



## ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA CONEXÃO AÇO-BETÃO LEVE REALIZADA COM PERNOS DE CABEÇA

David G. Fernandes<sup>a</sup>, Isabel B. Valente<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho*

**Resumo.** O presente trabalho procura abordar a modelação numérica da conexão entre o perfil metálico e a laje de betão, quando se utilizam conectores do tipo perno e betão leve. Utilizam-se elementos finitos de volume para definir todos os elementos presentes na ligação, recorrendo ao *software* ATENA 3D. A partir dos modelos desenvolvidos procura-se avaliar quais os parâmetros relevantes para o comportamento da conexão aço-betão leve. Recorre-se a resultados de ensaios de tipo *push-out* anteriormente realizados na Universidade do Minho para validar os modelos numéricos desenvolvidos.

### 1. Introdução

O presente trabalho procura abordar a modelação numérica da conexão entre o perfil metálico e a laje de betão, quando se utilizam conectores do tipo perno e betão leve. Utilizam-se elementos finitos de volume para definir todos os elementos presentes na ligação, recorrendo ao *software* ATENA 3D [1]. Este *software* permite efetuar análises numéricas, considerando a não linearidade material, geométrica e de contato, contemplando assim o comportamento global do provete durante o histórico de aplicação de cargas.

A partir dos modelos desenvolvidos procura-se avaliar quais os parâmetros relevantes para o comportamento da conexão aço-betão leve. Para validar os modelos numéricos desenvolvidos, recorre-se a resultados de ensaios de tipo *push-out* anteriormente realizados na Universidade do Minho.

Com o modelo numérico calibrado, realiza-se um estudo paramétrico, onde se procura avaliar vários parâmetros relevantes para o comportamento da conexão. São avaliados parâmetros relacionados com as propriedades do betão como a resistência à compressão e à tração, o módulo de elasticidade e a energia de fratura, a tensão última do aço utilizado nos conectores e a forma como o carregamento é aplicado. Comparando as curvas que relacionam força e escorregamento obtidas nos provetes ensaiados com as correspondentes curvas obtidas nos modelos numéricos desenvolvidos, é possível perceber o efeito dos parâmetros analisados na capacidade de carga, rigidez e ductilidade dos pernos.

## 2. Modelo numérico dos provetes CN 19

Pretende-se desenvolver modelos numéricos que sejam representativos dos ensaios de tipo *push-out* anteriormente realizados.

Utilizando os resultados dos provetes CN 19, ensaiados por Valente [2] são estabelecidas, nos modelos numéricos, várias hipóteses de modelação, variando o tamanho e o tipo de elementos finitos disponíveis no programa ATENA 3D, as ligações nas superfícies de contato entre o betão e os pernos, e o nível de refinamento da malha.

Tendo o modelo numérico calibrado, é possível realizar um estudo paramétrico, onde se procura avaliar vários parâmetros relevantes para o comportamento da conexão. São avaliados parâmetros relacionados com as propriedades do betão como a resistência à compressão e à tração, o módulo de elasticidade, e a tensão última do aço utilizado nos conectores.

Em todos os ensaios realizados, foi possível obter a curva que relaciona força e escorregamento, ao longo do carregamento. Comparando as curvas que relacionam força e escorregamento obtidas nos provetes ensaiados com as correspondentes curvas obtidas nos modelos numéricos desenvolvidos, é possível perceber o efeito dos parâmetros analisados na capacidade de carga, rigidez e ductilidade dos pernos.

Numa primeira fase, são modelados os provetes de tipo *push-out* ensaiados por [2]. Estes seguiram a geometria *standard* proposta na norma NP EN 1994-1-1 [3], tendo sido testados 3 provetes idênticos com pernos de 19 mm de diâmetro inseridos em lajes de betão leve. Na Figura 1.a) representa-se a geometria e disposição de todos os elementos que constituem os provetes do tipo CN 19 ensaiados.

Os provetes testados são duplamente simétricos, pelo que é possível adotar apenas um quarto da geometria na sua modelação, reduzindo assim tempo de processamento.

A construção dos modelos no *software* ATENA 3D é feita definindo superfícies e volumes que correspondem aos elementos constituintes dos provetes, como por exemplo o perfil metálico, a laje de betão, e os pernos. Estes elementos são designados de *macroelementos*, sendo possível considerar leis constitutivas adequadas ao seu comportamento e atribuir valores para os seus parâmetros. As propriedades imputadas aos vários materiais considerados nos modelos numéricos foram caracterizadas experimentalmente [2].

### 2.1 Elementos metálicos: Perfil metálico, chapa de aço, conectores e armaduras

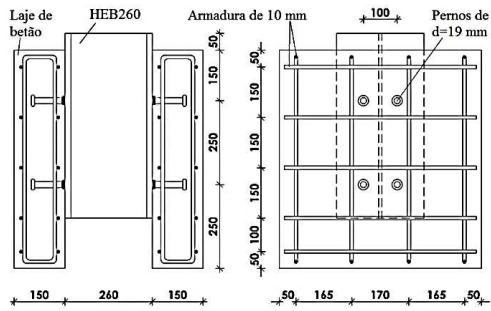
O perfil metálico utilizado nos provetes corresponde a um HEB 260. Colocou-se uma chapa de aço sobre o perfil metálico para possibilitar a aplicação da carga vertical e a sua distribuição uniforme na secção transversal do perfil metálico.

