

## TEMA IV - Projectos

### Reforço sísmico da fachada de um palácio do Séc. XII

R.S. Barros<sup>1,a</sup>, U. Almac<sup>2,b</sup>, A. Grazini<sup>3,c</sup>, D.V. Oliveira<sup>4,d</sup>, H. Varum<sup>5,e</sup>

<sup>1</sup>Universidade Fernando Pessoa, Portugal

<sup>2</sup>Istanbul Technical University, Turkey

<sup>3</sup>Università degli Studi di Perugia, Italy

<sup>4</sup>Universidade do Minho, Portugal

<sup>5</sup>Universidade de Aveiro, Portugal

<sup>a</sup>rbarros@ufp.pt, <sup>b</sup>dalmacumut@yahoo.com, <sup>c</sup>andregrazini@andregrazini.it,

<sup>d</sup>danvco@civil.uminho.pt, <sup>e</sup>hvarum@ua.pt

**Palavras-chave:** Análise não linear, Avaliação, Reforço estrutural, FRP

**Resumo.** Neste estudo foi efectuada uma análise da fachada do palácio Podestà, situado em Foligno, Itália, através de um modelo não linear de elementos finitos. Com base na geometria e no modelo mecânico, foi desenvolvida a análise da estrutura em três fases. Numa primeira fase, foi efectuada uma análise da estrutura para as cargas permanentes do edifício (análise estática com o peso próprio da estrutura e de elementos não estruturais, considerando os impulsos transmitidos pelas abóbadas). Numa segunda fase foi avaliado o comportamento da estrutura sujeita às cargas permanentes combinadas com a acção sísmica. Finalmente, foi avaliada numericamente a eficiência de uma solução de reforço baseada na aplicação de fibras de carbono. São comparados os resultados de cada análise tendo em consideração os deslocamentos e as tensões na fachada. Estas modulações permitiram compreender os mecanismos potenciais de dano e de colapso da fachada do edifício para cada análise efectuada, bem como estudar a eficiência de uma solução de reforço.

### Introdução

O palácio Podestà é um edifício histórico em alvenaria, do século XII, situado em Foligno, na região da Umbria, no centro de Itália. Este edifício tem um elevado valor patrimonial e artístico associado à sua antiguidade e à presença de frescos tanto no interior como no exterior da fachada.

A diversidade de materiais existentes na estrutura do edifício está relacionada com as múltiplas intervenções e alterações efectuadas ao longo dos tempos. No edifício foram detectados reforços estruturais nas fachadas e, nos pisos superiores verificam-se alguns danos, na sua maioria fendilhação.

O mau estado de conservação, conjuntamente com a perigosidade sísmica da região, dá ênfase à vulnerabilidade sísmica associada ao edifício. Porém, possíveis medidas de conservação e reforço têm que ser bem concebidas e projectadas de forma a não afectar o valor histórico e arquitectónico do palácio, mantendo assim, a sua autenticidade.

Para se avaliar a vulnerabilidade sísmica do edifício foi desenvolvido um modelo numérico. Este modelo foi sujeito ao peso próprio da estrutura e a uma força lateral que simula a acção sísmica para aquela zona, de acordo com a regulamentação italiana em vigor.

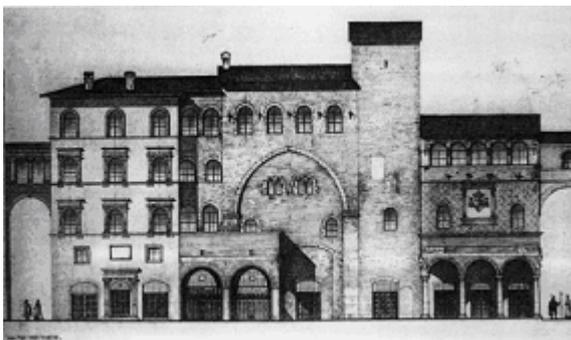
Os resultados da análise numérica permitem compreender o comportamento estrutural do edifício e identificar as zonas mais sensíveis da estrutura, ou seja, de maior concentração de tensões. A análise cuidada destas zonas que potenciam os mecanismos de colapso, permite determinar a metodologia de reforço estrutural mais apropriada, tendo em consideração todas as condicionantes, particularmente a mínima intervenção e grau de intrusão e a máxima eficiência.

## Palácio Podestà

### *História*

O palácio Podestà é um edifício do século XII, que se encontra na Praça da Repubblica, a praça principal da cidade de Foligno, na Umbria, região central da Itália. Este palácio faz parte de um conjunto de edifícios que outrora estiveram unidos fisicamente. O nome “Podestà” existe como uma homenagem ao governador da cidade, que naquela altura era denominado por “Podestà”. O palácio começou a ser conhecido quando passou a ser propriedade da família Trinci, que era uma família muito importante e que naquela altura era proprietária do palácio que se encontra no outro lado da rua, hoje em dia, com o mesmo nome da família. Nessa altura, os dois palácios estavam fisicamente unidos por uma passagem existente no último piso do palácio Podestà, como se pode observar na figura 1.

