

Modelação com elementos sólidos de uma construção em terra crua com vários tipos de reforço sujeita à acção sísmica

Maria Idália Gomes¹

*Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa
Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1950-062 Lisboa*

Jorge de Brito² e Mário Lopes³

*Instituto Superior Técnico
Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Secção de Construção, Av. Rovisco Pais,
1049-001 Lisboa*

RESUMO

Neste artigo, baseado na dissertação de mestrado da primeira autora (Gomes, 2008) e dedicado à construção sísmo-resistente em terra crua, após uma primeira descrição dos tipos de reforço utilizados nas várias estruturas modeladas, analisa-se o comportamento destas estruturas relativamente às tensões máximas obtidas e à sua admissibilidade. As estruturas apresentam as dimensões e características que podem ser consideradas representativas de um conjunto razoável de construções deste tipo, com dimensões em planta $13 \times 14 \text{ m}^2$ e disposições construtivas dentro dos limites recomendados por especialistas em edificações em terra crua. Neste estudo recorreu-se à modelação informática de estruturas com elementos finitos tridimensionais, usando o programa de *software* para análise estrutural, SAP 2000 (Structural Analysis Program), versão 10.0.1.

1. INTRODUÇÃO

Devido à grande carência habitacional e estando esta directamente relacionada com a escassez de recursos financeiros das populações, é da maior importância a revitalização do uso da terra como material de construção. A terra será sempre um dos materiais contemplados na construção das habitações, devido à sua abundância, custo acessível, tradição e facilidade de execução. Por outro lado, os problemas energéticos, ambientais, ecológicos e económicos sentidos a nível mundial conduzem a uma mudança de mentalidades nos escalões privilegiados das sociedades desenvolvidas. A terra crua como material de construção deixou de ser sinónimo de desconforto e pobreza para começar a ser visto como um material alternativo e valorizado. Por isso, actualmente, por todos os continentes, está em curso um

¹ Equiparado a Assistente / Mestre em Construção pelo IST

² Professor Associado com Agregação

³ Professor Auxiliar

revivalismo da arquitectura de terra. Assim, é da maior importância um melhor conhecimento do desempenho das construções em terra crua, nomeadamente sob o efeito de um sismo.

As principais causas de degradação das construções com terra são:

- degradação física ao longo do tempo, principalmente devido à acção da água;
- fraca resistência mecânica do material, quando solicitado aos vários tipos de acções, nomeadamente a acção sísmica.

É necessário melhorar as características da construção com terra crua e ao mesmo tempo compatibilizar este material com as tecnologias de construção actualmente disponíveis. A fraca capacidade destas construções à acção sísmica deve ser colmatada com recurso à estabilização das matérias-primas e à adopção de soluções construtivas adequadas.

2. MÉTODOS DE ANÁLISE SÍSMICA

É distinto o comportamento das construções “antigas” e das modernas com estruturas reticuladas, nomeadamente as estruturas de madeira, aço e betão armado. Nas construções “antigas”, as propriedades elásticas lineares não são suficientes para caracterizar o comportamento em serviço, devido aos materiais empregues. Efectivamente, materiais como a terra e a pedra possuem uma resistência à tracção muito baixa, influenciando assim o comportamento global das edificações. Segundo Varum (2005), a resistência à compressão numa estrutura de terra varia entre 0.5 e 2.0 MPa e a resistência à tracção é cerca de 20% da resistência à compressão.

Nas construções em terra, a complexidade do comportamento é grande e tanto maior quanto mais materiais forem empregues, devido aos seus diferentes comportamentos, podendo encontrar-se frequentemente a pedra, a madeira, os resíduos de cerâmica e, hoje em dia, até betão armado. Face ao exposto, questionou-se como simular correctamente o comportamento dos materiais utilizados nestas construções e qual o método mais adequado para averiguar a sua segurança sísmica. Para a análise do comportamento de uma construção em terra crua sujeita à acção sísmica, o ideal seria utilizar uma análise não linear dinâmica, por se tratar de uma ferramenta poderosa, podendo simular a resposta completa da estrutura, quer na sua fase elástica, quer na sua fase de fendilhação e esmagamento até à rotura completa. Porém, este método é bastante moroso em termos de processamento, para além de complexo no que respeita à integração no tempo e à própria modelação das relações histeréticas dos materiais e elementos constituintes.

