

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS MISTAS COM CONECTOR CRESTBOND



Ana Rita Alves

Aluna de Mestrado
ISISE, DEC, UMinho
Guimarães, Portugal
a58628@alunos.uminho.pt



Isabel B. Valente*

Profª Auxiliar
ISISE, DEC, UMinho
Guimarães, Portugal
isabelv@civil.uminho.pt



Washington B. Vieira

Aluno de Doutoramento UFV
Viçosa - MG, Brasil
wbatistavieira@civil.uminho.pt
wbatistavieira@yahoo.com.br



Gustavo S. Veríssimo

Prof. Adjunto
DEC, UFV
Viçosa - MG, Brasil
gustavo@ufv.br

SUMÁRIO

Neste trabalho, realiza-se um estudo sobre vigas mistas em aço e betão onde se utilizam conectores do tipo *Crestbond* contínuos. O conector *Crestbond* consiste numa chapa plana lisa cortada em forma de crista com saliências e reentrâncias trapezoidais, pertencendo, por isso, à família dos conectores de chapa contínua. Anteriormente, já foi experimentalmente comprovado que o conector *Crestbond* apresenta elevada capacidade resistente, comportamento dúctil e capacidade para garantir o funcionamento misto pretendido [1]. No presente trabalho apresentam-se resultados de ensaios numéricos e experimentais em vigas mistas de aço e betão, realizados na Universidade do Minho, onde são utilizados conectores *Crestbond*.

Palavras-chave: Vigas mistas, aço, betão, conector *Crestbond*.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de vigas mistas de aço e betão na construção de edifícios é cada vez mais usual. Esta tendência resulta do facto de o funcionamento misto permitir tirar proveito do

melhor desempenho de cada um dos materiais, resultando numa solução estrutural económica. Uma viga mista é constituída por uma laje de betão armado e um perfil metálico que funcionam em conjunto devido à existência de conectores que garantem a ligação entre essas duas secções. Os conectores são elementos metálicos que são soldados ao perfil de aço e posteriormente ficam embebidos na laje, após betonagem e endurecimento do betão. A principal função dos conectores é a de transmitir as forças longitudinais de corte que se geram entre as secções de betão e de aço, quando a viga é submetida a flexão.

Neste trabalho, realiza-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.

O conector *Crestbond* tem características específicas que influenciam o comportamento global da viga mista onde estão inseridos. Até ao presente momento, o seu comportamento foi validado [1] através do ensaio de tipo *push-out*, proposto no Eurocódigo 4 [2], mas considera-se que é também necessário validar o seu comportamento em vigas, tal como se propõe neste trabalho.

O presente trabalho inclui uma componente experimental e uma componente numérica. Apresentam-se os resultados de ensaios numéricos e experimentais em vigas mistas de aço e betão realizadas com conectores *Crestbond* na Universidade do Minho.

2. PRÉ-DIMENSIONAMENTO

2.1 Pressupostos iniciais

A geometria dos provetes não é normalizada, pelo que foi necessário definir um modelo representativo da viga a ensaiar. No presente trabalho, pretendeu-se testar um modelo de viga mista em que a conexão estivesse submetida a um elevado nível de esforço de corte, para que se pudesse observar a influência do conector no comportamento global do elemento estrutural.

Desta forma, o objetivo principal nesta fase de pré-dimensionamento é encontrar uma geometria para o provete que garanta a secção de aço toda tracionada e a secção de betão total ou quase totalmente comprimida. Assim, é garantida máxima eficácia de ambos os materiais constituintes da viga mista e admite-se que durante uma fase considerável do ensaio, a face inferior da laje de betão não está fendilhada.

A geometria final da viga mista a ensaiar foi definida com base nas seguintes características fixas: viga mista em aço e betão simplesmente apoiada, secção transversal composta por um perfil do tipo IPE200 com base na classificação da secção transversal de tipo 1, de acordo com a NPEN1994-1-1 [2] e a posição do eixo neutro para análise plástica; conector *Crestbond* do tipo CR40 centrado e contínuo ao longo do vão, carregamento pontual aplicado no vão em dois pontos simétricos.

