

PROCEEDINGS

VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries

Flávio Antônio dos Santos

Braj P. Sinha

Maria Cristina Ramos de Carvalho

Maria Estânia Mendonça Passos

Gray Farias Moita

P963p Proceedings of the VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries. (7: 2002: Belo Horizonte, MG)

Proceedings of the VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries / Publishers: Flávio Antônio dos Santos, Braj P. Sinha, Maria Cristina Ramos de Carvalho, Maria Estânia Mendonça Passos, Gray Farias Moita. - Belo Horizonte: (s.n.), 2002 (Belo Horizonte)

1 v.:il. 553 pp

Inclui bibliografia

Promovido pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / University of Edinburgh

1. Engenharia Civil – Congressos 2. Construção Civil – Alvenaria Estrutural
I. Santos, Flávio Antônio dos II. Sinha, Braj. P. III. Carvalho, Maria Cristina Ramos
de III. Passos, Maria Estânia Mendonça IV. Moita, Gray Farias V. Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas Gerais – University of Edinburgh VI. Título.

CDD 624

Análise numérica de painéis de alvenaria estrutural submetidos a recalques diferenciais considerando a não-linearidade de contato



VII International Seminar
on Structural Masonry
for Developing Countries

18th to 20th September 2002
Belo Horizonte, Brazil

Osvaldo G. Holanda Jr., Marcio A. Ramalho & Márcio R. S. Corrêa

Departamento de Engenharia de Estruturas
Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Av. Trabalhador São-Carlense, 400, São Carlos-SP, Brasil

H722a

RESUMO: Neste trabalho apresenta-se a modelagem numérica completa de um painel para simulação da ocorrência de recalques diferenciais em edifícios de alvenaria estrutural. Esse painel exemplo é constituído por parede de alvenaria sobre viga de fundação. Considerou-se o sistema apoiado em três pontos discretos, regularmente espaçados, aos quais se aplicou recalque diferencial em duas configurações distintas: do apoio central e de um dos apoios de extremidade. O painel foi pré-comprimido com uma carga uniformemente distribuída no seu topo, correspondente à carga de serviço de uma parede pertencente ao pavimento térreo de um edifício. Considerou-se a presença de aberturas de porta e janela, devido às concentrações de tensão nos seus cantos. Atenção especial foi dada ao comportamento da interface entre parede e viga, buscando-se encontrar a melhor forma de modelagem dessa região. Para atingir esse objetivo foram feitas análises com e sem a utilização de elementos de contato representando essa interface. Todas as análises foram realizadas por meio de um programa computacional comercial baseado no Método dos Elementos Finitos, cujos dados de entrada foram obtidos a partir de ensaios prévios de caracterização dos materiais.

Palavras-chave: Análise numérica, alvenaria estrutural, recalques, não-linearidade de contato.

1 INTRODUÇÃO

Na busca de modelagens numéricas mais adequadas para a representação de cada problema em engenharia de estruturas, diversas considerações devem ser analisadas. Dependendo dos graus de acuidade e simplicidade desejados, verifica-se a necessidade da adoção de critérios mais sofisticados de análise.

Nesta pesquisa, o objeto de estudo é constituído basicamente por uma parede de alvenaria estrutural sobre uma viga de fundação. O problema consiste em verificar o comportamento desse sistema quando submetido a um determinado tipo de ação externa: recalque.

Os recalques constituem ações externas aplicadas às estruturas, porém quase sempre negligenciadas nas análises correntes. Embora praticamente toda estrutura de edifício sofra a ação de recalques, o estudo dos seus efeitos ainda está em fase de desenvolvimento.

Em especial, as estruturas de alvenaria são bastante suscetíveis a danos provocados por movimentos da fundação, por se tratar de um sistema estrutural com pequena ductilidade.

