

# MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE LIGADORES METÁLICOS À TRAÇÃO EM PAREDES DE TIJOLO FACE À VISTA

## NUMERICAL MODELLING OF THE BEHAVIOR OF TIES UNDER TENSION IN BRICK VENEER WALLS

*Giacomo Negro*

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pavia*

*Graça Vasconcelos*

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*

*Elisa Poletti*

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*

*Guido Magenes*

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pavia*

*Andreia Martins*

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*



### RESUMO

Com o objetivo de avaliar o comportamento da ligação de paredes de tijolo face à vista a paredes de alvenaria de enchimento, foi definida uma campanha de ensaios para a caracterização do comportamento de diferentes tipos de ligadores sujeitos a diferentes configurações de carga (ações monotónicas e cíclicas de tração). Adicionalmente, com o objetivo de compreender em detalhe os fatores que afetam o comportamento da ligação parede de tijolo face à vista e parede de tijolo de enchimento através de ligadores metálicos, procedeu-se à calibração de um modelo numérico com base nos resultados experimentais obtidos nos ensaios de tração. Neste trabalho pretende-se apresentar os resultados da calibração do modelo numérico e de uma análise paramétrica para avaliação dos parâmetros mecânicos que mais influenciam o comportamento da ligação a ações de tração.

Palavras-chave: ligadores, paredes de tijolo face à vista, parede de alvenaria de enchimento, modelação numérica

## ABSTRACT

Aiming at assessing the mechanical behavior of the connection of brick veneer walls to the backing system (brick infill walls), an experimental campaign was defined for the experimental characterization of the behavior of distinct types of ties subjected to distinct loading configurations, namely monotonic and cyclic tension and compression loading. Additionally, with the goal of completing the experimental results and achieve a better insight on the main parameters influencing the connection, a numerical model was built and validated based on monotonic tension experimental tests. In this work, it is intended to show the results of the numerical model calibration and analyze the results of a sensitivity analyses on the influence of the mechanical properties on the tensile behavior of the tie.

Key words: ties, brick veneer walls, infill walls, numerical calibration

## 1. INTRODUÇÃO

As paredes de alvenaria de fachada são usadas frequentemente na construção residencial em várias partes do mundo, como por exemplo na América do Norte, Austrália, Inglaterra e sul de Europa. As principais vantagens das paredes de tijolo face à vista relacionam-se com a sua aparência estética, durabilidade e desempenho térmico. Em Portugal a solução de fachada com parede de tijolo face à vista foi muito utilizada nas décadas de 80 e 90, mantendo-se ainda o seu uso, ainda que menos reduzido (Martins et al, 2016a). Considera-se que o estudo do comportamento deste sistema construtivo é importante, particularmente no que respeita ao seu desempenho sísmico, uma vez que não existem regras específicas de dimensionamento que salvaguardem a segurança deste elemento construtivo. Um dos aspetos importantes consiste no desempenho global dos elementos metálicos que deverão ser aplicados na ligação entre as paredes de tijolo face à vista e a estrutura resistente.

Neste trabalho pretende-se avaliar o comportamento local de uma ligação entre uma parede de tijolo face à vista e uma parede de enchimento em alvenaria de tijolo de enchimento em edifícios de betão armado através da modelação numérica da ligação com base em elementos finitos. Numa primeira fase, efetuou-se a calibração do modelo numérico de elementos finitos com base nos resultados experimentais de ligações parede de tijolo face à vista-ligador-parede de enchimento sujeitas a esforços de tração (Martins et al, 2016b). Após a calibração do modelo numérico, pretende-se efetuar uma análise paramétrica para avaliar a influência das propriedades dos materiais no comportamento da ligação a esforços de tração.

