo de tração na flexão
- f_{vk} – resistência característica ao cisalhamento
- f_{yd} – resistência de cálculo de escoamento da armadura
- h – altura
- h_e – altura efetiva
- j – coeficiente para permitir transformação de flexão oblíqua em flexão reta
- l – vão ou comprimento ou espaçamento
- l_e – vão efetivo
- p – dimensão da seção transversal na direção perpendicular ao eixo x
- q – dimensão da seção transversal na direção perpendicular ao eixo y
- s – espaçamento das barras da armadura transversal
- t – espessura
- t_e – espessura efetiva
- x – altura da linha neutra
- y – profundidade da região de compressão uniforme
- z – braço da alavanca

Letras maiúsculas

- A – área bruta da seção transversal
- A_s – área da seção transversal da armadura longitudinal de tração
- A_{s1} – área da seção transversal da armadura comprimida na face de maior compressão
- A_{s2} – área da seção transversal da armadura na face oposta à de maior compressão
- E – módulo de elasticidade
- E_a – módulo de elasticidade da alvenaria
- F_d – valor de cálculo de uma ação
- F_{gk} – valor característico das ações permanentes
- F_k – valor característico de uma ação
- $F_{qi,k}$ – valor característico da ação variável i
- H – altura
- K – fator majorador da resistência de compressão na flexão da alvenaria
- L – vão ou comprimento

M_{Rd} – momento fletor resistente de cálculo
 M_x – momento fletor em torno do eixo x
 M_y – momento fletor em torno do eixo y
 M'_x – momento fletor efetivo em torno do eixo x
 M'_y – momento fletor efetivo em torno do eixo y
 M_{2d} – momento fletor de cálculo de 2ª ordem
 N_{rd} – força normal resistente de cálculo
 R – coeficiente redutor devido à esbeltez
 V_a – força cortante resistida pela alvenaria
 V_d – força cortante de cálculo
 W – módulo de resistência de flexão

Letras gregas

α_v – índice de esbeltez vertical
 α_h – índice de esbeltez horizontal
 δ – coeficiente auxiliar para cálculo de espessura efetiva
 Φ – diâmetro
 γ_g – coeficiente de ponderação das ações permanentes
 γ_q – coeficiente de ponderação das ações variáveis
 γ_m – coeficiente de ponderação das resistências
 γ_z – Parâmetro para efeitos de segunda ordem
 λ – índice de esbeltez
 ϕ_o – coeficiente para redução de ações variáveis
 ρ – taxa geométrica de armadura longitudinal
 σ – tensão normal
 σ_k – tensão de compressão axial aplicada na seção;
 σ_s – tensão de compressão axial calculada com carga permanente de serviço
 τ – tensão de cisalhamento
 τ_{vd} – tensão de cálculo convencional de cisalhamento
 θ – rotação
 θ_a – ângulo de desaprumo

SUMÁRIO

1. Introdução.....	17
1.1 OBJEITVO GERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.3 JUSTIFICATIVA	19
1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	20
2. Revisão bibliográfica	21
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	21
2.2 NORMALIZAÇÃO DA ALVENARIA ESTRUTURAL	21
2.2.1 Norma Americana – MSJC CODE (ACI 530/ASCE 5/TMS 402)	22
2.2.2 Normas Europeias – BS 5628 e Eurocode 6	23
2.2.3 Normas Brasileiras	26
2.2.3.1 NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011	29
3. itens analisados entre as normativas	32
3.1 ÍNDICE	32
3.2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS	32
3.3 TERMOS E DEFINIÇÕES.....	34
3.4 REQUISITOS	34
3.4.1 Avaliação da conformidade do projeto.....	36
3.5 PROPRIEDADES DA ALVENARIA E DE SEUS COMPONENTES.....	37
3.5.1 Componentes.....	37
3.5.1.1 Blocos e tijolos.....	37
3.5.1.2 Argamassa.....	37
3.5.1.3 Graute.....	42
3.5.1.4 Aço.....	42
3.5.2 Propriedades.....	43
3.5.3 Resistências.....	44
3.5.3.1 Compressão simples.....	45
3.5.3.2 Compressão na flexão	49
3.5.3.3 Tração na flexão	51
3.5.3.4 Cisalhamento na alvenaria.....	51
3.5.3.5 Aderência.....	53
3.6 SEGURANÇA E ESTADOS LIMITES	53

3.6.1	Ações na alvenaria estrutural.....	54
3.6.1.1	Ações permanentes diretas	54
3.6.1.2	Ações permanentes indiretas.....	55
3.6.1.3	Ações excepcionais	56
3.6.1.4	Outras ações.....	57
3.6.2	Combinações de ações segundo as normas brasileiras	57
3.6.3	Combinações de ações segundo as normas estrangeiras.....	59
3.6.4	Comparação das combinações de ações da NBR 16868:2020 e da BS 5628-1:1992.....	61
3.7	ANÁLISE ESTRUTURAL	72
3.7.1	Estabilidade global dos edifícios	73
3.7.2	Hipóteses básicas	73
3.7.3	Vigas	74
3.7.3.1	Vão efetivo	74
3.7.3.2	Carregamento para vigas.....	74
3.7.3.3	Flecha imediata.....	75
3.7.3.4	Deformação por fluência	77
3.7.4	Pilares	77
3.7.5	Paredes.....	78
3.7.5.1	Altura efetiva	78
3.7.5.2	Espessura efetiva.....	84
3.7.6	Interação entre elementos de alvenaria	87
3.7.7	Interação para cargas verticais	88
3.7.8	Interação para cargas horizontais	88
3.7.9	Interação entre a alvenaria e estruturas de apoio	89
3.8	LIMITES PARA DIMENSÕES, DESLOCAMENTOS E FISSURAS.....	90
3.8.1	Esbeltez	90
3.8.2	Cortes e juntas.....	95
3.8.3	Deslocamentos limites	96
3.9	DIMENSIONAMENTO.....	97
3.9.1	Dimensionamento da alvenaria à compressão simples	98
3.9.1.1	Resistência de cálculo para parede e pilares não armados...98	
3.9.1.2	Resistência de cálculo para parede e pilares armados com índice de esbeltez menor ou igual a 30	101

3.9.1.3	Resistência de cálculo para paredes com índice de esbeltez maior que 30	105
3.9.1.4	Forças concentradas.....	105
3.9.2	Dimensionamento da alvenaria à flexão simples	107
3.9.3	Dimensionamento da alvenaria ao cisalhamento.....	115
3.9.4	Dimensionamento da alvenaria à flexo-compressão.....	118
3.9.4.1	Alvenaria não armada.....	118
3.9.4.2	Alvenaria armada.....	119
3.9.4.3	Elementos esbeltos.....	122
3.9.4.4	Parede com flexão oblíqua considerando a verificação por faixas	128
3.10	DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS E DETALHAMENTO	130
3.10.1	Cobrimentos.....	130
3.10.2	Armadura mínima.....	130
3.10.3	Armadura máxima, diâmetro das armaduras, espaços entre barras e ancoragem.....	131
3.10.4	Estribos de pilares e paredes.....	132
3.10.5	Emendas.....	132
3.10.6	Ganchos e dobras.....	133
3.10.7	Limite de fissuração em vigas e armadura intermediária em vigas	133
3.10.8	Armadura intermediária em vigas	134
3.11	ANEXOS DO PROJETO DE NORMA DA NBR 16868:2020.....	135
3.11.1	Anexo A: Dano acidental e colapso progressivo	135
3.11.2	Anexo B: Alvenaria protendida.....	138
3.11.3	Anexo C: Parede com índice de esbeltez superior a 30	138
3.11.4	Anexo D: Alvenaria participante	142
3.11.4.1	Ação composta entre a parede participante e o pórtico	142
3.11.4.2	Paredes participantes com aberturas e juntas	142
3.11.4.3	Cisalhamento por escorregamento da junta horizontal	143
3.11.4.4	Largura da diagonal comprimida.....	144
3.11.4.5	Diagonal comprimida efetiva.....	146
3.11.5	Anexo E: Painel sob ação lateral fora do plano	147
3.11.5.1	Coeficiente de ortogonalidade	147

3.11.5.2	Cálculo das solicitações.....	148
3.11.5.3	Alvenaria não armada.....	148
3.11.5.4	Alvenaria armada.....	149
3.11.6	Anexo F: Especificação dos materiais da alvenaria.....	150
4.	conclusões	151
4.1	CONCLUSÕES OBTIDAS NO TRABALHO	151
4.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	153
5.	referências.....	154

1. INTRODUÇÃO

A utilização do sistema construtivo em alvenaria estrutural tem aumentado muito nas últimas décadas. Agilidade na construção, um canteiro de obras mais organizado e limpo estão entre os fatores que justificam tal crescimento, mas também o desenvolvimento e atualizações de estudos, pesquisas e normas técnicas, contribuem muito para que o sistema seja mais difundido e executado entre o meio empresarial e acadêmico.

Seguindo essa linha de raciocínio, é sabido que atualmente no Brasil, diferentemente da maioria dos países que são referência em alvenaria estrutural como nos Estados Unidos e os países Europeus, tem-se duas normas para a alvenaria estrutural, a ABNT NBR 15812:2010 referente aos blocos cerâmicos, e a ABNT NBR 15961:2011 que aborda os blocos de concreto. As duas normas abrangem desde o dimensionamento da alvenaria até a execução e ensaios.

Quando lançadas as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 foram elogiadas pelo público acadêmico por suas atualizações e novidades, como Lanna (2010), que exalta a nacionalização dos parâmetros por parte da NBR 15812:2010, que aumenta a relação com os blocos produzidos dentro do território brasileiro, pois até então estes parâmetros eram baseados em normas estrangeiras e por consequência, perdia-se a conexão direta entre o parâmetro e o produto. Uma das razões para esta atualização dos parâmetros dentro das novas normatizações, foi a mudança da filosofia de dimensionamento para a alvenaria estrutural, que há 22 anos baseava-se no Modelo das Tensões Admissíveis, para a ideia de dimensionamento do Estado Limite Último (E.L.U).

A NBR 10837 – Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto, foi publicada em 1989, baseando a parte do dimensionamento na norma Norte – Americana “ACI 530/ASCE 5/TMS 402”, que adota Modelo das Tensões Admissíveis e resultava em um dimensionamento considerado conservador por muitos especialistas.

Com a publicação das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, a filosofia de dimensionamento foi alterada para a do Estado Limite Último (E.L.U), usado pelo EUROCODE 6 (1996). Para Sánchez (2013), esta mudança na filosofia do dimensionamento resultou em uma normativa nitidamente mais abrangente, isso se

deve a diversos fatores, como por exemplo, o uso de uma envoltória de Coulomb-Mohr para definir valores de tensão de cisalhamento, considerando os diversos tipos de materiais dos blocos. Ainda segundo Sánchez (2013), com uso do E.L.U ficou possível atribuir um coeficiente de ponderação para cada tipo de material, e para os materiais produzidos e utilizados pela indústria nacional. Isto reforça a ideia de que as normas trouxeram parâmetros mais “nacionalizados”, substituindo os antigos baseados em normas estrangeiras.

Atualmente a NBR 16868-1:2020 está em análise pública para substituir as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 e convergir para uma única norma sobre alvenaria estrutural, aproximando-se dos modelos normativos dos países desenvolvidos, tendo uma norma para blocos de concreto, cerâmicos e tijolos, tal como no Estados Unidos da América com a ACI 530/ASCE 5/TMS 402 e países da União Europeia com o EUROCODE 6.

Assim, apresenta-se este estudo, que visa analisar comparativamente a parte 1, que discorre sobre o dimensionamento da alvenaria estrutural, das normas ABNT NBR 15812:2010 de blocos cerâmicos e ABNT NBR 15961:2011 de blocos de concreto, e correlacionar com a parte 1 do projeto de norma da NBR 16868:2020, que atualmente já está em análise pública.

1.1 OBJEITVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar comparativamente e de forma didática a primeira parte das normas brasileiras vigentes de alvenaria estrutural, ABNT NBR 15812:2010 de blocos cerâmicos e ABNT NBR 15961:2011 de blocos de concreto, que aborda o dimensionamento. Juntamente com a análise às normas, será realizada uma comparação com a primeira parte do projeto de norma da NBR 16868:2020, que também aborda o dimensionamento, e propõe a atualização, união e substituição das normas citadas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar comparativamente as ABNT NBR 15812-1:2010 e ABNT NBR 15961-1:2011, mostrando suas convergências e divergências;
- Analisar a NBR 16868-1:2020, observando os critérios adotados em relação às normas ainda vigentes;
- Analisar as atualizações propostas pela NBR 16868-1:2020, com aplicações, exemplos e comparações de resultados de estudos prévios.

1.3 JUSTIFICATIVA

A Alvenaria estrutural, caracterizada por ser uma tecnologia de construção racionalizada, vem se desenvolvendo e agregando técnicas para cada vez mais reduzir custos e agilizar processos. Caminha junto a este desenvolvimento o avanço de pesquisas, estudos, assim como a elaboração e atualizações de normas técnicas, ocorridos tanto em âmbito nacional quanto internacional.

Nacionalmente já houve diversas mudanças ao longo do tempo, com um destaque para a publicação das ABNT NBR 15812:2010 e ABNT NBR 15961:2011 que substituíram a NBR 10837:1989 – Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto, sendo alterado o conceito de dimensionamento, execução e realização de ensaios para a alvenaria estrutural.

Já internacionalmente fica claro a grande movimentação e preocupação dos países que são referência em alvenaria estrutural, muito devido a estrutura disponível para pesquisa, com atualizações e revisões das normativas vigentes, como no caso dos Estados Unidos, onde a norma é revista a cada três anos, e na União Europeia onde houve a mudança das normas nacionais para o EUROCODE.

Neste cenário atual, onde está ocorrendo a elaboração do projeto de norma da NBR 16868:2020, que visa reunir em uma norma tanto blocos de concreto, quanto blocos cerâmicos, e mais os tijolos maciços. O projeto da nova norma é dividido em seu projeto em cinco partes, sendo elas:

– NBR 16868:2020 – Alvenaria Estrutural – Parte 1: Projeto;

- NBR 16868:2020 – Alvenaria Estrutural – Parte 2: Execução e Controle de Obras;
- NBR 16868:2020 – Alvenaria Estrutural – Parte 3: Caracterização de Elementos;
- NBR 16868:2020 – Alvenaria Estrutural – Parte 4: Estrutura em Situação de Incêndio;
- NBR 16868:2020 – Alvenaria Estrutural – Parte 5: Projeto para Ações Sísmicas.

A única parte que já entrou para o processo de avaliação pública é justamente a primeira, que aborda o dimensionamento e o projeto da alvenaria, e por sua vez, é o objeto de estudo deste trabalho, que aborda uma análise comparativa entre a primeira parte das normas vigentes no país, ABNT NBR 15812-1:2010 e ABNT NBR 15961-1:2011, e a primeira parte do projeto de norma da NBR 16868-1:2020.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta pesquisa limita-se a análise comparativa da primeira parte das ABNT NBR 15812:2010 e ABNT NBR 15961:2011, referente ao dimensionamento da alvenaria estrutural, com a primeira parte do projeto da ABNT NBR 16868:2020, apontando as suas similaridades, discrepâncias e adaptações, por meio de aplicações dos seus critérios e comparações com resultados de estudos já desenvolvidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A alvenaria estrutural é o sistema construtivo mais antigo utilizado pelo homem. Nesse, as paredes que antes serviam apenas para vedação passaram a desempenhar também a função estrutural (SANTOS *et al*, 2017).

O crescimento da construção com a alvenaria aconteceu até meados de 1930, com o seu dimensionamento sendo por meio de métodos empíricos. Após esse período, o sistema construtivo foi sendo aos poucos abandonado, devido ao surgimento de materiais como aço, que possibilitavam elementos estruturais com menores dimensões. Porém, na década de 1960, pós a Segunda Guerra Mundial, com a urgência de reconstruir as cidades atingidas pela mesma, de maneira rápida e barata, reformularam-se as antigas normas de dimensionamento e assim, o sistema construtivo voltou a ser competitivo.

Como qualquer outra tecnologia e/ou objeto de estudo, a alvenaria estrutural tem seu crescimento econômico conectado com o desenvolvimento de normas e códigos nacionais, e estes dependem fundamentalmente de estudos e pesquisas.

Atualmente no Brasil, a norma de dimensionamento de alvenaria estrutural a ser seguida depende do tipo de material do bloco, diferentemente do restante do mundo. Assim, essa revisão da Norma marca a unificação das ABNT NBR 15812:2010, sobre blocos cerâmicos, e ABNT NBR 15961:2011, de blocos de concreto, seguindo uma corrente mundial e facilitando o crescimento do sistema construtivo.

2.2 NORMALIZAÇÃO DA ALVENARIA ESTRUTURAL

No mesmo sentido de muitos avanços tecnológicos desenvolvidos a milhares de anos pelo homem, a alvenaria estrutural começou a ser usada e difundida como um sistema construtivo de forma empírica, sem conhecimento ou embasamento teórico. Devido a ascensão de tecnologias, este processo empírico acaba sendo substituído por estudos e pesquisas, visando sempre o melhoramento do objeto de estudo e uma melhor aplicação do mesmo na sociedade. Andando lado a lado e

buscando, em teoria, os mesmos objetivos que as pesquisas, estão os regulamentos e normas, que direcionam e orientam o uso de bens e serviços.

Normas técnicas são necessárias para organização e regulação do uso de bens e produtos, assim como instrução da correta aplicação de tecnologias. O desenvolvimento é algo constante, ou seja, sempre há avanços em pesquisas e mudanças nos padrões que até então eram ditos como absolutos. Dessa forma, a atualização dos regulamentos e normas técnicas se faz necessária para que elas estejam sempre condizentes com o cenário atual de onde elas atuam

2.2.1 Norma Americana – MSJC CODE (ACI 530/ASCE 5/TMS 402)

O desenvolvimento da unificação da norma norte americana começa em 1977, na época havia diversas técnicas de dimensionamento para alvenaria, e assim, sem muitas conformidades entre elas, dificultando ainda mais a escolha de engenheiros e arquitetos. Em 1977, a Sociedade Americana de Concreto (ACI – American Concrete Institute) e a Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE – American Society of Civil Engineers) concordaram em elaborar uma norma unificada e padronizada para o dimensionamento da alvenaria estrutural. Esse acordo resultou na criação do Comitê Conjunto de Padronização de Alvenaria (MSJC – Masonry Standards Joint Committee), um comitê formado por órgãos oficiais do governo, professores universitários, consultores, produtores e projetistas.

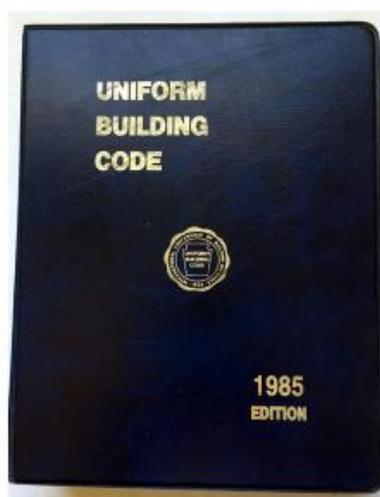
A elaboração da norma enfrentou problemas e diversas discussões, por causa de que o Estados Unidos ser um país de tamanho continental, tendo diferentes culturas e características em suas regiões. Uma das grandes divergências era o fato de que no lado oeste do país há uma alta atividade sísmica, diferentemente do centro e do lado leste.

Segundo a nota técnica “Technical Notes 3 – Overview of Building Code Requirements for Masonry Structures (ACI 530-02/ASCE 5-02/TMS 402-02) and Specification for Masonry Structures (ACI 530.1-02/ASCE 6-02/TMS602-02)” da “The Brick Industry Association” de julho de 2002, a ideia da elaboração de uma norma conjunta entre as entidades começou em 1977, foi aprovada pela MSJC (Masonry Standard Joint Committee) em 1986, sendo enviada posteriormente para uma revisão popular, e finalmente em 1989 a mesma foi publicada. Ainda de acordo com

a nota técnica citada, a norma é revisada a cada três ou quatro anos, e a sua primeira revisão aconteceu no ano de 1992, com mudanças de natureza editoriais.

Como falado anteriormente, a revisão e atualização de normas e regulamentos é de suma importância, pois as mudanças e avanços das tecnologias estão acontecendo de forma constante em todas as áreas, inclusive na Engenharia. Este fator aparece também na nota técnica acima citada, com a revisão da norma Americana ocorrer a cada três ou quatro anos. Na edição da norma de 1999 houve a inclusão de um capítulo sobre alvenaria protendida e uma seção sobre a adesão de verniz para a durabilidade da qualidade. Além destes itens, houve mudanças em valores no dimensionamento da alvenaria, como o do módulo de elasticidade e da resistência à compressão e a inclusão da argamassa, todas mudanças significativas na regulamentação. Em 2002, houve alterações de grande impacto, como por exemplo no dimensionamento para ações sísmicas, com requisitos prescritivos para tipos específicos de paredes de cisalhamento.

Figura 2.1 – ACI 530-02/ASCE 5-02/TMS 402-02.



Fonte: Technical Notes 3 – Overview of Building Code Requirements for Masonry Structures (ACI 530-02/ASCE 5-02/TMS 402-02) and Specification for Masonry Structures (ACI 530.1-02/ASCE 6-02/TMS602-02).

2.2.2 Normas Europeias – BS 5628 e Eurocode 6

O sistema construtivo de alvenaria estrutural é muito difundido nos países europeus, e as normas e regulamentos do velho continente são referências para

pesquisas e elaborações de outras normas e regulamentos de outros países há décadas. Segundo Haseltine (2012) o crescimento da alvenaria estrutural no Reino Unido, expandiu no século XVII com a grande demanda surgiram também vários regulamentos para a alvenaria. Porém, estas regulamentos eram voltadas para o controle das dimensões e áreas das construções, sem muita atenção para a parte estrutural da alvenaria, e finalmente no ano de 1948, foi publicado o primeiro código de prática que cobria os aspectos do dimensionamento da alvenaria, o CP 111 “Structural recommendations for load bearing walls”, de autoria governamental. Como de praxe em normas, algumas alterações foram feitas nesta versão de 1948 ao longo do tempo, em 1964 os fatores de segurança já apresentavam reduções, tornando o sistema construtivo mais barato e competitivo.

Em 1968, a explosão de gás no edifício Ronan Point, que ocasionou no colapso de um dos quatro cantos da edificação, chamou atenção do público geral e acadêmico. O edifício era construído em alvenaria estrutural, causando desconfiança da população com o sistema construtivo e alterações nas normas vigentes no Reino Unido sobre ele. Em 1978, depois de um período longo de pesquisas e esboços, o British Standards Institution publicou o novo código para alvenaria não reforçada, o “BS 5628: Part 1 Code of practice for use of masonry – Part 1: Structural use of masonry”.

Figura 2.2 – Ronan Point tower.



Fonte: Sinha (2002).

Haseltine (2012) enfatiza que no Reino Unido usava-se alvenaria sem reforço, provavelmente por causa da pouca atividade sísmica da região, portanto, havia somente um pequeno item sobre o assunto no antigo CP 111. Depois de uma publicação com sucesso do BS 5628: Part 1 - 2005, as atenções voltaram-se para a produção de uma regulação que abordasse a alvenaria reforçada. Nesse contexto, em 1985 o BSI (British Standards Institution) publicou a segunda parte da norma britânica de alvenaria estrutural, desta vez sobre alvenaria reforçada, denominada “BS 5628: Part 2 – 2005 – Code of practice for use of masonry – Part 2: Structural use of reinforced and prestressed masonry”. Também em 1985, houve a publicação da terceira parte do BS 5628 que normatizou as questões sobre os materiais e mão-de-obra necessários para a execução da alvenaria estrutural.

No ano de 1988, apenas três anos após a publicação da segunda parte da norma britânica, foi publicado um projeto do Eurocode 6 (EC 6), a nova norma Europeia para o dimensionamento da alvenaria estrutural. Segundo Faridah *et al* (2001), o Eurocode 6 surgiu como uma alternativa para diminuir as barreiras comerciais entre os países membros da União Europeia, assim como habilitando engenheiros e empreiteiros para trabalharem nos territórios dos países membros, com uma competição mais justa e rentável. Após um longo processo de discussões e revisões, devido à grande diversidade da produção de alvenaria estrutural pelos vários países pertencentes à União Europeia, a primeira parte do Eurocode 6 foi publicada como uma norma prévia em 1995 com o título de “Part 1.1: General rules for buildings: Rules for reinforced and unreinforced masonry”, a qual seria acompanhada futuramente pelas demais partes.

De acordo com Faridah *et al*. (2001), o EC 6 contém algumas diferenças da BS 5628, quanto ao dimensionamento à compressão, esbeltez, resistência ao cisalhamento e ao dimensionamento quanto a cargas concentradas, e considera o EC 6 mais conservador do que a BS 5628. Esse autor também considera que não houve grandes dificuldades para os engenheiros britânicos se adequarem ao EC 6, pois embora houvesse diferenças entre as normas, o EUROCODE 6 ainda é muito semelhante à norma britânica, devido à atuação de projetistas britânicos que participaram da elaboração da norma europeia.

Atualmente na Grã-Bretanha, os projetistas já estão familiarizados com o EC 6, depois de anos de transição e uso do código. Porém, com o atual cenário político da região, somado ao Brexit (saída da Grã-Bretanha da União Europeia), o futuro da

regulamentação sobre a alvenaria estrutural ainda está com uma pequena incógnita, embora a maioria dos especialistas acreditem que em relação aos códigos de dimensionamento, a Grã-Bretanha deve seguir com o bloco econômico para a segunda geração dos Eurocodes, de acordo com Faridah *et al.* (2001).

Devido as diferenças políticas, climáticas e de materiais usados nos países usuários do Eurocode, o comitê da normativa estabeleceu os chamados “National Annexes”. Este anexo é elaborado por cada país e anexado ao final do Eurocode, para acomodar as diferenças entre alguns critérios nacionais. Cada nação tem responsabilidade pelo seu “National Annexes” e ele somente é válido dentro de seu território.

Essas várias renovações e mudanças internacionais mostram como as normas e códigos de dimensionamento estão em constante mudança, seja pelo caminho natural de avanços tecnológicos e de pesquisas, ou por caminhos menos técnicos como respostas a acidentes ou consequências políticas.

2.2.3 Normas Brasileiras

No ano de 1977 foi publicada a NBR 5706 – Coordenação modular da construção, que segundo a ABNT foi a primeira norma brasileira que fez referência ao sistema construtivo de alvenaria estrutural, e teve como objetivo definir nomenclaturas, bases e definições, sistematizando as medidas dos componentes, desde o projeto até a execução.

Ainda na área de modulação, a NBR 5729 – Princípios fundamentais para a elaboração de projetos coordenados por meio de módulos, e a NBR 5718 – Alvenaria modular, foram lançadas em 1982 visando fixar condições exigíveis a serem observadas na elaboração de projetos modulados e na aplicação da alvenaria modular. Quase 30 anos depois, em 2010, as NBR 5706, NBR 5729 e a NBR 5718 foram canceladas e substituídas por uma única norma, a NBR 15873 – Coordenação modular para edificações, regulando termos, valor do módulo básico e os princípios da coordenação modular para edificação, e exemplificando a necessidade por renovações dos regulamentos.

Na área de cargas e ações em estruturas a NBR 6120 – Cargas para cálculos de estruturas de edificações foi publicada em 1980 e tinha o objetivo de fixar os valores das cargas que seriam consideradas para a elaboração do projeto da

estrutura de edificações, sem importar sua classe ou destino, salvo os casos previstos em normas especiais. A mesma norma teve a sua primeira atualização no ano de 2000. Para as ações estáticas e dinâmicas do vento a NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações foi publicada em 1988 e revisada logo depois em 1990.

A NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas foi também publicada na década de 1980, em 1984, fixando os requisitos exigíveis na verificação da segurança das estruturas e defini os critérios para a quantificação tanto das ações quanto das resistências que seriam consideradas em um projeto de estruturas das edificações, novamente em qualquer tipo de classe e destino, salvo os casos previstos em normas especiais, e teve a sua última revisão em 2003.

Quanto aos materiais relacionados a alvenaria estrutural, em 1994 foi publicada a NBR 6136 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos, estabelecendo os fatores necessários para o recebimento e uso de blocos de concretos vazados simples, os quais poderiam ser utilizados na execução de alvenarias com função estrutural ou não.

Ainda sobre blocos de concreto, na década de 1980 foram publicadas muitas normas sobre o elemento, como a NBR 8215 – Prismas de blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural – Preparo e ensaio à compressão, em 1983. Em 1985 foi publicada a NBR 8798 – Execução e controle de obras em alvenaria de blocos vazados de concreto, abordando a execução e recebimento dos blocos para alvenaria nos canteiros de obras. E no final da década, em 1989, a NBR 10837 – Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto, foi publicada, a norma que seria a referência para os projetistas quanto a alvenaria estrutural com blocos de concreto por muito anos. Todas as três normas citadas seriam canceladas em 2011, com a publicação da NBR 15961 – Alvenaria estrutural – Blocos de concreto, que é um dos tópicos principais deste trabalho e será citada logo mais neste capítulo.

Com relação à argamassa, foram publicadas duas normas em 2005, a primeira, NBR 13279 – Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão, a qual fixou o método a ser usado para a determinação da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos, no estado endurecido. A segunda norma sobre argamassas

publicada em 2005 foi a NBR 13281 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, que determinou os parâmetros exigidos para a argamassa utilizada em assentamento e revestimento de paredes e tetos.

A NBR 8949 – Paredes de alvenaria estrutural – Ensaio à compressão simples foi a primeira norma publicada que abordava diretamente a alvenaria estrutural, em 1985, e explicava como preparar paredes estruturais de blocos de concretos, cerâmicos ou tijolos, para o ensaio de resistência a compressão axial, além de como realizar o mesmo ensaio. Seguindo na linha do tempo e ainda sobre paredes de alvenaria estrutural, em 1999 as NBR 14321 – Paredes de alvenaria estrutural – Determinação da resistência ao cisalhamento e NBR 14322 – Paredes de alvenaria estrutural – Verificação da resistência à flexão simples ou à flexo-compressão foram publicadas. A NBR 14321 demonstra como determinar a tensão convencional de cisalhamento da alvenaria T_{alv} e o seu modulo de deformação transversal G_{alv} em paredes estruturais, e a NBR 14322 prescreve a forma de examinar a resistência de paredes de alvenaria estrutural feitas com blocos vazados de concreto quando submetidas à flexão simples ou à flexo-compressão.

Nota-se que foram citadas normas sobre a modulação da alvenaria, sobre as cargas e ações a serem consideradas, blocos vazados de concreto, argamassas e paredes de alvenaria. Antes mesmo da virada do século XX para o século XXI, a alvenaria estrutural já vinha crescendo de forma acentuada no país, somado a esta grande evolução, está o fator de que o no Brasil, havia e há muita produção de blocos cerâmicos, seja essa produção em nível industrial ou familiar. Nesse contexto, já havia estudos mostrando que a resistência do bloco no sistema de alvenaria estrutural não precisava ser de um valor exorbitante, um valor que era alcançado inclusive pelos blocos cerâmicos produzidos na época, exibindo um potencial nicho de negócios. Assim, somando a grande produção cerâmica do país e o atendimento das exigências técnicas, o uso de blocos cerâmicos na alvenaria estrutural cresceu muito neste período da troca de milênios.

Nesse grande avanço do uso dos blocos cerâmicos na alvenaria estrutural, a ABNT publica em 2005 a NBR 15270, voltada para esses blocos cerâmicos. A norma foi subdividida em três partes:

– Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Como já diz no nome, esta parte da norma fixa termos e requisitos exigíveis para o recebimento dos blocos usados na alvenaria de vedação.

– Parte 2: Blocos cerâmicos de alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Novamente como na parte 1, mas para os blocos que são usados na alvenaria estrutural.

– Parte 3: Métodos de ensaio. A terceira parte da norma é direcionada tanto para os blocos de alvenaria de vedação quanto para os blocos de alvenaria estrutural, e orienta como proceder na preparação e execução dos ensaios dos blocos.

2.2.3.1 NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011

Sobre as publicações das normas NBR 15812 – Alvenaria estrutura – Blocos Cerâmicos e NBR 15961 – Alvenaria Estrutural – Blocos de Concreto é oportuno lembrar da norma NBR 10837 – Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto, que foi a referência para o dimensionamento da alvenaria estrutural por mais de duas décadas.

A NBR 10837, publicada em 1989, usa a filosofia de dimensionamento do Método das Tensões Admissíveis, baseada na normativa norte-americana “ACI 530/ASCE 5/TMS 402”. Segundo Sánchez (2013), a adoção do modelo de tensões admissíveis leva a uma contemplação limitada dos parâmetros mecânicos, quando essa adoção tem pouco significado físico. Ainda segundo o autor, este modelo leva a um dimensionamento pouco abrangente e demasiado conservador.

No ano de 2010, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publica a NBR 15812 – Alvenaria estrutura – Blocos Cerâmicos, uma das normas analisada e comparada neste trabalho. A NBR 15812 abrange, em suas três partes, os requisitos para a elaboração do projeto, da execução e controle de obra, e dos métodos de ensaio e análise dos resultados, para alvenaria estrutural com blocos cerâmicos. Segundo Lanna (2010), a norma trouxe parâmetros que tinham maior relação aos blocos cerâmicos fabricados no Brasil, pois até então estes parâmetros eram baseados em normas estrangeiras. Essa “nacionalização” dos parâmetros com a nova norma fez com que os projetos fossem elaborados a partir de uma padronização mais clara e critérios mais rígidos, com um maior vínculo com a

realidade do país. Ainda segundo Lanna (2010), as estruturas concebidas e executadas a partir desta norma teriam capacidade de suportar sobrecargas dentro dos limites estabelecidos pela mesma.

Pouco mais de um ano depois do lançamento da norma sobre os blocos cerâmicos, a ABNT publica a NBR 15961 – Alvenaria Estrutural – Blocos de Concreto, dividida em duas partes que definem os requisitos e critérios para a alvenaria estrutural com blocos de concreto, e como dito anteriormente, cancelou e substituiu três normas anteriores sobre alvenaria estrutural com blocos de concreto. De acordo com Parsekian (2011), a NBR 15961 ajudaria a alvenaria estrutural brasileira a dar um salto de qualidade, pois o sistema construtivo ganharia em uniformização nos padrões de ensaio, uma atualização dos critérios de dimensionamento e um controle de obra com procedimentos mais claros e racionais.

“O controle de obra é baseado no ensaio de prisma, cujas normas antigas traziam confusões sobre o procedimento de ensaio, lote e quantidade de exemplares. Com as novas normas, se tem mais clareza e precisão, e isso irá refletir em construções de qualidade e mais seguras” (PARSEKIAN, 2011).

Na primeira parte da NBR 15961, voltada para o projeto da alvenaria estrutural, uma das grandes mudanças, assim como na NBR 15812, foi a adoção do método dos Estados Limites, alterando o conceito de dimensionamento e considerando critérios mais atuais para a verificação das ações e segurança. O ensaio de argamassa foi padronizado para cubos de 4 cm, e requerida a caracterização completa das argamassas com aditivos, além de adoção de critérios adequados para o dimensionamento ao cisalhamento.

Outra mudança que a NBR 15961 introduziu foi em questão aos resultados, padronizados para considerar sempre a área bruta, alterando das normas antigas que indicavam a resistência do bloco na área bruta e a do prisma na área líquida. A primeira parte da norma ainda introduziu conceitos básicos de verificação de dano acidental e colapso progressivo, e alguns requisitos básicos sobre a alvenaria pretendida.

Voltada para a execução e controle da obra, a parte 2 da NBR 15961 incluiu a obrigatoriedade da caracterização previa de bloco, argamassa, graute e prisma que seriam utilizados, além de apresentar um procedimento novo para controle da resistência a compressão dos elementos, com parâmetros em função da relação entre a resistência especificada no projeto, número de unidades repetidas e

variabilidade dos resultados de ensaio, facilitando o controle e o tornando mais eficiente.

Ainda de acordo com Parsekian (2011), as normas devem ser revisadas constantemente para atenderem e incorporarem o desenvolvimento teórico e técnico, e cita por exemplo a norma norte-americana, que é revista a cada três anos, e atualizada se necessário. Mesmo com toda a renovação que a NBR 15961 trouxe para a realidade brasileira, ainda havia fatores que ela não contemplava, e em 2016 já era necessária nova revisão da mesma que não atendia fatores como a estabilidade global de edifícios altos em alvenaria estrutural, exemplificando a necessidade de constante revisão das normativas.

A publicação das NBR 15812 e NBR 15961 representaram um grande avanço em relação à normatização anterior, alterando, por exemplo, o método de dimensionamento da alvenaria estrutural, do Método das Tensões Admissíveis para o método dos Estados Limites Últimos (E.L.U). Porém, a análise das normativas internacionais de países como Estados Unidos e países da União Europeia, fica claro que não existe normas diferentes para o dimensionamento ou execução da alvenaria estrutural dependendo do tipo de material do bloco, como é separado no Brasil.

Não somente para terminar com a separação normativa entre blocos cerâmicos e de concreto que a NBR 16868:2020 está sendo elaborada, mas também para abordar pontos que necessitam de um foco maior, devido a gama muito grande de avanços e pesquisas na área da alvenaria estrutural. Segundo Sánchez (2013), um dos pontos em que as normativas brasileiras não tratam de maneira direta é a instabilidade de paredes, onde ainda se mantém a sistemática norte-americana. Esse é só um dos exemplos a ser analisado e comparado entre as NBR 15812 e NBR 15961 e a NBR 16868:2020, que está sendo elaborada para substituí-las.

