

## MODELO NUMÉRICO DE LIGAÇÃO ENTRE VIGA MISTA E PAREDE DE BETÃO ARMADO: CALIBRAÇÃO E ESTUDO PARAMÉTRICO

José A. G. Henriques<sup>a</sup>, Luís A. P. Simões da Silva<sup>b</sup>, Isabel B. Valente<sup>c</sup>

<sup>a,b</sup> *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra*

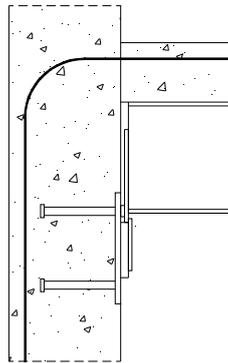
<sup>c</sup> *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho*

**Abstract.** O trabalho apresentado no artigo enquadra-se no estudo do comportamento de ligação viga mista-parede de betão armado. Um modelo numérico desenvolvido no software ABAQUS v6.9 é validado e calibrado através da comparação com ensaios experimentais realizados no âmbito do projecto de investigação RFCS “InFaSo”. Posteriormente, realizou-se um estudo paramétrico onde se analisaram os seguintes parâmetros: classe do aço da armadura longitudinal da laje; dimensões das peças de suporte da viga metálica, consola e placa de ancoragem.

### 1. Introdução

A implementação de soluções estruturais em que se combinam elementos de betão armado com elementos metálicos ou mistos é uma prática bastante competitiva para realização de edifícios de vários andares como são exemplo edifícios de escritórios e parques de estacionamento. Neste tipo de sistemas estruturais, as ligações entre dois tipos de elementos, aço/mista e betão armado, tornam-se um desafio dada ausência quer de soluções padronizadas quer de modelos de dimensionamento simplificados. De forma a responder a esta problemática, decorreu recentemente (2007-2010) o projecto de investigação RFCS “InFaSo” [1] no qual foram abordadas diferentes configurações para ligar este tipo de elementos de diferente natureza. Entre as soluções estudadas encontra-se a configuração ilustrada na Fig. 1. Esta representa a ligação entre uma viga mista e uma parede de betão armado na qual se distinguem duas partes: i) parte superior, a armadura longitudinal da viga mista é estendida e ancorada na parede de betão armado, realça-se que laje e parede são betonadas em diferente períodos e por isso não se assume continuidade; ii) parte inferior, o banzo inferior da viga é apoiado numa consola metálica que se encontra soldada a uma chapa metálica, esta estabelece a ligação com parede de betão armado utilizando chumbadouros de cabeça. Para transmissão da compressão, uma chapa de contacto é utilizada entre o banzo inferior da viga metálica e a chapa ancorada à parede de betão armado. A descrição mais detalhada dos provetes ensaiados assim como dos resultados obtidos pode ser consultada em[2].

No referido projecto, o comportamento da ligação descrita foi avaliado essencialmente pela via experimental. De forma a complementar o limitado número de testes realizado torna-se necessário a utilização da via numérica. Assim no presente artigo apresenta-se o modelo numérico desenvolvido para reprodução do comportamento da ligação em questão. O modelo foi desenvolvido utilizando o programa de elementos finitos ABAQUS v6.9 [3]. A validação do modelo é feita através dos resultados experimentais anteriormente referidos. Posteriormente, um estudo paramétrico foi realizado de forma a aumentar a gama de resultados. Este considerou a análise dos seguintes parâmetros: i) classe do aço da armadura longitudinal da laje de betão armado; ii) espessura da consola que suporta o banzo inferior da viga; iii) espessura da chapa com chumbadouros de cabeça realizando a ligação com a parede de betão armado na parte inferior da ligação.



**Fig. 1:** Ligação entre viga mista e parede de betão armado estudada no projecto RFCS “InFaSo” [1]

## 2. Construção do modelo numérico

### 2.1 Elementos finitos e interacções

A ligação em estudo incorpora diferentes fenómenos como: descontinuidade material, cedência, concentrações de tensões, contacto e comportamento de viga mista. O seu comportamento é tridimensional e de grande complexidade. Assim, todas as partes constituintes da ligação foram modeladas utilizando elementos sólidos hexaédricos, excepto para os conectores da viga mista. Dentro da família de elementos sólidos disponível no ABAQUS[3], os mais comuns são C3D8 (8 nós) e C3D20 (20 nós). Ambos estão disponíveis na versão integração completa e reduzida. Tendo em conta a rapidez de cálculo foi dada preferência à versão reduzida do elemento de 8 nós. A performance do tipo de elementos sólidos é discutida mais à frente.

De acordo com os resultados experimentais, as armaduras longitudinais da laje são elementos que dominam o comportamentoda ligação uma vez que em todos os testes observou-se a ruptura destas armaduras. Consequentemente, esta componente da ligação tem especial relevo e deve ser modelada com a devida sofisticação. Assim, decidiu-se modelar as armaduras também com elementos sólidos. A interacção das armaduras com o betão, pode ser reproduzida utilizando modelos de aderência “rígidos” ou aproximando o comportamento real (tensão-escorregamento). Tendo em conta a relevância das referidas armaduras, o segundo foi seleccionado. Para tal utilizaram-se elementos coesivos. No entanto, dadas as dificuldades numéricas introduzidas por este tipo de modelo, o mesmo foi apenas implementado na região onde as tensões nas armaduras são esperadas mais elevadas, ou seja, junto à interface parede-viga. A dimensão considerada para esta zona consiste na soma das seguintes dimensões: i)

comprimento da armadura entre a face da parede e início da curvatura dentro da mesma; ii) e comprimento na viga mista desde a face da parede até uma distância  $L_t$  designada por comprimento de transmissão de acordo com [4]. Em toda a restante dimensão desta armadura, e nas outras armaduras, o modelo de aderência “rígido” foi utilizado.