Tem-se como objetivo empreender uma análise a partir de um modelo numérico simples, mas que represente as principais características do problema.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A alvenaria pode ser numericamente representada basicamente de três formas distintas, segundo ROTS (1991) e LOURENÇO (1996). Cada uma dessas maneiras requer um conjunto próprio de características do material, e tem aplicação voltada para um tipo distinto de problema.

A *micro-modelagem detalhada* consiste na representação em separado das unidades e das juntas de argamassa, ambas como elementos contínuos. A interface entre as unidades e a argamassa pode ser modelada como elementos descontínuos, representando potenciais planos de fissuração e deslizamento. São necessários os valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson das unidades e da argamassa.

Na *micro-modelagem simplificada* as unidades são ainda representadas por elementos contínuos. As juntas, por sua vez, são representadas por elementos de contato. A alvenaria fica então modelada como um conjunto de unidades, com propriedades elásticas, unidas por elementos de contato não-lineares, sendo possível simular a propagação de fissuras ao longo das juntas horizontais e verticais e de linhas preferenciais passando pelas unidades, caso sejam inseridos elemento de contato nesses locais. Ambas as formas de micro-modelagem aplicam-se a detalhes

1282856
160103

estruturais, em que é necessário verificar o comportamento local com maior precisão.

O terceiro tipo de representação numérica da alvenaria corresponde à chamada *macro-modelagem*. Nela não se faz distinção entre blocos e argamassa, mas trata-se a alvenaria como um composto que, dependendo dos dados disponíveis, pode ser considerado isotrópico ou anisotrópico. Necessita-se, portanto, dos valores dos parâmetros elásticos da alvenaria como um conjunto. Esta modelagem global da alvenaria é adequada para a análise de estruturas de grande escala, em que as dimensões do painel de alvenaria são grandes em relação às dimensões das unidades e à espessura das juntas.

Com relação ao tipo de análise numérica, ANTHOINE (1997) estudou qual representação seria mais adequada para a alvenaria, sendo implementada a teoria de homogeneização de meios periódicos. Foram comparados o estado plano de tensão, o estado plano de deformação generalizado, e a modelagem tridimensional. Concluiu-se que a aproximação por estado plano de tensão é exata quando a espessura da parede tende a zero, enquanto que o contrário é válido para estado plano de deformação generalizado. A modelagem tridimensional produziu resultados melhores, apresentando modo de ruptura condizente com o observado na prática.

Ao estudar aspectos da modelagem plana do sistema parede-viga SAW (1974) concluiu que para o caso de vigas relativamente flexíveis (de pequena altura) sua representação por elementos de barra é provavelmente preferível ao uso de um grande número de elementos planos.

A esta mesma conclusão também chegou BARBOSA (2000), que analisou casos de paredes sobre vigas biapoiadas por meio do método dos elementos finitos usando o processador numérico ANSYS. Diversas modelagens foram comparadas, concluindo-se que a macro-modelagem da parede utilizando elementos planos em estado plano de tensão sobre elementos de barra representativos da viga produz bons resultados.

Outro objetivo dessa pesquisa foi a verificação da influência da consideração de separações e deslizamentos ocorrentes na interface parede-viga. Essa interface foi modelada por elementos de contato disponíveis no programa utilizado. Em alguns casos estudados a influência do contato mostrou-se bastante importante na distribuição das tensões e na magnitude dos deslocamentos. Porém, para que melhores análises possam ser realizadas, ressaltou-se a necessidade de comparações com ensaios experimentais, em que se obtenha o maior número possível de parâmetros que permitam uma modelagem mais precisa do sistema parede-viga.

3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Modelou-se o painel apresentado na figura seguinte. A parede possui espessura de 4,65 cm. As dimensões estão em escala reduzida 1:3 para que os resultados sejam posteriormente comparados com os de ensaios em laboratório realizados como parte desta mesma pesquisa.