3. ITENS ANALISADOS ENTRE AS NORMATIVAS

3.1 ÍNDICE

O projeto de norma da NBR 16868:2020 utiliza a mesma estrutura de índice que a primeira parte das NBR 15812:2010 e 15961:2011, podendo ser dividido em três partes. A primeira parte trata dos capítulos iniciais, que discorrem sobre termos, símbolos, referências e requisitos de um projeto. Em uma segunda parte, estão os capítulos que antecedem o dimensionamento, apresentando as propriedades da alvenaria e seus componentes, as ações envolvidas, segurança e os estados-limites, além da análise estrutural a ser realizada. Em uma terceira e última seção, estão os itens que abordam os limites de dimensões e deslocamentos, como deve ser procedido o dimensionamento da alvenaria e as suas disposições construtivas, além dos anexos no final.

3.2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Analisando as normativas que são citadas como referência para as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 é esperado que se tenha diferenças entre as duas listagens, porque se trata de uma norma para blocos cerâmicos e outra para blocos de concreto. Nesta comparação, apenas duas normas que são referência para a NBR 15961:2011 não estão na lista das normativas de referência para a NBR 15812:2010, são elas a ABNT NBR 6136:2014 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos; e a própria parte 2 da NBR 15961:2011, que aborda a execução e controle das obras. Nota-se que essas duas normas são especificadas para blocos de concreto, então obviamente elas são referências somente para a norma que aborda os blocos de concreto.

Assim como na NBR 15961:2011 há normativas de referências específicas sobre blocos de concreto, e assim, não aparecem na NBR 15812:2010, o inverso também é válido. Tanto a primeira quanto a segunda parte da ABNT NBR 15270 – Componentes Cerâmicos são referências para a NBR 15812:2010, e como se trata de uma normativa específica sobre elementos cerâmicos, elas não aparecem como referência para a NBR 15961:2011. Há mais três normas que estão listadas como

referência para a NBR 15812:2010 e não aparecem para a NBR 15961:2011, listadas abaixo:

- ABNT NBR 5706 (1977) – Coordenação modular na construção (cancelada);
- ANBT NBR 5718 (1982) – Alvenaria modular (cancelada);
- ABNT NBR 5729 (1982) – Princípios fundamentais para a elaboração de projetos coordenados modularmente (cancelada);

A lista de normativas que são referências para o projeto da NBR 16868:2020 é uma clara combinação das normas de referência da NBR 15812:2010 e da NBR 15961:2011, como esperado, porém, com um número superior de normas de referência da NBR 15961:2011 – Alvenaria estrutural – Blocos de concreto. São no total quinze normas de referência para o projeto da nova norma, dentre elas, sete estão presentes tanto na NBR 15812:2010 quanto na NBR 15961:2011.

A NBR 6136:2014 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos; é a única norma listada como referência no projeto de norma da NBR 16868:2020 que está somente em uma das normas ainda vigentes para alvenaria estrutural (NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011).

O projeto da nova norma para alvenaria estrutural ainda lista as suas próprias partes 2 e 3 como referências, onde são abordadas a execução e controle de obra e a caracterização de elementos, respectivamente. Ainda há mais três normas que não eram relacionadas nem na NBR 15812:2010 ou na NBR 15961:2011, são elas:

- ABNT NBR 5738 (2016) – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova;
- ANBT NBR 5739 (2010) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos;
- ABNT NBR 15270-1 (2017) – Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria. Parte 1 - Requisitos;

Como mostrado foram acrescentados tanto normas sobre materiais cerâmicos quanto sobre materiais de concreto, devido a um dos objetivos da NBR 16868:2020

ser de unificar as duas normas sobre alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de blocos de concreto.

O maior destaque dentre as novidades das normativas é a inclusão da norma canadense (CSA S304 (2014) – Design of masonry structures) e da norma europeia (EN 1996-1 -1 (2005) – Eurocode 6: Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures), porém elas estão listadas como bibliografias do projeto da NBR 16868:2020 e não como normativas de referência.

3.3 TERMOS E DEFINIÇÕES

A seção que lista os termos usuais na alvenaria estrutural e suas respectivas definições, e é a mesma lista para a NBR 15812:2010 quanto para a NBR 15961:2011. Essa mesma seção está presente no projeto de norma da NBR 16868:2020, e tem poucas diferenças entre as normas que ela vem a substituir. Foram acrescentados termos como “flange” que é um trecho de alvenaria considerado para o aumento de rigidez da seção transversal; “pequena parede” que fica determinado como um corpo de prova que tenha comprimento de dois blocos ou dois tijolos, e altura cinco vezes maior que a espessura do bloco ou tijolo, não podendo ser inferior a 70 cm. Ainda foram adicionados os termos de “prisma cheio”, “prisma oco” e “tijolo”, que são os prismas preenchidos com graute, prismas sem esse preenchimento e o componente básico da alvenaria com altura inferior a 115 mm.

Seguindo a ordem do projeto da nova norma e das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, a próxima seção trata dos “Símbolos e termos abreviados”, porém como esta seção é igual tanto nas duas normas referidas, quanto no projeto da nova norma, assim, não será realizado nenhum comentário sobre esta seção.

3.4 REQUISITOS

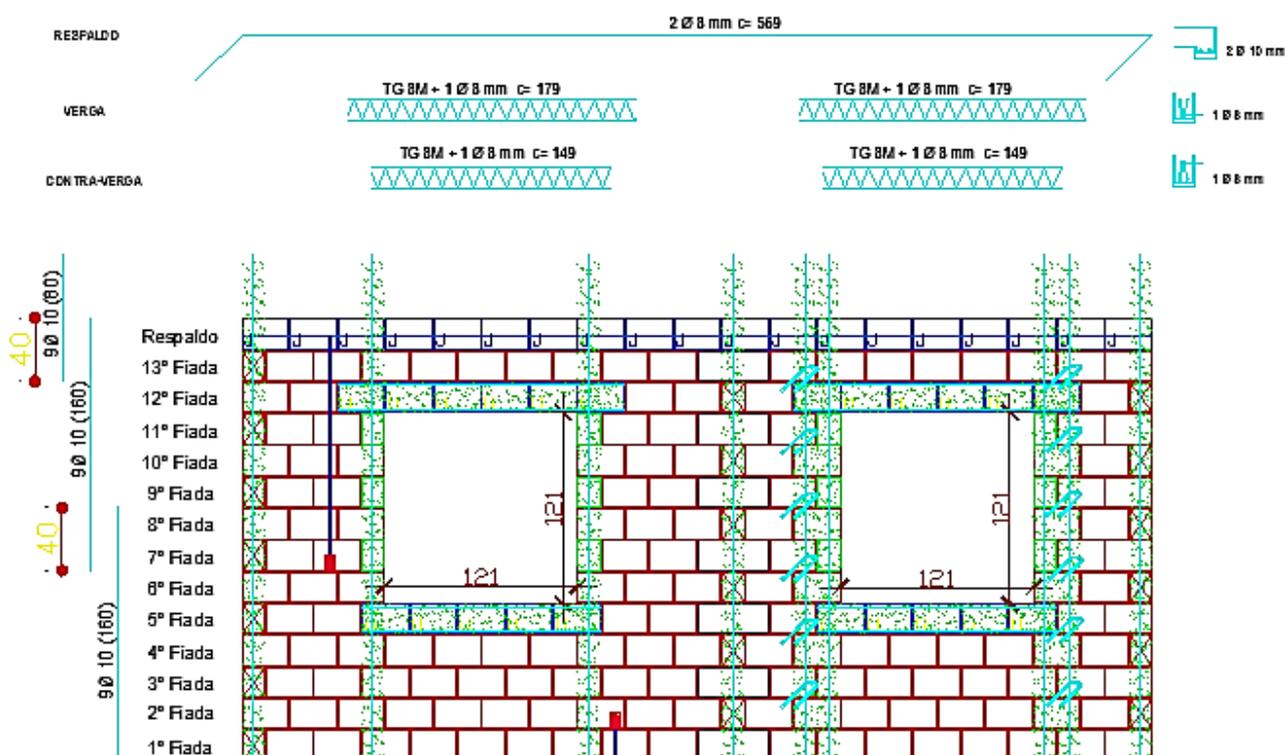
A seção do projeto de norma da NBR 16868:2020 sobre requisitos para a alvenaria estrutural é muito semelhante às seções do mesmo tema das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, que são iguais, porém, com alguns itens novos.

É abordada a qualidade da estrutura, observando que a solução estrutural deva atender aos requisitos de capacidade resistente, desempenho e durabilidade, especificados nas normas técnicas. O projeto deve ser compatível, representativo de acordo com o desejado para a estrutura e dimensionado e com todas as verificações estruturais presentes, além de conter as especificações dos materiais apropriados.

Sobre a documentação do projeto, tem-se dois pontos destacados tanto no projeto da nova norma, quanto nas normas ainda vigentes: Desenhos técnicos e Especificações. Em desenhos técnicos, o projeto de norma da NBR 16868:2020 mantém os requisitos já existentes nas NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, que são iguais. Apresenta-se como um bom projeto aquele que contenha as plantas das fiadas, elevações de paredes, posicionamento de blocos especiais, detalhamento das amarrações das paredes, localização dos pontos preenchidos com graute, armaduras e juntas de dilatação e controle, conforme mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1: Exemplo de elevação/paginação de uma parede de uma edificação em alvenaria estrutural

PAREDE 36
ESCALA 1:40



Fonte: Autor (2020).

No item “especificações” as normas ainda vigentes e o projeto da nova norma falam que o projeto deve informar as resistências à compressão de prismas e grautes, resistência média a compressão da argamassa, assim como as especificações dos aços adotados (categoria, classe e bitola).

Ainda é adicionado no projeto da nova norma uma recomendação para que o Plano de Controle de Qualidade da Obra deve seguir a parte 2 da norma, porém, é somente uma recomendação.

3.4.1 Avaliação da conformidade do projeto

No item de “requisitos” há apenas uma diferença do projeto de norma da NBR 16868:2020 para as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, que é a adição do item “Avaliação da conformidade do projeto” que é definida por “verificação e análise crítica do projeto, realizadas com o objetivo de avaliar se este projeto atende aos requisitos das normas técnicas vigentes aplicáveis.”.

Esta análise crítica deve contemplar, integralmente ou parcialmente segundo o projeto da nova norma, a revisão das premissas adotadas para o projeto, verificando se elas estão de acordo com a norma, além de analisar as considerações de cálculo e os resultados. Também são incluídos na análise os desenhos e detalhes construtivos do projeto.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 ainda especifica que a avaliação de conformidade deve ser realizada por um profissional habilitado e independente ao projetista da estrutura, sendo também registrada em um documento específico e acompanhar as documentações citadas acima. Essa avaliação de conformidade deve ser elaborada antes da fase de construção, preferencialmente junto a elaboração do projeto. A responsabilidade pela escolha do profissional que fará a avaliação de conformidade é do contratante do projeto da estrutura ou do responsável da obra, podendo ser designada para um terceiro.

A avaliação de conformidade é uma novidade que poderá inaugurar uma nova atividade para projetistas na área de alvenaria estrutural. Essa atividade poderá elevar os padrões de segurança nos projetos, uma vez em que há, nas normas brasileiras, uma falta de limitações em diversos aspectos, como, por exemplo, a resistência à compressão da argamassa que será discutida no próximo item deste trabalho. Essa falta de limitantes acaba muitas vezes direcionando a segurança do

projeto ao bom senso do projetista. Assim, uma análise crítica feita por outro profissional habilitado pode vir a agregar para a segurança do projeto.

Embora o projeto de norma da NBR 16868:2020 não especificar como deve ser verificada a avaliação de conformidade do projeto, gera-se uma expectativa de como será orientada, pois a mesma, segundo o projeto de norma da NBR 16868:2020, deverá ser registrada oficialmente, além de acompanhar os documentos do projeto como desenhos técnicos e especificações.

3.5 PROPRIEDADES DA ALVENARIA E DE SEUS COMPONENTES

Esta seção discorre sobre os componentes da alvenaria estrutural, suas propriedades, as resistências envolvidas no sistema construtivo e seus elementos. A separação dos itens proposta pelo projeto da nova norma é idêntica à usada nas NBR 15812:2010 e NBR 15691:2011.

3.5.1 Componentes

3.5.1.1 Blocos e tijolos

O primeiro componente abordado pelas normativas é o principal elemento da alvenaria estrutural, o bloco. Nas NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, eram abordados somente blocos cerâmicos e blocos de concreto em cada uma das normas, respectivamente. O projeto de norma da NBR 16868:2020 além de unir os dois tipos de blocos inclui também os tijolos, citando que para blocos cerâmicos a referência ocorre pela ABNT NBR 15270:2005 – 1 e para os blocos de concreto, a referência é a ABNT NBR 6136:2014 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos.

3.5.1.2 Argamassa

Tanto nas NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 quanto no projeto de norma da NBR 16868:2020, as argamassas de assentamento devem atender os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 13281:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.

A NBR 15812:2010 especifica para resistência à compressão da argamassa um valor mínimo de 1,5 MPa e um máximo de $0,7 f_{bk}$ referido à área líquida. Já a NBR 15961:2011 é ainda mais vaga e ampla na especificação, e fala somente em um limite máximo de 0,7 da resistência característica especificada pelo bloco referida a área líquida, o mesmo valor máximo da norma de blocos cerâmicos. Estes limitantes concedem margem consideráveis para projetistas adotarem valores que não são adequados para a resistência da argamassa usada na alvenaria estrutural.

Mohamad (2007) e Schankoski, Prudêncio Jr, e Pilar (2015) apontam casos onde os valores de tensão de resistência característica da alvenaria, adotados pelos projetistas baseando-se em normas brasileiras, eram de mesma magnitude dos de esmagamento da argamassa.

Em comparação, as normas internacionais delimitam mais detalhadamente as propriedades da argamassa, como nas normas ACI 530/ASCE 5/TMS 402 (2016), onde é especificado quatro tipos de traços padronizados para a argamassa, com os valores médios esperados para a resistência à compressão, além do índice de retenção de água e teor de ar incorporado, como mostra a Tabela 3.1. Sugere-se que a escolha do traço seja realizada em relação à agressividade do meio.

Tabela 3.1: Traços e propriedades esperadas para cada classe de argamassa segundo a norma norte-americana.

Classe da Argamassa	Materiais em volume			Resistência à compressão média aos 28 dias (Mpa)	Retenção de água mínima (%)	Teor máximo de ar incorporado (%)
	Cimento	Cal	Areia			
M	1	0.25	2.5 a 3 vezes	17.2	75	12
S	1	0.25 a 0.5	a soma dos	12.4		12
N	1	0.5 a 1.25	aglomerantes	5.2		14
O	1	1.25 a 2.25		2.4		14

Fonte: Lübeck (2016).

A norma britânica também especifica quatro traços diferentes para a argamassa usada na alvenaria estrutural, e segundo Lübeck (2016), os valores das normas norte-americana e britânica variam consideravelmente, sendo a britânica mais conservadora, em relação a resistência à compressão.

Figura 3.2: Traços e resistência à compressão média esperada para a argamassa segundo a norma britânica.

	Clase da argamassa	Proporção em volume Cimento:cal:areia	Resist. Média à compressão aos 28 dias (Mpa)	
			Em laboratório	Em obra
Resistência crescente ↑ Capacidade crescente de acomodar deformações e movimentos ↓	(i)	1:0 a 0.25:3	16	11
	(ii)	1:0.5:4 a 4.5	6.5	4.5
	(iii)	1:1:5 a 6	3.6	2.5
	(iv)	1:2:8 a 9	1.5	1

Fonte: Lübeck (2016).

Ainda sobre normas internacionais, o Eurocode 6 indica que a escolha da argamassa seja principalmente em função da capacidade de retenção de umidade e da plasticidade, considerando-se as características do bloco usado e da agressividade do meio.

Segundo Lübeck (2016) a carência de limitantes para os valores das propriedades desejáveis para a alvenaria é clara, com destaque para a resistência à compressão. Ainda segundo o autor, deve-se adotar o menor valor possível de resistência para que se mantenha a ductilidade da alvenaria, porém, não tão baixo a ponto de que a argamassa esmague, e induza a ruptura da parede por concentração de tensão nos blocos.

No estudo de Lübeck (2016), o autor propôs determinar a resistência à compressão da argamassa usada na alvenaria a partir da resistência característica da alvenaria $f_{k,brut}$, medida na área bruta. A partir da premissa de que a argamassa das juntas estava confinada, a envoltória da resistência é dada por:

$$f_{m^*} = f_a + k \sigma_3 \quad (1)$$

Na Equação 1, k é o coeficiente angular da reta, onde o autor usou o valor de 2,3 para argamassas fracas e 3,3 para argamassas fortes. Sendo σ_3 a tensão lateral confinante.

Lubeck (2016), assim como outros autores como De Lima (2010), considera como condição ideal de projeto que a ruptura da alvenaria se dá quando for atingido o limite de resistência à tração do bloco (f_{bkt}) na região próxima à junta, considerando os altos valores de eficiência prisma/bloco de estudos como De Marco (2016) e De Lima (2010), assim, a tensão lateral confinante máxima na Equação 1 passa a ser $\sigma_3 = f_{bkt}$.

Por praticidade, a resistência à tração pode ser estimada como uma parcela da resistência a compressão do bloco. Esse autor, citando estudos de Leão (2008), Santos (2008) e Pinheiro (2009) que avaliaram a relação entre a resistência à compressão e tração, propõe os valores para a resistência à tração de blocos cerâmicos e de concreto como:

$$f_{btk} = 0,06 \cdot f_{bk,liq} - \text{blocos cerâmicos}$$

$$f_{btk} = 0,10 \cdot f_{bk,liq} - \text{blocos de concreto}$$

Assim, o autor generalizou a Equação 1, adotando um valor de k de 2,3, e substituindo os valores de σ_3 por f_{bkt} das Equações 2 e 3:

$$f_{m^*_{cer}} = f_{ak} + 2,3 (0,06 \cdot f_{bk,liq}) = f_{ak} + 0,14 \cdot f_{bk,liq} \quad (2)$$

$$f_{m^*_{con}} = f_{ak} + 2,3 (0,1 \cdot f_{bk,liq}) = f_{ak} + 0,23 \cdot f_{bk,liq} \quad (3)$$

A resistência descrita nas equações acima f_{m^*} é a máxima que a argamassa confinada pode alcançar, assim, segundo Lübeck (2016) a resistência necessária do projeto para a alvenaria não pode superar este valor. Assim, esse autor chega nas inequações do primeiro limite para a resistência à compressão da argamassa f_{ak}' , aplicando um limite de 0,5 da resistência confinada da argamassa como máximo nível de tensão para manutenção do comportamento linear do material:

$$f_{ak}'_{cer} \geq 2 \cdot f_k - 0,14 \cdot f_{bk,liq} \quad (4)$$

$$f_{ak}'_{con} \geq 2 \cdot f_k - 0,23 \cdot f_{bk,liq} \quad (5)$$

Para o segundo limite de resistência da argamassa de assentamento f_{ak}'' , o autor cita o estudo de Lima (2010) que constatou que a ruptura dos prismas

acontecendo por esmagamento da argamassa, quando a proporção entre a resistência da argamassa e a resistência do bloco na área líquida era menor que 0,4. Assim, o autor considera válido que esta resistência da argamassa não possa ser menor que 40% da resistência à compressão do bloco na área líquida. Lübeck (2016) elaborou uma Tabela, representada pela Figura 3.3, definindo a resistência mínima da argamassa como o menor valor entre f_{ak}' , f_{ak}'' e 1,5 MPa, esse último valor que está especificado nas normativas brasileiras.

Figura 3.3: Resistência à compressão da argamassa em função dos limites propostos por Lübeck (2016).

Bloco	Resist. Alven.	Resist. prisma	Fator	Rel.	Resistência do bloco							$f_{ak,max}$ Norma
	$f_{k,brut}$ (MPa)	$f_{pk,brut}$ (MPa)	efic. f_{pk}/f_{bk}		$f_{k,liq}$ (MPa)	$f_{bk,brut}$ (MPa) Teórica	$f_{bk,brut}$ (MPa) Adotada	$f_{bk,liq}$ (MPa)	$f_{a,k}'$ (MPa)	$f_{a,k}''$ (MPa)	$f_{ak,min}$ (MPa)	
cer. vazado	1,0	1,4	0,45	0,42	2,4	3,2	4,0	9,5	2,6	3,8	2,6	6,7
	2,0	2,9			4,8	6,3	7,0	16,7	5,7	6,7	5,7	11,7
	3,0	4,3			7,1	9,5	10,0	23,8	8,8	9,5	8,8	16,7
	4,0	5,7			9,5	12,7	13,0	31,0	11,9	12,4	11,9	21,7
	5,0	7,1			11,9	15,9	16,0	38,1	15,0	15,2	15,0	26,7
	6,0	8,6			14,3	19,0	20,0	47,6	17,6	19,0	17,6	33,3
cer. maciço	1,0	1,4	0,45	0,57	1,8	3,2	4,0	7,0	1,9	2,8 (2,1)	2,8 (2,1)	4,9
	2,0	2,9			3,5	6,3	7,0	12,3	4,2	4,9 (3,7)	4,9 (4,2)	8,6
	3,0	4,3			5,3	9,5	10,0	17,5	6,5	7,0 (5,3)	7,0 (6,5)	12,3
	4,0	5,7			7,0	12,7	13,0	22,8	8,8	9,1 (6,8)	9,1 (8,8)	16,0
	5,0	7,1			8,8	15,9	16,0	28,1	11,1	11,2 (8,4)	11,2 (11,1)	19,6
	6,0	8,6			10,5	19,0	20,0	35,1	13,0	14,0 (10,5)	14,0 (13,0)	24,6
concr.	1,0	1,4	0,65	0,59	1,7	2,2	3,0	5,1	2,2	2,0 (1,5)	2,2	3,6
	2,0	2,9			3,4	4,4	5,0	8,5	4,8	3,4 (2,5)	4,8	5,9
	3,0	4,3			5,1	6,6	7,0	11,9	7,4	4,7 (3,6)	7,4	8,3
	4,0	5,7			6,8	8,8	9,0	15,3	10,1	6,1 (4,6)	10,1	10,7
	5,0	7,1			8,5	11,0	11,0	18,6	12,7	7,5 (5,6)	12,7	13,1
	6,0	8,6			10,2	13,2	14,0	23,7	14,9	9,5 (7,1)	14,9	16,6

Fonte: Lübeck (2016).

Analisa-se a Figura 3.4 e nota-se que todas as resistências mínimas necessárias para a argamassa, segundo os limites do autor, foram maiores do que o valor mínimo prescrito pela NBR 15812:2010 de blocos cerâmicos, de 1,5 MPa, e a NBR 15961:2011 de blocos de concreto nem sequer estabelece um limite mínimo.

Analisa-se o projeto de norma da NBR 16868:2020, é somente recomendado que a resistência à compressão da argamassa seja limitada a 1,5 vezes a

resistência característica do bloco, sem nenhum parâmetro mínimo, seguindo a NBR 15961:2011. Percebe-se uma defasagem quanto aos parâmetros de resistência da argamassa à compressão por parte das normativas brasileiras, fator importante já comprovado em estudos como de Lübeck (2016) e Schlosser (2019). Essa falta de parâmetros dá margem para má interpretação de projetistas e conta com o bom senso do mesmo para a definição do valor desta resistência, que se mal projetada, pode acarretar esmagamento da junta. Embora o projeto de norma da NBR 16868:2020 apresentar o Anexo F, com valores de resistência sugeridos, nenhum dos valores necessariamente precisam ser seguidos, resultando assim em uma margem, inclusive legal, ao projetista de cometer erro de dimensionamento.

3.5.1.3 Graute

Em relação ao graute, as duas normas brasileiras ainda vigentes são muito parecidas. Ambas especificam que a influência do graute na resistência da alvenaria seja verificada em laboratório. A NBR 15812:2010 (blocos cerâmicos) especifica que a influência do graute na compressão deve ser avaliada por meio de ensaio de prismas, e a NBR 15961:2011 (blocos de concreto) também aponta ensaios de prisma, mas também ensaios de pequenas paredes ou paredes.

Em casos de alvenaria armada, a NBR 15961:2011 é a única que menciona tal situação, e especifica um valor mínimo para resistência à compressão de 15 MPa.

Analisando o projeto da nova norma, ela segue fielmente a NBR 15961:2011 – Alvenaria Estrutural – Blocos de concreto, mostrando uma preferência por esta norma sobre a normativa que aborda os blocos cerâmicos, talvez por ser uma norma mais atual e completa, mesmo sendo muito parecida com a NBR 15812:2010.

3.5.1.4 Aço

Tanto para as normas de blocos cerâmicos (NBR 15812:2010) quanto para a de blocos de concreto (NBR 15961:2011) as especificações para o aço usadas na alvenaria estrutural são as mesmas, seguir a ABNT NBR 7480:2007–Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Caso não haja ensaios ou valores fornecidos pelo fabricante, admite-se o valor de 210 GPa para o

modulo de elasticidade do aço. O projeto da nova norma segue os mesmos parâmetros.

3.5.2 Propriedades

Devido a união de blocos cerâmicos e blocos de concreto em uma mesma normativa, a seção das propriedades físicas da alvenaria precisou ser alterada para o projeto da nova norma. Por suas naturezas serem diferentes, é fisicamente impossível apresentar valores iguais para os dois tipos de blocos em algumas propriedades, como o coeficiente de Poisson ou coeficiente de dilatação térmica. Assim, o projeto de norma da NBR 16868:2020 apresenta a Tabela 3.2, separada em seções, especificando o valor esperado para cada tipo de bloco.

Tabela 3.2: Propriedades da alvenaria

	Propriedade	Valor
Bloco de concreto	Módulo de deformação longitudinal	800 f_{pk} para $f_{bk} \leq 20$ Mpa 750 f_{pk} para $f_{bk} = 22$ e 24 Mpa 700 f_{pk} para $f_{bk} \geq 26$ Mpa
	Coeficiente de Poisson	0,20
	Coeficiente de dilatação térmica linear	$9.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
	Coeficiente de dilatação unitária por retração da alvenaria (1)	$500 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$
	Coeficiente de fluência específica (considerando tensões na área líquida, ajustar valores para área bruta conforme o caso).	0,36 mm/m/Mpa
Bloco cerâmico	Módulo de deformação longitudinal	600 f_{pk}
	Coeficiente de Poisson	0,15
	Coeficiente de dilatação térmica linear	$6,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
	Coeficiente de expansão por umidade	$300 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$
	Coeficiente de fluência específica (considerando tensões na área líquida, ajustar valores para área bruta conforme o caso).	0,15 mm/m/Mpa
Tijolo cerâmico	Módulo de deformação longitudinal	600 f_{pk}
	Coeficiente de Poisson	0,15
	Coeficiente de dilatação térmica linear	$6,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
	Coeficiente de expansão por umidade	$300 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$
	Coeficiente de fluência específica	0,15 mm/m/Mpa
(1) Esse valor deve ser aumentado para $600 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$ quando os blocos forem produzidos sem cura a vapor e na verificação de perdas quando a protensão é aplicada antes de 14 dias após a execução da parede		

Fonte: NBR 16868:2020.

Nota-se na seção sobre o bloco de concreto, que o módulo de deformação longitudinal muda comparado ao que apresenta a NBR 15961:2011. Na norma ainda vigente, tinha-se um valor de $800 f_{pk}$ para uma resistência característica do bloco f_{bk} de 16 MPa. Conforme a Tabela do projeto da nova norma, os valores para o f_{bk} aumentaram, e o módulo de deformação longitudinal de $800 f_{pk}$ passa a ser relacionado com um bloco de f_{bk} 20 MPa. Além disso, são listados os valores para esta propriedade para blocos de 22, 24 e 26 MPa.

Segundo Medeiros e Parsekian (2019), esta mudança se baseia em Fortes *et al.* (2017), estudo realizado em prismas e blocos de concreto de alta resistência. A relação entre o módulo de elasticidade da alvenaria E_a e a resistência característica do prisma (f_{pk}) depende diretamente da resistência do bloco f_{bpk} , variando entre $800f_{pk}$ para blocos de concreto com baixa resistência a $700f_{pk}$ para os blocos com alta resistência.

Tal aumento na resistência do bloco de concreto para a relação com o módulo de deformação longitudinal é questionável, uma vez que é escasso o acesso a blocos com tamanha resistência no mercado nacional.

Também surge com o projeto da nova norma a inclusão da seção do tijolo cerâmico e os valores para o coeficiente de fluência específica, mostrados na Figura 3.5, com valores específicos para cada tipo de bloco ou tijolo. Nas normas ainda vigentes (NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011) é especificado o limite mínimo para este coeficiente de ser o dobro da deformação elástica, independentemente do tipo do material.

A NBR 6118:2014 especifica que o coeficiente de fluência do concreto tem seu valor determinado a partir de uma tabela, tendo como parâmetros a umidade do ambiente, espessura fictícia e a classe e a idade do concreto.

De acordo com Medeiros e Parsekian (2019), a capacidade de carga da parede de tijolo é 15% menor do que a de uma parede de bloco vazado com mesmas dimensões geométricas. Essa especificação é o parâmetro básico para o projeto, e foi fundamentada nos estudos de Bastos (2000).

3.5.3 Resistências

Antes de comentar as solicitações na alvenaria estrutural e as especificações das normativas para o mesmo, o projeto da nova norma apresenta os valores dos

coeficientes de ponderação γ_m , para combinações normais, especiais ou de construção e excepcionais. Esses valores indicados pelo projeto de norma da NBR 16868:2020 são idênticos aos valores que a NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 apresentavam, e estão na Tabela 3.3. Para a análise do estado limite de serviço (ELS), não é necessário a minoração.

Tabela 3.3: Valores do coeficiente de ponderação (γ_m).

Combinações	Alvenaria	Graute	Aço
Normais	2,0	2,0	1,15
Especiais ou de construção	1,5	1,5	1,15
Excepcionais	1,5	1,5	1,0

Fonte: NBR 16868:2020

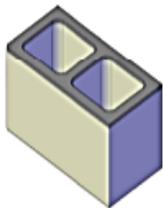
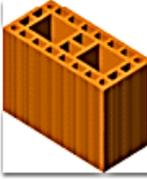
3.5.3.1 Compressão simples

Tanto a NBR 15812:2010 quanto a NBR 15961:2011 especificam os mesmos fatores para a resistência à compressão simples, e o projeto de norma da NBR 16868:2020 não fez alterações quanto a isso. É estabelecido que a resistência à compressão simples da alvenaria f_k deve ser determinada por meio do ensaio de paredes, porém, se o bloco atender os valores de altura de 190 mm e a junta da argamassa de 10 mm, esse valor pode ser especificado como 70% da resistência característica de compressão simples do prisma f_k , ou como 85% desta mesma resistência da pequena parede f_{ppk} . Ainda, pode-se considerar que essa resistência é igual a 60% da resistência à compressão simples do prisma f_{pk} quando se usa alvenaria de tijolos.

Ainda há fatores de correção dependendo do argamassamento total ou parcial das paredes dos blocos. Se a alvenaria tiver um argamassamento parcial e se a resistência for determinada pelo ensaio de compressão de prismas e pequenas paredes, a resistência característica à compressão deve ser corrigida pelo fator 0,80. No caso de não haver alinhamento vertical entre os septos verticais, devido à geometria do bloco, as normas especificam que o cálculo deve ser feito considerando argamassamento parcial.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 traz no seu anexo F uma tabela com valores de referência para especificação das resistências dos materiais da alvenaria (argamassa, bloco e prisma), em função da resistência do bloco. Essa tabela está representada pela Figura 3.4 e todos os valores da tabela são válidos somente para as geometrias indicadas e para materiais sem adição.

Figura 3.4: Valores para especificação da resistência dos materiais da alvenaria.

Tipo de Bloco		f_{bk}	f_a	f_{gk}	f_{pk}/f_{bk}	f_{pk}^*/f_{pk}	f_{pk}	f_{pk}^*	espessura mínima da parede do bloco (mm)
		(MPa)					(MPa)		
Bloco Vazado de Concreto, conforme NBR 6136 (ref. 14x39 cm.)		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
		8,0	6,0	20,0	0,75	1,75	6,0	10,5	25
		10,0	8,0	20,0	0,70	1,75	7,0	12,3	25
		12,0	8,0	25,0	0,70	1,60	8,4	13,4	25
		14,0	12,0	25,0	0,70	1,60	9,8	15,7	25
		16,0	12,0	30,0	0,65	1,60	10,4	16,6	25
		18,0	14,0	30,0	0,65	1,60	11,7	18,7	25
		20,0	14,0	35,0	0,60	1,60	12,0	19,2	25
		22,0	18,0	35,0	0,60	1,60	13,2	21,1	25
		24,0	18,0	40,0	0,60	1,60	14,4	23,0	25
Bloco Cerâmico de Parede Vazada, conforme NBR 15270 (ref. 14x29)		4,0	4,00	15,00	0,50	1,60	2,0	3,2	0
		6,0	6,00	15,00	0,50	1,60	3,0	4,8	8
		8,0	6,00	20,00	0,50	1,60	4,0	6,4	8
		10,0	8,00	25,00	0,45	1,60	4,5	7,2	8
		12,0	8,00	25,00	0,45	1,60	5,4	8,6	8
Bloco Cerâmico de Parede Maciça, conforme NBR 15270 (ref. 14x29)		10,0	8,00	20,00	0,60	1,60	6,0	9,6	22
		14,0	12,00	25,00	0,60	1,60	8,4	13,4	25
		18,0	15,00	30,00	0,60	1,60	10,8	17,3	30

f_{pk}^* = resistência de prisma cheio

Fonte: NBR 16868:2020 (atualizado pelo autor).

No estudo de Marco (2016), esse autor realizou ensaios de compressão axial em prismas de blocos cerâmicos de resistências características de 6, 7 e 15 MPa, de diferentes fabricantes. O autor realizou o ensaio em prismas ocios, preenchidos com argamassa e prismas preenchidos com graute. Nos prismas de blocos de 6 e 7 MPa, foi utilizado argamassa com resistência característica à compressão de 4 MPa, e graute de 15 MPa de resistência à compressão. Para os prismas com blocos de 15

MPa, a argamassa tinha uma resistência de 12 MPa e o graute de 25 MPa. Os resultados de De Marco (2016) estão demonstrados na figura 3.5, e como o projeto de norma da NBR 16868:2020 utiliza resistência de prismas com apenas dois blocos para a sugestão de valores, foi-se comparado somente os valores dos prismas com dois blocos do estudo de De Marco (2016).

Figura 3.5: Resultados da resistência à compressão axial de prismas de De Marco (2016)

Tipologia / Prismas/ Preenchimento			FABRICANTE 1 fbk(A) 6,0 Mpa			FABRICANTE 2 fbk(C) 15,0 Mpa			FABRICANTE 3 fbk(B) 6,0 Mpa		
			RESISTÊNCIA MÉDIA DO BLOCO (Mpa)	RESISTÊNCIA MÉDIA DO PRISMA (Mpa)	FATOR DE EFICIÊNCIA (fp/fb)	RESISTÊNCIA MÉDIA DO BLOCO (Mpa)	RESISTÊNCIA MÉDIA DO PRISMA (Mpa)	FATOR DE EFICIÊNCIA (fp/fb)	RESISTÊNCIA MÉDIA DO BLOCO (Mpa)	RESISTÊNCIA MÉDIA DO PRISMA (Mpa)	FATOR DE EFICIÊNCIA (fp/fb)
PRISMA 1		OCO	12,50	6,55	0,52	15,80	14,61	0,92	13,00	6,04	0,46
		ARGAMASSADO		8,05	0,64		14,37	0,91		6,62	0,51
		GRAUTEADO		8,55	0,68		13,39	0,85		6,90	0,53
PRISMA 2		OCO	12,50	6,18	0,49	15,80	12,76	0,81	13,00	5,58	0,43
		ARGAMASSADO		6,65	0,53		14,13	0,89		6,87	0,53
		GRAUTEADO		6,02	0,48		11,21	0,71		6,15	0,47
PRISMA 3		OCO	12,50	4,98	0,40	15,80	13,97	0,88	13,00	5,28	0,41
		ARGAMASSADO		5,70	0,46		13,63	0,86		7,39	0,57
		GRAUTEADO		4,77	0,38		12,57	0,80		7,27	0,56
PRISMA 4		OCO	12,50	4,48	0,36	15,80	8,35	0,53	13,00	4,11	0,32
		ARGAMASSADO		4,34	0,35		8,51	0,54		4,73	0,36
		GRAUTEADO		5,31	0,42		10,72	0,68		5,63	0,43

Fonte: De Marco (2016) atualizado pelo autor.

Na tabela do anexo F do projeto de norma da NBR 16868:2020 a resistência de prismas de blocos cerâmicos com paredes vazadas (com resistências características dos elementos de 6 MPa para os blocos, 6 MPa para a argamassa e 15 MPa para o graute) é recomendada como valor de resistência à compressão 3 e 4,8 MPa (marcados em laranja), para o prisma oco e preenchido com graute, respectivamente.

Após análise dos resultados de Marco (2016), nota-se que um prisma com blocos cerâmicos de paredes vazadas, com resistências características dos elementos de 6 MPa para o bloco, 4 MPa para a argamassa e 15 MPa para o graute, o elemento obteve valores médios de resistência à compressão maiores do

que os indicado no projeto da nova norma, tanto para prismas ocos quanto para os prismas preenchidos com graute, mesmo usando uma argamassa de resistência característica menor do que a indicada pelo projeto de norma da NBR 16868:2020 (Dados grifados em círculos laranjas). É considerado a favor da segurança e já esperado que os resultados de estudos como o de De Marco (2016) sejam superiores aos fornecidos como referências por normativas.