Para reprodução dos conectores da viga mista utilizaram-se elementos molas (axiais). Para cada conector duas molas são aplicadas, uma longitudinal e outra transversal (vertical). Esta técnica foi anteriormente utilizada com sucesso por Gil [5].

Além das interações acima referidas as seguintes foram também tidas em conta no modelo (Fig. 2):

- i. Laje de betão com parede de betão armado
- ii. Banzo superior da viga metálica com laje de betão armado
- iii. Viga metálica com chapa de topo
- iv. Chapa de topo com chapa de contacto
- v. Chapa de topo com consola metálica
- vi. Chapa de contacto com chapa metálica (fixa à parede de betão)
- vii. Chapa metálica (fixa à parede de betão) com consola metálica
- viii. Chapa metálica (fixa à parede de betão) com parede de betão
- ix. Chumbadouros de cabeça com parede de betão

Estas interações são inseridas no modelo como problemas de contacto. Assim, dois tipos de contacto foram considerados: a) “hard contact” com ou sem atrito, contacto é modelado com base em pares de contacto (“master-slave”), permitindo deslizamento entre superfícies e não permitindo penetração; b) e ligação rígida entre superfícies, também baseado em interação “master-slave” contudo os graus de liberdade da superfície “slave” tornam-se inactivos sendo as duas superfícies controladas pelos graus de liberdade da superfície “master”. O tipo de contacto considerado para as superfícies em contacto estão identificadas na Fig. 2.

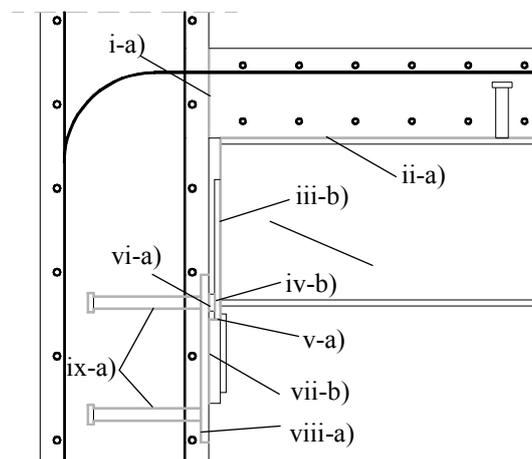


Fig. 2: Identificação das diferentes partes em contacto

## 2.2 Modelos constitutivos

O comportamento mecânico do betão foi modelado utilizando o modelo “ConcreteDamagePlasticity” disponível no ABAQUS[3]. Neste modelo constitutivo o comportamento uniaxial considera uma relação não linear em compressão. Esta foi definida conforme especificado na EN 1992-1-1[6] com base na resistência à compressão do betão obtida em testes. À tracção o comportamento é assumido elástico até ao início da fissuração

seguido de rigidez residual entre fissuras (“tensionstiffening”). O comportamento pós-fissuração é introduzido através da energia de fractura ( $G_f$ ) determinada de conforme [7].

No que diz respeito ao aço, estrutural e de reforço, o modelo isotrópico clássico (vonMises) foi utilizado. Para todas as peças metálicas, excepto armaduras, foi considerado um modelo elasto-plástico com patamar de cedência e endurecimento. Para as armaduras, dada a importância destas na resposta da ligação, a curva do material foi definida introduzindo directamente a curva do material obtida experimentalmente. De forma a melhorar a qualidade da aproximação as propriedades reais (“true-stress-truestrain”) foram determinadas utilizando as expressões (1) e (2) conforme descrito em[8].

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (2)$$

Relativamente ao modelo constitutivo para a reproduzir a aderência das armaduras ao betão, foi utilizado o modelo “traction-separation” disponível no ABAQUS [3]. Este modelo permite estabelecer uma relação tensão-escorregamento, no caso das componentes tangenciais, e tensão-separação, no caso da componente normal. Esta relação é definida atribuindo uma coeficientes de rigidez, início de dano e sua evolução. Para as componentes tangenciais, estas propriedades foram determinadas com base no modelo de aderência preconizado pelo ModelCode[7]. Após a tensão tangencial máxima ser atingida, este modelo preconiza a perda de aderência com o incremento de deslizamento. Para a componente normal, apenas a parte ascendente foi considerada, e de acordo com [9] a rigidez normal deverá ser no mínimo 100 vezes superior à componente normal.

Em relação às molas que reproduzem os conectores (viga-laje), assumiu-seno comportamento longitudinal um comportamento elástico linear com rigidez inicial de 100kN/mm conforme preconizado na EN 1994-1-1 [4]. Para a componente transversal (vertical impedindo a separação entre laje e viga metálica) considerou-se um comportamento rígido.

No que diz respeito ao contacto entre superfícies descrito na secção anterior. O modelo com atrito utiliza o modelo de atrito isotrópico de Coulomb. Mais informação sobre esta lei pode ser obtida em[3].

### 2.3 Outras considerações sobre o modelo numérico

A análise numérica da ligação contemplou a não linearidade geométrica. Assim, para cada incremento, a configuração deformada do incremento precedente é assumida como inicial. Desta forma, a análise pode ser realizada com grandes deformações, rotações e extensões.

