

LIGAÇÕES AÇO-BETÃO: MODELAÇÃO NUMÉRICA DE COMPONENTES ENVOLVENDO BETÃO

José Henriques^a, Luís Simões da Silva^b e Isabel B. Valente^c

^{a,b} *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra*

^c *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho*

Resumo. No presente trabalho abordam-se as ligações estruturais entre elementos em aço e em betão armado. O objectivo principal é desenvolver modelos simplificados para análise deste tipo de ligações, tendo por base o método das componentes. Dada a consistência do conhecimento actual no que diz respeito à avaliação das componentes “puramente” metálicas, o trabalho aqui apresentado centra-se nas componentes em que o betão contribui para o comportamento da ligação. Dentro destas últimas distinguem-se: i) a zona de ligação (painel de ligação) em pilares/paredes de betão armado; ii) ancoragens ao betão. Através de modelos numéricos FEM, pretende-se avaliar um modelo adequado, no primeiro caso, e reproduzir o comportamento da componente, no segundo.

1 Introdução

O aumento de competitividade na indústria da construção leva a que se procurem soluções que optimizem a utilização dos materiais. Dentro destas, as soluções estruturais aço-betão apresentam-se como uma alternativa séria. Neste tipo de construção destacam-se dois grupos de elementos de acordo com a natureza do material: i) em betão armado, utilizado em fundações, paredes resistentes (elementos de elevada rigidez) e em alguns casos em pilares; ii) em aço ou mistos (aço-betão), utilizado em vigas, pilares e lajes. Recorre-se assim à aplicação dos diferentes materiais de acordo com a sua melhor performance estrutural. Apesar da eficiência deste tipo de soluções, como são exemplo a “Millennium Tower Vienna” e vários edifícios para escritórios no Reino Unido, a sua implementação na Europa tem sido difícil. Para além de razões socioeconómicas, como o domínio da construção em betão armado, um importante obstáculo resulta da falta de soluções práticas e simples para ligar elementos aço/mistos (aço-betão) a elementos de betão armado e da ausência de métodos simplificados para o respectivo dimensionamento. Consequentemente, as opções postas em prática apresentam-se pouco sistemáticas, afastando os projectistas comuns da sua aplicação.

Com intuito de responder a estas questões, está a decorrer o projecto de investigação Europeu InFaSo¹. Este projecto visa a promoção da construção com aço em estruturas mistas aço-betão. De forma a ultrapassar o obstáculo anteriormente referido na implementação deste tipo de estruturas, abordam-se três tipos de ligações (ver Fig. 1): viga-pilar/parede sem transmissão de momento flector (apenas se admite momentos devidos à excentricidade da ligação); viga-pilar/parede com transmissão de momento flector; bases de pilares. Os objectivos do projecto abrangem duas vertentes fundamentais, uma mais teórica e outra mais prática. Contribuem assim não só instituições de ensino (centros de investigação) mas também parceiros industriais. Como produto final, o projecto tem por ambição: apresentar um conjunto de ligações tipo de fácil execução para diferentes exigências estruturais e; desenvolver modelos de dimensionamento; providenciar manuais/guias de dimensionamento e execução para projectistas e executantes.

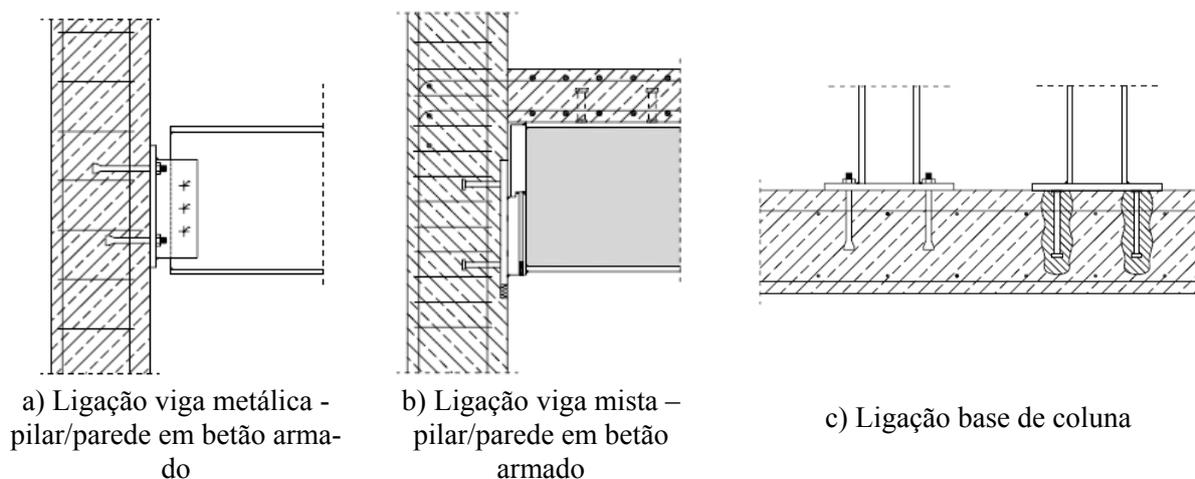


Fig. 1: Tipo de ligações analisadas no âmbito do projecto InFaSo¹.

