

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES DE CISALHAMENTO NAS INTERFACES VERTICAIS DE PAREDES DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL – ESTUDO DE CASO

Luciane Marcela Filizola de Oliveira¹ & Márcio Roberto Silva Corrêa²

Resumo

Este trabalho apresenta a avaliação das tensões de cisalhamento nas interfaces verticais de paredes de alvenaria interconectadas produzidas simultaneamente por carregamentos verticais e ações horizontais. Os valores obtidos para as máximas tensões de cisalhamento são comparados com as resistências estabelecidas na norma brasileira em vigor, ABNT NBR 10837:1989, e no texto base para sua revisão, avaliando-se criticamente a aplicação dos limites normativos na prática de projetos de edifícios existentes. Para aquisição dos dados para as análises foi feito um estudo de caso com um edifício residencial usual, variando-se o número de pavimentos em quatro, oito, doze e dezesseis. Com os resultados obtidos nas avaliações, concluiu-se que os valores adotados como limites de resistência pelo texto base da revisão da ABNT NBR 10837:1989 parecem ser rigorosos para realidade brasileira.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural. Cisalhamento. Interfaces verticais. Carregamento vertical. Ações horizontais.

SHEAR STRESS EVALUATION AT VERTICAL INTERFACES OF MASONRY BUILDING WALLS – CASE STUDY

Abstract

This paper presents the shear stress evaluation at the vertical interfaces of interconnected masonry walls subjected to vertical and horizontal loads simultaneously. The maximum shear stress values obtained are compared to the shear strengths prescribed by the current Brazilian code ABNT NBR 10837:1989, and by its review base text, critically evaluating the application of the regulatory limits in the practical design of existing buildings. A case study was performed taking into account a residential building. The number of floors was varied considering four, eight, twelve and sixteen. The developed analysis showed that the strength limits prescribed by the review base text of the ABNT NBR 10837:1989 seem to be very much strict according to the Brazilian common practice.

Keywords: Structural masonry. Shear stress. Vertical interfaces. Vertical loads. Horizontal forces.

1 INTRODUÇÃO

Um problema comum enfrentado quando se projetam edifícios em alvenaria é a determinação das tensões de cisalhamento nas interfaces verticais das paredes, as quais surgem quando há interação entre elas. Este tema ainda é pouco estudado e, sobretudo, divergente quanto às conclusões. Dentro deste contexto insere-se a presente pesquisa, buscando estimar a intensidade das tensões de cisalhamento nas interfaces verticais das paredes quando estas são submetidas às cargas verticais e às ações horizontais simultaneamente. Ainda, esta pesquisa busca discutir os valores de

¹ Mestre em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, filizola@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, mcorrea@sc.usp.br

resistências estabelecidos pelas normas utilizadas para verificação das tensões produzidas nas interfaces das paredes.

Os trabalhos que tratam da interação entre paredes e do cisalhamento vertical nas interfaces das paredes interconectadas, o fazem analisando distintamente as formas de aplicação do carregamento, ou seja, sem aplicação simultânea das ações horizontais e verticais. Sinha e Hendry (1979) desenvolveram um estudo experimental para comparação da capacidade de carregamento vertical entre paredes isoladas e paredes enrijecidas em suas extremidades e não reconheceram o fenômeno da interação entre as paredes sob carregamento vertical, concluindo que as paredes trabalham isoladamente. Isso levantou posteriores discussões entre outros autores, como Corrêa (2003) que afirma haver a interação total até o limite de 90% do valor da carga de ruptura, pois a separação dos flanges reflete uma não-linearidade intensa, uma vez que a ruptura é frágil. Capuzzo Neto (2000) também discorda de Sinha e Hendry (1979) e comenta que as condições de ensaio não representaram a situação de um edifício com múltiplos andares, pois o carregamento foi aplicado em um único pavimento, o que pode ter ocasionado uma ruptura localizada do painel devido à concentração de tensões. Mediante a confirmação do fenômeno da interação, Corrêa e Page (2001) desenvolveram um método simplificado para análise da interação de paredes submetidas às ações verticais. Esse modelo baseia-se na tendência de uniformização das tensões normais verticais ao longo da parede e no tipo de distribuição das tensões de cisalhamento na interface das paredes interconectadas.

Com relação à análise do comportamento de estruturas sujeitas a ações horizontais, Silva (1996) estudou o efeito do vento em edifícios de alvenaria estrutural, modelando as paredes através da associação plana de paredes isoladas e pelo método do pórtico equivalente, com e sem a inclusão de trechos rígidos e concluiu que a consideração das paredes estruturais isoladas, levando-se em conta o grau de enrijecimento promovido pelos flanges, é suficiente para a modelagem dos edifícios usuais.

Neste trabalho, a análise das tensões devidas às ações horizontais foi feita utilizando-se o modelo de pórtico tridimensional, indicado por Nascimento Neto (1999) como adequado, pois permite uma análise abrangente da estrutura de contraventamento.

2 INTERAÇÃO DE PAREDES INTERCONECTADAS

2.1 Caracterização do fenômeno

A interação de paredes é um fenômeno que ocorre quando há transferência de forças através de suas interfaces comuns. Ela ocorre devido à tendência de deslocamento relativo entre as paredes, o qual é ocasionado tanto por ações horizontais quanto por ações verticais, proporcionando, assim, um aumento na resistência do conjunto, quando as interfaces têm resistência suficiente. O fenômeno da interação de paredes é comprovado de forma teórica e experimental, e sua incorporação nos projetos é muito vantajosa, principalmente em sistemas estruturais nos quais as paredes trabalham em conjunto com diafragmas rígidos. Neste caso, as paredes possuem maior capacidade de distribuição das ações ao longo dos painéis adjacentes, favorecendo a redução das tensões máximas, o que resulta na necessidade de paredes menos resistentes (OLIVEIRA JR. e PINHEIRO, 1994).

Para análise de paredes submetidas a ações horizontais, a interação é atribuída à colaboração dos flanges provenientes de paredes que apresentem intersecções. Essa contribuição aumenta a inércia dos painéis e conseqüentemente reduz as tensões normais. No caso da análise de paredes submetidas a carregamento vertical, na qual as paredes mais solicitadas aliviam seus excessos nas menos solicitadas, a conseqüência direta no seu comportamento estrutural, é a tendência de uniformização das tensões normais ao longo da altura do edifício (NASCIMENTO NETO, 1999). Um fator importante para o surgimento desse fenômeno é o tipo de ligação existente entre as

paredes que pode ser direta (Figura 1a.) ou indireta (Figura 1b.). Esta característica do processo construtivo interfere diretamente na intensidade das forças de interação.

