



ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO SOBRE O COMPORTAMENTO DE VIGAS MISTAS COM CONECTOR CRESTBOND

Ana Rita Alves^a, Isabel B. Valente^a, Washington B. Vieira^b, Gustavo S. Veríssimo^c

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

^b *Campus Avançado de Itabira, Universidade Federal de Itajubá, Brasil*

^c *Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal de Viçosa, Brasil*

Resumo. Nesta comunicação apresenta-se um estudo sobre vigas mistas em aço e betão onde se utilizam conectores do tipo *Crestbond* contínuos para estabelecer a ligação entre a viga metálica e a laje de betão e garantir o funcionamento misto entre estes dois elementos. Apresentam-se os resultados de ensaios numéricos e experimentais obtidos em vigas mistas de aço e betão realizadas com conectores *Crestbond*, na Universidade do Minho. Os provetes consistem numa viga metálica IPE200 com um conector CR40-R10 contínuo, posicionado sobre o banzo superior da viga e soldado em todo o seu desenvolvimento, e uma laje betão armado com secção transversal de $0.40 \times 0.10 \text{ m}^2$. Os provetes apresentam um vão de 3.0 m e um comprimento total de 3.2 m. O modelo numérico foi desenvolvido no *software Atena 3D*.

1. Introdução

O conector *Crestbond* consiste numa chapa plana lisa cortada em crista com saliências e reentrâncias trapezoidais, pertencendo, por isso, à família dos conectores de chapa contínua. Já foi experimentalmente comprovado que o conector *Crestbond* apresenta elevada capacidade resistente, comportamento dúctil e capacidade para garantir o funcionamento misto. Até ao presente, o seu comportamento foi validado através do ensaio de tipo *push-out*, proposto no Eurocódigo 4 [1], mas considera-se que é também necessário validar o seu comportamento em vigas, tal como aqui se propõe. Foram realizados ensaios monotónicos a uma viga mista de forma a poder avaliar a influência do conector *Crestbond* na carga máxima atingida, na rigidez da viga e na evolução da deformação vertical e do escorregamento na interface entre as secções de aço e de betão, em função do carregamento aplicado [2,3]. Posteriormente, foram desenvolvidos e calibrados modelos numéricos representativos dos ensaios experimentais com objetivo de ser avaliado o comportamento dos parâmetros mais relevantes no comportamento misto com conector *Crestbond* [2].

2. Geometria

O provete em causa diz respeito a uma viga mista de aço e betão, simplesmente apoiada, com 300 cm de vão, composta por um perfil metálico IPE 200, com um conector *Crestbond* CR40 centrado e contínuo ao longo do vão e uma laje de betão com secção transversal $40 \times 10 \text{ cm}^2$, tal como se pode observar na **Fig. 1**.

Foi considerada uma única configuração de carga para a realização dos ensaios das vigas mistas correspondente a duas cargas concentradas, com posição simétrica em relação ao meio vão, distanciadas entre si a um comprimento de 60 cm, ou seja, a 1/5 do vão.

A armadura transversal da laje foi determinada com base na secção 6.2.4 do Eurocódigo 2 [4]. Esta foi distribuída uniformemente ao longo do vão, correspondendo a 2 varões com 6 mm de diâmetro dispostos em cada abertura do conector, portanto a cada 8.4 cm (corresponde ao espaçamento dos dentes do conector).

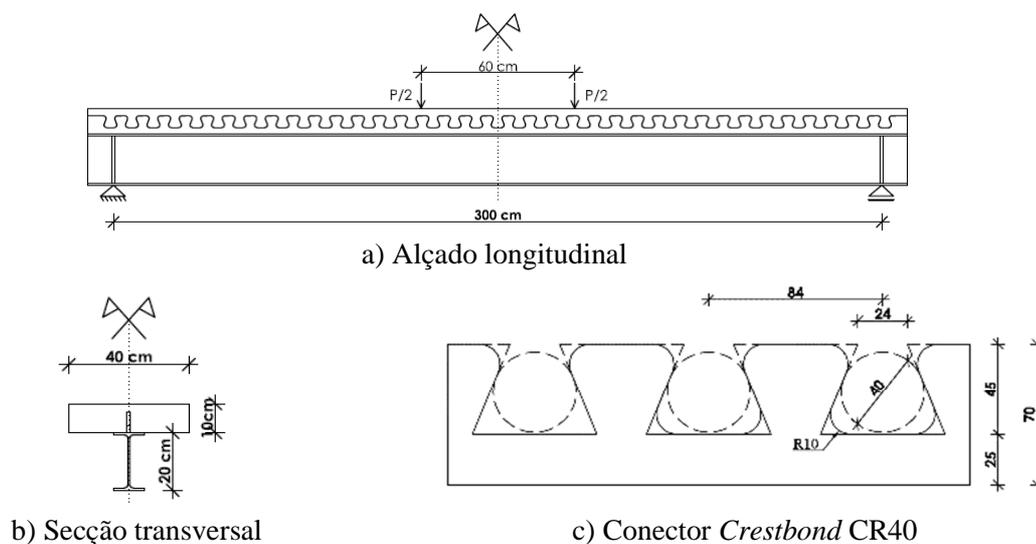


Fig. 1: Geometria da viga mista e do conector

3. Execução dos provetes das vigas mistas

A viga metálica corresponde a um IPE200 realizado em aço de tipo S275. A viga metálica foi reforçada na zona dos apoios. O conector utilizado é um *Crestbond*, CR40, desenvolvido por Veríssimo [5]. O conector possui uma altura total de 70 mm, adequada à laje de betão utilizada nas vigas mistas, cuja altura total é igual a 10 cm. O conector foi posicionado simetricamente ao longo da viga, alinhado com a alma do perfil metálico. Na Fig. 2 está representado o faseamento do fabrico da laje de betão.

