

Estudo Numérico de Estrutura de Contenção em Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados

Bruno Ricardo da Silva

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco – PR, Brasil, brunorsilva@live.com

Rodolfo André Kuche Sanches

Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, rodolfo.sanches@usp.br

RESUMO: Com o objetivo de estudar o comportamento de painéis de alvenaria estrutural, que fazem parte da estrutura de muros de arrimo, quando submetidos à carga de empuxo do solo, foram desenvolvidas análises numéricas, com o emprego de elementos finitos, considerando características reais do solo e definição das características dos materiais a partir de ensaios em laboratório e levantamento bibliográfico. O modelo de muro de arrimo considerado é executado com painéis de alvenaria de blocos cerâmicos estruturais unidos por argamassa, suportados por contrafortes e vigas de concreto armado ou reforçados com contrafortes de blocos grauteados, trabalhando à compressão e à flexão. Nas análises foi considerado um modelo simplesmente apoiado na base e nas laterais, e outro com a base e laterais engastadas, ambos com a extremidade superior livre. O modelo computacional elaborado leva em conta parâmetros de resistência e rigidez, bem como carregamentos e dimensões dos materiais. O elemento finito utilizado é triangular de casca segundo a cinemática de Reissner e capaz de análise não linear geométrica com formulação baseada em posições. Quanto aos materiais que compõem o painel, foram buscados dados de resistência à compressão, resistência à tração, resistência ao cisalhamento, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, a partir de ensaios em laboratório e na literatura publicada. As características do solo foram definidas a partir de estudos publicados sobre a região de Pato Branco – PR. Foram estabelecidas dimensões variadas do painel, submetidos à carga do empuxo do solo, e fez-se o levantamento das tensões atuantes nos elementos, tensões principais e tensões de cisalhamento, as quais foram utilizadas para verificação da falha do muro, através do critério Morh-Coulomb, ou da tensão de cisalhamento nos planos. Por fim, verificou-se que, dentre as características estabelecidas, a dimensão máxima do painel que não romperia quando submetido à carga solicitante era de 90x100cm, no modelo com engastes. Entre os dois modelos de painéis adotados, percebeu-se que os que possuíam suas laterais e bases engastadas eram mais resistentes aos carregamentos. Percebeu-se também que há um “desperdício” da resistência à compressão no conjunto, já que os painéis romperam à tração, enquanto as tensões de compressão eram ínfimas em relação à tensão resistente à compressão.

PALAVRAS-CHAVE: Muro de Arrimo, Análise Numérica, Método dos Elementos Finitos

1 INTRODUÇÃO

Devido aos menores custos de projeto e de execução de obras, tradicionalmente busca-se a utilização de terrenos planos e firmes para construir habitações, porém esse cenário nem sempre está disponível. Para que tal

configuração seja obtida, pode ser necessária intervenção humana no relevo local, com utilização de cortes e aterros no solo (Domingues, 1997).

Nesse sentido, de modo a alcançar o melhor aproveitamento do terreno, os muros de arrimo vêm sendo de grande importância e larga

utilização. Os mesmos, no entanto, devem ser projetados de forma a assegurar a sua máxima eficiência e segurança.

O muro de arrimo em estudo segue um modelo bastante utilizado em várias regiões do Brasil, que é o muro executado com painéis de alvenaria de blocos cerâmicos estruturais unidos por argamassa, suportados por contrafortes de concreto armado ou reforçados com contrafortes de blocos grauteados, trabalhando à compressão e flexão (Lobo et al, 2003).

Com base em parâmetros de resistência e rigidez obtidos por meio de ensaios em laboratório ou disponíveis na literatura, foi elaborado um modelo computacional para a análise do painel de alvenaria. Para esse modelo, foram empregados elementos finitos de casca introduzidos por Coda & Paccola (2007).