Hoje em dia, devido à sua história e ao seu elevado valor patrimonial e artístico, esta construção é considerada um marco da história da cidade de Foligno, juntamente com os palácios vizinhos (Palácio Trinci, Palácio Priori e o Duomo da Cidade).



(a)



(b)

Figura 1 – Palácio Podestà: (a) U. Tarchi Drawing; (b) Vista geral

O Palácio Podestà, para além da sua história e valor patrimonial, tem nas suas fachadas uma característica que o destaca de todos os edifícios vizinhos. Os frescos, presentes tanto no interior da fachada como no exterior, tornam este edifício único, como se apresenta na figura 2.



Figura 2 – Frescos: (a) Exterior do edifício ; (b) Interior do edifício

A presença destes valores e a sua localização, numa zona com factor sísmico de 0,35g (Ordinanza 3474-3431) [14], leva a que sejam necessárias metodologias de estudo e ensaio, não destrutivas e pouco intrusivas.

### ***Levantamento estrutural***

Sendo este palácio antigo, a sua estrutura foi alterada ao longo dos tempos, devido aos diferentes tipos de utilização, assim como, devido a razões estéticas ou trabalhos de restauro. Através de uma inspecção visual detalhada, são obtidas informações muito importantes para a execução de uma correcta análise estrutural. A inspecção levada a cabo teve em conta vários parâmetros, tais como, a geometria e arquitectura do edifício, os materiais de construção e a caracterização dos elementos estruturais considerando a disposição e danos existentes.

A Figura 3 representa o levantamento dos materiais, elementos estruturais e danos, permitindo compreender as principais informações obtidas na inspecção visual detalhada.

O edifício tem quatro pisos, uma altura total de aproximadamente 18 m e uma área de aproximadamente 76 metros quadrados. O edifício tem 10,5 m de largura e 6,5 m de profundidade. A parede da fachada principal tem uma forma bastante irregular, variando na sua espessura e largura ao longo da fachada. A sua espessura no rés-do-chão é de aproximadamente 1,20 m, diminuindo até ao topo da fachada do edifício até atingir 0,70 m. O mesmo acontece em relação à largura da fachada, que também vai diminuindo do rés-do-chão, onde regista 11 m, até ao topo do edifício onde atinge 10 m.

Os materiais que se encontram na estrutura do edifício são variados, devido às recuperações e restauros que ocorreram ao longo da sua vida. Estes materiais passam por, blocos de pedra dispostos regularmente, pedra de menor qualidade ou blocos cerâmicos dispostos regularmente. O palácio é constituído por diversos elementos estruturais, como abóbadas em cruz ao nível do primeiro piso, abóbadas em pavilhão ao nível do segundo piso e pavimentos em madeira apoiados em vigas de madeira. Também é registada a presença de reforços estruturais, tais como tirantes ancorados na fachada principal ao nível do segundo e terceiro piso. Mais informações técnicas e conhecimentos mais aprofundados podem ser obtidos em [1].

Foram detectados danos nas paredes de alvenaria, sendo os mais significativos registados aos nível do segundo e terceiro piso. Os danos mais significativos foram detectados nas aberturas, principalmente fendilhação. Mais informação específica pode ser encontrada em [1, 12].