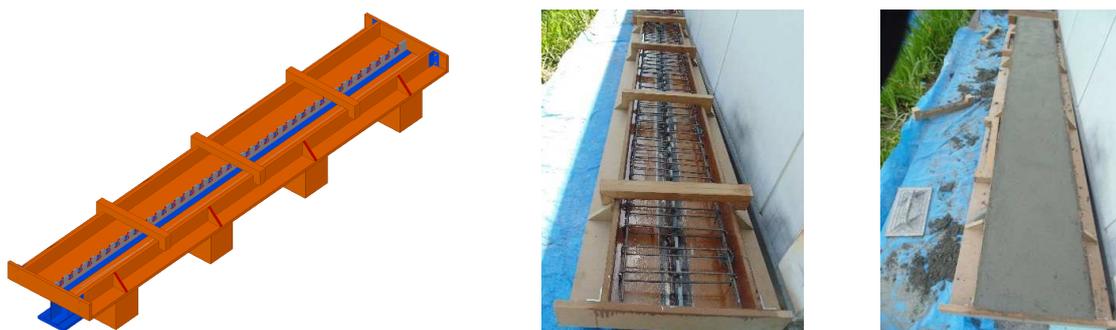


Fig. 2: Processo de fabrico da laje de betão

A armadura foi soldada e disposta sobre a cofragem com recurso a espaçadores para garantir o recobrimento necessário. Após a produção da cofragem e da armadura, segue-se a fase da betonagem. Esta fase requer um processo de vibração cuidadoso e uma retificação da parte superior para que a viga se apresente com a mesma dimensão ao longo da secção transversal.

Na Fig. 3 está representado o pórtico de ensaio (atuador, apoios, distribuidor de carga), a disposição do provete e a instrumentação. Durante a realização dos ensaios monotónicos, a deformação vertical é medida nos dois lados da viga (Fig. 3). O escorregamento e a separação vertical (*uplift*) entre a viga de aço e a laje de betão são medidos nas duas extremidades da viga. Na primeira fase do ensaio aplicou-se um conjunto de ciclos de carga e descarga entre patamares de 5 e 20 kN, a uma taxa de 0.5 kN/s. Na segunda fase foi aplicado um deslocamento progressivo nos pontos de aplicação da carga, com uma taxa 10 $\mu\text{m/s}$.

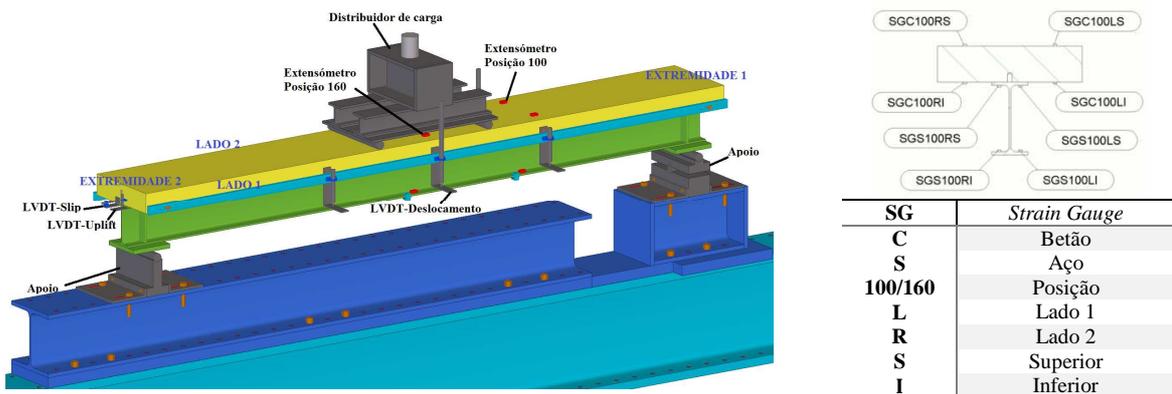


Fig. 3: Pórtico do ensaio e disposição do ensaio

4. Caracterização experimental dos materiais utilizados no fabrico de vigas mistas

Foram realizados ensaios de caracterização em provetes do betão e dos aços da viga, do conector e da armadura, com o objetivo de determinar as suas características mecânicas. No fabrico dos provetes de betão utilizaram-se moldes cilíndricos de geometria normalizada. A análise dos provetes de betão foi feita em simultâneo com os ensaios realizados com a viga mista. A massa volúmica aparente dos provetes de betão apresentou um valor médio de 2386 kg/m^3 , a resistência à compressão, f_{cm} , um valor médio de 38.13 MPa e o módulo de elasticidade, E_{cm} , um valor médio de 31.56 GPa.

As propriedades mecânicas da armadura foram determinadas com base num conjunto de ensaios com varões da classe A500, com 500 mm de comprimento total.

