



Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

RESUMO

Este trabalho trata da distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural, com a possibilidade de se considerar uma homogeneização desses carregamentos ao longo da altura da edificação. Inicialmente são discutidos os mecanismos que permitem que ocorra essa uniformização das cargas, bem como os procedimentos construtivos que a potencializam. Em seguida, descreve-se um procedimento computacional para realizar análises de edifícios com a possibilidade dessa homogeneização. Com a utilização desse procedimento é discutido um exemplo de edifício, com e sem a consideração da uniformização, e são discutidos os resultados obtidos, inclusive com respeito à economia alcançada. Por fim, são apresentadas as conclusões sobre as análises realizadas.

INTRODUÇÃO

Uma importante consideração em edifícios de alvenaria estrutural é a distribuição das cargas verticais entre as paredes portantes da edificação. Assim, para maior clareza, deve inicialmente definir o que é uma parede portante, ou seja, como se considera a divisão da estrutura nesses elementos estruturais. Usualmente uma parede é considerada como um trecho de alvenaria onde não haja aberturas ou mudança de sua direção. Portanto, a ocorrência de uma abertura ou mudança de direção em planta caracterizariam o limite entre paredes. Dessa forma, toda a estrutura do edifício seria dividida em um certo número desses elementos estruturais, que seriam considerados os entes básicos para a análise da edificação.

Existem dois procedimentos extremos que podem ser adotados para a distribuição das ações verticais atuantes sobre o edifício entre as suas diversas paredes. O primeiro seria considerar-se as paredes totalmente independentes umas das outras. Nesse caso a carga que se supõe atuando sobre uma determinada parede continua exclusivamente sobre essa mesma parede, não havendo qualquer interação desse elemento estrutural com os elementos vizinhos. Esse procedimento é recomendado por alguns autores, em especial aqueles que enfocam o dimensionamento como um estado limite último, [1] e [2], e representa uma maneira bastante simples e segura de se realizar a distribuição das cargas verticais. Entretanto, esse é um procedimento que apresenta falhas evidentes quanto aos aspectos econômicos. Isso ocorre porque um edifício normalmente apresenta carregamento nas paredes de valores muito diferentes e a tendência é a obtenção de blocos de resistência também muito diferentes para a execução desses elementos. Entretanto, como não é viável a utilização de blocos de resistências diferentes em um mesmo pavimento da edificação.

O outro procedimento extremo que pode ser adotado é a completa uniformização das cargas verticais entre as paredes do edifício. Nesse caso é como se não se considerasse a existência de diversas paredes distintas, sendo que todas estariam submetidas à mesma tensão : a carga total dividida pela área de todas as paredes portantes. Também é um procedimento de análise evidentemente muito simples e por sua vez extremamente econômico. Mas sua deficiência está na segurança, pois a interação entre as paredes precisaria ser total e absoluta para que os resultados assim obtidos fossem compatíveis com a realidade. Entretanto, essa interação tão completa seria difícil de ser obtida na prática, exceto em caso excepcionais.



Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

Do que foi colocado pode-se concluir que o ideal é a consideração de um procedimento alternativo intermediário que contemple aspectos de segurança e economia e represente uma análise mais próxima da realidade estrutural. Alguns autores, em especial aqueles que estudam a alvenaria sob o enfoque das tensões admissíveis, [3], costumam admitir a uniformização das cargas, particularmente em bordas e cantos. A opinião dos autores deste trabalho é que essas interações devem realmente ser consideradas, tanto em cantos e bordas como também junto a aberturas, mesmo que o dimensionamento seja realizado pelo estado limite último. Essa postura é consagrada quando se trata do concreto armado e não existe um motivo plausível para que deva ser diferente no caso da alvenaria. Entretanto, para a implementação desse procedimento existem dois problemas a serem resolvidos :

- a) Avaliar as forças de interação que ocorrem entre as paredes
- b) Definir procedimentos computacionais que possam tornar exeqüíveis as análises a serem realizadas.