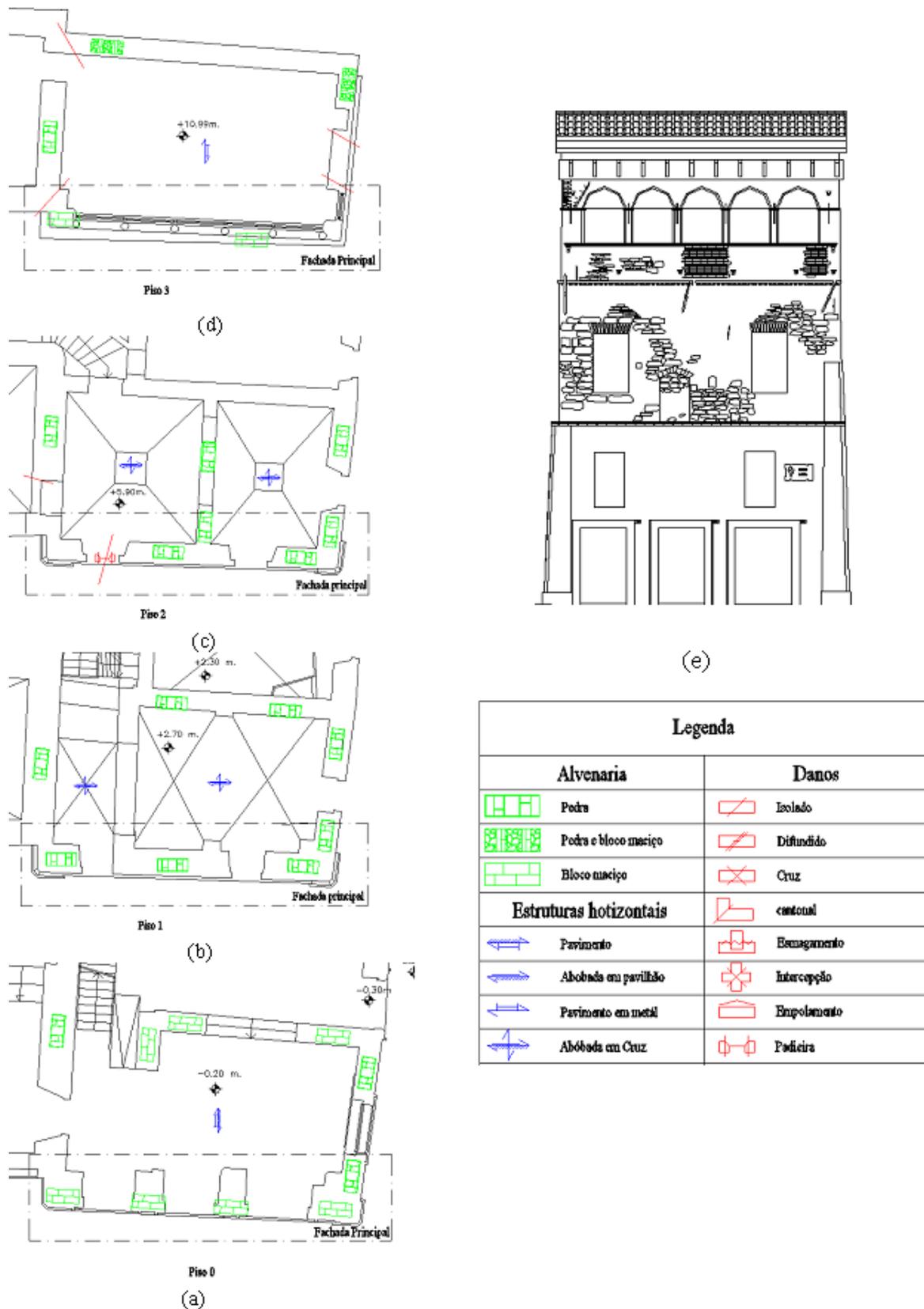


Figura 3 – Levantamento dos materiais, elementos estruturais e danos: (a) Piso zero; (b) Primeiro piso; (c) Segundo piso; (d) Terceiro piso; (e) Fachada principal.

Conhecendo-se os principais mecanismos de colapso e sabendo que estes ocorrem sobre as fachadas principais dos edifícios, neste caso particular, tratando-se de um edifício de pequenas dimensões e sendo a sua fachada a zona mais valiosa, decidiu-se efectuar um estudo apenas da fachada, tendo em conta os efeitos das paredes perpendiculares, pavimentos e abóbadas que se encontram no edifício, assim como, os efeitos do edifício vizinho e dos antigos reforços estruturais existentes na fachada do palácio. Mais informações podem ser obtidas em [2, 3, 4, 15].

Em relação aos mecanismos de colapso, neste caso particular, o colapso para fora do plano não é um problema porque é evitado pelos reforços com elementos metálicos existentes na fachada principal do edifício.

Uma análise prévia e pormenorizada das patologias estruturais e conjugada com a arquitectura do edifício, torna possível a recriação de um modelo geométrico da fachada do edifício.

## Análise Numérica

### *Geometria do modelo*

Devido à complexidade da estrutura da fachada do edifício, foi usado o software Rhinoceros para a criação do modelo geométrico 3D da fachada. Este software permite, através de elementos sólidos e superfícies fechadas, criar facilmente o volume da fachada com blocos regulares de forma a obter uma malha adequada. Mais informação detalhada pode ser obtida em [5].

A elaboração de um modelo geométrico representativo da fachada, como é apresentado na figura 4, é um passo importante para o bom funcionamento do modelo no software de cálculo, assim como para a obtenção de resultados realistas. A recriação digital da fachada, não passa por criar um modelo semelhante em termos arquitectónicos, mas sim em termos estruturais, de forma a compreender, de uma forma precisa, o funcionamento real do edifício.