As condições de apoio introduzidas no modelo foram simplificadas. Estas consideram-se aplicadas na parede de betão armado, nas faces superior e inferior, onde todos graus de liberdade foram restringidos. Esta simplificação foi posteriormente avaliada, comparando com modelo com as condições reais de apoio, e verificou-se não serem introduzidos desvios significativos. Dada a simetria do problema, e uma vez que apenas metade dos provetes foram simulados, as condições de apoio que reflectem a simetria do problema foram igualmente consideradas. O modelo desenvolvido ilustra-se naFig. 3.

A estratégia para o carregamento considerou a imposição de deslocamentos na extremidade livre da viga mista. Desta forma a ligação fica submetida a um momento flector negativo (tração na parte superior), tal como nos ensaios experimentais. Este tipo de estratégia permite ultrapassar alguns dos problemas numéricos no caso de problemas com matriz rigidez negativa, facilitando a convergência do problema.

Para resolução numérica do problema não-linear, até aqui descrito, foi utilizado o método “StaticRiks” entre os que encontram disponíveis no ABAQUS[3]. Este método permite

resolver problemas estáticos geometricamente não-lineares que apresentem uma rigidez negativa no comportamento força-deslocamento.

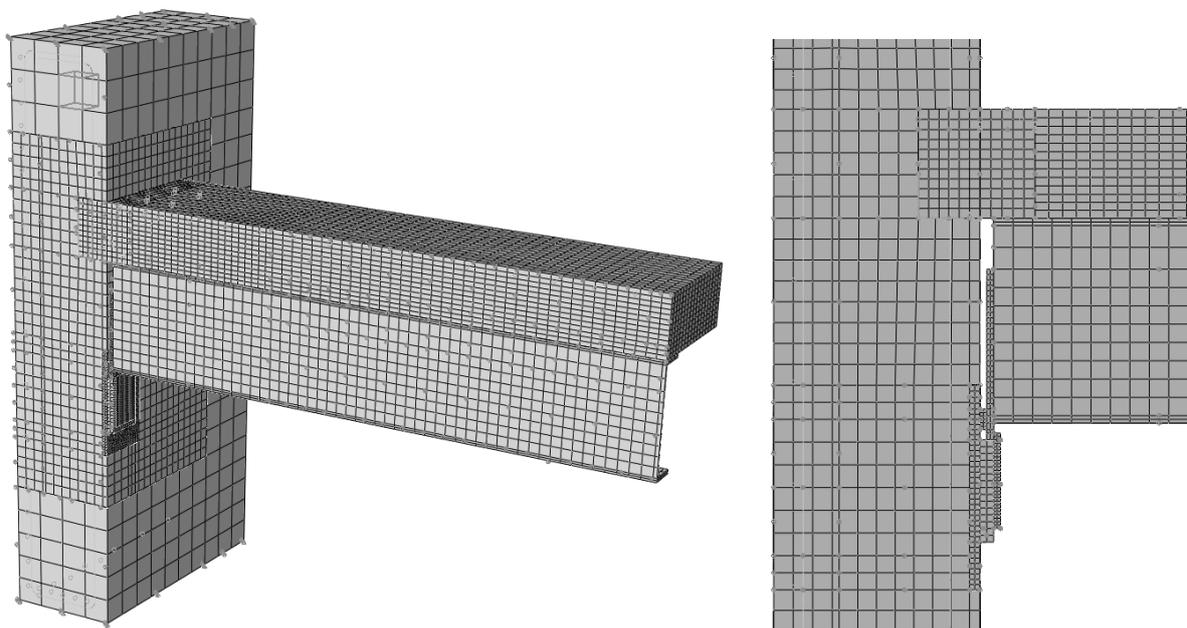


Fig. 3: Modelo desenvolvido no ABAQUS da ligação em estudo

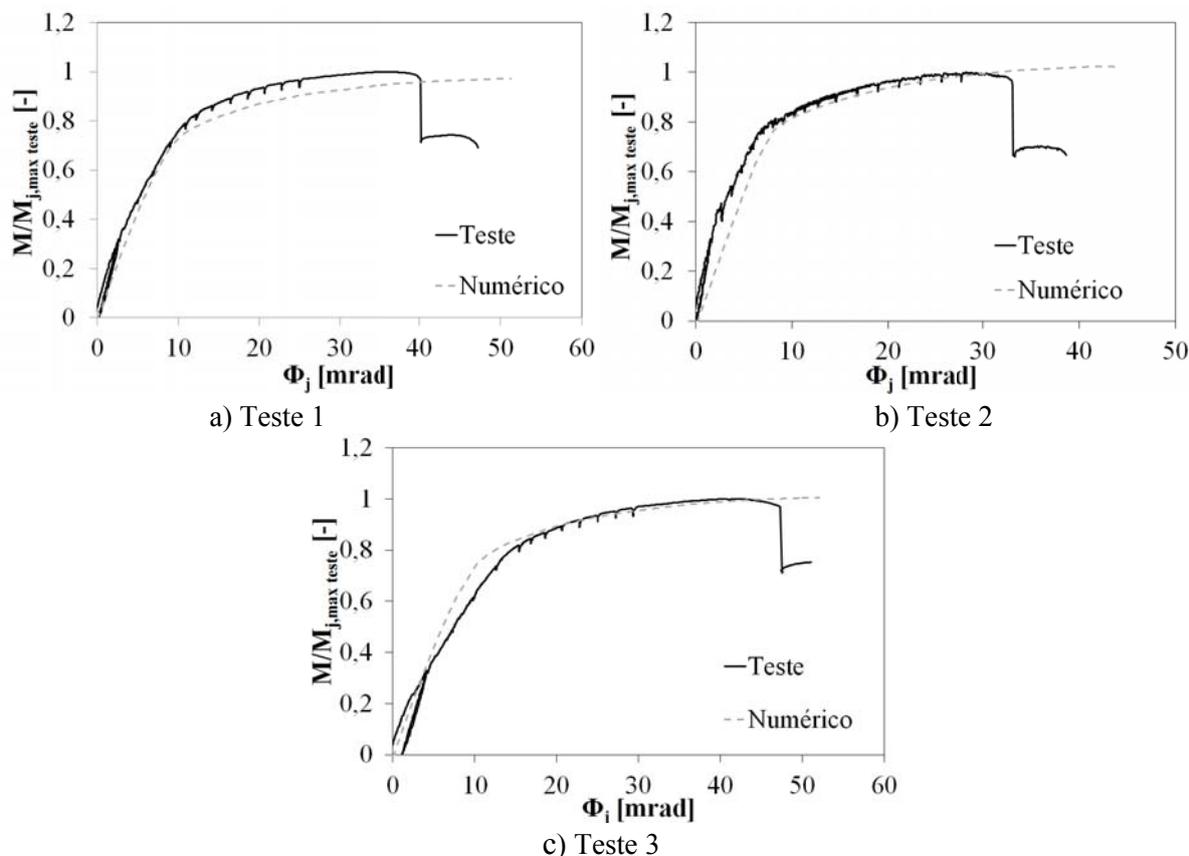
### 3. Validação do modelo numérico

#### 3.1 Comparação com ensaios experimentais

Dada a complexidade do problema em estudo, o processo de validação do modelo numérico não foi automático tendo resultado de uma evolução por fases. Neste processo foram identificados os vários parâmetros que influenciaram a resposta do modelo e que consequentemente resultaram na tomada de decisões para obtenção do modelo final. A descrição do modelo feita no capítulo anterior resulta dessa análise. Dada a limitação do presente artigo apresenta-se aqui apenas os resultados dos modelos finais. Informa-se que se encontra em preparação um artigo com uma descrição mais detalhada do presente trabalho onde o leitor interessado poderá encontrar a evolução de todo o processo de validação do modelo.