Os próximos itens tratam exatamente dessas questões, de modo a se ter o fundamento e a procedimento executivo para a realização desse tipo de análise.

INTERAÇÃO ENTRE PAREDES

A interação entre paredes adjacentes somente ocorrerá se na ligação entre esses elementos puderem se desenvolver forças de interação. Assim, de acordo com a definição de uma parede de alvenaria, apresentada no item anterior, pode-se supor a consideração de forças de interação em dois casos principais :

- a) Interação em cantos e borda.
- b) Interação através de aberturas.

No caso dos cantos e bordas, a principal característica a ser analisada para se verificar a existência das forças de interação é a amarração dos blocos componentes. Nesse caso, é praticamente impossível a ocorrência de deslocamentos relativos entre as paredes, a menos que se verifique uma ruptura no local. Portanto, havendo essa amarração, forças de interação de valores significativos estarão garantidas, ver Figura 1. Existem ainda alguns procedimentos construtivos que tornam ainda mais segura a existência dessas forças, como por exemplo, a utilização de cintas à meia altura e sob a laje do pavimento. Por outro lado, a inexistência de amarração entre as paredes consideradas praticamente elimina a possibilidade da ocorrência das forças de interação e conseqüentemente o espalhamento e uniformização das cargas que atuam em um ou outro elemento.

Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

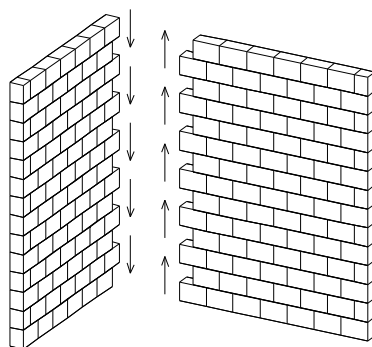


Figura 1. Interação entre paredes em um canto

Quanto à interação através de aberturas, pode-se considerar que também nesse caso normalmente ocorrerão forças de interação entre os elementos, ver Figura 2. Não se pode esquecer que em casos usuais de janelas ainda se tem aproximadamente $2/3$ da distância entre pavimentos preenchida com material, sendo que essa altura se reduz a aproximadamente $1/3$ no caso de portas. Também neste caso alguns procedimentos construtivos podem tornar a consideração das forças de interação ainda mais segura, como por exemplo existência de vergas, contravergas e cintas que passem ao redor da abertura e penetrem nas paredes adjacentes. Entretanto, também neste caso, a inexistência de amarração praticamente elimina as forças de interação e conseqüentemente o espalhamento e uniformização de cargas através da abertura.

