

# AValiação EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS RESISTENTES EM ALVENARIA DE ADOBE

Humberto Varum, Aníbal Costa, Henrique Pereira, João Almeida, Hugo Rodrigues

Departamento de Engenharia Civil  
Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, PORTUGAL  
Tel.: +351 234 370938 - Fax: +351 234 370094 - E-mail: [hvarum@civil.ua.pt](mailto:hvarum@civil.ua.pt)

## Tema 1. Patrimonio edificado en tierra. Técnicas y métodos de conservación.

*Palavras-chave:* Elementos resistentes em adobe, Caracterização mecânica, Ensaios cíclicos

### RESUMO

Na região da Beira Litoral, em Portugal, e particularmente no distrito de Aveiro, a construção em adobe foi uma técnica muito utilizada até meados do século XX. Presentemente, cerca de 25% das construções existentes na cidade de Aveiro são de adobe. Estes números sobem para 40% se referidos a todo o distrito, destacando-se assim a importância deste sistema construtivo no meio rural. O adobe foi utilizado nas mais diversas construções, desde edifícios rurais, edifícios urbanos de maior porte, muros, poços de água, igrejas e armazéns. De destacar imensos edifícios de elevado valor histórico e patrimonial que foram também construídos em adobe, como por exemplo alguns edifícios de estilo *Art Nouveaux*. A reabilitação ou reforço destas construções tem vindo a ser negligenciada durante décadas. Da falta de sensibilidade para a sua preservação resultou o estado actual de dano estrutural pronunciado e, em muitos casos, o limiar da ruína, no qual se encontram a maioria das construções existentes e que deixa antever, a breve prazo, a entrada em colapso de muitas destas. Para colmatar a falta de informação acerca do comportamento e propriedades mecânicas dos elementos estruturais em adobe, a Universidade de Aveiro tem vindo a desenvolver estudos e ensaios de caracterização deste tipo de material e construção, nomeadamente a realização de levantamentos dimensionais, estudo da composição dos diferentes adobes da região e do seu comportamento mecânico. Foram efectuados ensaios de caracterização mecânica de paredes de alvenaria de adobe em laboratório e *in-situ*, sob solicitações verticais permanentes combinadas com solicitações horizontais cíclicas. Pretende-se que os resultados desta campanha de ensaios sirvam como suporte em futuras intervenções de reabilitação e reforço em construções existentes de adobe. Nesta comunicação será brevemente relatado o trabalho recentemente desenvolvido na Universidade de Aveiro, serão apresentadas as principais conclusões e os projectos a desenvolver no futuro.

### 1. Enquadramento e objectivos

Em Portugal e principalmente na zona de Aveiro a construção em adobe foi uma técnica muito utilizada, até meados do século XX, aquando do desenvolvimento de outros materiais.

Actualmente, em Aveiro o adobe pode ser encontrado nas mais variadas construções desde edifícios rurais, geralmente de pequenas dimensões, a edifícios urbanos de maior porte, passando por muros, poços de água, igrejas e armazéns. Inúmeros edifícios de elevado valor patrimonial foram construídos em adobe, por exemplo alguns edifícios de estilo *Art Nouveaux*. De tal forma se faz ainda sentir a presença da construção em adobe na região que, segundo dados do município de Aveiro, cerca de 25% das construções existentes na cidade de Aveiro são de adobe, estes números sobem para 40% se referidos a todo o distrito, destacando-se assim a importância deste sistema construtivo no meio rural.

É evidente o nível de degradação e abandono patente nas construções em adobe da região de Aveiro, contudo podem-se ressaltar casos em que as construções se encontram plenamente capazes de cumprir as funções para as quais foram pensadas e construídas, bastando para tal pequenas obras de manutenção e conservação. Regra geral, a demolição tem sido a solução adoptada para estas construções, porém, nos últimos anos, tem-se recorrido pontualmente à

reabilitação e reforço das construções em adobe por parte de alguns proprietários sensibilizados com a sua salvaguarda e preservação.

A opção de reabilitar apresenta dificuldades acrescidas devido à falta de informação sobre as propriedades e caracterização mecânica do adobe, sendo necessário estudos técnicos para determinar propriedades como: o módulo de elasticidade, a sua resistência à compressão, tracção e corte ou a sua composição, entre outros.

A caracterização mecânica dos blocos de adobe e das argamassas bem como de alvenarias em adobe, são instrumentos fundamentais no apoio à realização de projectos de reabilitação e reforço deste tipo de alvenaria resistente e até mesmo para construções novas, utilizando esta técnica construtiva.