Neste trabalho distinguem-se ligações mistas de ligações aço-betão. No primeiro caso, assumem-se as ligações em que o betão armado está apenas presente na viga mista e/ou pilar misto (definição usual no mundo da construção metálica). A ligação aço-betão pressupõe que o elemento vertical (pilar ou parede) é exclusivamente em betão armado, no caso de ligações viga-pilar. Ou seja, neste tipo de ligações é necessária uma ancoragem do elemento metálico ao elemento de betão de armado e não existe qualquer tipo de ligação entre elementos metálicos. As bases de colunas incluem-se também na segunda definição.

O presente trabalho insere-se no âmbito do projecto InFaSo e visa a análise de ligações aço-betão.

Pela sua simplicidade e eficiência, utiliza-se o método das componentes, tal como preconizado pela EN 1993-1-8 [1] na análise do comportamento do tipo de ligações em questão. A aplicação do método requer a avaliação das diferentes componentes que contribuem para a resposta global da ligação. Em ligações aço-betão podem distinguir-se dois tipos de componentes: componentes metálicas e componentes que envolvem betão. Assim, o principal objectivo deste trabalho consiste na avaliação das componentes que envolvam o betão. No presente artigo apresenta-se o trabalho numérico desenvolvido para avaliação deste tipo de componentes, que se encontra dividido em duas partes: i) usando modelos bidimensionais na análise de pilares/paredes de betão armado, avaliam-se possíveis modelos de bielas e tirantes que repro-

¹ InFaSo – acrónimo de “New market chances for steel structures by innovative fastening solutions”, projecto europeu financiado pelo RFCS.

duzam o comportamento do painel da ligação (zona similar ao painel de alma do pilar na construção metálica); ii) usando modelos numéricos tridimensionais, procura-se reproduzir o comportamento de componentes associados às ancoragens ao betão. Nesta fase, utilizando resultados experimentais, pretende-se validar estes modelos numéricos.

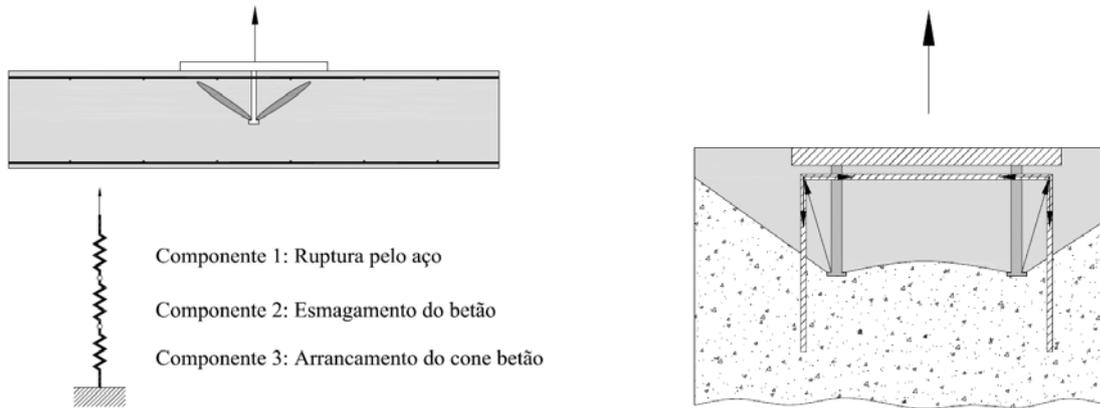
2 Modelo mecânico de componentes

É usual caracterizar o comportamento das ligações com base no método das componentes, cujo princípio básico consiste na utilização de modelos mecânicos de molas, sendo cada componente representada por uma mola. A fiabilidade da aplicação deste tipo de modelos na determinação das propriedades de ligações metálicas e mistas foi demonstrada por [2] e [3]. A extensão desta metodologia ao tipo de ligações aqui abordadas requer algumas adaptações. Como já foi referido anteriormente, há que distinguir entre componentes comuns aos diferentes tipos de ligações, componentes que consideram mecanismos de ruptura apenas no aço, e as “novas” componentes, em que os mecanismos de ruptura se desenvolvem no betão. Neste trabalho apenas se abordará estas últimas. Dentro destas, distinguem-se aquelas que advêm das ancoragens ao betão e o painel da ligação.