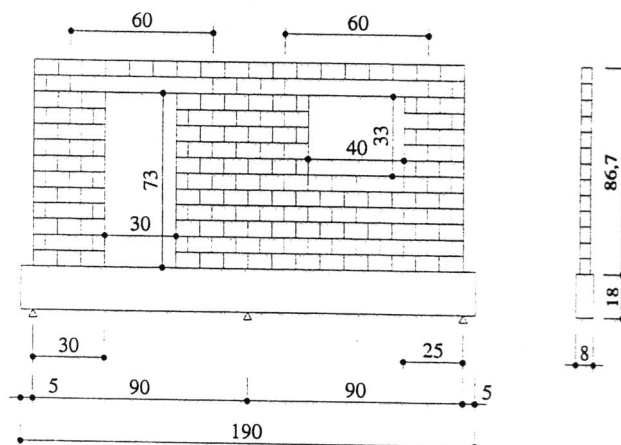


Figura 1. Dimensões do painel.

Buscando representar um painel pertencente ao pavimento térreo de um edifício, aplicou-se inicialmente um carregamento de pré-compressão no topo do painel, com intensidade equivalente a situações normais de serviço. A carga foi estimada segundo a norma brasileira NBR 10837 (1989), utilizando-se os valores obtidos com a caracterização dos materiais. Adotou-se, a partir desse procedimento, a aplicação de uma tensão uniformemente distribuída de 1,22 MPa no topo do painel, que equivaleria a aproximadamente 2 MPa em cada trecho de parede isolada, definido entre as aberturas. Portanto, a carga total foi de 102 kN.

O recalque foi simulado estabelecendo-se o deslocamento vertical dos apoios, após a etapa de carregamento do painel. Considerando a falta de consenso entre os pesquisadores quanto ao valor absoluto do recalque causador de danos na alvenaria, decidiu-se deixar o apoio deslocar-se até que sua reação fosse anulada. Duas simulações foram feitas: recalque do apoio central, e do apoio de extremidade.

A figura seguinte ilustra o procedimento das análises. Inicialmente aplica-se o carregamento uniformemente distribuído (designado por ① na Figura 2) no topo do painel, o qual é mantido constante durante todo o processo. Em seguida desloca-se verticalmente para baixo o apoio central até que sua reação seja anulada (②). Retorna-se o apoio à posição original e, em seguida, mantendo o carregamento ①, repete-se o procedimento anterior deslocando-se o apoio da direita (③).

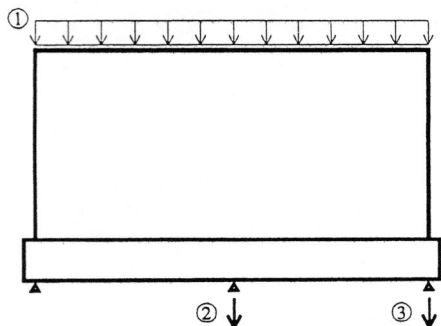


Figura 2. Ações aplicadas ao modelo.

4 MODELAGEM ADOTADA

Com base nos fundamentos descritos e seguindo o objetivo estipulado, optou-se por adotar a macro-modelagem da parede, realizando-se uma análise em estado plano de tensão. Utilizaram-se elementos finitos quadrilaterais para a discretização da parede e das vergas e elementos de barra para a representação da viga.

Em sistemas compostos de parede sobre viga com apoios discretos torna-se interessante a verificação do comportamento da interface entre ambas. Além disso, acredita-se que no problema estudado, que envolve recalque dos apoios, provocando uma maior deformação da viga, esta verificação ganha maior importância.

Desta forma, decidiu-se incluir a não-linearidade de contato desta região na análise por meio de elementos de contato de superfície. Com o objetivo de avaliar a influência dessa não-linearidade nos resultados, realizou-se também uma análise sem elementos de contato, para comparação.

As análises foram realizadas com o auxílio do programa ANSYS. Desta forma, utilizaram-se os elementos finitos PLANE42, BEAM3, CONTA171 e TARGE169.