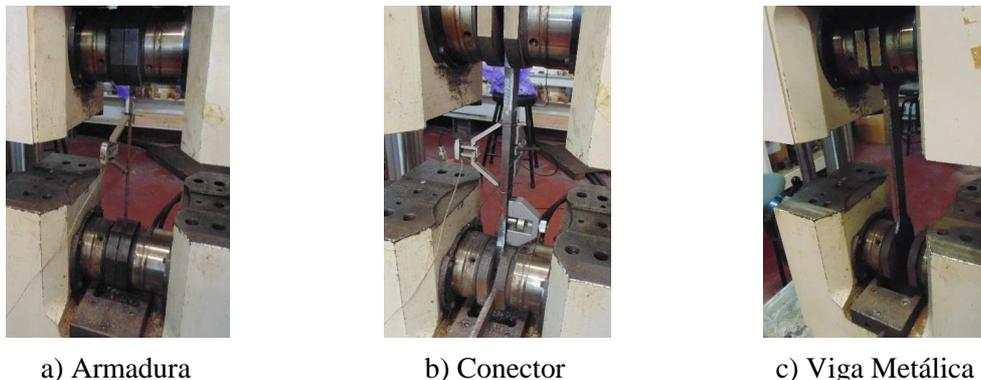


Fig. 4: Ensaios de tração em provetes de aço

As características do aço de classe S235, utilizado no fabrico do conector, foram determinadas através de provetes com configuração normalizada, cortados da mesma chapa utilizada no fabrico dos conectores (espessura de 12 mm). Os provetes de caracterização do aço da viga metálica, com classe de resistência S275, foram recortados a partir da alma da viga IPE 200, com espessura de 5.6 mm. Os ensaios consistem na aplicação de uma carga uniaxial crescente a um provete preso por amarras apropriadas, tal como é representado na Fig. 4. Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos vários provetes de aço.

Tabela 1: Caracterização dos aços utilizados no conector, armadura e viga metálica

		F_{max} (kN)	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_u (%)
Aço utilizado no conector	Média	143.93	409.42	282.41	36
	Desvio padrão (Δ)	0.897	2.74	2.86	2
	Coef. de variação (δ)	0.62%	0.67%	1.02%	6.65
Aço utilizado na armadura	Média	18.25	645.34	551.75	14
	Desvio padrão (Δ)	1.02	36.03	26.75	4
	Coef. de variação (δ)	5.58%	5.58%	4.85%	2.8
Aço utilizado na viga met.	Média	78.54	455.68	326.75	26
	Desvio padrão (Δ)	0.700	6.244	5.814	34
	Coef. de variação (δ)	0.89%	1.37%	1.78%	13.1

5. Apresentação de resultados experimentais e discussão

5.1 Comportamento experimental observado e modos de rotura dos provetes

O início de fendilhação ocorreu para um carregamento de aproximadamente 180 kN. As fendas foram observadas na face inferior da laje, alinhadas com os pontos de aplicação do carregamento e junto ao banzo superior da viga metálica (Fig. 5a). Foi posteriormente identificada uma fenda longitudinal, na face superior do betão, a meio vão e alinhada com a direção do conector, para um carregamento de aproximadamente 235 kN (Fig. 5b). Foi observado um comportamento muito simétrico nas duas metades da viga, ao longo de todo o ensaio. As extremidades da viga permaneceram intatas durante todo o ensaio, não sendo observados qualquer escorregamento ou separação vertical (*uplift*) entre a laje e o perfil.

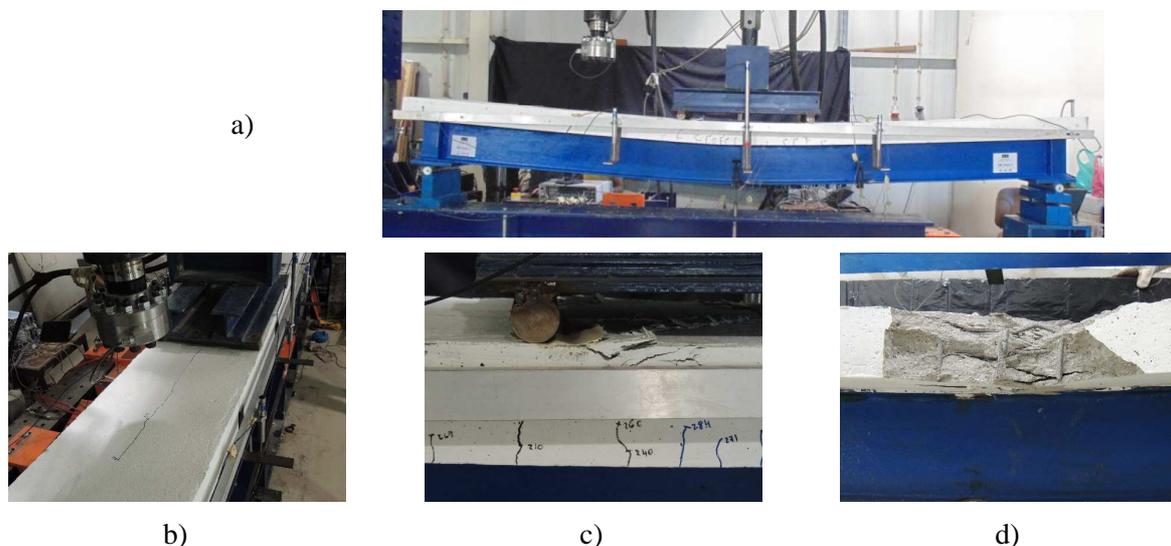


Fig. 5: Comportamento observado durante o ensaio da viga VM_Crest_1

Os apoios utilizados permitiram a rotação da viga em torno ao eixo perpendicular ao plano definido pelo pórtico de ensaio (Fig. 5a). Não houve deslocamentos horizontais da viga sobre os apoios. A rotura ocorreu na secção de aplicação do carregamento, por esmagamento do betão para uma carga de aproximadamente 284 kN (Fig. 5c). Na zona em que ocorre maior concentração do esmagamento do betão, verifica-se também instabilidade local das armaduras por efeito de compressão (Fig. 5d).