No que diz respeito às ancoragens ao betão, Kuhlmann et al [4] apresentam um modelo para ancoragens. O princípio do método das componentes é assumido e cada modo de ruína associado é identificado como uma componente. Na Fig. 2-a é ilustrada esta aplicação ao caso de um chumbadouro de cabeça à tracção onde estas componentes são posicionadas em série. Nesta figura identificam-se as seguintes componentes: i) ruptura pelo aço; ii) esmagamento do betão; iii) arrancamento do cone de betão (com ou sem armadura de reforço). De igual forma poder-se-á obter o modelo para o caso de ancoragem submetida a corte. A principal novidade destes modelos consiste em introduzir o betão em componentes independentes do aço. Actualmente, a EN 1993-1-8 [1] remete para a EN 1992-1-1 [5], no que respeita à verificação do elemento de betão, Já a EN1994-1-1 [6] considera o reforço das componentes de aço envolvidas pelo betão. Assim, este tipo de componentes não é actualmente incluído no modelo global da ligação.

A utilização de armaduras específicas para aumentar a resistência de uma ancoragem é uma prática comum. A transferência de forças da ancoragem para as armaduras pode ser representada pelo modelo de bielas e tirantes ilustrado na Fig. 2-b, como especificado em [7]. Neste tipo de modelos, de igual forma à análise de treliças, o equilíbrio dos nós tem que ser garantido por bielas de compressão (betão) e tirantes de tracção (armaduras).

Para além das componentes directamente associadas às ancoragens dever-se-á ter em consideração a zona do pilar ou parede de betão armado ao nível da ligação. Esta zona é aqui designada por painel de ligação e pode-se assumir como equivalente ao painel da alma do pilar no caso de ligações metálicas/mistas. Contudo, dadas as evidentes diferenças, o tipo de modelos mais apropriado para representar esta zona serão os anteriormente referidos modelos de bielas e tirantes usualmente aplicados a estruturas de betão armado. Como ponto de partida podem encontrar-se na literatura disponível [8], [9], [10] e [11] alguns modelos para nós de estruturas em betão armado. Na Fig. 3 apresentam-se alguns desses modelos propostos para diferentes casos. O traço interrompido representa as bielas (compressão) e o traço a cheio os tirantes (tracção). Estes modelos são obtidos a partir de análises numéricas com elementos finitos e têm por base o fluxo de tensões e o desenvolvimento de fendas.



a) Modelo proposto por Kulmann et al [4] para ancoragem à tracção

a) Modelo de bielas e tirantes para placas de ancoragem com armaduras de reforço [7]

Fig. 2: Modelos mecânicos de molas

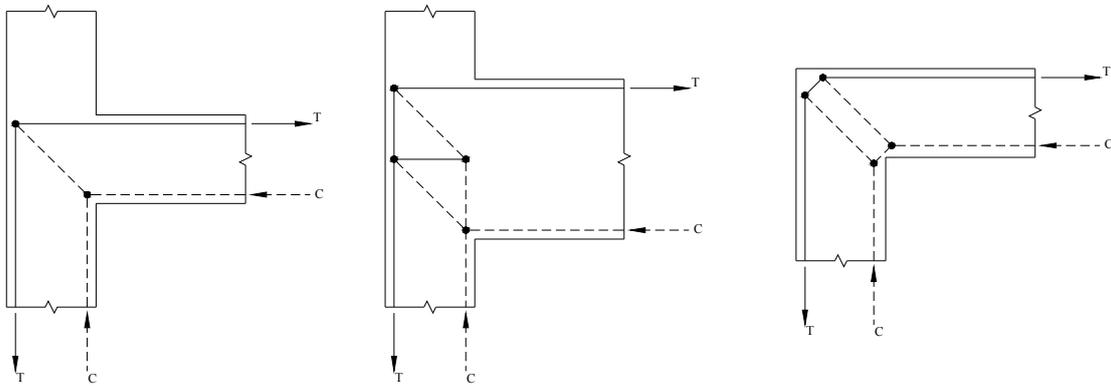


Fig. 3: Exemplos de modelos de bielas e tirantes para nós de estruturas de betão armado.

3 Modelação numérica das componentes que envolvem betão

3.1 Considerações gerais

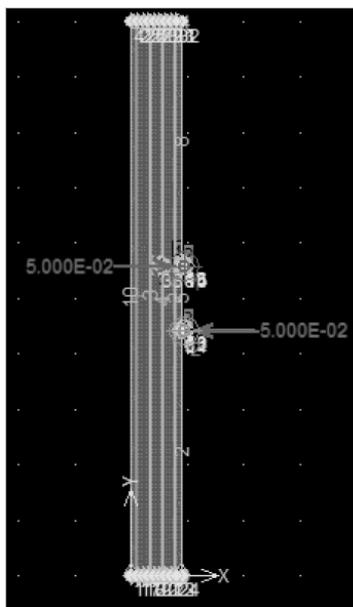
A aplicação de modelos mecânicos, como os que foram abordados em §2, para determinar a resposta global das ligações, requer a caracterização das componentes activadas através de curvas força-deslocamento ($F-d$). A avaliação das componentes pode ser feita por via analítica, numérica e experimental. Neste trabalho utiliza-se a análise numérica para avaliação de componentes envolvendo betão. Assim, apresentam-se modelos bidimensionais para a análise do painel de ligação com objectivo de vir a obter modelos de bielas e tirantes apropriados. Validam-se modelos tridimensionais para simular três casos: ancoragem à tracção; T-stub+placa de ancoragem à tracção; e T-stub à compressão em bloco de betão. Nesta fase o estudo encontra-se incompleto, apresentando-se os resultados obtidos até ao momento.