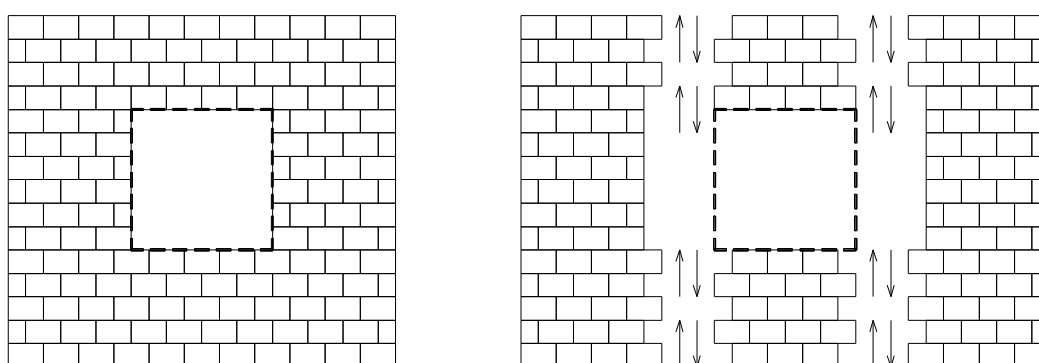


Figura 2. Interação entre paredes em região de janela



Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

Portanto, o procedimento de distribuição de cargas verticais somente pode ser definido após uma clara avaliação desses níveis de interação entre paredes, seja em cantos ou em aberturas, de modo a não se violar condições reais de trabalho da estrutura. Se for possível a ocorrência de forças de interação relativamente grandes isso significará um espalhamento do carregamento e portanto uma uniformização das cargas entre essas paredes. Em caso contrário, o espalhamento e a uniformização do carregamento podem se dar em níveis muito baixos. A correta avaliação da magnitude dessas interações obrigatoriamente deve ser realizada pelo projetista, tendo em conta os parâmetros mencionados neste item.

PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL PARA DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS

Para a automatização dos procedimentos de distribuição com interação entre as paredes portantes criou-se um programa computacional no qual a estrutura a ser analisada tem sua geometria e carregamentos discretizados, adotando-se um procedimento semelhante à discretização de uma estrutura de barras convencional, como por exemplo uma grelha. Dessa forma se pode não só analisar um edifício de forma rápida e segura como também efetuar modificações e reprocessar a estrutura repetidas vezes, sem a possibilidade de erros algébricos. Além disso através da definição de grupos e macrogrupos de paredes, discutidos com maiores detalhes mais a frente, é fácil, rápido e seguro analisar-se a estrutura como um conjunto de paredes trabalhando com diferentes taxas de interação, de modo que os resultados obtidos sejam adequados.

Inicialmente devem ser fornecidos alguns parâmetros gerais da estrutura, como por exemplo : unidades dimensionais adotadas, distância entre pavimentos, espessura de paredes e número de pavimentos. Em seguida define-se a geometria da estrutura em planta, através de elementos próprios para tal fim e que serão mais detalhadamente discutidos à frente. Por fim a estrutura deve ser carregada para que durante o processamento possam ser obtidos os resultados das forças e tensões atuantes em cada parede.

Definição da Geometria

Para a definição da geometria da estrutura podem ser utilizados os seguintes elementos : Pontos, Segmentos, Grupos e Macrogrupos, que serão brevemente descritos a seguir.

a) Pontos

Localizações geométricas de extremos de segmentos, de forma semelhante aos nós de uma análise matricial convencional. São definidos por X e Y, coordenadas cartesianas planas em relação a uma origem adotada.

b) Segmentos



Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

Representam trechos retos de alvenaria, semelhantes às barras de uma análise matricial convencional. Podem ser de dois tipos básicos : paredes portantes, chamados simplesmente parede, ou paredes não-portantes, que podem ser : janela, porta ou abertura total. Seus atributos são : pontos inicial e final, tipo, altura e espessura. Caso não tenha sido definida a altura de um segmento o programa adotará automaticamente os seguintes valores : h para paredes, 2h/3 para janelas, h/3 para portas e zero para as aberturas, sendo h a altura das paredes do andar correspondente. Já para a espessura, caso não seja explicitamente fornecida, o programa adotará o valor genérico especificado. É importante salientar que segmentos não-portantes serão considerados apenas meios de se adicionar carregamentos na estrutura, seja o peso próprio ou outros carregamentos sobre eles definidos.

c) Grupos

São conjuntos de segmentos parede que estarão sempre submetidos a uma mesma carga e portanto a uma mesma tensão. Os atributos são exatamente o número dos segmentos componentes. Qualquer carregamento que seja definido sobre um determinado segmento de um grupo será distribuído imediatamente pelos demais. Portanto, um grupo é um conjunto de segmentos que apresentam interação total e imediata. Todos os segmentos portantes definidos devem pertencer a um grupo, mesmo que seja apenas o único componente, pois o programa apresenta seus resultados por grupos. Por outro lado, segmentos não portantes não podem participar de grupos. Para evitar erros o próprio programa verifica a consistência dos dados fornecidos avisando os possíveis erros cometidos.