Os materiais alvenaria e concreto foram considerados elásticos, lineares e isotrópicos. As vergas são constituídas de concreto de maior resistência, aproximadamente igual à resistência do bloco na área líquida. Os módulos de elasticidade dos materiais (E) e o coeficiente de Poisson (ν) da alvenaria foram obtidos a partir de ensaios de caracterização. Para o concreto adotou-se ν = 0,2. As propriedades encontram-se organizadas na tabela seguinte.

Tabela 1. Propriedades dos materiais.

MATERIAL	E (kN/cm ²)	ν
Alvenaria	618	0,1
Concreto – viga	1830	0,2
Concreto – verga	2702	0,2

Também como resultado de ensaios de caracterização obteve-se o coeficiente de atrito interno da região de interface parede-viga:

$$\mu = 0,76$$

Os parâmetros do contato foram calibrados com base nos resultados dos ensaios, de forma a se obter a melhor representação possível quanto às penetrações, às separações e ao deslizamento na interface. Dessa forma, foram adotados os seguintes valores:

$$F_{kn} = 3,9 \qquad \tau_{m\acute{a}x} = 0,67 \text{ kN/cm}^2$$

Na Figura 3 apresenta-se a discretização em elementos finitos empregada. Quando se utilizaram elementos de contato, aqueles do tipo CONTA171 foram posicionados na linha inferior da parede, enquanto que seus pares (TARGE169) eram coincidentes com os elementos da viga.

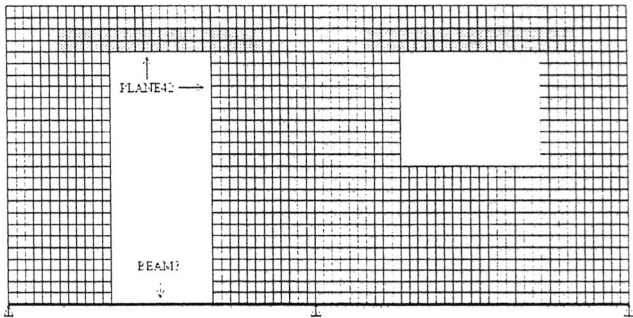


Figura 3. Discretização do painel.

5 RESULTADOS

A seguir são apresentados e discutidos os principais resultados da análise numérica empreendida. As análises com e sem elementos de contato são confrontadas para as três situações de carregamento definidas: pré-compressão do painel, recalque do apoio central e recalque do apoio de extremidade. Para fins de comparação, adotou-se o instante final de cada etapa de carregamento, ou seja, carga de pré-compressão totalmente aplicada e retirada total de cada apoio.

Deste ponto em diante serão utilizados os seguintes códigos para os dois tipos de modelagem:

- MSC – Modelagem Sem elementos de Contato; e
- MCC – Modelagem Com elementos de Contato.

Inicialmente serão apresentados os gráficos obtidos com ambas as análises, para posterior discussão. Observar-se-ão as tensões verticais na parede, dando-se atenção especial à distribuição na base, e o diagrama de momento fletor da viga.

5.1 Situação 1 – Pré-compressão

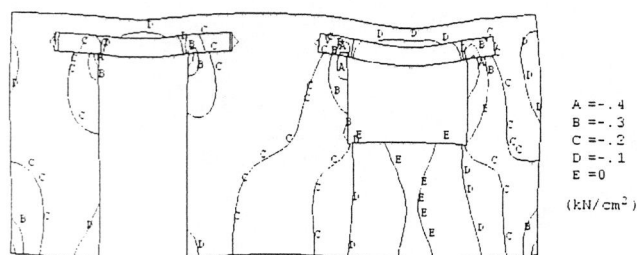


Figura 4. Tensões verticais na parede – MSC, Situação 1.