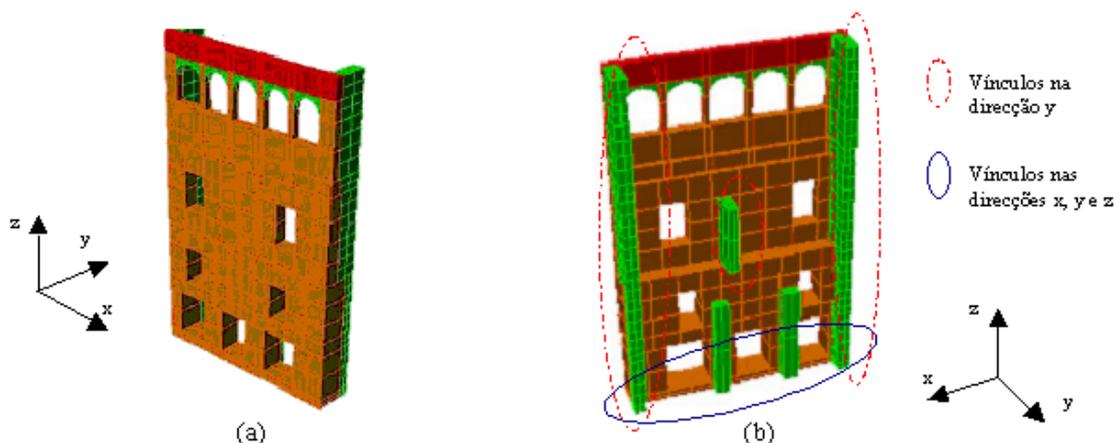


Figura 4 – Modelo geométrico da fachada do palácio: (a) Exterior; (b) Interior

### *Modelo e propriedades dos materiais*

O software utilizado para a execução da análise de elementos finitos permite representar as características dos elementos estruturais, assim como as propriedades dos materiais existentes

na estrutura. Mais informação técnica acerca do software de elementos finitos ANSYS podem ser obtidos em [10, 13].

Dada a dificuldade de recriar elementos de alvenaria neste tipo de software, a malha criada para análise apresentada na figura 5, de 25 cm x 25 cm, permite estudar os deslocamentos e alterações na estrutura com um grau elevado de precisão.

Para simular os materiais da estrutura foi usado um elemento sólido (Solid 65) que permite dar um carácter homogéneo à fachada e representar a alvenaria. É um elemento definido com oito nós, cada um com três graus de liberdade. Foram consideradas propriedades dos materiais não lineares, assim como tensões resistentes de tracção e compressão, como se pode observar na tabela 1. Os valores apresentados nesta tabela foram obtidos de [6, 8, 9] e foram definidos para representar o funcionamento mecânico da alvenaria de uma forma simples e precisa.

Tabela 1- Características dos elementos

Alvenaria (Solid 65)	
Não linear	
Peso específico	20 kN/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	2,82 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Resistência em compressão	4000 kPa
Resistência em tracção	400 kPa

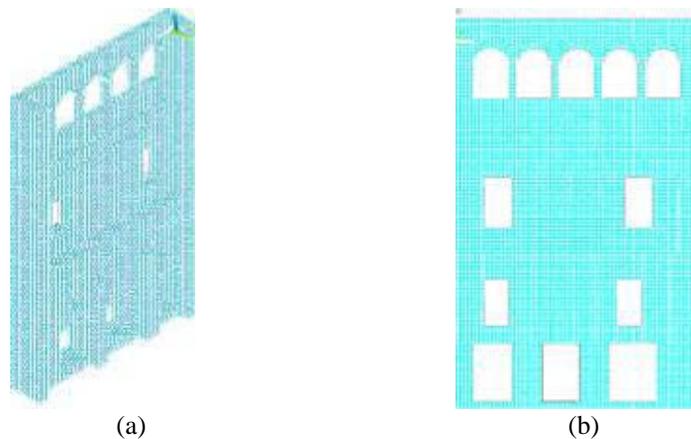


Figura 5 – Malha dos elementos finitos: (a) Interior; (b) Exterior

A análise de elementos finitos efectuada neste estudo consiste numa análise dos materiais não linear, na qual as cargas são aplicadas de uma forma incremental.

### ***Estudo do efeito impulsivo das abóbadas sobre a fachada***

Por forma a compreender a influência das abóbadas de cruz e pavilhão existentes nos dois primeiros pisos sobre a parede da fachada, foram criados modelos das mesmas, como é apresentado na figura 6, e testados através do método dos elementos finitos.

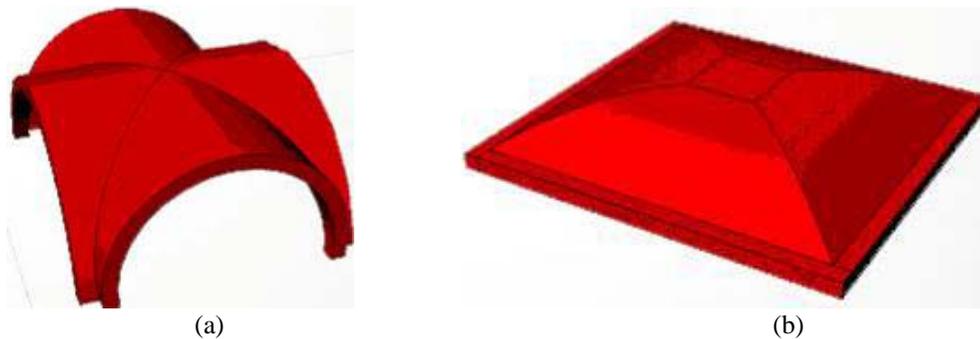


Figura 6 – Modelos geométricos 3D das abóbadas: (a) Abóbada em cruz; (b) Abóbada em pavilhão

Os modelos geométricos das abóbadas foram criados com o software Rhinoceros através de elementos sólidos e superfícies fechadas. Depois de se criar os modelos 3D das abóbadas e aplicar estes modelos geométricos no programa de análise (ANSYS), são obtidas as informações relativamente a deslocamentos, forças de reacção nos apoios, tensões máximas e mínimas e as suas localizações, como se pode observar na figura 7. Mais informações detalhadas podem ser obtidas em [1].