A lei constitutiva escolhida para modelar o aço do perfil metálico do tipo HEB 260 é o *3D Bilinear Steel Von Mises*, disponível no *software* ATENA 3D, que considera um comportamento elasto-plástico perfeito, associado ao critério de rotura de *Von Mises*.

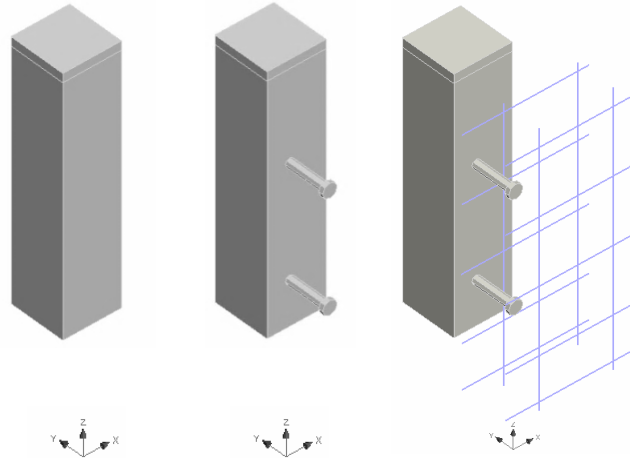
É importante que a chapa posicionada sobre o perfil metálico seja bastante rígida e por essa razão é-lhe atribuído um elevado módulo de elasticidade. A capacidade resistente desta chapa não é relevante para o problema em causa. Deste modo, a lei constitutiva utilizada na sua modelação é o *3D Elastic Isotropic* disponível no ATENA 3D, que apresenta um comportamento elástico isotrópico.

A lei constitutiva utilizada para modelar o material dos pernos é também a lei *3D Bilinear Steel Von Mises*, que foi utilizada no perfil metálico, apresentando um comportamento elasto-plástico perfeito, associado ao critério de rotura de *Von Mises*.

Para modelar o comportamento do aço das armaduras considera-se um comportamento elasto-perfeitamente plástico.



a) Esquema dos provetes CN 19 (medidas em mm) [2]



b) Perfil metálico + Chapa de aço no seu topo

c) Pernos soldados ao perfil metálico

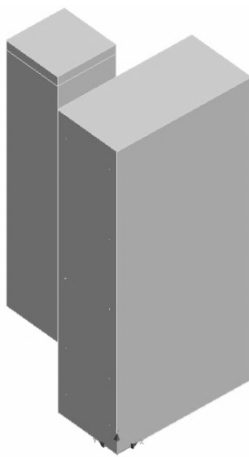
d) Disposição das armaduras

**Fig. 1:** Provetes de tipo *push-out* ensaiados e geometria dos elementos metálicos no modelo numérico

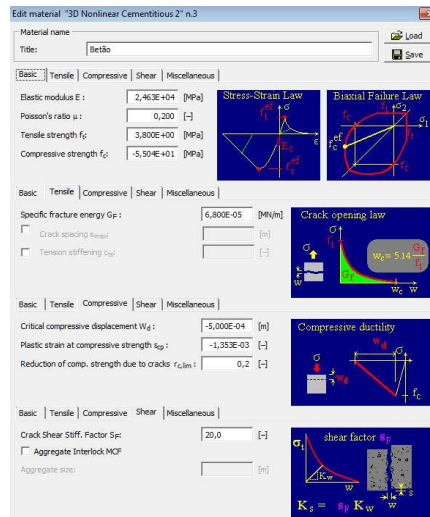
## 2.4 Betão

A modelação do comportamento do betão leve é possível através da lei constitutiva *3D Nonlinear Cementitious*, disponível no *software* ATENA 3D. O betão assume um comportamento não linear de acordo com os parâmetros definidos na Figura 2.b).

A obtenção de todos os parâmetros necessários à caracterização do betão só é possível com o recurso a ensaios laboratoriais. Para os parâmetros não quantificados em [2], assumiram-se os valores aconselhados pelo ATENA 3D [1].



a) Geometria



b) Lei constitutiva do betão leve

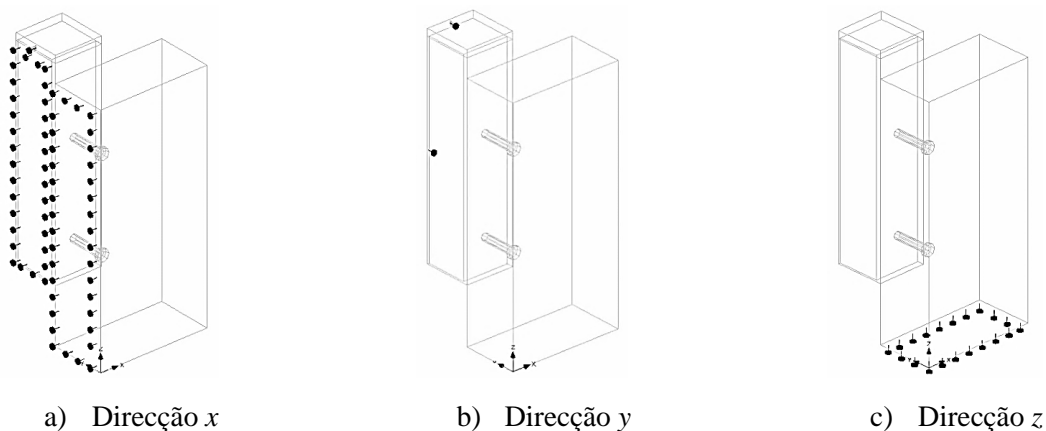
**Fig. 2:** Perspetiva da laje e lei constitutiva associada ao betão