A inexistência de regulamentos e normas para as construções de terra crua que disciplinem o dimensionamento destas para fins estruturais, para além de outras motivações tecnológicas e decisões arquitectónicas, constituiu, até há poucos anos, a razão principal para limitar a sua utilização. Para as construções em terra, os critérios de dimensionamento aplicáveis têm sido apenas os de natureza empírica - intuitiva com base na experiência adquirida ao longo do tempo. Actualmente, esta situação tem vindo a ser alterada, com a entrada em vigor da norma que regula o projecto e a execução em alvenaria resistente, porque estas construções apresentam um comportamento semelhante ao das construções em terra crua. No entanto, o Eurocódigo 6 (EC6 - Projecto de estruturas de alvenaria), que regula as características tecnológicas e físico - mecânicas da alvenaria e dos seus constituintes, e o Eurocódigo 8 (EC8 - Projecto de estruturas resistentes à acção sísmica), que detalha a acção sísmica e os requisitos dos edifícios em zonas sísmicas, não referem explicitamente as construções em terra crua e só se encontram em vigor em Portugal há muito pouco tempo. Assim sendo, optou-se por modelações que permitem uma análise quantitativa linear no âmbito do Regulamento de Segurança e Acções (RSA), ainda em vigor em Portugal.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As construções em taipa, que se pretendeu simular, são executadas com terra crua, que é um material heterogéneo. Este tipo de construção conduz a edificações resistentes e, por isso, com durabilidade, desde que construída correctamente e num local com um clima adequado. A terra utilizada na taipa é normalmente arenosa, rica em pedras e cascalho e pouco argilosa. O comportamento destas construções é complexo, devido à sua fraca resistência à tracção. Esta característica influenciou durante séculos a geometria destas construções que sempre têm apresentado uma espessura elevada de paredes. Na bibliografia, consegue-se encontrar alguns dos parâmetros, que caracterizam as propriedades dos materiais referidos e apresentando uma variabilidade significativa.

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros que caracterizam as propriedades mecânicas e o peso dos materiais utilizados neste trabalho.

Tabela 1 - Caracterização do materiais

Material	C20/25 (REBAP)	Terra (Marangon, 2005; NZ4297:1998)	Pedra (Ramos, 2002)	Madeira (Ramos, 2002)
Massa por unidade de volume [ton/m ³]	2.5	1.9	2.2	0.6
Peso por unidade de volume [kN/m ³]	25	19	22	6
Módulo de elasticidade (E) [kN/m ²]	29 000 000	200 000	10 000 000	10 000 000
Coefficiente de Poisson (μ)	0.2	0.35	0.2	0.2

4. REFORÇO NAS CONSTRUÇÕES EM TERRA CRUA

Porque a acção de um sismo se faz sentir em todas as direcções, há que fazer uma correcta selecção da geometria da edificação, dispondo paredes em mais do que uma direcção para assegurar o bom comportamento de uma construção. No entanto, esta condição não é por si só suficiente. Torna-se ainda necessário, para melhorar o comportamento da construção, assegurar a existência de reforço horizontal e vertical, utilizando para isso materiais como por exemplo pedra, madeira ou mesmo o betão armado. Descrevem-se de seguida todos os tipos de reforços utilizados nas modelações numéricas.

4.1. Lintéis

É usual a utilização de lintéis na zona de vãos de portas e janelas. Estes lintéis podem ser de madeira (Figura 1, esquerda), aço, pedra ou betão armado. É assim criado um elemento horizontal que atravessa a abertura, tendo em consideração a espessura da parede e a sua própria largura, apoiando-se extremidades na própria parede. Os lintéis têm como principal objectivo a resistência às acções verticais. Segundo Lourenço (2005) e o Regulamento da Nova Zelândia (NZ 4299, 1998), os lintéis devem ser assentes nas paredes de terra, no mínimo com 0.30 m para cada lado da abertura. Segundo Parreira (2007), é essencial garantir uma boa ligação entre os dois materiais para que a paredes e o lintel funcionem em conjunto, devendo assim utilizar-se chumbadores de maneira a fixar o lintel à parede de terra.

4.2. Elementos em pedra

Os elementos em pedra têm como objectivo reforçar os cunhais e vãos de janelas e portas, sendo estas zonas críticas onde ocorrem grandes concentrações de esforços responsáveis por danos importantes, por exemplo aquando da ocorrência de sismos. Pretende-se assim aumentar a rigidez e resistência nas ligações entre paredes, assim como nos vãos de portas e janelas. Reforçando desta forma as paredes de taipa, confere-se-lhes uma maior rigidez.

Os cunhais em pedra devem ser usados nas esquinas e nas ligações ortogonais entre paredes. Devem ser integrados na estrutura, aumentando assim a ligação entre paredes, pelo que as suas juntas devem ser desfasadas. Esta ligação é conseguida utilizando cunhais “denteados”.

O reforço das faces verticais e horizontais do contorno das aberturas (Figura 1), zonas sempre frágeis da estrutura, pretende minimizar os efeitos da concentração de tensões, que ocorrem no contorno dos vãos e que levam ao aparecimento e à progressão da fendilhação.



Figura 1 - À esquerda, habitação cujo material da ombreira da porta é a pedra e com um lintel em madeira e, à direita, pormenor da ombreira em pedra

4.3. Tirantes em aço

A introdução de tirantes em aço nas paredes (Figura 2) é corrente em Portugal, sendo que nas construções antigas era utilizado o ferro forjado. Os varões são ancorados nas extremidades com peças especiais. Estes tirantes funcionam como uma armadura passiva, isto é, a sua utilização em obra não é acompanhada da aplicação de qualquer força transferida para a parede; pelo contrário, tais elementos apenas serão mobilizados quando ocorrem modificações dos estados de equilíbrio precedentes, por exemplo, associadas a movimentos de origem térmica, assentamentos de fundações, impulsos horizontais ou forças devidas à acção de sismos (Appleton, 2003).