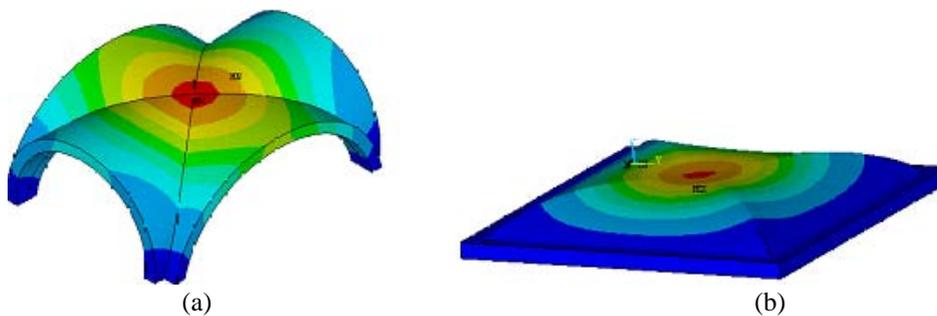


Figura 7 – Abóbadas sob o seu peso próprio: (a) Deslocamentos nas abóbadas em cruz; (b) Deslocamentos nas abóbadas em pavilhão

Com as reacções obtidas da análise das abóbadas, foi possível transportar as mesmas para o modelo da fachada principal, reproduzindo desta forma o efeito provocado pelas abóbadas na fachada.

### **Avaliação do Comportamento da Fachada Existente**

A análise numérica foi dividida em três diferentes partes. Na primeira análise foi tido em consideração apenas o peso próprio da estrutura, enquanto que na segunda e terceira análise foi tido em consideração o peso próprio da estrutura e a acção sísmica, sendo que na terceira análise o modelo da estrutura já se encontrava reforçado estruturalmente. Nas três análises as forças foram aplicadas de uma forma incremental.

A análise da força sísmica foi feita apenas no sentido da fachada e não no sentido perpendicular à fachada, isto porque existe um antigo reforço efectuado com elementos metálicos, mais propriamente tirantes ancorados na fachada principal que impedem os movimentos no sentido perpendicular à mesma. Assim, como este reforço existente já teve um bom funcionamento durante o sismo ocorrido na zona da Umbria no ano de 1997, considerou-se mais relevante a análise do efeito da força sísmica no plano da fachada.

### Resultados para as cargas permanentes

Na primeira análise pretende-se recriar o estado actual da fachada. Para tal, foram representados todos os elementos existentes que possam influenciar o comportamento da estrutura. Tais elementos são, a fundação contínua, as paredes perpendiculares, os pavimentos, a cobertura, as abóbadas, os reforços executados com elementos metálicos e o efeito provocado pelo edifício vizinho.

Recriando a situação existente e sujeitando o modelo da fachada à análise com o software de elementos finitos foram obtidos deslocamentos máximos de cerca de 9 mm (figura 8), tensões máximas de compressão de 0,24 MPa e tensões máximas de tracção de 0,21 MPa (figura 9), valores também observáveis na tabela 2. Mais informações podem ser obtidas em [1].

Tabela 2- Resultados para as cargas permanentes (valores máximos)

Deslocamentos máximos (mm)	9,2
Tensões máximas de tracção (MPa)	0,21
Tensões máximas de compressão (MPa)	0,24

Estes resultados representam zonas específicas onde são atingidos valores de pico, relacionados com as áreas onde se apoiam as abóbadas (tensões máximas de tracção) e fundações (tensões máximas de compressão). Considerando as cargas aplicadas estes valores podem ser considerados normais.