## 2.5 Condições de apoio e carregamento

Tal como referido anteriormente, o modelo desenvolvido tira partido da dupla simetria dos provetes de tipo *push-out*. Nas faces do modelo que correspondem a superfícies de simetria, são considerados apoios simples distribuídos, que são aplicados em diferentes direcções. Como tal, aplicam-se apoios simples na direcção *x* à laje de betão, ao perfil metálico, e à placa de aço (Figura 3.a) e também na direcção *y* ao perfil metálico e a placa de aço (Figura 3.b). Pos-

teriormente bloqueia-se a base da laje na direcção  $z$  (Figura 3.c). Consegue-se assim assegurar as condições da dupla simetria, e também que o perfil metálico apenas esteja livre para se mover em relação à laje na direcção  $z$ , tal como no ensaio.

O ATENA 3D permite a aplicação incremental de solicitações. No caso específico do ensaio de tipo *push-out* que se pretende modelar, aplicam-se incrementos de deslocamento na chapa de aço. Por sua vez, esta transmite essa deformação ao perfil metálico, fazendo-o mover-se em relação à laje de betão. Colocam-se pontos de monitorização com o objetivo de medir a força imposta ao provete e o correspondente escorregamento. Aplicam-se sucessivos incrementos de deformação e avalia-se o comportamento do provete a partir da curva que relaciona a força total aplicada e o correspondente escorregamento. O valor do deslocamento que se impõe em cada incremento tem influência na solução obtida. Após uma análise exaustiva, optou-se, nos modelos desenvolvidos, por considerar incrementos de 0.125 mm até ao primeiro milímetro de escorregamento, e de seguida incrementos de 0.25 mm.



**Fig. 3:** Condições de apoio

## 2.6 Definição das superfícies de contato

No ATENA 3D, sempre que dois *macroelementos* são contíguos, é gerada uma superfície de contato. Existem três formas possíveis de caracterizar essas superfícies de contato: 1) *contact element-GAP*, que permite criar superfícies de contato não lineares através da atribuição de diversos parâmetros; 2) *perfect connection*, que permite ligar as superfícies dos dois materiais, de modo a que os nós presentes entre elas sofram os mesmos deslocamentos, criando assim uma ligação rígida; 3) *no connection*, que torna independentes os deslocamentos dos nós que são comuns aos dois *macroelementos*. Na Figura 4 representa-se em tons acastanhados as ligações assumidas com *perfect connection*, e em tons esverdeados as ligações consideradas como *no connection* no modelo numérico em causa. São classificados como *perfect connection* os elementos soldados, como a base dos conectores, os elementos que estabelecem entre si uma ligação rígida, como a chapa de aço e o perfil metálico e elementos como as armaduras que estão embebidas no betão. À área de contato entre a laje de betão e o perfil metálico, cuja resistência por atrito não é considerada, é atribuída uma ligação do tipo *no connection*. Nos pernos temos dois tipos de ligações entre superfícies. Devido ao movimento descendente do perfil na direcção  $z$ , a parte de castanho dos pernos, definida como parte de trás, tende a encostar no betão, oferecendo um mecanismo de resistência. Nesta zona, como os deslocamentos dos pernos são semelhantes aos do betão, atribui-se uma ligação do tipo *perfect connection*. Por outro lado, a zona a verde dos pernos, definida como parte da frente, tende a descolar do betão, fazendo com que os deslocamentos nessas zonas não sejam idênticos entre os dois materiais, sendo atribuída uma ligação do tipo *no connection*. Realizaram-se vários modelos, que permitiram explorar e otimizar este conceito.