## 2. Caracterização experimental de ligadores metálicos em tração-compressão

Com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico de diferentes tipos de ligadores metálicos que frequentemente são utilizados para efetuar a ligação entre as paredes de tijolo face à vista e a estrutura de suporte, que pode ser betão armado com parede de alvenaria de enchimento, foi definida uma campanha experimental de ensaios monotónicos e ensaios cíclicos em tração-compressão. Para o efeito foram considerados diferentes tipos de ligadores (Figura 1a) e diferentes configurações de ensaio. Os ensaios duplos consistem na configuração em que, quer a parede de alvenaria de enchimento, quer a parede de tijolo face à vista estão representadas por prismas de alvenaria ligados pelos conectores ao nível das juntas de argamassa (Martins et al, 2016a), ver Figura 1b. Foram ainda considerados ensaios em que o provete de ensaio é constituído pelo ligador embebido em apenas por um dos dois prismas de alvenaria (ensaios simples) (Martins et al., 2016c). O esquema de ensaio encontra-se indicado na Figura 2. Na alvenaria de tijolo face à vista utilizam-se tijolos de 237mm x 115mm x 60mm (comprimento x altura x espessura) e para a alvenaria de enchimento utilizam-se tijolos de furação horizontal com dimensões 300mm de comprimento, 150mm de espessura e 200mm de altura. O comprimento de embebedimento dos ligadores é sempre superior na alvenaria de enchimento. O provete representativo da alvenaria de enchimento é fixado ao pórtico metálico de reação através de duas chapas metálicas nas superfícies verticais do prisma ligadas por varões metálicos e parafusos, prevenindo deste modo qualquer deslocamento na direção horizontal (direção de carregamento). Como se pode ver através da Figura 2, os ligadores metálicos são embebidos nas juntas de argamassa de ambos os prismas. O provete representativo da parede de tijolo face à vista é também confinado através de duas chapas metálicas, às quais se liga, por uma rótula, o atuador horizontal, que por sua vez aplica o carregamento monotónico de tração ou o carregamento cíclico em tração e compressão.

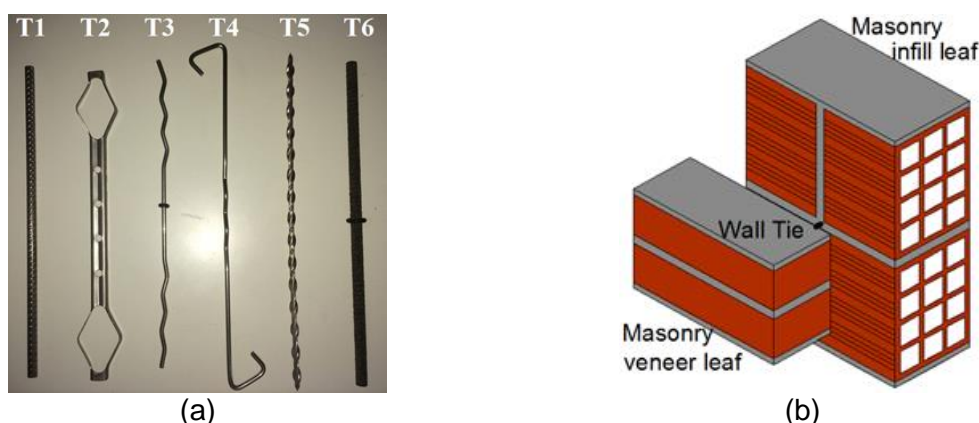
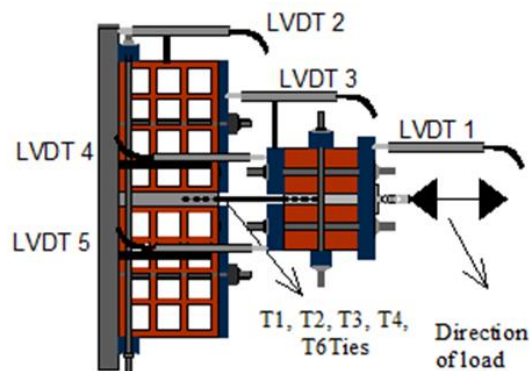
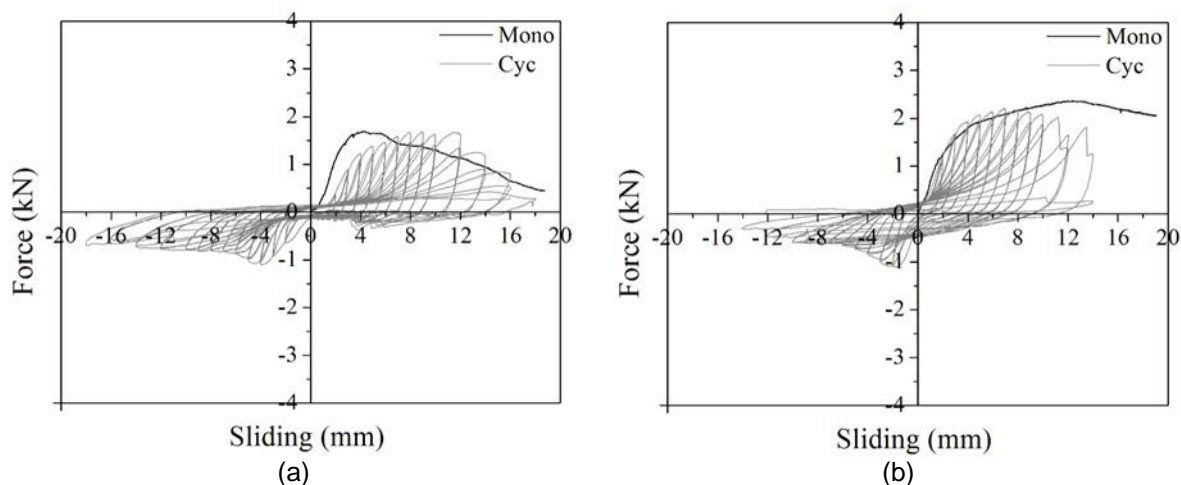