Para avaliação da qualidade do modelo numérico utilizaram-se três ensaios realizados no âmbito do referido projecto [1]. Nestes ensaios não se verificou alteração das propriedades dos materiais, apenas se realizaram variações geométricas. Assim, partindo de um ensaio referência (Teste 1), diminuiu-se a percentagem de armadura (Teste 2) e aumentou-se a distância do primeiro conector adjacente à ligação em relação a esta (Teste 3). O principal parâmetro para caracterização do comportamento da ligação foi a curva momento-rotação. Na Fig. 4 comparam-se os resultados obtidos numericamente e experimentalmente. Por questões inerentes à propriedade dos ensaios, o momento flector é apresentado em valores relativos ( $M/M_{max, teste}$ ). A comparação das curvas momento demonstra uma excelente aproximação do comportamento real da ligação. Na Tabela 1 sumariza-se a qualidade do modelo para três parâmetros: momento máximo ( $M_{j,max}$ ), rigidez inicial ( $S_{j,ini}$ ) e rotação ao nível do momento máximo ( $\Phi_{j,Mmax}$ ). Como se pode observar a aproximação obtida é bastante satisfatória para todos os parâmetros excepto para a rotação para momento máximo. No entanto, para o último, a diferença observada deve-se ao facto de no modelo do material se considerar um patamar

após tensão máxima não se modelando a ruptura do aço. Este facto implicou que maiores valores de deformação sejam atingidos.



**Fig. 4:** Comparação das curvas momento-rotação entre testes e modelo numérico

**Tabela 1:** Rácio entre modelo numérico e testes para principais propriedades da ligação

Provete	Rácio (Num/Exp)		
	$M_{j,max}$	$S_{j,ini}$	$\Phi_{j,Mmax}$
Teste 1	0,97	0,93	1,43
Teste 2	1,02	0,92	1,51
Teste 3	1,01	0,82	1,28

Como foi referido anteriormente as armaduras longitudinais da laje são a componente que governam a resposta da ligação, assim para uma melhor avaliação da qualidade do modelo numérico comparam-se as extensões medidas na armadura em duas secções ao longo das armaduras e nas armaduras internas e externas. As secções utilizadas para comparação identificam-se na Fig. 5. Na Fig. 6 comparam-se as extensões medidas experimentalmente com os valores extraídos do modelo numérico. Como se pode observar, existe uma excelente aproximação para a secção mais próxima da face da ligação. A qualidade da aproximação diminui para a outra secção. A razão para o desvio encontrado justifica-se no facto de a segunda secção já se encontrar numa zona em que aderência ao betão é modelada utilizando o modelo “rígido” de aderência. Consequentemente, as deformações nesta parte da armadura são menores. No entanto, a influência deste efeito na resposta global do modelo é menor uma vez que a deformação se concentra essencialmente na zona de interface laje-parede, onde o modelo é mais exacto.