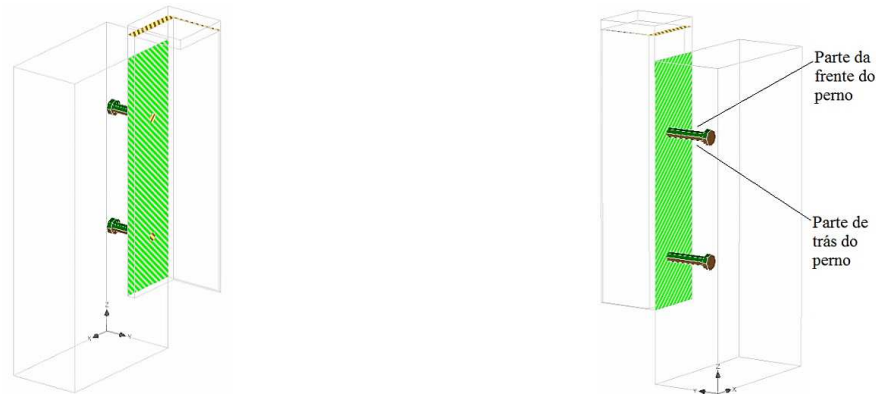


Fig. 4: Definição das superfícies de contato no modelo numérico

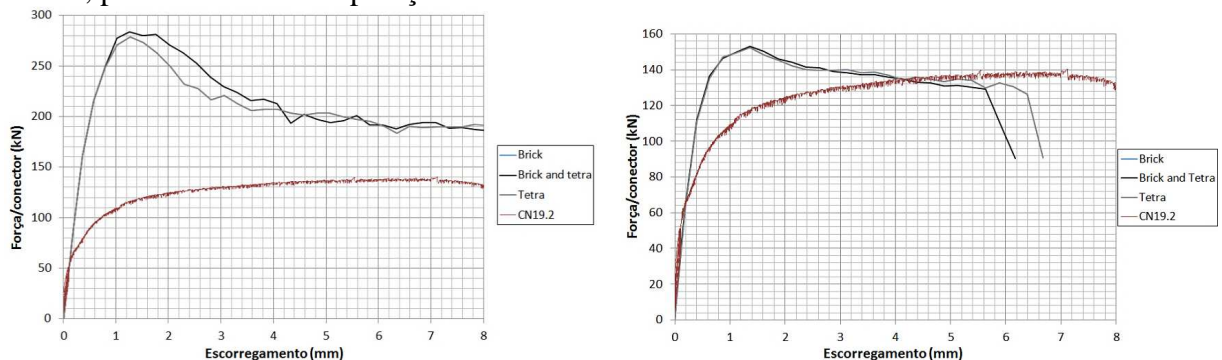
### 3. Modelação dos Provetes CN 19

Após a construção do modelo numérico, foi necessário proceder à sua calibração. Para tal, variou-se o tamanho e o tipo da malha dos elementos finitos, as ligações das faces dos conectores ao betão envolvente, e também diferentes níveis de refinamento da malha. Pretendeu-se ajustar a curva numérica que relaciona força e escorregamento à correspondente curva experimental obtida com os provetes CN 19. Em termos médios, as curvas força  $\times$  escorregamento obtidas nos provetes CN 19 atingem o seu pico de carga, de valor igual a 140.25 kN/conector, aos 6 mm de escorregamento e entram em colapso por volta dos 8 mm. Na lei constitutiva do aço utilizado nos conectores, é adotado um comportamento elasto-plástico sem limitação de extensão última, pelo que, a partir de uma certa gama de valores, os resultados do modelo podem não ser aceitáveis. Por isso, em todos os resultados numéricos apresentados, é imposto um limite de escorregamento máximo igual a 8 mm.

#### 3.1 Definição da malha

O programa ATENA 3D permite a discretização individual de *macroelementos*, dando a escolher o tipo de elemento finito que se pretende, ou uma mistura de elementos, designada *Brick* e *Tetra*. Devido a sua forma regular, foram escolhidos os elementos *Brick* para a chapa de aço. Aos conectores é atribuída uma mistura de elementos *Brick* e *Tetra*, possibilitando assim um melhor ajuste da malha. Relativamente ao perfil e à laje de betão, testaram-se várias opções de malha, variando o tipo de elemento, por forma a identificar a melhor malha. Nestas tentativas, também se variou o tamanho dos elementos. O ATENA 3D permite a geração da malha de elementos finitos de uma forma automática.

Na primeira iteração os elementos têm uma dimensão de 50 mm. Os resultados são apresentados na Figura 5.a), juntamente com uma curva força  $\times$  escorregamento de um dos provetes CN 19, para efeitos de comparação.