Para os blocos cerâmicos de paredes maciças (dados grifados por círculos azuis), De Marco (2016) usou valores de resistência característica à compressão da argamassa e do graute de 12 MPa e 25 MPa, respectivamente, idênticos a uma das referências da tabela do projeto da nova norma. Porém a resistência característica à compressão dos blocos é um pouco maior, pois autor usou blocos com 15 MPa e a tabela apresentada pelo projeto de norma da NBR 16868:2020 tem como um dos exemplos blocos com 14 MPa. Com blocos mais resistentes, os ensaios De Marco (2016) resultaram em uma resistência média para os prismas ocos de 14,61 MPa, valor muito superior ao da tabela do projeto de norma da NBR 16868:2020 de 8,4 MPa. Porém para os prismas preenchidos, mesmo com blocos de resistência superior aos da norma, o autor encontrou uma resistência média de 13,39 MPa, valor praticamente igual ao apontado pelo projeto da nova norma, de 13,4 MPa.

Outro ponto a ser destacado na comparação entre o estudo de De Marco (2016) e a tabela do anexo F do projeto da nova norma é o fator de eficiência (dados destacados em preto). O projeto de norma da NBR 16868:2020 aponta um fator de eficiência entre prisma (ocos) e bloco (parede vazada) $f_{pk}/f_{bk} = 0,5$ (com resistências características de 6 MPa para os blocos, 6 MPa para a argamassa e 15 MPa para o graute), De Marco (2016) encontrou fatores de eficiência de 0,52 e 0,46 em seu estudo (usando dois blocos diferentes), com materiais com mesmas resistências características que o projeto da nova norma sugere, a não ser pela argamassa, que era de 4 MPa.

Outro estudo que serve como comparação aos dados da tabela do anexo F do projeto de norma da NBR 16868:2020 é de Portella (2015), que analisou o fator de eficiência entre prisma/bloco com prismas de dois blocos cerâmicos de paredes vazadas, sem preenchimento com graute. Os resultados do autor estão mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Fator de eficiência médio e característico de ensaios aos 28 dias

FAIXA DE RESISTÊNCIA	FATOR DE EFICIÊNCIA			
	MÉDIO	CARACTERÍSTICO	SUGERIDO	NBR 16868:2020
6,0 - 8,5	54,68%	47,67%	50%	50%
8,5 - 10,0	43,97%	36,68%	40%	50%
10,0 - 12,0	45,83%	37,93%	40%	45%
12,0 - 15,0	40,97%	33,20%	35%	45%
ACIMA DE 15,0	39,33%	31,08%	35%	—

Fonte: Portella (2015) editado pelo autor (2020).

A comparação dos resultados de Portella (2015) com os valores sugeridos pelo projeto de norma da NBR 16868:2020 mostra que para algumas faixas de resistências, como a de 6 até 8,5 MPa e 10 até 12 MPa, os resultados do autor coincidem muito com os valores sugeridos pelo projeto da nova norma para o fator de eficiência prisma/bloco. Porém, as demais faixas não possuem a mesma concordância, além de que o projeto da nova norma não cita prismas de blocos com resistência acima de 15 MPa.

Portella (2015) ainda conclui que o fator de eficiência de prismas com apenas dois blocos, usado nas normas vigentes e no projeto da nova norma é muito útil para o controle de qualidade da obra, mas para pesquisas, caracterização e especificação de projetos o método se torna menos fiel a realidade, quando comparado a ensaios realizados em prismas de três blocos de altura.

3.5.3.2 Compressão na flexão

Analisando as normas de alvenaria estrutural para blocos cerâmicos e para blocos de concreto, NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, respectivamente, encontra-se diferenças sobre como deve-se prosseguir em relação à compressão na flexão.

Para as duas normas deve-se observar a posição da junta da argamassa em relação ao esforço. Segundo a NBR 15812:2010, de blocos cerâmicos, quando a compressão é na direção normal às juntas, o procedimento é o mesmo para a

compressão simples. Porém, se a compressão for paralela à junta de argamassa, adota-se o valor de 0,7 da resistência à compressão simples do prisma (f_k) se a região comprimida estiver completamente preenchida com graute. Caso a região comprimida não esteja totalmente preenchida pelo graute, usa-se o valor de $0,4f_k$ obtido em prisma oco.

A NBR 15961:2011 de blocos de concreto especifica algo muito parecido com a NBR 15812:2010. Caso a compressão seja normal às juntas, o procedimento é o mesmo do que a compressão simples, igual à norma para blocos cerâmicos. Mas quando ocorre compressão paralela às juntas, adota-se o valor da resistência à compressão f_k caso a região esteja completamente preenchida por graute. Se a região comprimida não estiver preenchida totalmente com graute, usa-se $0,5f_k$.

Analisando-se o projeto de norma da NBR 16868:2020 nota-se que ele segue a norma NBR 15961 de blocos de concreto, usando o mesmo valor de f_k quando a força é paralela à junta de argamassa e a região comprimida está totalmente preenchida com graute, e $0,5f_k$ quando o esforço também é paralelo a junta mas não há o preenchimento total, com graute, da região comprimida.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 ainda especifica que a resistência à compressão na flexão na direção normal às juntas de assentamento pode ser adotada como $1,5f_k$ para áreas não preenchidas e $2f_k$ para as áreas preenchidas. Segundo Medeiros e Parsekian (2019), o comitê levou em consideração os resultados de Fortes *et al.* (2018), que indicam pouco aumento da resistência à flexo-compressão fora do plano para blocos vazados, mas em contrapartida, a resistência à compressão axial na alvenaria com blocos vazados totalmente preenchidos com graute aumentou em 2,3 vezes.

Comparando-se as normas atuais, NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, há algumas diferenças esperadas em parâmetros e especificações. Assim, a preferência que o projeto da nova norma opta, entre as normas ainda vigentes, devido a união dessas duas normas, é um dos pontos de interesse deste trabalho, e até o momento, nota-se uma recorrência maior da NBR 15961:2011, de blocos de concretos, devido aos parâmetros escolhidos, como os relatados acima.

3.5.3.3 Tração na flexão

A seção que discorre sobre a resistência da alvenaria à tração sob flexão mostra a Tabela 3.5, com as resistências características, dependendo da direção da tração, que pode ser normal à fiada ou paralela à fiada.

Tabela 3.5: Valores característicos da resistência à tração na flexão (f_{tk}).

Resistência média a compressão da argamassa	f_{pk} (MPa)	
	Direção da tração perpendicular à fiada	Direção da tração paralela à fiada
Entre 1,5 e 3,4 MPa	0,10	0,20
Entre 3,5 e 7,0 MPa	0,20	0,40
Acima de 7,0 MPa	0,25	0,50

Fonte: NBR 16868:2020.

De acordo com Sánchez (2013), no plano de flexão normal à fiada a resistência exigida vem da aderência da interface entre blocos e argamassa e por causa das tensões de compressão também normais à fiada, as tensões de tração diminuem além de influenciarem na resistência à flexão das paredes.

No caso do plano de flexão paralelo à fiada, ainda de acordo com Sánchez (2013), as resistências exigidas são as resistências de tração (cisalhantes) provenientes da aderência entre os elementos e a argamassa. Esta resistência de aderência e a resistência à tração são melhoradas devido à presença de tensões de compressão normais à fiada.

A Tabela 3.3 é uma representação da tabela presente no projeto de norma da NBR 16868:2020, que contém o mesmo conteúdo das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011.

3.5.3.4 Cisalhamento na alvenaria

Na atualização das normas de dimensionamento para alvenaria estrutural, a NBR 10837:1989 foi substituída pelas atuais NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, e houve a mudança da filosofia de dimensionamento do Método das Tensões

Admissíveis para o Estado Limite Último, porém, segundo Sánchez (2013) as normas atuais ainda são conservadoras em relação à força cortante.

As NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 adotam o critério de ruptura de Coulomb-Mohr para a obtenção da tensão máxima de cisalhamento. Nas duas normativas é fornecido o valor das tensões máximas de cisalhamento, a partir da resistência média da argamassa à compressão f_a e do nível da tensão de pré-compressão σ . Deve-se considerar as ações permanentes multiplicadas pelo fator de ponderação de 0,9.

Tabela 3.6: Valores característicos da resistência ao cisalhamento em juntas horizontais de paredes (f_{vk}).

Resistência média a compressão da argamassa	f_{pk} (MPa)
Entre 1,5 e 3,4 MPa	$0,10 + 0,5 \sigma \leq 1,0$
Entre 3,5 e 7,0 MPa	$0,15 + 0,5 \sigma \leq 1,4$
Acima de 7,0 MPa	$0,35 + 0,5 \sigma \leq 1,7$
σ é a tensão normal de pré compressão na junta, considerando-se apenas as ações permanentes ponderadas por coeficiente igual a 0,9 (ação favorável).	

Fonte: NBR 16868:2020.

Ainda é especificado nas normativas brasileiras que quando houver armadura perpendicular ao plano de cisalhamento envolvidas por graute, no caso das vigas, a resistência característica ao cisalhamento pode ser obtida por:

$$f_{vk} = 0,35 + 17,5 \cdot \rho \leq 0,7 \text{ MPa} \quad (6)$$

sendo

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (7)$$

onde

ρ – taxa geométrica de armadura, limitada em até 2%;

A_s – área da armadura principal de flexão;

b – largura da seção transversal;

d – altura útil da seção transversal.

A NBR 15961:2011 especificava que a resistência característica ao cisalhamento na interface vertical de paredes com juntas amarradas deveria ser de 0,35 MPa. Como a norma de blocos cerâmicos não fazia menção para tal resistência, o projeto da nova norma especificou que esse valor de resistência na interface vertical de paredes com juntas amarradas deve ser de 0,6 MPa, aumentando a resistência necessária. Segundo Medeiros e Parsekian (2019), essa tensão máxima de cisalhamento teve base em referências como os estudos de Oliveira (2017) que interpretou numericamente os resultados experimentais de paredes em formato “H” com blocos de concreto.

3.5.3.5 Aderência

As normas ainda vigentes, NBR 15812:2010 e NBR 16868:2011 apresentam valores de resistência característica da aderência idênticos, justamente por ser uma propriedade que não depende do material do bloco. Dividida em duas aderências, a entre o aço e a argamassa, que para barras corrugadas deve ser igual a 0,1 MPa e para barras lisas é nula, e a entre o aço e o graute. Nesta segunda, as normas de blocos cerâmicos e de blocos de concreto ainda especificam os valores da resistência característica de aderência, sendo ele de 2,2 MPa para barras corrugadas e 1,5 MPa para barras lisas.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 repete os valores para a aderência entre o aço e a argamassa, porém para a aderência entre aço e graute, o projeto da nova norma deixa de especificar os valores e recomenda o uso da ABNT NBR 6118:2014 – Estruturas de concreto armado – Procedimento.

3.6 SEGURANÇA E ESTADOS LIMITES

Tanto para a NBR 15812:2010 sobre os blocos cerâmicos, quanto para a NBR 15961:2011 que aborda os blocos de concreto, os critérios de segurança são baseados na NBR 8681:2003. O projeto de norma da NBR 16868:2020 mantém a referência das duas normas anteriores. e por isso, será feita uma breve abordagem nestes requisitos de segurança.

3.6.1 Ações na alvenaria estrutural

O projeto de norma da NBR 16868:2020 estabelece, assim como as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, que todas as ações que possam causar efeitos significativos para a estrutura devem ser consideradas na análise estrutural das tensões, considerando os estados limites últimos (ELU) e os estados limites de serviço (ELS).

Nas ações a serem consideradas, tanto as normas ainda vigentes, quanto o projeto da nova norma, citam os mesmos carregamentos: ações permanentes, divididas em diretas e indiretas; ações variáveis, e ações excepcionais.

As ações permanentes, tanto diretas quanto indiretas tendem a ter pouca variação em seus valores médios durante praticamente toda a vida da estrutura. Já as ações variáveis são justamente o contrário das ações permanente, seus valores variam muito durante o tempo, como por exemplo, as ações do vento e cargas acidentais. As ações excepcionais, como o próprio nome já explica, são cargas decorrentes de eventos raros, como explosões, incêndios ou sismos.

3.6.1.1 Ações permanentes diretas

Dívida em peso específico, elementos construtivos fixos e instalações permanentes, e empuxos permanentes, as ações permanentes diretas são praticamente iguais para as normativas brasileiras e para o projeto de norma da NBR 16868:2020. omente na seção do peso específico que há uma pequena diferença entre elas.

A NBR 15812:2010 e a NBR 15961:2011 especificam valores para o peso específico da alvenaria, caso não haja uma avaliação precisa sobre o mesmo. Justamente por ser uma propriedade física do material em questão, o peso específico varia de uma norma para a outra. Na NBR 15812:2010 de blocos cerâmicos, é recomendado o uso de 12 kN/m^3 para o peso específico da alvenaria, e para a alvenaria de blocos de concreto, especifica-se o valor de 14 kN/m^3 para o peso específico.

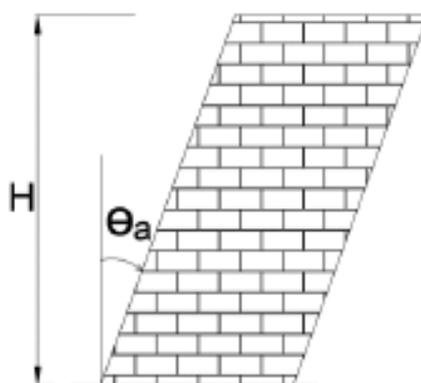
O projeto da nova norma propõe a união das normas de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos (NBR 15812:2010) e de blocos de concreto (NBR 15961:2011), conseqüentemente inviabilizando a especificação de um único valor para o peso

específico da alvenaria com blocos de materiais diferentes. Assim, adota os mesmo valores ditos acima, ou seja, valores diferentes especificando o tipo de bloco, 12 kN/m³ para alvenaria de blocos cerâmicos vazados com paredes vazadas e 14 kN/m³ para a alvenaria de blocos de concreto. Ainda, o projeto de norma da NBR 16868:2020 adiciona o valor do peso específico da alvenaria com blocos cerâmicos com paredes maciças, 14 kN/m³, e da alvenaria com tijolos maciços, de 18 kN/m³, dois fatores novos em relação às NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011. Deve-se acrescentar, caso existir, o peso do graute e revestimento nas diferentes faces da parede.

3.6.1.2 Ações permanentes indiretas

As NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, acompanhadas pelo projeto da nova norma, citam que deve ser considerado um desaprumo global, para edifícios de múltiplos andares, por meio do ângulo de desaprumo θ_a , em radianos.

Figura 3.6: Imperfeições geométricas globais.



Fonte: NBR 16868:2020

Sendo:

$$\theta_a = \frac{1}{100 \cdot \sqrt{H}} \leq \frac{1}{40 \cdot H} \quad (8)$$

onde

H = altura total da edificação (m);

θ_a = ângulo de desaprumo (rad).

Analisando-se a NBR 6118:2014 – Estruturas de concreto – Procedimentos, tem-se alguns itens a serem considerados para as ações do vento e do desaprumo sejam concomitantes:

- 1) considerar somente a ação do vento se 30% da mesma for maior que a ação do desaprumo;
- 2) considerar somente a ação do desaprumo se a ação do vento for inferior à 30% da mesma, respeitando o $\theta_{1\ min}$;
- 3) para os restantes dos casos, ignorar o $\theta_{1\ min}$ e combinar a ação do vento e do desaprumo, considerando que estão atuando na mesma direção e sentido, equivalendo-se como uma ação de vento.

Sendo:

$$\theta_{1\ min.} = \frac{1}{300} \quad (9)$$

Tanto as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, quanto o projeto da nova norma, contrariam a NBR 6118:2014, e apontam que a ação do vento e o desaprumo devem ser considerados de maneira concomitante.

Mais uma vez há a preferência do projeto de norma da NBR 16868:2020 pela NBR 15961:2011 de blocos de concreto sobre a norma NBR 15812:2010 de blocos cerâmicos, com o uso da Equação 8, conforme está especificado na norma de blocos de concreto. Um dos fatores é pode ser a ordem cronológica das mesmas, como a NBR 15961:2011 foi elaborada após a NBR 15812:2010, já seria considerada mais atualizada entre as duas para fatores independentes da natureza dos materiais.

3.6.1.3 Ações excepcionais

As ações excepcionais são aquelas decorrentes de explosões, impactos, sismos, incêndios etc. O projeto da nova norma segue as normas anteriores, que

são iguais uma a outra, e recomenda o anexo A.2 para tais ações. O anexo A.2 discorre sobre proteções e reforços para elementos estruturais que possam estar sujeitos a qualquer ação que fuja da normalidade, como estruturas auxiliares e reforço de armaduras para que a ductilidade aumente. Estas providências são as mesmas especificadas pelas NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011

Há somente uma mudança das normas ainda vigentes para o projeto de norma da NBR 16868:2020, que é na especificação do reforço de armaduras caso estruturas auxiliares não possam ser usadas. Nas NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, indicava-se que nesse caso, os elementos sob risco deveriam ser reforçados com armaduras usando uma taxa mínima de 0,2% da área da seção transversal. No projeto da nova norma esse valor baixa para 0,15%, sendo no mínimo um terço em uma direção e dois terços na outra.

A redução da taxa mínima da armadura entende-se ser justificada pela especificação da NBR 6118:2014, onde cita que a taxa mínima absoluta para armaduras de tração é de 0,15%.

3.6.1.4 Outras ações

Há também as ações variáveis e acidentais, porém essas se mantêm inalteradas, remetendo à NBR 6120:2019, iguais para as normas ainda vigentes e para o projeto da nova norma.

3.6.2 Combinações de ações segundo as normas brasileiras

As ações são quantificadas por seus valores, sendo eles os valores característicos F_k , valores convencionais excepcionais e valores reduzidos de ações variáveis, sendo este último reduzido por ser muito baixa a probabilidade de que duas ou mais ações variáveis de natureza diferentes ocorram ao mesmo tempo. Os valores de redução Ψ_0 estão indicados na Tabela 3.7, que é um resumo das ações mais comuns, segundo a NBR 8681:2003.

Tabela 3.7: Coeficientes de redução das ações variáveis para ELU.

Ações		ψ_0
Cargas acidentais em edifícios	Edifícios residenciais	0,5
	Edifícios comerciais	0,7
	Biblioteca; arquivos; oficinas e garagens	0,8
Vento	Pressão do vento para edificações em geral	0,6

Fonte: NBR 16868:2020

Os valores de cálculo f_d são obtidos pela multiplicação dos valores especificados (característico, convencionais excepcionais e reduzidos de ações variáveis) por coeficientes de ponderação, que estão listados nas Tabelas 1 a 5 da NBR 8681:2003, e a Tabela 3.8 apresenta um resumo dos casos mais comuns.

Tabela 3.8: Coeficientes de ponderação para ELU.

Categoria da ação	Tipo da estrutura	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Permanentes	Edifícios Tipo 1 ^a e pontes em geral	1,35	0,9
	Edifícios Tipo 2b	1,40	0,9
Variáveis	Edifícios Tipo 1 ^a e pontes em geral	1,50	–
	Edifícios Tipo 2b	1,40	–

^a Edificações Tipo 1 são aquelas que as cargas acidentais superam 5 kN/m²
^b Edificações Tipo 2 são aquelas que as cargas acidentais não superam 5 kN/m²

Fonte: NBR 16868:2020.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 especifica o mesmo que a NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, para cada carregamento devem ser consideradas todas as combinações de ações que possam produzir os efeitos mais desfavoráveis para o dimensionamento dos elementos da estrutura. As ações incluídas devem ser consideradas com seus valores representativos multiplicados pelos respectivos coeficientes de ponderação, conforme NBR 8681:2003 e mostrado na Tabela 3.5 e na Figura 3.12. As combinações para carregamentos permanentes e variáveis são obtidas por:

$$F_d = \gamma_g \cdot F_{G,k} + \gamma_q \cdot (F_{Q1,k} + \sum \Psi_{0j} \cdot F_{Qj,k}) \quad (10)$$

onde

F_d = valor de cálculo para a combinação última;

γ_g = ponderador das ações permanentes;

$F_{G,k}$ = valor característico das ações permanentes;

γ_q = ponderador das ações variáveis;

$F_{Q1,k}$ = valor característico da ação variável considerada principal;

$\Psi_{0j} \cdot F_{Qj,k}$ = valores característicos reduzidos das demais ações variáveis.

3.6.3 Combinações de ações segundo as normas estrangeiras

Segundo a BS 5925-1:1992, a carga de cálculo no estado limite último deve considerar o peso próprio, cargas acidentais, vento e cargas de terra e água. Na Tabela 3.9 mostra as combinações de ações segundo a norma britânica, e os coeficientes ponderadores. Para o projeto, devem ser escolhidas as combinações de carregamentos que exigem mais da estrutura durante a sua vida útil.

Tabela 3.9: Combinações de ações segundo a norma britânica.

Combinações das ações	Tipo de carga	Coefficientes ponderadores
Permanente + Acidental	Carga permanente	$0,9 \cdot G_k$ ou $1,4 \cdot G_k$
	Carga acidental	$1,6 \cdot Q_k$
	Cargas de terra e água	$1,4 \cdot E_n$
Permanente + Vento	Carga permanente	$0,9 \cdot G_k$ ou $1,4 \cdot G_k$
	Carga de vento	$1,4 \cdot W_k$ ou $0,015 \cdot G_k$ o maior dos dois valores
	Cargas de terra e água	$1,4 \cdot E_n$
Permanente + Acidental + Vento	Carga permanente	$1,2 \cdot G_k$
	Carga acidental	$1,2 \cdot Q_k$
	Carga de vento	$1,2 \cdot W_k$ ou $0,015 \cdot G_k$ o maior dos dois valores
	Cargas de terra e água	$1,2 \cdot E_n$

Fonte: BS 5628-1:1992.

A norma canadense também determina combinações de ações para o dimensionamento da alvenaria estrutural no estado limite último, como mostrado na Tabela 3.10. A CSA S304-14 leva em consideração ações pelo peso próprio, carga accidental, efeitos de terra, água, vento e terremoto. Ainda faz adendos para mudanças nos coeficientes em caso de tanques contendo líquidos, armazéns e pressão de terras ou plantas.

Tabela 3.10: Combinações de ações segundo a norma canadense.

caso	Combinação de ações	
	Cargas principais	Cargas secundárias
1	1.4D	-
2	(1.25D ou 0.9D) +1.5L	0.5S ou 0.4W
3	(1.25D ou 0.9D) +1.5S	0.5L ou 0.4W
4	(1.25D ou 0.9D) +1.4W	0.5L ou 0.5S
5	1.0D + 1.0E	0.5L + 0.25S

Fonte: CSA S304-14:2013

Sendo:

D = peso próprio;

E = Carga e efeitos de terremoto;

L = Carga variável devido ao uso da estrutura;

S = Carga devido à neve;

W = Carga de vento.

A CSA S304-14 determina que quando for necessário considerar os efeitos de tensão lateral da terra H, protensão P e diferença de temperatura T, os coeficientes destas ações devem ser de 1,5, 1 e 1,25, respectivamente.

Os coeficientes multiplicadores das normas britânicas e brasileiras, seja de majoração ou minoração de cada ação, são muito parecidos. Ambas as normas usam fatores de 1,4 e 0,9 para o peso próprio, e para a ação de vento e cargas accidentais, a norma britânica estabelece os parâmetros de 1,6 e 1,2, dependendo da

combinação, e a norma brasileira mantém o parâmetro de 1,4, média dos dois valores da BS 5628-1:1992, para estas mesmas ações. As duas normativas não especificam coeficientes de minoração para a carga acidental ou para a ação de vento.

A norma canadense se destaca ao especificar um coeficiente de majoração de 1,25 para a ação do peso próprio, e diferentemente das normas britânicas e brasileiras, estabelece parâmetros de minoração de 0,5 e 0,4 para ações de carga acidental e ação do vento, respectivamente. Por um outro lado, a CSA S304-14 ressalta a ação pela carga de neve, definindo uma combinação para tal fenômeno e usando parâmetros idênticos aos da carga acidental.

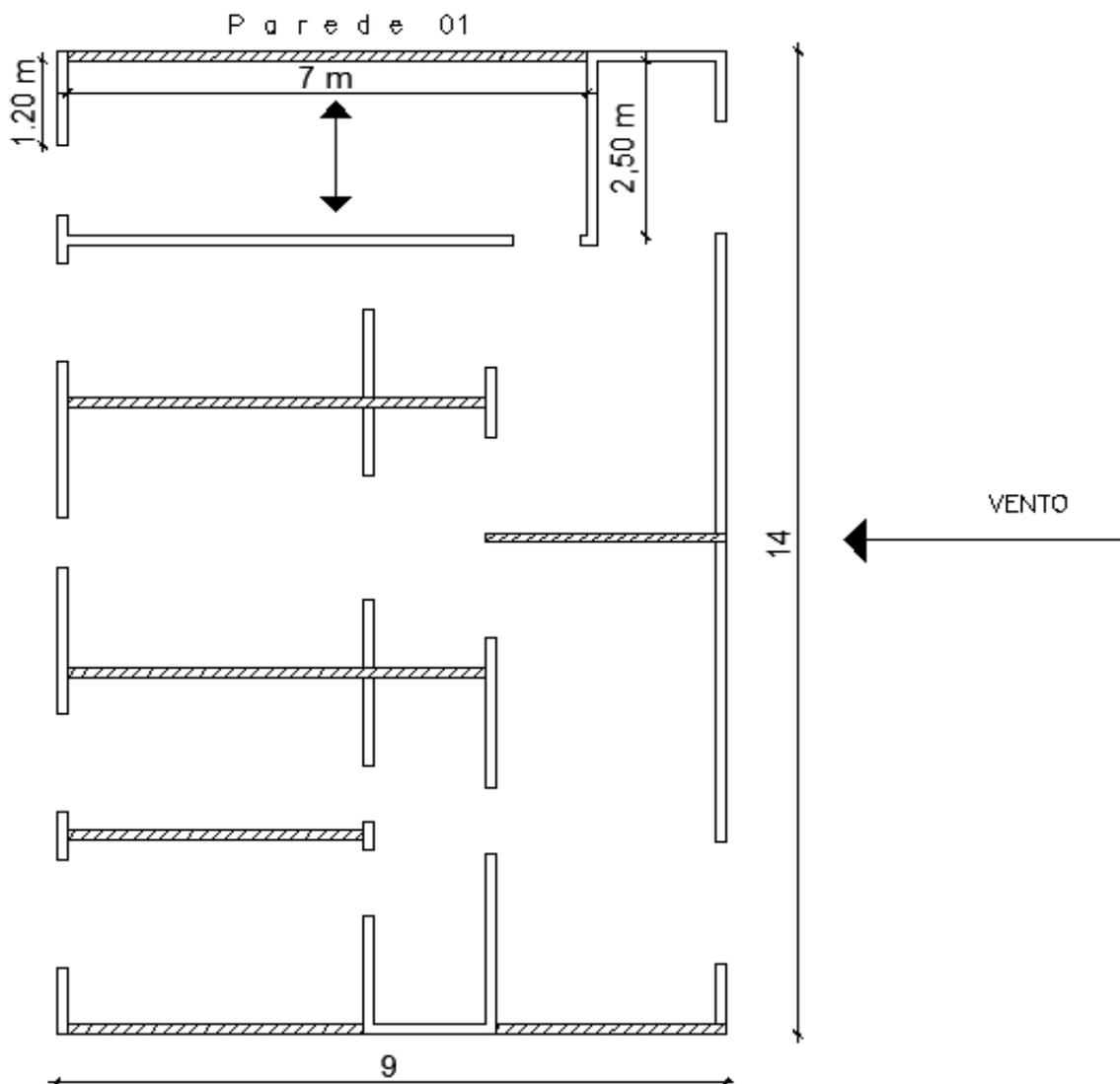
3.6.4 Comparação das combinações de ações da NBR 16868:2020 e da BS 5628-1:1992.

Conforme visto anteriormente, as combinações de ações e seus fatores multiplicadores são os mesmo para as normas ainda vigentes e para o projeto da nova norma NBR 16868:2020.

Assim, a fim de comparar o método de combinação de ações do projeto da norma brasileira com a norma britânica, usa-se o exemplo de uma edificação de nove pavimentos com o pavimento tipo disposto conforme a Figura 3.13.

Observa-se que por causa do objetivo do trabalho ser de comparar as normativas e suas diretrizes, foram feitas simplificações no dimensionamento, como por exemplo a adoção de um único valor para os fatores S_1 , S_2 e S_3 , a não inclusão das flanges nas paredes resistentes da Figura 3.7, entre outros explicitados durante o texto.

Figura 3.7: Disposição das paredes na edificação.

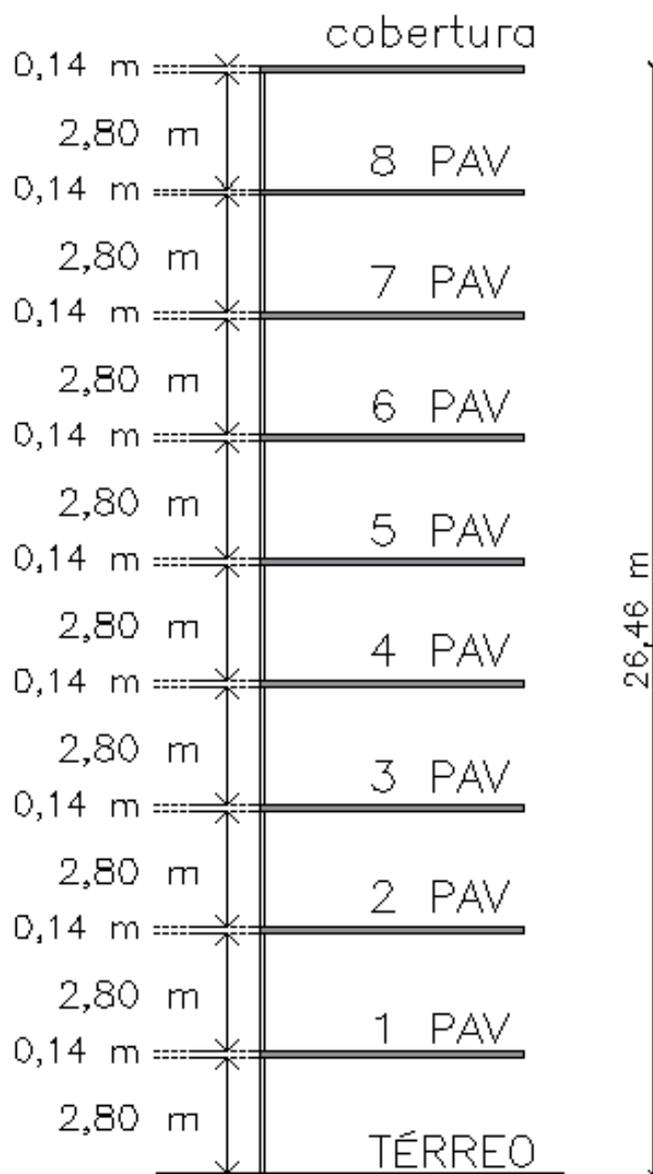


Fonte: Autor (2020).

O painel analisado em questão está indicado como "parede 01", com 7 m de comprimento, 14 cm de largura e um pé direito de 2,80 m. A laje sobre o painel é unidirecional, ou seja, as cargas são descarregadas somente na "parede 01" e na sua parede oposta. As paredes estruturais e consideradas para a inércia na direção do vento considerada estão indicadas como hachuras listradas.

As alturas dos pavimentos, altura total do prédio e espessura das lajes estão mostradas na Figura 3.8.

Figura 3.8: Corte da edificação.



Fonte: Autor (2020).

Determina-se o coeficiente de estabilidade global α , que define a necessidade ou não de considerar os efeitos de segunda ordem, dado por:

$$\alpha = H \sqrt{\frac{N}{E.I}} \leq 0,6 \quad (11)$$

onde

H = altura total do edifício;

N = Peso total do edifício (considerando um peso médio por metro quadrado de 10 kN/m²);

E = módulo de deformação longitudinal da alvenaria, considerando a alvenaria com blocos de concreto com $f_{b,k} \leq 20$ MPa, o $E = 800 f_{pk}$, segundo o projeto de norma da NBR 16868:2020;

I = somatório dos momentos de inércia das paredes na direção analisada.

Como a área total da edificação é de 126 m², e o número total de pavimentos é de 9, o peso total do edifício é de $N = 11.340$ kN. A altura total da edificação é de $H = 26,46$ m, e a inércia na direção avaliada é de $I = 10,4$ m⁴.

O valor para a resistência característica do prisma para a determinação do módulo de elasticidade, foi adotado como 5 MPa, e assim:

$$\alpha = 26,46 \sqrt{\frac{1.340.000}{4.10^8 \cdot 10,4}} = 0,47 < 0,6$$

De acordo com coeficiente de estabilidade global α , não há necessidade da consideração dos efeitos de segunda ordem no prédio em questão.

Antes de prosseguir com a análise das combinações de ações, é necessário abordar a verificação dos efeitos de segunda ordem, que não podem ser superiores a 10% dos efeitos de primeira ordem. Os efeitos de segunda ordem são proporcionais ao parâmetro γ_z , ou seja, quanto maior este parâmetro, maior os efeitos de segunda ordem em comparação aos de primeira ordem, e por consequência, maior a instabilidade da estrutura. O projeto da nova norma, seguindo as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, especifica que essa verificação pode ser realizada conforme a NBR 6118:2014 que fornece:

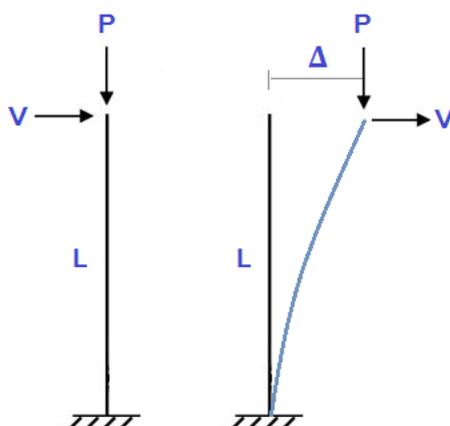
$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (12)$$

onde

$\Delta M_{tot,d}$ – valor de N_d multiplicado pelo deslocamento de topo “e”;

$M_{1,tot,d}$ – valor da força resultante horizontal no topo pela altura total da edificação h .

Figura 3.9: Efeitos de segunda ordem em edificações.



Fonte: AltoQi 2019.

Mesmo com essa prescrição ainda se faz necessária a verificação de efeitos locais de segunda ordem.

Segundo a NBR 6118:2014, a estrutura é considerada de nós fixos quando $\gamma_z \leq 1,10$, e se o coeficiente for maior que 1,30, a estrutura deve ser considerada com um alto grau de instabilidade.

Para simplificar o dimensionamento e manter os padrões de segurança, foi considerado os fatores S_1 , S_2 e S_3 com o valor de 1,0 e a velocidade básica de 45 m/s. Para determinar a força horizontal atuante no topo do prédio, é necessário calcular a pressão dinâmica de vento.

$$V_0 = 45 \text{ m/s}$$

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = 45 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 45 \text{ m/s}$$

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 = 0,613 \cdot 45^2 = 1241,3 \text{ N/m}^2 = 1,24 \text{ kN/m}^2$$

Com a pressão dinâmica, determina-se a força atuante na área de atuação do vento em função da direção mais crítica. A força do vento depende do coeficiente de arrasto, área de atuação do vento e da pressão dinâmica.

O coeficiente de arrasto é determinado por meio de relações entre as dimensões do edifício, como altura, largura e comprimento.

Tabela 3.11: Determinação do coeficiente de arrasto.

$H/L1 = 26,46 \text{ m}/14 \text{ m} = 1,89$	$Ca = 1,34$
$L1/L2 = 14 \text{ m}/9 \text{ m} = 1,56$	

Fonte: Autor (2020).

Com o coeficiente de arrasto (Ca) = 1,34, a força do vento é determinada por:

$$F = Ca \cdot q \cdot Ae = 1,34 \cdot 1,24 \text{ kN/m}^2 \cdot (26,46\text{m} \cdot 14\text{m}) = 615,5 \text{ kN}$$

Momento na base da edificação:

$$M = F \cdot H/2 = (615,5\text{kN} \cdot 26,46\text{m})/2 = 8.143\text{kN.m}$$

Força equivalente no topo do prédio:

$$M = F.H$$

$$8143\text{kN.m} = F \cdot 26,46 \text{ m}$$

$$F_{\text{equiv.}} = 307,8\text{kN}$$

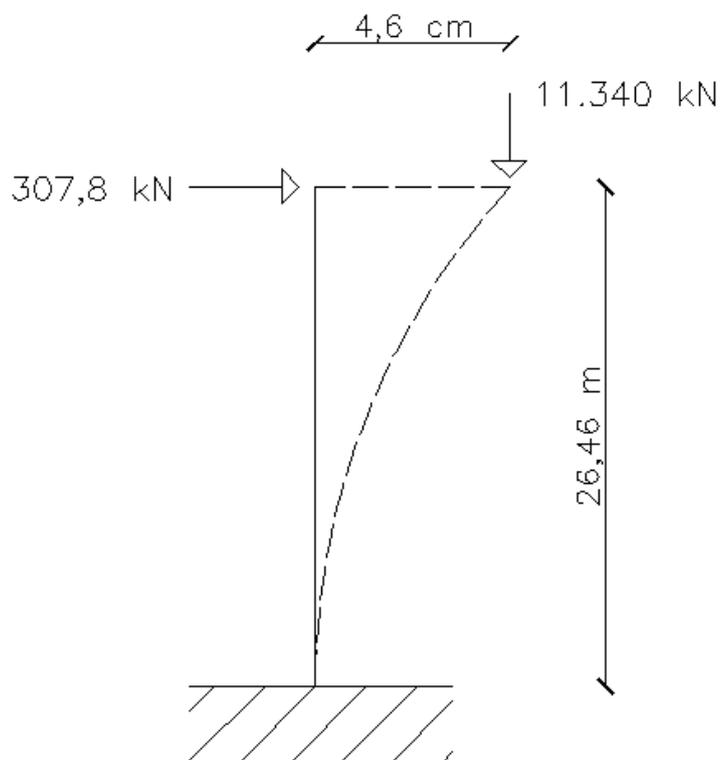
O deslocamento horizontal devido ao vento é dado por:

$$X = \frac{F_H L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (13)$$

Assim:

$$X = \frac{307,8 \text{ kN} \cdot 26,46^3}{3 \cdot 4 \cdot 10^6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 10,4 \text{ m}^4} = 0,046 \text{ m}$$

Figura 3.10: Deslocamentos horizontal causado pela ação do vento.