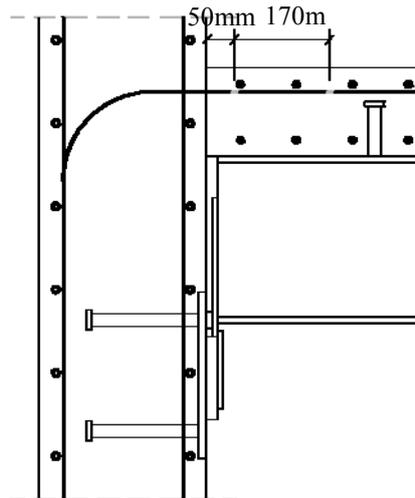


Fig. 5: Localização das secções para medição das extensões nas armaduras

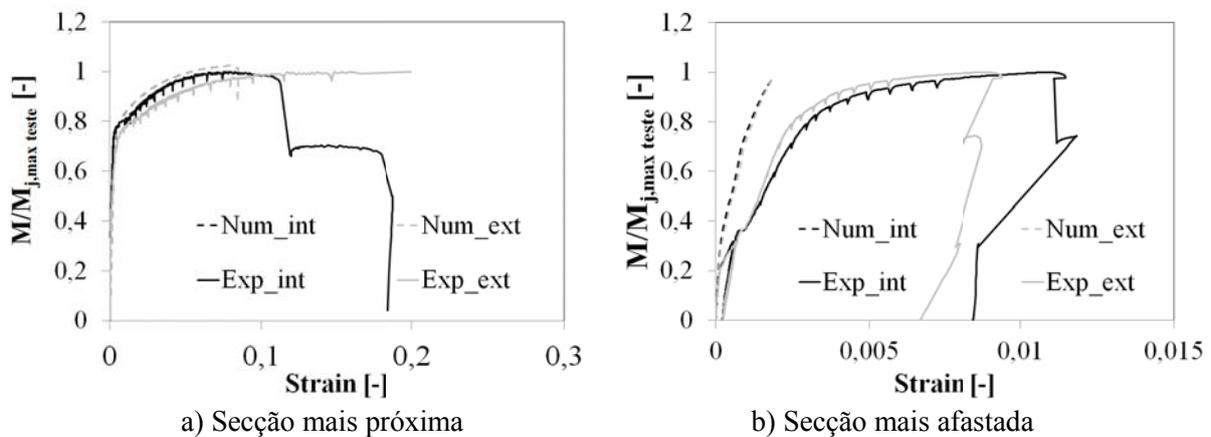


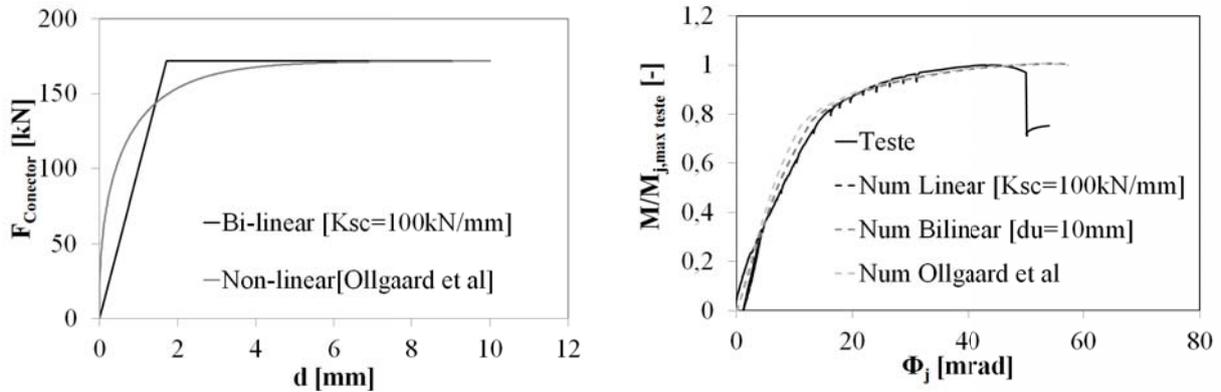
Fig. 6: Comparação das extensões nas armaduras medidas nos ensaios e no modelo numérico

### 3.2 Calibração e preparação do modelo para estudo paramétrico

Após o processo de validação do modelo, foi realizado um estudo que visou aferir alguns parâmetros para estudo paramétrico. O primeiro aspecto a ser analisado foi o tipo de elementos. Uma vez que com os elementos de 8 nós e integração reduzida os resultados obtidos são bastante satisfatórios, decidiu-se prosseguir com a utilização deste tipo de elementos. A utilização de elementos de integração completa ou de ordem superior implicaria o acréscimo considerável no custo computacional. Ainda relacionado com a dimensão do modelo, foi realizado um estudo onde se pretendeu diminuir os graus de liberdade total. Para tal efeito, alterou-se a malha de elementos finitos e mudaram-se o tipo de elementos a utilizar nas armaduras menos relevantes. Assim, aumentou-se a dimensão dos elementos. Apenas nas zonas onde se verifica concentração de tensões a malha adoptada permaneceu mais densa. No que diz respeito às armaduras menos relevantes o tipo de elemento finito foi alterado de sólido de 8 nós com integração reduzida (C3D8R) para elementos barra de 2 nós (T3D2). Com estas medidas, mantendo-se a qualidade da resposta do modelo, conseguiu-se aumentar a eficiência de cálculo em aproximadamente 107%.

No que diz respeito ao comportamento das molas longitudinais que reproduzem o comportamento dos conectores (entre laje e viga metálica) nesta direcção, foram testados três modelos: elástico linear (utilizado nos modelos anteriores); bilinear e não-linear (modelo de Ollgaard et al [11]). Os dois primeiros foram definidos conforme a EN 1994-1-1 [10], onde a deformação última considerada foi de 10mm. As leis descritas ilustram-se na Fig. 7-a). Na

Fig. 7-b) comparam-se os resultados obtidos. Como se pode observar, os desvios são praticamente insignificantes. Estes resultados são justificados pelo facto de as molas não atingirem o patamar de cedência.