As características variáveis a atribuir na fase de pré-dimensionamento, dizem respeito à secção transversal da laje de betão com altura de 9 a 10 cm e largura entre 30 e 50 cm e ao vão da viga com dimensão entre 2,0 m e 3,5 m (em função das limitações do pórtico de ensaio).

Devido ao elevado número de hipóteses possíveis de implementar no provete a ensaiar, achou-se prudente a utilização de um modelo de cálculo que foi desenvolvido no software ATENA 2D, para efetuar o pré-dimensionamento e adquirir uma ideia geral da resposta que este apresenta quando se varia uma das suas dimensões. Esta análise é posteriormente confrontada com o pré-dimensionamento efetuado por via analítica.

Foi considerada uma única configuração de carga para a realização dos ensaios das vigas mistas. Esta corresponde a duas cargas concentradas, em posição simétrica em relação ao meio vão, e distanciadas entre si a um comprimento de $1/5$ do vão. A configuração de carga apresentada resulta nos diagramas de esforços que estão representados na Figura 1.

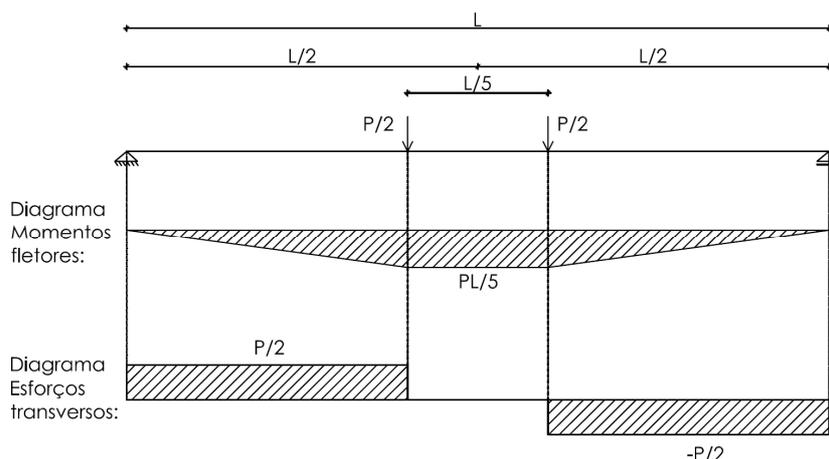


Figura 1. Configuração das cargas a aplicar na viga e respetivos diagramas de esforços.

Optou-se por um perfil metálico em aço S275 e um conector metálico em aço S235. A laje de betão armado foi produzida com um betão de classe de resistência de C25/30 e a respetiva armadura de classe de resistência A500. Posteriormente, foi realizada uma caracterização experimental dos materiais que é apresentada no item 3.2.

2.2 O Conector Crestbond

O conector *Crestbond* consiste numa chapa plana lisa cortada em forma de crista, com saliências e reentrâncias trapezoidais, pertencendo, por isso, à família dos conectores de chapa contínua.

O conector utilizado para realizar o ensaio é um CR40, desenvolvido por Veríssimo [1]. Assim, a geometria do conector foi estabelecida com base em relações geométricas entre diversos elementos do conector, todas elas obtidas em função do diâmetro de um furo circular fictício inscrito no dente trapezoidal (Figura 2). O valor “40” corresponde

precisamente ao diâmetro de um círculo inscrito na abertura trapezoidal. Estas relações dimensionais consideram o espaçamento ideal entre os dentes e a altura do conector. O conector CR40 tem uma altura total de 70 mm, o que o torna adequado à laje de betão utilizada nas vigas mistas, cuja altura total usualmente varia entre 9 e 10 cm.

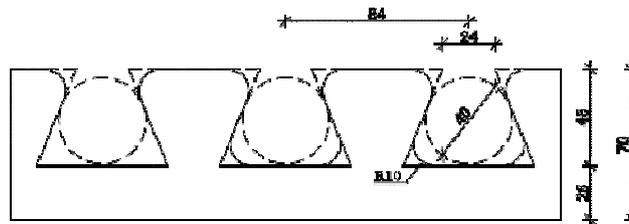


Figura 2. Geometria do conector Crestbond.