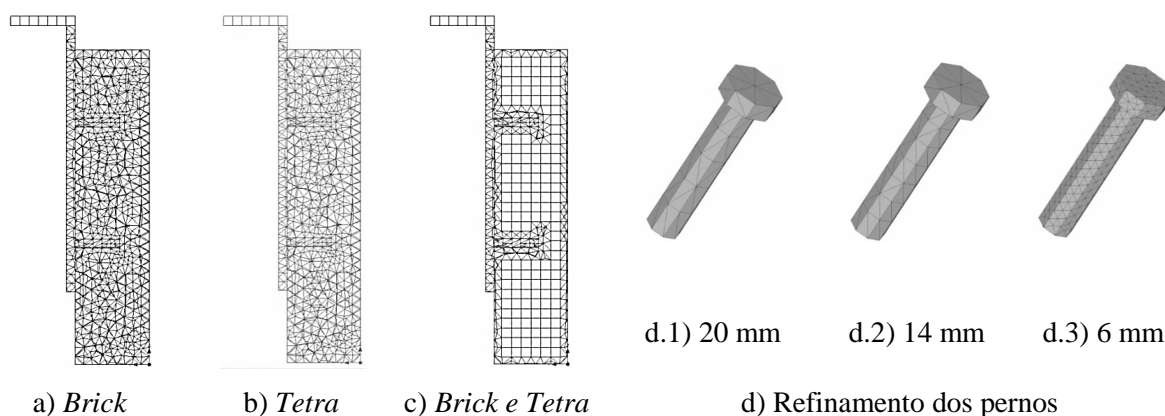
a) Elementos finitos de 50 mm

b) Elementos finitos de 20 mm

Fig. 5: Resultados obtidos com diferentes tamanhos de elementos finitos

Os resultados numéricos obtidos afastam-se muito dos resultados alcançados nos ensaios experimentais dos provetes CN 19. Por essa razão, reduziu-se o tamanho da malha para 35 mm. Com a diminuição do tamanho dos elementos finitos, verifica-se uma diminuição no valor da carga máxima atingida, mas os resultados numéricos ainda se mantêm distantes dos resultados esperados. Na Figura 5.b) são apresentados os resultados de um novo modelo onde o tamanho dos elementos é de 20 mm. Ambos os modelos, com elementos *Brick* e *Tetra*, se aproximam dos níveis de carga registados nos provetes CN 19.

Pelos resultados apresentados, percebe-se que uma maior quantidade de elementos finitos não é sinonimo de melhores resultados. Para perceber o que acontece no interior do modelo, efetuaram-se cortes segundo o plano *yz*, que passam pelo meio dos pernos, no modelo com malha de 20 mm. Os cortes são representados na Figura 6 e mostram que a malha *Brick* e a malha *Tetra* são semelhantes e bastante mais desorganizadas do que a malha que mistura os dois tipos de elementos (*Brick* e *Tetra*). Os contornos realizados na laje de betão, para o encaixe dos pernos fazem com que esta ganhe uma forma irregular, não permitindo o perfeito ajuste dos elementos *Brick*. Apesar de ter menos elementos finitos, a combinação de elementos *Brick* e *Tetra* permitiu uma maior adaptação e organização da malha ao provete conseguindo-se assim melhores resultados, com menor esforço computacional. Por essas razões o perfil metálico, e a laje de betão, passaram a ser modelados com uma combinação de elementos *Brick* e *Tetra*.



**Fig. 6:** Cortes *yz* nos modelos com malha de 20 mm e refinamento dos pernos

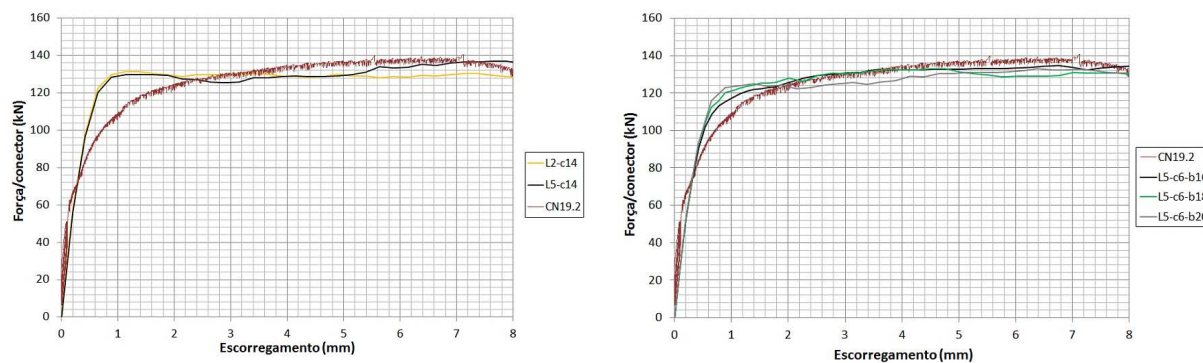
### 3.2 Refinamento da malha

Os 20 mm adoptados para os elementos finitos do provete ainda não possibilitaram uma boa adaptação da malha aos pernos, uma vez que a haste apresenta 19 mm de diâmetro. O ATENA 3D permite efetuar refinamentos locais dos elementos finitos, diminuindo o tamanho destes, possibilitando assim uma melhor adaptação na malha e um maior número de elementos finitos organizados no *macroelemento*. No primeiro refinamento efetuado, os elementos finitos dos pernos adquirem uma dimensão de 14 mm, sendo os resultados da modelação visíveis na Figura 7.a.

Visando uma maior aproximação aos resultados obtidos nos provetes CN 19, efetuou-se um refinamento de 6 mm nos pernos, e variou-se o refinamento da malha do betão entre 20 mm, 18 mm, e 16 mm. Os correspondentes resultados são apresentados na Figura 7.b).

Na Figura 6.d) é possível ver a evolução na malha à medida que se implementa o refinamento nos pernos.

Atendendo aos resultados obtidos, o modelo com refinamento de 6 mm nos pernos e refinamento da malha do betão de 16 mm é o que apresenta maior aproximação aos resultados experimentais obtidos nos provetes CN 19. Sendo assim, é o modelo escolhido nas análises subsequentes.



a) Refinamento dos EF dos pernos para 14 mm

b) Refinamento dos EF dos pernos para 6 mm + refinamento na laje de betão

**Fig. 7:** Resultados obtidos com o refinamento dos pernos e da laje de betão

### 3.4 Comparação entre resultados experimentais e numéricos

Após a calibração do modelo numérico, é possível efetuar uma comparação com os resultados experimentais obtidos nos provetes CN 19.