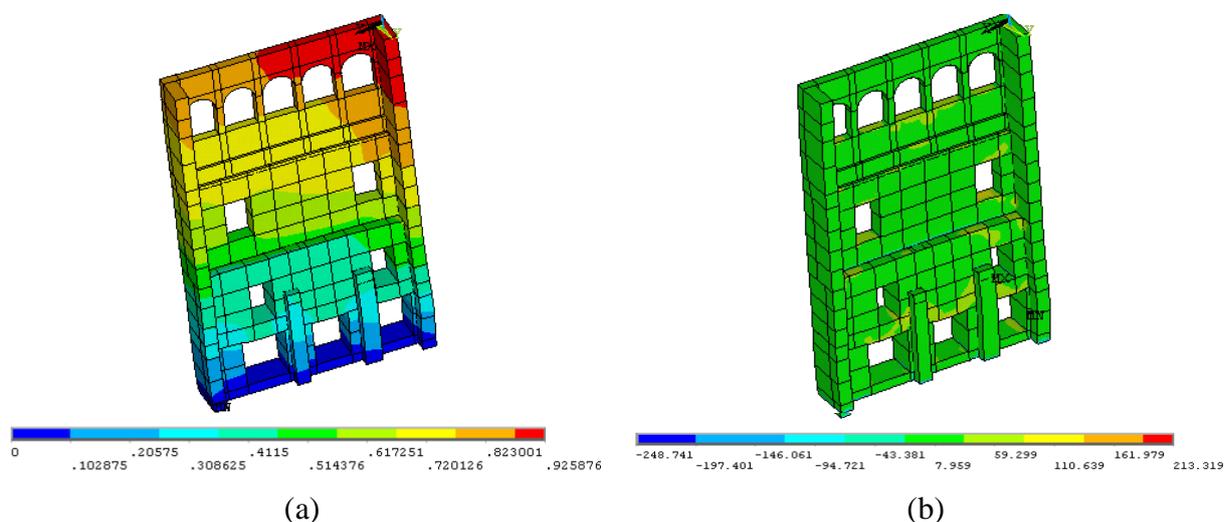


Figura 8 – Resultados da primeira análise: (a) Deslocamentos totais (cm); (b) Tensões principais máximas (kPa)

### Avaliação da segurança sísmica

Na segunda análise, o modelo é sujeito a forças estáticas equivalentes, através da aplicação de uma forma gradual de uma força sísmica, correspondente a um pico de aceleração de 0,35g (Ordinanza 3474-3431) [14] na direcção x-x.

Os valores registados foram deslocamentos na ordem de 21 mm (ver figura 10), tensões máximas de compressão de 0,39 MPa e tensões máximas de tracção de 0,40 MPa (ver figura 11), que demonstram o actual risco da estrutura perante um fenómeno sísmico. Comparando os valores da tabela 2 com os valores da tabela 3, é possível observar que os

valores máximos das tensões são praticamente o dobro dos valores obtidos na primeira análise.

Sob o efeito das forças laterais, os deslocamentos no plano da fachada são bastante altos, criando zonas de tensões elevadas, que levam a colapsos locais na estrutura.

Tabela 3- Resultados da análise sísmica (valores máximos)

Deslocamentos máximos (mm)	21
Tensões máximas de tracção (MPa)	0,40
Tensões máximas de compressão (MPa)	0,39

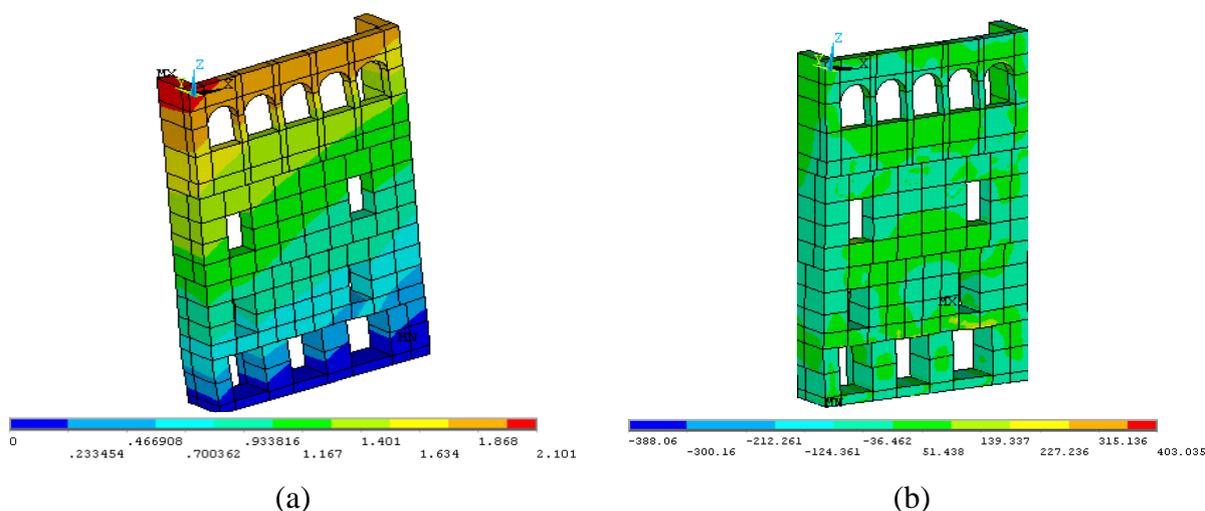


Figura 9 – Resultados da análise sísmica no último ponto de convergência:  
(a) Deslocamentos totais (cm); (b) Tensões principais máximas (kPa)

Os valores máximos obtidos na segunda análise são valores locais. Compreende-se que estes valores são relativos aos apoios das abóbadas em cruz (tensões máximas de tracção) e fundações (tensões máximas de compressão). Porém, estes valores são bastante elevados, podendo causar danos na estrutura, pois, o “drift” da estrutura é de cerca de 0,2%, valor considerado na bibliografia de referência como gravoso [11].