O conector foi posicionado simetricamente ao longo de todo o comprimento da viga, alinhado com a alma do perfil metálico.

O conector *Crestbond* foi testado e validado por Veríssimo [1] com base em 41 ensaios *push-out*. Os resultados evidenciaram que a rotura do modelo foi bastante dúctil, observando-se uma elevada capacidade resistente e uma elevada resistência pós-pico, medida para grandes deformações (Figura 3).

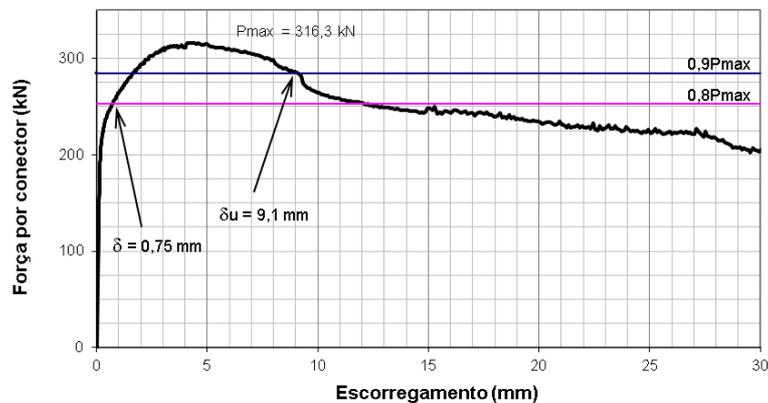


Figura 3. Relação força-deslizamento para o modelo A1 - CR40 [1].

Posteriormente, Silva, M. [3] desenvolveu uma investigação sobre a contribuição das aberturas na resistência global de dois tipos de conectores de chapa contínua perfurada, o *Perfobond* e o *Crestbond*. Tendo como fundamento resultados experimentais obtidos por outros autores, foram estudados modelos semiempíricos com base em parâmetros que determinam o comportamento da conexão.

Silva, H. [4] desenvolveu um modelo numérico capaz de simular o comportamento da ligação entre aço e betão com o conector *Crestbond*, utilizando o Método de Elementos Finitos. O modelo numérico foi validado com base em ensaios experimentais obtidos por Veríssimo (2007).

Recentemente, Dutra [5] desenvolveu um estudo paramétrico do conector *Crestbond* através de modelação numérica, avaliando a sua resistência e o escorregamento relativo entre o perfil metálico e a laje. O estudo paramétrico consistiu na análise de 88 simulações numéricas de ensaios tipo *push-out*, conforme a EN 1994-1-1:2004 [2] e 3 simulações de ensaios com vigas mistas. Os resultados obtidos permitiram a determinar a influência de cada parâmetro no comportamento do conector.

2.3 Modelação numérica

2.3.1 Geometria

No programa de cálculo ATENA 2D, a geometria da viga foi definida com macroelementos no plano, atribuindo a espessura que cada um apresenta. Foi considerada simetria na modelação do provete, modelando-se apenas metade da estrutura.

Na ligação entre a alma e o banzo do perfil metálico, existe um raio de concordância. Como o programa só permite inserir segmentos retos, criou-se um perfil equivalente que tem a mesma área da secção transversal e a mesma inércia em torno do eixo yy .

Colocaram-se chapas metálicas sob o perfil metálico na zona de apoio e sobre a laje de betão na zona de aplicação da carga, de forma a evitar uma concentração de tensões nestas zonas críticas.

2.3.2 Tipo de elementos FEM utilizados e malha

A geração de malha no ATENA 2D é automática, definida com base em tamanhos de elementos que são pré-estabelecidos para cada macroelemento. A malha pode ser refinada em termos locais em torno dos seus eixos geométricos. Para todos os elementos do provete, é definida uma malha quadrilátera de 4 nós e elementos de 10 mm de lado. A Figura 4 apresenta a configuração final da viga mista no programa de cálculo ATENA 2D.

Foram considerados três pontos de monitorização que correspondem ao valor da reacção no ponto do apoio, ao valor da deformação vertical a meio vão na fibra inferior do perfil metálico e ao valor da deformação vertical no ponto de aplicação da carga (ver Figura 4).