5.2 Deformação vertical, escorregamento e separação vertical

Foram analisados os resultados provenientes dos transdutores de deslocamento, de modo a determinar a deformação máxima (a meio vão) e numa posição intermédia e o escorregamento/separação vertical entre a viga metálica e a laje de betão.

Foram observados três instantes “críticos” no decorrer do ensaio monotónico de VM_Crest_1: (a) início de fendilhação na face inferior do betão na secção a meio vão; (b) abertura de uma fenda longitudinal na face superior do betão e alinhada com o posicionamento do conector e (c) a carga máxima atingida pela viga. A viga VM_Crest_1 apresenta um nível de carga máxima de 284.7 kN (ver Fig. 6b) . Na Fig. 6c mostra-se a evolução do escorregamento nas duas extremidades da viga. Verifica-se que os valores de escorregamento medidos são muito reduzidos e similares em ambas as extremidades da viga.

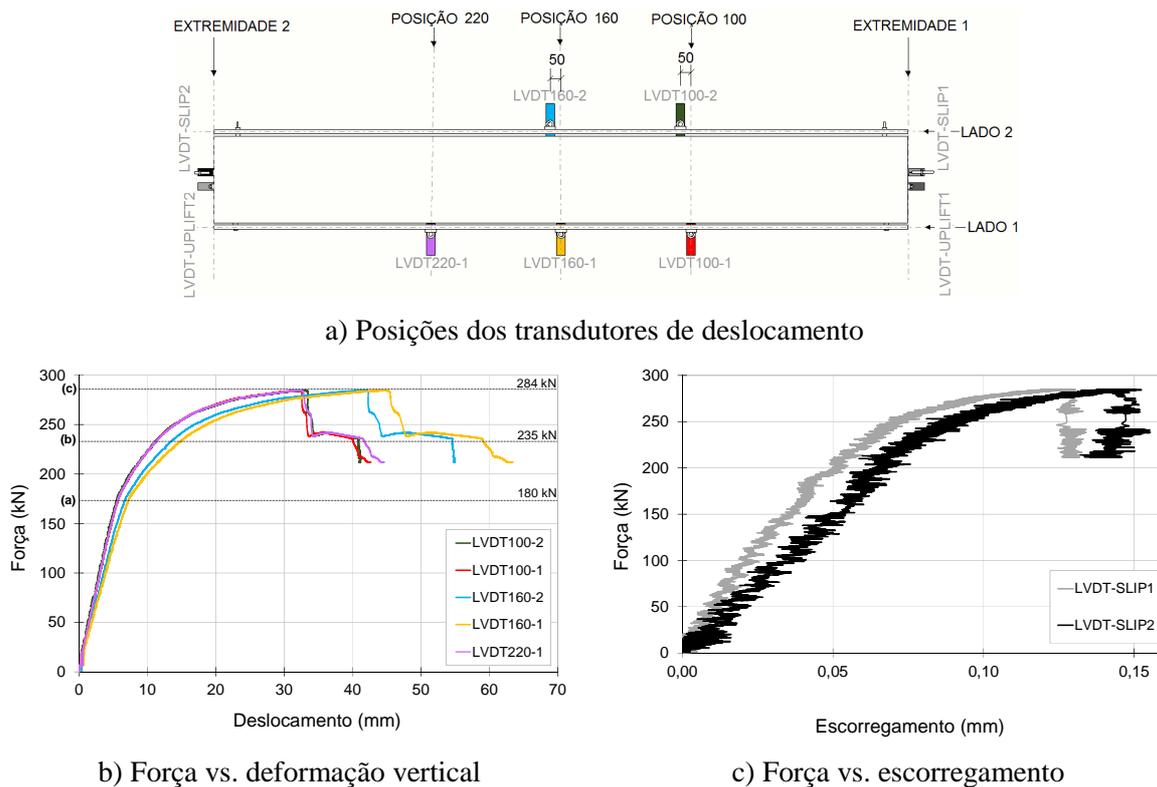


Fig. 6: Posições dos transdutores de deslocamento e curvas que relacionam força aplicada com deformação vertical e com escorregamento

Conclui-se que o comportamento do conector *Crestbond* na viga foi muito simétrico, mobilizando o mesmo nível de esforços rasantes nas duas metades das vigas. Os valores de escorregamento registados foram muito reduzidos, o que mostra que o conector é muito rígido. Verificou-se também que a separação vertical foi praticamente nula em ambos os ensaios. Deste modo, o conector impede eficazmente a separação vertical entre a laje de betão e o perfil metálico e é capaz de garantir interação total entre as secções de aço e de betão.