Figura 2 - Habitações de taipa, na localidade de S. Luís - Portugal, com a utilização de tirantes em aço

4.4. Viga de soleira

Os autores Pinto et al (2003) referem que, para a construção apresentar uma maior resistência ao sismo, se deve colocar uma viga de soleira e uma viga de bordadura, ambas em betão armado.

4.5. Viga de bordadura

A viga de bordadura constitui o principal elemento de ligação com as paredes de taipa, ligando estas de forma consistente segundo uma estrutura reticulada horizontal (Figura 3). Deve ser suficientemente forte e contínua, devendo estar bem amarrada às paredes e aos cunhais. Para tal, pode colocar-se, nas esquinas das paredes e nas ligações com outras paredes, um dente em betão armado. Este, em conjunto com a viga de bordadura, não só confere estabilidade à estrutura, impedindo os deslocamentos laterais, como evita as fissuras verticais na zona superior das paredes e na perda de união entre as esquinas.



Figura 3 - Edificações com vigas de bordadura em betão armado: à esquerda, habitação e, à direita, habitação para turismo rural (Naturarte, 2007), ambas na localidade de São Luís - Odemira

Uma outra solução é apresentada nos regulamentos da Nova Zelândia (NZ 4299, 1998) e do Novo México (New Mexico Code, 2003) que preconizam a utilização de chumbadores na ligação da parede de terra crua e a viga de bordadura. Os chumbadores são elementos metálicos semelhantes a parafusos, que ligam as paredes às vigas de bordadura. De acordo com estes regulamentos, os chumbadores devem ser introduzidos em orifícios com um mínimo de 0.30 m de profundidade e com 0.07 m de diâmetro no interior da parede. Garantem assim um bom encastramento destes elementos nas paredes de terra crua e, ao mesmo tempo asseguram que a capacidade resistente da própria parede não seja muito afectada. O afastamento destes elementos e a área adoptada para a sua secção devem ser definidos de

forma a resistir aos máximos esforços de corte que solicitem esta interface parede de taipa - viga de bordadura (Parreira, 2007).

Uma consequência frequente nas edificações de terra, quando sujeitas à acção sísmica, consiste nas grandes fissuras verticais na intersecção das paredes ortogonais (Zegarra et al, 1997). Nestas zonas, a concentração de tensões é elevada (Dowling, 2004). Utilizando como reforço a viga de bordadura, tenta-se minimizar estes efeitos.

4.6. Estrutura reticulada em betão armado

Os reforços verticais e horizontais devem estar unidos entre si e com os outros elementos estruturais, nomeadamente as fundações, montantes, viga de bordadura, a ligação à cobertura, entre outros. Esta ligação faz com que a edificação se comporte como um bloco, tornando-a mais forte do que se todos os elementos funcionassem independentes. Ao colocar-se uma estrutura reticulada em betão armado, a construção irá comportar-se como um conjunto mais rígido e resistente, não existindo grandes deslocamentos, nem grandes tensões nas zonas mais críticas (Gomes, 2008).

5. MODELOS ANALISADOS

Para fazer a análise numérica, elaboraram-se cinco estruturas e respectivos modelos tridimensionais. Todas as estruturas tiveram em conta soluções de reforço da edificação de terra, tanto na horizontal como na vertical, como por exemplo o lintel de madeira, os cunhais em pedra, a viga de bordadura, entre outros. A arquitectura da edificação foi concebida de forma a ser semelhante a edificações existentes em Portugal e adaptar-se às dimensões recomendadas por especialistas em edificações em terra crua. Em todos os modelos, a edificação tem uma dimensão em planta de 13 x 14 m², as paredes exteriores têm uma espessura de 0.60 m e as paredes interiores de 0.40 m. Seguidamente, resumem-se as principais características das estruturas analisadas.

- Primeira estrutura

O primeiro modelo numérico refere-se a uma estrutura com uma construção de terra que não apresenta reforço, à excepção do lintel em madeira localizado nas vergas de janelas e portas, com 0.20 m de espessura e 0.60 m de largura. As fundações (embasamento) são em alvenaria de pedra.

- Segunda estrutura

O segundo modelo apresenta as mesmas características geométricas do primeiro. A diferença está no reforço de cunhais e de vãos de janelas e portas (vergas, ombreiras e peitoris) com elementos em pedra. Também as fundações (embasamento) são em alvenaria de pedra.

- Terceira estrutura

O terceiro modelo continua a apresentar as características geométricas dos anteriores. A diferença está na introdução de tirantes em aço nas paredes, utilizando um tirante em aço (A400), com um diâmetro de 16 mm e colocado a 0.30 m do topo da parede e ao centro da espessura destas. Os cunhais são em alvenaria de pedra, assim como as ombreiras, os peitoris e as vergas de portas e janelas. Também as fundações (embasamento) são em alvenaria de pedra.

- Quarta estrutura

O quarto modelo distingue-se dos anteriores pela colocação de uma viga de bordadura em betão armado, não sendo assim necessário a colocação do tirante. A viga de bordadura é em betão armado com uma secção de 0.20 x 0.20 m². Os cunhais continuam a ser em alvenaria de pedra, assim como as fundações (embasamento).