d) Macrogrupos

São conjuntos de grupos cujos carregamentos interagem segundo uma determinada taxa. É um recurso opcional que permite realizar a distribuição do carregamento vertical definindo taxas de interação diferentes entre as diversas partes da estrutura. Dessa forma o projetista tem a possibilidade de representar com fidelidade o comportamento das forças de interação nos diversos pontos da estrutura, ficando com grande liberdade para modelar a estrutura de acordo com sua avaliação de qual deve ser o comportamento real. Os atributos do macrogrupo são : taxa de interação e relação dos grupos componentes. A taxa de interação poderá ser definida com qualquer valor entre zero e 1. Ela representa a parcela do diferencial de carga entre os diversos grupos componentes que deve ser uniformizada. A implementação da taxa pode ser resumida pelas seguintes expressões, considerando-se sua aplicação para um determinado nível :

$$q_m = (q_1 + q_2 + \dots + q_n) / n$$

$$d_i = (q_i - q_m) * (1 - t) \quad (1)$$

$$q_i = q_m + d_i$$

onde :

n = número de grupos componentes do macrogrupo.



Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

- Q_i = carga do grupo i.
- Q_m = carga média do macrogrupo.
- d_i = diferencial de carga do grupo em relação à média do macrogrupo.
- t = taxa de interação.

A análise do fator $(1 - t)$, que multiplica a diferença entre a carga no grupo e carga média do macrogrupo, confirma que a taxa t pode ser vista como uma representação da percentagem da diferença a ser uniformizada. Assim, $t = 0,25$ significa que 25% da diferença estará sendo uniformizada a cada pavimento, ou seja, 75% da diferença continuará sem uniformização. Esse procedimento é interessante pois, apesar de simples, garante que não se crie ou se perca cargas no processo, o que obviamente é condição indispensável para a viabilidade de sua aplicação.

Definição do Carregamento

A definição do carregamento pode ser feita de maneira muito confortável, através de conjuntos de cargas distribuídas que atuam em segmentos ou conjunto de cargas concentradas que atuam em pontos. Cada conjunto pode ser definido em um ou mais níveis, ou seja em um ou mais pavimentos. Importante ressaltar-se que o peso próprio, tanto dos segmentos portantes como não-portantes, é considerado automaticamente com os parâmetros do segmento e o peso específico da alvenaria .

Resultados Obtidos

Após a discretização da geometria e do carregamento a análise será executada de acordo com parâmetros estabelecidos. Como resultados obtêm-se as cargas e tensões atuantes em cada grupo, nível a nível. O programa também fornece os resultados considerando todos os grupos sem qualquer interação e a carga e a tensão médias em todos os níveis. Como os resultados obtidos estarão sempre entre esses extremos, esses valores servem de controle para o procedimento de uniformização executado.

Programas Pré e Pós-Processadores

Para tornar a análise ainda mais eficiente podem ser utilizados programas pré e pós-processadores. Por exemplo, um programa para cálculo do pavimento que inclusive faça automaticamente a montagem do carregamento nos segmentos. Nesse caso resta ao projetista a definição de uma ou outra carga adicional, como, por exemplo, as devidas a escada ou caixas d'água da edificação.

A discretização da estrutura traz uma vantagem adicional. O programa de distribuição pode executar a montagem de um arquivo para um programa de pórtico tridimensional que será utilizado na análise de esforços devidos à ação dos ventos, desaprumo e ações sísmicas. Esses pórticos poderão



Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

ser criados considerando-se lintéis ou paredes isoladas, de acordo com a opção do usuário.

Após essas duas análises já será possível se conhecer as tensões em todas as paredes portantes da edificação, seja por efeito das cargas verticais ou ações horizontais. Então, para completar a análise do edifício pode ser utilizado um outro programa computacional que, a partir dos resultados obtidos nas etapas anteriores, defina a resistência necessária para a alvenaria nível a nível, inclusive realizando dimensionamento de armaduras para resistir eventuais trações não admissíveis, verificando a tensão de cisalhamento das paredes e definindo eventuais pontos de grauteamento.