5.3 Extensões

A Fig. 7a apresenta a relação entre a força aplicada e os correspondentes valores de extensão nos quatro níveis da secção transversal (faces superior e inferior da laje de betão, faces superior e inferior da viga de aço). A extensão em cada nível corresponde ao valor médio calculado com os valores medidos pelos dois extensómetros desse nível.

Para efeitos de comparação, foram considerados os instantes críticos definidos em 5.2 e observou-se que as curvas de força-extensão também mudam de comportamento para os mesmos níveis de carregamento, ou seja, quando se inicia a fendilhação (a), quando ocorre a abertura de uma fenda longitudinal na face superior do betão (b) e quando o provete atinge carga máxima (c).

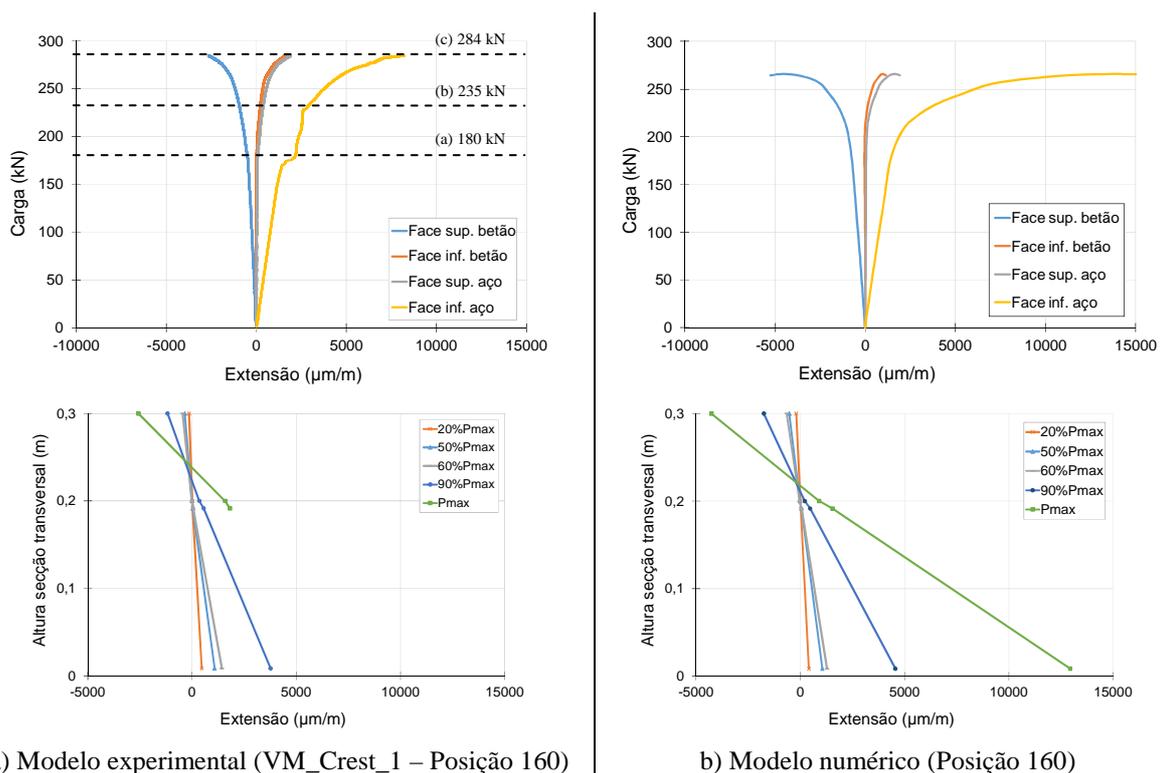


Fig. 7: Curvas que relacionam força e extensão na secção transversal de meio vão

A Fig. 7a ilustra os diagramas de extensão na secção transversal posicionada a meio vão. As curvas mostram que o eixo neutro, tal como foi definido na fase de pré-dimensionamento, se encontra muito próximo da linha de interface entre as secções de aço e de betão, uma vez que os valores de extensão na face superior de aço e na face inferior de betão se mantêm próximos de zero até se iniciar a fendilhação do provete. Da mesma forma, verificam-se compressões na face superior do betão e trações na secção do aço correspondentes à alma e ao banzo inferior. Ao ocorrer a plastificação do provete, o eixo neutro sobe.

Os diagramas de extensão representados ao nível da secção transversal correspondem a patamares de carga relativos a 20% P_{max} (mudança de declive da curva força-deslocamento), 50% P_{max} (fendilhação na face inferior do betão), 60% P_{max} (fenda longitudinal na face superior do betão), 80% P_{max} e P_{max} (esmagamento do betão). Estes patamares permitem efetuar uma comparação direta entre o ensaio experimental e o ensaio numérico. Os diagramas de extensão apresentam-se contínuos e com variação linear ao longo de toda a secção transversal. Salienta-se que não há descontinuidade no diagrama de extensões na interface dos dois materiais, confirmando-se por isso como válida a hipótese de interação total entre a viga metálica e a laje de betão.

6. Modelo numérico

O programa de cálculo escolhido para proceder à modelação foi o *ATENA 3D*, que tem por base o Mét. dos Elementos Finitos. Este *software* permite considerar as não linearidades física e geométrica das estruturas. O modelo numérico foi calibrado tendo em conta os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais e os resultados obtidos no ensaio da viga [2].