Tendo em consideração que os valores obtidos são relativos a zonas locais da fachada e que o software regista colapso nestas zonas, torna-se aconselhável determinar reforços estruturais que permitam ultrapassar a rotura e, desta maneira, prevenir o colapso da fachada do palácio Podestà.

### Estudo de uma Solução de Reforço Estrutural

Devido à necessidade de uma metodologia pouco intrusiva, optou-se pelo reforço através de FRP (fibras de carbono), conseguindo-se uma solução precisa, eficaz e pouco intrusiva. A opção de utilização de FRP no reforço (ver tabela 4), permite um reforço mais localizado. Desta forma, com a intenção de reduzir os deslocamentos detectados na segunda análise, decidiu-se aplicar fibras de carbono no interior da fachada, na zona de apoio das abóbadas. Aplicaram-se, também, fibras de carbono em duas zonas no exterior da fachada, no topo da fachada e na zona de apoio das abóbadas em pavilhão. Mais informações podem ser obtidas em [7].

Tabela 4 - Características do elemento usado para representar o reforço

FRP (Membrane 41) Linear	
Peso específico	18 kN/m <sup>3</sup>
Modulo de elasticidade	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,2
Espessura	3 mm

Na última análise do estudo, o modelo reforçado é sujeito ao mesmo teste efectuado na segunda análise, sendo que, desta forma o colapso numérico do edifício foi evitado através do aumento da capacidade de resistência aos deslocamentos perpendiculares ao plano da fachada e da mesma forma, através da capacitação do edifício para resistir a forças de compressão e tracção mais elevadas.

Assim sendo, após reforço do edifício, os resultados relativos aos deslocamentos máximos aumentaram para 33,4 mm (ver figura 12). O mesmo aconteceu com as tensões máximas de tracção de 0,60 MPa e as tensões máximas de compressão de 5,64 MPa (ver tabela 5). Estas últimas, tendo um valor elevado, no entanto, é um valor considerado normal, sendo relativo aos valores máximos de compressão obtidos na fibra de carbono registrados pelo software, e não na estrutura em si, como se pode observar nas figura 13.

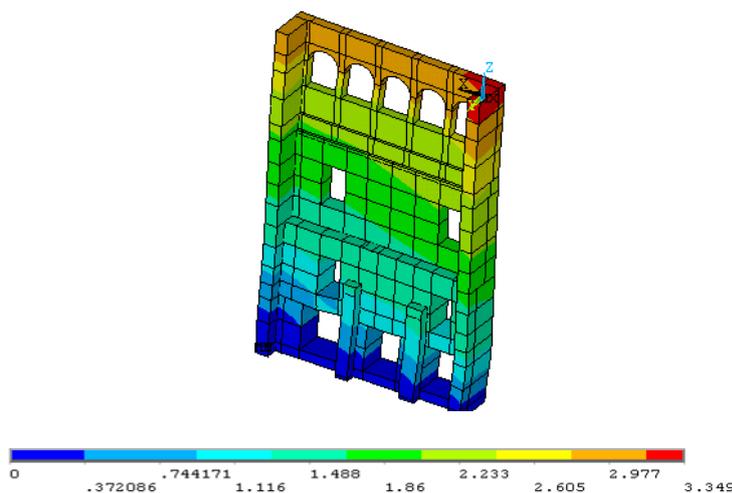


Figura 10 - Resultados da análise sísmica com reforço no exterior com FRP: Deslocamentos totais (cm)

Desta forma confirma-se que um reforço estrutural através de uma intervenção precisa e pouco intrusiva, como o caso da utilização de fibras de carbono, pode permitir reforçar zonas locais debilitadas e, desta forma, evitar o colapso do palácio Podestà, salvaguardando o seu valor patrimonial e arquitectónico.

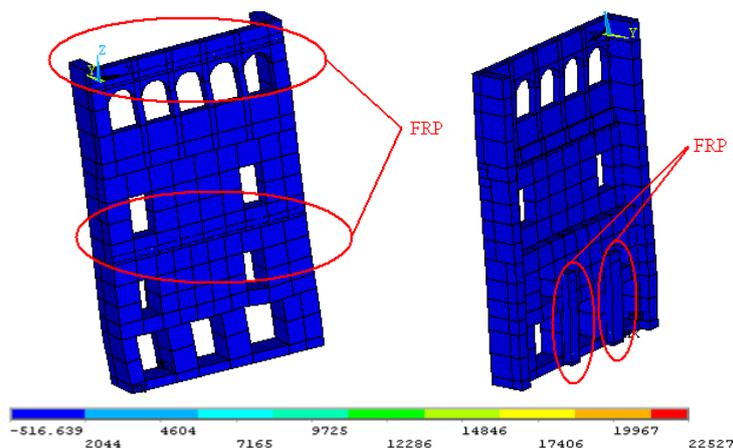


Foto 11 - Resultados da análise sísmica com reforço no exterior com FRP: Tensões principais máximas(kPa)

Tabela 5: Resultados para a estrutura reforçada (valores máximos)

Deslocamento máximo (mm)	33,4
Tracção máxima (MPa)	0,607
Compressão máxima (MPa)	5,64

## CONCLUSÕES

A região da Umbria é classificada como uma região de perigosidade sísmica elevada de acordo com o estipulado na regulamentação italiana. As estruturas de interesse histórico que abundam nesta região, são particularmente vulneráveis à acção sísmica.