Buscou-se, assim, um melhor entendimento sobre a distribuição de tensões e a resistência dos painéis de alvenaria estrutural empregados em muros de arrimo.

2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E CARGAS ATUANTES

Os valores de resistência do painel, bem como das cargas atuantes, foram levantados com base em valores reais de ensaios nos materiais, no solo e ensaios em prismas.

2.1 Bloco Cerâmico

O bloco cerâmico utilizado nas análises tem suas paredes vazadas, e é produzido para ser assentado com os furos na vertical, conforme o modelo da Figura 1.

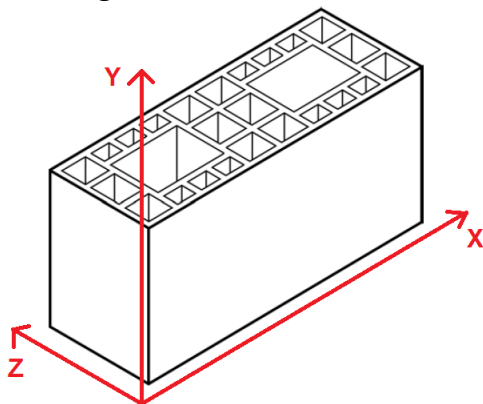


Figura 1. Modelo do bloco cerâmico utilizado.

As dimensões do bloco cerâmico seguem o estabelecido na NBR 15270-02 (ABNT, 2005). Trata-se de um bloco de 14x19x29cm (largura x altura x comprimento), com espessura mínima do septo interno de 7,0mm e espessura mínima do septo externo de 8,0mm.

Para a determinação da resistência à compressão do bloco cerâmico, considerou-se o valor constante no laudo técnico do fornecedor. A partir disso, para a área líquida da superfície do bloco foi verificada uma resistência à compressão de 2,20kN/cm².

Na definição do módulo de elasticidade do bloco, foi consultado o trabalho desenvolvido por Garcia (2000). A partir dele, o valor do módulo de elasticidade em função da área líquida do bloco e em relação ao eixo *x* é de 1136,17kN/cm². Fazendo uma correlação entre as dimensões do bloco e seus momentos de inércia em relação aos eixos *x* e *y*, definiu-se o módulo de elasticidade em relação ao eixo *y* em 935,07kN/cm². Com base no trabalho do mesmo autor, o coeficiente de Poisson considerado foi de 0,25.

2.2 Argamassa

Para determinação da resistência à compressão da argamassa, foram feitos ensaios em laboratório, conforme recomenda a NBR 13279 (ABNT, 1995). Utilizando uma argamassa com traço 1:0,5:4,5 (cimento:cal:areia), conforme tipo (ii) definido pela BS 5628-1 (BSI, 2005), o valor encontrado foi de 0,80kN/cm².

Como o menor entre os valores das resistências à compressão encontrado foi o da argamassa, este foi considerado como o valor da resistência à compressão do painel.

2.3 Prisma

A fim de buscar uma caracterização dos materiais trabalhando em conjunto, buscou-se o estudo de Araujo (2002). Num ensaio, o autor utilizou prismas compostos por 3 unidades de blocos cerâmicos unidos por argamassa do tipo (ii) definido pela BS 5628-1 (BSI, 2005).

A resistência à compressão do conjunto considerada foi de 7,059MPa. O valor de tensão

de cisalhamento resistente, em relação à área líquida do bloco, foi de 0,74MPa.

Na determinação da resistência à tração do painel, foram ensaiados prismas compostos por dois blocos unidos pela mesma argamassa do ensaio à compressão, submetidos a esforços de tração simples. O valor da resistência à tração do prisma encontrado foi de 0,016kN/cm².

2.4 Carregamento

Para a determinação das cargas atuantes no muro, considerou-se um solo da região do bairro Bortot, em Pato Branco – PR. O trabalho de Tabalipa (2008) forneceu os dados necessários a respeito das características do solo em referência.