Embora seja mais comum a consideração da interação em paredes submetidas a carregamento horizontal, é importante considerá-la quando as paredes interconectadas são carregadas verticalmente, pois, neste caso, há também, a tendência de uniformização das ações ao longo da altura do edifício e de deslocamento relativo na interface. Ocorre a interação quando paredes adjacentes estão submetidas a diferentes tensões de compressão, resultando na produção de forças de cisalhamento nas interfaces, como mostrado na Figura 1c. Segundo Capuzzo *et al.* (2007) a trajetória das tensões ao longo da altura das paredes da edificação também depende da interação entre elas.

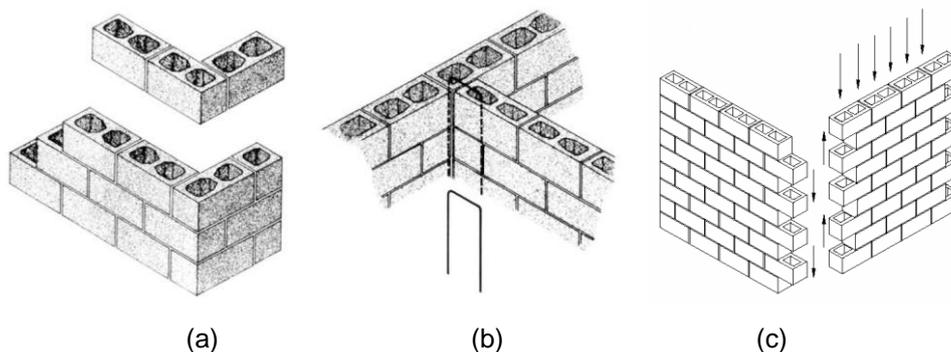


Figura 1 – (a) Amarração direta. (b) Amarração indireta (ABCI, 1990). (c) Forças de cisalhamento produzidas pela interação de paredes (MOREIRA, 2007).

2.2 Resistência ao cisalhamento

Para a determinação da capacidade da alvenaria de transferir as forças cisalhantes que surgem nas interfaces das paredes interconectadas, há necessidade de se conhecer a sua resistência ao cisalhamento. Porém, nem sempre o projetista dispõe desses dados, que ainda são escassos. Neste caso, podem ser usadas as recomendações dos códigos normativos que predizem a resistência ao cisalhamento das interfaces das paredes, em geral, de maneira conservadora. Na ausência de ensaios experimentais, as normas apresentam tensões admissíveis ou resistências características ao cisalhamento, que podem ser usadas no projeto. Os códigos de prática para alvenaria estrutural reúnem informações essenciais para a concepção das estruturas. Tais documentos, entretanto, não eximem o projetista da responsabilidade de conhecer os materiais usados e as ações estruturais que estão implícitas em seu projeto.

2.2.1 Norma brasileira ABNT NBR 10837:1989

A atual norma brasileira, ABNT NBR 10837:1989 estabelece de maneira geral, a tensão admissível de cisalhamento máxima atuante entre o bloco e a junta de argamassa, como função da resistência da argamassa empregada (f_a). Essa norma prescreve que em elementos de alvenaria solicitados por esforço cortante, a tensão convencional de cisalhamento (τ_{alv}) seja calculada pela Eq. (1), que fornece um valor médio:

$$\tau_{alv} = \frac{V}{b t} \tag{1}$$

Para alvenaria não armada, essa norma ainda estabelece que, a tensão convencional de cisalhamento (τ_{alv}) não exceda os seguintes valores:

0,25 MPa para construção com blocos vazados ou maciços e $12 MPa \leq f_a \leq 17 MPa$;

0,15 MPa para construção com blocos vazados ou maciços e $5 MPa \leq f_a \leq 12 MPa$.

Para o caso de combinações que incluam as tensões devidas ao vento, pode-se majorar em 33% as tensões admissíveis na alvenaria.

Apesar dos valores mencionados não serem de interesse direto no presente trabalho, estes serão utilizados para comparação com as tensões obtidas nas interfaces das paredes.

2.2.2 Revisão da norma brasileira ABNT NBR 10837

Encontra-se em andamento a revisão da norma ABNT NBR 10837:1989, que se baseia na hipótese dos estados limites. A norma estabelece que as resistências características ao cisalhamento nas interfaces verticais de paredes com amarração direta não devem ser maiores que 0,35 MPa. Este valor é uma adaptação de resistência prescrita pela norma britânica BS 5628 (BSI, 1992), que trata especificamente de interfaces verticais no item 2.4.1.4.

Em síntese, as condições que satisfazem aos limites prescritos pela norma, com relação às tensões de cisalhamento vertical originadas nas interfaces das paredes, podem ser expressas pelas Eq. (2) e (3). Essas expressões consideram as tensões devidas às ações verticais (τ_V) e horizontais (τ_H), simultaneamente, para edifícios residenciais e incorporam a resistência de cálculo. Para comparação das tensões de cisalhamento, neste trabalho, será utilizada apenas a Eq. (3), que é a mais conservadora, sendo, portanto, adotada no texto para revisão da ABNT NBR 10837:1989 como combinação última para o caso de edifícios residenciais.

$$1,4 \tau_V + 0,84\tau_H < 0,14 MPa \quad (2)$$

$$1,3 \tau_V + 1,4 \tau_H < 0,14 MPa \quad (3)$$

3 DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS VERTICAIS

3.1 Grupos isolados de paredes

Neste procedimento, os grupos são compostos de paredes que trabalham de forma solidária, mas sem interação com os demais, delimitados, usualmente, por aberturas de portas e janelas. É um procedimento econômico e seguro, pois segundo Corrêa e Ramalho (2004), considera-se a uniformização total das forças em cada grupo e a produção de forças adequadas às estruturas de apoio, devido à interação entre as paredes interligadas. A força atuante no grupo é a soma das forças atuantes em cada uma das paredes que o compõe. A tensão de compressão vertical no grupo é calculada pela razão entre a força resultante e a área da seção em planta do grupo de paredes. Devido à uniformização das tensões, as resistências necessárias para os blocos são menores que aquelas que seriam necessárias caso a uniformização não ocorresse. Para que tal uniformização ocorra é necessário garantir que ocorram forças de interação entre as paredes. Na prática, o procedimento de grupos isolados de paredes consiste, inicialmente, na definição dos grupos, que é feita empiricamente. A forma mais comum de divisão desses grupos é limitá-los pelas aberturas de portas e janelas ou interrompê-los em grandes lances de paredes. Em seguida, as ações são homogeneizadas somando todas as ações atuantes no grupo (concentradas e distribuídas) e redistribuídas uniformemente entre as paredes do grupo. Em se tratando das ações nos vãos, estas são transferidas para os grupos adjacentes. Capuzzo Neto (2000) enunciou um algoritmo (Figura 2 e Eq. 4) para aplicação do procedimento de grupos de paredes isoladas:

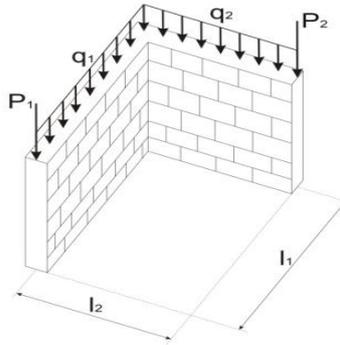


Figura 2 – Grupos de paredes isoladas.

$$q = \sum (q_{oi}l_i + P_i / \sum l_i) \quad (4)$$

Em que:

q : ações homogeneizadas uniformemente distribuídas no nível considerado;

q_{oi} : ações uniformemente distribuídas nas paredes do grupo no nível considerado;

P_i : ações concentradas nas paredes do grupo no nível considerado;

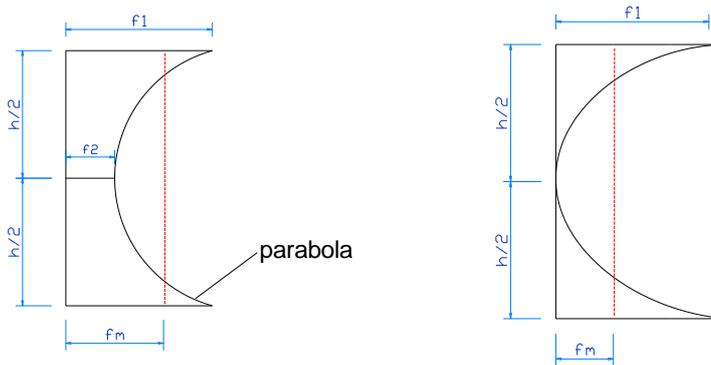
l_i : comprimento da parede i que constitui o grupo.

3.2 Avaliação das tensões de cisalhamento na interface

No presente trabalho, foi utilizado o modelo de grupos isolados de paredes (item 3.1) como procedimento de distribuição das cargas verticais. E para análise da interação de paredes submetidas às ações verticais foi utilizado um procedimento simplificado desenvolvido por Corrêa e Page (2001). Esse procedimento baseia-se na tendência de uniformização das tensões normais verticais ao longo da parede e no tipo de distribuição das tensões de cisalhamento na interface das paredes interconectadas. Para generalização da análise foram estudados exemplos de paredes variando-se o tipo de carregamento, número de pavimentos e dimensões em planta dos painéis.

Corrêa e Page (2001) observaram que nas regiões intermediárias, as máximas tensões atingem valores máximos estabilizados, indicando a possível transferência de forças, sendo estes valores máximos inversamente proporcionais ao número de pavimentos. As curvas obtidas entre os níveis assemelham-se a parábolas quadráticas. Diante disso, e a fim de definir de forma simplificada a máxima tensão de cisalhamento, a distribuição parabólica foi assumida entre os níveis adjacentes, com valores iguais nos extremos e valor nulo no ponto médio. Para que a força total seja transferida pela interface, foi estabelecida a relação entre a tensão média e máxima, sendo o valor máximo o triplo do valor médio (Figura 3). Esse valor foi fixado a favor da segurança, sendo que em simulações alternativas o dobro do valor médio também se mostrou adequado para a representação da força total transferida pela interface.

Para aplicação do método proposto nos edifícios, é necessário conhecer os carregamentos e as resistências utilizadas no projeto estrutural e identificar os grupos de paredes interconectadas e as interfaces que serão analisadas. O método foi implementado considerando a homogeneização total das tensões verticais ao longo da altura de um pavimento, o que favorece o aumento da tensão de cisalhamento, obtendo-se uma condição mais desfavorável, o que interessa nas primeiras análises.



$f_m = \text{Valor médio}$

$$f_m = \frac{1}{3} f_1 + \frac{2}{3} f_2$$

quando $f_2 = 0$

$$\therefore f_1 = 3f_m$$

Figura 3 – Parábola quadrática – valores médios.

4 DISTRIBUIÇÃO DE AÇÕES HORIZONTAIS

4.1 Considerações iniciais

Para analisar a distribuição das ações horizontais, foram consideradas as originadas pelo vento e pelo desaprumo, que são as ações mais comuns em edifícios residenciais. A consideração dessas ações em projeto foi feita por meio da norma brasileira ABNT NBR 6123:1988, para ações originadas pelo vento, e pela norma alemã DIN 1053:1974, para ações produzidas pelo desaprumo do eixo vertical da estrutura.

4.2 Modelo de pórtico tridimensional

Nessa modelagem, um trecho de parede sem abertura, situado entre pavimentos consecutivos, é discretizado por elementos de barra tridimensionais verticais flexíveis e elementos de barra horizontais rígidas (Figura 4). Segundo Nascimento Neto *et al.* (2006), este tipo de modelo é considerado complexo, no que diz respeito às modelagens com elementos de barra.

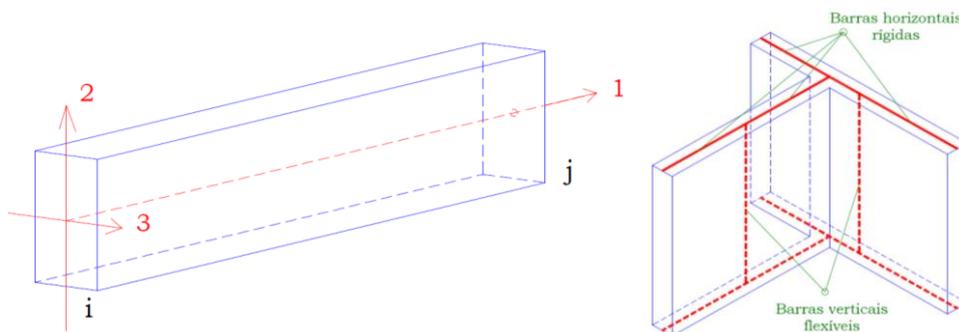


Figura 4 – Eixos de referência para os graus de liberdade dos elementos de barra tridimensionais e detalhe da modelagem das paredes de contraventamento (NASCIMENTO NETO, 1999).