## 2. Ensaio sobre paredes de alvenaria em adobe

Dada a falta de informação acerca do comportamento e propriedades mecânicas (rigidez, capacidade resistente, capacidade de dissipação de energia, mecanismo de colapso) dos elementos resistentes em alvenaria de adobe existentes nas construções desta região, foram efectuados ensaios sobre paredes, em laboratório e *in-situ*, sob solicitações verticais permanentes combinadas com solicitações horizontais cíclicas, como as induzidas por sismos.

### 2.1. Ensaio em laboratório

Com unidades recolhidas em construções existentes na região de Aveiro e com uma argamassa produzida com composição análoga à usada tradicionalmente nessas edificações em adobe, foi construída uma parede e ensaiada no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

A parede construída tem uma altura de 1.08m, largura de 1.02m e a espessura de um adobe, neste caso 0.185m. O apoio na base simula uma ligação de encastramento (rotação impedida para fora do plano da parede) que foi realizada com recurso a uma lajeta de betão fixa através de varões roscados à laje de reacção do Laboratório.

Na construção da parede usaram-se adobes retirados de uma casa existente na região, cujos valores médios da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, determinado em ensaios mecânicos, assumem o valor de 1.10MPa e 147.3MPa, respectivamente. Para as juntas usou-se uma argamassa com resistência à compressão de 1.42MPa e módulo de elasticidade de 112.8MPa.

Foram realizados dois tipos de ensaios sobre a parede. Inicialmente, em ensaios não destrutivos, foram medidas as frequências próprias da parede, que permitem fazer a sua caracterização dinâmica e a calibração de modelos numéricos. Numa segunda fase, foi efectuado um ensaio destrutivo com imposição de forças horizontais cíclicas.

Na imagem 01 representa-se um esquema geral da parede e do dispositivo de ensaio.

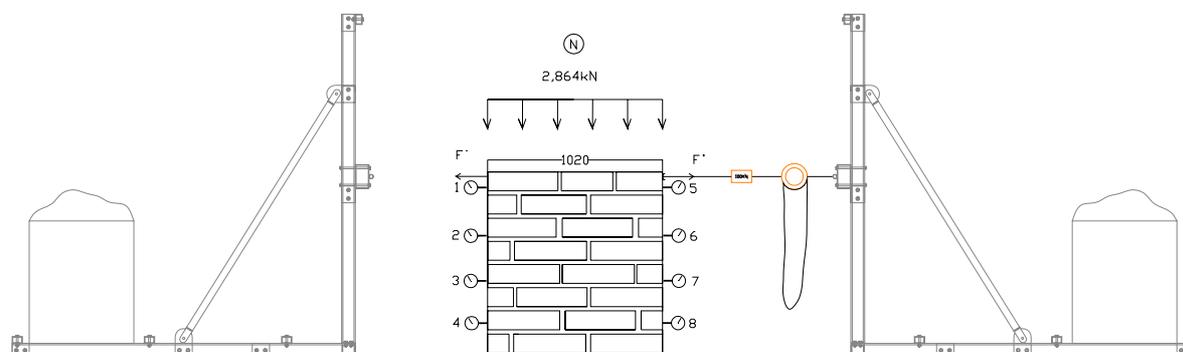


Imagem 01 – Esquema de ensaio da parede em laboratório: pórticos de reacção, transdutores de deslocamento, dinamómetro e sistema de aplicação de forças horizontais na parede (Garibaldi).

### 2.1.1. Ensaio dinâmico

Foi feita a leitura, através de um sismógrafo, das frequências próprias nas duas direcções horizontais (transversal e longitudinal), (imagem 02). Como excitação aplicou-se um impulso dinâmico sobre a parede. Das acelerações registadas no sismógrafo derivaram-se as frequências próprias. Das leituras efectuadas com o sismógrafo estimou-se uma frequência de 10.94Hz na direcção transversal da parede.



Imagem 02 – Leitura, através de um sismógrafo, das frequências próprias.

Assumindo para a parede um funcionamento em consola de um elemento com secção transversal constante, encastrada na base e com massa uniformemente distribuída em altura, pode estimar-se a frequência própria através da seguinte expressão:

$$E = \frac{\omega^2}{1.875^4} \cdot \frac{mL^4}{I}$$

onde,  $E$  representa o módulo de elasticidade médio da parede;  $\omega$  a frequência da parede (em rad/s; funcionamento em consola);  $I$  o momento de inércia da secção transversal;  $m$  a massa por unidade de comprimento da parede; e,  $l$  a altura total. Através da expressão apresentada e tendo como base a frequência transversal medida obtém-se para o módulo de elasticidade médio da parede um valor de 310MPa.