A partir dessas informações, e considerando que a carga tem uma distribuição triangular ao longo da altura do muro, foi obtido o valor da pressão ativa P_a em função da altura H do muro, conforme apresentado na Equação 1:

$$P_a = 0,000007845 * H \frac{kN}{cm^2} \quad (1)$$

3 MÉTODO DE ANÁLISE

Para a aplicação da análise numérica, foi utilizado um programa desenvolvido por Coda & Paccola (2009). Neste, é utilizado um elemento triangular de casca segundo a cinemática de Reissner e capaz de análise não linear geométrica com formulação baseada em posições, introduzido por Coda & Paccola (2007), composto por 10 nós, cada um com 7 parâmetros nodais.

Os 7 parâmetros nodais são 3 componentes cartesianas de posição final, taxa de variação linear da espessura (admitindo um comportamento linear para o elemento de casca ao longo da espessura), e 3 componentes finais do vetor generalizado, inicialmente normal à superfície do elemento (Sanches, 2011).

A partir da inserção de informações sobre propriedades dos materiais, número de camadas que compõem cada material, excentricidades e espessuras dessas camadas, e dados a respeito da malha que descreve o painel, as posições dos

nós que definem os elementos, as condições de contorno do painel e os carregamentos, são obtidas: tensões atuantes nos elementos dos eixos x , y e z para a primeira e última camadas do painel, tensões principais na primeira e última camada e tensões de cisalhamento nos planos xz e yz .

Com esses valores de tensão, foram adotados o critério de Mohr-Coulomb e a tensão resistente ao cisalhamento para definir os critérios de ruptura do modelo.

3.1 Modelos Analisados

Para a escolha dos modelos de painéis a serem analisados, definiu-se uma dimensão inicial de 90x180cm, que é equivalente a 3 blocos assentados lado a lado por 9 blocos assentados verticalmente. A partir das tensões obtidas para esse painel, foi verificado se haveria a ruptura ou não. Havendo, a dimensão foi sendo diminuída e reanalisada, até que se encontrasse o tamanho do painel que não romperia com a carga solicitante.

A dimensão dos modelos era reduzida com base na dimensão de uma fiada de blocos cerâmicos sendo retirada por vez. Para cada tamanho de painel, foram considerados dois modelos: um simplesmente apoiado na base e nas laterais, com a extremidade superior livre, e outro engastado na base e nas laterais, com a extremidade superior livre.

4 RESULTADOS

A partir dos resultados fornecidos pelo programa, foram feitas duas análises para verificar a integridade dos painéis com a aplicação dos esforços: uma considerando o critério de Mohr-Coulomb, e outra verificando a tensão de cisalhamento média nos planos xz e yz .

A Figura 2 apresenta a distribuição das tensões no eixo x , na última camada do painel de 90x100cm, com engastes na base e laterais. A Figura 3 apresenta a distribuição das tensões no eixo y , na última camada do mesmo painel.

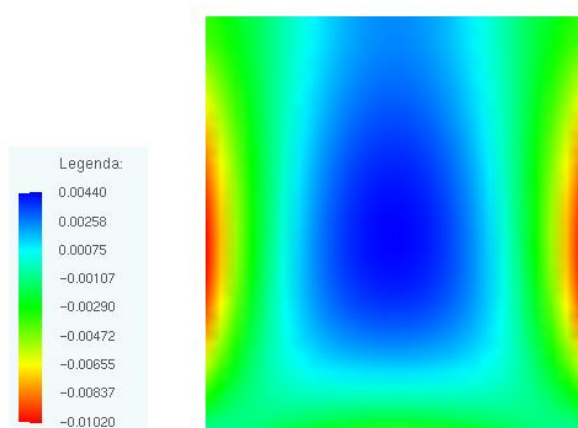


Figura 2. Tensões no eixo x da última camada do painel de 90x100cm com engastes.