Fonte: Autor (2020).

Calculando-se os deslocamentos horizontais, tem-se que:

$$\Delta M_{tot,d} = 11340 \text{ kN} \cdot 0,046 \text{ m} = 521,64 \text{ kN} \cdot \text{m};$$

$$M_{1,tot,d} = 307,8 \text{ kN} \cdot 26,46 \text{ m} = 8144,4 \text{ kN} \cdot \text{m};$$

logo:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} = \frac{1}{1 - \frac{521,64 \text{ kN} \cdot \text{m}}{8144,4 \text{ kN} \cdot \text{m}}} = 1,06$$

Assim a estrutura é considerada de nós fixos, pois $\gamma_z \leq 1,10$.

O efeito do desaprumo, segundo o projeto de norma da NBR 16868:2020 que segue as diretrizes da NBR 15961:2011, é dado por:

$$\theta_a = (1 / 100 \cdot H^{1/2}) \leq (1/40 \cdot H) \quad (14)$$

O menor valor entre “(1 / 100·H^{1/2})” e “(1/40·H)” é usado para a determinação da força horizontal, sendo H = 26,46 m.

$$\theta_a = \left(\frac{1}{100 \cdot 26,46^{1/2}} \right) \geq \left(\frac{1}{40 \cdot 26,46} \right)$$

$$\theta_a = 0,00194 \geq 0,00094$$

Assim, o valor da força horizontal em cada pavimento é determinado pela multiplicação do ângulo de desaprumo pelo peso do pavimento, assim:

$$F_{Horizontal} = \theta_a \cdot \text{Peso do pavimento} \quad (15)$$

$$F_{Horizontal} = 0,00094 \text{ rad} \cdot 1260 \text{ kN} = 1,18 \text{ kN}$$

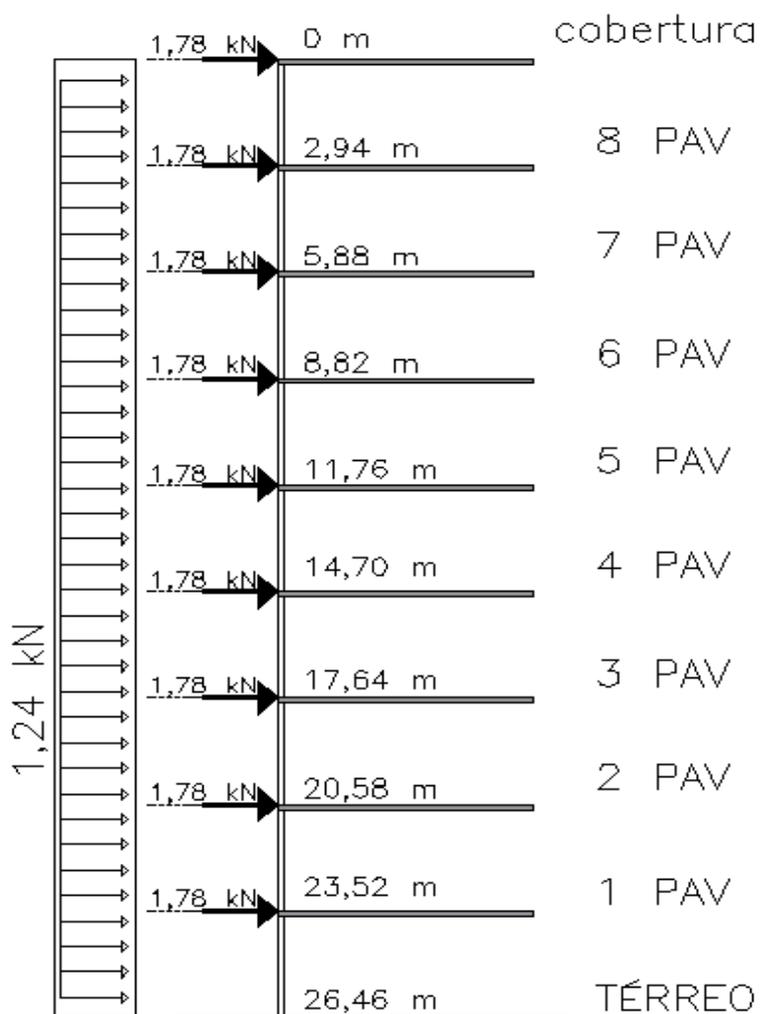
A Tabela 3.12 mostra os resultados de momento máximo gerado em cada pavimento devido a ação do vento e do desaprumo, e na Figura 3.11 mostra essas mesmas ações e seu local de ação para o cálculo do momento.

Tabela 3.12: Velocidades características de vento e pressão dinâmica de vento na direção do vento.

VEL. CARACTERÍSTICA DE VENTO E PRESSÃO DINÂMICA DE VENTO NA DIREÇÃO A								
PAV.	H (m)	q (Kn/m ²) 0,613 · V _k ²	Área efetiva Altura · 14 m (m ²)	Força do vento C _a · q · A _e (kN)	Força de desaprumo (kN)	Mom. de vento (kN.m)	Mom. de desaprumo (Kn.m)	Mom. total (kN.m)
Cobertura	0	1,24	0	0,00	1,18	0,00	0,00	0,00
8	2,94	1,24	41,16	68,39	1,18	100,54	3,47	104,00
7	5,88	1,24	82,32	136,78	1,18	402,14	10,41	412,55
6	8,82	1,24	123,48	205,17	1,18	904,82	20,82	925,63
5	11,76	1,24	164,64	273,57	1,18	1608,57	34,69	1643,26
4	14,7	1,24	205,8	341,96	1,18	2513,39	52,04	2565,42
3	17,64	1,24	246,96	410,35	1,18	3619,28	72,85	3692,13
2	20,58	1,24	288,12	478,74	1,18	4926,24	97,14	5023,37
1	23,52	1,24	329,28	547,13	1,18	6434,27	124,89	6559,16
Térreo	26,46	1,24	370,44	615,52	1,18	8143,37	156,11	8299,48

Fonte: Autor (2020).

Figura 3.11: Solicitações horizontais.



Fonte: Autor (2020).

Como o objetivo do trabalho é de comparar as normativas, as solicitações horizontais da Figura 3.17 não de acordo com o usual encontrado no dimensionamento de edifícios devido às simplificações utilizadas e explicadas no início deste item.

Ainda com a finalidade de simplificar o dimensionamento, é adotado um valor de carga para o peso próprio por pavimento de 3 kN/m^2 e uma carga acidental de 2 kN/m^2 .

Considera-se que o comprimento da laje associada à parede 01 seja de $2,50 \text{ m}$, e como ela é unidirecional, metade das cargas são direcionadas para a parede em questão. A fim de facilitar o dimensionamento da estrutura, que a laje de cobertura, e a laje do tipo tenham o mesmo peso, e que o peso específico da

alvenaria estrutural de blocos de concreto vazados ou blocos cerâmicos vazados de paredes maciças é de 14 kN/m^3 , as ações verticais na “parede 01” seriam as seguintes:

- Reação da carga permanente da laje = $\left(3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) \cdot \frac{2,50}{2} = 3,75 \text{ kN/m}$;
- Reação da carga acidental da laje = $\left(2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) \cdot \frac{2,50}{2} = 2,50 \text{ kN/m}$;
- Peso próprio da parede (carga permanente) = $(0,14 \text{ m} + 0,02 \text{ m}) \cdot 2,8 \text{ m} \cdot 14 \text{ kN/m}^3 = 6,27 \text{ kN/m}$.

Considerando que a carga devido ao momento total considerado (W_k) é definida pela Equação 16:

$$W_k = \frac{PI \cdot M \cdot y}{I} \quad (16)$$

onde

PI = proporção de inércia entre a inércia da parede 1 e a inércia total das paredes consideradas;

M = momento total atuando no pavimento;

y = posição da linha neutra na parede 1 = $7 \text{ m} / 2 = 3,5 \text{ m}$;

I = inércia da parede 1.

Desse modo, é possível determinar as combinações de ações segundo a norma britânica, mostrada na Tabela 3.13 e segundo o projeto de norma da NBR 16868:2020, Tabela 3.14.

Tabela 3.13: Combinações de ações segundo a BS 5925-1:1992

NORMA BRITÂNICA				<i>1ªcomb</i>	<i>2ªcomb</i>	<i>3ªcomb</i>	<i>4ªcomb</i>	<i>5ªcomb</i>
				$1,4 \cdot G_k + 1,6 \cdot Q_k$	$0,9 \cdot G_k - 1,4 \cdot W_k$	$1,2 \cdot G_k + 1,2 \cdot Q_k + 1,2 \cdot W_k$	$0,9 \cdot G_k + 1,4 \cdot W_k$	$1,2 \cdot G_k + 1,2 \cdot Q_k - 1,2 \cdot W_k$
				Compressão	Tração	Compressão	Compressão	Tração
Pav	Gk (kN/m)	Qk (kN/m)	M (kN.m)	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²
Cobertura	3,75	2,50	0,00	66,07	24,11	53,57	24,11	53,57
8	13,77	5,00	104,00	194,84	69,90	176,85	107,14	144,93
7	23,79	7,50	412,55	323,61	79,07	331,51	226,80	204,89
6	33,81	10,00	925,63	452,39	51,63	517,56	383,07	233,47
5	43,83	12,50	1643,26	581,16	-12,44	735,01	575,97	230,65
4	53,85	15,00	2565,42	709,93	-113,13	983,84	805,49	196,45
3	63,87	17,50	3692,13	838,70	-250,44	1264,06	1071,63	130,86
2	73,89	20,00	5023,37	967,47	-424,37	1575,67	1374,38	33,88
1	83,91	22,50	6559,16	1096,24	-634,92	1918,66	1713,76	-94,49
Térreo	93,93	25,00	8299,48	1225,01	-882,09	2293,05	2089,76	-254,25

Fonte: Autor (2020).

Tabela 3.14: Combinações de ações segundo a NBR 16868:2020.

NORMA BRASILEIRA				<i>1ªcomb</i>	<i>2ªcomb</i>	<i>3ªcomb</i>	<i>4ªcomb</i>
				$1,4 \cdot G_k + 1,4 \cdot Q_k$	$1,4 \cdot G_k + 1,4 \cdot Q_k + 1,4 \cdot W_k \cdot \psi$	$1,4 \cdot G_k + 1,4 \cdot W_k + 1,4 \cdot Q_k \cdot \psi$	$0,9 \cdot G_k - 1,4 \cdot W_k$
				Compressão	Compressão	Compressão	Tração
Pav	Gk (kN/m)	Qk (kN/m)	M (kN.m)	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²
Cobertura	3,75	2,50	0,00	62,50	62,50	50,00	24,11
8	13,77	5,00	104,00	187,70	197,01	181,32	69,90
7	23,79	7,50	412,55	312,90	349,83	349,26	79,07
6	33,81	10,00	925,63	438,10	520,96	553,82	51,63
5	43,83	12,50	1643,26	563,30	710,40	795,01	-12,44
4	53,85	15,00	2565,42	688,50	918,15	1072,81	-113,13
3	63,87	17,50	3692,13	813,70	1144,22	1387,23	-250,44
2	73,89	20,00	5023,37	938,90	1388,59	1738,28	-424,37
1	83,91	22,50	6559,16	1064,10	1651,27	2125,94	-634,92
Térreo	93,93	25,00	8299,48	1189,30	1932,26	2550,23	-882,09

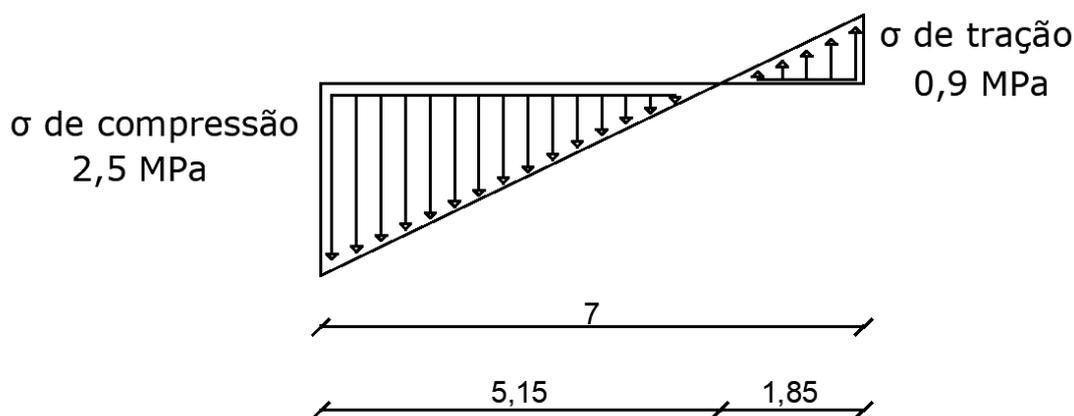
Fonte: Autor (2020).

A comparação entre as combinações de ações da norma britânica com as combinações de ações da norma brasileira mostra que ambas são muito semelhantes. A maior tensão de tração (marcada em amarelo) nas duas situações

foram iguais, devido as combinações serem exatamente iguais em ambas as normativas. Quanto a maior tensão de compressão (marcada em vermelho), há uma pequena diferença entre as normas, o que era esperado devido aos diferentes, porém muito semelhantes, fatores multiplicadores de cada combinação.

Por meio das combinações de ações, fica claro que há esforços de tensão e compressão na “parede 01”. Conforme a direção do vento, o diagrama de tensões do elemento fica conforme a Figura 3.12, baseada nas combinações de ações das normas brasileiras, com as fibras tracionadas à direita e as comprimidas à esquerda.

Figura 3.12: Diagrama de tensões da parede “01”



Fonte: Autor (2020).

3.7 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural deve ser feita sempre considerando o equilíbrio de geral da estrutura e de todos os seus elementos, e por meio do caminho descritos pelas cargas, do seu ponto de aplicação até a fundação, ou onde se entende por limite da estrutura de alvenaria. Tanto o projeto de norma da NBR 16868:2020 quanto as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 usam o mesmo escopo geral para esta análise, porém há novidades em itens específicos, como, por exemplo, na altura efetiva de paredes.

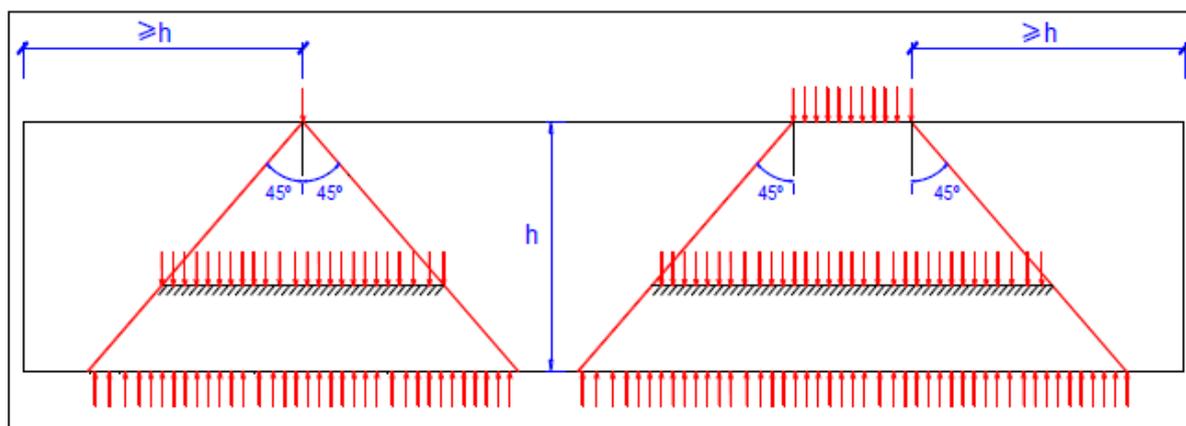
3.7.1 Estabilidade global dos edifícios

A estabilidade global dos edifícios já foi abordada neste trabalho, no item 3.6.4, pois era uma etapa necessária para o cálculo das combinações de ações, que foram realizadas no item anterior.

3.7.2 Hipóteses básicas

As normas ainda vigentes de alvenaria estrutural NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, de blocos cerâmicos e de blocos de concreto, respectivamente, citam que a análise estrutural da alvenaria pode ser realizada considerando um comportamento elástico-linear dos materiais, mesmo para a verificação dos estados limite últimos. Essas normas ainda especificam que a propagação de uma ação vertical, seja ela concentrada ou distribuída, se dá segundo a inclinação de 45° em relação ao plano horizontal do elemento.

Figura 3.13: Dispersões de ações verticais concentradas e distribuídas.



Fonte: NBR 16868:2020.

Conforme a Figura 3.13, o projeto de norma da NBR 16868:2020 segue as mesmas prescrições citadas acima, e especifica o mesmo esquema da dispersão da carga em 45° através do elemento.

O projeto da nova norma apresenta novidades quanto a rigidez dos materiais, para a aproximação de sua não linearidade física, podendo ser considerado os seguintes valores, iguais aos parâmetros adotados pela NBR 6118:2014.

$$\text{vigas: } (E_a I)_{\text{sec}} = 0,4 E_a I \quad (17)$$

$$\text{paredes e pilares: } (E_a I)_{\text{sec}} = 0,8 E_a I \quad (18)$$

3.7.3 Vigas

3.7.3.1 Vão efetivo

A NBR 15812:2010 apresenta como vão efetivo o menor valor entre: a distância entre os eixos dos apoios ou a distância entre as faces dos apoios mais a altura da seção transversal da viga.

Porém, a NBR 15961:2011, especifica o vão efetivo de forma um pouco diferente da norma referente aos blocos cerâmicos. Na normativa que aborda a alvenaria com blocos de concreto o vão efetivo é descrito como a distância livre entre as faces dos apoios, somado em cada lado do vão pelo menor valor entre:

- metade da altura da viga;
- distância do eixo do apoio à face do apoio.

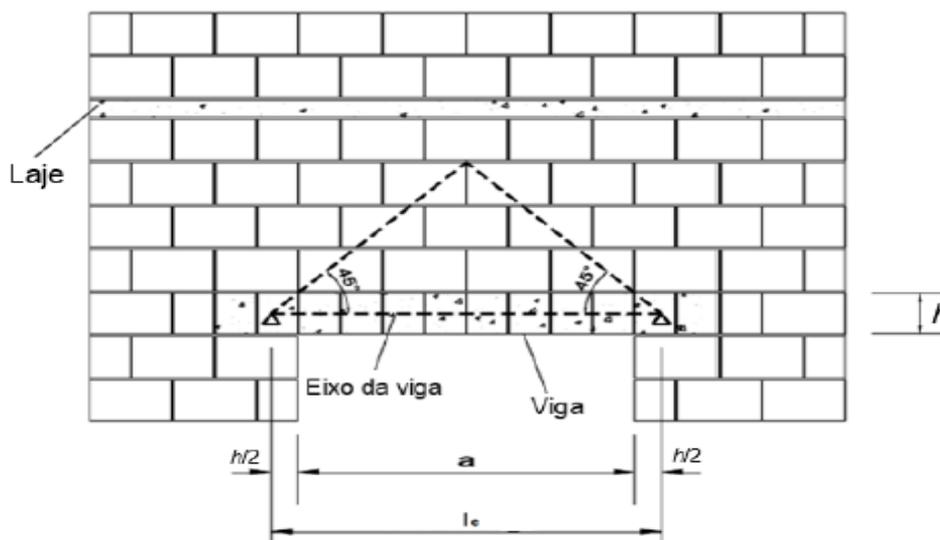
Com as duas normas especificadas de maneiras diferentes, o projeto de norma da NBR 16868:2020, que irá substituir estas normas, acompanha a NBR 15961:2011, de alvenaria com blocos de concreto. Essa situação já foi relatada neste trabalho anteriormente, e reforçando a impressão de que a NBR 15961:2011 é mais citada do que a NBR 15812:2010, seja por ela tratar de blocos de concreto, ou por ser considerada mais atualizada por ter sido elaborada após a norma sobre blocos cerâmicos.

3.7.3.2 Carregamento para vigas

Diferentemente do vão efetivo da viga, o carregamento para estes elementos segue as mesmas prescrições, tanto na norma para blocos cerâmicos, quanto na para os blocos de concreto. Assim, o projeto da nova norma reforça essa ideia, que segue o princípio geral da dispersão das ações, que se dá em um ângulo de 45°, conforme o item 4.6.2 deste trabalho.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 ainda especifica que devem ser respeitadas as considerações do seu próprio item “9.7”, que fala sobre a interação da alvenaria e as estruturas de apoio, o qual será abordado neste trabalho no item 4.6.9.

Figura 3.14: Carregamento em vigas.



Fonte: NBR 15812:2010.

Onde

h = altura da viga;

l_e = vão da viga;

a = distância livre entre os apoios.

3.7.3.3 Flecha imediata

O item que discorre sobre a flecha imediata em vigas na alvenaria estrutural é uma das novidades apresentada pelo projeto de norma da NBR 16868:2020 em relação às normas brasileiras ainda vigentes NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011. A inércia equivalente, baseada na CSA S304:2014, para a avaliação aproximada da flecha imediata, é dada por:

$$I_{eq} = \left(\frac{Mr}{Ma}\right)^3 I_a + \left[1 - \left(\frac{Mr}{Ma}\right)^3\right] I_{II} \leq I_a \quad (19)$$

onde

I_a = momento de inércia da seção bruta de alvenaria;

I_{II} = momento de inércia da seção fissurada de alvenaria;

M_a = momento máximo no vão da viga, considerando o estado limite de serviço na combinação quase-permanente;

$$M_r = \text{momento de fissuração} = \frac{(f_{tk} + \sigma_k)}{y_t} I_a \quad (20)$$

Na análise da equação do momento de fissuração tem-se:

F_{tk} = resistência de tração na flexão;

σ_k = tensão de compressão axial aplicada na seção;

y_t = distância do centroide da seção não fissurada ao bordo mais tracionado.

Como o elemento analisado é uma viga, no caso da alvenaria estrutural, as vergas e contravergas, a ação que ocorre é a flexão, composta de compressão nas fibras superiores e tração nas fibras inferiores. Como a fissuração somente acontece nas fibras inferiores, onde há tensão de tração e a compressão é nula, na Equação 20, do momento de fissuração M_r , a tensão de compressão axial σ_k é nula, resultando em:

$$M_r = \frac{f_{tk}}{y_t} I_a \quad (21)$$

A equação 21 é uma variação considerando a tensão de flexão da viga, tração, reforçando a ideia de que a tensão de compressão é nula para tal questão.

$$\sigma_{flexão} = \frac{M_d}{W} = \frac{M_d}{I} y$$

(22)

sendo

$$f_{tk} = \frac{M_d}{I} y \quad (23)$$

dando:

$$M_y = \frac{f_{tk}}{y} I = M_r \quad (24)$$

3.7.3.4 Deformação por fluência

Novamente o projeto da nova norma apresenta um item que não havia nem na norma de blocos cerâmicos nem na de blocos de concreto. A deformação por fluência é dada por:

$$\text{Flecha final} = \text{Flecha inicial} \times \left(1 + \frac{1}{1+(50\rho)} \right) \quad (25)$$

Sendo que $\rho = \frac{A_s}{bd}$ na seção central para vão da viga com dois apoios ou no apoio para vão em balanço.

Tanto o item sobre a flecha imediata, citado em 4.6.3.3, quanto o presente item sobre deformação por fluência tem influência da NBR 6118:2014 e da CSA S304:2014. Há uma pequena diferença entre as fórmulas apresentadas pelo projeto de norma da NBR 16868:2020.

3.7.4 Pilares

Diferentemente do item que discorre sobre as vigas na alvenaria estrutural, onde o projeto da nova norma propõe novidades, no item que trata sobre pilares, o projeto de norma da NBR 16868:2020 segue as especificações das normativas ainda vigentes, NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, que são idênticas.

Para a altura efetiva do elemento, é especificado que seja igual à altura do pilar, quando houver travamentos restringindo deslocamentos horizontais ou rotações das extremidades. Caso haja uma extremidade livre, considera-se a altura efetiva como o dobro da altura do elemento.

As características geométricas devem ser calculadas considerando o pilar sem revestimento, e as excentricidades devido a cargas, quando existirem, devem sempre ser consideradas, e dimensionar o pilar como submetido a flexão composta.

3.7.5 Paredes

3.7.5.1 Altura efetiva

As NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 trazem a mesma especificação para a altura efetiva da parede, igual às diretrizes da norma americana (ACI 530), que deve-se considerar a própria altura da parede, quando houver travamentos restringindo os deslocamentos horizontais nas extremidades inferior e superior, ou o dobro da altura da parede, quando uma das extremidades for livre e a outra extremidade esteja restringida ao deslocamento horizontal e a rotação.

O projeto da nova norma por sua vez separa a altura efetiva em dois tópicos, quando não há travamento lateral transversal à parede, e quando há. Na situação de não haver este travamento lateral transversal, as especificações são idênticas às das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, descritas no parágrafo anterior.

A nova especificação do projeto de norma da NBR 16868:2020 propõe para quando há o travamento lateral transversal à parede, a altura efetiva h_e seja o menor valor entre:

$$\alpha_v \cdot h \quad (26)$$

$$0,7 \cdot \sqrt{\alpha_v \cdot h \cdot \alpha_h \cdot l} \quad (27)$$

onde α_v é o índice de esbeltez vertical, que pode ser considerado:

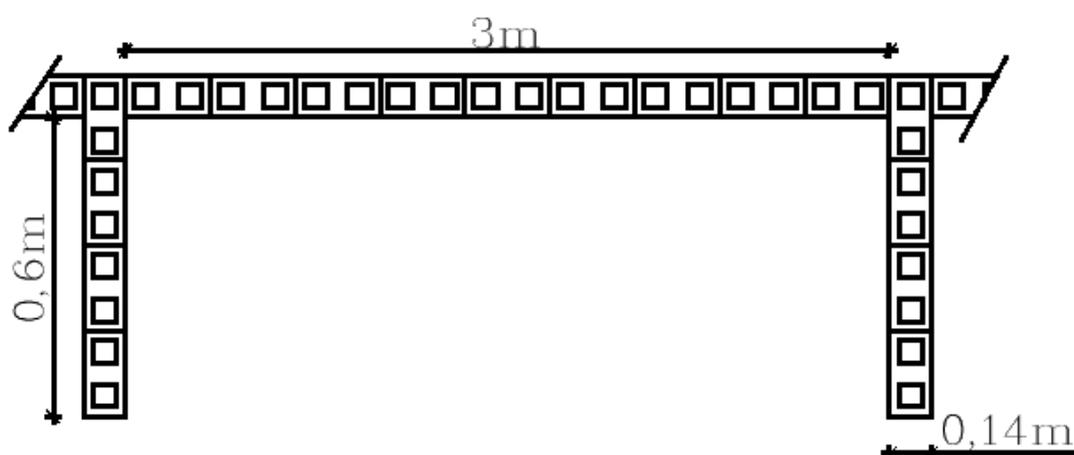
- 1,0 se houver travamentos que restrinjam os deslocamentos horizontais das extremidades superior e inferior;
- 2,5 se houver travamentos que restrinjam os deslocamentos horizontais em uma das extremidades.

E para α_h , que é o índice de esbeltez horizontal, seu valor podem ser:

- 1,0 se houver travamentos que restrinjam os deslocamentos horizontais das extremidades esquerda e direita;

Por exemplo, analisando-se um painel com altura de 2,80 m e uma comprimento de 3 m, e onde há travamentos que restrinjam os deslocamentos horizontais em suas extremidades e que haja travamentos laterais transversais, conforme a Figura 3.16. A altura efetiva, segundo as normas ainda vigentes, seria considerada igual a altura do painel (2,80 m), pois as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 somente levam em consideração os travamentos das extremidades superior e inferior, ou seja, dos deslocamentos horizontais.

Figura 3.16: Valores para o cálculo da altura efetiva.



Fonte: Autor (2020).

Por outro lado, o projeto de norma da NBR 16868:2020 propõe considerar os travamentos laterais transversais ao painel em ambas as extremidades (direita e esquerda). Para o mesmo exemplo anterior, e considerando que estes travamentos tenham um comprimento de 60 cm, ou seja, valor superior a 56 cm (1/5 da altura do painel), a altura efetiva seria o menor valor entre os dois resultados abaixo:

$$h_e = \alpha_v \cdot h = 1 \cdot 280 = 280 \text{ cm}$$

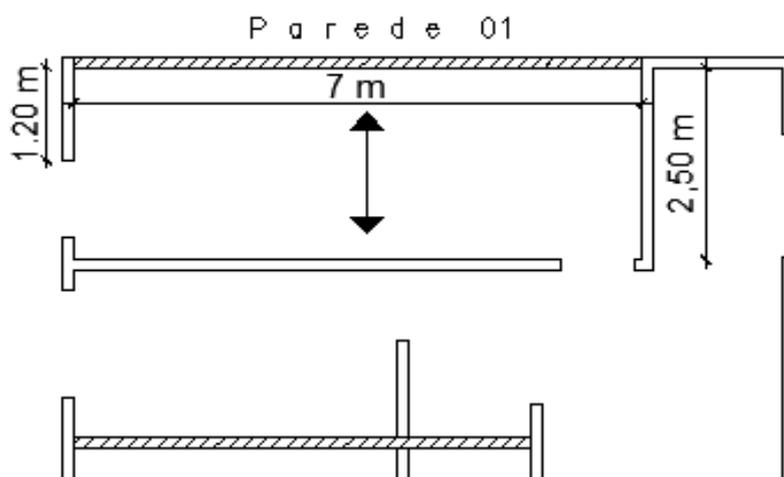
$$h_e = 0,7 \cdot \sqrt{\alpha_v \cdot h \cdot \alpha_h \cdot l} = 0,7 \cdot \sqrt{1 \cdot 280 \cdot 1 \cdot 300} = 202,88 \text{ cm}$$

Assim, a altura efetiva do painel, por conta dos travamentos laterais transversais e travamentos que restrinjam os deslocamentos horizontais nas extremidades superior e inferior, seria de 202,88 cm, uma redução de 27% no valor em relação às NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011.

Esta nova especificação para a altura efetiva na parede proposta pelo projeto de norma da NBR 16868:2020, leva a futura normativa a um patamar menos conservador, uma vez que considera a contribuição das paredes laterais transversais para a rigidez do painel em questão, resultando em uma altura efetiva menor, que por sua vez resulta em uma esbelteza menor do elemento.

Porém, o projeto da nova norma não especifica os quão distantes os travamentos laterais transversais podem estar do centro do painel que está sendo travado. Nesse enfoque, como, por exemplo, de travamentos laterais transversais com um vão maior entre eles, tem-se a “parede 01” do exemplo do item 3.6.4, conforme mostra a Figura 3.17:

Figura 3.17: Valores para o cálculo da altura efetiva da “parede 01”.



Fonte: Autor (2020).

A “parede 01” tem travamentos laterais transversais, e ambos os travamentos têm comprimento maior que 56 cm, ou seja, maior que 1/5 da altura da “parede 01”, conforme especifica o projeto de norma da NBR 16868:2020. Assim, a determinação da altura efetiva dessa parede é o mesmo do exemplo anterior, o menor valor entre:

$$h_e = \alpha_v \cdot h = 1 \cdot 280 = 280 \text{ cm}$$

$$h_e = 0,7 \cdot \sqrt{\alpha_v \cdot h \cdot \alpha_h \cdot l} = 0,7 \cdot \sqrt{1 \cdot 280 \cdot 1 \cdot 700} = 309,9 \text{ cm}$$

No caso da “parede 01”, mesmo com os travamentos laterais transversais considerados conforme diz o projeto da nova norma, a sua altura efetiva resulta no mesmo valor das diretrizes das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, $h_e = 280$ cm, justamente pelo grande vão entre os travamentos laterais transversais, que assim, perdem a sua influência sobre o painel.

Para fins de comparação, além de exemplos com as diretrizes das normas brasileiras ainda vigentes e do projeto da nova norma, este trabalho irá abordar as especificações de algumas normativas internacionais, nos itens de altura específica, espessura específica e índice de esbeltez.

Segundo a CSA – S304(2014) a altura efetiva da alvenaria é determinada por

$$h_{ef} = k \cdot h \quad (28)$$

onde

h_{ef} = altura efetiva da parede;

k = coeficiente multiplicador de altura;

h = altura livre da parede.

A norma canadense, desde 2004, já considerava os travamentos transversais laterais na parede para o valor da altura efetiva, pois o coeficiente “ k ”, quando a parede tiver vinculações no topo, na base e nas suas laterais, deve ser igual a 0,80, reduzindo o valor da altura efetiva. Porém, se a parede tiver sua extremidade superior livre, o valor do coeficiente passa para 2.

O Eurocode 6 adota para a determinação da altura efetiva da parede:

$$h_{ef} = \rho n \cdot h \quad (29)$$

onde

h_{ef} = altura efetiva da parede;

ρn = coeficiente multiplicador de altura;

h = altura livre da parede.

A norma europeia especifica com mais detalhes os diferentes casos para o valor de ρn . Segundo Lopes (2014), os casos de determinação do coeficiente seriam:

O coeficiente tem valor de $\rho n = \rho_1 = 0,75$ para paredes apoiadas na parte superior e inferior por pisos de concreto armado ou telhados, apoiando-se nas duas faces, no mesmo nível, ou por pisos de concreto armado, apoiando-se em uma das faces, considerando-se que o apoio ocupe 2/3 da espessura da parede.

Quando a parede está apoiada na parte superior e inferior por pisos de madeira ou telhados, apoiando-se nas duas faces, no mesmo nível, ou por pisos de madeira, apoiando-se em uma das faces, considerando-se que o apoio ocupa 2/3 da espessura da parede, mas não menos que 85 mm, o valor do coeficiente é de $\rho n = \rho_1 = 1,0$.

Para as paredes vinculadas na parte superior e inferior com apenas uma face lateral apoiada, o coeficiente é determinado pelas seguintes equações.

$$\rho_3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho n h}{3L}\right)^2} \rho_2 > 0,3 \text{ para } h \leq 3,5L \quad (30)$$

$$\rho_3 = \frac{1,5L}{h} \text{ para } h > 3,5L \quad (31)$$

Para paredes vinculadas na parte superior e inferior com as duas laterais apoiadas, o coeficiente passa a ser determinado pelas equações 32 e 33:

$$\rho_4 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_2 h}{L}\right)^2} \rho_2 \text{ para } h \leq L \quad (32)$$

$$\rho_4 = \frac{0,5L}{h} \text{ para } h > L \quad (33)$$

No entanto a norma europeia não especifica um valor para o coeficiente multiplicador para os casos de paredes que tenham a extremidade inferior restringindo o deslocamento horizontal e a rotação, porém, a sua extremidade superior seja livre.

3.7.5.2 Espessura efetiva

Tanto a NBR 15812:2010 quanto a NBR 15961:2011 especificam os mesmos parâmetros para a espessura efetiva t_e da parede. Caso a parede não tenha enrijecedores, a espessura efetiva será igual a sua espessura t , sem considerar os revestimentos. Caso a parede tenha enrijecedores, espaçados regularmente, a espessura efetiva deve ser calculada por

$$t_e = \delta \cdot t \quad (34)$$

onde

t_e = espessura efetiva da parede;

δ = coeficiente calculado de acordo com a Tabela 3.15;

t = espessura da parede.

Tabela 3.15: Valores para cálculo da espessura efetiva.

$l_{\text{enr}} / e_{\text{enr}}$	$t_{\text{enr}} / t = 1$	$t_{\text{enr}} / t = 2$	$t_{\text{enr}} / t = 3$
6	1,0	1,4	2,0
8	1,0	1,3	1,7
10	1,0	1,2	1,4
15	1,0	1,1	1,2
20 ou mais	1,0	1,0	1,0

Fonte: NBR 16868:2020.

Onde:

l_{enr} = espaçamento entre eixos de enrijecedores adjacentes;

e_{enr} = espessura dos enrijecedores;

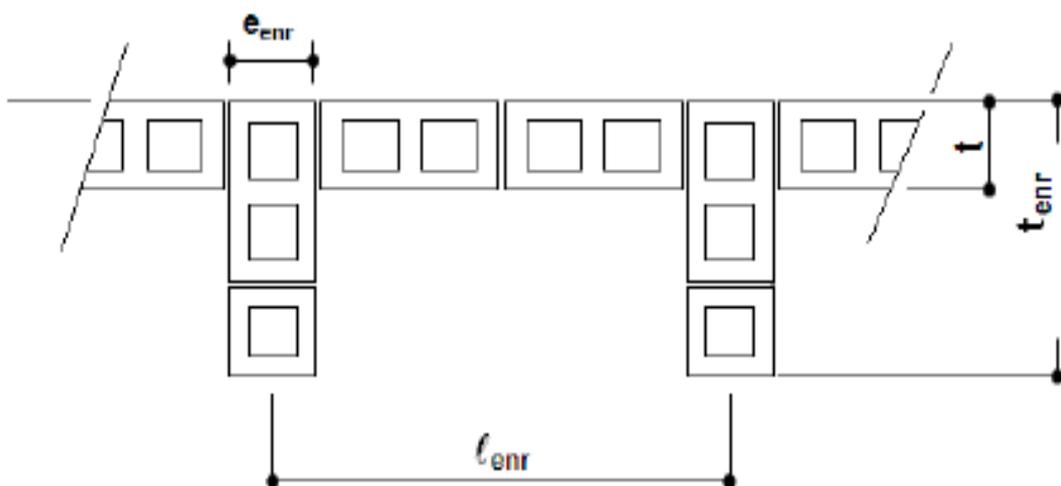
t_{enr} = comprimento dos enrijecedores;

t = espessura da parede.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 mantém as especificações das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 e ainda estabelece que a seção resistente sempre será calculada desconsiderando os revestimentos, salvo projetos especificados.