### 2.1.2. Ensaio cíclico

Executaram-se ensaios cíclicos semi-destrutivos sobre uma parede construída em laboratório, nesta impuseram-se forças no plano de forma controlada e mediram-se os deslocamentos. Depois de aplicada a carga vertical (2.86kN) sobre a parede, foram impostas forças horizontais no plano da parede, em ciclos de amplitude crescente até ao colapso da parede. A força horizontal máxima aplicada na parede foi de 3.20kN (imagem 03 e 04).



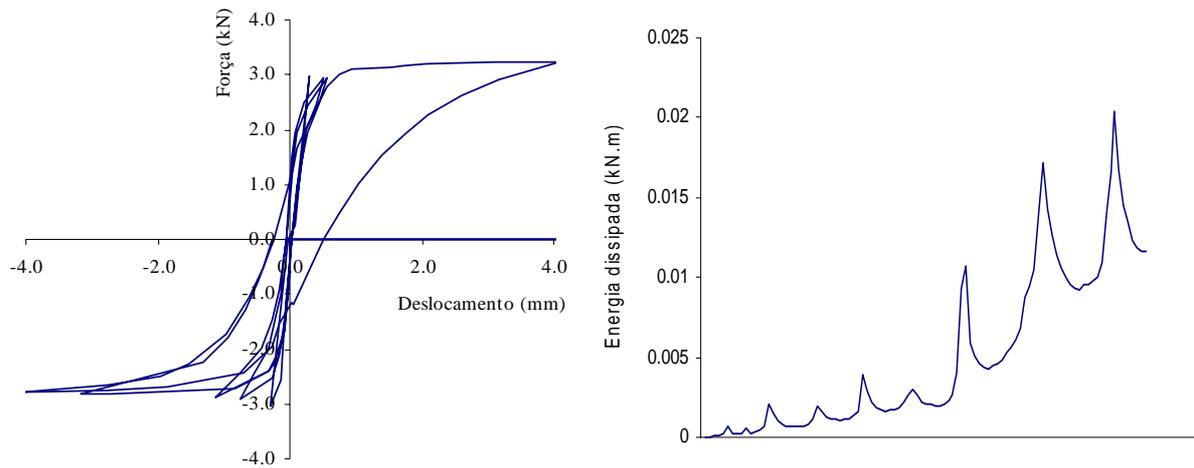


Imagem 03 – Parede, pórticos de reacção e gráfico força vs. deslocamento.

O modo de rotura verificado na parede foi o característico destas paredes de alvenaria e para os níveis de tensão vertical em causa. Este traduziu-se pela abertura de uma fenda horizontal na base da parede. O valor reduzido da carga vertical induz um comportamento tipo mecanismo de corpo rígido, traduzido num movimento de rotação da parede quase intacta sob os seus cantos inferiores (*rocking*). A resposta à solicitação horizontal cíclica aplicada sobre a parede pode ser observada no gráfico da imagem 03.