Na Figura 7.b) é notória a proximidade entre os resultados experimentais e os resultados atingidos com o modelo que considera refinamento de 6 mm nos pernos e refinamento da malha do betão de 16 mm, quer na primeira fase do gráfico, onde o comportamento é aproximadamente linear elástico, quer na segunda fase onde se dá a fendilhação do betão e a carga aumenta mais lentamente. É nesta fase do ensaio, que os provetes CN 19 atingem a sua máxima capacidade de carga, sendo o valor médio de 140.25 kN/conector enquanto que o modelo L5-c6-b16 apresenta uma carga máxima de 134.8 kN/conector, o que corresponde a uma diferença de aproximadamente 4% entre o modelo experimental e o modelo numérico.

A Figura 8 apresenta imagens captadas nos ensaios experimentais dos provetes CN 19 e identifica os valores das tensões e das deformações, registadas aos 6 mm de escorregamento do perfil metálico, nos elementos de aço e betão do modelo. No caso das lajes de betão, é também possível observar a correspondente fendilhação. Esta informação permite perceber os fenómenos que se desencadeiam ao longo do ensaio de tipo *push-out*. À medida que o perfil metálico se move em relação à laje de betão, origina-se uma folga entre a parte da frente do perno e o betão. No entanto, na parte de trás do perno o contacto com o betão intensifica-se, gerando elevadas tensões na zona imediatamente acima do cordão de soldadura. A deformação do perno conduz ao esmagamento do betão. Na zona da haste onde se verifica deformação, gera-se outra zona de tensões elevadas, com compressões na parte de trás do perno, e tracções na parte da frente. Este conjunto de tensões propicia a fissuração do betão em redor dos pernos, que se intensifica à medida que se introduzem incrementos de deslocamento no perfil metálico e observa-se uma maior concentração das fissuras na parte de trás do perno devido às elevadas tensões que se mobilizam no contacto entre os pernos e a laje de betão. Esta fendilhação é coincidente com a fendilhação identificada nos ensaios experimentais.

Na Figura 8.a) representam-se as deformações induzidas no perno, que se assemelham à deformação encontrada nos pernos do ensaio experimental (Figura 8.a). Numa fase adiantada do carregamento, atingem-se as tensões de cedência dos pernos, na zona próxima do seu cordão de soldadura, o que origina a sua rotura, tal como acontece nos provetes CN 19.

Na Figura 8.a) e 8.b), é visível a elevada deformação do perno na zona posicionada junto à base de soldadura e no betão envolvente. A parte frontal do perno deforma-se e afasta-se da laje de betão, enquanto a parte de trás se encosta ao betão. Este comportamento conduz à fissuração e ao esmagamento do betão (Figura 8.c).

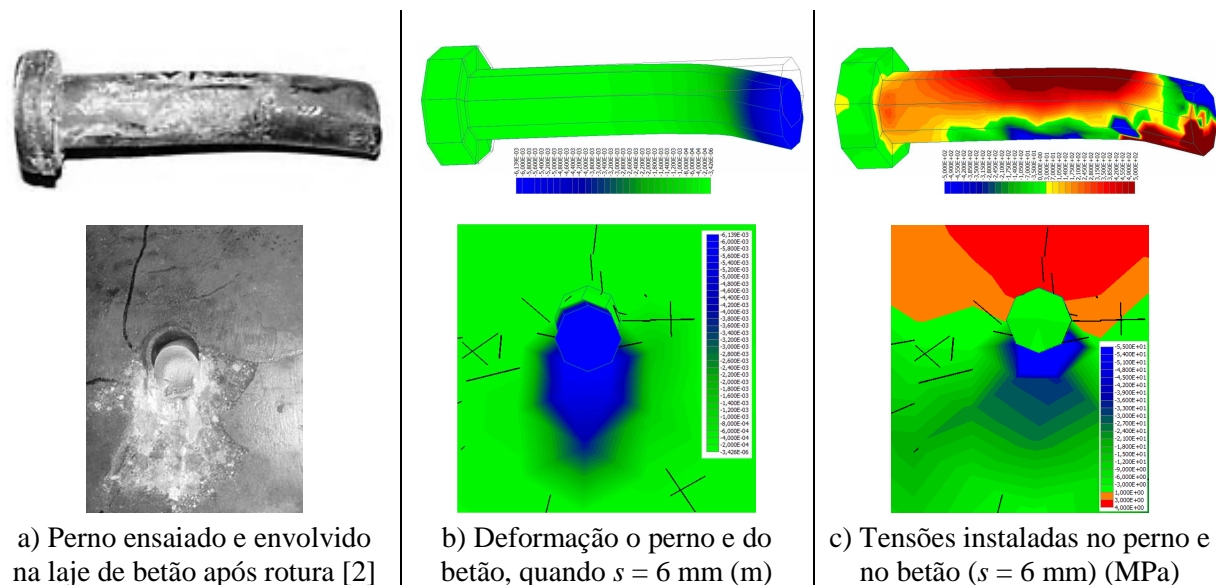


Fig. 8: Comparação entre resultados experimentais e numéricos

#### 4. Análise paramétrica

A partir do modelo numérico calibrado é possível realizar uma análise paramétrica fazendo variar as propriedades dos materiais utilizados no modelo, que mais influenciam a conexão. Esperam-se alterações na capacidade de carga máxima, na rigidez e na ductilidade da conexão quando se alteram os valores das propriedades do aço e do betão leve.