6.1 Modelo geométrico

O modelo desenvolvido no *software* ATENA 3D é composto por macroelementos. A cada macroelemento é atribuído um material e respetiva lei constitutiva, de forma a simular o comportamento observado nos ensaios experimentais. A viga mista apresenta uma geometria duplamente simétrica, tendo-se modelado apenas um quarto do provete.

O conector, elemento principal em estudo, exigiu um cuidado especial na definição da sua geometria. Avaliou-se a possibilidade de substituir a forma circular dos dentes do conector por uma equivalente constituída por elementos retos (Fig. 8a).

Na definição da laje de betão, foi necessário criar contornos em volta do conector para permitir o correto encaixe dos elementos. A geometria dos macroelementos que definem o betão incorporado nos dentes do conector é muito semelhante à adotada nos macroelementos que compõem o conector para prevenir problemas de incompatibilidade na malha (Fig. 8b).

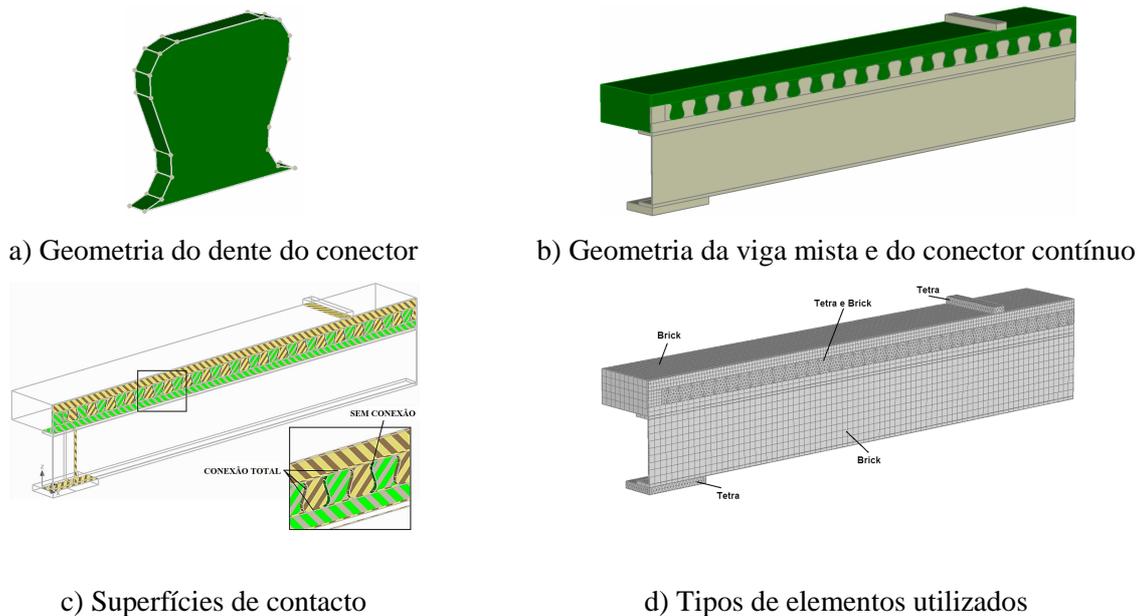


Fig. 8: Geometria do conector *Crestbond* no programa de cálculo ATENA 3D

6.2 Modelos constitutivos dos materiais

A cada macroelemento é atribuído um material, que é definido com base em leis constitutivas que definem o seu comportamento. Os aços utilizados no perfil metálico IPE200 e no conector *Crestbond* CR40 foram definidos com base na lei constitutiva *3D Bilinear Steel von Mises* [6] à qual é associado o critério de rotura de *von Mises*. Os ensaios de caracterização dos provetes retirados da viga metálica e do conector permitiram definir os respetivos módulo de elasticidade (E) e a tensão de cedência (f_y). Também foram definidas chapas metálicas com comportamento elástico (sobre a laje de betão e nos apoios), com o modelo constitutivo *3D Elastic Isotropic* [6]. As características da laje de betão foram definidas através do modelo

constitutivo *3D Nonlinear Cementitious 2* [6]. Os ensaios realizados aos provetes cilíndricos permitiram definir a massa volúmica (ρ) do betão, o módulo de elasticidade (E) e a resistência à compressão (f_c). Tendo em conta o valor da resistência à compressão obtida experimentalmente, determinou-se o valor da resistência à tração (f_{ct}) de acordo com o Eurocódigo 2 [4]. Para modelar a armadura foi adotado o modelo constitutivo denominado *Reinforcement*, que considera um comportamento elástico-perfeitamente plástico.

Para todos os parâmetros que não foram obtidos através de caracterização experimental, foram adotados valores calculados com base na bibliografia apresentada. Assim, foi atribuído um coeficiente de Poisson (μ) de 0.3 para os elementos metálicos e 0.2 para o betão. Para o betão, foi ainda necessário definir a energia de fratura (G_f), a extensão de compressão (ε_c) correspondente a f_c , o fator de redução da resistência à compressão por efeito de fendilhação do modelo de “*compression softening*” e a deformação última em compressão (W_d). A Tabela 2 sintetiza os parâmetros necessários à definição das leis constitutivas acima definidas.