3.2 Análise numérica: modelos bidimensionais

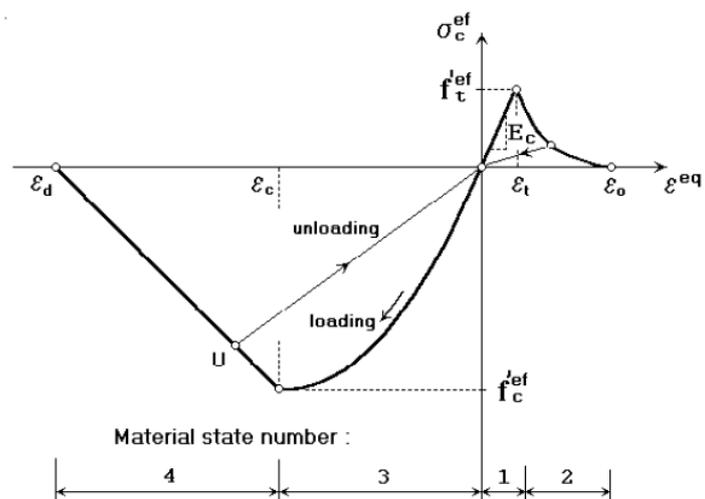
De forma a obter modelos que melhor se ajustem a vários casos, decidiu-se analisar um conjunto alargado situações as quais consideram a variação dos seguintes parâmetros: elemento de suporte; dimensões do elemento de suporte; modo de transmissão da carga; profundidade da ancoragem; quantidade de armadura no elemento de suporte; braço binário das forças aplicadas.

O software utilizado para desenvolver os modelos descritos é o ATENA. Este é um programa especialmente direccionado para a análise de estruturas de betão armado que permite análise através de modelos 2D e/ou 3D.

Como já foi referido, actualmente o trabalho encontra-se numa fase inicial. Apresenta-se assim um modelo preliminar que expressa o objectivo do estudo. Na Fig. 4-a) ilustra-se o modelo desenvolvido que considera um pilar de betão armado com dimensões de 0.45×0.45 m². As forças de tracção e compressão são aplicadas com um braço equivalente à altura de um IPE 500. A força de tracção é introduzida por meio de um elemento metálico que se encontra embutido no betão e rigidamente ligado a este. No que diz respeito à compressão, esta é igualmente aplicada por meio de uma peça metálica rigidamente ligada aos elementos de betão. Na modelação dos materiais assumiu-se um comportamento linear elástico para os elementos de aço que transmitem as forças ao pilar; para o betão é utilizado o modelo (SBETA) disponível no ATENA [12] e cuja o comportamento uniaxial é ilustrado na Fig. 4-b); para o aço das armaduras considera-se um comportamento bi-linear com endurecimento.



a) Pilar em betão armado
 0.45×0.45 m²



b) Lei uni-axial assumida para o betão.

Fig. 4: Modelo bidimensional preliminar para análise do painel de ligação

Os resultados deste modelo no que respeita ao fluxo de tensões principais apresentam-se na Fig. 5-a). Como proposta preliminar, ilustra-se na Fig. 5-b) um possível modelo de bielas e tirantes. Na Fig. 5-c) sobrepõe-se o modelo proposto com o fluxo de tensões principais. Como se pode observar, a força de tracção é aplicada na parte superior. Verifica-se que o fluxo de tensões de tracção se dirige da parte superior direita para parte inferior esquerda. Já no que respeita à compressão verifica-se o contrário. Assim, como uma primeira aproximação assume-se que o modelo é composto por três nós: um TTT, apenas com tirantes à tracção; um CCC, apenas com bielas de compressão; e um CTT, com dois tirantes de tracção e duas bielas de compressão. Esta nomenclatura de nós é usual na literatura da especialidade [8] e [13].