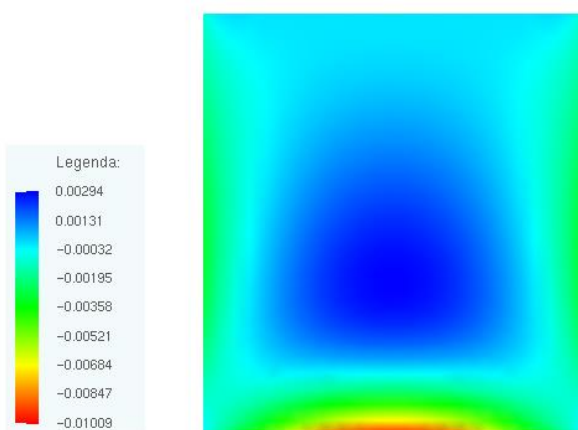


Figura 3. Tensões no eixo y da última camada do painel de 90x100cm com engastes.

A Figura 4 apresenta a aplicação do critério de Mohr-Coulomb para o painel em referência, e a Figura 5 apresenta um detalhe do mesmo critério, para melhor observação.

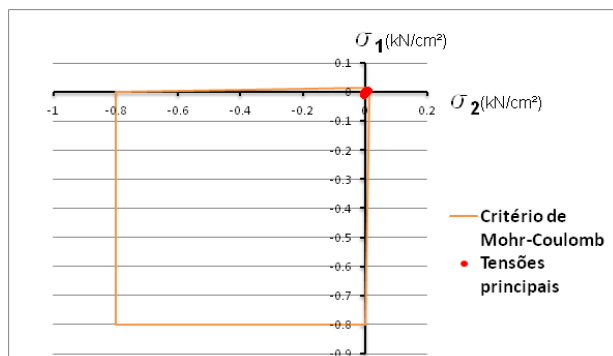


Figura 4. Aplicação do critério de Mohr-Coulomb para o painel 90x100cm com engastes.

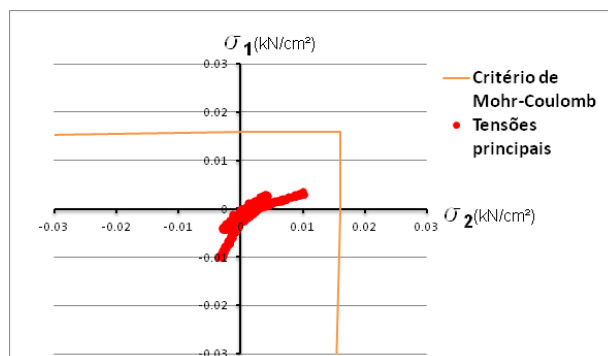


Figura 5. Detalhe da aplicação do critério de Mohr-Coulomb para o painel 90x100cm com engastes.

A partir da análise da aplicação do critério de Mohr-Coulomb, percebe-se que o painel de 90x100cm com engastes resiste aos esforços.

Contudo, deve-se verificar quanto à resistência aos esforços de cisalhamento. A Figura 6 apresenta as tensões de cisalhamento no plano xz , e a Figura 7 apresenta as tensões de cisalhamento no plano yz .

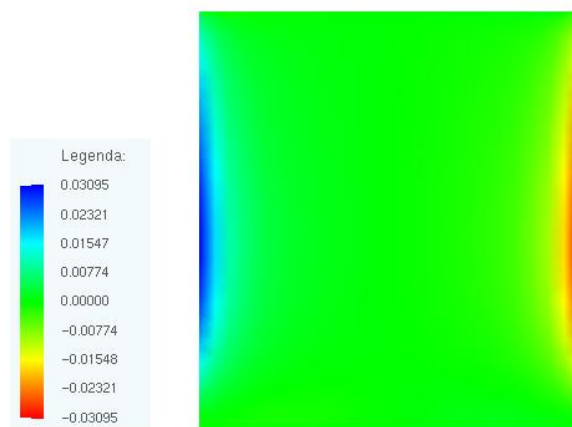


Figura 6. Tensões de cisalhamento no plano xz para o painel de 90x100cm com engastes.

