

# Resumo

Devido à importância histórica do património cultural para qualquer país, não só socialmente mas também do ponto de vista técnico, tem surgido um crescente interesse no estudo do seu comportamento. Como qualquer outra estrutura, ao longo da sua vida útil, as construções históricas estão sujeitas à deterioração devido a acções ambientais e acidentais como terramotos, assentamentos diferenciais e ruptura de elementos estruturais devido à falta de resistência mecânica. Pelas razões expostas, é importante perceber e interpretar o seu comportamento e a evolução do dano que eventualmente possa existir para se poder avaliar a necessidade duma intervenção estrutural.

Nesta tese descreve-se um estudo numérico e experimental sobre a alvenaria de tijolo antiga reforçada com materiais compósitos (FRP). Tendo em conta que os principais modos de colapso ocorrem na ligação da alvenaria com o material de reforço, como parte dos objectivos do programa experimental, estudou-se o comportamento da interface assim como o comportamento global de estruturas à escala reduzida com formas curvas, construídas com o propósito de reproduzir arcos e abóbadas.

Foram utilizados dois tipos de materiais de reforço, nomeadamente fibras de vidro e carbono. Na construção dos provetes experimentais, procurou-se reproduzir as características mais relevantes das construções antigas portuguesas, com a utilização de materiais representativos da região. Com o propósito de caracterizar a distribuição de esforços na interface FRP-alvenaria, adoptou-se um ensaio de corte simples, onde se aplicou uma carga monotónica crescente no material compósito até à ruptura do provete. Para determinar o comprimento de ancoragem para o qual o modo de colapso muda de escorregamento para a ruptura por tracção do FRP, foram testados diferentes comprimentos de ancoragem. Por intermédio da análise da distribuição de esforços de corte na interface FRP-alvenaria, determinou-se que

as fibras de vidro comportam-se melhor que as de carbono, devido à compatibilidade das suas propriedades mecânicas com a alvenaria. Os ensaios de corte directo foram modelados numericamente tendo em vista a calibração das propriedades da interface. Foi ainda desenvolvida uma simulação analítica dos ensaios de corte FRP-alvenaria, baseada em dados experimentais para a distribuição de esforços ao longo do comprimento de ancoragem.

Foram construídos e ensaiados arcos de alvenaria com a forma semicircular, à escala 1:2, e ensaiados sob carregamento monotónico. Para estudar os mecanismos de colapso de arcos de alvenaria, aplicou-se uma carga concentrada no quarto de vão. Os arcos de alvenaria e foram carregados até se alcançar o seu colapso. As diferentes alternativas de reforço aplicadas, confirmam que o reforço aplicado de forma contínua, quer no intradorso quer no extradorso, funcionam melhor que reforço descontínuo. Como reforço adicional, colocaram-se dispositivos de ancoragem do reforço, os quais atrasam o destacamento das fibras de FRP e aumentam a capacidade de carga dos arcos. Todos os resultados experimentais foram simulados mediante a utilização de modelos numéricos, admitindo-se que o comportamento não linear apenas poderia ocorrer nos elementos de interface.

No trabalho desenvolvido, verificou-se que os modelos numéricos adoptados conseguiram reproduzir os resultados experimentais numa forma satisfatória e que os resultados da simulação analítica estão de acordo com os resultados experimentais obtidos em laboratório.

# Abstract

Given the historical importance of the cultural heritage for any country, not only social but also from the technical point of view it naturally emerges the interest to be studied. As any other structure during its period of life, historical constructions are exposed to deterioration due to environmental actions and hazard events caused by: earthquake, differential settlements and structural elements failures due to lack of strength. For these reasons, in order to evaluate the need for a retrofitting intervention, is important to understand and interpret his behaviour and damage evolution.

This thesis describes a numerical-experimental study of historical clay brick masonry, strengthened by Fibre Reinforced Polymers (FRP). Because the most critical results are found in the FRP-masonry substrate, the local interface study was included as a part of the experimental objectives. In addition, scaled masonry specimens with curved shapes were constructed with the purpose to observe the global behaviour of strengthened structures as well as reproduction of domes and vaults. Two types of FRP material were used namely glass and carbon fibres. The building technique of experimental specimens, considered the reproduction of the most relevant characteristic regarding old Portuguese constructions, using typical materials from the region. With the purpose to characterize the stress distribution along the interface, a far-end supported single shear test was modified and adapted. Monotonic load was applied to the FRP strip until failure was attained. To determine the anchor length where the failure mode changed from sliding to tensile failure in the FRP strip, different anchorage lengths were tested. After analysing the shear stress distribution in the masonry-FRP interface, it was concluded that glass FRP behaves better than carbon due to compatibility of its properties with masonry. The far-end supported single-shear tests were then numerically modelled aiming at calibrating the interface properties. An analytical

“bond-slip” simulation of the FRP strip was done, using the experimental results as data to plot the stresses distribution along the anchorage length.