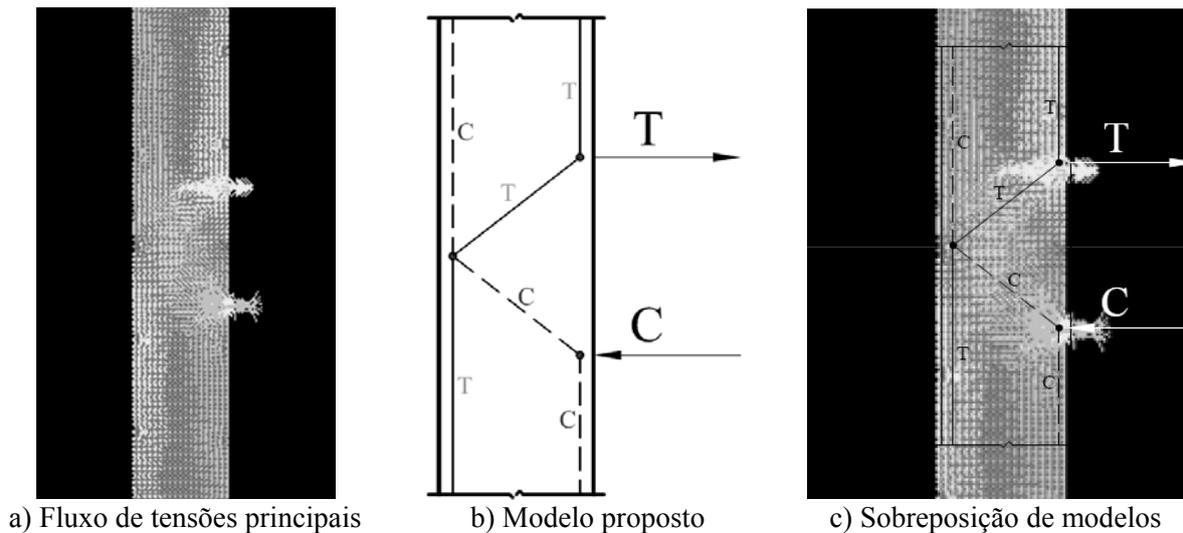


Fig. 5: Resultados dos modelos bidimensionais e modelo proposto.

3.3 Análise numérica: modelos tridimensionais (para ancoragens ao betão)

3.3.1 Ensaio de referência para os modelos desenvolvidos

Conforme anteriormente descrito, utilizam-se modelos tridimensionais para analisar três situações. Ensaio experimental foram seleccionados na literatura com o objectivo de validar os modelos numéricos desenvolvidos. Os provetes que estiveram na base destes modelos apresentam-se na Fig. 6. A primeira situação (Fig. 6-a) reproduz um chumbadouro de cabeça inserido num bloco de betão armado e traccionado [14] e [15]. As distâncias aos bordos foram definidas de forma a não existir qualquer influência destas na formação do cone de betão. No segundo caso (Fig. 6-b) é ensaiado um T-stub à tracção [16] que se encontra ancorado a um bloco de betão. Também aqui se salvaguardaram as distâncias ao bordo, de forma a que estas não interferissem nos mecanismos desenvolvidos no betão. No último caso, (**Fig. 6-c**), considera-se um T-stub comprimido contra um bloco de betão [16].

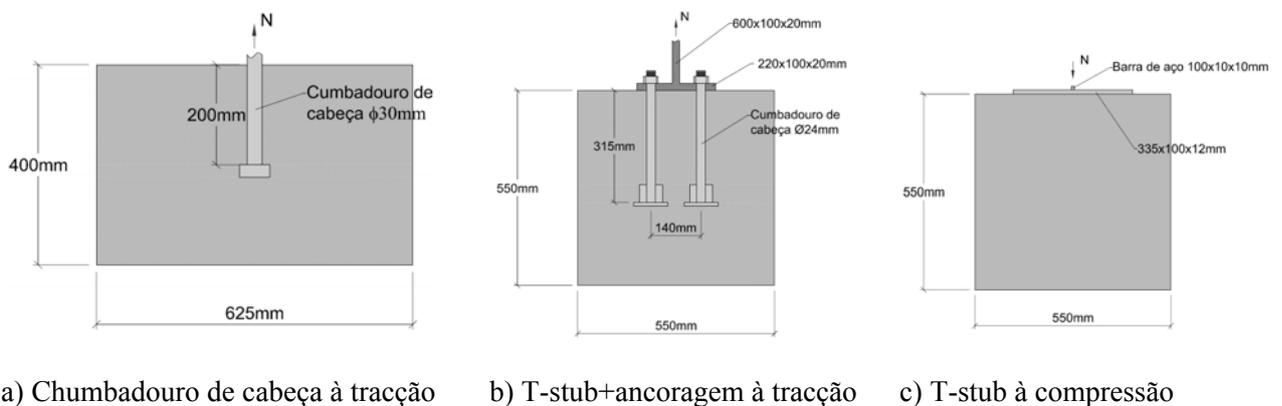


Fig. 6: Provetes ensaiados na base dos modelos numéricos

3.3.2 Descrição dos modelos

O software utilizado para desenvolver os modelos em questão é o ABAQUS. Este é um programa de elementos finitos que permite simular o comportamento não-linear dos materiais, [17]. De acordo com a simetria dos problemas apenas um quarto de cada provete foi modelado.

No que diz respeito às propriedades dos materiais, estas foram definidas de acordo com o relatado nos ensaios experimentais [14], [15] e [16]. Para o betão em compressão apresenta-se a curva tensão-deformação uniaxial (Fig. 4-b) do de acordo com a EN 1992-1-1 [5]. Em tracção é assumido um comportamento linear até ao início da fendilhação, seguido de uma curva descendente designada por “tension stiffening”. Em relação ao aço, o seu comportamento foi modelado através de uma lei multilinear considerando um patamar de cedência seguido de endurecimento.