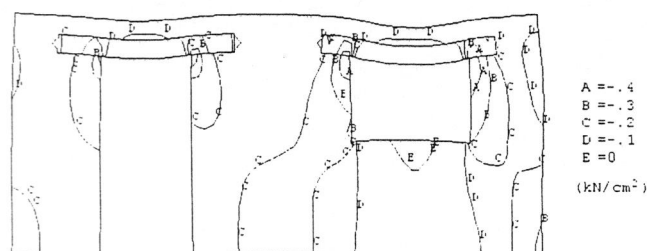


Figura 5. Tensões verticais na parede – MCC, Situação 1.

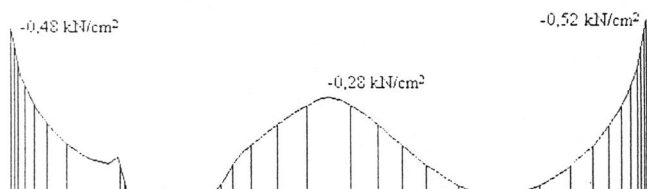


Figura 6. Tensões verticais na base da parede – MSC, Situação 1.

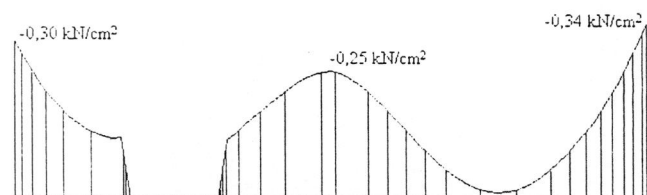


Figura 7. Tensões verticais na base da parede – MCC, Situação 1.

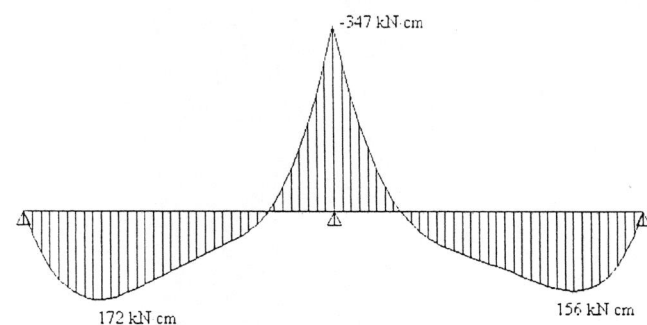


Figura 8. Diagrama de momento fletor da viga – MSC, Situação 1.

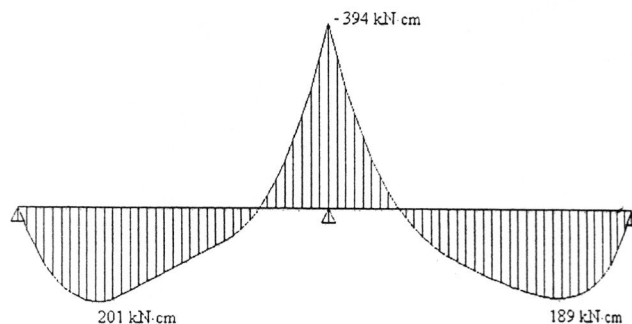


Figura 9. Diagrama de momento fletor da viga – MCC, Situação 1.

5.2 Situação 2 – Recalque do apoio central

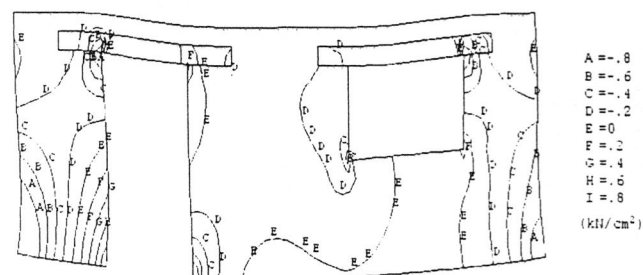


Figura 10. Tensões verticais na parede – MSC, Situação 2.