Figura 1 - Detalhes dos ensaios experimentais: (a) ligadores metálicos; (b) provete de ensaio



**Figura 2 - Esquema de ensaio**

Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento através do transdutor de deslocamento ligado ao atuador. Foi ainda considerado um conjunto de transdutores de deslocamento para validação do sistema de ensaio e medição do arrancamento ou deformação do ligador. De acordo com a Figura 2, os transdutores LVDT 2, LVDT 4 e LVDT 5 medem se o prisma de alvenaria de enchimento se desloca em relação ao pórtico de reação no sentido de se proceder a ajustes no caso dos deslocamentos não serem nulos. O LVDT 3 mede o possível arrancamento do ligador em relação ao prisma de alvenaria de enchimento e o LVDT 1 mede o arrancamento total do ligador que pode ocorrer na junta de alvenaria de enchimento, na junta de alvenaria de tijolo face à vista ou simultaneamente em ambas as juntas de argamassa. Na Figura 3 indicam-se os diagramas que relacionam a força medida no atuador e o deslocamento correspondente ao escorregamento do ligador nas juntas de argamassa medido no LVDT 1 considerando os ligadores T3 e T4, que servem de base à calibração do modelo numérico. O diagrama relativo aos ensaios cíclicos revela que o comportamento da ligação em tração é diferente do comportamento em compressão. A resistência em tração envolve o mecanismo de resistência de aderência entre o ligador e a argamassa, enquanto que o comportamento em compressão da ligação depende principalmente do comportamento do ligador à compressão. Verifica-se ainda que a curva monotónica em tração para a ligação com o ligador T3 apresenta uma maior rigidez e uma resistência ligeiramente superior. O comportamento monotónico da ligação com o ligador T4 apresenta uma maior resistência e uma maior capacidade de deformação, o que deve estar associado à acumulação de dano no caso do carregamento cíclico. Verifica-se ainda que a geometria do ligador é bastante importante, quer no comportamento cíclico, quer no comportamento monotónico. Em relação à campanha experimental, uma discussão mais largada dos ensaios experimentais em provetes duplos pode ser lida no trabalho publicado por Martins et al. (2006b).



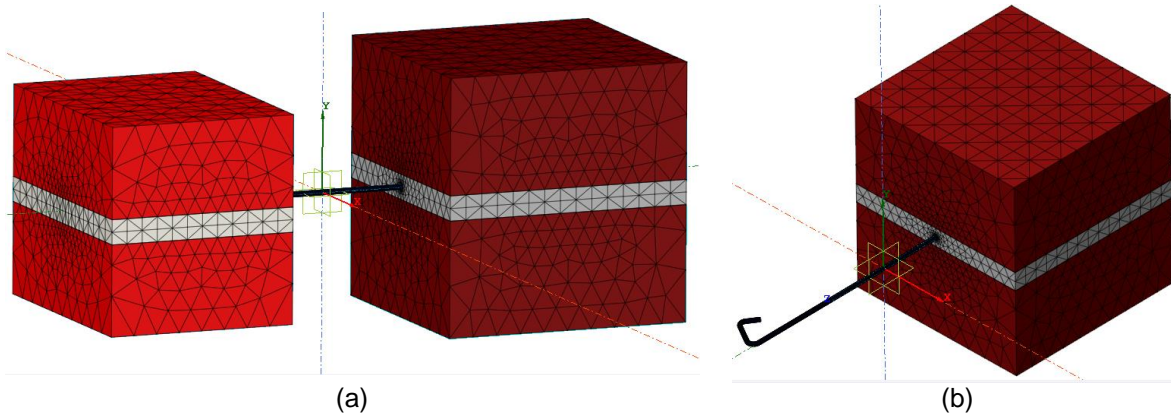
**Figura 3 - Diagramas força-deslizamento obtidos nos ensaios; (a) ligador T3 ; (b) ligador T4 (Martins et al. 2016b)**

### 3. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Com base nos resultados experimentais obtidos nos ensaios monotônicos de tração, decidiu-se construir um modelo numérico para a avaliação do comportamento local da ligação entre uma parede de tijolo face à vista e a parede de tijolo de enchimento e uma maior compreensão dos parâmetros envolvidos no comportamento mecânico de aderência do ligador à alvenaria.