A modelação do contacto pode incluir a introdução de vários parâmetros que é necessário calibrar. Assim, de forma a evitar a calibração de uma série de parâmetros adicionais, e conforme assumido por outros autores [21], considerou-se que o contacto é perfeito e sem atrito. Para tal, definiram-se dois tipos de superfícies: “master” e “slave”. Na resolução numérica do problema, a primeira pode penetrar na segunda, mas o inverso não pode suceder. No caso de contacto aço-betão, as superfícies de aço assumiram-se com “master” e as de betão como “slave”.

Na Fig. 7 ilustram-se os modelos desenvolvidos. A definição das condições de apoio teve em conta as simplificações associadas à simetria dos provetes. O carregamento foi aplicado conforme esquematizado na Fig. 6. A malha de elementos finitos foi definida seguindo o princípio de maior refinamento na zona onde se esperam maiores concentrações de tensão, o que no caso particular das peças de betão corresponde às zonas que envolvem as ancoragens (no caso de tracção), e às zonas adjacentes ao contacto com o banzo (no caso do T-stub à compressão). Os elementos finitos utilizados para modelar as peças de aço e de betão são elementos sólidos de 8 nós de tipo C3D8 [17].

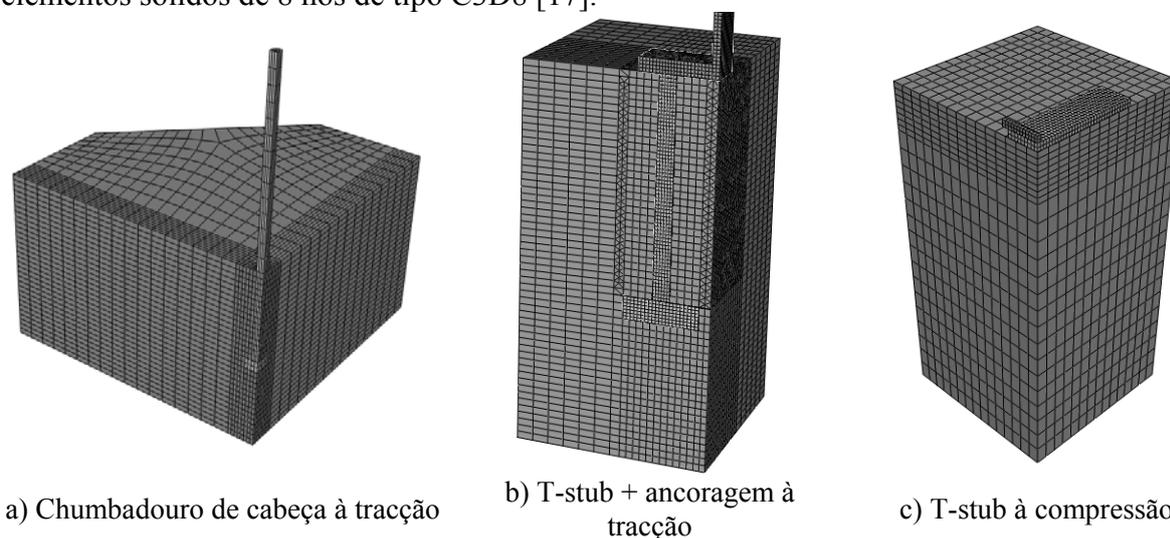


Fig. 7: Modelos de elementos de finitos desenvolvidos.

3.3.3 Comparação com ensaios e resultados

Para comparação e validação dos modelos numéricos utilizaram-se as curvas experimentais força-deslocamento. Na Fig. 8 apresentam-se as comparações para os três modelos desenvolvidos.

Na Fig. 8-a) apresentam-se três curvas experimentais que representam os deslocamentos medidos no chumbadouro, junto à superfície de betão, e no betão, na parte posterior e anterior

do chumbadouro. No que diz respeito às quatro curvas numéricas, duas correspondem às leituras no betão e duas às leituras no chumbadouro. A diferença entre estas duas curvas diz respeito à diferente energia de fractura (G_f) assumida para o betão. A variação introduzida (0.07N/mm e 0.12N/mm) traduziu-se num acréscimo de 20% da carga máxima obtida numericamente. Com esta comparação ilustra-se o efeito de um parâmetro difícil de obter experimentalmente e que tem grande influência na resposta do modelo numérico. Verifica-se ainda que nesta fase o modelo é incapaz reproduzir o comportamento pós-pico dada a elevada fendilhação no betão. A simulação numérica é interrompida por incapacidade de convergência.