- Quinta estrutura

O quinto modelo mantém as mesmas características geométricas do modelo anterior. O modelo apresenta uma estrutura de betão armado, nomeadamente uma viga de bordadura, montantes e fundações (embasamento) em betão. As secções da viga de bordadura e dos montantes são de $0.20 \times 0.20 \text{ m}^2$. Os vãos de janelas e portas apresentam uma zona em alvenaria de pedra.

6. MODELAÇÃO DAS ESTRUTURAS NO PROGRAMA

6.1. Introdução

O modelo foi definido como sendo composto por elementos finitos tridimensionais, ou seja, elementos sólidos. Estes elementos são assim utilizados para a análise de um estado tridimensional de tensão. Esta modelação justifica-se neste tipo de construção por existirem paredes de elevada espessura e, deste modo, ser possível conhecer as tensões e deslocamentos ao longo da espessura da parede. O elemento sólido utilizado tem 8 nós e cada nó três graus de liberdade, como se pode ver na Figura 4.

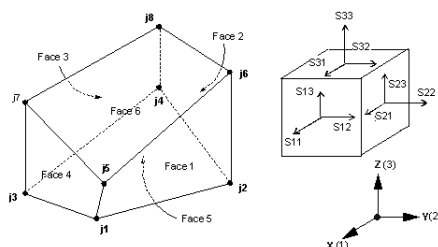


Figura 4 - À esquerda, elemento sólido com oito nós e, à direita, estado de tensão num ponto em termos de componentes cartesianas nas faces de um corpo livre (SAP 2000, 1998)

Os vários modelos construídos no programa de cálculo automático de estruturas, como referido, apresentam as mesmas características geométricas, sendo o modelo da primeira estrutura retratado na Figura 5, onde é possível observar a sua geometria e a malha de sólidos gerada que irá definir o modelo numérico no cálculo automático de estruturas.

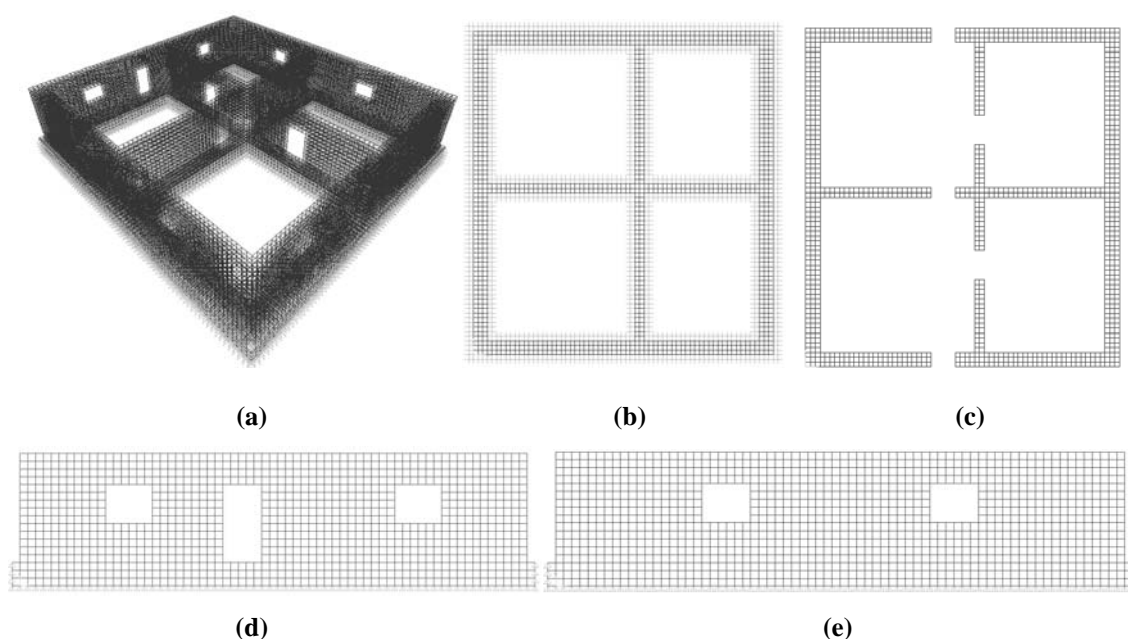


Figura 5 - Primeiro modelo numérico: (a) perspectiva a 3 dimensões; (b) vista em planta (XY) com $Z = 0.4$ m; (c) vista em planta (XY) com $Z = 1.0$ m; (d) vista em alçado do plano XZ; (e) vista em alçado do plano YZ

Como não existe qualquer prospecção geotécnica para a caracterização mecânica do terreno de implantação da edificação, considerou-se um terreno de características médias do tipo II - solos coerentes muito duros, duros e de consistência média; solos incoerentes compactos, tal como definido no RSA. A ligação da estrutura ao solo de fundação foi simulada através de limitações de deslocamentos em cada nó, bloqueando assim os deslocamentos nas três direcções (x, y e z). A base dos sólidos no modelo numérico fica simulada como sendo um encastramento.