O modelo de elementos finitos construído no software comercial DIANA 9.4 (2009), representa a ligação ensaiada experimentalmente constituída por três partes: (1) alvenaria de enchimento; (2) ligador; (3) alvenaria de tijolo face à vista. Com o objetivo de obter uma modelação detalhada, representa-se os tijolos e a argamassa de forma independente, uma vez que as propriedades mecânicas são diferentes e através da análise dos resultados experimentais concluiu-se que a rotura ocorre sempre por deslizamento do ligador da junta de argamassa. Apesar de se considerar que a modelação bidimensional deverá descrever razoavelmente o comportamento de aderência no caso de ligadores de geometria retilínea, decidiu-se construir um modelo de elementos finitos tridimensional, ver Figura 4, porque no caso da ligação T4, a geometria da extremidade deverá condicionar a resistência de aderência (Figura 4b). Através de uma análise elástica preliminar foi possível avaliar o campo de tensões e extensões e definir um volume representativo de ambos os tipos de alvenaria. Os tijolos, a argamassa e os ligadores são modelados através de elementos tridimensionais piramidais de 4 nós (elemento TE12L) baseados em interpolação linear e integração numérica. A seleção deste tipo de elementos justifica-se pela necessidade de

compatibilizar a malha de elementos finitos dos ligadores de secção circular e a malha dos restantes elementos.



**Figura 4 - Detalhes do modelos de elementos finitos; (a) assemblage total; (b) vista do ligador T4**

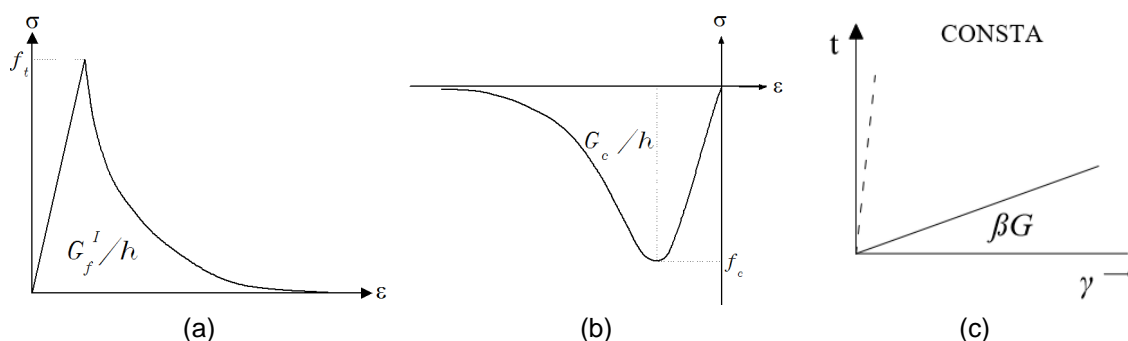
A interação entre o ligador e a argamassa é simulada através de elementos de interface entre 2 planos na configuração tridimensional, ver Figura 5b. O elemento é também baseado em interpolação linear e esquema de integração em 3 pontos. Considera-se que a interface entre a argamassa e o tijolo é rígida, uma vez que dos resultados experimentais se verificou a inexistência de dano nesta interface. As condições de fronteira do modelo numérico são semelhantes às que se consideraram no programa experimental: (1) prisma de alvenaria ligado ao pórtico de reação tem os deslocamento vertical e deslocamento horizontal impedidos; (2) o prisma que representa a alvenaria de tijolo face à vista tem impedidos os deslocamentos verticais, sendo imposto na direção horizontal o deslocamento considerado no programa experimental dos ensaios monotónicos.



**Figura 5 - Tipo de elementos finitos utilizados no modelo numérico; (a) elementos para a argamassa e tijolos; (2) elementos de interface para representar a ligação entre o ligador e a argamassa**

O comportamento do tijolo e do ligador considera-se linear, dado que não se desenvolve qualquer tipo de dano no tijolo, nem no ligador. De referir ainda que os prismas de alvenaria estão confinados lateralmente, pelo que a não linearidade se desenvolve ao nível da

argamassa da junta onde está embebido o ligador metálico. O comportamento não linear da argamassa foi modelado através da consideração do modelo constitutivo baseado em extensões totais, também designado em língua inglesa por “Total strain crack model”, que descreve o comportamento em tração e compressão de um material com apenas uma lei de tensão-extensão (Figura 6). Neste modelo, a iniciação de fendilhação ocorre quando a tensão principal máxima é superior à resistência à tração e a fenda tem orientação perpendicular à da direção principal. Existem duas possibilidades no que respeita à orientação das fendas após a seu início, nomeadamente: (1) modelo de fendilhação fixa, isto é, a fenda após a abertura mantém a sua orientação; (2) modelo de fendilhação com rotação. Neste modelo admite-se que as fendas se desenvolvem sempre segundo a direção perpendicular à direção principal de tensão. Neste último modelo não é necessário considerar nenhum modelo de comportamento de corte, mas no primeiro caso, o comportamento de corte após a fendilhação é simulado através do modelo apresentado na Figura 6c, e para o qual é necessário definir o parâmetro  $\beta$ . Neste trabalho adota-se para este fator o valor de 0.01 (valor recomendado pelo DIANA).