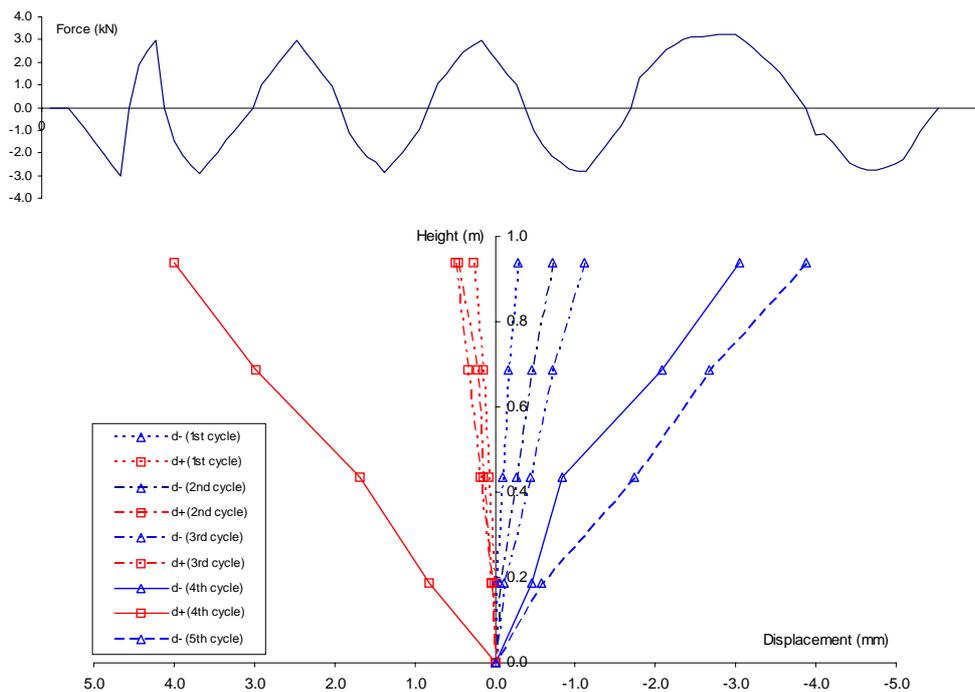


Imagem 04 – Ensaios cíclicos: evolução da força aplicada e da deformada.

## 2.2. Ensaios *in-situ*

Foram iniciados trabalhos de caracterização mecânica *in-situ* do comportamento de paredes de alvenaria de adobe, com representação das reais condições materiais, de apoio e de ligação a outros elementos estruturais.

O facto de se executarem os ensaios na própria construção e não em modelos realizados em laboratório, permite avaliar o funcionamento global da estrutura, podendo-se assim obter valores que melhor descrevem o comportamento dos diferentes elementos e avaliar de forma mais rigorosa as condições de funcionamento estrutural, quer nas ligações entre paredes, quer

o efeito das coberturas nas paredes estruturais ou a influencia das aberturas e de outros pontos singulares.

A metodologia e o esquema de ensaios *in-situ* (imagem 05) é em tudo semelhante aos ensaios realizados em laboratório, anteriormente descritos.

Realizaram-se também medições *in-situ* de frequências próprias dos elementos estruturais em estudo, com recurso a um sismógrafo.

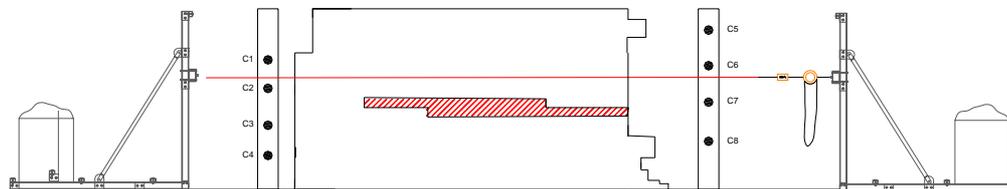


Imagem 05 – Esquema de ensaio da parede *in-situ*: pórticos de reacção, transdutores de deslocamento, dinamómetro e sistema de aplicação de forças horizontais na parede.

### 2.2.1. Ensaio dinâmico

De forma análoga ao procedimento utilizado para a parede ensaiada em laboratório, foram também feitos ensaios dinâmicos sobre a parede antes do ensaio, para estimar a sua frequência própria e, de forma simplificada, o módulo de elasticidade médio (imagem 06). Das acelerações registadas no sismógrafo estimou-se a primeira frequência com o valor de 2.20Hz na direcção transversal da parede.



Imagem 06 – Leitura com recurso a sismógrafo de acelerações (para estimar as frequências próprias).

Da mesma forma, assumindo para a parede um funcionamento em consola de um elemento com secção transversal constante, encastrada na base e com massa uniformemente distribuída em altura, e com recurso à fórmula apresentada na secção 2.1.1, pode estimar-se o

módulo de elasticidade. Através da expressão apresentada, e tendo como base a frequência transversal medida, obteve-se para o módulo de elasticidade médio da parede *in-situ* um valor de 101.2MPa.

## 2.2.2. Ensaios cíclicos

De forma a caracterizar o comportamento de uma parede da construção em estudo, no plano e fora do plano, executaram-se ensaios cíclicos semi-destrutivos no plano e, numa segunda fase, destrutivos fora do plano, impondo deslocamentos controlados e registando-se os correspondentes valores da força aplicada.

Não foi considerada qualquer carga vertical adicional, de forma a caracterizar o real funcionamento da parede. Os deslocamentos horizontais impostos no ensaio no plano da parede, são aplicados em ciclos sucessivos de amplitude crescente, com carga, descarga, e recarga em sentido oposto. No ensaio fora do plano foram impostos ciclos de carga-descarga num só sentido, de amplitude crescente até ao colapso total da parede.