EXEMPLO

O exemplo a ser discutido é um edifício de alvenaria portante de nove pavimentos e distância entre pavimentos de 2,72 m, cuja planta apresenta-se na Figura 3. As paredes portantes externas e as que dividem os apartamentos têm espessura de 19 cm, sendo as restantes de 14 cm de espessura. Para se limitar a discussão aos elementos mais importantes, tomar-se-á a região inferior esquerda da edificação, ver Figura 4. Essa região foi dividida em paredes, de acordo com a definição do item 1, e analisada com quatro suposições de níveis de interação entre os elementos componentes :

- a) Paredes isoladas
- b) Grupos de paredes com interação $t = 0,0$
- c) Grupos de paredes com interação $t = 0,5$
- d) Grupos de paredes com interação $t = 1,0$

Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

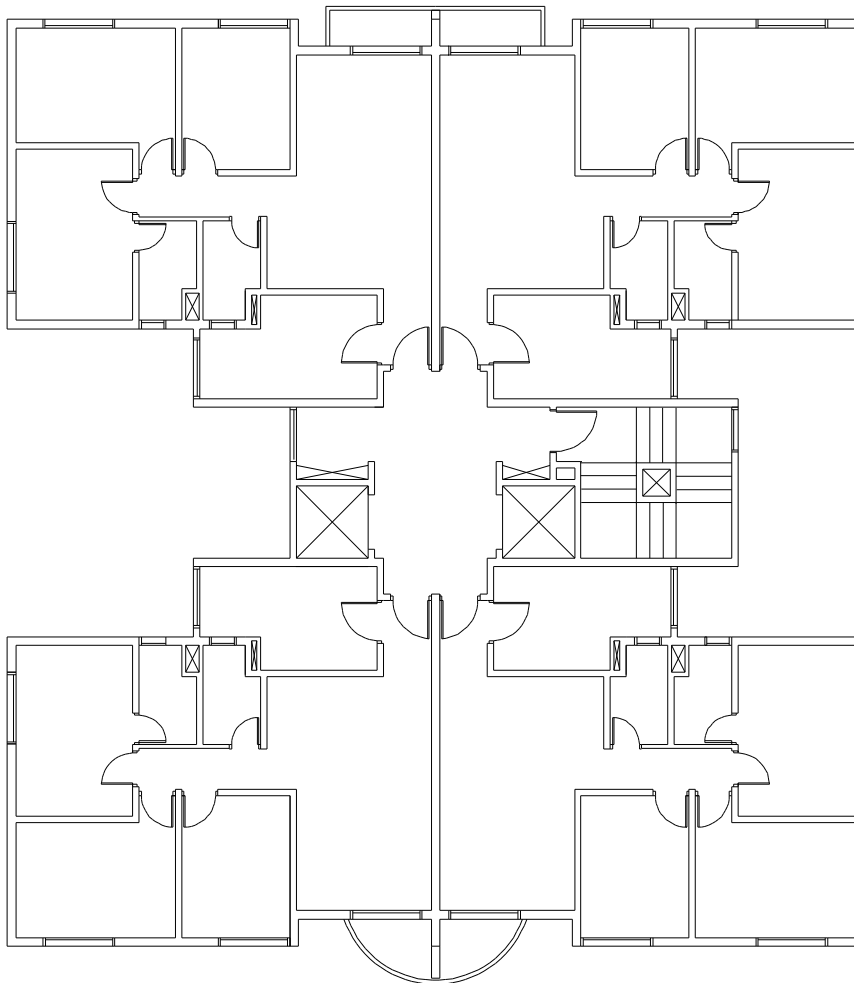


Figura 3. Planta completa do edifício exemplo

Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

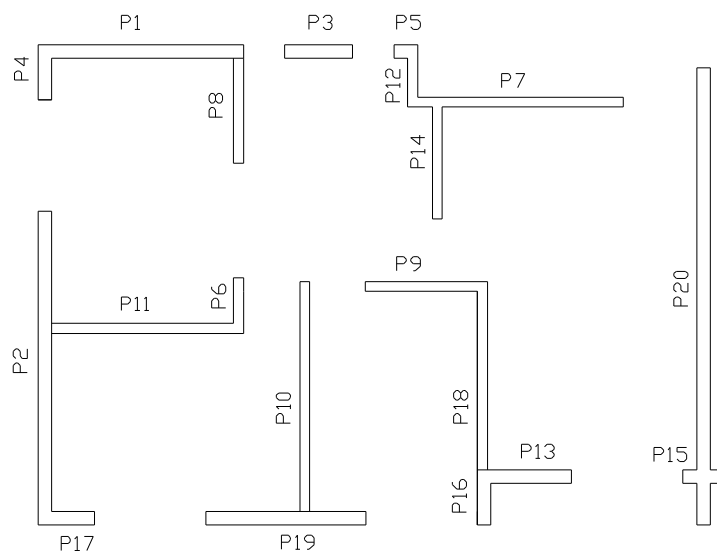


Figura 4. Definição de paredes para região inferior esquerda

Convém ressaltar que a interação suposta no item b, com $t = 0,0$, corresponde ao esquema de grupos isolados, ou seja, sem interação entre si. Já a interação suposta no item d corresponde a uma uniformização completa das cargas verticais entre os grupos analisados.

Os grupos foram definidos procurando isolar partes com carregamentos verticais de valores próximos e paredes de mesma espessura. Em alguns casos de paredes muito pequenas foram abandonados esses critérios e elas foram incluídas em grupos simplesmente por proximidade. A Tabela 1 apresenta os grupos e as paredes componentes de cada um.

Tabela 1. Grupos e paredes componentes

Grupo	Paredes componentes
G1	P2 e P17
G2	P6 e P11
G3	P1 e P4
G4	P19
G5	P10
G6	P9 e P18
G7	P8