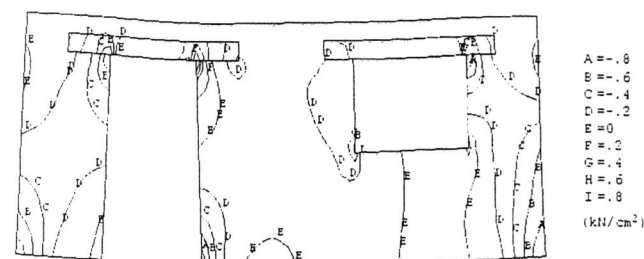


Figura 11. Tensões verticais na parede – MCC, Situação 2.

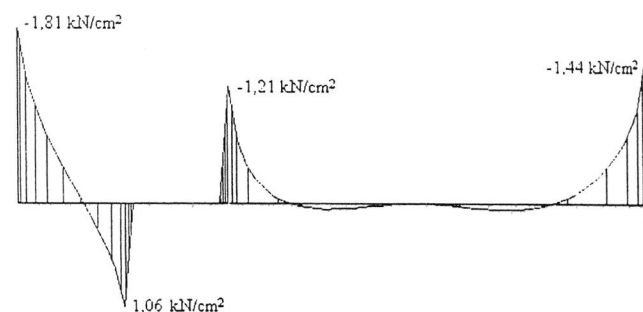


Figura 12. Tensões verticais na base da parede – MSC, Situação 2.

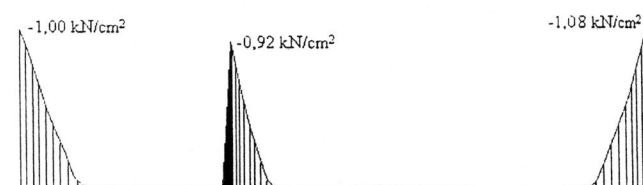


Figura 13. Tensões verticais na base da parede – MCC, Situação 2.

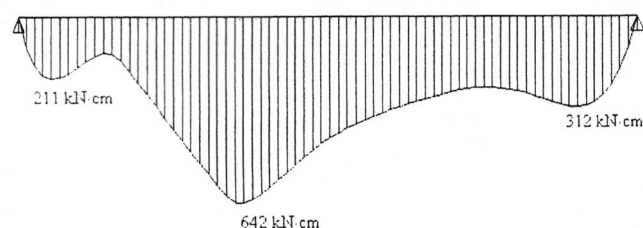


Figura 14. Diagrama de momento fletor da viga - MSC, Situação 2.

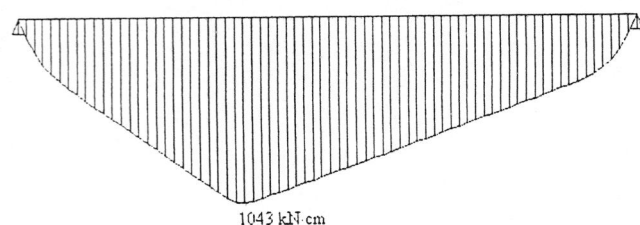


Figura 15. Diagrama de momento fletor da viga - MCC, Situação 2.

5.3 Situação 3 - Recalque do apoio de extremidade

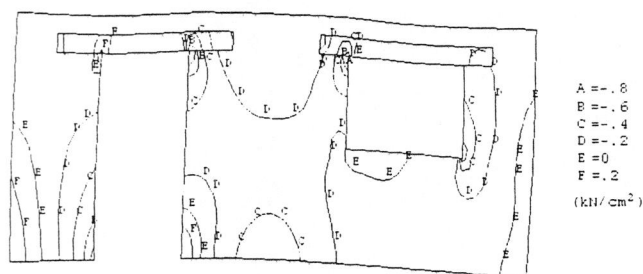


Figura 16. Tensões verticais na parede - MSC, Situação 3.