Considerou-se como cargas permanentes instaladas na estrutura o peso próprio dos materiais incorporados e a cobertura. A estrutura da cobertura não foi incluída no modelo numérico, tendo-se considerado apenas o seu peso próprio, aplicado nos locais correspondentes no topo da edificação. Considera-se, assim, o peso próprio da cobertura como uma acção vertical, com um valor de 0.50 kN/m^2 , sendo este um valor médio segundo as Tabelas Técnicas, para uma cobertura de madeira. As coberturas devem ser leves, sendo tradicional a utilização de coberturas em madeira (Morales et al, 1993).

6.2. Introdução das propriedades nos elementos sólidos no programa de cálculo automático

Como referido, todas as modelações foram realizadas a partir da definição de elementos finitos tridimensionais - sólidos. Após realizada a estrutura em elementos finitos, definiram-se os materiais em cada um desses elementos sólidos. Em cada uma das cinco modelações, os materiais variam de acordo com as características de cada uma das estruturas.

A definição de cada elemento sólido foi feita de acordo com a sua localização em cada um dos cinco modelos a estudar. Desta forma, a cada elemento está associado um material, ao qual corresponde um conjunto de propriedades. Em termos práticos, começa-se por definir as propriedades dos materiais a utilizar. Após esta fase, definem-se os vários sólidos e localizam-se estes nos vários modelos, atribuindo-se-lhes as propriedades respectivas.

O coeficiente de amortecimento (ξ) para edifícios de alvenaria, segundo Cardoso et al (2004), o valor para o coeficiente de amortecimento deve ser considerado igual a 10%. Segundo Vasques (2000), é considerado para edificações em alvenaria tradicional um coeficiente de amortecimento de $\xi = 5$ a 7%. Ainda, segundo Parreira (2007), é considerado para edificações em taipa um coeficiente de amortecimento de $\xi = 5\%$. No caso das modelações efectuadas, sendo estas em terra crua - taipa, foi considerado um coeficiente de amortecimento de $\xi = 5\%$. Ao ser utilizado este valor, está-se a ser conservativo, nas modelações efectuadas.

Nestas modelações, foi necessário utilizar o coeficiente de comportamento (η). Este coeficiente é uma forma simplificada de estimar os esforços que se desenvolvem em regime não linear devido à acção dos sismos. As construções em terra, embora muito idênticas às construções de alvenaria, não têm um valor regulamentado para este coeficiente e, assim sendo, estar-se-á a ser conservativo se se considerar este coeficiente com o valor 1.0.

6.3. Combinações de acções

Em cada análise linear, foram consideradas três combinações. A primeira, designada combinação de acções verticais, refere-se às cargas verticais aplicadas na estrutura e as duas restantes, nomeadamente combinações para a acção de base sismo do tipo I e II,

correspondem às acções sísmicas. Não foi considerado qualquer outro tipo de acção horizontal (como o vento, por exemplo).

Segundo o RSA, é necessário considerar a actuação da acção sísmica no plano horizontal e esta somente é considerada na direcção vertical em estruturas que sejam especialmente sensíveis a vibrações nesta direcção, tal como acontece nas construções de terra crua, assim sendo, a direcção vertical também será considerada. Nestas construções, a resistência ao corte é assegurada pelo atrito existente entre as partículas no interior da parede e pela acção da gravidade, sendo reduzida com vibrações verticais que induzem movimentos ascendentes. A quantificação da acção sísmica é realizada por espectros de resposta.

A resposta correspondente à actuação simultânea do sismo em três direcções ortogonais é efectuada por meio da raiz quadrada da soma dos quadrados, *Square Root of Sum of Squares* - SRSS, da resposta devida a cada direcção de actuação da acção sísmica. Foi esta a via utilizada nos modelos analisados para ter em conta as várias componentes do sismo.

Para combinar os valores modais, recorreu-se ao método CQC - Combinação Quadrática Completa, definindo o amortecimento presente na estrutura a afectar igualmente todos os modos de vibração.

7. ANÁLISES NUMÉRICAS

Neste capítulo, expõem-se os resultados das várias modelações. Estas análises lineares devem ser encaradas com alguma prudência já que, como referido, o tipo de estruturas que se pretende analisar tem comportamento não-linear para acções sísmicas intensas.

Nas cinco modelações, a frequência de vibração com o valor mais baixo foi observada na primeira, com um valor de 5.314 Hz no 1º modo. Assim, segundo o RSA, numa análise dinâmica com espectros de resposta, verifica-se que a acção sísmica do tipo I é a mais gravosa.

7.1. Critérios de análise

Pretende-se analisar este tipo de modelos quanto aos seus estados limite últimos, verificando-se para isso as suas tensões admissíveis. Constata-se que, de acordo com o Regulamento da Nova Zelândia (NZ 4297, 1998), para a terra crua o valor do módulo de elasticidade pode ser tomado igual a 300 vezes a máxima tensão de compressão. O valor adoptado para o módulo de elasticidade da estrutura de terra foi de 200 MPa (Tabela 1), aceitando-se assim que a tensão de compressão máxima admissível é de 0.67 MPa. Segundo Varum (2005), a tensão de tracção é cerca de 20% da tensão de compressão. Assim, o valor máximo admissível de tensão de tracção será de aproximadamente 0.13 MPa. No entanto os valores admissíveis das tensões máximas de compressão e de tracção podem diminuir ou mesmo aumentar e conseqüentemente modificar os estados limite.