G8	P5, P7, P12 e P14
G9	P13 e P16
G10	P3
G11	P15 e P20

Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

Quanto aos resultados obtidos para as quatro simulações mencionadas, eles serão apresentados por parede, independentemente delas estarem ou não agrupadas e desses grupos estarem interagindo ou não. Dessa forma poder-se-á comparar com maior facilidade os diversos resultados obtidos. A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos com as diversas simulações para o primeiro pavimento da edificação.

Através dos dados contidos na Tabela 2 pode-se observar algumas diferenças muito significativas na carga vertical atuante em algumas paredes. Normalmente são paredes de pequeno comprimento que se encontram adjacentes a uma abertura. No exemplo desenvolvido pode-se citar P4, P5, P6 e P15. Nesse caso, pode-se afirmar que é fundamental a consideração de um grupo entre essas paredes e as adjacentes, supondo que as forças de interação nesses casos serão suficientes para a uniformização das cargas. Se isso não for feito será praticamente impossível especificar blocos com resistência razoável.

Tabela 2. Resultados obtidos para as cargas nas paredes

Parede	Carga (kN/m)			
	Paredes Isoladas	Grupos t = 0,0	Grupos t = 0,5	Grupos t = 1,0
P1	103,9	121,3	149,9	153,5
P2	108,9	117,6	149,5	153,5
P3	260,9	260,9	165,4	153,5
P4	300,8	121,3	149,9	153,5
P5	328,5	166,3	154,9	153,5
P6	309,1	149,3	153,1	153,5
P7	158,8	166,3	154,9	153,5
P8	195,2	195,2	158,1	153,5
P9	155,1	146,0	152,7	153,5
P10	129,1	129,1	150,8	153,5
P11	114,8	149,3	153,1	153,5
P12	97,6	166,3	154,9	153,5
P13	193,4	190,4	157,6	153,5
P14	182,5	166,3	154,9	153,5
P15	577,2	201,3	158,8	153,5
P16	184,0	190,4	157,6	153,5
P17	164,3	117,6	149,5	153,5
P18	140,4	146,0	152,7	153,5
P19	148,8	148,8	153,0	153,5
P20	166,6	201,3	158,8	153,5