**Figura 6 - Comportamento não linear material; (a) diagrama tensão-extensão em compressão; (c) diagrama tensão-extensão em tração**

O comportamento em tração é descrito por uma lei com um tramo descendente exponencial (Figura 6a) e o comportamento em compressão é descrito por uma curva com um tramo descendente parabólico (Figura 6b). Os parâmetros mecânicos necessários para a descrição do comportamento não linear à tração são a resistência à tração,  $f_t$ , e a energia de fratura  $G_f^I$ , enquanto que os parâmetros necessários para descrever o comportamento em compressão são a resistência à compressão,  $f_c$ , e a energia de fratura em compressão,  $G_c$ . O processo iterativo da análise não linear foi definido com base no método Newton-Raphson regular e critério de convergência adotado foi o da energia com uma tolerância de  $10^{-3}$ .

### 3.1. Calibração do modelo numérico

A calibração do modelo numérico foi efetuado com base nos resultados experimentais dos ensaios monotônicos realizados com os ligadores T3 e T4, tendo em conta as características mecânicas não lineares da argamassa das juntas e da rigidez elástica da interface entre o ligador e a argamassa. Os valores das propriedades elásticas adotados para os diferentes materiais encontram-se indicados na Tabela 1. Na ausência de resultados experimentais específicos para obter a rigidez da interface entre o ligador e a argamassa, adotaram-se os valores da rigidez normal e tangencial indicados na

Tabela 2, correspondentes ao ajustamento da rigidez inicial do diagrama força-deslocamento no modelo numérico e o diagrama obtido nos ensaios experimentais. Note-se que a interface é mantida linear, sendo necessário simular o deslizamento relativo entre o ligador e a argamassa, concentrando-se a não linearidade material na argamassa.

**Tabela 1 – Propriedades elásticas**

Material	Propriedades elásticas		
	E (MPa)	$\nu$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Argamassa (AE)	200	0.2	18.0
Argamassa (TFV)	200	0.2	18.0
Tijolo (AE)	2000	0.2	16.5
Tijolo (TFV)	2000	0.2	15.2
Ligador	210000	0.3	78.5

**Tabela 2 – Rigidez dos elementos de interface**

Propriedade	Rigidez normal, $K_n$ (N/mm <sup>3</sup> )	Rigidez tangencial, $k_s$ (N/mm <sup>3</sup> )
Interface	2.0	2.0

A argamassa utilizada para o assentamento da alvenaria de tijolo face à vista é uma argamassa hidrófuga pré-doseada recomendada para este tipo de alvenaria. A argamassa utilizada no assentamento da alvenaria de enchimento foi também uma argamassa de assentamento pré-doseada da classe M10. Com base em resultados dos ensaios de compressão axial em cubos de argamassa obteve-se uma resistência à compressão para a argamassa hidrófuga de 5.0 MPa (coeficiente de variação de 15%). Para a argamassa da alvenaria de enchimento obteve-se um valor médio de 6.0MPa para a resistência à compressão (coeficiente de variação de 3.4%), abaixo do valor esperado para uma argamassa de classe M10. O valor da resistência da argamassa da junta do prisma de alvenaria de tijolo face à vista teve de ser reduzida para o intervalo entre 3.0 e 3.5MPa de modo que fosse possível obter o modo de rotura observado nos ensaios experimentais, ou seja, deslizamento do ligador na junta de argamassa do prisma de tijolo face à vista.