##### 4.1 Variação da resistência dos pernos

Para além dos resultados já obtidos no modelo L5-c6-b16, onde o valor da tensão de cedência considerada no material dos pernos é igual a 500 MPa, consideram-se outros dois modelos onde se faz variar este valor e se mantêm todas as restantes propriedades dos materiais (ver Tabela 1). Os valores de tensão última considerados correspondem a valores plausíveis de serem obtidos em casos reais. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 9, através de curvas força  $\times$  escorregamento.

O comportamento das curvas é idêntico em termos de rigidez inicial e capacidade de deformação. No entanto, a sua capacidade de carga aumenta com o aumento da tensão de cedência dos pernos, mostrando que o comportamento da conexão e a sua capacidade de carga são dependentes da resistência do aço utilizado no fabrico dos pernos. Para a gama de valores testados, observa-se que a capacidade resistente da conexão é limitada pela capacidade resistente dos pernos e não pela capacidade resistente do betão. Na Tabela 1 são exibidos os valores das cargas máximas obtidos nos provetes CN 19 e nos modelos numéricos.

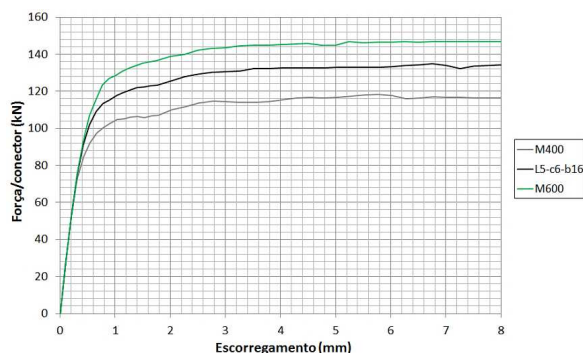


Fig. 9: Força  $\times$  escorregamento para diferentes níveis de tensão de cedência do aço dos pernos

Tabela 1: Propriedades do aço e cargas máximas (por perno)

$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	CN 19 $P_{Médio}$ (kN)	Modelos Numéricos $P$ (kN)
400	440	-	118.2
500	550	140.25	134.8
600	660	-	146.8



#### 4.2 Variação da resistência do betão leve

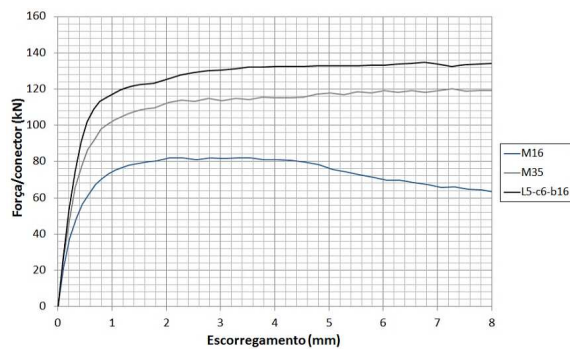
Para a realização da presente análise paramétrica, utilizou-se a NP EN 1992-1-1 [4] para a caracterização do betão leve. Para o efeito, considerou-se o Quadro 3.1 e o Quadro 11.3.1 do referido regulamento, juntamente com as equações (11.1) e (11.2) aí propostas para quantificação da resistência à compressão e módulo de elasticidade do betão leve, tendo-se admitido uma massa volúmica de  $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ , e construiu-se a Tabela 2, onde os dados referentes a  $f_{lck} = 55 \text{ MPa}$  correspondem a um betão de massa volúmica normal com resistência à compressão igual à do betão leve utilizado nos provetes CN 19.

**Tabela 2:** Propriedades do betão leve e cargas máximas (por perno)

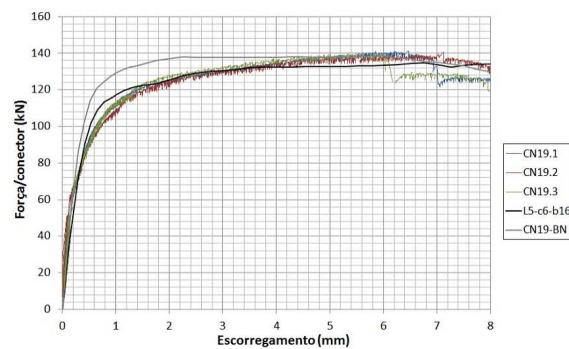
							Modelo Experimental	Modelo Numérico
	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{lck}$ (MPa)	$f_{ctm}$ (MPa)	$f_{lctm}$ (MPa)	$E_{cm}$ (GPa)	$E_{lcm}$ (GPa)	$P_{\text{Médio}}$ (kN)	$P$ (kN)
	-	16	-	1.69	-	19.4	-	82.1
Betão leve	-	35	-	2.85	-	22.8	-	120.0
	-	55	-	3.80	-	24.6	140.25	134.8
Betão normal	55		4.3	-	36.8	-	-	138.6

Realizaram-se diversas simulações com o modelo numérico construído, onde se variaram separadamente os valores da energia de fratura e do deslocamento de compressão crítica, de modo a perceber o seu efeito nos resultados. Conclui-se que a sua influência não é significativa, optando-se então por manter os referidos parâmetros constantes.