Os valores de cálculo de resistência também aumentam se se estabilizar a terra com cimento e se utilizar meios mecânicos de compactação. Segundo Galante (2004), uma amostra de solo compactada manualmente apresenta uma resistência à compressão de 0.86 MPa. Para uma outra amostra de solo, mas agora compactada mecanicamente e constituída por uma parte em cimento e vinte partes de solo, a resistência aumenta 225%, obtendo assim uma resistência máxima admissível à compressão de 3.05 MPa e uma resistência máxima admissível à tracção de 0.61 MPa. Embora estes valores não sejam extrapoláveis, por se tratarem de um caso isolado, permitem mostrar que existem melhorias bastante significativas das características da terra, quando esta é estabilizada.

7.2. Análise de tensões

Perante os critérios de análise e para as três combinações de acções, verifica-se que, para a combinação de acções verticais, é verificada a segurança relativamente aos estados limite últimos, uma vez que, segundo os critérios de análise, as tensões admissíveis de tracção e compressão se encontram dentro destes limites de segurança. Para as duas restantes combinações, apenas será abordada a combinação para a acção de base sismo tipo I, uma vez que esta é a mais desfavorável, como já referido.

Serão apenas apresentadas as tensões mais gravosas em cada uma das modelações, através dos valores das máximas tensões normais dos eixos globais.

- Primeira modelação

Na Figura 6, observam-se os resultados referentes à tensão normal do eixo global x, σ_{11} . É notória a deformação e as elevadas tensões de tracção, no topo da parede interior e similarmemente as elevadas tensões na intersecção entre paredes interiores e exteriores. A parede mais solicitada, em termos de tensões de tracção, corresponde à parede interior segundo a sua direcção x. Deve-se este estado de tensão à diminuição da espessura da parede interior sendo esta menos rígida. Para a combinação para a acção de base sismo tipo I, as maiores tensões de tracção apresentam-se na zona de intersecção entre paredes interiores e exteriores, com um valor de 450 kPa. Para esta modelação, verifica-se que existem zonas de elevadas tensões de tracção, que ultrapassam em muito os valores máximos admissíveis de resistência para este tipo de estrutura de acordo com o que foi estipulado. Para este modelo e combinação, dão-se em várias zonas da estrutura danos localizados. Verifica-se ainda que os valores máximos das tensões de compressão são superiores aos valores máximos de tensões de tracção para esta componente, não sendo, de acordo com os critérios de segurança, os valores das tensões de compressão condicionantes, uma vez que o valor admissível (5 vezes maior para a compressão do que para a tracção) é muito superior aos valores observados.

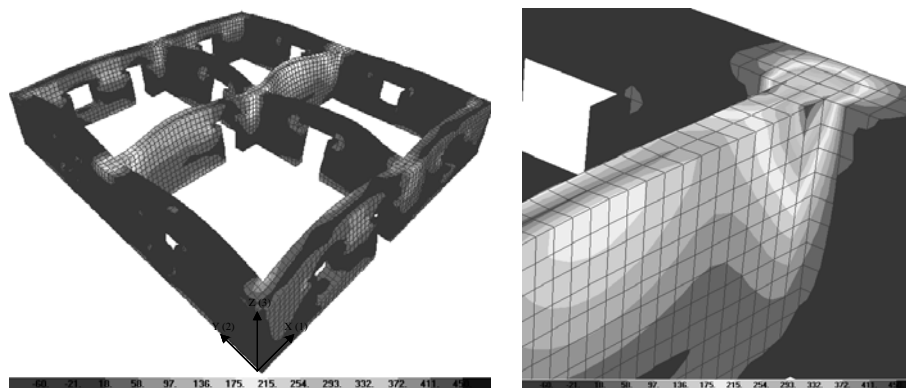


Figura 6 - Máximas tensões de tracção, em kPa, σ_{11} , e deformada nos elementos com o material terra para a combinação para a acção de base sismo tipo I: à esquerda, modelo global e, à direita, pormenor da intersecção das paredes interiores com as paredes exteriores

- Segunda modelação

Os resultados das tensões de tracção mais gravosas observam-se na intersecção entre paredes interiores e exteriores, chegando ao valor de 250 kPa, e nos vãos das janelas atingindo valores na ordem de 300 kPa. Consequentemente, nestas zonas irão dar-se danos localizados, uma vez que se ultrapassam os estados limite últimos. As tensões de compressão, na estrutura em terra crua, apresentam valores máximos de 415 kPa, não sendo este valor gravoso para este tipo de estruturas, de acordo com os critérios de análise. Em comparação com o primeiro modelo, o reforço com elementos em pedra leva a uma diminuição no valor das tensões, não sendo ainda suficiente para estar dentro dos limites de segurança.

- Terceira modelação

Os resultados das tensões de tracção nesta modelação assemelham-se aos resultados obtidos na segunda modelação, constatando assim, que não existem alterações significativas na análise de tensões, do segundo modelo para o terceiro. A colocação de um tirante passivo não contribui portanto para a diminuição de deformações ou tensões. Pode no entanto contribuir de uma forma construtiva, ou seja, limitar a perda de material por desagregação quando este fissura.