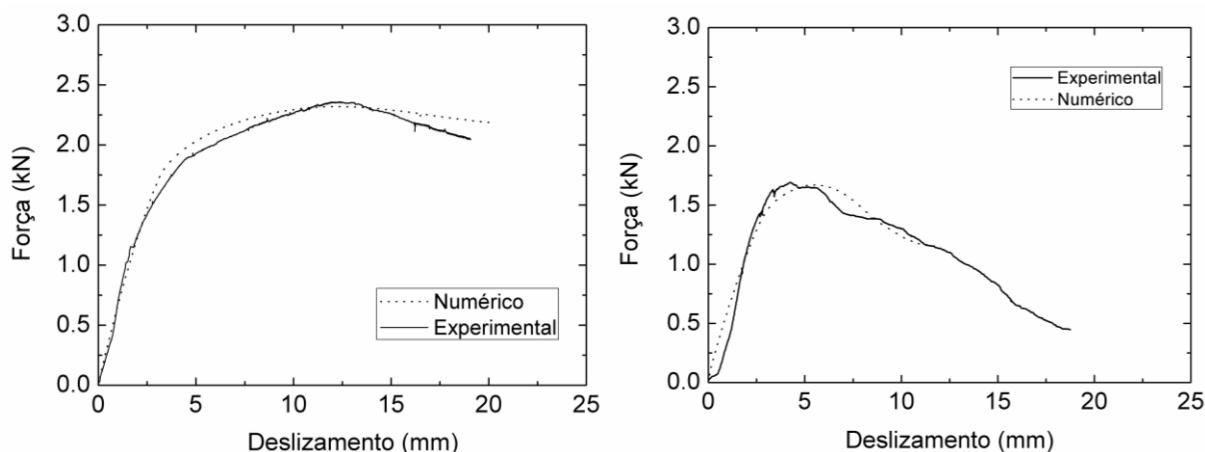
Considera-se que esta redução na resistência da argamassa é plausível e pode estar associada a vazios que possam ficar instalados entre o ligador e a argamassa no processo de construção.

**Tabela 3 – Propriedades relativas ao comportamento não linear material da argamassa**

Material	Propriedades não lineares			
	$f_t$ (MPa)	$G_f'$ (N/mm)	$f_c$ (MPa)	$G_c$ (N/mm)
Argamassa (AE)	0.2	0.05	6.0	20
Argamassa (TFV)	0.2	0.05	3.0-3.5	15

A energia de fratura em compressão foi definida também a partir do melhor ajuste entre os resultados experimentais e numéricos. Considerou-se para a resistência à tração da argamassa o valor de 0.2MPa, aproximadamente 5% do valor da resistência à compressão, e para energia de fratura o valor de 0.05N/mm.

A comparação entre os resultados numéricos e experimentais (ensaios monotônicos) ilustra-se na Figura 7 para os provetes com os ligadores T4 e T3. Verifica-se que em ambos os tipos de ligadores, consegue-se uma boa aproximação da resposta numérica ao comportamento experimental em termos de rigidez inicial, regime de pré-pico e resistência. Em termos de comportamento pós-pico, o ajuste também é razoável, ainda que no caso do ligador T3 não seja possível chegar à deformação máxima. A distribuição de tensões principais mínimas (compressão máxima) apresenta-se na Figura 8 (ligador T4) para o valor máximo da força aplicada. Os valores das tensões principais de compressão são máximas na zona da interface entre o ligador e a argamassa. Por outro lado, as tensões de compressão distribuem-se ao longo do comprimento de embebedimento do ligador, na envolvente onde se mobiliza a resistência de aderência do ligador.



**Figura 7 Resultados numéricos e experimentais (a) ligador T4; (b) ligador T3**

A concentração de tensões de compressão é superior na extremidade do ligador embecido no prisma de alvenaria de tijolo face à vista, o que se atribui à rotura de aderência neste prisma. Da análise da distribuição de tensões principais mínimas (Figura 8c), conclui-se que estas são de compressão na zona interna da extremidade esquerda do ligador, desenvolvendo-se tensões de tração na zona angular mais à esquerda. A comparação entre distribuição de tensões principais permite concluir que o escorregamento do ligador ao longo da interface com a argamassa mobiliza principalmente a resistência à compressão da argamassa, pelo que este parâmetro mecânico deve controlar o processo de rotura do ligador. Isto demonstra ainda que o facto da resistência à compressão da argamassa da parede de tijolo face à vista ser inferior condiciona a rotura da ligação.