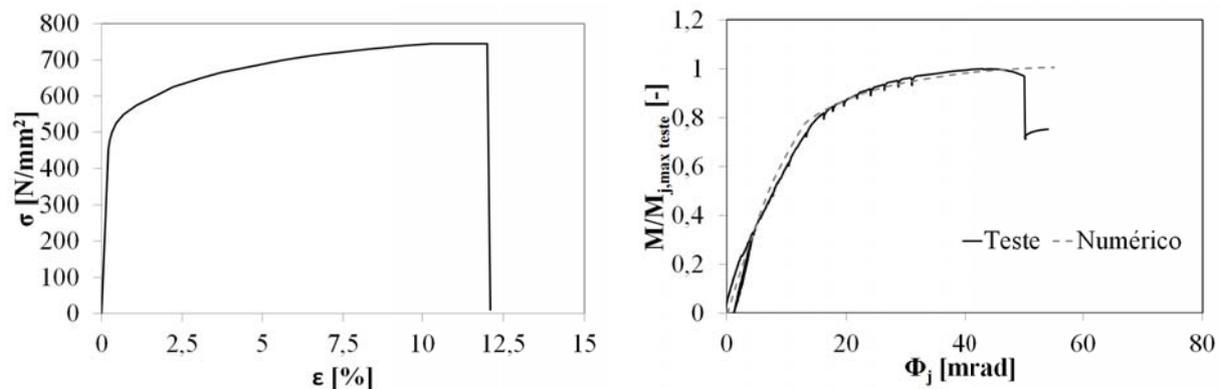


a) Modelo de comportamento dos elementos mola (conectores)

b) Comparação dos diferentes modelos com os resultados experimentais

**Fig. 7:** Efeito da lei constitutiva aplicada às molas que representa a conexão longitudinal entre viga metálica e laje

Seguidamente foi avaliada a definição de um critério de ruptura para o aço das armaduras longitudinais. De forma simplificada, a ruptura foi modelada assumindo uma perda de resistência abrupta quando a extensão última, obtida experimentalmente, é atingida. O valor desta extensão foi aproximadamente 12%. O comportamento considerado ilustra-se na Fig. 8-a). Na Fig. 8-b) compara-se o resultado numérico deste modelo com o resultado experimental. Verifica-se agora que existe uma maior aproximação entre estes.



a) Modelo comportamento do aço das armaduras

b) Comparação das curvas M- $\Phi$

**Fig. 8:** Introdução de critério de ruptura para as armaduras longitudinais

Por fim avaliou-se a influência do coeficiente de atrito entre a laje de betão e a viga metálica. Testaram-se valores entre 0,2, utilizado nos modelos anteriores e por Gil [5], e 0,5. Verificou-se que este parâmetro não tem influência. Manteve-se assim o valor de 0,2.

## 4. Estudo paramétrico

### 4.1 Variação paramétrica

Numa primeira fase, apenas três parâmetros foram alvo do estudo paramétrico. A escolha recaiu sobre os parâmetros que se estudaram experimentalmente em [1] e que são: i) classe do aço das armaduras longitudinais; ii) espessura da consola metálica onde se apoia o banzo inferior da viga; iii) e espessura da chapa metálica ancorada à parede de betão.

No que diz respeito ao procedimento do estudo paramétrico, decidiu-se realizar a variação de cada parâmetro, acima referido, isoladamente. Desta forma foi possível interpretar melhor a influência de cada um. Foram utilizadas como base as propriedades geométricas e mecânicas de um dos provetes ensaiados em [1].

Na Tabela 2 listam-se os parâmetros a variar assim como o domínio de variação. Note-se que as variações geométricas implicam variações locais da geometria dos provetes para manter a geometria global. Em relação à classe do aço, as propriedades foram determinadas tendo em conta os limites apresentados na EN 1992-1-1 [6]. Para valores intermédios foi realizada uma interpolação linear com base nos referidos limites.

**Tabela 2:** Lista dos parâmetros objecto do estudo paramétrico e correspondente domínio de variação

Parâmetro	Domínio de variação	Número de modelos
Classe do aço da armadura longitudinal da laje	A classe do aço varia de A a C onde as propriedades $f_u/f_y$ e $\epsilon_u$ são determinadas de acordo com EN 1992-1-1 [1].	10
Espessura da consola de suporte do banzo inferior da viga metálica	A espessura varia de 20mm a 50mm com incrementos de 5mm.	7
Espessura da chapa metálica ancorada à parede de betão armado	A espessura varia de 5 a 15mm com incrementos de 2,5mm, e de 15mm a 40mm com incrementos de 5mm.	10
Total		27