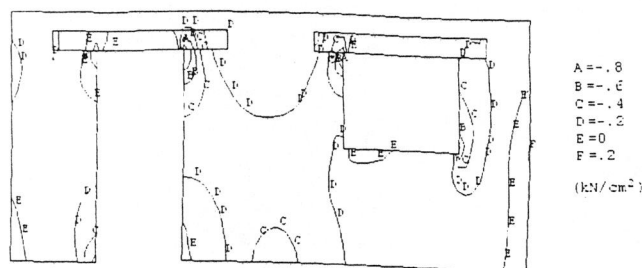


Figura 17. Tensões verticais na parede - MCC, Situação 3.

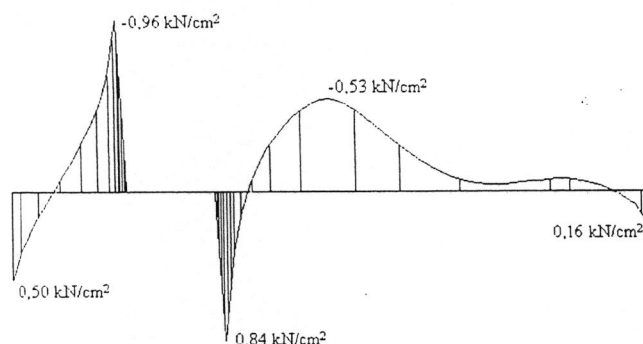


Figura 18. Tensões verticais na base da parede - MSC, Situação 3.

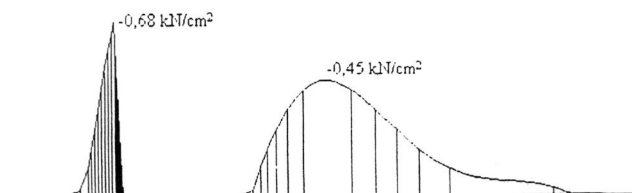


Figura 19. Tensões verticais na base da parede - MCC, Situação 3.

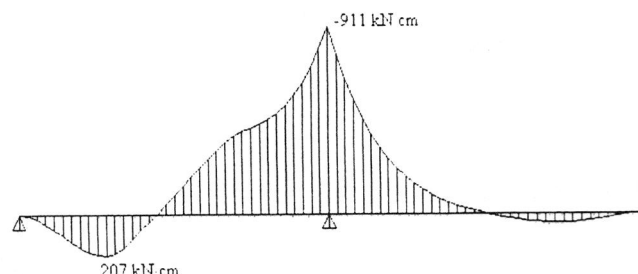


Figura 20. Diagrama de momento fletor da viga - MSC, Situação 3.

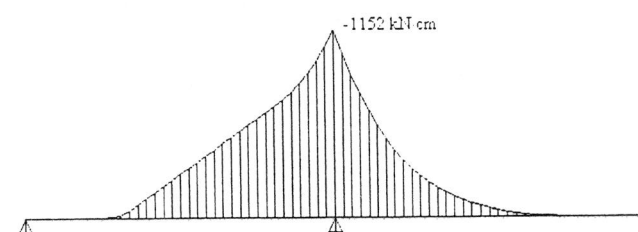


Figura 21. Diagrama de momento fletor da viga - MCC, Situação 3.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como se pode observar pelos gráficos, a distribuição e a magnitude das tensões verticais nas paredes são praticamente idênticas para os dois tipos de modelagem, ressalvada a região próxima à interface parede-viga. Esta afirmação é válida para as três situações de carregamento avaliadas.

Nas duas situações de recalque, outra singularidade pode ser observada, no pequeno trecho de parede compreendido entre a abertura de porta e a borda do painel. As tensões verticais até meia altura são bem mais intensas na análise sem elementos de contato. Isso é consequência do fato de a modelagem com elementos de contato (MCC) permitir o deslizamento e a separação na interface, enquanto que na outra modelagem (MSC) parede e viga permanecem perfeitamente unidas.