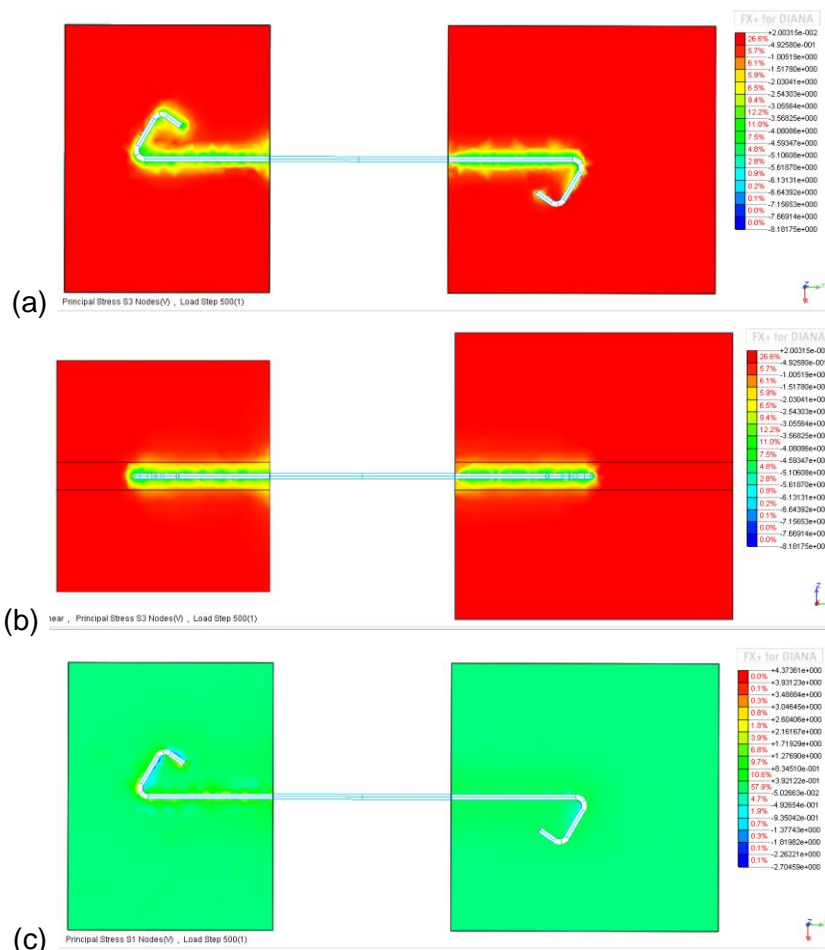
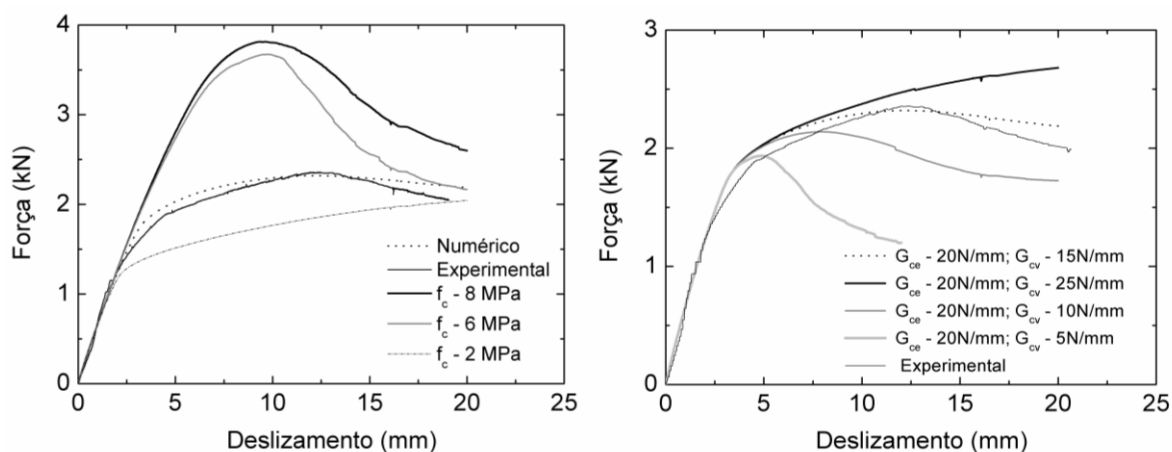


Figura 8 Distribuição de tensões principais; (a) mínima - vista em planta; (b) mínima - perfil lateral; (c) máxima – vista de cima