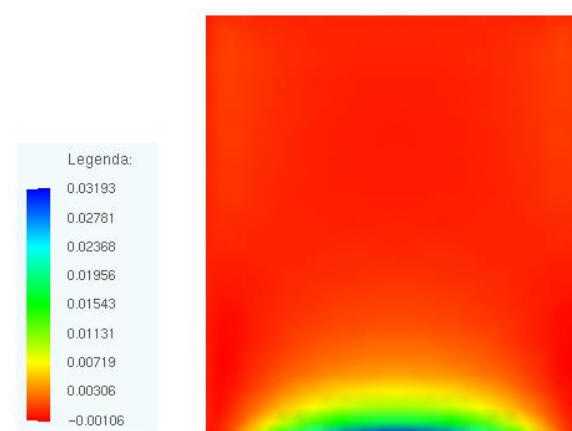


Figura 7. Tensões de cisalhamento no plano yz para o painel de 90x100cm com engastes.

Para que seja feita a verificação da ruptura ao cisalhamento, foi encontrado um valor aproximado para a tensão de cisalhamento média τ nos planos xz e yz, em relação à altura h e largura L do painel, a área líquida da superfície do bloco A_{liq} , e a tensão máxima encontrada na análise do modelo τ_{modelo} , conforme apresentado na Equação 2:

$$\tau_{xz} = \frac{\tau_{xz,modelo} * h * L}{A_{liq}} \quad (2)$$

Calculando-se as tensões de cisalhamento médias, tem-se os valores de 0,072kN/cm² para o plano xz e 0,050kN/cm² para o plano yz.

Assim, verificou-se que os valores solicitantes são menores que os resistentes. Logo, o painel em referência resiste aos esforços de cisalhamento.

A fim de exemplificar uma situação em que houve ruptura do painel, as Figuras 8 e 9 apresentam as tensões de cisalhamento nos planos xz e yz, respectivamente, para o painel de 90x100cm, no modelo com bordos simplesmente apoiados.

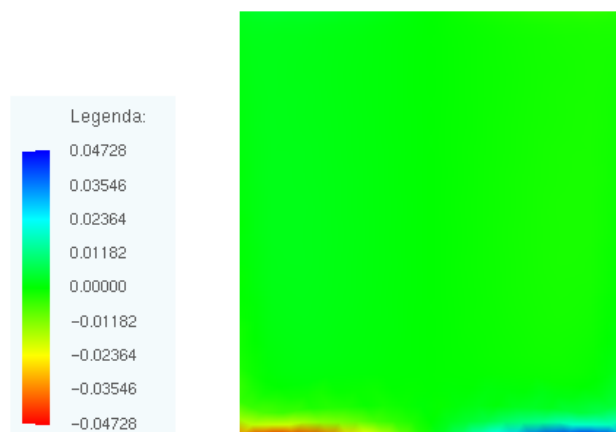


Figura 8. Tensões de cisalhamento no plano xz para o painel de 90x100cm com apoios.

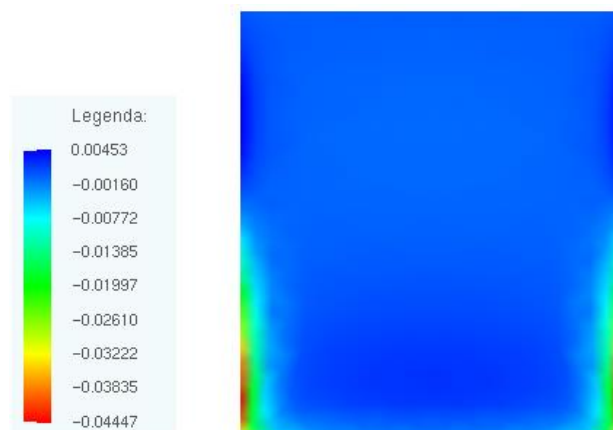


Figura 9. Tensões de cisalhamento no plano yz para o painel de 90x100cm com apoios.