### 4.2 Análise dos resultados

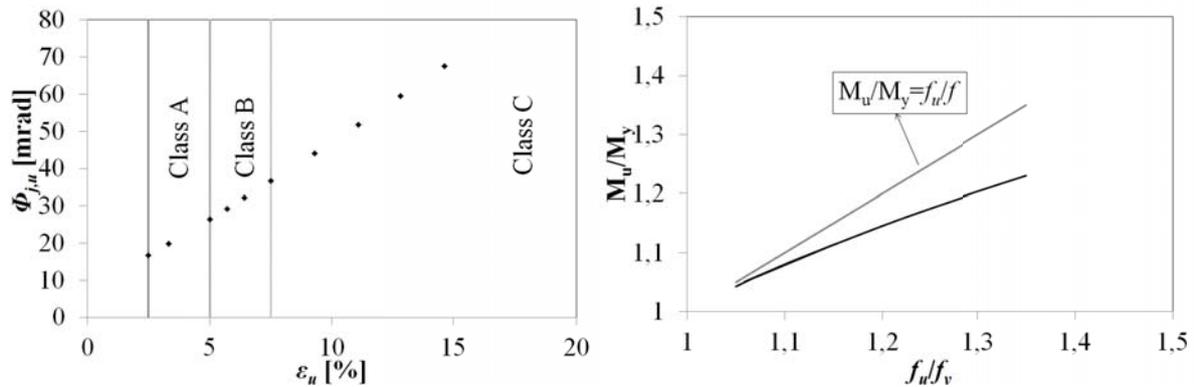
#### 4.2.1 Classe do aço da armadura longitudinal da laje

A armadura longitudinal da laje é a componente que controla a resposta da ligação uma vez que a ruptura desta limita a capacidade da ligação. Assim, variação realizada reflecte-se directamente na resposta da ligação. Os parâmetros que se variam,  $\epsilon_u$  e  $f_u/f_y$ , têm influência na resistência e na capacidade de rotação. Na Fig. 9-a) apresenta-se a rotação última obtida em função da extensão última. A proporcionalidade encontrada é praticamente linear. De acordo com os resultados obtidos, a classe de aço pode ser escolhida em função da rotação requerida à ligação. Assim tem-se:

- Até 27mrad – Classe A;
- Até 37mrad – Classe B;
- Acima de 37mrad – Classe C

Na Fig. 9-b) apresenta-se a relação de  $M_u/M_y$  em função de  $f_u/f_y$  que define a evolução na resistência da ligação. Aqui a relação também é linear no entanto verifica-se que  $M_u/M_y$  não segue o mesmo crescimento que  $f_u/f_y$ . Tal facto é justificado pelo aumento de  $\epsilon_u$  com  $f_u/f_y$  considerado. O aumento da extensão última ( $\epsilon_u$ ) implica que a deformação da secção das

armaduras também aumente. O decréscimo da secção da armadura implica que o acréscimo de resistência da armadura não seja totalmente eficaz, consequentemente o rácio  $M_u/M_y$  não cresce na mesma proporção que  $f_u/f_y$ .



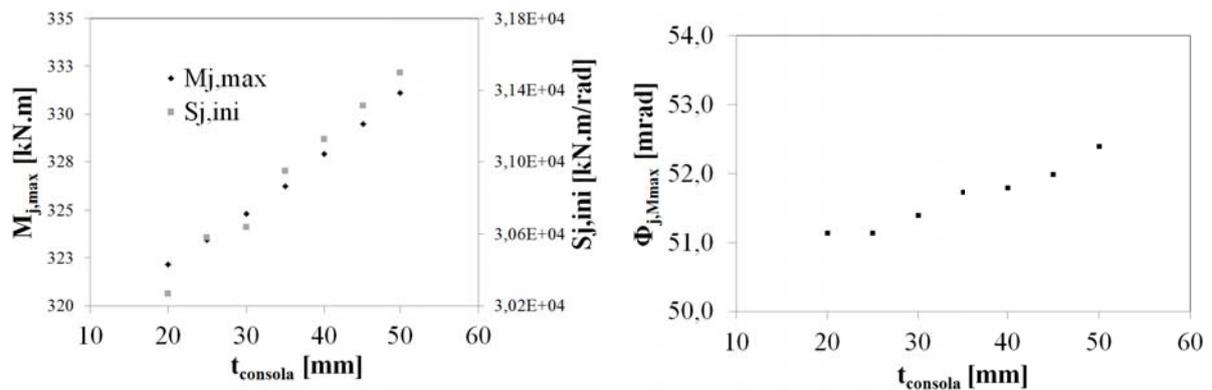
a) Evolução da rotação última da ligação

b) Momento flector resistente máximo

**Fig. 9:** Avaliação da influência da ductilidade do aço armadura longitudinal da laje

#### 4.2.2 Espessura da consola metálica

Apesar das variações realizadas nesta parte da ligação, a armadura longitudinal da laje permanece a componente que governa o comportamento da ligação. Assim, o efeito da espessura da consola metálica na resposta global da ligação é praticamente insignificante, como comprovam os resultados apresentados no Fig. 10. Na Fig. 10-a) apresenta-se a variação de momento flectormáximo e rigidez inicial de rotação da ligação com a variação da espessura da consola metálica. Na Fig. 10-b) apresenta-se a variação da rotação da ligação, ao nível do momento flector máximo, em função da espessura da consola metálica. Para todos estes parâmetros, a variação é aproximadamente inferior a 4%.