Tabela 2: Valores considerados nos parâmetros de definição das leis constitutivas definidas no software ATENA 3D

Aço	Chapas	Conector	Betão	Armadura
<i>3D Bilinear Steel Von Mises</i>	<i>3D Elastic Isotropic</i>	<i>3D Bilinear Steel Von Mises</i>	<i>3D Nonlinear Cementitious 2</i>	<i>Reinforcement</i>
$E = 200 \text{ GPa}$	$E = 200 \text{ GPa}$	$E = 198 \text{ GPa}$	$E = 31.7 \text{ GPa}$	$E = 188 \text{ GPa}$
$\mu = 0.3$	$\mu = 0.3$	$\mu = 0.3$	$\mu = 0.2$	
$f_y = 327 \text{ MPa}$		$f_y = 283 \text{ MPa}$	$f_t = 2.9 \text{ MPa} ; f_c = 38 \text{ MPa}$	$\sigma_y = 550 \text{ MPa}$
$\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ 1/k}$	$\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ 1/k}$	$\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ 1/k}$	$G_f = 1 \times 10^{-4}$	$\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ 1/k}$

6.3 Definição das superfícies de contacto

Sempre que há contacto entre dois macroelementos, gera-se uma superfície de contacto que pode ser definida de três maneiras diferentes: *no connection*, *perfect connection* e *contact element-GAP*. Nas superfícies de contacto definidas como *contact element-GAP* é possível atribuir os parâmetros para caracterizar a ligação.

Todos os elementos soldados à viga metálica como é o caso das chapas de reforço e do conector, apresentam uma ligação rígida, sendo a sua ligação definida como *perfect connection*. A superfície de contacto definida pela laje de betão e o banzo superior da viga metálica foi definida como *no connection*.

A ligação entre o conector *Crestbond* e a laje de betão é caracterizada de formas distintas em função do comportamento da viga à flexão (Fig. 8c).

Ao considerar a dupla simetria da viga, é necessário restringir os deslocamentos perpendiculares aos planos de simetria. Na chapa metálica colocada sobre o apoio, foi restringido o deslocamento vertical, numa linha situada ao nível do seu eixo.

O carregamento foi efetuado através da aplicação incremental de deslocamentos, num ponto situado na chapa metálica disposta sobre a laje de betão (ver Fig. 8d), tal como ocorreu no ensaio experimental.

6.5 Definição e refinamento da malha de elementos finitos

O programa *ATENA 3D* permite a geração automática da malha de elementos finitos e possibilita o seu refinamento ao nível de cada macroelemento. A malha pode ser definida com três tipos de elementos: hexaédricos (*Brick*), tetraédricos (*Tetra*) e elementos mistos (*Brick e Te-*

tra). A constituição dos macroelementos foi feita de forma estratégica para que fosse definida malha quadrilátera à maioria dos casos. Assim, apenas a secção definida pelo conector e o betão nele inserido foi definida por elementos mistos (*Brick e Tetra*).

As chapas metálicas, por apresentarem características elásticas, foram definidas como elementos do tipo tetraédricos (*Tetra*). Tal como é ilustrado na Fig. 8c, o tamanho da malha considerado no modelo é variável. Assim, para cada modelo testado é atribuído o tamanho de elemento global e refinado a nível de cada macroelemento constituinte.

6.6 Validação do modelo numérico

Tendo concluído o processo de definição da geometria do modelo numérico, é possível efetuar uma comparação com os resultados experimentais referentes ao ensaio monotónico.

À semelhança do que aconteceu nos ensaios experimentais, o início de fendilhação nos modelos numéricos ocorreu para um carregamento de aproximadamente 170 kN, com o aparecimento de fendas na face inferior de betão junto ao banzo superior da viga metálica (Fig. 9a). A progressiva fendilhação que se deu no interior dos dentes do conector, promoveu o aparecimento de uma fenda longitudinal (observada nos ensaios experimentais), para uma carga de aproximadamente 230 kN (Fig. 9b). Quando os modelos registavam a carga máxima, verificava-se uma fendilhação alargada da face inferior da laje de betão, a meio vão (Fig. 9c).

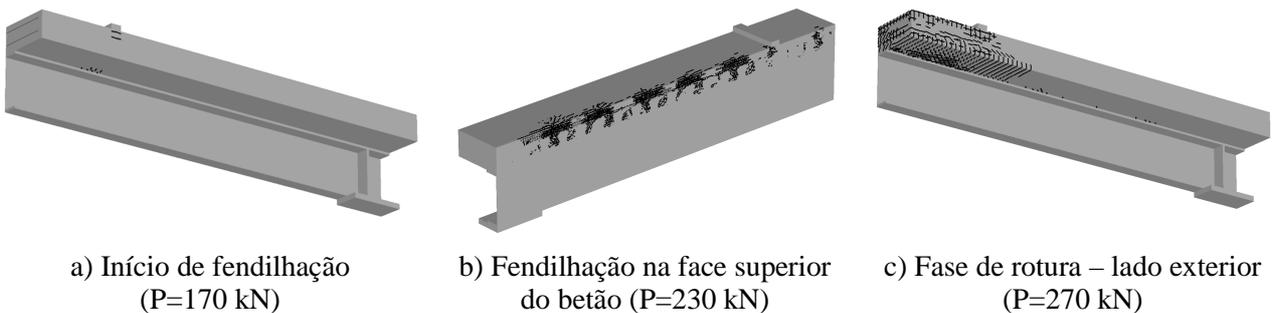


Fig. 9: Evolução da fendilhação no modelo numérico da viga mista

A deformação vertical foi determinada com base em pontos de monitorização. Para efeitos de comparação com os resultados experimentais obtidos, é estabelecida a curva força-deslocamento a meio vão da viga (Fig. 10a) e numa secção intermédia (Fig. 10b).