Calculando-se as tensões de cisalhamento médias, tem-se os valores de 0,110kN/cm² para o plano xz e 0,069kN/cm² para o plano yz.

Assim, verificou-se que os valores solicitantes são maiores que os resistentes. Logo, o painel em referência não resiste aos esforços de cisalhamento.

Por fim, constatou-se que a maior dimensão do painel que resistiu aos esforços solicitantes foi de 90x100cm, no modelo com engastes na base e laterais, e extremidade superior livre.

5 CONCLUSÕES

Feitas as análises, percebeu-se que os painéis que possuíam suas laterais e bases engastadas eram mais resistentes aos carregamentos do que os painéis que possuíam suas laterais e base simplesmente apoiadas. Buscando maior eficiência, na execução de um muro de arrimo com blocos de alvenaria estrutural é viável a tentativa de realizar ligações que se comportam como engastes.

Nos muros de alvenaria comum, são feitas vigas-cinta para aumento da resistência do conjunto, e, como pode ser observado em campo, esse método é eficiente. Talvez um reforço do muro de alvenaria estrutural com vigas-cintas colocadas estrategicamente seja uma boa opção. Isso tornaria a face superior, que nos modelos foi considerada como livre, numa face engastada ou com apoio simples.

Quando se observa o comportamento do critério de Mohr-Coulomb no gráfico, percebe-se que há um “desperdício” da resistência à

compressão do conjunto. Enquanto os painéis rompem por tensões de tração, as tensões de compressão solicitantes são ínfimas se comparadas com a tensão resistente à compressão. Isso se dá pela baixa resistência à tração na interface bloco/argamassa, a qual pode ser considerada como o ponto mais frágil da estrutura.

vertentes da bacia do Rio Ligeiro, Pato Branco, Paraná. Tese de Doutorado, Geologia, UFPR, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 243 p.

REFERÊNCIAS

- Araujo, A. F. (2002). *Metodologia para avaliação da resistência de aderência ao cisalhamento de prismas para alvenaria estrutural*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 148 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005), *NBR 15270-2: Componentes cerâmicos – Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos*, Rio de Janeiro, 11 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995), *NBR 13279: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão*, Rio de Janeiro, 2 p.
- British Standards Institution (2005), *BS 5628-1: Code of practice for the use of masonry – Part 1: Structural use of reinforced masonry*, London, 80 p.
- Coda, H. B e Paccola, R. R. (2007). An alternative positional FEM formulation for geometrically non-linear analysis of shells: curved triangular isoparametric elements. *Computational Mechanics*, v. 40, p. 185-200.
- Coda, H. B e Paccola, R. R. (2009). Unconstrained Finite Element for Geometrical Nonlinear Dynamics of Shells. *Mathematical problems in engineering*. ISSN 1024-123X
- Domingues, P. C. (1997) *Indicações para projetos de muros de arrimo em concreto armado*, Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 109 p.
- Garcia, P. D (2000), *Contribuições ao estudo da resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos*. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 173 p.
- Lobo, A. S. e Ferreira, C. V. e Renofio, A. (2003), Muros de arrimo em solos colapsáveis provenientes do arenito Bauru: problemas executivos e influência em edificações vizinhas em áreas urbanas. *Acta Scientiarum Technology*, Maringá, v. 25, no. 2, p. 169-177.
- Sanches, R. A. K. (2011), *Sobre o acoplamento fluido-casca utilizando o método dos elementos finitos*. Tese de Doutorado, Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 228 p.
- Tabalipa, N. L. (2008), *Estudo da estabilidade de*