Masonry arches with semicircular a shape at scale of 1:2 were constructed and tested under monotonic loading. In order to observe and study the collapse mechanism of masonry arches, a concentrated load was applied, at the quarter span. The masonry arches were loaded until the collapse was achieved. Different strengthening alternatives were adopted, confirming that the FRP strip applied continuously at the extrados or intrados, perform better that collocating it discontinuously. As an additional anchorage strengthening technique, saturated fibres soaked into resin and manually prepared, were use to delay the FRP detachment when reinforced at the intrados surface. An increase of the maximum load was also achieved. All experimental tests series were evaluated by means of numerical models where nonlinear behaviour was concentrated in interface elements.

Along the present research it was found that not only the numerical models adopted were able to reproduce the experimental results reasonable but also the corresponding results from the analytical simulation, support the experimental results obtained in the laboratory.

# Resumen

Debido a la importancia histórica del patrimonio cultural para cualquier país, no solamente social pero también desde del punto de vista técnico, ha surgido un creciente interés creciente en el estudio de su comportamiento. Como cualquier otra estructura a lo largo de su vida útil, las construcciones históricas están expuestas al deterioro debido a acciones ambientales y accidentales como terremotos, desplazamientos diferenciales por hundimientos y falla de elementos estructurales debido a la falta de resistencia mecánica. Por las razones expuestas, es importante comprender e interpretar su comportamiento y evolución del daño que eventualmente pueda existir para poder evaluar la necesidad de una intervención estructural.

En esta tesis se describe un estudio numérico y experimental sobre mampostería de ladrillo antigua, reforzada con materiales compuestos (FRP). Teniendo en cuenta que los principales modos de colapso ocurren en la unión de la mampostería con el material de refuerzo, como parte de los objetivos del programa experimental, se estudió el comportamiento de la interfaz así como el comportamiento global de estructuras a escala reducida con formas curvas, construidas con el propósito de reproducir arcos y bóvedas.

Fueron utilizados dos tipos de materiales de refuerzo, específicamente fibras de vidrio y carbón. En la construcción de los especímenes experimentales, se buscó reproducir las características más relevantes de construcciones antiguas portuguesas, con la utilización de materiales representativos de la región. Con el propósito de caracterizar la distribución de esfuerzos en la interfaz FRP-mampostería, se adaptó un ensayo de corte simple, donde se aplicó carga monotónica creciente en el material compuesto hasta la falla del espécimen. Para determinar la longitud de anclaje para la cual el modo de colapso cambia de deslizamiento a ruptura por tensión del FRP se probaron diferentes longitudes de anclaje. Por medio del análisis de la distribución de esfuerzos cortantes en la interfaz FRP-mampostería,

se determinó que las fibras de vidrio se comportan mejor que las de carbón, debido a la compatibilidad de sus propiedades mecánicas con las de la mampostería. Los ensayos de corte directo fueron modelados numéricamente tomando en cuenta la calibración de las propiedades de la interfaz. Adicionalmente se desarrolló una simulación analítica de los ensayos de cortante FRP-mampostería, basada en datos experimentales para la distribución de esfuerzos a lo largo de la longitud de anclaje.

Fueron construidos y ensayados arcos de mampostería con forma semicircular, a escala 1:2 sometidos a carga monotónica. Para estudiar los mecanismos de colapso de arcos de mampostería, se aplicó una carga concentrada en el cuarto del claro. Los arcos de mampostería se fueron cargando hasta alcanzar su colapso. Las diferentes alternativas de refuerzo aplicadas, confirman que el refuerzo aplicado de forma continua, sea en el intradós o extradós, funciona mejor que el discontinuo. Como refuerzo adicional, se colocaron dispositivos de anclaje de refuerzo los cuales retardaron el desprendimiento de las fibras de FRP y aumentaron la capacidad de carga de los arcos. Todos los resultados experimentales fueron simulados mediante la utilización de modelos numéricos, admitiendo que el comportamiento no lineal podría ocurrir en los elementos de interfaz.

En el trabajo desarrollado, se verificó que los modelos numéricos adoptados consiguieron reproducir los resultados experimentales de una forma satisfactoria y que los resultados de la simulación analítica empatan con los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.