Para além dos resultados já obtidos no modelo L5-c6-b16, onde a resistência do betão leve à compressão é de 55 MPa, criaram-se outros dois modelos com diferentes resistências à compressão do betão, mantendo as restantes propriedades. São eles o modelo M16 e o modelo M35 (ver propriedades na Tabela 2). Os resultados são apresentados na Figura 10, através das correspondentes curvas que relacionam força e escorregamento.



**Fig. 10:** Curvas força  $\times$  escorregamento para diferentes betões leves



**Fig. 11:** Curvas força  $\times$  escorregamento para betão normal e betão leve

Os resultados obtidos mostram que a rigidez e a capacidade de carga aumentam à medida que se consideram betões leves de melhores resistências.

Na curva de força  $\times$  escorregamento correspondente ao betão leve M16, observa-se que ocorre uma diminuição da capacidade de carga para escorregamentos superiores a 4 mm. Este decréscimo da capacidade de carga resulta de uma progressiva fendilhação e esmagamento induzidos nas lajes de betão. Ao contrário do que acontece com os modelos M35 e L5-c6-b16, verifica-se que a capacidade de carga não é limitada pela capacidade resistente do conector metálico, mas sim pelo dano introduzido nas lajes de betão.

### 4.3 Comparação entre betão leve e betão de massa volúmica normal

Para a caracterização do betão normal usaram-se as propriedades do betão leve idênticas às medidas no betão utilizado nos provetes CN 19, e recorreu-se às equações anteriormente referidas, propostas na NP EN 1992-1-1 [4], onde se considerou a massa volúmica,  $\rho=1800 \text{ kg/m}^3$ . Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2. As resistências à compressão são iguais nos dois tipos de betão e a maior diferença regista-se nos valores do módulo de elasticidade. Com as propriedades do betão normal criou-se o modelo CN19-BN. Na Figura 11 apresenta-se a curva força  $\times$  escorregamento obtida, juntamente com as curvas de força  $\times$  escorregamento obtidas nos provetes CN 19 e no modelo L5-c6-b16.

A curva obtida com o modelo CN19-BN, que possui as características do betão normal, apresenta maior rigidez na fase inicial do carregamento, do que as curvas obtidas nos provetes onde se utiliza betão leve. Posteriormente, o modelo CN19-BN atinge um nível de carga superior ao que se verifica no modelo L5-c6-b16 e em ambos os casos observa-se uma elevada capacidade de deformação da conexão, sob efeito de um nível de carga aproximadamente constante. O modelo CN19-BN atinge uma carga máxima de 138.6 kN/conector, enquanto o modelo L5-c6-b16 alcança 134.8 kN/conector, havendo uma diferença de aproximadamente 3% entre estes dois resultados.

## 5. Conclusões

O presente trabalho aborda a modelação numérica da conexão entre o perfil metálico e a laje de betão, quando se utilizam conectores do tipo perno e betão leve. Utilizam-se elementos finitos de volume para definir os elementos presentes na ligação, recorrendo ao *software* ATENA 3D. A partir dos modelos desenvolvidos avaliam-se os parâmetros que são identificados como relevantes para o comportamento da conexão aço-betão. Para validar os modelos numéricos desenvolvidos, recorre-se a resultados de ensaios do tipo *push-out* realizados anteriormente na Universidade do Minho [2].

Após diversas iterações onde se variaram diferentes propriedades do modelo numérico, obteve-se o modelo L5-c6-b16 que apresentou resultados bastante próximos dos obtidos nos ensaios experimentais realizados com os provetes CN 19, com uma diferença de cerca de 4% no valor da carga máxima. Para além disso, foram encontradas outras semelhanças entre os resultados obtidos nos ensaios experimentais e no modelo numérico, como as deformações e tensões nos pernos, a rotura dos pernos na zona adjacente à soldadura, o esmagamento do betão na zona envolvente dos pernos e a fissuração das lajes.

Com o modelo numérico calibrado, realizou-se uma análise paramétrica, onde se avaliou a importância de parâmetros associados às propriedades dos materiais utilizados: aço, tipo de betão e respectivas classes de resistência.

## Referências

- [1] Červenka, J. – “ATENA Program Documentation. Part 4-2: Tutorial for Program ATENA 3D”, Červenka Consulting, Prague, Junho 2013.
- [2] I. B. Valente, *Experimental Studies on Shear Connection Systems in Steel and Lightweight Concrete Composite Bridges*, Tese de Doutoramento, Portugal: Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2007.
- [3] NPEN1994-1-1, *Eurocódigo 4 - Projecto de estruturas mistas aço-betão*, Instituto Português da Qualidade, 2011.
- [4] NPEN1992-1-1, *Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão*, Instituto Português da Qualidade, 2010.