A Figura 3.18 está presente nas normas vigentes de alvenaria estrutural e no projeto da nova norma. Essa figura esquematiza os parâmetros para o cálculo da espessura efetiva da parede.

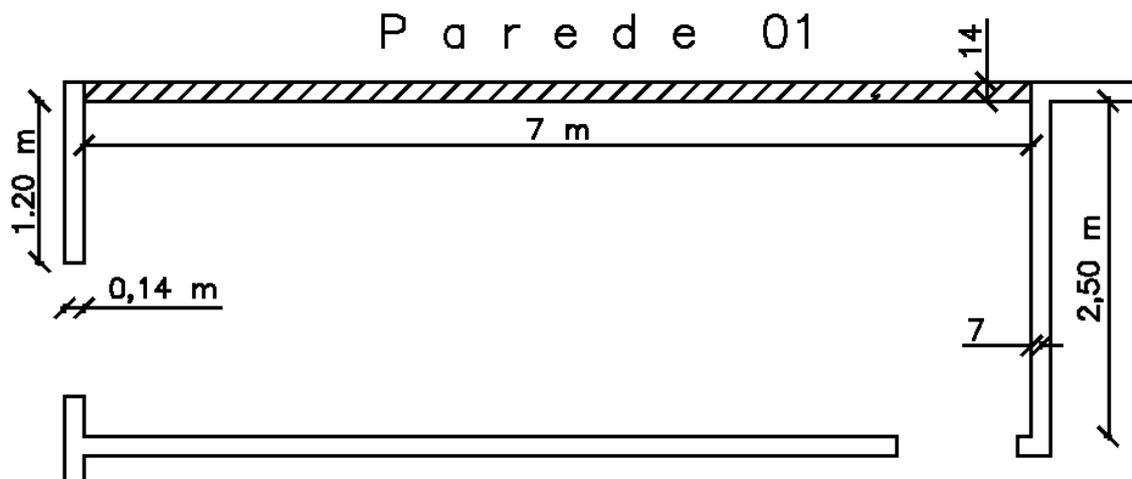
Figura 3.18: Parâmetros para o cálculo da espessura efetiva.



Fonte: NBR 16868:2020.

Seguindo o exemplo do item sobre a altura efetiva, e também do item sobre a comparação entre as combinações de ações deste trabalho, usa-se a “parede 01”, com altura de 2,80 m, para a determinação da espessura efetiva.

Figura 3.19: Valores para o cálculo da espessura efetiva da “parede 01”.



Fonte: Autor (2020).

A espessura efetiva para o exemplo em questão, é a mesma tanto para as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, quanto para o projeto da nova norma, calculada pela Equação 34.

O fator δ é determinado pelos valores da tabela 3.15, portanto:

$$\frac{\ell_e}{e_{enr}} = \frac{700 + 7 + 7}{14} = \frac{714}{14} = 51$$

O valor de 51 é superior a 20, assim, analisa-se a Tabela 3.15 e conclui-se que qualquer interpolação para valores superiores 20, resulta em $\delta = 1$. Assim, a espessura efetiva do painel é:

$$t_e = \delta \cdot t = 1 \cdot 14 = 14 \text{ cm}$$

comprovando que a determinação da espessura efetiva não foi alterada para o projeto de norma da NBR 16868:2020.

Lopes (2014) comenta que tanto a ACI 530 e quanto a CSA S304:2014 não utilizam o conceito de espessura efetiva para o dimensionamento das paredes de alvenaria estrutural. As normativas usam a ideia de raio de giração, que é determinada, para ambas as normas, assim:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (35)$$

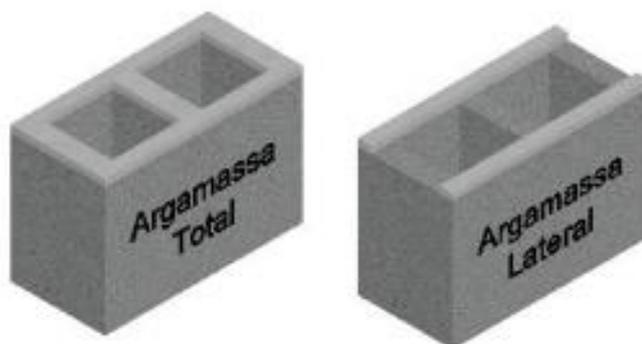
onde

I = momento de inércia da seção;

A = área da seção transversal.

A norma americana e a norma canadense calculam a inércia I e área A na área efetiva, ou seja, utilizam a área que de fato há argamassa no bloco, seja o argamassamento total ou lateral, conforme mostra a Figura 3.20.

Figura 3.20: Argamassamento total e lateral.



Fonte: Lopes (2014).

O Eurocode 6 especifica a espessura efetiva de forma muito parecida com a normativas brasileiras. A equação que a norma europeia especifica é igual a equação 34, e a tabela com os valores do coeficiente multiplicador também é a mesma que a especificada pelo projeto de norma da NBR 16868:2020, porém, com menos valores.

3.7.6 Interação entre elementos de alvenaria

O projeto de norma da NBR 16868:2020 segue as normativas atuais de alvenaria estrutural quanto às prescrições gerais para a interação entre os elementos da alvenaria, que devem ser consideradas somente quando há garantias de que as forças de interação possam se desenvolver entre os elementos, e que tenham resistência o suficiente na interface para transmiti-las.

Porém, as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 especificam que aberturas cuja maior dimensão seja menor que $1/6$ do menor valor da altura ou do comprimento da parede em questão podem ser desconsideradas para efeitos de interação.

No projeto da nova norma é proposto a mudança deste valor, e cita que aberturas menores ou iguais à 61 cm e menor que $1/4$ do menor valor entre a altura e o comprimento da parede em questão, podem ser desconsideradas do efeito de interação, desde que as extremidades dessa abertura estejam a mais de 60 centímetros das extremidades das paredes. Quando houver mais de uma abertura nas paredes, essa especificação só é válida se houver mais de 60 cm de parede entre as aberturas.

Nos casos que seja considerada a interação entre as paredes, deve-se verificar a resistência ao cisalhamento.

Ressalta-se que esta mudança proposta pelo projeto da nova norma está um tanto quanto confusa na sua redação, podendo dificultar a interpretação do projetista, o que não é o objetivo das normativas.

3.7.7 Interação para cargas verticais

Para interação de paredes em cantos e bordas, com amarrações dos tipos “L”, “T”, e “X”, deve-se considerar que há interação com amarrações diretas. As normas ainda vigentes (NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011) citam que para outras ligações além das amarrações diretas, a interação pode ser considerada quando sua eficiência for comprovada experimentalmente. O projeto de norma da NBR 16868:2020 exclui essa possibilidade, e passa a especificar que essas outras ligações além da amarração direta não devem ser consideradas. Essa mudança reflete o que vem sendo praticado na construção em alvenaria estrutural.

O contrário acontece com as interações através de aberturas, onde as normas de blocos cerâmicos e de blocos de concreto somente consideravam essa interação quando comprovadas experimentalmente, e o projeto da nova norma afirma que essa interação através de aberturas pode ser considerada e que as dimensões das aberturas devem ser descontadas da área da parede para o dimensionamento.

3.7.8 Interação para cargas horizontais

Muito semelhante com o item anterior sobre a interação de cargas verticais, a interação de cargas horizontais também é considerada somente quando houver uma amarração direta, dessa vez por flanges (mesas). Para as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, caso fossem comprovadas experimentalmente a eficiência de outras que não as diretas, elas poderiam ser consideradas. Para o projeto de nor NBR 16868:2020, amarrações diferentes das diretas, devem ser desconsideradas.

O projeto da nova norma ainda especifica, igualmente as normas ainda vigentes, que não pode haver superposição de flanges no dimensionamento, e que esses elementos devem ser utilizados para o cálculo de rigidez do painel e para o

cálculo de tensões normais devidas à flexão, porém sem participação na resistência ao esforço cortante.

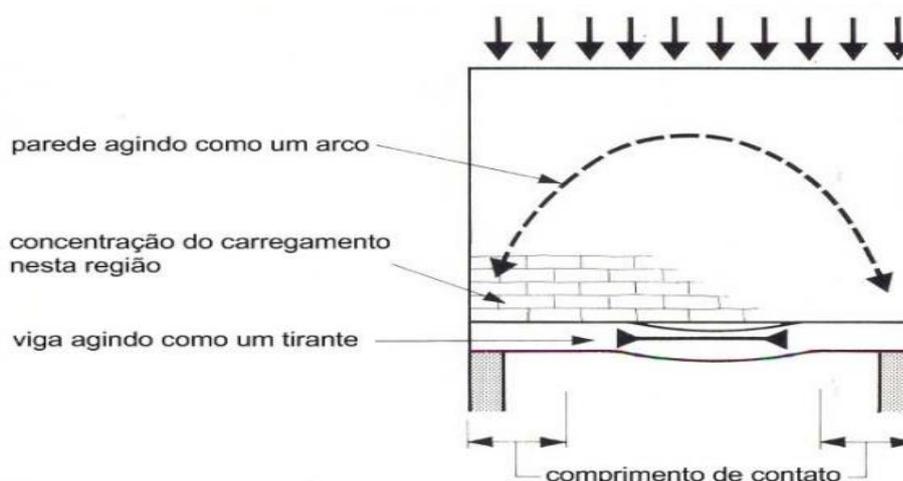
3.7.9 Interação entre a alvenaria e estruturas de apoio

O carregamento que resulta nas estruturas de apoio deve ser sempre coerente com o esquema estrutural, e seguir a trajetória estabelecida para as tensões.

As NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 especificam que é proibida a redução nos valores de carregamentos, como os que são transmitidos para as estruturas de apoio, baseado no efeito arco. Para fazer tal, é necessário levar em conta todos os aspectos do efeito arco.

O efeito arco aparece na interação entre a parede de alvenaria e sua estrutura de suporte. Tomando-se como exemplo uma parede de alvenaria estrutural apoiada sobre uma viga de concreto armado, a parede terá a função de um arco atirantado. Segundo Paes (2008), o arco forma-se na parede, e a viga trabalha como tirante, o que influencia a transferência de cargas da parede para a viga (estrutura de apoio). Ainda segundo a autora, as cargas que antes se localizavam no centro da parede se conduzem para o extremo da parede. Dessa forma, as solicitações na viga tendem a diminuir, em especial os momentos fletores, porém, há uma concentração de tensão nos extremos das paredes, o que leva a um aumento das ações de cisalhamento nos apoios.

Figura 3.21: Ação do efeito arco.



Fonte: Haseltine e Moore (1981) *Apud.* Paes (2008).

Seguindo as NBR 15812:2010 e 15961:2011, o projeto da nova norma também especifica que não pode haver reduções nos valores adotados sem antes considerar em seu total as consequências do efeito arco.

O projeto da nova norma também atenta, assim como as normas ainda vigentes, para a concentração de tensões nas regiões próximas aos apoios, porém, acrescenta, em comparação às NBR 15812:2010 e 15961:2011, que nas verificações dessas tensões, pode-se considerar um aumento no valor de f_k , multiplicando pelo parâmetro K, que vale 1,5 para regiões de alvenaria sem graute e 2 para as regiões preenchidas com graute.

3.8 LIMITES PARA DIMENSÕES, DESLOCAMENTOS E FISSURAS

3.8.1 Esbeltez

De acordo com o projeto de norma da NBR 16868:2020, os limites máximos para o índice de esbeltez λ continuam iguais aos recomendados nas NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, sendo de 24 para alvenaria não armada e 30 para alvenaria armada.

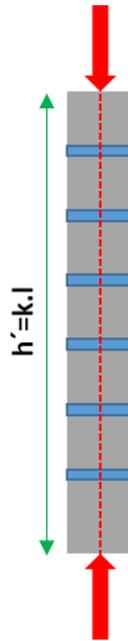
Tabela 3.16: Valores máximos para o índice de esbeltez.

Não armados	24
Armados (respeitando armaduras mínimas)	30

Fonte: NBR 16868:2020 atualizado por Autor (2020).

O valor máximo para o índice de esbeltez de alvenarias não armadas é determinado por meio da aplicação da carga crítica em um elemento, Figura 3.22.

Figura 3.22: Elemento de alvenaria com condição de apoio-apoio.



Fonte: Autor (2020).

Com o elemento da Figura 3.22 estando em condição de apoio-apoio nas suas extremidades superior e inferior, o comprimento de flambagem é igual a altura do elemento, ou seja, $l_{fl} = h$:

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_{fl}^2} \quad (36)$$

Substituindo-se na Equação 36 os parâmetros de comprimento de flambagem, inércia e da área:

$$l_{fl} = h = k \cdot l$$

$$I = \frac{b \cdot t^3}{12}$$

$$A = b \cdot t$$

Tem-se a Equação 36 redefinida como:

$$\sigma_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E_m \cdot \frac{b \cdot t^3}{12}}{(k \cdot l)^2 \cdot b \cdot t} = \frac{0,82 \cdot E_m}{\left(\frac{k \cdot l}{t}\right)^2} \quad (37)$$

A única variável da Equação 37 é o módulo de elasticidade E_m da alvenaria. Ainda na década de 1990, o valor mais comum para o módulo de elasticidade era de $E_m = 1000 \cdot f_k$, porém, Drysdale *et al.* (1994) já afirmavam que este valor estava superestimado para a maioria das alvenarias, e que o valor de $E_m = 750 \cdot f_m$ era uma estimativa melhor. Assim, usa-se a melhor estimativa:

$$\frac{0,82 \cdot (750 \cdot f_m)}{\left(\frac{k \cdot l}{t}\right)^2} = \sigma_{crit} = \frac{615 \cdot f_m}{\left(\frac{h}{t}\right)^2}$$

Considera-se que no limite permitido a tensão e a resistência são equivalentes:

$$\sigma = f_m = \frac{615 \cdot f_m}{\left(\frac{h}{t}\right)^2} \text{ ou seja } h/t = \sqrt{615} = 24,8$$

Todavia, projeto da nova norma destaca uma exceção na especificação da alvenaria não armada, que no caso de habitações térreas, admite-se um índice de esbeltez menor ou igual a 30, desde que o coeficiente ponderador da resistência da alvenaria seja igual a $\gamma_m = 3,0$ e Medeiros e Parsekian (2019) citam o estudo sobre paredes armadas e não armadas de Parsekian *et al.* (2016) como referência para tal coeficiente.

O projeto da nova norma ainda especifica o Anexo C, posteriormente abordado neste trabalho, como a diretriz de dimensionamento para paredes esbeltas com λ sem limite máximo, desde que atenda as prescrições do Anexo C.

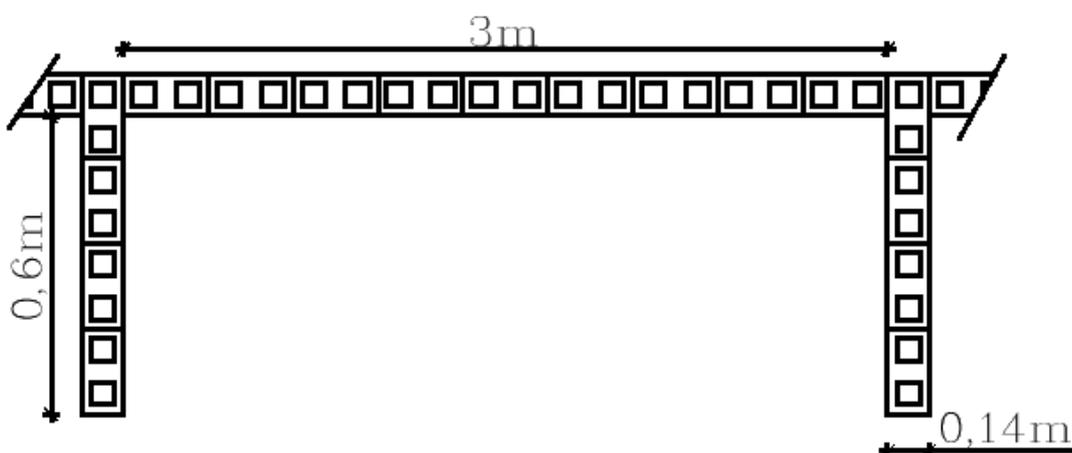
Conforme comentado nos parágrafos anteriores, o projeto de norma da NBR 16868:2020 estabelece, em um primeiro momento, que o índice de esbeltez para elementos de alvenaria estrutural devem ser de 24 e 30, para alvenarias não armadas e armadas, respectivamente. Porém, na especificação do dimensionamento de elementos de alvenaria submetidos à flexo-compressão, o projeto da nova norma determina que elementos com índice de esbeltez menor ou

igual a 16 podem ser dimensionados como alvenaria armada, tanto usando uma armadura mínima, quanto considerando o elemento submetido a uma flexão oblíqua, levando em conta momentos de segunda ordem e aumentando a taxa de armadura.

Observa-se uma falta de comunicação entre os itens de esbeltez e dimensionamento no projeto de norma da NBR 16868:2020, citados anteriormente, sendo que o projeto da nova norma se contradiz quanto ao limite máximo para a esbeltez de elementos não armados e armados.

Seguindo no exemplo do item 3.7.5.1, onde se tem uma parede conforme a Figura 3.23.

Figura 3.23: Dimensões da parede exemplo.



Fonte: Autor (2020).

A altura da parede é de 2,80 m, mas a sua altura efetiva h_e varia, dependendo da especificação usada:

- 280 cm segundo as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011;
- 202,88 cm segundo o projeto de norma da NBR 16868:2020.

A espessura efetiva do painel em questão é de 14 cm, assim, o cálculo da esbeltez do painel, tanto para as normas ainda vigentes, quanto para o projeto da nova norma, é realizado pela equação 18.

$$\lambda = \frac{h_e}{t_e} \quad (38)$$

onde

h_e = altura efetiva

t_e = espessura efetiva

Assim, para o valor da altura efetiva calculado pelas diretrizes das NBR 15812:2010 e 15961:2011, a esbeltez resulta em:

$$\lambda = \frac{h_e}{t_e} = \frac{280}{14} = 20$$

E usado a altura efetiva calculada segundo o projeto da nova norma, levando em consideração os travamentos transversais laterais, a esbeltez do painel resulta em:

$$\lambda = \frac{h_e}{t_e} = \frac{202,88}{14} = 14,5$$

Ambas as esbeltezes resultam em valores menores que 24, indicando um painel não armado, porém não necessariamente.

Em comparação, o Eurocode 6 determina a esbeltez com as mesmas fórmulas da NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, e por consequência, igual ao projeto de norma da NBR 16868:2020. Porém, a norma europeia determina um valor máximo para a esbeltez de uma parede de até 27, menor do que os valores brasileiros, que vão até 30 e o projeto de norma da NBR 16868:2020 ainda apresenta o anexo C que demonstra como dimensionar paredes que ultrapassam o valor de 30 na sua esbeltez.

Como mostrado no item 3.7.5.2, a norma americana utiliza do conceito de raio de giração para o dimensionamento das paredes de alvenaria, e assim, o raio de giração faz parte do cálculo do índice de esbeltez:

$$\lambda = \frac{h}{r} \quad (39)$$

onde

h = altura efetiva da parede;

r = raio de giração.

A ACI 530 limita o valor do índice de esbeltez em até 99, e determina critérios diferentes para o dimensionamento de paredes que ultrapassem este valor e paredes que tenham o raio de giração menor que 99, tanto para alvenaria não armada, quanto para alvenaria armada.

A norma canadense mesmo usando o método do raio de giração como a norma americana, estabelece que o índice de esbeltez seja determinado pela Equação 40, não utilizando o raio de giração.

$$\lambda = \frac{k \cdot h}{t} \quad (40)$$

onde

h = altura livre da parede;

k = coeficiente multiplicador de altura;

t = espessura da parede.

A CSA S304:2014 especifica um valor máximo para o índice de esbeltez de até 30, tanto para alvenaria não armada quanto para alvenaria armada.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 especifica um método de dimensionamento para paredes com índice de esbeltez maior do que o limite máximo estipulado de 30, em seu anexo C que será abordado posteriormente neste trabalho.

3.8.2 Cortes e juntas

No item de cortes e juntas, o projeto da nova norma não traz novidades em comparação às normas que ela irá substituir. Assim como em itens prévios, como os que abordaram as propriedades do material por exemplo, o projeto de norma da NBR 16868:2020 neste item mantém as especificações que eram compartilhadas entre as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, e agrupa as informações que eram distintas entre as normativas em uma mesma tabela. No caso das juntas de controle,

que tinham informações distintas para blocos cerâmicos e de concreto, o projeto da nova norma manteve os valores para cada tipo de material, especificado na Tabela 3.17.

Tabela 3.17: Valores máximos de espaçamento entre juntas verticais de controle.

Material	Localização do elemento	Limite (m)			
		Alvenaria sem armadura horizontal		Alvenaria com taxa de armadura horizontal maior ou igual a 0,04% da seção transversal (altura vezes a espessura)	
		t ≥ 14 cm	t < 14 cm	t ≥ 14 cm	t < 14 cm
Cerâmica	Externa	10	8	12	9
	Interna	12	10	15	12
Concreto	Externa	7	6	9	8
	Interna	12	10	15	12

NOTA 1 Os limites acima devem ser reduzidos em 15% caso a parede tenha abertura.
 NOTA 2 No caso de paredes executadas com blocos de concreto não curados a vapor, os limites devem ser reduzidos em 20%, caso a parede não tenha abertura.
 NOTA 3 No caso de paredes executadas com blocos de concreto não curados a vapor, os limites devem ser reduzidos em 30%, caso a parede tenha abertura.

Fonte: NBR 16868:2020.

3.8.3 Deslocamentos limites

Para elementos de apoio a alvenarias, as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 especificam como limite máximo os valores de $L/500$, 10 mm ou $\theta = 0,0017$ rad. O projeto da nova norma apresenta mudanças nos valores em comparação às normas vigentes, além de ser mais específica em seu texto. O projeto de norma da NBR 16868:2020 separa a especificação entre peças em balanço e demais casos. Para as situações em balanço é especificado valores máximos de $L/250$ e 10 mm. Para os demais casos, os limites são $L/500$ ou 10 mm.

Para quaisquer elementos fletidos, os limites de deslocamentos finais já são separados em elemento em balanço, ou não, nas NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011. Os valores são de $L/500$ ou 20 mm para as peças em balanço, e de

L/300 ou 10 mm para os demais casos. O projeto da nova norma altera somente o limite dos elementos que estão em balanço, que passa de 20 mm para 10 mm. O valor de L/500 continua inalterado.

A novidade de maior relevância da seção sobre deslocamentos limites que o projeto de norma da NBR 16868:2020 apresenta é o item de “Movimento lateral em edifícios”. O item discorre sobre o projeto de edifícios altos, e segundo Medeiros e Parsekian (2019), é um tópico importante no projeto de norma da NBR 16868:2020. É especificado que na verificação lateral, provocada pela ação do vento em combinação frequente ($\psi_1 = 0,30$) é limitada a $H/1700$ e $H_i/850$, onde H é a altura total do edifício e H_i é o desnível entre dois pavimentos sucessivos. Estes parâmetros são os mesmos especificados pela NBR 6118:2014 sobre projeto de estruturas de concreto.

3.9 DIMENSIONAMENTO

Este item discorre sobre o dimensionamento da alvenaria estrutura, e provavelmente seja o mais importante das normativas. Serão abordadas as especificações das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 para o dimensionamento da alvenaria estrutural, comparando-as com as especificações do projeto de norma da NBR 16868:2020, por meio de uma análise teórica e com o desenvolvimento de alguns exemplos.

Assim como as NBR 15812:2010 e 15961:2011, o projeto de norma da NBR 16868:2020 divide o dimensionamento de acordo com a atuação das forças na estrutura. A estrutura pode ser dimensionada à compressão simples, à flexão simples, ao cisalhamento ou à flexo-compressão.

Do mesmo modo que as normas ainda vigentes, o projeto da nova norma começa a seção definindo as hipóteses admitidas para a alvenaria não armada e alvenaria armada. O projeto de norma da NBR 16868:2020 descreve as mesmas hipóteses que as normas ainda vigentes, com exceção ao encurtamento máximo da alvenaria quando tem-se o efeito de flexão ou flexo-compressão, onde o limite era de 0,35% para as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, e o projeto da nova norma diminui o limite para 0,30%.

3.9.1 Dimensionamento da alvenaria à compressão simples

A NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 separam o item em três partes, resistência de cálculo em paredes, resistência de cálculo em pilares e forças concentradas. O projeto de norma da NBR 16868:2020 altera esse escopo. O projeto da nova norma separa o dimensionamento à compressão simples em quatro itens, e a grande novidade que a normativa apresenta é a possibilidade de inclusão da armadura para o dimensionamento à compressão simples.

3.9.1.1 Resistência de cálculo para parede e pilares não armados

O procedimento para a resistência de cálculo em paredes e pilares não armados de acordo com o projeto de norma da NBR 16868:2020 é basicamente a união dos itens “resistência de cálculo em paredes” e “resistência de cálculo em pilares” das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, onde a força resistente de cálculo é obtida pelas seguintes equações:

$$N_{rd} = f_d \cdot A \cdot R \quad (\text{para paredes}) \quad (41)$$

$$N_{rd} = 0,9 \cdot f_d \cdot A \cdot R \quad (\text{para pilares}) \quad (42)$$

onde

N_{rd} = força normal resistente de cálculo;

f_d = resistência à compressão de cálculo da alvenaria;

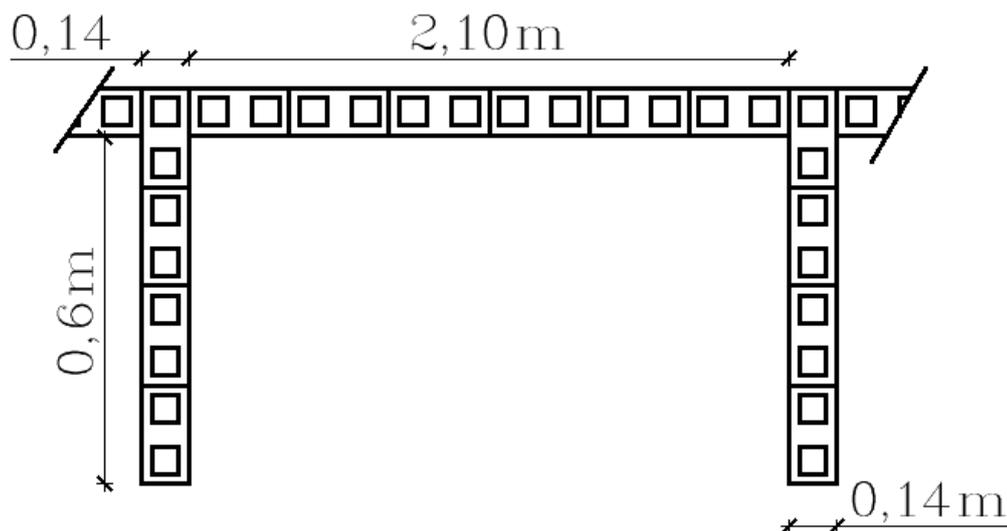
A = área da seção resistente;

$R = \left[1 - \left(\frac{\lambda}{40} \right)^3 \right]$ = coeficiente redutor devido à esbeltez da parede.

O dimensionamento de paredes de alvenaria não armada é o mesmo para a NBR 15812:2010 e para a NBR 15961:2011, e continua o mesmo no projeto de norma da NBR 16868:2020.

Como exemplo de um elemento não armado de alvenaria estrutural sob compressão simples, tem-se a parede ilustrada pela Figura 3.24. A parede em questão está submetida sob uma carga centrada de 800 kN.

Figura 3.24: Parede de exemplo.



Fonte: Autor (2020).

É importante ressaltar que a altura do painel em questão é de 280 cm, porém, conforme foi discutido no item 3.7.5.1 deste trabalho que aborda a altura efetiva, o projeto da nova norma estabelece que quando há travamentos transversais laterais à parede, com comprimento de pelo menos 1/5 da altura do painel que está sendo travado, a altura efetiva vai ser o menor valor entre:

$$h_e = \alpha_v \cdot h = 1 \cdot 280 = 280 \text{ cm}$$

$$h_e = 0,7 \cdot \sqrt{\alpha_v \cdot h \cdot \alpha_h \cdot l} = 0,7 \cdot \sqrt{1 \cdot 280 \cdot 1 \cdot 210} = 169,75$$

Assim, a altura efetiva h_e do elemento é 169,75 cm. A espessura efetiva (t_e) do elemento é de 14 cm, logo a sua esbelteza λ será igual a 12,12.

Com a esbelteza determinada, o dimensionamento segue conforme a Equação 41:

$$N_{rd} = f_d \cdot A \cdot R$$

O coeficiente redutor devido a esbeltez é:

$$R = \left[1 - \left(\frac{\lambda}{40} \right)^3 \right] = \left[1 - \left(\frac{12,12}{40} \right)^3 \right] = 0,97$$

Assim:

$$N_{rd} = f_d \cdot A \cdot R$$

$$800 = f_d \cdot (210 \cdot 14) \cdot 0,97$$

$$f_d = 2,8 \text{ MPa}$$

Caso o elemento fosse dimensionado com as especificações da NBR 15812:2010 ou da NBR 15961:2011, a grande diferença seria o valor da altura efetiva da parede. Como as normas ainda vigentes não consideram os travamentos laterais transversais, a altura efetiva h_e seria de 280 cm. Por consequência, a esbeltez λ da parede mudaria de 12,12 para 20.

O painel ainda seria considerado como não armado, porém o seu fator redutor (R), que depende diretamente da esbeltez seria afetado, mudando de 0,97 para:

$$R = \left[1 - \left(\frac{\lambda}{40} \right)^3 \right] = \left[1 - \left(\frac{20}{40} \right)^3 \right] = 0,875$$

Assim, a resistência de à compressão de cálculo resultaria em:

$$800 = f_d \cdot (210 \cdot 14) \cdot 0,875$$

$$f_d = 3,1 \text{ MPa}$$

Mesmo com a diferença do valor da resistência de cálculo à compressão entre as diretrizes das normas ainda vigentes e do projeto da nova norma, ambos os valores foram muito semelhantes, com uma pequena diferença entre eles de 0,3 MPa. Isso mostra que, para o dimensionamento à compressão simples de

elementos não armados, a diferença da altura efetiva e da esbeltez do projeto da nova norma não parece ser muito importante.

3.9.1.2 Resistência de cálculo para parede e pilares armados com índice de esbeltez menor ou igual a 30

Uma das mudanças consideráveis do projeto da nova norma para as normas ainda vigentes é a consideração da armadura no dimensionamento da alvenaria à compressão simples. No item indicado para paredes e pilares armados com um índice de esbeltez menor ou igual a 30, o projeto de norma da NBR 16868:2020 especifica o método de dimensionamento da resistência de cálculo somente para pilares de alvenaria estrutural, sem mencionar as paredes estruturais, algo que pode causar confusão para o projetista. Assim, para pilares de alvenaria estrutural, com índice de esbeltez menor ou igual a 30, o projeto de norma da NBR 16868:2020 especifica:

$$N_{rd} = \left(f_d \cdot A + f_s \cdot \frac{A_s}{\gamma_s} \right) \cdot R \quad (43)$$

onde

N_{rd} = força normal resistente de cálculo;

f_d = resistência à compressão de cálculo da alvenaria;

f_s = tensão na armadura, limitada a:

$$- f_s \leq f_{pk} \cdot \frac{E_s}{E_m};$$

– f_{pk} = Resistência característica;

– $f_s \leq f_{yk}$.

A_s = área da seção das armaduras longitudinais contraventadas por estribos;

A = área da seção resistente;

$R = \left[1 - \left(\frac{\lambda}{40} \right)^3 \right]$ = coeficiente redutor devido à esbeltez do pilar.

Segundo Medeiros e Parsekian (2019), as normas atuais não permitem a consideração da armadura no dimensionamento da alvenaria à compressão simples

pois as paredes, em sua maioria, não são fortemente armadas, e a armadura longitudinal não é confinada por estribos na maioria dos casos. Ainda segundo Medeiros e Parsekian (2019), o comitê que desenvolveu o projeto da nova norma considerou que a utilização da armadura na compressão é uma ferramenta útil para o dimensionamento.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 ainda estabelece que o espaçamento máximo do estribo deve ser limitado a 24 vezes o diâmetro da barra longitudinal para tensões na armadura menores que 250 MPa. Para casos em que as tensões na armadura sejam de 250 MPa até 500 MPa, o espaçamento máximo dos estribos fica limitado à 12 vezes o diâmetro da barra longitudinal.

Embora no texto do projeto de norma da NBR 16868:2020 contenha somente as especificações para o dimensionamento de pilares, como exemplo para o dimensionamento de elementos armados com índice de esbeltez menor igual a 30, será calculado o dimensionamento da “parede 01”, objeto de exemplo no item 3.6.4, cujo cálculos iniciais já foram realizados em itens anteriores, como altura efetiva, espessura efetiva e todas as cargas e ações que a parede está submetida.

A “parede 1” tem espessura de 14 cm, uma altura de 2,80 m e comprimento de 7 m. No seu pavimento térreo, o acúmulo de cargas permanentes G_k é de 93,93 kN/m e o de cargas acidentais Q_k é de 25 kN/m. Para a sequência do dimensionamento é necessário determinar o índice de esbeltez da parede:

$$\lambda = \frac{h_e}{t_e} = \frac{280}{14} = 20$$

O projeto de norma da NBR 16868:2020 estabelece como índice de esbeltez máximo para paredes sem armadura o valor de 24. A mesma norma também especifica um método de dimensionamento para paredes com índice de esbeltez menor ou igual a 30 com armadura. Conforme o índice de esbeltez da “parede 01”, ela pode ser classificada de ambas as maneiras. Porém, segundo o item 3.6.4 deste trabalho onde foram determinadas as cargas e momentos atuantes na “parede 1”, bem como suas combinações de ações, a parede está submetida a tensões de compressão e tração, desde o 5º pavimento até o térreo, havendo assim a necessidade de armadura no elemento. Portanto, a “parede 01” deve ser dimensionada à flexo-compressão.

Do mesmo modo que a NBR 15812:2010 e a NBR 15961:2011, o projeto de norma da NBR 16868:2020 tem como primeira especificação para o dimensionamento à flexo-compressão que todo elemento submetido a essa solicitação deve primeiro resistir à força de compressão de cálculo atuante. Assim, a “parede 01” será verificada como uma parede armada com índice de esbeltez menor ou igual a 30, conforme especifica o projeto da nova norma.

$$N_d = ((93,93 + 25) \cdot 1,4) \cdot 7 = 1165,5 \text{ kN}$$

$$R = \left[1 - \left(\frac{\lambda}{40} \right)^3 \right] = \left[1 - \left(\frac{20}{40} \right)^3 \right] = 0,875$$

Considera-se a resistência de prisma como referência de $f_{pk} = 7 \text{ MPa}$. Assim, estima-se a resistência de cálculo da parede (f_d) por meio de relações apresentadas nas seguintes expressões:

$$f_k = \frac{f_{pk}}{0,7} \quad (44)$$

$$f_d = \frac{f_k}{1,4} \quad (45)$$

Assim:

$$f_k = \frac{f_{pk}}{0,7} = \frac{7}{0,7} = 10 \text{ MPa}$$

$$f_d = \frac{f_k}{1,4} = \frac{10}{1,4} = 7,1 \text{ MPa}$$

O que falta ser determinado é a tensão na armadura, que como mencionado anteriormente, deve ser limitada a: $f_s \leq f_{pk} \cdot \frac{E_s}{E_m}$. o valor de $E_s = 210 \text{ GPa}$, e E_m é determinado por:

$$E_m = 800 \cdot f_{pk} = 800 \cdot 7 \text{ MPa} = 5,6 \text{ GPa}$$

logo:

$$f_s \leq f_{pk} \cdot \frac{E_s}{E_m} = 7 \cdot \frac{210}{5,6} = 262,5 \text{ MPa}$$

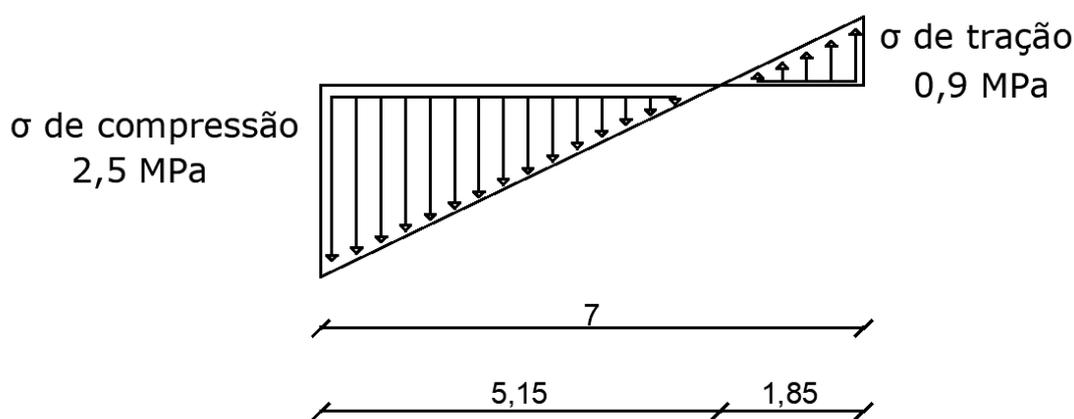
Portanto, conforme especifica o projeto de norma da NBR 16868:2020, usa-se um valor de f_s é igual a 250 MPa, para o espaçamento de estribos seja ≤ 24 vezes o diâmetro da barra longitudinal.

Assim, determina-se a área de aço necessária, conforme a Equação 46:

$$N_{rd} = \left(f_d \cdot A + f_s \cdot \frac{A_s}{\gamma_s} \right) \cdot R \quad (46)$$

A área A considerada para a equação 46 deve ser somente a que está sob esforços de compressão na parede, conforme o diagrama de tensões da “parede 01”, mostrado na Figura 3.12 do item 3.6.4 deste trabalho, reproduzida novamente na Figura 3.25.