Os diagramas de distribuição das tensões verticais ao longo da base da parede também foram apresentados, para que se possa visualizar melhor as diferenças de resultados entre as duas modelagens. Na primeira situação, em que não há deslocamento vertical dos apoios, observa-se apenas uma maior concentração de tensões nas extremidades e no centro da parede.

Nas situações em que os recalques são aplicados, percebe-se uma diferença mais importante. Na MSC surgem tensões de tração de grande intensidade nos cantos da porta e de extremidade da parede. Já na MCC, quando essas tensões tendem a aparecer, ocorre a separação entre parede e viga, permitida pelos elementos de contato. Dessa forma, a distribuição das tensões nessa região consiste de concentrações de tensões de compressão apenas.

Essa distribuição de tensões na base da parede tem influência direta no momento fletor da viga, pois correspondem ao carregamento que lhe é transmitido. Na primeira situação, a maior concentração de esforços próximo aos apoios na MSC produz menores momentos fletores em comparação com a MCC. As diferenças entre os valores máximos, positivos e negativos, situaram-se entre 14 % e 21 %.

Na situação de recalque do apoio central, as tensões de tração na base da parede na MSC influenciaram sobremaneira o diagrama de momento fletor, diminuindo consideravelmente esta solicitação da viga. Fisicamente tais tensões significariam que a parede "sustenta" a viga, formando quase que um apoio quando há uma concentração forte.

Fato semelhante pode ser verificado com relação à terceira situação de carregamento.

Verifica-se como comportamento geral que os picos de momento fletor calculados considerando a não-linearidade de contato são maiores. Além disso, observa-se em todas as situações que os momentos no vão onde se encontra a porta são maiores, devido à concentração de esforços que ocorre no canto dessa abertura.

7 CONCLUSÕES

Procurou-se com este estudo verificar a importância da consideração da não-linearidade de contato em problemas de painéis de alvenaria sobre vigas de concreto submetidos a recalques dos apoios. Com esta finalidade, foram comparados os principais resultados de análises realizadas com e sem elementos de contato na interface parede-viga.

Verificou-se que as tensões verticais na maior parte da parede não sofrem influência significativa da consideração que se faça à região de interface.

Em contrapartida, os momentos fletores que se desenvolvem na viga são bastante diferentes ao se comparar os resultados das duas modelagens, apresentando picos maiores quando se utilizam elementos de contato.

Considera-se muito improvável o desenvolvimento de tensões de tração intensas na interface parede-viga,

pois é mínima a resistência à tração vertical nessa região, em que se encontra na realidade uma junta de argamassa.

Dessa forma, conclui-se que em problemas envolvendo paredes de alvenaria sobre vigas torna-se importante a consideração da não-linearidade de contato entre ambas, principalmente quando análises não-lineares acarretarem o surgimento de grandes tensões de tração perpendiculares à interface.

Entretanto, quando há interesse em obter apenas as tensões que se desenvolvem na parede em regiões distantes da interface, a consideração da não-linearidade de contato pode ser dispensável.

Ressalta-se, porém, que as conclusões aqui apresentadas necessitam comprovação experimental, que os autores pretendem obter com a continuidade desta pesquisa.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – e do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- J. G. Rots, Numerical simulation of cracking in structural masonry, *Heron*, 36, 2, 49-63, 1991.
- P. B. Lourenço, Computational strategies for masonry structures (Thesis). Delft University of Technology, 1996.
- A. Anthoine, Homogenization of periodic masonry: plane stress, generalized plane strain or 3D modelling?, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 13, 319-26, 1997.
- C. B. Saw, Linear elastic finite element analysis of masonry walls on beams, *Building Science*, 9, 299-307, 1974.
- P. C. Barbosa, Estudo da interação de paredes de alvenaria estrutural com vigas de concreto armado (Thesis). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.
- NBR 10837, Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989.