É notória a proximidade entre os resultados obtidos pelos modelos numéricos e dos ensaios experimentais. Existe uma quase sobreposição de resultados na fase de comportamento elástico da viga mista. A carga máxima obtida com o modelo numérico é inferior à que foi obtida experimentalmente.

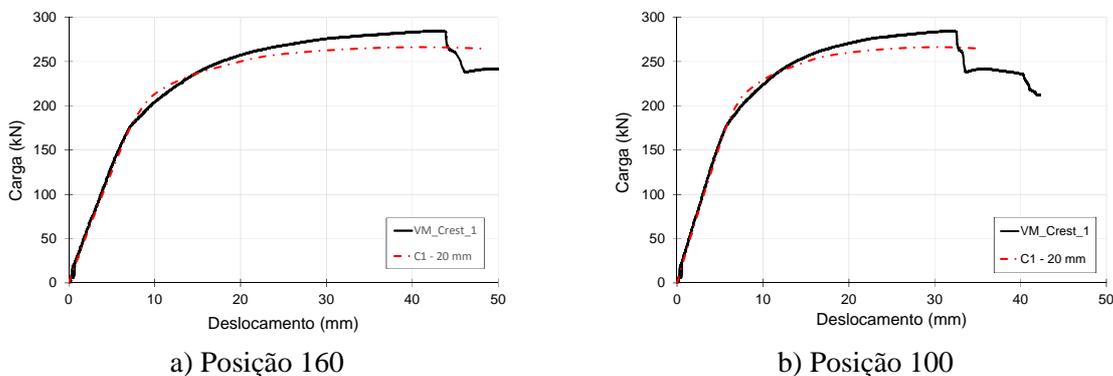


Fig. 10: Curvas força-deslocamento vertical dos provetes VM_Crest_1 e VM_Crest_2 e dos modelos numéricos C1-20 mm e C2-20 mm: a) Posição 160; Posição 100

A Fig. 7b apresenta os diagramas de extensão referentes aos ensaios experimentais e aos modelos numéricos, na secção de meio vão. É possível observar o mesmo andamento das curvas força-extensão nos modelos numéricos e nos ensaios experimentais.

Observa-se também que os valores de extensão nas fibras extremas (face superior do betão e face inferior do perfil metálico) apresentam evolução similar ao longo do carregamento, com exceção da fase final, onde os valores atingidos nos modelo numérico são bastante superiores. O modelo numérico capta a posição de rotura, ao contrário dos modelos experimentais, onde as secções monitorizadas podem não corresponder à secção que condiciona a rotura da viga.

Verifica-se que, nos modelos numéricos, os diagramas de extensão apresentam-se contínuos e com variação linear ao longo da secção transversal. Observa-se o mesmo comportamento relativo às extensões nos ensaios experimentais e numéricos até a um carregamento correspondente a $90\%P_{max}$. A partir desse patamar de carga, a extensão observada nos modelos numéricos é bastante superior à obtida nos ensaios experimentais. Nos ensaios experimentais foi concluído que ocorreu plastificação parcial da secção transversal. Nos modelos numéricos, observou-se também plastificação total da secção, para a carga máxima.

7. Considerações finais

Este trabalho teve por objetivo avaliar a utilização do conector *Crestbond* em vigas mistas, através de um estudo numérico-experimental. Os resultados dos ensaios experimentais foram comparados com os resultados numéricos, em termos de carga aplicada, deformação vertical, escorregamento entre as secções metálica e de betão e extensões na secção transversal, para vários níveis de carregamento, observando-se um comportamento muito semelhante nos modelos experimental e numérico. Também os modos de rotura e a evolução do comportamento ao longo do carregamento foram semelhantes nas duas abordagens. Conclui-se que os modelos numéricos representam adequadamente os modelos experimentais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST-UM), onde os ensaios experimentais foram realizados, e reconhecem a colaboração dos técnicos António Matos e Marco Jorge. Agradecem também à CAPES, Brasil, pela bolsa concedida no Processo BEX 1724/14-2.

Referências

- [1] NP EN 1994-1-1 – “Eurocódigo 4 – Projecto de estruturas mistas aço-betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”. IPQ, Junho 2011.
- [2] Alves, A. R. – “Avaliação do comportamento do conector *Crestbond* em vigas mistas”, *Tese de Mestrado*, Universidade do Minho, Portugal, Dezembro 2014.
- [3] Alves, A.R.; Valente, I.B.; Vieira, W.B.; Veríssimo, G.S. – “Avaliação do comportamento de vigas mistas com conector *Crestbond*”, JPEE2014 - 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, Portugal, Novembro 2014.
- [4] NP EN 1992-1-1 – “Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”. IPQ, Março 2010.
- [5] Veríssimo, G. S. – “Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento”, *Tese de Doutoramento*, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, Agosto 2007.
- [6] Červenka, J. – “ATENA Program Documentation. Part 4-2: Tutorial for Program ATENA 3D”, Červenka Consulting, Prague, Junho 2013.