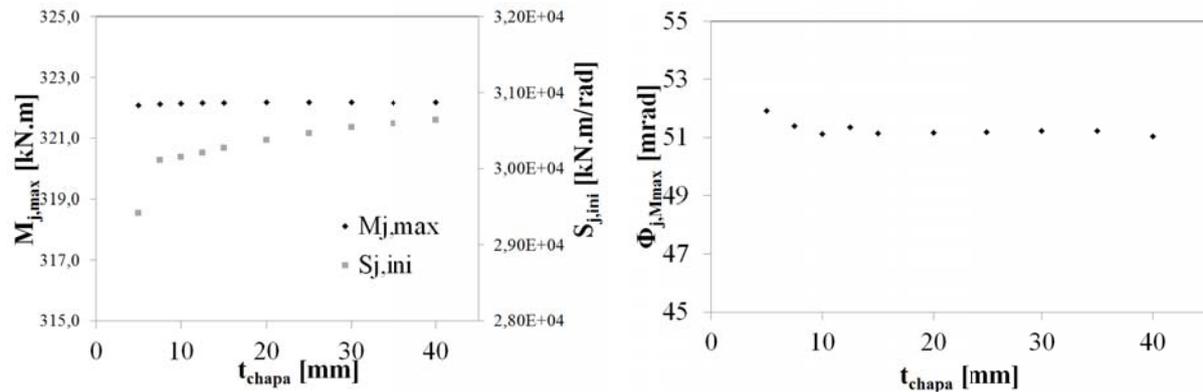
a) Momento flector máximo e rigidez inicial de rotação

b) Rotação para momento flector máximo

**Fig. 10:** Avaliação da influência da espessura da consola metálica

#### 4.2.3 Espessura da chapa metálica ancorada à parede de betão armado

Tal como para a espessura da consola, as variações da espessura da chapa metálica ancorada à parede de betão armado não produziram alteração no modo de ruptura da ligação. Como se comprova na Fig. 11, em relação às propriedades globais da ligação, momento flector máximo, rigidez de rotação inicial e rotação ao nível do momento flector máximo, as variações observadas são ainda menores que para o parâmetro anterior.



a) Momento flector máximo e rigidez inicial de rotação

b) Rotação para momento flector máximo

**Fig. 11:** Avaliação da influência da espessura da chapa metálica ancorada à parede de betão armado

## 5. Conclusões

Foi apresentado um modelo numérico para ligação entre viga mista e parede estrutural em betão armado. Complementou-se desta forma o trabalho experimental e analítico iniciado no âmbito do projecto RFCS “InFaSo” [1] dedicado ao estudo de ligações estruturais aço-betão. O modelo foi desenvolvido no programa de elementos finitos ABAQUS v6.9 [3]. Neste foram utilizados essencialmente elementos sólidos de 8 nós com integração reduzida. Dada a capital importância da armadura longitudinal da laje, observada experimentalmente, especial atenção foi dedicada à modelação desta componente. Consequentemente, utilizaram-se elementos sólidos na sua modelação e a aderência ao betão foi simulada utilizando elementos coesivos cujo comportamento foi aproximado ao moledo de aderência do ModelCode[7]. A comparação do modelo numérico com os resultados experimentais demonstrou que o primeiro consegue reproduzir o comportamento da ligação com boa aproximação. Esta foi obtida não só para parâmetros como momento flector máximo, rigidez inicial de rotação e rotação máxima, mas também ao longo de toda a curva momento-rotação. O estudo paramétrico realizado considerou apenas os principais parâmetros alvo de estudo na parte experimental. Desta forma foi alargado o âmbito das variações geométricas realizadas em[1]. Os resultados obtidos confirmaram as principais conclusões do estudo experimental, onde se verificou que, nesta configuração, a parte inferior da ligação apresenta baixa influência na resposta da ligação. A principal componente é claramente a armadura longitudinal da laje. Por fim, futuramente, o modelo desenvolvido permite alargar o âmbito do estudo da configuração em causa a casos como sejam: a utilização de duas linhas de armadura; a resposta a um momento flector positivo; excentricidade da ligação em relação à parede de betão armado (introdução do efeito dada a proximidade a bordos); etc.

## Referências

- [1] Kuhlmann U, Eligehausen R, Wald F, da Silva L, Hofmann J. “New market chances for steel structures by innovative fastening solutions”, Relatório final do projecto RFCS “InFaSo”, projectoNº RFSR-CT-2007-00051 (a publicar).
- [2] Henriques J, Ozbolt A, Žižka J, Kuhlmann U, Simões da Silva L, Wald F. “Behaviour of steel-to-concrete joints II: Moment resisting joint of a composite beam to reinforced

- concrete wall” , Steel Construction *Design and Research* (Ed. Ernst &Sohn), Volume 4, August 2011 N°3,161-165.
- [3] ABAQUS Theory Manual & Users Manuals, Version 6.9-3, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. USA, 2010.
- [4] ECCS, “Design of Composite Joints for Buildings”, ECCS Publication n°109, Technical Committee 11, Composite Structures, First Edition, Belgium, 1999.
- [5] Gil B. “Metodología práctica para el diseño de pórticos de estructura mixta con uniones semi-rígidas”, Tese de doutoramento, Departamento de Estructuras, ETSAUN, Junho, 2006.
- [6] CEN, European Committee for Standardization. “Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”, EN 1992-1-1, Bruxelas, Bélgica, Dezembro 2004.
- [7] CEB-FIP Model Code 1990, Design Code, CEB, Lausanne, 1993.
- [8] Simões da Silva L, Gervásio H. “manual de DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS: Métodos Avançados”, Edição: CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, Fevereiro, 2007.
- [9] Gan Y. “Bond stress and slip modeling in non-linear finite element analysis of reinforced concrete structures”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Toronto, 2000.
- [10] CEN European Committee for Standardization. “Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1994-1-1” Bruxelas, Bélgica, Dezembro 2004.
- [11] Ollgaard JG, Slutter RG, Fisher JW. “Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete,” AISC Engineering Journal, vol. 8, Abril 1971, pp. 55-64.