As paredes são discretizadas por elementos de barra tridimensional flexíveis com as mesmas características geométricas da seção transversal das paredes que representam, com eixos longitudinais posicionados verticalmente no centro de gravidade da seção retangular dessas paredes. Barras horizontais rígidas, dispostas no nível do pavimento, são interligadas através de articulações nas extremidades comuns, sendo permitida apenas a translação vertical nesses nós. Assim, o fenômeno da interação das paredes é considerado, estando associado ao desenvolvimento de

esforços cortantes verticais em suas interfaces. A ligação entre as barras horizontais e as verticais é contínua, sem liberação de vínculos.

Nascimento Neto (1999) afirma que, para análise dos esforços devidos às ações horizontais, este modelo pode ser considerado adequado, por representar a rigidez relativa dos painéis e por permitir a inclusão da torção do edifício, ou seja, permite uma análise abrangente da estrutura de contraventamento.

5 EXEMPLO

5.1 Características da edificação

Neste exemplo foi analisado um edifício de habitação padrão. Trata-se de pavimento tipo, constituído de lajes de concreto armado moldadas no local que se apóiam em paredes de alvenaria estrutural, sendo o primeiro pavimento apoiado diretamente sobre as fundações e todas as paredes são estruturais. O edifício possui 16 pavimentos e foram utilizados blocos vazados de concreto de resistência mínima $4,5 \text{ MPa}$, eficiência $\eta = 0,8$, módulo de elasticidade $E = 2880 \text{ MPa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,15$, e adotou-se argamassa de resistência característica 5 MPa .

O peso próprio dos trechos sobre as aberturas e o carregamento exercido pelas lajes sobre estes trechos foram transferidos para os grupos adjacentes de forma simplificada, conforme o exemplo da Figura 5. Na elevação da parede pode ser vista a região pertencente ao grupo 1 (G1) e a pertencente ao grupo 2 (G2), além da região que se encontra entre eles, subdividida em 4 (R1, R2, R3 e R4). O carregamento proveniente da laje, acrescido do peso próprio da região da parede entre grupos é repartido igualmente entre eles, ou seja, R1 equivale ao peso próprio mais o carregamento da laje e R3 equivale somente ao peso próprio. Esses carregamentos se transformam em um único que é aplicado sobre a região G1, enquanto R2 e R4 são aplicados sobre G2.

No caso de uma porta, há somente as regiões como as formadas por R1 e R2 com a contribuição do peso próprio dessas regiões e da laje sobre elas e no caso de uma abertura total, há apenas a contribuição da laje.

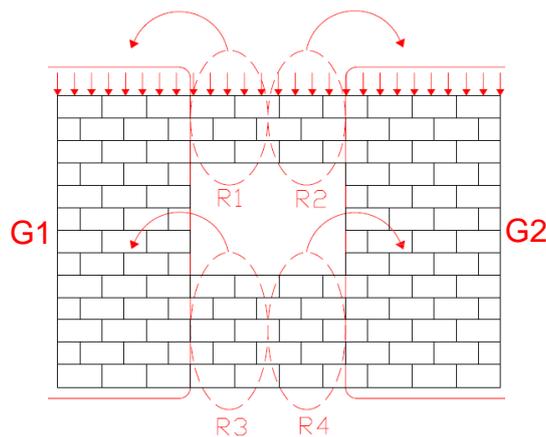


Figura 5 – Contribuição dos trechos sobre as aberturas (DEFENDI, 2006).

A Figura 6 apresenta o arranjo arquitetônico do pavimento tipo, com suas dimensões e o esquema do diagrama unifilar do pavimento, onde são destacados os grupos de paredes denominados pela letra G, seguidos de um número sequencial. Devido à simetria do pavimento, os grupos se repetem e, portanto, apenas os grupos identificados foram analisados.

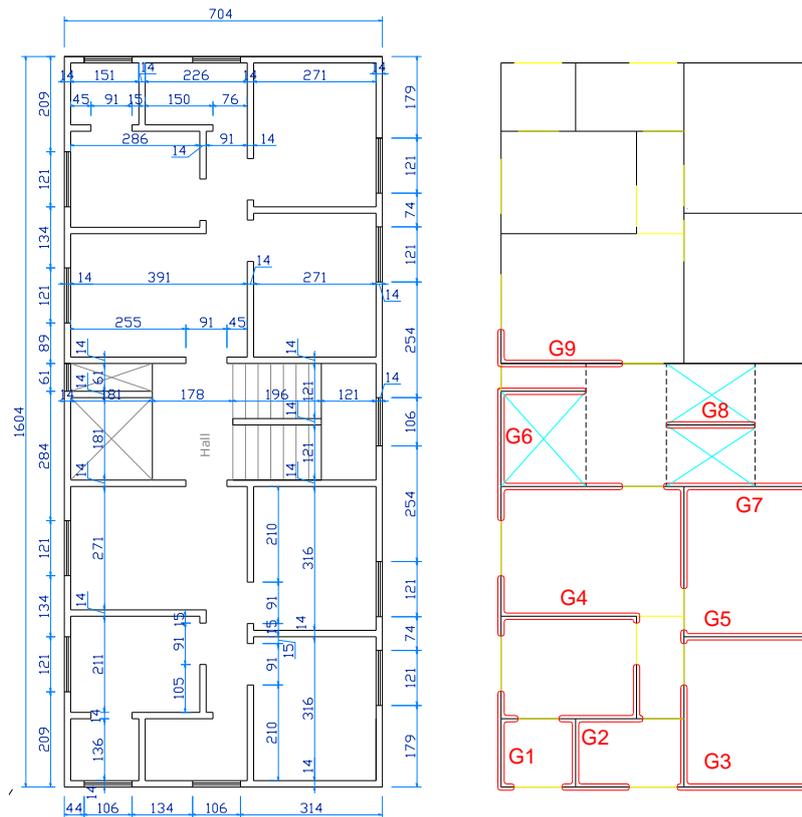


Figura 6 – Arranjo arquitetônico e diagrama unifilar do pavimento tipo do edifício.