Figura 3.25: Diagrama de tensões na “parede 01”.



Fonte: Autor (2020).

Assim:

$$\text{Área}_{\text{compressão}} = 515 \cdot 14 = 7210 \text{ cm}^2$$

Portanto, a área de aço necessária é definida por:

$$1165,5 \text{ kN} = \left(0,71 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 7210 \text{ cm}^2 + \frac{25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot A_s}{1,15} \right) \cdot 0,875$$

$$A_s = -174,4 \text{ cm}^2$$

Como a área de aço é um valor negativo neste caso, determina-se o uso da área de aço mínima:

$$A_{s\text{mín.}} = 0,10\% \cdot A = \frac{0,1}{100} \cdot 700 \cdot 14 = 9,8 \text{ cm}^2$$

Assim, seriam necessárias 13 Ø 10 mm ao longo da parte comprimida da “parede 01” (5,15 metros).

Este item é uma das novidades do projeto de norma da NBR 16868:2020 em relação as normas vigentes, e apresenta um promissor método de dimensionamento, o qual permite a consideração de armaduras para elementos sob compressão simples. Porém, o item é confuso na sua especificação da validade do método para elementos, é intitulado como “resistência de cálculo para parede e pilares armados...” mas em seu texto somente cita “pilares de alvenaria estrutural” antes de apresentar o método de cálculo, o que pode gerar dúvidas ao projetista.

3.9.1.3 Resistência de cálculo para paredes com índice de esbeltez maior que 30

Tal item refere-se ao anexo C do projeto de norma da NBR 16868:2020, que será discutido posteriormente neste trabalho.

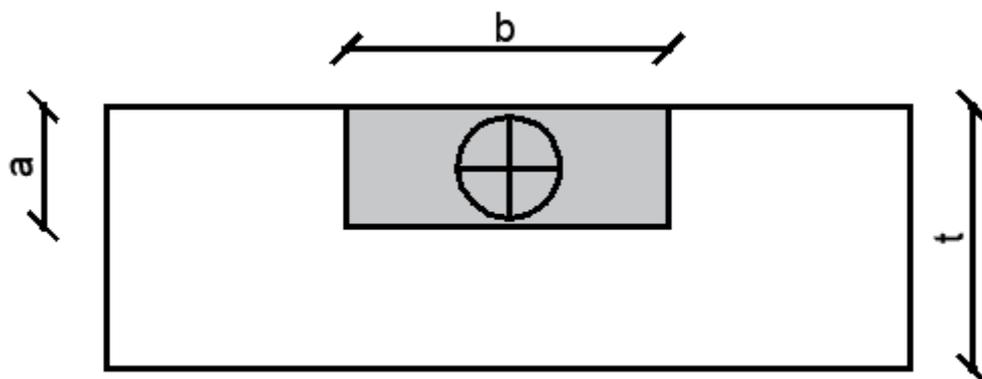
3.9.1.4 Forças concentradas

As NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 especificam que forças de compressão que se concentram em regiões de dimensões reduzidas devem atender a duas condições:

- tensão de contato deve ser menor ou igual a $1,5 f_d$;

– região de contato deve ser tal que a dimensão paralela a espessura t deve ser igual ou maior a 50 mm ou $t/3$.

Figura 3.26: Cargas concentradas.



Fonte: NBR 15961:2011.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 mantém as limitações das dimensões da região de contato das normas vigentes, porém altera a condição da tensão de contato para:

$$\sigma_d \leq 1,2 \cdot k \cdot f_{pk} / \gamma_m \quad (47)$$

onde:

σ_d = tensão de contato em valor de projeto, somada a tensão aplicada à paredes antes da inserção da carga concentrada;

k = fator para resistência de contato.

O fator “k” para a resistência de contato pode ter dois valores:

$k = \sqrt{A_1/A_2} \leq 2,0$; quando a alvenaria é maciça ou grauteada e a tensão de contato da carga concentrada é maior ou igual a 80% da tensão σ_d ;

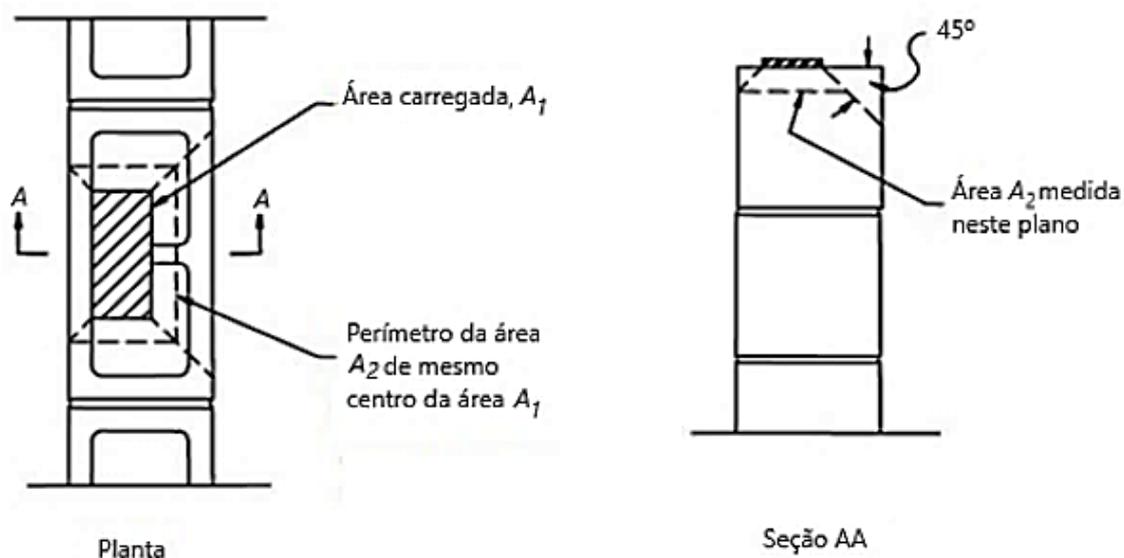
k = 1,0; todos os demais casos.

sendo

A_1 = área de contato carregada uniformemente;

A_2 = área máxima até a extremidade da seção, de mesma forma e centro de gravidade de A_1 .

Figura 3.27: Área de ação das cargas concentradas.



Fonte: NBR 16868:2020.

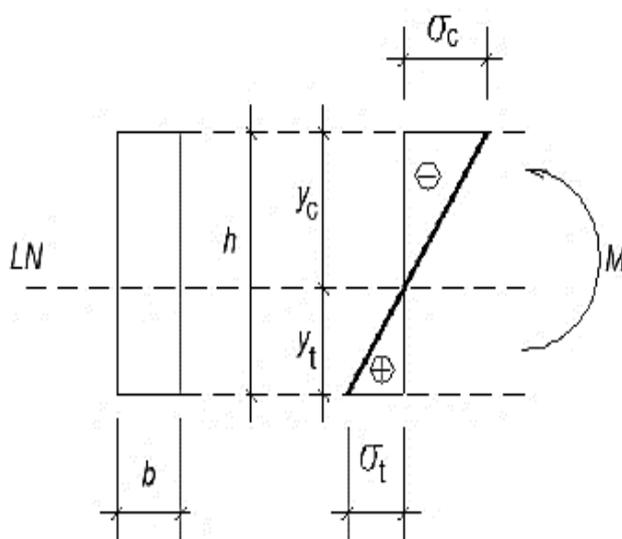
Segundo Medeiros e Parsekian (2019), projetistas tendem a esquecer de somar a cargas de alvenaria aplicadas à carga concentrada quando esta é aplicada em uma posição mais baixa na parede, e nesse caso, o comitê que desenvolveu o projeto de norma da NBR 16868:2020 decidiu que se a tensão proveniente da carga distribuída acima for maior que tensão da carga concentrada, não há aumento de resistência a ser considerado.

As especificações do fator “k” segundo o projeto da nova norma, listadas acima, significam que somente quando a tensão da carga concentrada for maior ou igual a 80% da tensão calculada como carga total, deve-se aumentar a resistência da alvenaria. No caso da carga concentrada ocorrer diretamente sobre blocos vazados, o aumento da resistência não deve ser considerado.

3.9.2 Dimensionamento da alvenaria à flexão simples

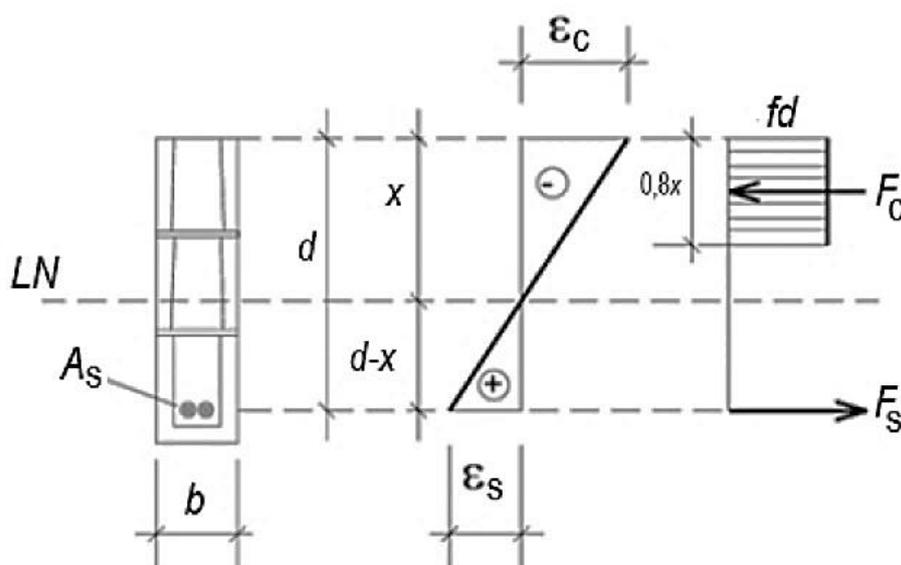
Quanto aos elementos submetidos à flexão simples, o projeto da nova norma segue o escopo das normas ainda vigentes, sem mudanças nos itens sobre alvenaria não armada e alvenaria armada. O projeto de norma da NBR 16868:2020 apresenta nestes itens os mesmos diagramas simplificados para o cálculo do momento fletor resistente da seção transversal que as NBR 15812:2010 e 15961:2011, além de estabelecer as mesmas tensões máximas de compressão e tração no cálculo da flexão que as normas ainda vigentes.

Figura 3.28: Diagrama de tensões para alvenaria não armada.



Fonte: NBR 16868:2020.

Figura 3.29: Diagrama de deformações e tensões para a alvenaria armada.



Fonte: NBR 16868:2020.

Diferentemente dos diagramas anteriores, o projeto da nova norma apresenta mudanças consideráveis no item sobre seções retangulares com armadura simples. As NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 limitam a tensão na armadura a 50% da tensão de escoamento quando se considera a resistência à flexão, onde o momento fletor resistente de cálculo é igual a:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_s \cdot z \quad (48)$$

onde

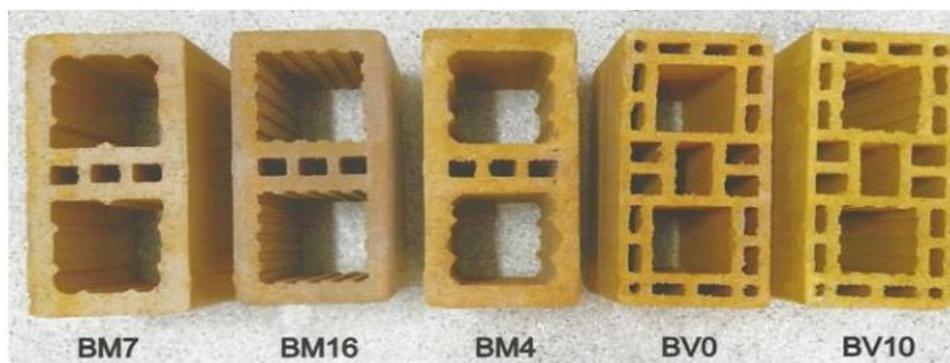
$$f_s = 0,5 \cdot f_{yd} = 0,5 \cdot f_{yk} / \gamma_m \quad (49)$$

Ou seja, metade da resistência ao escoamento de cálculo da armadura. Esta limitação é baseada na ideia de que eventualmente uma seção pode se deformar e o graute deslizaria dentro do vazado, interrompendo a transferência das tensões da armadura. Segundo Medeiros e Parsekian (2019), com essa especificação o projeto resultaria no dobro da área de aço necessária.

Estudos como o de Izquierdo e Corrêa (2016) mostram por meio de ensaios de “push out” que existe boa aderência entre paredes de blocos de concreto e os grautes usados na pesquisa. Izquierdo e Corrêa (2016) atribuem tal aderência a “similaridade entre ambos os materiais (graute e concreto dos blocos) e a natural rugosidade das faces internas dos furos dos blocos de concreto”. No mesmo estudo, os autores constaram que houve escorregamento do graute quando eram usados blocos cerâmicos, justamente pela superfície lisa característica dos blocos e pela diferença entre o concreto e argila.

Sipp e Parsekian (2018) realizaram ensaios de “pull out” em paredes de blocos cerâmicos preenchidos com graute. A tipologia dos blocos está na Figura 3.30:

Figura 3.30: Tipos de blocos usados por Sipp e Parsekian (2018).



Fonte: Sipp e Parsekian (2018).

Na Tabela 3.18 estão os resultados do ensaio de “pull out” realizado pelos autores:

Tabela 3.18: Resultados obtidos por Sipp e Parsekian (2018).

Bloco	Graute	Carga máxima média (kN)	Área de contato média (cm ²)	Tensão de aderência média (Mpa)	D. Pad. (Mpa)	C. V. (%)
BM7	15 MPa	95,5	701	1,37	0,26	19,3
	30 Mpa	16,7	698	0,24	0,07	27,5
BM16	15 MPa	161,0	899	1,80	0,17	9,5
	30 Mpa	128,8	899	1,43	0,19	13,3
BM4	15 MPa	72,9	725	1,01	0,27	26,5
	30 Mpa	26,6	724	0,37	0,23	61,4
BV0	15 MPa	85,0	546	1,56	0,19	12,1
	30 Mpa	48,3	548	0,88	0,19	21,5
BV10	15 MPa	96,6	637	1,52	0,04	2,5
	30 Mpa	96,5	638	1,51	0,18	11,7

Fonte: Sipp e Parsekian (2018).

Nota-se pelos resultados que entre os blocos de parede maciça (BM7, BM16 e BM4) os maiores valores de tensão de aderência, para ambos os grautes, foram obtidos com o bloco BM16, que tem maior quantidade de frisos nas suas faces internas. Para os blocos de parede vazadas (BV0 e BV10), a aderência com o graute de 15 MPa foi a mesma para ambos os blocos, porém, com o graute de 30 MPa, a aderência foi superior com o bloco BV10, que tem maior quantidade de frisos.

Além disso, os autores constataam que a redução na tensão de aderência apresentada por cada tipo de bloco com a utilização do graute de 30 MPa, em

relação ao graute de 15 MPa, foi inferior para os blocos BM16 e BV10, respectivamente, entre os blocos de paredes maciças e vazadas. Tanto os blocos BM16, comparado aos blocos de paredes maciças, quanto os BV10, comparado aos blocos de paredes vazadas, são os que apresentam mais frisos em seus vazados.

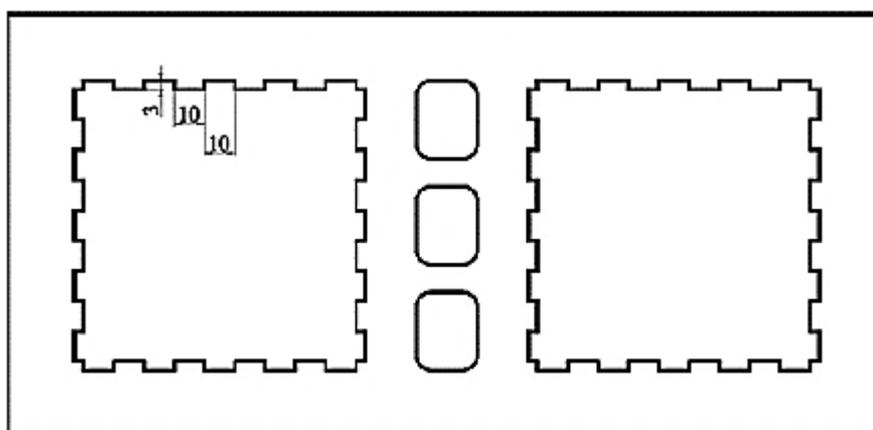
Portanto, Sipp e Parsekian (2018) concluíram que blocos com faces interiores com ranhura e maior área de contato com o graute podem aumentar significativamente a tensão de aderência entre o bloco e o graute.

Baseados nos estudos de Izquierdo e Corrêa (2016) e Sipp e Parsekian (2018) comentados neste trabalho, entre outros, o projeto da nova norma afirma que o vínculo entre o bloco e o graute pode ser considerado forte o suficiente para permitir a transferência de tensões.

Assim, segundo o projeto de norma da NBR 16868:2020, a tensão no aço f_s é limitada a:

- blocos de concreto: $f_s = f_{yk}$;
- blocos ou tijolos cerâmicos, com faces lisas em contato com o graute
 - para barras de 10 mm, $f_s = f_{yk}$ (sem redução);
 - para barras de 12,5 mm, $f_s = 0,75 \cdot f_{yk}$ (com redução de 25%);
 - para barras de 16 mm, $f_s = 0,50 \cdot f_{yk}$ (com redução de 50%);
- Blocos cerâmicos, com faces com ranhuras em contato com o graute: $f_s = f_{yk}$
(a Figura 3.31 representa blocos com vazado ranhurado de boa aderência):

Figura 3.31: Medidas internas das ranhuras ideais.



Fonte: NBR 16868:2020.

Sánchez (2013) afirma que a adoção de apenas 50% da tensão característica ao escoamento do aço da armadura longitudinal de flexão para o dimensionamento à flexão é muito conservadora. Assim, o projeto da nova norma acerta em alterar este valor, ainda mais quando baseada em estudos comprovados.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 determina que as ranhuras devem ter pelo menos 3 mm de profundidade e 10 mm de largura, e com espaçamento de até 10 mm, por todo o perímetro do vazado.

O valor de M_{rd} , segundo o projeto da nova norma, passa ser no mínimo:

$$M_{rd} = 0,3 \cdot f_d \cdot b \cdot d^2 \quad (50)$$

O fator multiplicador que na NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 é de 0,4 muda para 0,3, para limitar a posição da linha neutra em $0,45 \cdot d$.

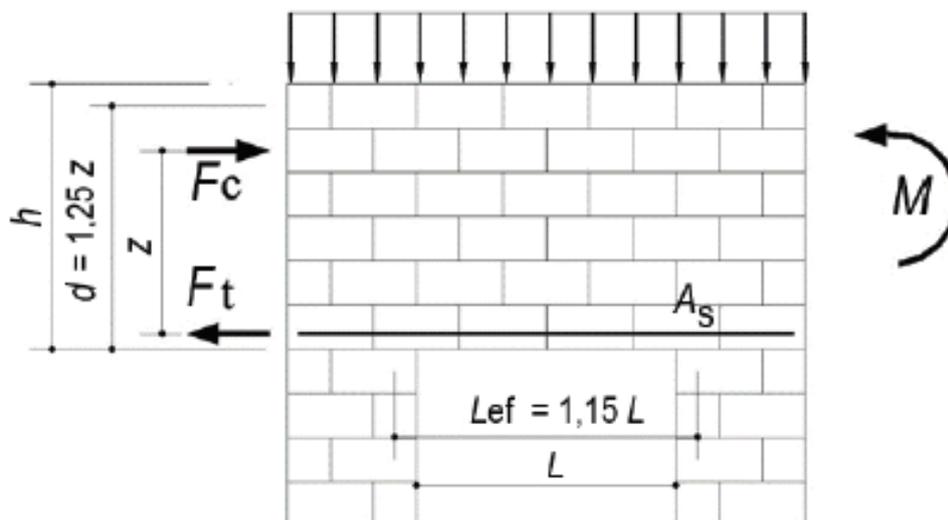
O dimensionamento de elementos que contenham flanges e estejam submetidos a flexão no plano do elemento não foi alterada em nada pelo projeto de norma da NBR 16868:2020 em comparação às normas ainda vigentes.

No caso de elementos submetidos à flexão em plano perpendicular ao do elemento, para as seções com armaduras isoladas, ou concentradas localmente, o projeto da nova norma especifica que a largura paralela ao eixo de flexão não pode ser superior a seis vezes a dimensão de sua espessura, considerando a área líquida do bloco. Nas NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 esse valor era de no máximo três vezes a dimensão da espessura, assim como no Eurocode 6 (1996).

Assim como na NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, o projeto de norma da NBR 16868:2020 caracteriza como viga-parede a viga que quando arazão vão/altura seja inferior a 3. Assim, a resultante de tração no elemento deve ser absorvida pela armadura longitudinal, calculada com o braço de alavanca igual a $2/3$ da altura, não podendo ser um valor maior que 70% do vão.

Essa recomendação já está especificada nas normas vigentes, mas o projeto da nova norma traz novidades ao determinar a verificação à compressão na região superior da parede, e ainda recomenda o posicionamento de uma armadura em cada junta horizontal da face inferior da viga, até a distância do menor valor entre $0,5 \cdot d$ e $0,5 \cdot L_{ef}$, com área mínima de 0,04% da área da seção, conforme a Figura 3.32:

Figura 3.32: Detalhes para vigas altas.



Fonte: NBR 16868:2020.

Como exemplo para o dimensionamento à flexão simples com as especificações do projeto de norma da NBR 16868:2020, analisa-se uma viga em alvenaria estrutural de blocos de concreto, com altura total de 40 cm e altura útil de 35,4 cm. A viga está sujeita a uma carga total de cálculo $q = 15 \text{ kN/m}$, e tem um vão de 2,80 m. O bloco de concreto considerado possui uma resistência à compressão de 5,5 MPa e resistência na área líquida de 10 MPa, com 14 cm de largura, 20 cm de altura e 30 de comprimento.

O vão efetivo da viga é o espaço livre entre as faces dos apoios, acrescido de metade da altura da viga de cada lado, ou seja:

$$l = 2,80 + 0,20 + 0,20 = 3,20 \text{ m}$$

O momento atuante de cálculo no meio do vão é determinado pela seguinte equação:

$$M_d = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{15 \cdot (3,20)^2}{8} = 19,2 \text{ kN.m}$$

A resistência de cálculo da alvenaria f_d é igual a:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} = \frac{10 \text{ MPa}}{2} = 5 \text{ MPa ou } 0,5 \text{ kN/cm}^2$$

Segundo o projeto da nova norma, a tensão de escoamento do aço f_s é, para alvenaria com blocos de concreto:

$$f_s = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_m} = \frac{50}{1,15} = 43,5 \text{ kN/cm}^2$$

A escolha de aço foi de duas barras de 10 mm, ou seja, 2 Ø 10mm. Assim, a área de aço é de 1,57 cm².

Calcula-se o braço da alavanca z na sequência:

$$z = d \left(1 - 0,5 \frac{f_s \cdot A_s}{f_d \cdot b \cdot d} \right) \leq 0,95 \cdot d$$

$$z = 35,4 \left(1 - 0,5 \frac{43,5 \cdot 1,57}{0,5 \cdot 14 \cdot 35,4} \right) \leq 0,95 \cdot 35,4$$

$$z = 30,52 \leq 33,63 \text{ ok!}$$

Assim, com o braço da alavanca z determinado, sendo igual a 30,43 cm, usa-se o equilíbrio de momentos onde:

$$M_d = 19,2 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_s \cdot z = 1,6 \cdot 43,5 \cdot 30,43 = 2215,3 \text{ kN.cm} = 22,15 \text{ kN.m}$$

Como M_{rd} é maior que M_d , ou seja, o momento resistente é maior que o momento atuante, a verificação é válida.

Outro requisito do projeto da nova norma é sobre a limitação da posição da linha neutra a 0,45.d, para garantir a ductilidade, para isso:

$$M_{Rd} \leq 0,3 \cdot f_d \cdot b \cdot d^2 = 0,3 \cdot 0,5 \cdot 14 \cdot 35,4^2 = 2631,6 \text{ kN.cm} = 26,3 \text{ kN.m}$$

Como M_{rd} é menor que 26,3 kN.m, a condição da norma está atendida e o elemento corretamente dimensionada.

Caso o dimensionamento seguisse as diretrizes das normas NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, onde considera-se somente 50% da tensão de escoamento do aço, ou seja, $f_s = 0,5 \cdot f_{yd}$, o dimensionamento da mesma viga seria mais conservador, começando pelo valor da tensão normal da armadura longitudinal:

$$f_s = 0,5 \cdot f_{yd} = 0,5 \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_m} = 0,5 \cdot \frac{50}{1,15} = 21,7 \text{ kN/cm}^2$$

O valor do braço da alavanca também mudaria de 30,43 cm para:

$$z = 35,4 \left(1 - 0,5 \frac{21,7 \cdot 1,6}{0,5 \cdot 14 \cdot 35,4} \right) \leq 0,95 \cdot 35,4$$

$$z = 32,92 \leq 33,63 \text{ ok!!}$$

E assim, o momento resistente M_{Rd} diminuiria para:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_s \cdot z = 1,6 \cdot 21,7 \cdot 32,92 = 1142,98 \text{ kN.cm} = 11,43 \text{ kN.m}$$

Assim, caso fosse utilizado as especificações das normas ainda vigentes, para uma mesma viga, o momento resistente M_{Rd} seria inferior ao momento atuante, necessitando o aumento da área de aço, comprovando maior conservadorismo das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 em relação ao projeto da nova norma.

3.9.3 Dimensionamento da alvenaria ao cisalhamento

As especificações para as tensões de cisalhamento de cálculo seguem iguais no projeto de norma da NBR 16868:2020 como estão na NBR 15812:2010 e na NBR 15961:2011, sendo elas $\tau_{vd} = \frac{V_d}{b \cdot h}$ para peças de alvenaria não armada e $\tau_{vd} = \frac{V_d}{b \cdot d}$ para peças de alvenaria armada.

Para casos com a existência de flanges no elemento, toma-se somente a área da alma da flange para o cálculo da tensão de cisalhamento.

Em casos de vigas com cargas uniformemente distribuídas, deve-se tomar o valor de V_d a uma distância de $d/2$ dos apoios, para considerar o efeito de arqueamento das tensões de cisalhamento.

A verificação da resistência do projeto de norma da NBR 16868:2020 segue as diretrizes das normas ainda vigentes, ou seja, respeitando a relação $\tau_{vd} \leq f_{vk}/\gamma_m$.

As NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 orientam o projetista a desconsiderar a parcela da força cortante resistida pela alvenaria V_a na determinação das armaduras de cisalhamento, dada por:

$$V_a = f_{vd} \cdot b \cdot d \quad (51)$$

O projeto de norma da NBR 16868:2020 também segue essa recomendação, embora não explicita em seu texto.

$$V_s = 0,75 \cdot f_{yd} \cdot b \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \leq 0,4 \cdot b \cdot d \cdot \frac{\sqrt{f_{pk}}}{\gamma_m} \quad (52)$$

Uma alteração do projeto da nova norma para as normas ainda vigentes é que a adoção de 75% da tensão de escoamento do aço da armadura transversal, como mostra a Equação 52. Ambas as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 adotam apenas 50% desta mesma tensão de escoamento. Sánchez (2013) comenta que não há justificativa consistente para a consideração de apenas 50%, e que isso acarreta valores conservadores. Com essa mudança, o projeto de norma da NBR 16868:2020 propõe uma mudança positiva em termos de dimensionamento e se afasta do conservadorismo.

O espaçamento “s” continua limitado a 50% da altura útil, para que no mínimo um estribo atravesse a fissura. Porém no caso de vigas de alvenaria esse limite, que nas normas vigentes é de 30 cm, o projeto da nova norma altera para 40 cm.

Para as paredes armadas ao cisalhamento, o espaçamento não pode superar 60 cm, conforme as normas ainda vigentes e o projeto da nova norma.

Seguindo um dos exemplos de Sánchez (2013), onde o autor dimensiona à força cortante a seção transversal de blocos cerâmicos de dimensões 190 x 400 mm, com altura útil $d = 360$ mm, adotando coeficientes de ponderação de 2,0 e 1,15 para graute e aço, respectivamente. O aço usado é o CA-50, a área de aço da armadura para flexão é de $A_s = 70$ cm² e a força cortante $V_k = 30$ kN. A força cortante de cálculo é determinada:

$$V_{sd} = 1,4 \cdot 30 = 42 \text{ kN}$$

Assim, verifica-se a tensão cisalhante de cálculo:

$$\tau_{vd} = \frac{42 \times 10^3}{190 \cdot 360} = 0,614 < 0,7 \text{ MPa}$$

E tensão cisalhante característica:

$$\rho_{vd} = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{7,0}{19 \cdot 36} = 1,02\%$$

$$f_{vk} = 0,35 + 17,5 \cdot \rho = 0,35 + 17,5 \cdot 1,02\% = 0,53 \text{ MPa}$$

Deve ser realizada a verificação de $\tau_{vd} \leq f_{vk}/\gamma_m$ para a necessidade da armadura transversal. Como $\tau_{vd} = 0,61 \text{ MPa}$:

$$f_{vk}/\gamma_m = \frac{0,53}{2} = 0,27 \text{ MPa}$$

Assim, como a verificação não foi atendida, pois $\tau_{vd} \geq f_{vk}/\gamma_m$, calcula-se a armadura transversal.

$$V_a = f_{vd} \cdot b \cdot d = 0,27 \cdot 190 \cdot 360 \times 10^{-3} = 18,47 \text{ kN}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 435 \text{ MPa}$$

Assim, segundo o exemplo de Sánchez (2013), o qual segue as diretrizes da NBR 15812:2010, a área de aço da armadura transversal é determinada por:

$$\frac{A_s}{s} = a_s = \frac{(V_d - V_a)}{0,5 \cdot f_{yd} \cdot d} = \frac{(42 - 18,47) \times 10^{-4}}{0,5 \cdot 435 \cdot 360} = 3,01 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Como dito anteriormente, autores como Sánchez já comentavam o quão conservador era considerar apenas 50% da tensão de escoamento do aço da armadura transversal. Assim, com a mudança proposta pelo projeto da nova norma, de considerar 75% desta tensão de escoamento, a área de aço da armadura transversal, segundo o projeto de norma da NBR 16868:2020 resultaria em:

$$\frac{A_{sw}}{s} = a_{sw} = \frac{(V_d - V_a)}{0,75 \cdot f_{yd} \cdot d} = \frac{(42 - 18,47) \times 10^{-4}}{0,75 \cdot 435 \cdot 360} = 2,00 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Com a proposta do projeto da nova norma, a área de aço da armadura transversal diminui, de 3 cm²/m para 2 cm²/m, comprovando que o projeto de norma da NBR 16868:2020 diminui o aspecto de conservadorismo.

3.9.4 Dimensionamento da alvenaria à flexo-compressão

Como dito anteriormente neste trabalho, todo elemento que está submetido a flexo-compressão precisa resistir à força de compressão de cálculo atuante, explicado no item 3.9.1 deste trabalho. O projeto de norma da NBR 16868:2020 mantém a estrutura das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 e após realizada a conferição para resistência a força de compressão de cálculo atuante, projeto da nova norma divide o dimensionamento à flexo-compressão em quatro itens.

3.9.4.1 Alvenaria não armada

Sem alterações com relação as normas ainda vigentes, o projeto de norma da NBR 16868:2020 especifica que as tensões normais na seção transversal devem ser obtidas por superposição das tensões normais lineares devido ao momento fletor

com as tensões normais uniformes devidas à força de compressão. As tensões normais de compressões devem atender a seguinte condição:

$$\frac{N_d}{A \cdot R} + \frac{M_d}{W \cdot K} \leq f_d \quad (53)$$

onde

N_d = força normal de cálculo;

M_d = momento fletor de cálculo;

f_d = resistência à compressão de cálculo da alvenaria;

A = área da seção resistente;

W = mínimo modulo de resistência de flexão da seção resistente;

R = coeficiente redutor devido à esbeltez do elemento;

K = fator ajustador da resistência à compressão na flexão, pode ser 1,5 ou 2.

O valor do fator que a ajusta a resistência à compressão na flexão depende se a região da alvenaria está preenchida com graute ou não. Para as regiões não preenchidas o valor é de 1,5, e para as regiões preenchidas, ele aumenta para 2. As NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 só apresentavam o valor das regiões não preenchidas. Outra alteração que o projeto de norma da NBR 16868:2020 apresenta em relação ao fator “K” é que ele deve ser multiplicado por “R” quando a extremidade não for travada por flange.

Caso exista tensão de tração, seu valor não pode ser maior que a resistência de tração da alvenaria f_{td} .

3.9.4.2 Alvenaria armada

A seção que discorre sobre elementos de alvenaria estrutural armada separa estes elementos dependendo de sua esbeltez. Para as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 são considerados elementos curtos aqueles que o índice de esbeltez não ultrapasse 12, porém, o projeto da nova norma altera este índice para 16. Tais parâmetros mostram uma falta de comunicação entre os capítulos das normativas, uma vez em que no item 3.8.1 deste trabalho, sobre a esbeltez, as normativas

apresentam valores em que elementos com um índice de esbeltez de até 24 podem ser considerados como não armados.

Para casos em que índice de esbeltez seja menor e igual a 16 e que a força normal N_{sd} não exceda a resistência de cálculo da Equação 54, deve-se usar a armadura mínima que esta detalhada no item 3.10.2 deste trabalho.

$$N_{Rd} = f_d \cdot b \cdot (h \cdot 2e_x) \quad (54)$$

onde

b = largura da seção;

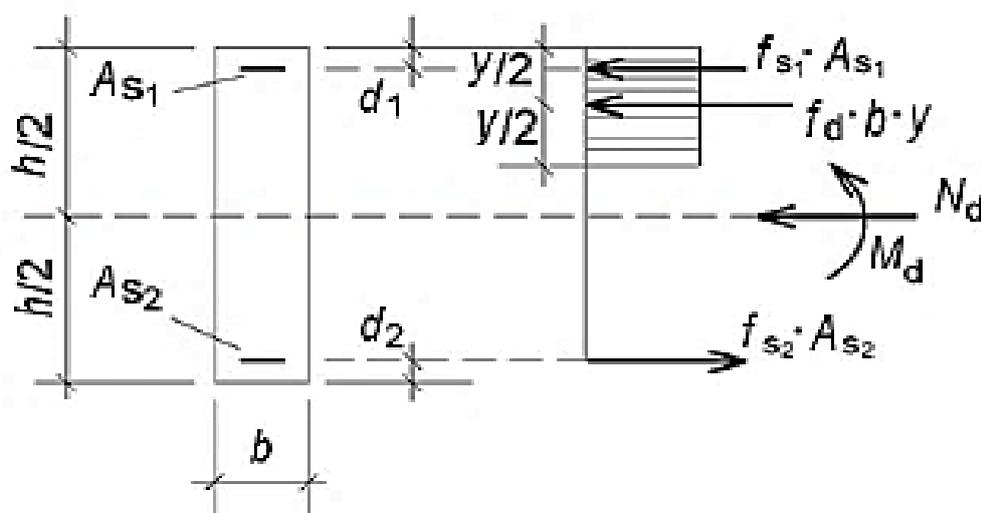
e_x = excentricidade resultante no plano de flexão (não podendo ser maior que $0,5 \cdot h$);

f_d = resistência de cálculo à compressão;

h = dimensão da seção na direção da flexão.

Se a força normal de cálculo excede o limite descrito anteriormente, a resistência da seção pode ser estimada conforme a Figura 3.33 e as seguintes expressões.

Figura 3.33: Flexo-compressão, seção retangular.



Fonte: NBR 16868:2020.

$$N_{Rd} = f_d \cdot b \cdot y + f_{s1} \cdot A_{s1} - f_{s2} \cdot A_{s2} \quad (55)$$

$$M_{Rd} = 0,5 \cdot f_d \cdot b \cdot y(h - y) + f_{s1} \cdot A_{s1}(0,5h - d_1) + f_{s2} \cdot A_{s2}(0,5h - d_2) \quad (56)$$

onde

A_{s1} = área de armadura comprimida na face de maior dimensão;

A_{s2} = área de armadura na outra face;

b = largura da seção;

d_1 = distância do centroide da armadura A_{s1} à borda mais comprimida;

d_2 = distância do centroide da armadura A_{s2} à outra borda;

y = profundidade da região de compressão uniforme ($y = 0,8x$);

f_d = resistência à compressão de cálculo da alvenaria;

h = dimensão da seção na direção da flexão;

f_s = tensão na armadura.

Assim como no item 3.9.1.2 deste trabalho, que aborda o dimensionamento de paredes e pilares armados com índice de esbeltez menor ou igual a 30, submetidos à compressão simples, o projeto de norma da NBR 16868:2020 limita o espaçamento máximo do estribo a 24 vezes o diâmetro da barra longitudinal para tensões na armadura menores que 250 MPa. Para casos em que as tensões na armadura sejam de 250 MPa até 500 MPa, o espaçamento máximo dos estribos fica limitado à 12 vezes o diâmetro da barra longitudinal.

Outra alteração do projeto de norma da NBR 16868:2020 com relação às normas vigentes é exemplificar elementos submetidos a uma flexão composta oblíqua como elementos com índice de esbeltez maior que 16. Neste caso, pode-se dimensionar uma seção com armaduras simétricas, transformando em uma flexão reta composta, aumentando-se um dos momentos fletores, como mostram as seguintes expressões.

$$M'_x = M_x + j \cdot \frac{p}{q} M_y \quad \text{para} \quad \frac{M_x}{p} \geq \frac{M_y}{q} \quad (57)$$

ou

$$M'_y = M_y + j \cdot \frac{p}{q} M_x \quad \text{para} \quad \frac{M_x}{p} \leq \frac{M_y}{q} \quad (58)$$

onde

M_x = momento fletor em torno do eixo x;

M_y = momento fletor em torno do eixo y;

M'_x = momento fletor efetivo em torno do eixo x;

M'_y = momento fletor efetivo em torno do eixo y;

p = dimensão da seção transversal na direção perpendicular ao eixo x;

q = dimensão da seção transversal na direção perpendicular ao eixo y;

j = coeficiente determinado pela Tabela 3.19.