Neste estudo são efectuadas três análises com o intuito de compreender o funcionamento da estrutura da fachada do palácio Podestà. Na primeira análise, na qual é considerado o peso próprio da estrutura, não são apresentados resultados gravosos relativamente aos deslocamentos e às tensões. Os problemas detectados são em zonas delimitadas que podem ser solucionadas com intervenções locais.

Quando esta mesma fachada é sujeita a uma força sísmica na segunda análise, os deslocamentos e tensões obtidos ultrapassam as margens de segurança, muito possivelmente levando ao colapso da estrutura.

Tendo-se a informação obtida nas duas primeiras análises da estrutura, é clara a necessidade de uma metodologia de intervenção para aumentar a resistência da estrutura sem alterar os valores históricos e estéticos desta herança arquitectónica. A solução de aplicação de fibras de carbono, é uma opção viável, visto que com a aplicação destes elementos de reforço, obtêm-se resultados satisfatórios através de intervenções pouco intrusivas e estruturalmente eficientes.

Assim sendo, na terceira análise efectuada com o método dos elementos finitos foi aplicado um reforço com FRP em zonas específicas da fachada tendo em conta os resultados obtidos na segunda análise, ou seja, as zonas mais debilitadas da fachada.

Com este reforço e devido ao bom funcionamento da fibra de carbono aplicada nas zonas mais debilitadas do edifício, foi possível ultrapassar o colapso numérico obtido na segunda análise e desta forma verificar um aumento da capacidade resistente do edifício quando sujeito a um fenómeno sísmico.

Em conclusão, reforçar com fibras de carbono se aplicado estrategicamente, poderá aumentar a segurança da fachada do edifício, nomeadamente controlando os deslocamentos perpendiculares à mesma. A utilização de fibras de carbono no reforço torna-se imperceptível, e como tal, pouco intrusiva, aspecto fundamental tendo em conta o valor patrimonial do palácio Podestà.

### **Agradecimentos**

Agradece-se o apoio e as sugestões dos Prof. Antonio Borri, Prof. Caterina Carocci e Prof. Vittorio Ceradini para o desenvolvimento deste trabalho.

### **Referências**

- [1] Barros, R.S., Almac, U., Grazine, A.: *Modelazione com elementi finiti della facciata di palácio Podestà* (Università degli Studi di Perugia, Itália 2007).
- [2] Barros, R.S., Guerra, J., Varum, H.: *Reforço sísmico de estruturas de alvenaria com elementos metálicos* (Universidade Fernando Pessoa, Porto 2005).
- [3] Cangi, G.: *Manuale del recupero strutturale e antisismico* (DEI, Itália 2005).
- [4] Carocci, C., Ceradini, V.: *Sicurezza e conservazione dei centri storici – Il caso Ortigia* (Editori Laterza, Itália 2006).
- [5] Fanchini, R.: *Rhinoceros guida all'uso* (Edizioni FAG, Itália 2006).
- [6] Gottfried, A.: *Quaderni del manuale di progettazione edilizia – I materiali sintetici* (HOEPLI, Itália 2003a).
- [7] Gottfried, A.: *Quaderni del manuale di progettazione edilizia – I materiali tradizionali* (HOEPLI, Itália 2003b).
- [8] Gottfried, A.: *Quaderni del manuale di progettazione edilizia – Le strutture* (HOEPLI, Itália 2003c).
- [9] Hegger, M., Fuchs, M., Rosenkranz, Auch-Scwelk, V.: *Atlante dei materiali* (UTET, Itália 2005).
- [10] Madenci E., Guven, I.: *The finite element method and applications in engineering using ANSYS* (Springer 2006).
- [11] Magenes, G., Calvi, G.M.: *In-plane seismic response of brick masonry walls*" Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 26(11) (1997), 1091-1112.
- [12] Mastrodicasa, S.: *Dissesti statici delle strutture edilizie* (HOEPLI, Itália 1993).
- [13] Moaveni, S.: *Finite Element Analysis – Theory and application with ANSYS* (Pearson 2003).
- [14] OPCM: *Ordinanza 3474-3431 - Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sísmico degli edifici* (OPCM, Itália 2005).
- [15] Tomaselli, L.: *L'edificio antisismico in muratura* (Vitali e Ghianda, Itália 2000).