5.2 Tensão de cisalhamento na interface das paredes devida ao carregamento vertical

Para melhor entendimento, foi adotada a seguinte nomenclatura para representação dos grupos: algarismos romanos representam encontros de paredes e algarismos arábicos representam os trechos das paredes (Figura 7). Assim, por exemplo, para o grupo 6, as interfaces serão referidas como: I-1, I-2, I-3, II-2 e II-4.

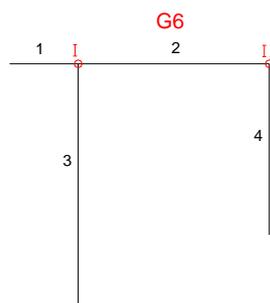


Figura 7 – Diagrama unifilar do grupo 6.

A tensão de cisalhamento média na interface foi obtida pela razão entre a força transmitida pela interface vertical e a sua área. Essa força é calculada pela diferença entre as forças no topo e na base da parede, enquanto a área da interface é dada pelo produto da altura da parede (distância de piso a teto) pela sua espessura. A tensão de cisalhamento máxima foi obtida através do procedimento estabelecido por Corrêa e Page (2001), que estipula este valor como o triplo da tensão média. Os resultados obtidos para o grupo 6 são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tensões de cisalhamento em cada uma das interfaces do grupo 6

Encontro	Trecho	(F _{topo} -F _{base}) (kN)	$\tau_{\text{médio}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)
I	1	3,58	0,0094	0,0282
I	2	13,97	0,0366	0,1101
I	3	10,39	0,0273	0,0819
II	2	7,56	0,0198	0,0595
II	4	7,56	0,0198	0,0595

5.3 Ações devidas ao vento e desaprumo

As análises foram desenvolvidas para ação do vento considerada simétrica, separadamente, para duas direções principais de atuação, ortogonais entre si, X e Y. As paredes são identificadas por PX ou PY, conforme sejam paralelos à direção do eixo X ou Y, seguidos por seus números.

O edifício foi modelado com o auxílio do programa LASER³ que utiliza o método dos Elementos Finitos. O programa possui em sua biblioteca elementos de barra tridimensional, necessários à modelagem dos painéis. Assim, serão apresentadas as características mais relevantes para seu entendimento. Na modelagem, foi incorporada a deformação por cisalhamento e os efeitos causados por empenamento.

Considerando o vento de baixa turbulência, foram determinados os coeficientes de arrasto nas direções X (C_{a_x}) e Y (C_{a_y}), sendo estes valores iguais a 1,02 e 1,44, respectivamente. Adotou-se a velocidade básica do vento (V_0) de 40 m/s, os coeficientes de ajuste S_1 e S_3 iguais a 1 e 2, respectivamente. O terreno de rugosidade categoria IV, a classe variando de acordo com a maior dimensão do edifício, que para o caso desse edifício de 16 pavimentos corresponde à classe B, pois a maior dimensão está entre 20 m e 50 m. A partir dessas informações, foi possível montar a Tabela 2, que contém o fator S_2 , a velocidade característica V_k , a pressão dinâmica q e as forças horizontais devidas ao vento em cada pavimento nas direções X e Y. A área da superfície perpendicular à direção do vento engloba meio pé-direito abaixo e acima do pavimento.

Tabela 2 – Forças horizontais devidas ao vento

Nível	Cota (m)	S2	V _k (m/s)	q (kN/m ²)	F _x (kN)	F _y (kN)
1	2,80	0,71	28,42	495,06	10,00	31,99
2	5,60	0,77	30,99	588,73	11,89	38,04
3	8,40	0,82	32,60	651,54	13,16	42,10
4	11,20	0,84	33,80	700,12	14,14	45,24
5	14,00	0,87	34,75	740,29	14,95	47,83
6	16,80	0,89	35,55	774,81	15,65	50,07
7	19,60	0,91	36,24	805,26	16,27	52,03
8	22,40	0,92	36,85	832,59	16,82	53,80
9	25,20	0,94	37,40	857,47	17,32	55,41
10	28,00	0,95	37,90	880,36	17,78	56,89
11	30,80	0,96	38,35	901,59	18,21	58,26
12	33,60	0,97	38,77	921,42	18,61	59,54
13	36,40	0,98	39,16	940,04	18,99	60,74
14	39,20	0,99	39,52	957,62	19,34	61,88
15	42,00	1,00	39,87	974,28	19,68	62,95
16	44,80	1,00	40,19	990,12	20,00	63,98

³ Programa em Elementos Finitos desenvolvido na Escola de Engenharia de São Carlos.

O ângulo de desaprumo (ψ) encontrado foi $0,001494 \text{ rad}$, o peso do pavimento tipo (ΔP) obtido pela soma das forças verticais foi $987,46 \text{ kN}$ e a força horizontal correspondente ao desaprumo (F_d) foi $1,48 \text{ kN}$ para as direções X e Y. A Tabela 3 apresenta os valores dos esforços cortantes e momentos fletores globais nas direções X e Y para os quatro níveis do edifício.

Tabela 3 – Esforços globais nas direções X e Y

Nível	DIREÇÃO X			DIREÇÃO Y		
	Força (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN.m)	Força (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN.m)
1	11,48	286,43	7386,03	33,46	864,34	22391,01
2	13,37	274,96	6584,02	39,52	830,88	19970,86
3	14,64	261,59	5814,13	43,57	791,36	17644,41
4	15,62	246,95	5081,68	46,71	747,78	15428,61
5	16,43	231,34	4390,20	49,31	701,07	13334,81
6	17,13	214,91	3742,46	51,54	651,76	11371,82
7	17,74	197,78	3140,72	53,51	600,22	9546,89
8	18,29	180,04	2586,93	55,27	546,71	7866,28
9	18,80	161,75	2082,82	56,88	491,44	6335,49
10	19,26	142,95	1629,93	58,36	434,56	4959,46
11	19,69	123,69	1229,67	59,73	376,20	3742,70
12	20,09	104,00	883,34	61,01	316,46	2689,35
13	20,46	83,92	592,13	62,22	255,45	1803,25
14	20,82	63,45	357,16	63,35	193,23	1087,99
15	21,16	42,63	179,50	64,43	129,88	546,94
16	21,48	21,48	60,13	65,45	65,45	183,27