Já na Fig. 8-b e Fig. 8-c, a resposta dos modelos/provetes é condicionada pelo aço. Nestes dois últimos casos as curvas $F-d$ apresentadas dizem respeito aos deslocamentos medidos na alma do T-stub e na barra de aço, respectivamente. Como se pode observar, o modelo do T-stub+ancoragem à tracção apresenta uma excelente aproximação. Nota-se no entanto uma ligeira sobre avaliação da resistência. Já no que se refere ao T-stub em compressão, apenas a rigidez inicial é reproduzida com precisão. Observa-se que no modelo numérico a plastificação dá-se para forças superiores às medidas experimentalmente. As razões para tal discrepância podem advir de má interpretação do ensaio experimental que tenha influenciado a incorrecta modelação ou errada leitura de dados (comparação de resultados distintos).

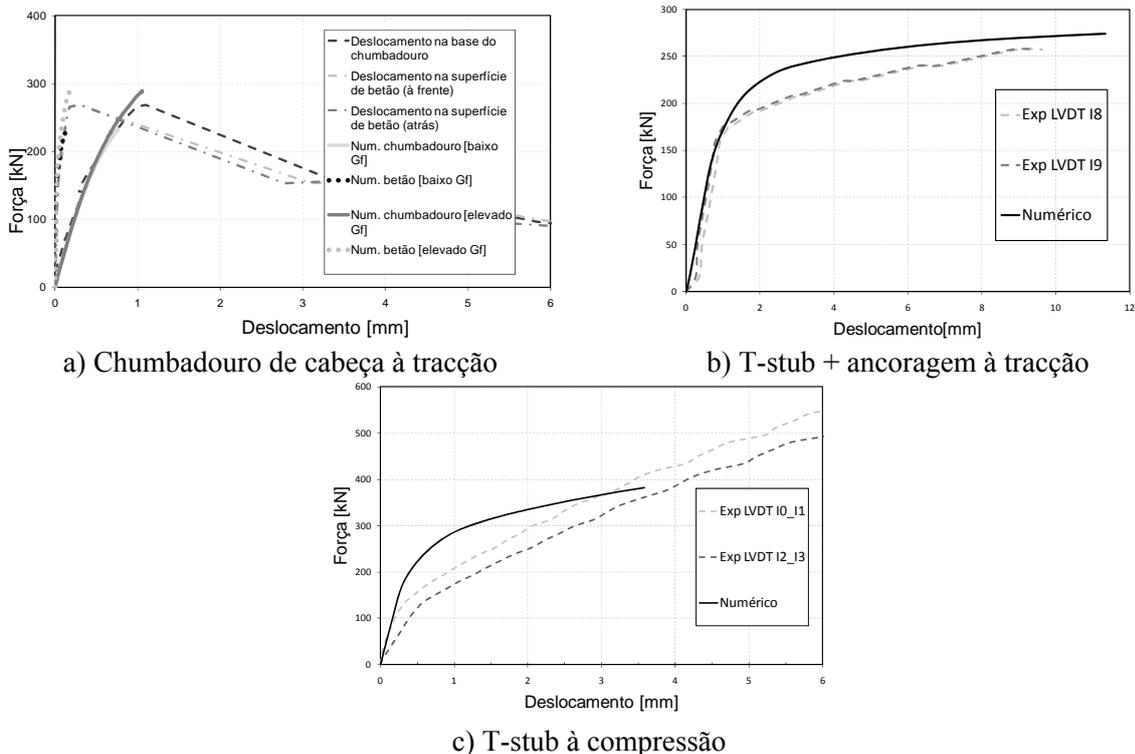


Fig. 8: Comparação de curvas $F-d$ entre resultados experimentais e numéricos.

4 Conclusões

Neste artigo abordaram-se as ligações aço-betão. O trabalho insere-se no projecto europeu InFaSo, que visa promover a construção em aço, através de uma maior implementação de estruturas em que se combinam elementos de betão armado com elementos metálicos ou mistos (aço-betão). O principal objectivo é apresentar soluções simples e eficazes para ligar estes dois tipos de elementos.

Para analisar o comportamento das ligações abordadas, prevê-se a aplicação do método das componentes. Assim, torna-se necessário a caracterização de componentes que envolvam mecanismos de ruptura no betão. Neste grupo, distinguem-se: o painel de ligação e as componentes associadas às ancoragens ao betão. O trabalho numérico apresentado contemplou estes dois grupos de componentes.