Já para as simulações que envolvem grupos de paredes, as diferenças continuam a ser expressivas, e agora isso não ocorre com paredes de pequenas dimensões, mas com as que estão isoladas das demais pela existência de aberturas. O caso mais significativo no exemplo é a parede P3. A redução do carregamento entre a não consideração da interação entre grupos e a consideração da

Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

interação com $t = 0,5$ é da ordem de 37%. Caso semelhante ocorre com uma parede de grande importância, a P20, que apresenta uma redução de 21% na carga vertical atuante.

Somente como comparação pode-se estimar a resistência à compressão da alvenaria necessária em cada caso simulado, sempre para o primeiro pavimento, de acordo com [4]. Para tanto serão utilizadas as tensões obtidas para cada parede, realizando-se o dimensionamento e tomando-se o maior valor obtido. Os resultados podem ser encontrados na Tabela 3. Ressalta-se que em correspondência direta com a resistência da alvenaria está a resistência do bloco, o item mais importante para se definir o custo de execução da estrutura.

Tabela 3. Resistências à compressão da alvenaria (em MPa)

Paredes isoladas	Grupos $t = 0,0$	Grupos $t = 0,5$	Grupos $t = 1,0$
16,0	8,2	6,7	6,5

Através dos resultados da Tabela 3 pode-se perceber que o processo utilizado para a distribuição das cargas verticais influencia de forma muito significativa os parâmetros de resistência a serem utilizados na alvenaria. Assim fica muito bem caracterizada a necessidade de se analisar a estrutura de alvenaria estrutural considerando-se as reais condições de existência de forças de interação entre seus diversos elementos.

CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que tanto o aspecto segurança como o econômico são muito influenciados pelo procedimento de distribuição das cargas verticais que se adota na análise da edificação.

A recomendação que se pode fazer é de que o procedimento de se considerar as paredes isoladas não é adequado à economia, devendo ser adotado apenas quando não existir amarração entre os elementos. Normalmente, a interação total entre todos os grupos também não é adequada por penalizar a segurança e necessitar de um nível de interação entre os elementos que não é facilmente atingido. Assim os procedimentos que consideram grupos de paredes com taxas de interação entre 0,0 e 0,5 parecem ser os mais adequados, pois resultam em dimensionamentos econômicos e, de acordo com a maioria das evidências obtidas por ensaios e análise de casos reais, representam o comportamento real das estruturas de alvenaria.

Entretanto, fundamental para se definir o procedimento a ser adotado é se fazer uma análise objetiva das condições existentes na edificação para o desenvolvimento das forças de interação. Elas é que devem balizar o esquema de distribuição a ser utilizado.

Finalmente é importante ressaltar que a existência de uma ferramenta computacional é que propicia a livre escolha do procedimento a ser adotado, eliminando a possibilidade de ocorrência de erros e permitindo ao projetista adotar tal ou qual modelo simplesmente pela sua conveniência estrutural.



Distribuição de cargas verticais entre paredes de edifícios em alvenaria estrutural

Marcio Antonio Ramalho¹
Márcio Roberto Silva Corrêa¹

REFERÊNCIAS

1. Hendry, A. W., "Structural Brickwork", Macmillan Press, London, England, 1981.
2. Hendry, A. W., Sinha, B.P., Davies, S.R., "An introduction to load bearing brickwork design", New York, Halsted Press, 1981.
3. Curtin, W.G., Shaw, G., Beck, J.K., Parkinson, G.I., "Structural Masonry Detailing", Granada Publishing, London, England, 1984.
4. British Standards Institution, "Code of Practice for Use of Masonry – Part 1. Structural Use of Unreinforced Masonry", BS 5628, London, UK, 1978.