5.4 Discretização

A Figura 8a e 8b apresenta os encontros das barras do modelo na distribuição das paredes do grupo 6. Cada parede possui um nó em cada pavimento no centro de gravidade da seção retangular que a representa, bem como nós definidos pelas interseções de paredes. O nó do centro de gravidade é utilizado para incidência das barras verticais. A parede PX3 possui três barras rígidas. Observe-se que os números das barras estão indicados no interior de retângulos. A primeira barra [1] possui a extremidade inicial articulada, no nó 96, pois corresponde a um ponto extremo na modelagem da parede e a outra extremidade contínua (nó 97). A segunda barra [2] disposta entre os nós 97 e 48, não tem liberação de vínculos em suas extremidades. Na extremidade inicial da terceira barra [3] não há liberação de vínculos, pois corresponde à continuidade com o elemento vertical (nó 48) e a extremidade final é articulada, pois o nó 98 corresponde a um ponto extremo na modelagem da parede e está simulando a interação entre as paredes PX3 e PY11. No caso da extremidade inicial da primeira barra não interagir com outra parede ou com algum lintel, ela se torna desnecessária no modelo, podendo ser removida. A Figura 8c apresenta um diagrama unifilar tridimensional para o edifício em análise.

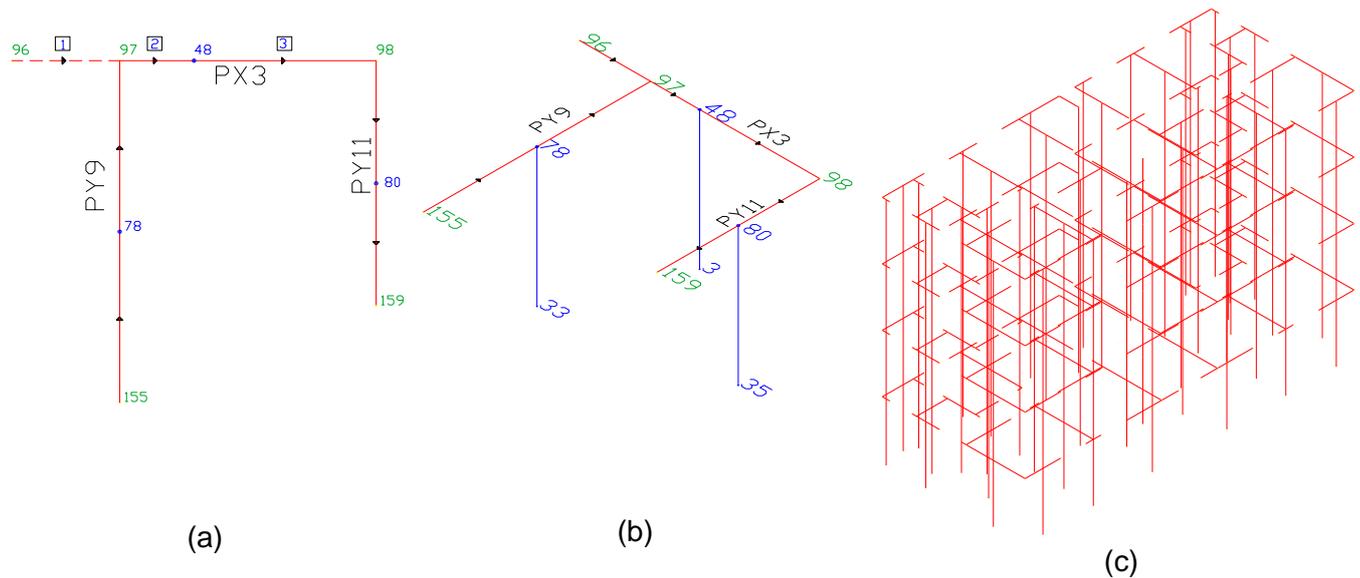


Figura 8 – (a) Discretização das paredes em elementos de barra tridimensional; (b) Detalhe da incidência das barras verticais no modelo tridimensional; (c) Modelo tridimensional de paredes.

5.5 Tensão de cisalhamento na interface das paredes devida ação horizontal

A tensão de cisalhamento na interface vertical das paredes foi calculada pela Eq. (1), com os valores dos esforços cortantes obtidos na extremidade das barras horizontais que se interceptam e a área de interseção sendo o produto da altura da parede pela sua espessura.

Os valores das tensões de cisalhamento nas interfaces do grupo 6 devidas às ações horizontais na direção X no primeiro nível do edifício estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tensões de cisalhamento nas interfaces do grupo 6 devidas às ações horizontais.

Nível	Encontro	Trecho	τ_H (MPa)
1	I	1	0,0000
	I	2	0,0767
	I	3	0,0767
	II	2	0,1041
	II	4	0,1041

6 SOLICITAÇÃO DE INTERFACES DE PAREDES: AÇÕES COMBINADAS

6.1 Composição dos carregamentos vertical e horizontal

A avaliação do nível das tensões de cisalhamento na interface das paredes interconectadas, considerando a aplicação simultânea do carregamento vertical e das ações horizontais foi feita mediante o princípio da superposição dos efeitos. A Figura 9 esquematiza o procedimento de avaliação das interfaces das paredes.

Primeiramente é necessário verificar a resistência das interfaces considerando apenas o carregamento vertical, pois estas podem ocorrer mesmo na ausência das ações horizontais. Caso ela não possua capacidade de transmissão das forças cisalhantes, o processo torna-se iterativo, excluindo-se a possibilidade de interação nessa interface. Esse processo deve se repetir até que o nível de solicitação das interfaces não exceda os limites de resistência. Após a definição das interfaces que estarão resistindo aos esforços causados pelas ações verticais, procede-se o cálculo

das tensões de cisalhamento provocadas pelas ações horizontais. Em seguida combinam-se as ações e avaliam-se as resistências das interfaces. Aqui, novamente, no caso de alguma interface não ter capacidade suficiente para absorver a solitação da combinação, o processo deve ser submetido a uma nova iteração, desconsiderando-se a interação correspondente à interface que não resistiu.