- Quarta modelação

Pode concluir-se que, para o quarto modelo em comparação com o segundo e para a combinação mais desfavorável, o valor máximo de tensão de tracção baixou cerca de 40%, existindo uma diminuição de cerca de 60% comparativamente com o primeiro modelo. Perante estes resultados, verifica-se que é essencial a utilização de vigas de bordadura sobre todas as paredes com função estrutural, uma vez que as tensões de tracção diminuem significativamente com este tipo de reforço. Mesmo assim, ainda existirão três pontos na estrutura com valores de tensões de tracção acima dos admissíveis, sendo o valor máximo observado de cerca de 185 kPa. Nestes pontos e para esta combinação, irão existir danos locais, uma vez que os valores de tensões de tracção ultrapassam os limites considerados nos critérios de segurança. Estes danos encontram-se nas zonas de intersecção entre paredes interiores e exteriores, na zona de intersecção entre paredes interiores para a tensão normal do eixo global x, σ_{11} , e nos vãos de janela para a tensão normal do eixo global z, σ_{33} (Figura 7).

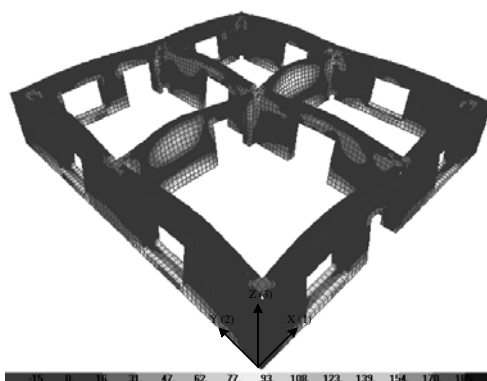


Figura 7 - Máximas tensões de tracção, em kPa, σ_{33} , e deformada nos elementos de terra para a combinação para a acção de base sismo tipo I

A viga de bordadura, quando sujeita a forças sísmicas, impede que as paredes tenham grandes deslocamentos a meio vão, fissuras verticais e a perda de união nos cantos (Pinto et al, 2003). A viga de bordadura é um dos elementos mais importantes nas construções de terra, sendo bastante importante para resistir a um sismo, devido ao seu bom comportamento face a esta acção, como referem Blondet et al (2003). Esta deve estar fortemente ligada às paredes, formando uma estrutura do tipo caixa, devendo ser contínua e receber as solicitações impostas pela cobertura e suportar as mesmas. Estas vigas de bordadura poderão ser em betão armado ou, menos correntemente, em madeira.

- Quinta modelação

Verifica-se que não existem alterações significativas de tensões, do quarto modelo para o quinto. A colocação adicional de montantes em betão armado, em relação à viga de bordadura, não contribui significativamente para a diminuição de tensões. A colocação de pilares em betão, pode no entanto contribuir para confinar os panos de taipa transversalmente, devendo estes estar ligados de uma forma consistente à viga de bordadura e à viga de soleira.

Para a combinação para a acção de base sismo tipo I, existem ainda, à semelhança do modelo anterior, zonas com tensões de tracção superiores às admissíveis para as tensões

normais, ultrapassando os valores de resistência para este tipo de estrutura de acordo com o que foi estipulado. Existirão dois pontos na estrutura com valores de tensões de tracção acima dos admissíveis, sendo o valor máximo observado de cerca de 200 kPa. Nestes pontos e para esta combinação, existirão danos locais, uma vez que os valores de tensões de tracção, ultrapassam os limites considerados nos critérios de segurança. Os danos localizados encontram-se nas zonas de intersecção entre paredes interiores e exteriores para a tensão normal do eixo global x, σ_{11} , e nos vãos de janela para a tensão normal do eixo global z, σ_{33} .

8. CONCLUSÕES

Perante os resultados obtidos para todos os modelos e para a combinação mais desfavorável, verifica-se que, com este tipo de solo e com um módulo de elasticidade da terra igual a 200 MPa, não é verificada a segurança relativamente aos estados limite últimos, uma vez que a alvenaria em terra crua apresenta valores de tensões de tracções superiores aos admissíveis, de 0.13 MPa.

Constata-se ainda que as tensões máximas de tracção, para a zona A (zona mais desfavorável), ocorrem no primeiro modelo, modelo este não reforçado. À medida que os modelos vão sendo reforçados, verifica-se uma diminuição das tensões máximas de tracção, sendo o quarto e o quinto modelos os que apresentam menos danos localizados.

A utilização de lintéis de madeira sobre as aberturas ou mesmo de lintéis em betão armado pode ser uma boa solução para paredes que apresentem como problema a flexão vertical. Os lintéis, para além de resistirem às tracções que por vezes surgem devido às cargas permanentes, no caso de serem em betão armado aumentam também a rigidez da parede fora do seu plano.

É também possível verificar que é essencial a utilização de vigas de bordadura sobre todas as paredes com função estrutural. Estes elementos, além de aumentarem a rigidez à flexão vertical das paredes, são fundamentais na compatibilização de deslocamentos entre as várias paredes, garantindo, deste modo, que todas funcionam em conjunto. São também responsáveis pela diminuição de esforços de tracção.