Tabela 3.19: Valores do coeficiente j .

Valor de $N_d/(A \cdot f_k)$	j
0	1,00
0.1	0,88
0.2	0,77
0.3	0,65
0.4	0,53
0.5	0,42
≥ 0.6	0,30

Fonte: NBR 16868:2020.

3.9.4.3 Elementos esbeltos

De acordo com o projeto de norma da NBR 16868:2020, elementos comprimidos com índice de esbeltez maior que 16 o dimensionamento é feito conforme o item anterior 3.9.4.2, e se faz necessário adicionar efeitos de segunda ordem. As NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, igualmente ao Eurocode (1996), também consideram necessária a consideração dos efeitos de segunda ordem, porém, as normas ainda vigentes estabeleciam que o índice de esbeltez do elemento deveria ser maior que 12.

Outra mudança proposta pelo projeto da nova norma, em relação às normas vigentes, no modo de determinação do momento de segunda ordem, que segundo o projeto de norma NBR 16868:2020 é determinado por uma expressão, que utiliza em seu denominador o valor constante de 3600, enquanto as normas ainda vigentes e também a norma europeia, usam o valor constante de 2000, assim:

$$M_{2d} = \frac{N_d(h_e)^2}{3600 \cdot t} \quad (59)$$

onde

N_d = força normal de cálculo;

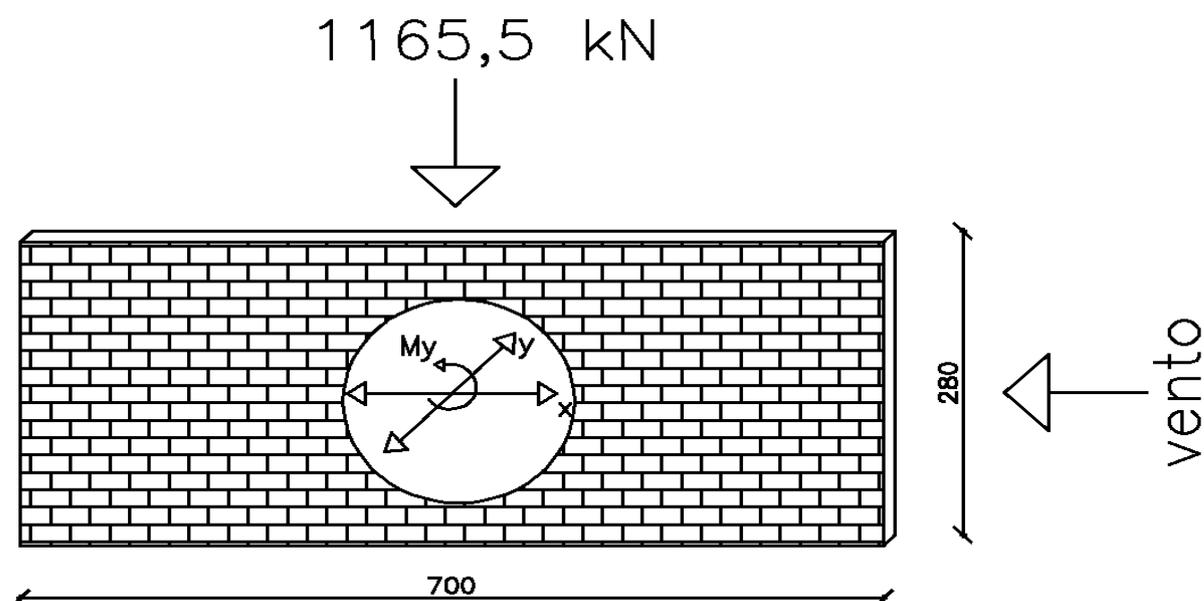
h_e = altura efetiva do elemento comprimido;

t = dimensão da seção transversal da peça no plano de flexão.

Como exemplo de um elemento de alvenaria estrutural submetido à flexo-compressão, será realizado o prosseguimento do dimensionamento da “parede 01”, elemento que está submetido a forças de compressão e tração, conforme foi verificado neste trabalho no item 3.6.4 com as combinações de ações.

De acordo com as normas brasileiras, primeiramente verifica-se a resistência à compressão do elemento submetido a flexo-compressão, e a “parede 01” já foi dimensionada para essa solicitação, no item 3.9.1.2 deste trabalho, restando enfim a verificação do elemento quanto à tração. Para tal dimensionamento é necessário lembrar que o elemento está submetido a uma carga de compressão $N_d = 1165,5$ kN e um momento de cálculo na direção y causado pela ação do vento de $M_y = 8299,48$ kN.m ou 829948 kN.cm, conforme a Figura 3.34:

Figura 3.34: Solicitações atuantes na “parede 01”



Fonte: Autor (2020).

Assim, calcula-se a excentricidade e_x por:

$$e_x = \frac{M_y}{N_d} = \frac{8299,48}{1165,5} = 7,1m \quad (60)$$

Verifica-se então:

$$e_x \leq 0,5h$$

$$7,1 \leq 0,5 \cdot 1,85 \text{ ou seja } 7,1 \geq 0,925 \quad \text{Não atende!}$$

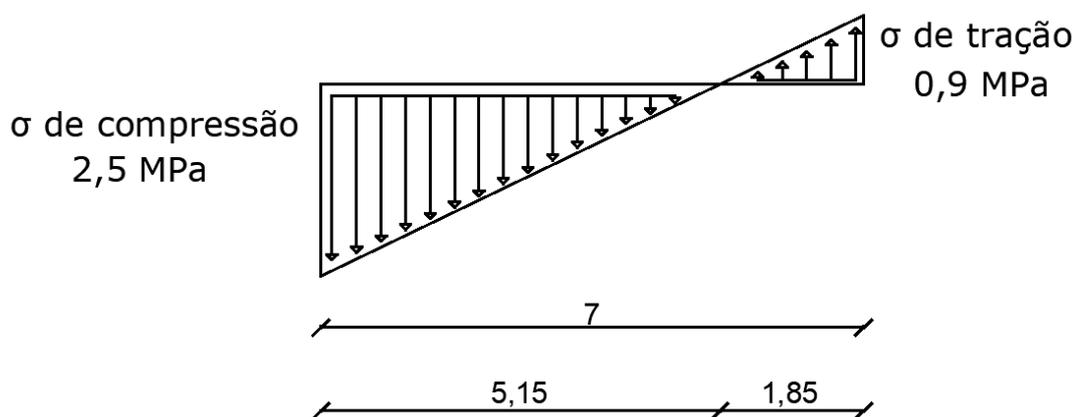
Como a excentricidade e_x ultrapassa a condição de $e_x \leq 0,5h$, o dimensionamento deve ocorrer conforme as seguintes expressões:

$$N_{Rd} = f_d \cdot b \cdot y + f_{s1} \cdot A_{s1} - f_{s2} \cdot A_{s2} \quad (61)$$

$$M_{Rd} = 0,5 \cdot f_d \cdot b \cdot y(h - y) + f_{s1} \cdot A_{s1}(0,5h - d_1) + f_{s2} \cdot A_{s2}(0,5h - d_2) \quad (62)$$

A Figura 3.35 mostra o diagrama de tensões na “parede 1”.

Figura 3.35: Diagrama de tensões da parede “01”.



Fonte: Autor (2020).

O comprimento em que se tem tensões de tração é de somente 1,85 m.

Além disso, o valor da resistência à compressão de cálculo da alvenaria (f_d) é igual a 7,1 MPa ou 0,71 kN/cm² para ser igual ao valor encontrado na verificação da

resistência de cálculo à compressão da “parede 01” realizada no item 3.9.1.2. Assim, com a largura da seção b igual a 14 cm, resta determinar o valor de y :

$$y = 0,8 \cdot x$$

Como x é a dimensão do elemento sob a tração, ou seja, 1,85 m:

$$y = 0,8 \cdot 185 = 148 \text{ cm.}$$

Considera-se $f_s = 250$ MPa, para que o espaçamento de estribos seja menor que 24 vezes o diâmetro da barra, e assim, a Equação 61 resulta em:

$$1165,5 = 0,71 \cdot 14 \cdot 148 + \frac{25}{1,15} \cdot A_{s1} - \frac{25}{1,15} \cdot A_{s2}$$

$$-305,6 = 21,74 \cdot A_{s1} - 21,74 \cdot A_{s2}$$

Para a determinação da Equação 62, é necessário especificar os valores da dimensão da seção na direção da flexão h , da distância do centroide da armadura A_{s1} até a borda mais comprimida d_1 e a distância do centroide da armadura A_{s2} até a outra borda.

Como a esbeltez λ da “parede 01” é igual a 20, ou seja, $\lambda > 16$, o elemento é considerado esbelto e é necessário a adição de efeitos de segunda ordem, conforme a Equação 59:

$$M_{2d} = \frac{N_d(h_e)^2}{3600 \cdot t} = \frac{1165,5 \cdot (280)^2}{3600 \cdot 14} = 1813 \text{ kN.cm}$$

Assim, soma-se M_{2d} ao momento provocado pela ação do vento M_y :

$$M_{Rd} = M_y + M_{2d} = 829948 + 1813 = 831761 \text{ kN.cm}$$

Com todos os parâmetros e variáveis determinados, monta-se a equação 62:

$$831761 = 0,5 \cdot 0,71 \cdot 14 \cdot 148(700 - 148) + \frac{25}{1,15} A_{s1}(350 - 61,67) + \frac{25}{1,15} A_{s2}(350 - 171,67)$$

$$425731,88 = 6268,04 A_{s1} + 3876,73 A_{s2}$$

Desse modo, tem-se um sistema de duas equações com duas variáveis:

$$\begin{aligned} -305,6 &= 21,74 \cdot A_{s1} - 21,74 \cdot A_{s2} \\ 425731,88 &= 6268,04 \cdot A_{s1} + 3876,73 \cdot A_{s2} \end{aligned}$$

Multiplicando a primeira equação pelo valor de 178,322:

$$\begin{aligned} -305,6 &= 21,74 \cdot A_{s1} - 21,74 \cdot A_{s2} \times (178,322) \\ 425731,88 &= 6268,04 \cdot A_{s1} + 3876,73 \cdot A_{s2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -54495,2 &= 3876,73 \cdot A_{s1} - 3876,73 \cdot A_{s2} \\ 425731,88 &= 6268,04 \cdot A_{s1} + 3876,73 \cdot A_{s2} \end{aligned}$$

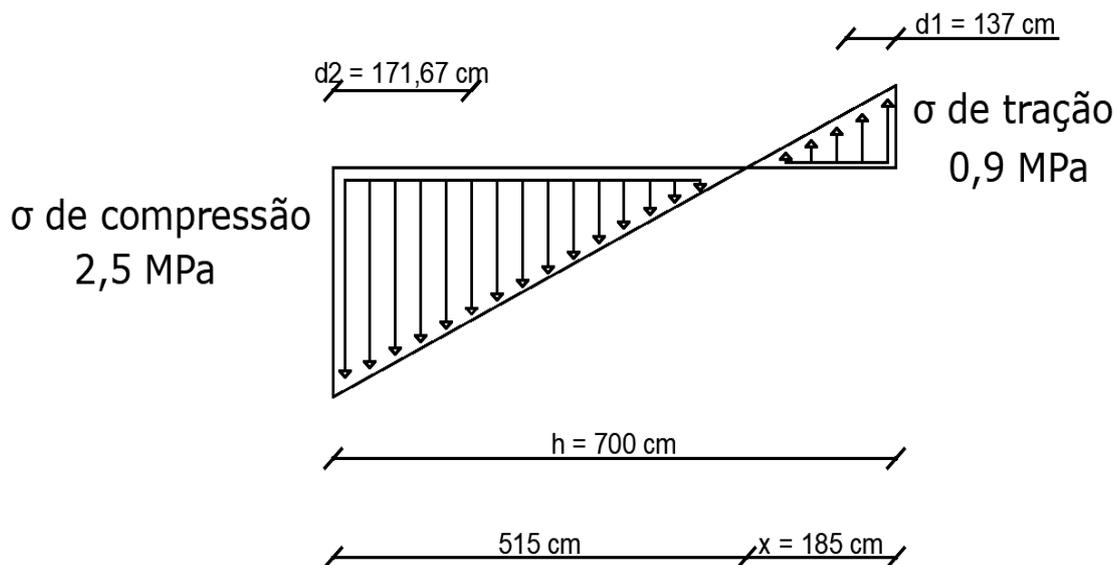
Os termos de A_{s2} se anulam e os termos de A_{s1} se somam, resultando em uma equação para a determinação da área de aço necessária:

$$\begin{aligned} 371236,68 &= 10144,77 \cdot A_{s1} \\ A_{s1} &= 36,6 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Portanto, a armadura necessária pelo dimensionamento é de 30 Ø 12,5 mm.

A Figura 3.36 ilustra as distâncias relacionadas com o diagrama de tensão da “parede 01”, que foram utilizadas nas equações anteriores.

Figura 3.36: Dimensões para o dimensionamento da “parede 01.



Fonte: Autor (2020).

Caso fossem seguidas as diretrizes da NBR 15812:2010 ou da NBR 15961:2011, há dois pontos de divergência em relação ao projeto da nova norma, sendo o primeiro no valor da tensão na armadura. As normas ainda vigentes estabelecem que este valor somente pode ser considerado como $0,5 f_{yd}$, enquanto o projeto da nova norma permite o uso de 250 MPa (o que equivale a $0,5 f_{yd}$ neste exemplo) ou de 500 MPa (o que equivale a f_{yd}). No exemplo anterior, não há alterações entre os valores utilizados pelo projeto da nova norma e pelos valores que seriam utilizados pelas normas ainda vigentes.

A segunda divergência seria quanto ao valor do momento de segunda ordem (M_{2d}). Como explicado no texto deste trabalho antes do desenvolvimento do exemplo, as NBR 15812:2012 e NBR 15961:2011 especificam outra equação para a adição dos efeitos de segunda ordem, o que resultaria em um valor distinto do exemplo:

$$M_{2d} = \frac{N_d(h_e)^2}{2000 \cdot t} = \frac{1165,5 \cdot (280)^2}{2000 \cdot 14} = 32634 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Como já comentado anteriormente a diferença entre as normas está no valor constante do denominador da equação. Enquanto o projeto da nova norma especifica “3600”, as normas ainda vigentes usam “2000”. Essa diferença tem consequências diretas no valor do momento de segunda ordem, e nota-se que o

valor encontrado pelas diretrizes do projeto de norma da NBR 16868:2020 é bem inferior ao valor das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, comprovando que o projeto da nova norma está menos conservador.

Esse valor alteraria e Equação 62:

$$425731,88 = 6268,04A_{s1} + 3876,73A_{s2} \quad \text{para} \quad 456552,12 = 6268,04A_{s1} + 3876,73A_{s2}$$

Assim o sistema de equações seria:

$$\begin{aligned} -54495,2 &= 3876,73.A_{s1} - 3876,73.A_{s2} \quad x(178,322) \\ 456552,12 &= 6268,04.A_{s1} + 3876,73.A_{s2} \end{aligned}$$

Efetuada a somatória dos termos de mesmas variáveis, a área de aço (A_{s1}) necessária, segundo as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 seria:

$$A_{s1} = 39,6 \text{ cm}^2$$

Neste caso seriam necessários de 33 Ø 12,5 mm, mais armadura do que o dimensionamento do projeto da nova norma, mostrando que neste exemplo o projeto de norma da NBR 16868:2020 é menos conservadora e mais econômica.

3.9.4.4 Parede com flexão oblíqua considerando a verificação por faixas

Normalmente as tensões normais são mais elevadas nas extremidades das paredes, onde por sua vez, geralmente encontra-se restrições dos movimentos laterais devido a outra parede intertravada. Caso a região onde apresentem-se as maiores tensões for restrita lateralmente, não há necessidade da verificação de efeitos de segunda ordem. Assim baseando-se na análise de pilares-parede da NBR 61189:2014 e em estudos e simulações de Araújo *et al.* (2017) o comitê organizador apresenta no projeto da nova norma um método de faixas que, segundo Medeiros e Parsekian (2019), permite projetar a parede considerando cargas, limitações e esbeltez por faixas. Assim, no caso específico de paredes, o projeto de norma da NBR 16868:2020 permite substituir a verificação da seção em flexão oblíqua pela verificação de faixas submetidas à flexo-compressão fora do plano da parede.

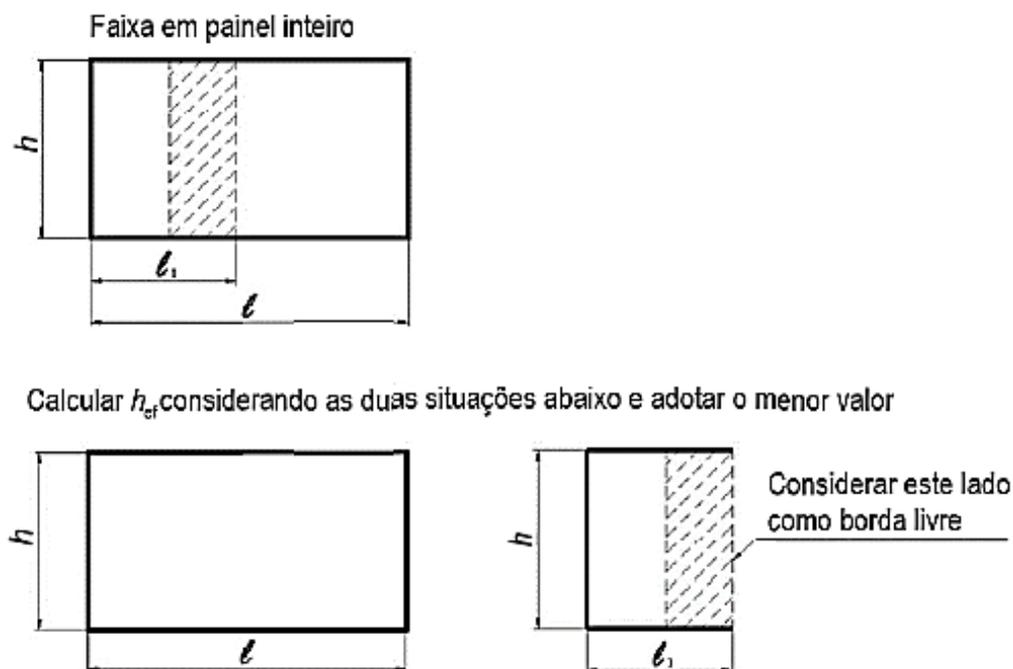
O comprimento de cada faixa deve ser igual a cinco vezes a espessura da parede e no máximo de 100 cm, mesmo limitante máximo para as faixas de pilares-paredes da NBR 6118:2014.

O índice de esbeltez e eventual momento de 2ª ordem deve ser calculado para cada faixa, atentando para a altura efetiva h_e , que deve ser considerada conforme cada caso a seguir:

- quando não houver travamento lateral do trecho inteiro, conforme o item 9.4.1 do projeto da nova norma, abordado no item 3.7.5.1 deste trabalho;
- quando houver travamento lateral do trecho inteiro, conforme item 9.4.1 do projeto da nova norma, abordado no item 3.7.5.1 deste trabalho, porém, deve-se considerar o menor valor de h_{ef} das seguintes opções, explicadas na Figura 3.37:

- a) h_{ef} calculado com as características do trecho inteiro;
- b) h_{ef} calculado considerando o lado interno livre e o outro lado conforme a real condição do painel inteiro, sendo que a largura do painel l deverá ser considerada como a distância entre o apoio e face mais interna da faixa.

Figura 3.37: Características do painel para cálculo de h_{ef} de faixas intermediárias.



Fonte: NBR 16868:2020.

O projeto da nova norma propõe que o cálculo da faixa deva considerar, além da força normal, eventual momento fora do plano. Geralmente este momento fora do plano é devido a forças laterais de vento, empuxo de terra ou líquido ou a efeitos de 2ª ordem.

3.10 DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS E DETALHAMENTO

O último capítulo das normativas vigentes e do projeto da nova norma aborda os detalhamentos construtivos, como cobrimento, espaçamento de barras, estribos e outros.

3.10.1 Cobrimentos

Tanto para a NBR 15812:2010 quanto para a NBR 15961:2011 especificam o mesmo valor para o cobrimento, de 15 mm, seguindo a NBR 6118:2014, podendo a armadura estar envolta por argamassa ou graute. O projeto de norma da NBR 16868:2020 também indica 15 mm para o valor de cobrimento, seguindo as normativas vigentes.

3.10.2 Armadura mínima

As NBR 15812:2010 e 15961:2011 estabeleciam que para vigas e paredes de alvenaria armada, a área mínima de armadura deveria ser de 0,10% da área da seção transversal, porém, a NBR 15686:2020 altera este valor e especifica que para os elementos predominantemente fletidos, caso das vigas de alvenaria armada, a área da armadura não pode ser menor a 0,15% da área da seção transversal, mesmo valor da taxa mínima absoluta para armadura segundo a NBR 6118:2014. Para as vigas altas, a armadura mínima ainda deve ser igual a 0,10% da área da seção transversal, como está especificado nas normativas ainda vigentes.

Tanto a NBR 15812:2010 quanto a NBR 15961:2011 determinam que para as vigas que tenham necessidade de armadura transversal, esta deve ter uma área mínima de 0,05% da área da seção, sendo essa seção a multiplicação da largura da viga (b) pelo espaçamento da armadura de cisalhamento s . A NBR 15686:2020 altera estas especificações, deixando a taxa mínima dependente da resistência

característica do graute à compressão, ou seja, para grautes de 15 MPa, a taxa mínima é de 0,07% de “b x s” e para grautes de 40 MPa, essa taxa mínima deve ser de 0,14% da área da seção, sendo o produto da largura da viga pelo espaçamento dos estribos. Para grautes com valores entre 15 MPa e 40 MPa, o valor da taxa pode ser interpolado.

Quanto aos pilares de alvenaria armada, a NBR 15686:2020 segue as diretrizes das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 especificando uma área mínima de armadura longitudinal de 0,30% da área transversal.

Já para as paredes de alvenaria armada, as normas ainda vigentes definem uma taxa mínima de 0,10% da área da seção transversal, e a NBR 15686:2020 mantém esta especificação, e detalha que deve ser tomada como a área da alma. Ainda, o projeto da nova norma permite prescindir esta prescrição de armadura mínima quando a armadura efetivamente disposta resulta um momento resistente de cálculo maior ou igual a 1,4 vezes o momento solicitante de cálculo, ou seja, $M_{Rd} \geq 1,4 \times M_{Sd}$.

Ainda sobre paredes de alvenaria armada, as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 especificam que essas paredes devem dispor de uma armadura secundária, perpendicular à principal, e com uma taxa mínima de 0,05% da área transversal. A NBR 15686:2020 é mais específica sobre o tema, e determina que parede de alvenaria armada dimensionadas no Estádio III devem dispor da armadura secundária, com a mesma taxa mínima das normas ainda vigentes, porém, as paredes dimensionadas no Estádio II não necessitam dessa armadura perpendicular à armadura principal.

3.10.3 Armadura máxima, diâmetro das armaduras, espaços entre barras e ancoragem

Diferentemente da armadura mínima para a alvenaria, as especificações para armadura máxima, diâmetro das armaduras, espaçamento entre as barras e a ancoragem mantiveram-se inalteradas no projeto da nova norma, ou seja, com os mesmos valores das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011. O limite máximo para armadura na alvenaria estrutural continua sendo a área de seção do aço não superior a 8% da área de seção do graute envolvente.

O diâmetro máximo de uma armadura, quando disposta ao longo de cordões de argamassa em juntas de assentamento, não pode ultrapassar 6,3 mm. Em todos os outros casos, o limite é de 25 mm.

O espaçamento entre as barras da armadura serve para garantir a disposição correta do graute que as envolve. A distância mínima livre entre as barras não pode ser menor que:

- diâmetro máximo do agregado mais 5 mm;
- 1,5 vez o diâmetro da armadura;
- 20 mm.

Por último, o texto que discorre sobre a ancoragem no projeto de norma da NBR 16868:2020 é idêntico aos textos das NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011.

3.10.4 Estribos de pilares e paredes

Nas normas ainda vigentes, era abordado somente os estribos de pilares, que deveriam ter diâmetro mínimo de 5 mm e com espaçamento não maior que 50 vezes o diâmetro do estribo, ou a menor dimensão do pilar, ou 20 vezes o diâmetro das barras longitudinais.

O projeto da nova norma ainda mante o diâmetro mínimo de 5 mm e especifica que o espaço entre as barras não pode exceder 50 vezes o diâmetro do estribo, excluindo as demais possibilidades para o espaçamento.

Outra novidade do projeto de norma da NBR 16868:2020 em relação às NBR 15812:2010 e 15961:2011 é a adição do estribo de parede em seu texto, e ainda atenta para a verificação do espaçamento dos estribos quando for considerada a armadura comprimida, conforme os capítulos de alvenaria armada e de resistência de cálculo de paredes e pilares armados com índice de esbeltez menor ou igual a 30, discutidos anteriormente neste trabalho no item 3.9.1.2.

3.10.5 Emendas

As NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 especificam parâmetros iguais para as emendas de barras na alvenaria estrutural, como por exemplo a distância entre a

primeira e segunda emenda ser no mínimo de 40Φ , e que a emenda nunca pode ser inferior a ancoragem.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 por outro lado, não aponta parâmetros diretos em seu texto, mas especifica a NBR 6118:2014 como diretriz para o projeto do comprimento da emenda. A NBR 6118:2014 é mais completa que as NBR 15812:2010 e 15961:2011 quanto aos tipos e comprimento das emendas, variando entre emendas por traspasse, por solda, por luvas com preenchimento metálico, rosqueadas ou pensadas e outro método que seja devidamente justificado.

3.10.6 Ganchos e dobras

Outro item que não houve alteração das normas vigentes para o projeto da nova norma. As especificações atentam para o formato dos ganchos e dobras, para que não causem concentração de tensões no graute ou argamassa que os envolve.

A NBR 15812:2010, a NBR 15961:2011 e o projeto de norma da NBR 16868:2020 determinam que o comprimento efetivo deve ser o maior valor entre:

- comprimento real;
- para um gancho, oito vezes o raio interno, até no máximo 24Φ ;
- para uma dobra de 90° , quatro vezes o raio interno da dobra, até no máximo 12Φ .

3.10.7 Limite de fissuração em vigas e armadura intermediária em vigas

O projeto de norma da NBR 16868:2020 inova em relação as NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011 e apresenta a Tabela 3.20 com limites para a tensão e espaçamento máximo da armadura e assim, limita a abertura de fissuras em vigas. Porém, as vigas devem ser projetadas no Estádio II na combinação frequente do ELS, para elementos em classe II de agressividade ambiental. Segundo Medeiros e Parsekian (2019), a posição da linha neutra deve ser limitada a $0,45d$, para garantir a ductilidade.

Tabela 3.20: Valores máximos de diâmetro e espaçamento de armadura passiva de alta aderência.

Tensão na barra (MPa)	Diâmetro máximo da armadura (mm)	Espaçamento máximo da armadura (cm) (desconsiderar esta coluna no caso de barra única na seção)
200	25	25
240	20	20
280	16	15
320	12,5	10
360	10	5
400	8	-

Fonte: NBR 16868:2020.

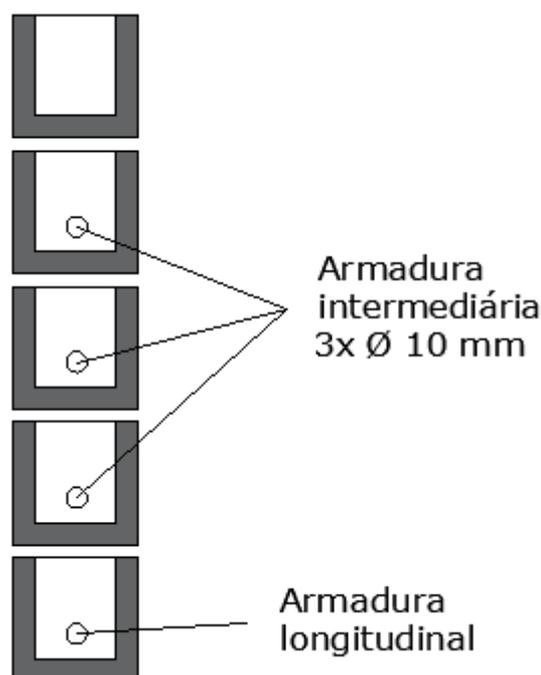
Ressalta-se que a Tabela 3.20 contém os mesmos valores apresentados pela NBR 6118:2014 na seção de “Controle da fissuração sem a verificação da abertura de fissuras”, válidos para concreto sem armaduras ativas, ou seja, passiva, conforme está explicitado no projeto de norma da NBR 16868:2020.

3.10.8 Armadura intermediária em vigas

Outra inclusão da NBR 15686:2020 é o uso da armadura intermediária em vigas com altura superior a 60 cm. Essa especificação tem como base o estudo de Das *et al.* (2014), que pesquisou as diferenças nos padrões de fissuras de vigas grandes de concreto armado para as vigas grandes de alvenaria armada, além de identificar que as recomendações da CSA S304.1:2014, de reforço intermediário nas vigas de alvenaria armada, não produziam os melhores resultados.

A norma brasileira estabelece que para vigas com quatro ou mais fiadas, com blocos de 14 cm e 19 cm, deve-se detalhar uma barra longitudinal de 10 mm em cada 20 cm, até alcançar 2/3 da altura a partir da face tracionada, conforme a Figura 3.38.

Figura 3.38: Armadura intermediária para vigas com quatro ou mais fiadas.



Fonte: NBR 16868:2020.

3.11 ANEXOS DO PROJETO DE NORMA DA NBR 16868:2020

Há seis anexos propostos pelo projeto de norma da NBR 16868:2020, sendo os anexos C, D, E e F novidades do projeto da nova norma, e os dois primeiros (anexos A e B) já estão presentes nas normais ainda vigentes

- Anexo A: Dano acidental e colapso progressivo (caráter informativo);
- Anexo B: Alvenaria protendida (caráter normativo);
- Anexo C: Parede com índice de esbeltez superior a 30 (caráter normativo);
- Anexo D: Alvenaria participante (caráter informativo);
- Anexo E: Painel sob ação lateral fora do plano (caráter informativo);
- Anexo F: Especificação dos materiais da alvenaria (caráter informativo).

3.11.1 Anexo A: Dano acidental e colapso progressivo

O anexo A já foi abordado neste trabalho no item 3.6.2.3 que tratava sobre ações excepcionais. No item do projeto da nova norma sobre ações excepcionais, é especificada a utilização do anexo A, assim como nas normas ainda vigentes. Como já foi explicado no item 3.6.2.3, a taxa mínima da armadura dos reforços dos

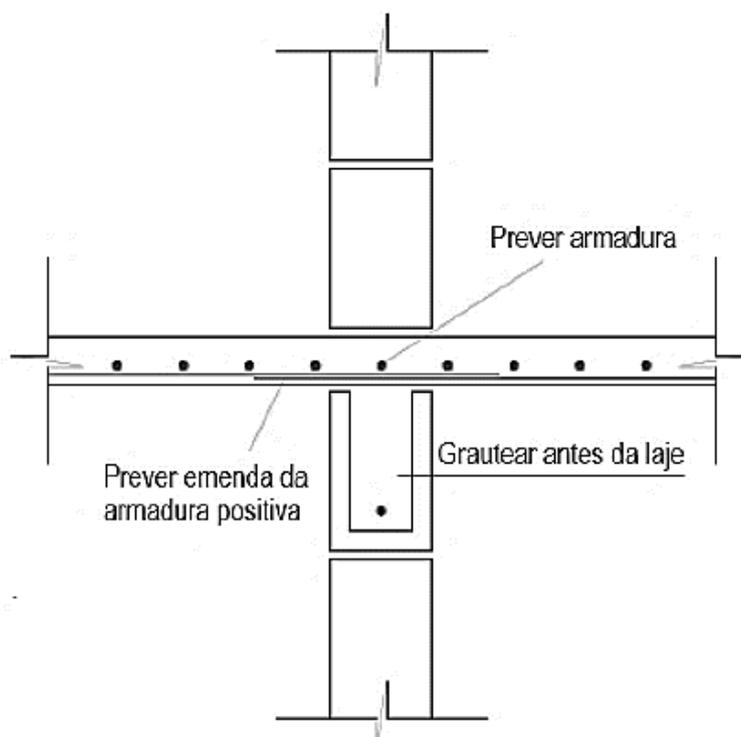
elementos deve ser de 0,15% e não mais 0,2% como especificam a NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011, seguindo a taxa mínima absoluta para armadura da NBR 6118:2014.

Outra novidade que o projeto de norma da NBR 16868:2020 apresenta são os detalhes construtivos para a interação dos elementos da alvenaria e as lajes de concreto, alguns baseados nos exemplos de Parsekian (2014). Para edifícios com lajes de concreto moldadas no local, o projeto de norma da NBR 16868:2020 propõe que, sobre apoios intermediários deve-se detalhar as emendas das armaduras positivas e dimensionar o painel considerando a não existência do apoio, simulando o colapso da parede. Deve-se também prever uma armadura concentrada sob cada parede, conforme Figura 3.39.

A armadura positiva deve ser verificada para caso um dos apoios seja removido e a distribuição das cargas sobre a laje pode levar em conta o efeito arco, conforme a real situação do projeto.

Os coeficientes ponderadores dos materiais para as devidas verificações são: 1,0 para o aço e ações acidentais; 1,2 para ações permanentes; 1,5 para alvenaria.

Figura 3.39: Detalhe da armadura de laje maciça sobre apoios.



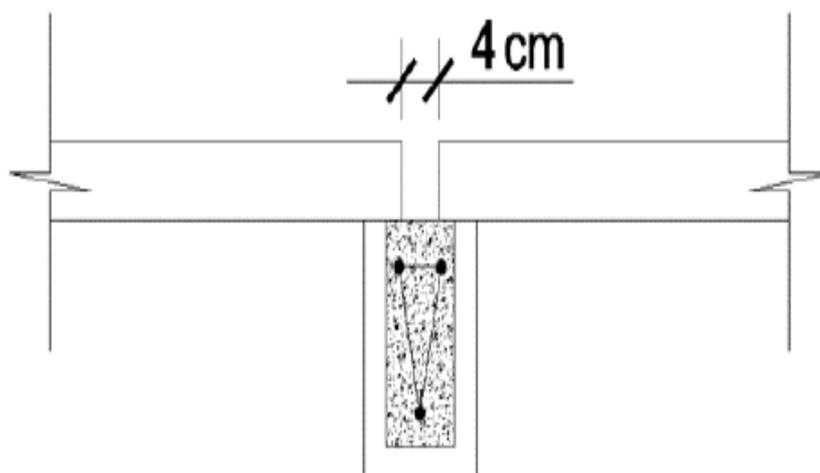
Fonte: NBR 16868:2020.

No caso de edifícios com lajes pré-moldadas, o anexo A do projeto da nova norma inclui as seguintes precauções:

– dimensionar cada painel antecipando a remoção de um dos apoios e fazer o mesmo procedimento para as lajes maciças;

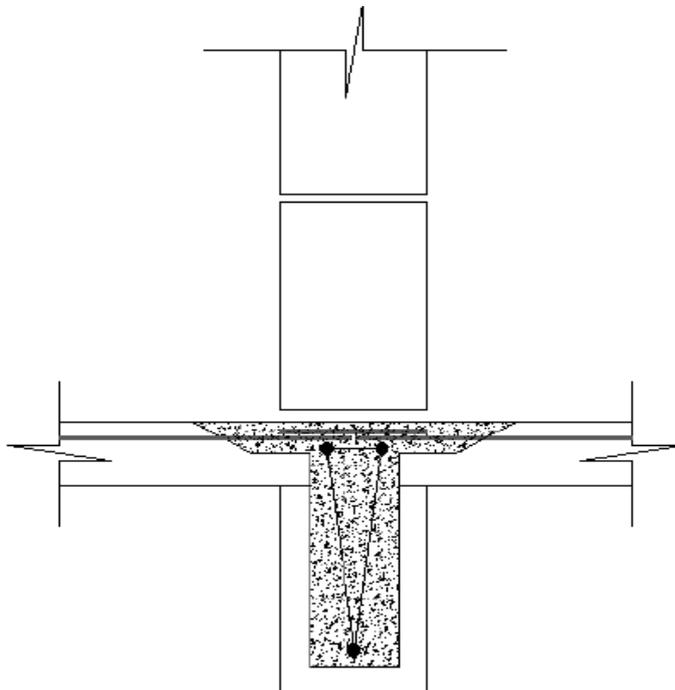
– dimensionar uma cinta de respaldo incorporando uma viga armada, para vir a ser o apoio no caso de uma parede ser removida, e podendo utilizar armadura treliçada para resistir a flexão e o cisalhamento, conforme Figura 3.40. Ainda é possível incorporar esse trecho da laje na viga, formando uma seção T, desde que a armadura negativa da treliça chegue até a zona comprimida da viga, conforme Figura 3.41. Neste último caso, a armadura negativa deve ser maior que $1,5 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Figura 3.40: Detalhe contra colapso progressivo em painéis de lajes pré-moldadas sem ligação.



Fonte: NBR 16868:2020.

Figura 3.41: Detalhe contra colapso progressivo em painéis de lajes pré-moldadas sem ligação (armadura negativa maior que $1,5 \text{ cm}^2/\text{m}$).



Fonte: NBR 16868:2020.