### 2.2.2.1 Ensaios cíclicos no plano

Para a realização do ensaio cíclico no plano foi montado o esquema de ensaio de acordo com o representado na imagem 05. Foram registados os deslocamentos em vários pontos notáveis em função da força aplicada.

Na imagem 07 podem ser observados os gráficos que relacionam a força aplicada à parede no plano com o deslocamento de topo medido, à esquerda e à direita, e a evolução da energia dissipada ao longo do ensaio.

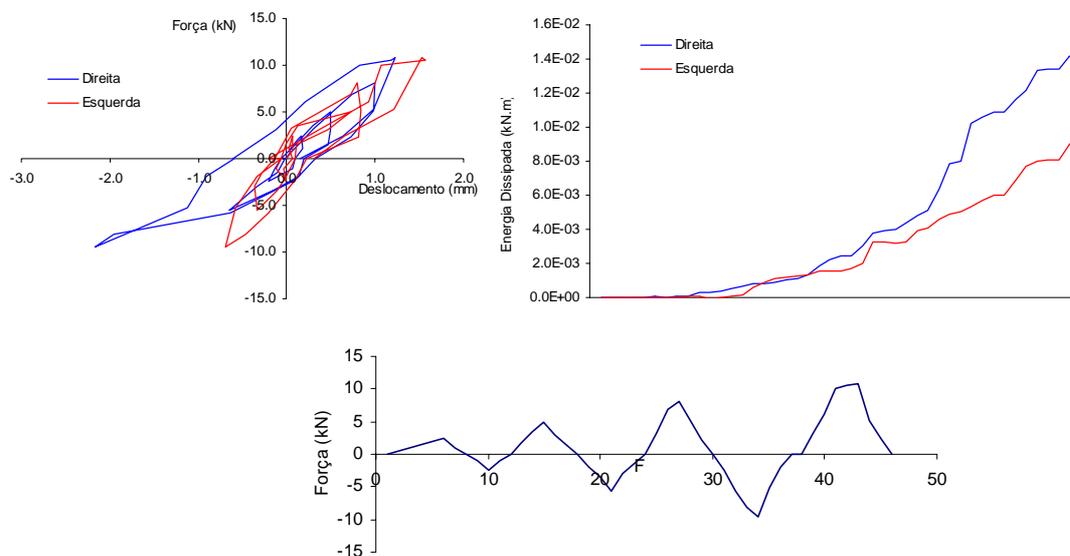


Imagem 07 – Resultados do ensaio cíclico: força-deslocamento, evolução da energia total, evolução da força aplicada.

Da análise dos resultados dos ensaios apresentados nos gráficos observa-se que a força horizontal máxima aplicada na parede foi de 10.7kN. Não se elevou a carga a um nível superior, até à rotura, para que fosse possível realizar um segundo ensaio, no sentido fora do plano. Da análise dos gráficos que relacionam os deslocamentos nos topos (esquerda e direita) da parede com a força aplicada e a evolução da energia dissipada, podem-se verificar diferenças significativas, devido ao comportamento não simétrico da parede. Contudo ambos apresentam a mesma tendência.

De uma forma global, e apesar das diferenças na evolução força-deslocamento, a rigidez inicial medida em ambas as faces da parede é semelhante.

### 2.2.2.2 Ensaio cíclicos fora do plano

Para a realização do ensaio da parede fora do plano foi montado um novo dispositivo de ensaio, concebido para aplicar forças apenas num sentido, ou seja, ciclos carga-descarga sem inversão do sinal da força. Foram adoptados dois alinhamentos de transdutores, cada alinhamento foi colocado a um terço do desenvolvimento da parede em planta.



Imagem 08 – Ensaio fora do plano da parede *in-situ*: transdutores; aplicação da força horizontal; resultados.

Na imagem 08 são representados os gráficos que relacionam a força aplicada à parede fora do plano com o deslocamento de topo medido. Como se pode observar a força horizontal máxima aplicada na parede foi de 0.69kN, sendo um nível de força muito baixo, quando comparado com a força horizontal aplicada no plano. O colapso da parede, fora do seu plano, deu-se para um deslocamento de 16mm, a que corresponde um drift aproximado de 0.95%. Quando comparado com o ensaio no plano, foram obtidos drifts semelhantes para forças 15 vezes superiores. Isto vem demonstrar a tendência para uma maior vulnerabilidade deste tipo de elementos face a acções horizontais fora do plano. O modo de rotura verificado na parede é associado a uma rotação pela base, apesar da pronunciada fragilização original a meia altura da parede.