No que diz respeito ao painel da ligação conclui-se que:

1. Para a modelação desta zona da ligação pretende-se desenvolver modelo(s) de bielas e tirantes que a possa representar num modelo mecânico;
2. Como ferramenta utilizam-se modelos numéricos de elementos finitos bidimensionais;
3. O modelo numérico e correspondente modelo de bielas e tirantes preliminares expressam a filosofia a seguir no desenvolvimento de futuros modelos;

Em relação às componentes relacionadas com as ancoragens, salienta-se:

1. De forma a ganhar confiança na modelação numérica, prevê-se a simulação de diferentes casos em que o número de componentes activadas é incrementado progressivamente. As situações a analisar são: i) tracção pura, dois casos, ancoragem e T-stub + ancoragem; ii) compressão pura, T-stub à compressão; iii) corte puro, placa de ancoragem ao corte; iv) momento flector puro, placa de ancoragem em flexão; v) corte+flexão, placa de ancoragem ao corte com excentricidade;
2. Desenvolveram-se modelos numéricos para validação que consideram as seguintes situações: ancoragem à tracção; T-stub+ancoragem à tracção; T-stub à compressão; No que diz respeito à fase elástica, todos os modelos apresentam resultados com boa precisão. Já no que diz respeito ao comportamento inelástico, a qualidade dos modelos varia consoante o caso. O modelo T-stub à compressão é o que necessita maior aperfeiçoamento.

Referências

- [1] European Committee for Standardization (CEN), “EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints”, May, 2005.
- [2] Huber, G. (1999) – “Nicht-Linear Berechnungen von verbundquerschnitten und biegeweichen knoten”, Doctor Thesis, Innsbruck, Austria, March 1999.
- [3] Tschammernegg, F.; Rubin, D.; Pavlov, A. (1998) – „ Application of the component method to composite joints”, COST C1 – “Control of the semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections, Proceedings of the international conference, pp. 145-154, Liège, 17 to 19 September, 1998.
- [4] Kuhlmann, U.; Rybinski, M. (2007) – “Component Method for Anchor Plates”, 2nd International Symposium on “Connections between Steel and Concrete”, University Stuttgart, Edited by R. Eligehausen, volume II, pp. 1049-1058, 4-7 September, 2007.
- [5] European Committee for Standardization (CEN), “EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings”, December, 2004.
- [6] European Committee for Standardization (CEN), “EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings”, December, 2004.
- [7] Comité European de Normalisation (2006) – “Technical Specification, Design of fastening for Use in Concrete – Final Draft – Part2: Headed Fasteners”, October, 2006.
- [8] Schlaich, J.; Schaefer, K. And Jennewein, M. (1987) - “Toward a Consistent Design of Structural Concrete”, PCI Journal, V. 32, N° 3, May-June 1987, pp. 75-149.
- [9] Narayanan, R. S.; Beeby, A. (2005) – “ Designers’ Guide to EN1992-1-1 and EN 1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures. General rules and rules for buildings and

- structural fire design“, Series editor Haig Gulvanessian, Thomas Telford, London, 2005.
- [10] Liang, Q. Q. (2006) – “Performance-based optimization of strut-and-tie models in reinforced concrete beam-column connections”, *Real Structures: Bridges and Tall Buildings, Proceedings of the Tenth con East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Bangkok, Thailand, 2006, pp. 347-352.
- [11] Shrivatharan, S.; Ingham, J. M. (2003) – “Application of Stru-and-Tie Concepts to Prestressed Concrete Bridge Joints in Seismic Regions”, *PCI Journal*, 2003.
- [12] Červenka, V.; Jendele, L. and Červenka, J. (2009) - “ATENA Program Documentation, Part 1 - Theory “, Prague, March 2, 2009.
- [13] Tjhin, T. N. And Kuchma, D. A. (2007) – “ Integrated analysis and design tool for the strut-and-tie method”, *Engineering Structures* 29, pp. 3024-3052, 2007.
- [14] Raposo, J. M. (2006) – “Reforço com armaduras em ligações com chumbadouros de cabeça à tracção”, *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialidade de Estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra*, 2006.
- [15] Raposo, J. M.; Simões da Silva, L. e Neves, L. C. (2005) – “Avaliação experimental do comportamento de Chumbadouros à Tracção Acorados em peças de Betão”, *V Congresso de Construção Metálica e Mista, CMM*, 24 e 25 de Novembro, 2005.
- [16] Sokol, Z.; Wald, F. (1997) – “Experiements with T-stubs in tension and compression”, *Research Report, Czech Technical University in Prague*, July, 1997.
- [17] *ABAQUS Theory Manual & Users Manuals, Version 6.7*, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. USA, 2007.
- [18] European Committee for Standardization (CEN), “EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel and structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings”, May, 2005.
- [19] Gil, B. (2006) – “Metodología práctica para el diseño de pórticos de estructura mixta con uniones semi-rígidas”, *Tesis Doctoral, Departamento de Estructuras, ETSAUN*, Junio, 2006.
- [20] Jankowiak, T.; Lodygowski, T. (2005) – “Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model”, *Foundations of Civil and Environmental Engineering* No. 6, pp. 54-69, 2005.
- [21] Boussa, H.; Mounajed, G.; Mesureur, B.; Heck, J.-V. (2001) – “Three dimensional modeling of an anchorage to concrete using metal anchor bolts”, *Int. Symposium on “Connections between Steel and Concrete”*, University of Stuttgart, rilem, pp.637-646, Edited by R. Eligehausen, Stuttgart, Germany, 10-12 September, 2001.