3.11.2 Anexo B: Alvenaria protendida

O anexo B do projeto da nova norma não altera em nada o que é apresentado no anexo B das normas ainda vigentes. Dessa forma, mesmo sendo um dos dois anexos de caráter normativo, este presente trabalho não faz a análise deste anexo.

3.11.3 Anexo C: Parede com índice de esbeltez superior a 30

Único anexo entre os novos que tem caráter normativo no projeto de norma da NBR 16868:2020, traz as especificações de como dimensionar uma parede muito esbelta, com o índice de esbeltez maior que 30. O projeto da nova norma inicia o anexo pontuando as condições para que o dimensionamento possa ocorrer:

- a) as paredes devem ser armadas;
- b) o elemento deve ser parede e não um pilar;
- c) espessura dos blocos de no mínimo 14 cm;
- d) os deslocamentos horizontais fora do plano, na base e no topo da parede, devem ser restritos;

- e) no dimensionamento, deve-se assumir as extremidades como simplesmente apoiadas;
- f) a máxima tensão de compressão de projeto deve ser menor que 10% da resistência de prisma do projeto, ou seja: $\sigma_d \leq 0,1 \times f_{pk} / \gamma_m$;
- g) a área máxima de armadura deve levar à posição da linha neutra da seção, ou seja: $x/d \leq 0,5$;
- h) os efeitos $P.\Delta$ devem obrigatoriamente ser considerados no dimensionamento;
- i) o dimensionamento deve ser feito na área efetiva da parede.

A determinação do momento de cálculo total se faz por:

$$M_{d,total} = \frac{w_d \cdot h^2}{8} + P_{d1} \cdot \frac{e}{2} + (P_{d1} + P_{d2}) \cdot \Delta_d \quad (63)$$

onde

w_d = força lateral de projeto;

P_{d1} = carga vertical de projeto aplicada pelo nível do topo da parede;

P_{d2} = carga vertical de projeto resultante de carregamentos de pisos acima do nível do topo da parede;

e = excentricidade de P_{d1} ;

Δ_d = deslocamento lateral à meia altura considerando simultaneamente ações de projeto e efeito $P.\Delta$.

O projeto da nova norma especifica a Equação 63 baseando-se na norma canadense de alvenaria estrutural. A CSA S304:2014 determina para paredes esbeltez (índice também superior a 30) com baixa carga axial, condições iguais às descritas no projeto de norma da NBR 16868:2020, e a mesma fórmula para o momento de cálculo total.

Para o cálculo do deslocamento lateral de primeira ordem Δ_0 , o projeto de norma da NBR 16868:2020 especifica:

$$\Delta_0 = \frac{5.w_d.h^4}{384.E.I_{ef}} + \frac{P_d.e.h^2}{16.E.I_{ef}} \quad (64)$$

onde

I_{ef} = momento de inércia efetivo da seção transversal, calculado levando em conta apenas a área argamassada e/ou grauteada da seção da parede;

E = módulo de elasticidade da alvenaria na área líquida.

O projeto da nova norma determina que EI_{ef} não pode ser maior que $0,25EI_0$, nem menor que EI_{II} , sendo que EI_0 é o momento de inércia da seção não fissurada, calculado na área efetiva de argamassa ou graute e EI_{II} por outro lado é o momento de inércia da seção fissurada, calculado a área efetiva de argamassa ou graute.

O deslocamento Δ_0 deve ser majorado para considerar os efeitos de segunda ordem. Combinando essa majoração com a Equação 65 do momento de cálculo total, resulta-se no momento final de projeto:

$$M_{d,total} = \frac{w_d.h^2}{8} + P_{d1} \cdot \frac{e}{2} + (P_{d1} + P_{d2}) \cdot \Delta_0 \left[\frac{1}{1 - \frac{(P_{d1} + P_{d2})}{P_{cr}}} \right] \quad (65)$$

onde

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot (EI)_{ef}}{(h)^2 \cdot (1 + 0,5 \cdot \beta_d) \cdot \gamma_m};$$

β_d = razão entre o momento causado pela ação permanente e o momento causado pela ação total.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 ainda especifica que o valor do deslocamento total não deve ultrapassar o valor de $h/250$. Para o cálculo desse deslocamento aplicam-se os coeficientes do estado limite de serviço, que são:

$\psi_1 = 0,3$ para força lateral de vento;

$\psi_1 = 0,4$ para ação acidental;

$\psi_1 = 1,0$ para ação permanente.

Para o caso de falta de uma análise mais precisa, o projeto de norma da NBR 16868:2020 especifica o mesmo método de cálculo que a CSA S304:2014 em seu item sobre deslocamentos para cargas de serviços, mais especificamente para os deslocamentos em meia altura:

$$\Delta_0 = \frac{5.M_s.h^2}{48.E_a.I_0} \text{ para } M_s \leq M_r \quad (66)$$

com

$$M_r = (f_{tk} + \sigma_s) \cdot \frac{I_0}{y} \quad (67)$$

onde

σ_s = tensão de compressão axial calculada com carga permanente de serviço, $0,9.P_k/A_e$;

f_{tk} = resistência à tração na flexão da alvenaria;

M_s = momento máximo à meia altura para ELS e considerando efeito P- Δ .

No caso de paredes fissuradas sob ação de serviço:

$$\Delta_0 = \frac{5.M_s.h^2}{48.E.I_0} + \frac{5.(M_s - M_r).h^2}{48.EI_{II}} \text{ para } M_s > M_r \quad (68)$$

Segundo o projeto da nova norma, o cálculo de M_s é iterativo por ser dependente do valor do deslocamento, sendo necessário fazer a interação até que se atinja a convergência, atentando-se para a ocorrência da fissuração da seção transversal da parede.

Para evitar o processo de iteração, o projeto de norma da NBR 16868:2020 permite calcular M_s a partir do valor máximo de Δ_s para o estado limite de serviço, e estimar o valor do deslocamento correspondente a esse momento. Caso o

deslocamento resultar em valor inferior ao máximo admissível, a condição de serviço estará sendo atendida.

3.11.4 Anexo D: Alvenaria participante

Esse anexo informativo trata de paredes de alvenaria estrutural que são construídas dentro de um pórtico com a finalidade de serem parte do sistema de contraventamento, além de serem projetadas para resistir a todas as ações aplicadas no plano e fora dele.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 segue à risca as especificações da CSA S304:2014 sobre “in fill shear walls” ou paredes de cisalhamento que cumprem a função de preenchimento. Ambas as normas especificam que a alvenaria participante pode ser considerada usando o modelo de barra diagonal comprimida, que ela deve resistir a todas as cargas verticais transferidas do pórtico, além de outros modelos analíticos para a análise.

3.11.4.1 Ação composta entre a parede participante e o pórtico

As paredes participantes vinculadas aos elementos do pórtico devem ser projetadas para resistência e rigidez com base nos cálculos realizados pensando na ação conjunta. As tensões da alvenaria devem ser consideradas nas deformações diferenciais.

3.11.4.2 Paredes participantes com aberturas e juntas

Paredes participantes não podem ter aberturas ou espaços vazios entre o painel de alvenaria e o pórtico, a não ser que seja comprovado por meio de ensaios que a ação da diagonal comprimida e os requisitos estruturais não são afetados.

O projeto de norma da NBR 16868:2020, seguindo as diretrizes da CSA S304:2014, atenta para três notas sobre as aberturas e juntas:

- a) o uso de espaços entre o painel de alvenaria e o elemento estrutural acima dele, para permitir a movimentação vertical do mesmo, acarreta

desvios laterais importante na estrutura, antes do desenvolvimento da diagonal comprimida na parede participante;

- b) onde uma abertura interfere na diagonal comprimida, análises devem mostrar o desenvolvimento de uma diagonal comprimida alternativa que liga a parede participante ao pórtico;
- c) juntas com materiais deformáveis são permitidas desde que demonstrada a efetividade do sistema.

3.11.4.3 Cisalhamento por escorregamento da junta horizontal

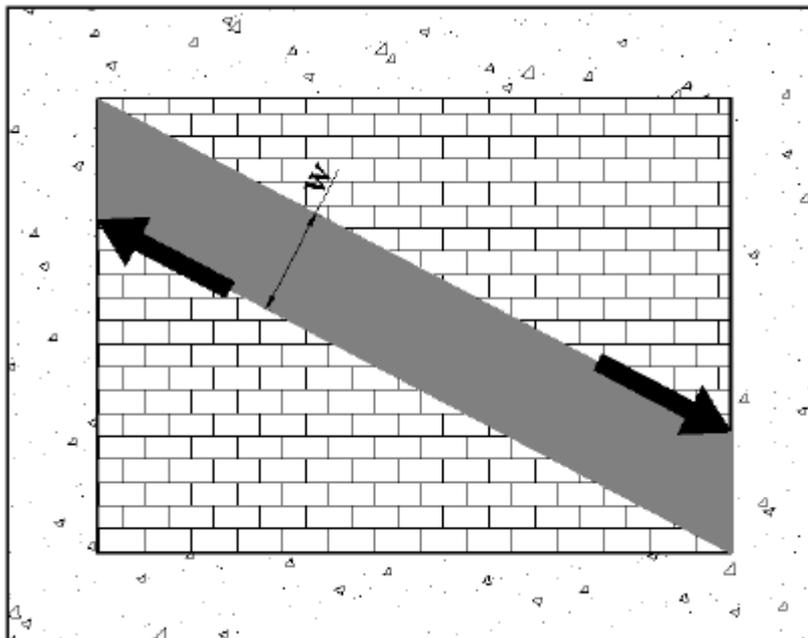
As paredes participantes devem resistir ao cisalhamento existente no plano, conforme o item 6.2.2.6 do projeto da nova norma sobre o cisalhamento na alvenaria, abordado no item 3.5.3.4 deste trabalho. O projeto da nova norma, seguindo a norma canadense, não permite que as forças de cisalhamento sejam transferidas através da interface entre elementos do pórtico e da alvenaria participante, somente pelo apoio da diagonal comprimida.

O projeto de norma da NBR 16868:2020 atenta especialmente para a resistência ao cisalhamento por escoramento, pois uma falha de cisalhamento por escorregamento da parede participante pode acarretar uma fissura horizontal, redirecionando a biela sobre a parte superior da alvenaria para o pórtico, levando a uma possível falha prematura do pilar do pórtico.

Para a norma canadense e para o projeto da nova norma brasileira, a componente vertical da força diagonal deve ser considerada na resistência ao cisalhamento por escorregamento do painel, porém o projeto de norma da NBR 16868:2020 especifica que somente a parcela da ação vertical permanente deve ser considerada.

Os elementos do pórtico devem ser dimensionados levando em conta a adição das forças de cisalhamento introduzidas pela ação da diagonal comprimida. Vigas, pilares e lajes em contato com a alvenaria participante devem ser projetados considerando as forças cortantes e momento, majorados por um fator igual a 1,1. A norma brasileira é mais detalhista na explicação sobre o cisalhamento por escorregamento da junta horizontal, do que a norma canadense, além de ilustrar a atuação da diagonal comprimida e a posição das solicitações adicionais causados por ela na Figura 3.42:

Figura 3.42: Posição sugerida da força diagonal resultante para o dimensionamento dos elementos do pórtico.



Fonte: NBR 16868:2020.

3.11.4.4 Largura da diagonal comprimida

Da mesma maneira como a norma canadense determina, o projeto de norma da NBR 16868:2020 especifica que a largura da diagonal comprimida w deve ser tomada como:

$$w = \sqrt{\alpha_h^2 + \alpha_L^2} \quad (69)$$

onde

α_h = comprimento de contato vertical entre o pórtico e a diagonal comprimida;

α_L = comprimento de contato horizontal entre o pórtico e a diagonal comprimida.

Os comprimentos de contato entre o pórtico e a diagonal comprimida são determinados de acordo com:

$$\alpha_h = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_f \cdot I_c \cdot h}{E_m \cdot t_{ap} \cdot \sin 2\theta}} \quad (70)$$

$$\alpha_L = \pi \cdot \sqrt[4]{\frac{4.E_f.I_b.hl}{E_m.t_{ap}.sen2\theta}} \quad (71)$$

onde

E_m, E_f = módulos de elasticidade do material da parede de alvenaria e pórtico, respectivamente;

h, ℓ = altura e comprimento da parede participante, respectivamente;

t_{ap} = duas vezes a soma da espessura das paredes longitudinais do bloco, caso o bloco seja vazado não grauteado totalmente; ou é a espessura da parede caso seja tijolo maciço ou bloco vazado totalmente grauteado;

I_c, I_b = momentos de inércia do pilar e da viga do pórtico, respectivamente;

$\theta = \tan^{-1} (h/\ell)$, graus.

Na edição do projeto de norma da NBR 16868:2020, que atualmente está em consulta pública, há erros nas Equações 70 e 71 descritas anteriormente. A norma brasileira usa as fórmulas da norma canadense para a determinação de α_h e α_L e acaba confundindo alguns dos fatores. Na publicação brasileira a fórmula contém os fatores “ E_m, E_f, I_c e I_b ”, iguais aos da norma canadense. Porém no momento da definição desses termos abreviados, a norma brasileira usa “ E_a, E_p, I_p e I_v ”. Trata-se de um engano por parte da norma brasileira, que usa dentro das fórmulas os termos abreviados em inglês (fórmulas da norma canadense), e para a definição de cada termo, usa as abreviações em português, conforme mostra a Figura 3.43, marcando os termos alterados.

Figura 3.43: Erros de tradução das siglas apontados nas equações.

$$\alpha_n = \frac{\pi^4}{2} \sqrt{\frac{4E_r l_c \ell}{E_m t_{ap} \sin 2\theta}}$$

$$\alpha_L = \pi^4 \sqrt{\frac{4E_r l_b \ell}{E_m t_{ap} \sin 2\theta}}$$

onde

E_a e E_p são os módulos de elasticidade

h e ℓ são a altura e o comprimento

t_{ap} equivale a duas vezes a espessura do bloco no caso de bloco vazado e a espessura do tijolo no caso de tijolo maciço ou

I_p e I_v são momentos de inércia

θ é a $\tan^{-1}(h/\ell)$, expressa em radianos

Fonte: NBR 16868:2020.

3.11.4.5 Diagonal comprimida efetiva

A largura da diagonal comprimida efetiva w_{eff} para a determinação da resistência à compressão da diagonal comprimida deve ser igual a $w/2$, não podendo ser maior que um quarto do comprimento da diagonal.

Quanto a rigidez efetiva da diagonal comprimida ela é tomada conforme:

$$rigidez\ efetiva = \phi_{st} \cdot w_{eff} \cdot t_{ap} \cdot \frac{E_m}{\ell_s} \quad (72)$$

onde

ℓ_s = comprimento da diagonal comprimida diminuído de $w/2$;

ϕ_{st} = fator que leva em conta a redução de rigidez, calculado como 0,5.

A resistência à compressão da diagonal comprimida deve ser conforme o item 6.2.2.3 do projeto da nova norma, que aborda a resistência à compressão da alvenaria, o qual se encontra comentado no item 3.5.3.1 deste trabalho.

Usa-se a resistência à compressão da alvenaria f_k multiplicada por um fator que corrige a resistência à compressão normal à junta pela resistência na direção da diagonal. Na falta de informações, esse fator corretor deve ser igual a 0,5.

A área da seção transversal efetiva da diagonal comprimida é igual à largura w_{eff} multiplicada pela largura da alvenaria. Segundo o projeto da nova norma, seguindo as diretrizes da norma canadense, os efeitos da esbeltez devem ser levados em conta, considerando que a altura efetiva h_{ef} é igual ao comprimento da diagonal comprimida diminuído de $w/2$, identificado como l_s .

3.11.5 Anexo E: Painel sob ação lateral fora do plano

Este anexo do projeto da nova norma, também de caráter informativo, permite ao projetista a possibilidade de dimensionar o painel sob ação lateral fora do plano por meio de Tabelas das normas europeia e canadense, ou pelo modelo de grelha equivalente, desde que sejam feitas considerações sobre fissuração e propriedades da alvenaria para cada direção. O anexo ainda determina que as prescrições são válidas para painéis de espessura única e de até 25 cm, como também especifica a norma europeia.

3.11.5.1 Coeficiente de ortogonalidade

Segundo o anexo do projeto de norma da NBR 16868:2020, o coeficiente de ortogonalidade da resistência à flexão μ , deve ser determinado por:

$$\mu = \left(\frac{f_{td,normal} + P_f/A_e}{f_{td,paralela}} \right) \leq 1,0 \quad (73)$$

onde

$F_{td,normal}$ = resistência à tração na flexão normal a junta de assentamento, em valores de projeto;

$F_{td,paralela}$ = resistência à tração na flexão paralela à junta de assentamento, em valores de projeto;

P_f = carga axial, considerada igual a 90% da carga permanente, com P_f/A_e não superior a 0,15 MPa;

A_e = área efetiva da seção.

3.11.5.2 Cálculo das solicitações

As solicitações são calculadas considerando-se o máximo momento por comprimento linear em cada direção dados por:

$$M_{d,paralelo} = \beta_f \cdot w_d \cdot \ell^2 \quad (\text{flexão horizontal}) \quad (74)$$

$$M_{d,normal} = \mu \cdot \beta_f \cdot w_d \cdot \ell^2 \quad (\text{flexão vertical}) \quad (75)$$

onde

w_d = pressão lateral por área em valor de projeto;

β_f = fator para cálculo do momento conforme Tabelas presentes das normas europeia e canadense;

ℓ = largura do painel;

μ = coeficiente de ortogonalidade.

3.11.5.3 Alvenaria não armada

O projeto de norma da NBR 16868:2020 recomenda as tabelas da CSA S304:2014 para o caso de alvenaria não armadas, que descontam a resistência à flexão da alvenaria ao longo da primeira fissura do painel. Não é permitida a consideração de lados engastados, sendo considerados casos de painel apoiados em três ou quatros lados. Casos apoiados em uma direção podem ser resolvidos de forma isostática.

Para painéis onde a largura ℓ e a altura h não exceda 50 vezes a espessura t da alvenaria, o produto entre a altura e largura do painel deve ser limitado a:

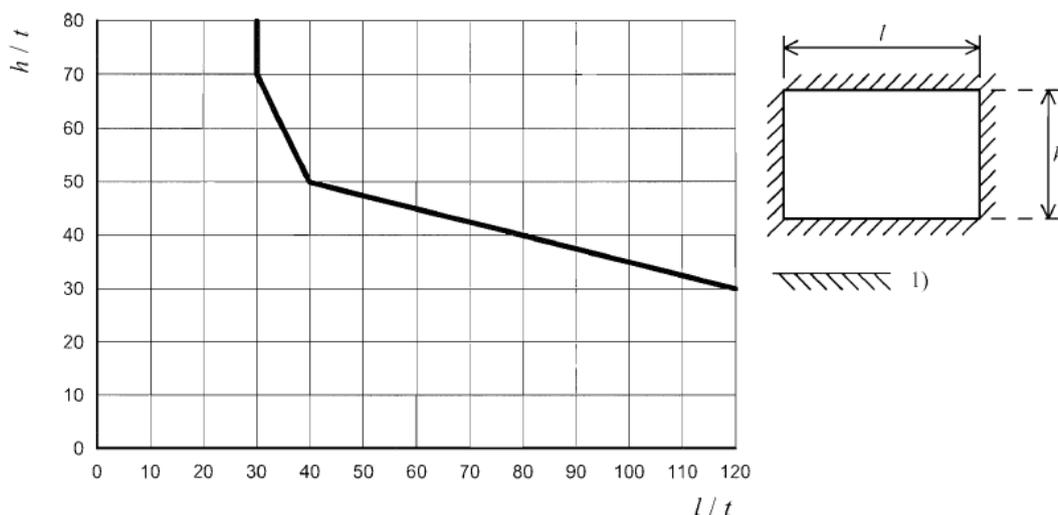
- menor ou igual a $1350 \cdot t^2$ para painéis apoiados nos três lados;
- menor ou igual a $2020 \cdot t^2$ para painéis apoiados nos quatro lados.

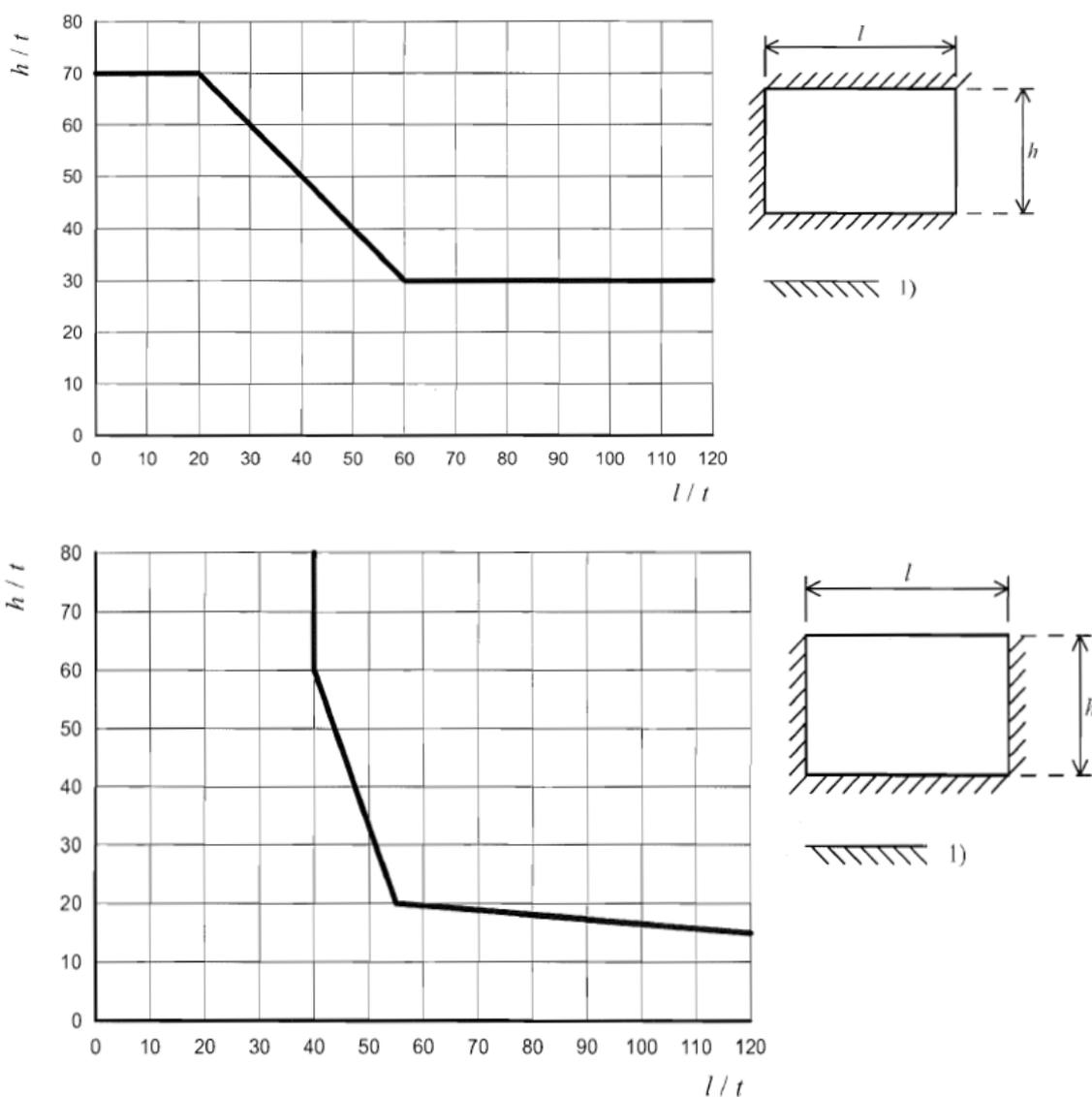
3.11.5.4 Alvenaria armada

Segundo Medeiros e Parsekian (2019), para casos de alvenaria armada, o anexo E do projeto de norma da NBR 16868:2020 recomenda as tabelas do Eurocode 6 (2005). O coeficiente de ortogonalidade deve seguir as diretrizes do item E.2 do anexo, abordado no item 3.11.5.1 deste trabalho. No cálculo das solicitações, o projeto da nova norma permite considerar os lados engastados, desde que haja um detalhamento da ligação da borda do painel, incluindo a armadura.

As dimensões limites que o anexo E define são tabelas disponíveis na norma europeia, conforme mostra a Figura 3.44. Caso as relações entre altura e espessura h/t e largura e espessura l/t estejam dentro dos limites dessas tabelas, o estado de limite de serviço está sendo atendido. Para casos que ultrapassam esses limites, é necessário fazer a análise dos deslocamentos limites do painel, considerando a fissuração do mesmo.

Figura 3.44: Dimensões limites de painéis armados.





Fonte: NBR 16868:2020.

3.11.6 Anexo F: Especificação dos materiais da alvenaria

Esse anexo apresenta uma tabela com valores recomendados ao projetista para a especificação do bloco, argamassa, graute e resistência do prisma. Essa tabela está representada pela Figura 3.6 deste trabalho, no item 3.5.3.1 sobre a compressão simples. Tais valores devem ser confirmados com os devidos testes, mas segundo Medeiros e Parsekian (2019) o comitê organizador do projeto da nova norma entende que valores comuns como referência para projetistas inexperientes são importantes.

4. CONCLUSÕES

4.1 CONCLUSÕES OBTIDAS NO TRABALHO

- De uma maneira geral, a publicação do projeto de norma da NBR 16868:2020, que substituirá a NBR 15812:2010 e a NBR 15961:2011, acontece em bom tempo se não atrasada. Com o projeto da nova norma, o Brasil alinha-se com a comunidade internacional, no quesito de normativas que abordam a alvenaria estrutural, deixando a segregação devido ao tipo do material do bloco. Outro ponto que faz a publicação da nova norma ser necessária é o período de praticamente uma década sem revisões nas normas ainda vigentes.
- O projeto de norma da NBR 16868:2020 se baseia muito na norma canadense (CSA 304:2014) para inclusão de itens inéditos ao longo de seu texto, como a flecha imediata, deformação por fluência, armaduras intermediárias em vigas. Além disso, os novos anexos C e D do projeto da nova norma, Paredes com índice de esbeltez maior superior a 30 e Alvenaria participante, respectivamente, são baseados inteiramente na CSA 304:2014. Tais ampliações de opções para o dimensionamento são muito bem vindas, mesmo que em uma primeira etapa usa-se normas internacionais como referência, quando não há estudos e resultados nacionais.
- Nota-se uma leve preferência para os parâmetros da NBR 15961:2011 quanto aos da NBR 15812:2010. Em itens nos quais as normas ainda vigentes divergem (especificação do graute, na equação para determinação de ações permanentes indiretas e no caso do vão efetivo), e o projeto da nova norma não conseguiria especificar métodos ou valores diferentes de acordo com o tipo de bloco, optou-se pelas diretrizes da norma que aborda os blocos de concreto (NBR 15961:2011), talvez por ser uma norma mais recente que a referente aos blocos cerâmicos (NBR 15812:2010).
- O projeto da nova norma apresenta novidades positivas, menos conservadoras e que terão efeitos imediatos quanto ao projeto da

alvenaria estrutural, como por exemplo a avaliação de conformidade do projeto, que reforça a seguridade do projeto além de abrir uma nova gama de serviço para engenheiros. Além disso, o fim da limitação de considerar somente 50% da tensão na armadura no dimensionamento à flexão simples e ao cisalhamento já era uma mudança requerida por diversos autores. Esta alteração se baseia em estudos nacionais, e fica dependendo do tipo de bloco, de suas paredes internas e da bitola do aço. Outro ponto positivo é o uso de armadura no dimensionamento à compressão simples.

- A resistência a compressão da argamassa no projeto da nova norma continua com uma especificação defasada, sem limites mínimos e dependendo do bom senso do projetista. Além disso, a elevação dos valores para o módulo de deformação longitudinal dos blocos de concreto se mostra demasiada, uma vez que são incompatíveis com os ofertados no mercado nacional.
- O projeto de norma da NBR 16868:2020 peca na comunicação entre itens diferentes que abordam temas em comum, como a esbeltez. Em um primeiro momento, alguns elementos podem ser considerados como “não armados” se o índice de esbeltez for de até 24. Porém, elementos com índice de esbeltez superior a 16 são considerados “armados” e submetidos a momentos de segunda ordem. Além da comunicação entre alguns itens ser confusa, o projeto da nova norma peca na comunicação com o leitor. Por vezes a normativa é confusa e vaga, como por exemplo no item para a determinação da resistência de cálculo para paredes e pilares armados, com índice de esbeltez inferior ou igual a 30, onde o projeto de norma da NBR 16868:2020 somente apresenta as diretrizes para pilares, sem citar paredes.
- Alguns objetivos das normas são a segurança, inovação e comunicação. O projeto de norma da NBR 16868:2020, além de unificar as normas ainda vigentes, progride em segurança e inovação comparada às NBR 15812:2010 e NBR 15961:2011. Porém, como em qualquer normativa, ainda há atualizações possíveis de serem realizadas em alguns itens e na comunicação do projeto da nova norma.

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, para trabalhos futuros, o estudo comparativo entre o projeto de norma da NBR 16868:2020 – Parte 2 e 3, com as respectivas partes das normas ainda vigentes. Ainda, serão adicionadas as partes 4 e 5 na nova norma, que abordarão a estrutura em situação de incêndio e o projeto para ações sísmicas, assim, sugere-se o estudo aplicando as novas normativas nacionais, além de um estudo comparativo com normas internacionais que abordam as mesmas áreas.

5. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT NBR 10837: Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 1989.

ABNT NBR15812: Alvenaria Estrutural – Blocos Cerâmicos. 1.ed. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT NBR15961: Alvenaria Estrutural – Blocos de concreto. 1.ed. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT/CE-002:123.010 – Projeto de Norma PN 002:123.010 – Alvenaria Estrutural.

BASTOS, P. S. S. Fundamentos do concreto armado. 2019. Apostila da disciplina 2117 – Estruturas de concreto I. Universidade Estadual Paulista (Unesp). Bauru, 2019.

BSI- BS 5628-1: Code of practice for use of masonry – Part 1: Structural use of unreinforced masonry. London, 1992.

Building Code Requirements for Masonry Structures (ACI 530-92/ ASCE 5-92/TMS 402-92). Masonry Standards Joint Committee, ASCE, NY.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. CSA S304: Design of Masonry Structures. Mississauga: CSA, 2014.

DAS S.; BOUTILIER B.; STUBBS D. Cracking and Crack Width Patterns in Large Masonry Beams. *ACI Structural Journal*, Farmington Hills, v. 111, n. 1, p. 167-175, 2014.

DE LIMA, A. N. Análise experimental da influência da resistência e espessura da argamassa de assentamento no desempenho mecânico de prismas de blocos cerâmicos. 2010. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

DE MARCO, C. E. G. Avaliação mecânica de prismas preenchidos com argamassa/graute à compressão. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

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

FORTES, E. S.; PARSEKIAN, G. A.; FONSECA, F. S.; CAMACHO, J. S. High-Strength Concrete Masonry Walls under Concentric and Eccentric Loadings. *Journal of Structural Engineering*, Reston, v. 144, n. 6, 2018.

FORTES, E. S.; PARSEKIAN, G. A.; FONSECA, F. S.; CAMACHO, J. S. High Strength Concrete Blocks Structural Masonry Compression Strength. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, São Paulo, v. 10, p. 1273-1319, 2017.

GUARNIERI, L.; BERGMANN, C. P.; FILHO, L. C. P. S. Influência da aderência graute/bloco cerâmico estrutural na resistência mecânica do conjunto. In: Congresso internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas, 2017, Crato. Anais do 13º Cinpar. Crato: Cinpar, 2017.

HASELTINE, Barry. MASONRY ENGINEERING IN THE UK – PAST DEVELOPMENT, CURRENT OVERVIEW AND FUTURE. 15th International Brick and Block Masonry Conference | Florianópolis, 2012.

HASELTINE, Barry. The Evolution of the design and construction of masonry buildings in the UK.GTP | Volume 7, Número 2 | São Carlos | p. 20-26 | Dezembro, 2012.

IGLESIA, Socrate Muñoz. Estrutura de nós fixos e nós móveis: aplicação do P-Delta. www.altoqi.com.br, 2017. Disponível em <https://maisengenharia.altoqi.com.br/estrutural/estruturas-de-nos-fixos-e-nos-moveis-aplicacao-do-p-delta/> Acesso em 06/11/2019.

IZQUIERDO, O. S.; CORRÊA, M. R. S. Análise experimental da interface graute/bloco estrutural de concreto e cerâmico. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 16, n. 66, p. 17-48, 2016.

KIRKUP, A. ICE update on use of structural engineering codes. 2017. Disponível em: <https://www.ice.org.uk/knowledge-and-resources/best-practice/ice-update-on-use-of-structural-engineering-codes>. Acesso em outubro de 2019.

LANNA, Carlos. André. Fois. Painel de normas, conheça a nova norma de alvenaria estrutural. Revista Construção Mercado. Edição 106 maio/2010. Disponível em: <http://revista.construcaomercado.com.br/guia/habitacao-financiamento-imobiliario/106/blocos-estruturais-nova-norma-regulamenta-construcao-com-blocos-ceramicos-170688-1.asp>. Acesso em: setembro 2019.

LÜBECK, A. Comportamento mecânico e influência da argamassa no modo de ruptura da alvenaria estrutural. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

MACHADO, J. F. Análise do modo de ruptura e previsão de resistência à compressão de prismas de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A. Revisão e unificação das normas para alvenaria estrutural. 2019. Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto, Outubro, 2019.

MOHAMAD, G. (coordenador) Construção em Alvenaria Estrutural: materiais, projeto e desempenho. São Paulo: Blucher, 2015. 1.ed.

MOHAMAD, G. Mechanism failure of concrete block masonry under compression. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2007.

OLIVEIRA, L. M. F.; CORRÊA, M. R. S. Numerical and experimental analysis of the shear capacity of interconnected concrete block walls. Ambiente Construído (online), v. 17, p. 25-37, 2017.

PAES, M. S. Interação entre edifício de alvenaria estrutural e pavimento em concreto armado considerando-se o efeito arco com a atuação de cargas verticais e ações horizontais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

PARSEKIAN, G. A.; SOARES, M.M. Alvenaria estrutural em blocos cerâmicos: projeto, execução e controle. São Paulo: O Nome da Rosa.1. ed., 2010.

Parsekian, G. A. Normas fazem alvenaria estrutural brasileira dar salto de qualidade. Entrevista para o site Cimento Itambe. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/normas-fazem-alvenaria-estrutural-brasileira-dar-salto-de-qualidade/>>. Acesso em setembro 2019.

PARSEKIAN, G. A. The success of masonry structures in Brazil: practice, research and challenges. In: International Masonry Conference, 2014, Guimarães. Proceedings of the 9 th International Masonry Conference. Guimarães: Universidade do Minho, p. 1-24, 2014.

PARSEKIAN, G. A.; CORRÊA, M. R. S.; LOPES, G. M.; CAVICHIOLLI, I. Estudo teórico e experimental de paredes esbeltas de alvenaria estrutural. *Ambiente Construído* (online), v. 16, n. 4, p. 197-213, 2016.

POLETTO, F.A. B. Análise da fluência em vigas de concreto armado simplesmente apoiadas usando o método dos elementos finitos. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Tecnológica federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PORTELLA, R. P. Fator de eficiência da resistência prisma/bloco cerâmico de paredes vazadas. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. Projetos de edifícios de alvenaria estrutural. São Paulo: Pini, 2003.

S. K. Arora. Technical assessment of Eurocode 6 by United Kingdom - A comparison with BS 5628 Parts 1 & 2. Building Research Establishment, Garston, Watford, UK, 1991.

SABBATINI, F. H. Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos – Formulação e aplicação de uma metodologia. 1989. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1989.

SANTOS, C.F.R; FELIPE, T.R.C; SIMÕES, Y. S; ALVARENGA, R. C. S. S; PRADO, P. L. Análise comparativa entre blocos cerâmicos e blocos de concreto no dimensionamento de um edifício. ANAIS DO 59º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2017 – 59CBC2017. Novembro 2017.

SÁNCHEZ, E. Nova normalização brasileira para a alvenaria estrutural. 1.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

SIPP, G. Avaliação do comportamento de aderência entre blocos cerâmicos e grautes. 2019. Dissertação (Mestrado em Construção civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

SCHANKOSKI, R. A.; PRUDÊNCIO Jr., L. R.; PILAR, R. Influência do tipo de argamassa e suas propriedades do estado fresco nas propriedades mecânicas de alvenarias estruturais de blocos de concreto para edifícios altos. *Revista Matéria*, v. 20, n. 4, p. 1008-1023, 2015.

SHAFII, Faridah; OMAR, Wahid; MOHAMMAD, Shahrin; MAKHTAR, A. M. Standardization of structural design: A shift from British standards to Eurocodes. *Jurnal Teknologi*, 34(B) Jun 2001: 21–30 © Universiti Teknologi Malaysia.

SINHA, Braj P. Development and potencial of structural masonry. Seminário sobre Paredes de Alvenaria, P.B. Lourenço & H. Sousa. Porto, 2002.

Site oficial da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Como elaborar normas. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/normalizacao/elaboracao-e-participacao/como-se-elaboram>> Acesso em setembro 2019.

SOARES, M. M. M. Especificação, execução e controle de alvenaria estrutural em blocos cerâmicos de acordo com a NBR 15812. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

Technical Notes 3 - Overview of Building Code Requirements for Masonry Structures (ACI 530-02/ASCE 5-02/TMS 402-02) and Specification for Masonry Structures (ACI 530.1-02/ASCE 6-02/TMS602-02). The Brick Industry Association. Julio, 2002.

THE MASONRY SOCIETY (TMS). The history of Structural Masonry Standards. Disponível em: <https://masonrysociety.org/wp-content/uploads/2017/10/2B_History-of-Structural-Masonry-Standards.pdf> Acesso em novembro de 2019.