### 3. Principais conclusões, trabalhos em desenvolvimento e considerações finais

No Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro está a ser desenvolvido um projecto para a caracterização estrutural da construção em adobe na região. Serão estudadas várias obras representativas da construção local. No âmbito do projecto é realizado o levantamento detalhado da construção e das patologias mais comuns, são realizados ensaios de caracterização dos materiais (adobe e argamassas) e das paredes, e são desenvolvidos modelos numéricos que representam o comportamento estrutural, e permitem verificar a segurança e/ou dimensionar o seu reforço.

Serão desenvolvidas fichas de caracterização das construções, organizadas de forma a criar uma base que permita concluir acerca, por exemplo, da influência das soluções construtivas no desempenho das estruturas, da correlação entre o tipo de solo local e a resistência do adobe. Os resultados obtidos pelos ensaios são usados na modelação das construções, com recurso a ferramentas numéricas baseadas no método dos elementos finitos, usando elementos de casca rectangulares, adoptando um comportamento elástico-linear e isotrópico. Destas análises numéricas obtêm-se as frequências próprias e as correspondentes configurações modais associadas ao modelo em análise.

Com estes procedimentos, ensaios e análises numéricas obtêm-se uma representação do comportamento estrutural, uma rigorosa avaliação da segurança sísmica e um dimensionamento de soluções de consolidação e reforço adequadas a cada construção.

A motivação para a realização destes trabalhos surge do interesse geral na reabilitação destas construções por parte de entidades públicas e particulares e de, em muitos casos, não se proceder à sua reabilitação por falta de informação técnica e conhecimento do seu comportamento.

## Agradecimentos

MARTIFER pela oferta do sistema de reacção; aos proprietários e habitantes das obras em estudo que amavelmente e pacientemente nos abriram as portas das suas casas.

## Referências bibliográficas

- [1] VEIGA OLIVEIRA, E.; GALHANO, F. *Arquitectura Tradicional Portuguesa*. Portugal de Perto Publicações D. Quixote. Portugal. 1992.
- [2] Seminário. *Arquitecturas de Terra*. Museu Monográfico de Conímbriga. Ed CCRCentro. Portugal. 1992.
- [3] MOROPOULOU, A. et al. "San Francisco Monastery - Characterization of Building Materials, Damage assessment and conservation considerations". *Journal of Cultural Heritage* 4. Ecuador. 2003. pp. 101-108.
- [4] HERNANDEZ, R.S.; Barrios, M.S.; POZAS, J.M.M. "Characterization of ancient construction materials (mud walls and adobe) in the Churches of Cisneros, Villada and Boada de Campos (Palencia)". *Materiales de Construcción* Vol. 50. n.º 257. 2000. pp. 33-45.
- [5] PUCP/CIID. *Nuevas Casas Resistentes de Adobe*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo (CIID). Perú.
- [6] VARUM, H.; MARTINS, T.; VELOSA, A. "Caracterização do adobe em construções existentes na região de Aveiro". IV SIACOT Seminário Ibero-Americano de Construção com terra e III Seminário Arquitectura de Terra em Portugal. Convento da Orada, Monsaraz, 8 a 10 de Outubro de 2005.
- [7] VARUM, H.; VELOSA, A.; RODRIGUES, H. *Relatório Técnico - Avaliação do comportamento estrutural da Torre Medieval de Vilharigues, Vouzela*, Câmara Municipal de Vouzela - Universidade de Aveiro. Agosto de 2004. Portugal.
- [8] CLOUGH RW; PENZIEN J. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill, U.S.A., 1975.
- [9] PINHO, F.F.S. *Modelação do reforço estrutural de um monumento*. Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, LNEC, Portugal, 2000.
- [10] Millard, A. *CASTEM-2000: Guide d'utilisation*. Rapport CEA 93/007. France. 1993.
- [11] VARUM, H.; COSTA; PEREIRA, H.; ALMEIDA, J. "Ensaio de caracterização do comportamento estrutural de construções existentes em adobe". V SIACOT Seminário Ibero-Americano de Construção com terra e I Seminario Argentino de Arquitectura y Construcción con tierra, Mendoza, Argentina, 14 al 17 de junio de 2006.