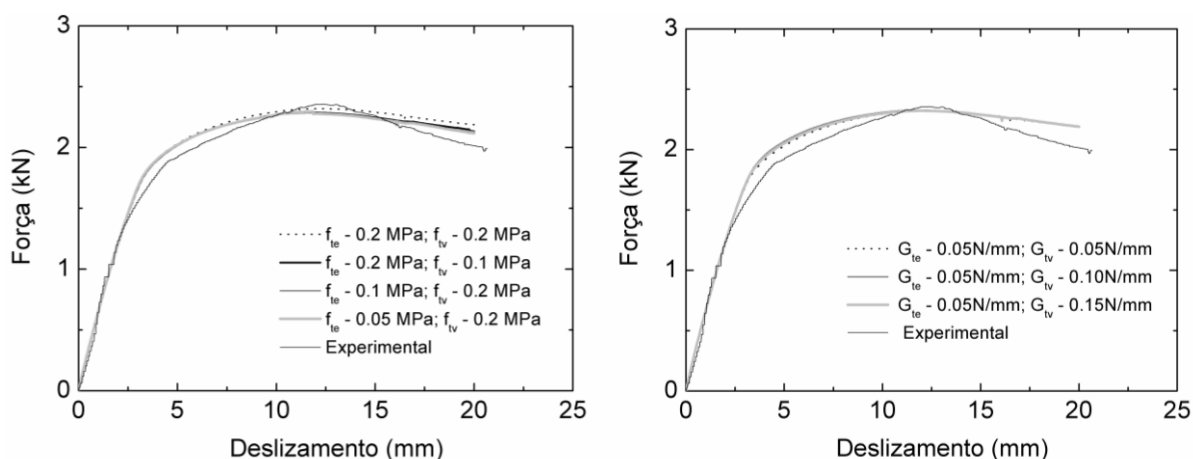
#### 4. ANÁLISE PARAMÉTRICA

Com base no modelo numérico desenvolvido e com o objetivo de avaliar a influência das propriedades mecânicas da argamassa na resistência da ligação, foi feito um estudo de

variação da resistência à tração dos parâmetros que caracterizam a resposta da argamassa em tração e compressão. Tendo em conta que a resistência da argamassa utilizada na alvenaria de tijolo face à vista é inferior à da argamassa da alvenaria de enchimento, decidiu-se variar as propriedades mecânicas da argamassa da alvenaria de tijolo face à vista. Assim, variou-se a resistência à compressão de 2.0MPa, 6.0MPa e 8.0MPa, mantendo-se a energia de fratura utilizada no modelo de referência obtido na calibração do modelo (Figura 9a). A energia de fratura ( $G_{cv}$ ) em compressão variou de 5N/mm, 10N/mm e 25N/mm, mantendo-se a energia de fratura em compressão da argamassa da alvenaria de enchimento ( $G_{ce}$ ) (Figura 9b).



**Figura 9 Avaliação do efeitos dos parâmetros em compressão da argamassa; (a) variação da resistência; (b) variação da energia de fratura**



**Figura 10 Avaliação do efeitos dos parâmetros em tração da argamassa; (a) variação da resistência; (b) variação da energia de fratura**

Em relação à resistência à tração,  $f_{tv}$ , fez-se a variação da resistência da argamassa da alvenaria de tijolo face à vista de 0.2 MPa para 0.1MPa, fazendo-se também variar a energia de fratura da argamassa da alvenaria de enchimento,  $f_{te}$  (Figura 10a). Variou-se ainda a

energia de fratura em tração de 0.10N/mm e 0.15N/mm, mantendo-se as restantes propriedades (Figura 10b). Note-se que a variação da energia de fratura para valores da resistência constantes pode não ser muito realista, porque esta depende também da resistência, mas tratando-se de uma análise de sensibilidades, é necessário manter alguns parâmetros inalterados.

Dos resultados obtidos, verifica-se que os parâmetros que mais influenciam o comportamento da ligação à tração são os parâmetros que caracterizam o comportamento da argamassa em compressão, em particular a resistência à compressão. Verifica-se que o aumento da resistência à compressão aumenta significativamente a resistência da ligação, tornando o comportamento também mais frágil. Verifica-se que a energia de fratura em compressão tem um papel importante no comportamento de pós-pico, aumento também a resistência da ligação. Este estudo revela ainda que as propriedades em tração apresentam uma influência bastante reduzida.

## 5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi possível efetuar a calibração do modelo de elementos finitos que representa o comportamento da ligação de uma parede de tijolo face à vista a uma parede de tijolo de enchimento através de dois tipos de ligadores metálicos. Constata-se que o modelo numérico é capaz de descrever com boa aproximação o comportamento experimental de aderência obtido nos ensaios de tração do ligador. Para além da calibração do modelo numérico, foi possível efetuar uma análise de sensibilidades relativa à variação das propriedades mecânicas da argamassa onde se considera a concentração da não linearidade material. Desta análise foi possível observar que as propriedades da argamassa à compressão têm um papel central no comportamento de aderência dos ligadores quando sujeitos à tração.

## REFERÊNCIAS

- Martins, A., Vasconcelos, G., Campos Costa, A. 2016a. Brick masonry veneer walls: An overview, *Journal of Building Engineering* (under revision).
- Martins, A., Vasconcelos, G., Campos Costa, A. 2016b. Experimental study on the mechanical performance of steel ties for brick masonry veneers, 16<sup>th</sup> International Brick and Block Masonry Conference, 26-30 Junho, Padova, Italy, 2016b.
- Martins, A., Vasconcelos, G., Campos Costa, A. 2016c. Caracterização experimental do comportamento de ligadores metálicos em paredes de tijolo face à vista à tração e à compressão, Congresso Nacional de Engenharia Sísmica, Ponta Delgada, Açores, 28-21 de Abril.
- TNO DIANA (2009) DIANA, DIplacement method ANALyser, release 9.4, Manual do Utilizador.