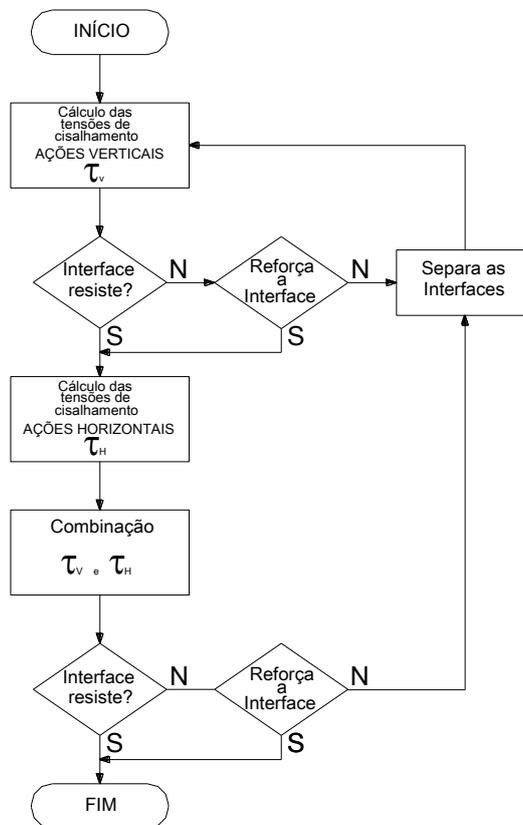


Figura 9 – Esquema do procedimento para avaliação das tensões de cisalhamento nas interfaces das paredes interconectadas.

Cabe observar que ao invés de se desconsiderar a interface com resistência insuficiente (seja causada pelo carregamento vertical ou pela combinação com o horizontal) pode-se, alternativamente, reforçar esta interface de modo que ela tenha resistência suficiente para absorver a solitação atuante. Nesse caso é importante que sejam conhecidos os procedimentos de reforço, bem como os acréscimos de resistência que eles permitam adicionar à interface vertical. Supondo a integridade de todas as interfaces após aplicação do carregamento vertical, superpõe-se as ações horizontais e encontra-se novas tensões cisalhantes nas interfaces.

Como exemplo para primeira iteração, a Tabela 5 apresenta os valores das tensões devidas à combinação das ações verticais e horizontais na direção X da Edificação Padrão de dezesseis pavimentos do grupo 6. Esses valores são confrontados com as resistências prescritas pela ABNT NBR 10837:1989 e pelo texto base para sua revisão.

Tabela 5 – Verificação das resistências das interfaces da Edificação Padrão - 16 Pavimentos

Grupo	Encontro	Trecho	$\tau_v + \tau_h < 0,20$ (MPa)	$1,3\tau_v + 1,4\tau_h < 0,14$ (MPa)
6	I	1	0,0282	0,0367
	I	2	0,1868	0,2505
	I	3	0,1586	0,2138
	II	2	0,1637	0,2232
	II	4	0,1637	0,2232

A tensão final em algumas interfaces, após as combinações, excederam os valores das resistências, determinadas de acordo com o texto base para a revisão da ABNT NBR 10837. Diante disso, e supondo-se que nenhum reforço foi feito, as tensões devem ser recalculadas para as ações verticais, segundo procedimento descrito anteriormente, desconsiderando-se a interação correspondente a essas interfaces que não obtiveram resistência suficiente para absorver a sollicitação. Em termos práticos, isso significaria alterar a modulação das paredes nessa região, considerando-se uma junta a prumo com armaduras apenas construtivas cruzando a interface. Assim, inicia-se a segunda iteração do processo. Esse procedimento deve se repetir até que as tensões obtidas não excedam os limites de resistência em questão.

A Tabela 6 apresenta o número e a porcentagem de interfaces que ultrapassaram os limites para resistência ao cisalhamento estabelecidos nos códigos normativos. São apresentados tanto os resultados para o carregamento exclusivamente vertical como para a sua combinação com as ações horizontais.

Os valores das ações combinadas são referentes às quatro alternativas do edifício padrão (quatro, oito, doze e dezesseis pavimentos) e às direções X e Y conforme indicações na tabela (Hx e Hy, respectivamente). Para o carregamento vertical, foi considerada a homogeneização total das tensões verticais de compressão ao longo do pé-direito de um pavimento. Diante disso, e por se tratar de pavimentos tipo, os valores para todas as variações do número de pavimentos do edifício não se alteram.

Tabela 6 – Número de interfaces que falharam na Edificação Padrão

Critério	Carregamento								
	Vertical	Ações Combinadas							
		4 PAV		8 PAV		12 PAV		16 PAV	
	Hx	Hy	Hx	Hy	Hx	Hy	Hx	Hy	
ABNT NBR 10837:1989 ($\tau_V + \tau_H \leq 0,20 \text{ MPa}$)		-	-	-	-	-	1 (1%)	-	10 (13%)
Texto para revisão da ABNT NBR 10837 ($1,3\tau_V + 1,4\tau_H \leq 0,14 \text{ MPa}$)	1 (1%)	1 (1%)	2 (3%)	2 (3%)	6 (8%)	8 (10%)	22 (28%)	14 (18%)	30 (38%)

Comparando-se os valores apresentados, observa-se um número significativo de interfaces que não atenderam o critério de resistência estabelecido pelas normas em questão, principalmente em relação aos limites prescritos no texto para revisão da ABNT NBR 10837.

Diante disso, são discutidas algumas possíveis razões para tais resultados. Primeiramente, para obtenção das tensões de cisalhamento nas interfaces quando submetidas às ações verticais, o procedimento utilizado teve como base o proposto por Corrêa e Page (2001), que utiliza um valor de pico de tensão igual ao triplo da tensão média. Entretanto, os autores comentam que simulações alternativas realizadas com dobro do valor médio também se mostraram satisfatórias para a representação da força total transferida pela interface. É necessário acrescentar que as análises que embasaram o método foram lineares, não contemplando, portanto, a plastificação ou a redistribuição de tensões, o que favoreceria a redução dos picos de tensão. Ainda nesse contexto, pode-se incluir como uma das razões para este grande número de interfaces que não se enquadram nos padrões normatizados, os próprios valores de resistência que essas normas estabelecem. Diante dessa necessidade, buscou-se encontrar alguns valores característicos das tensões de cisalhamento obtidos através de alguns poucos testes já realizados no Brasil. Os valores característicos das tensões de cisalhamento encontrados por alguns autores são apresentados em resumo na Tabela 7.

Ao analisar os resultados mostrados na Tabela 7, verificam-se valores característicos acima dos adotados pelas normas. Isso também pode ser uma das razões pela qual houve um grande

número de interfaces que não atingiram os limites fornecidos, sendo, portanto, necessárias maiores investigações para se chegar a um valor a ser utilizado em projetos. Cabe ressaltar que na prática usual no Brasil não se tem informações sobre um grande número de paredes que apresentem patologias devidas ao cisalhamento nas interfaces. Isso parece indicar a necessidade de calibração do valor normalizado.