O reforço com elementos em betão armado (podendo estes ficar ocultos), além de reduzir as tensões no solo para valores aceitáveis na maior parte das zonas sísmicas, apresenta também a vantagem de limitar as consequências de possíveis danos locais: permitiria manter o apoio vertical da cobertura, um objectivo mais difícil de garantir se esta se apoiasse directamente nas paredes de terra.

Adoptando os valores propostos por Galante (2004), ao utilizar uma mistura de terra estabilizada com cimento e posteriormente compactada mecanicamente, verifica-se que as tensões máximas de tracção e compressão para os vários modelos são bastante inferiores às tensões máximas admissíveis, verificando assim a segurança para os estados limite últimos para todos os modelos

Como as análises efectuadas se referem a um caso de uma estrutura de um piso com uns determinados vãos e percentagens de aberturas (para portas e janelas) nas paredes, as conclusões não devem ser directamente extrapoladas para construções de maior número de pisos ou vãos ou percentagens de aberturas em paredes superiores às consideradas.

9. REFERÊNCIAS

A.A.V.V. - SAP 2000 (1998). Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures, Graphic user Interface Manual. Computers & Structures Inc. Berkeley, California, USA Version 7.0. August

Appleton, J. (2003). Reabilitação de edifício antigos - Patologias e tecnologias de intervenção. Edições Orion, Lisboa, Setembro.

Blondet, M.; García, G.; Loaiza, C. (2003). Viviendas sismorresistentes de tierra? Una visión a futuro. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil - CONIC. Lima, Peru.

Cardoso, R.; Lopes, M.; Bento, R. (2004). Vulnerabilidade sísmica de um edifício pombalino. Sísmica 2004 - 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. Lisboa, pp. 921-930.

Dowling, D. (2004). Adobe housing in El Salvador: earthquake performance and seismic improvement. In Rose, W. I. et al, GSA Special Paper on Natural Hazards in El Salvador. Geological Society of America.

European Standard, Eurocode 6: Design of masonry structures. ENV 1996-1-3.

European Standard, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1, December 2004.

Galante, R. (2004). A construção em taipa e a reciclagem de materiais. Relatório de estágio para a obtenção do grau de licenciado em Arquitectura. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Novembro.

Gomes, M. (2008). Construção sismo-resistente em terra crua. Dissertação de Mestrado em Construção no Instituto Superior Técnico, Lisboa, 182 p.

Lourenço, P. (2005). As estruturas de terra e os sismos. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil.

Marangon, M (2005). Mecânica dos Solos II. Faculdade de Engenharia - NuGeo / Núcleo de Geotecnia. Documentos de apoio à disciplina Mecânica dos Solos. Universidade Federal de Juiz de Fora - Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes.

Morales, R.; Cabrejos, R.; Rengifo, L.; Candiotti, C. (1993). Manual para la construcción de Viviendas de adobe. Lima.

New México Code (2003). New Mexico earthen buildings materials code, construction. Industries Division of the Regulation and Licensing Department, Estados Unidos da América.

Parreira, D. (2007). Análise sísmica de uma construção em taipa. Dissertação de Mestrado em Construção. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Setembro.

Pinto, M.; Payalich, E.; Wamsler, C. (2003). Proyecto de reconstrucción con inclusión de la gestión de riesgo - elementos técnicos y estrategia institucional para la disminución del riesgo y de la dimensión de futuros desastres. División 4200, Democracia y Gobernabilidad. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Eschborn, Peru. Março.

Ramos, J. (2002). Análise experimental e numérica de estruturas históricas de alvenaria. Escola de Engenharia da Universidade do Minho - Departamento de Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Janeiro.

RSA (1985). Regulamento de segurança e acções em estrutura de edifícios e pontes. Decreto-Lei 235/83 de 31 de Maio. Imprensa Nacional, Casa da Moeda. Lisboa.

REBAP (1983). Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado. Decreto-Lei 349-C/83 de 30 de Julho. Imprensa Nacional, Casa da Moeda. Lisboa.

Regulamento da Nova Zelândia NZ 4297 (1998). Engineering design of earth buildings. Earth Building Association of New Zealand, Nova Zelândia.

Regulamento da Nova Zelândia NZ 4299 (1998). Earth buildings not requiring specific design. Earth Building Association of New Zealand, Nova Zelândia.

Varum, H.; Martins, T.; Velosa, A. (2005). Caracterização do adobe em construções existentes na região de Aveiro. Terra em Seminário, IV Seminário Ibero-Americano de Construção em Terra e III Seminário de Arquitectura de Terra em Portugal. Argumentum -

Edições Estudos e Realizações, Escola Superior Gallaecia - Ensino Universitário. Monaraz, Outubro, pp. 233-235.

Vasques, M. (2000). Sebenta da unidade curricular de dinâmica de estruturas. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil.

Zegarra, L.; Quiun, D.; San Bartolomé, A.; Giesecke, A. (1997a). Reforzamiento de viviendas de adobe existentes (Proyecto Ceresis- Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit - GTZ-PUCP), no XI Congresso Nacional Ingeniería Civil, Trujillo.