Tabela 7 – Valores característicos de tensão de cisalhamento obtidos experimentalmente

Autor	Qtde CP	Escala	Material	Fator	$f_{vm} (MPa)$ ($f_m \times fator$)	$f_{vk,est} (MPa)$ ($f_{vm}/1,2$)	$f_v (MPa)$ ($f_{vk,est}/2,5$)
SILVA (2003)	2	Natural	Cerâmica	-	0,91	0,76	0,30
MAURÍCIO (2005)	3	Natural	Concreto	-	0,88	0,73	0,29
CAPUZZO NETO (2005)	5	1:3	Cerâmica	0,48	1,32**	1,1	0,44
MOREIRA (2007)	6	1:3	Cerâmica	0,48	1,20**	0,92*	0,37

* Valor obtido estatisticamente segundo ABNT NBR 8798:1985.

** Valor convertido para escala natural.

A tensão de cisalhamento admissível segundo a ABNT NBR 10837:1989 é 0,15 MPa. Quando se incluem as ações horizontais, pode-se majorar esse valor em 33%, chegando a 0,20 MPa. O valor prescrito pelo texto base para revisão da referida norma é 0,35 MPa que quando dividido pelos coeficientes γ_m , correspondente ao material e γ_f , para obter-se a combinação crítica das ações, assume o valor aproximado de 0,11 MPa, que seria o correspondente à tensão admissível. Esse valor equivale a aproximadamente 50% do utilizado pelo texto da atual ABNT NBR 10837:1989. Isso significa que para se obter um valor de referência equivalente ao da atual norma, o texto base da revisão poderia adotar, no mínimo, 0,70 MPa como valor característico da resistência de cisalhamento da interface. Observe-se que esse valor é menor que todos os apresentados na Tabela 7 e se aproxima do resultado disponível para bloco de concreto.

7 CONCLUSÕES

Foram realizadas comparações das resistências de cisalhamento estabelecidas pelas normas de referência com valores característicos obtidos experimentalmente por alguns pesquisadores brasileiros. Apesar de serem poucos os valores experimentais disponíveis, foi feita uma análise crítica preliminar do valor que a norma brasileira poderia adotar como resistência característica, de modo a contemplar simultaneamente a economia a segurança das estruturas de alvenaria.

As análises realizadas mostraram que o texto base para revisão da norma brasileira é mais restritivo quando comparado com o texto da norma atualmente em vigor. Como na prática não se tem informações de grandes problemas na região da interface das paredes dos edifícios de alvenaria estrutural, buscou-se um valor de resistência característica que correspondesse ao da ABNT NBR 10837:1989 atual, levando em conta os valores experimentais disponíveis. O valor encontrado foi de 0,70 MPa, que corresponde ao dobro do valor proposto pelo texto base. Com esse novo valor de resistência, foram feitas análises adicionais que levaram a uma significativa redução do número de interfaces com problemas. Observa-se, porém, que como o número de experimentos é pequeno, ainda se faz necessário estender as investigações experimentais para os materiais utilizados no Brasil.

8 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA. Manual técnico de alvenaria. São Paulo, ABCI / Projeto, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.837**: Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. Rio de Janeiro, 1989.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5628**: Code of practice for Structural use of masonry. Part 1. Unreinforced masonry. Londres, Inglaterra, 1992.

CAPUZZO NETO, V. **Estudo teórico e experimental da interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas a ações verticais**. 2000. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

CAPUZZO NETO, V. **Interação de paredes em alvenaria estrutural sob ações verticais**. 2005. 321p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CAPUZZO NETO, V.; CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. Shear strength of vertical interfaces of intersecting walls. In: 10TH NORTH AMERICAN MASONRY CONFERENCE. Boulder, Saint Louis, CO: The Masonry Society, 2007. v. 1. p. 872-883.

CORRÊA, M. R. S. **Fluxo de forças em edifícios de alvenaria estrutural**. 2003. 156p. Tese (Livredocência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CORRÊA, M. R. S.; PAGE, A. W. **The interaction of load-bearing masonry walls subjected to vertical loads**. Callaghan, Australia, The University of Newcastle, 2001. 62p. (Research report n. 218.12.2001)

CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. A simple finite element based model for evaluating the interaction of load bearing walls subjected to vertical loading. **Construction and Building Materials, Elsevier**, v. 18, p. 77-89, 2004.

DEFENDI, R. A. **Cisalhamento na interface vertical de paredes de alvenaria estrutural**. 2006 (Relatório de Iniciação Científica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

DEUTSCH INDUSTRIE NORMEN. **DIN 1053**. Alvenaria: Cálculo e Execução, 1974.

MAURÍCIO, R. M. **Estudo teórico e experimental das ligações diretas contrafiadas entre paredes de blocos de concreto em escala real e reduzida 1:4**. 2005, 209p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2005.

MOREIRA, E. M. S. **Análise experimental em escala reduzida de ligações entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos submetidas a ações verticais**. 2007. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

NASCIMENTO NETO, J. A. **Investigação das solicitações de cisalhamento em edifícios de alvenaria estrutural submetidos a ações horizontais**. 1999. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

NASCIMENTO NETO, J. A.; CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. Efeitos do vento sobre edifícios de alvenaria estrutural. **Téchne**, v. 14, n. 108, p. 56-61, mar., 2006.

OLIVEIRA JR, V.; PINHEIRO, L. M. Análise de paredes de alvenaria estrutural calculadas no estado limite último. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 5., Florianópolis, Brazil, 21-24 Aug. 1994. **Proceedings**. Florianópolis, Univ. Fed. Santa Catarina / University of Edinburgh / ANTAC, pp.295-304.

SILVA, I. M. **Análise de edifícios de alvenaria estrutural sujeitos as ações do vento**. 1996. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

SILVA, W. J. **Estudo experimental de ligações entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos sujeitas a ações verticais**. Ilha Solteira, 2003. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2003.

SINHA, B. P.; HENDRY, A. W. Compressive strength of axially loaded brick walls stiffened along their vertical edges. In: INTERNATIONAL BRICK MASONRY CONFERENCE, 5., Washington, USA, 05-10 Oct. 1979 **Proceedings**. Washington, Brick Institute of America, p.254-261.