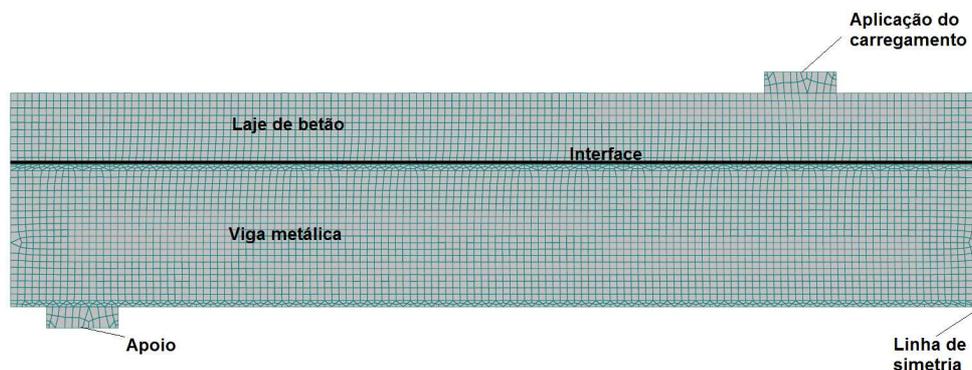


Figura 4. Configuração final da viga mista no programa de cálculo ATENA 2D.

2.3.3 Condições de fronteira e carregamento

É modelada apenas metade da viga, considerando as condições de simetria existentes. No apoio, restringe-se o deslocamento vertical no correspondente ponto médio (Figura 5.a). Na linha que define o eixo de simetria da viga, impõem-se deslocamentos horizontais iguais a zero (Figura 5.b).

A carga a aplicar no provete é dividida em duas equivalentes posicionadas a 1/5 do vão para evitar a concentração de tensões a meio vão e evitar o esmagamento precoce do betão. São impostos deslocamentos verticais sucessivos no ponto central da chapa de aço colocada sobre a laje de betão, no ponto de carregamento (Figura 5.c). Deste modo, o carregamento é efetuado sob controlo de deslocamento e não de carga.

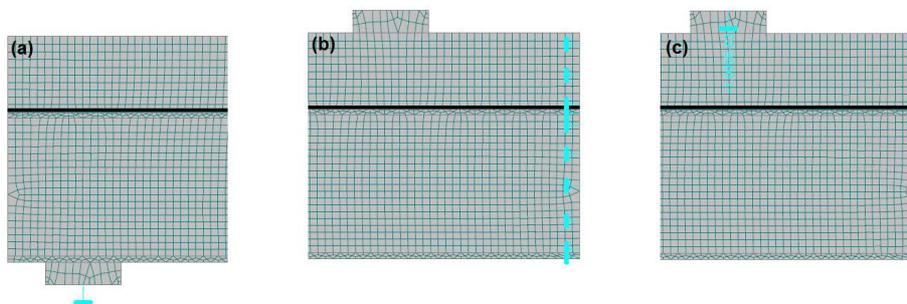


Figura 5. Casos de carga: (a) apoio; (b) condição de simetria; (c) deslocamento.

2.3.4 Leis constitutivas

Para modelar a viga mista no programa de cálculo ATENA 2D, é primeiramente necessário introduzir todos os materiais que constituem o provete a ensaiar.

O perfil metálico é realizado com um aço S275. Assim, com base nas características que este aço apresenta, foram definidos todos os parâmetros de entrada com base na lei constitutiva *3D Bilinear Steel Von Mises* [6], onde se considera um comportamento elastoplástico perfeito, associado ao critério de rotura de Von Mises.

O betão a utilizar é da classe C25/30. As suas características foram definidas tendo em conta a lei construtiva *S Beta Material* [6] que considera o comportamento não-linear do betão tanto à tração como à compressão. Colocaram-se chapas metálicas sob o apoio da viga e sobre a laje de betão para possibilitar uma melhor distribuição da carga. É considerado um material com comportamento elástico e isotrópico, com base na lei *Plane Stress Elastic Isotropic* [6], uma vez que a sua capacidade resistente não é relevante.

Utilizou-se uma lei *interface 2D* [6] para simular a ligação estabelecida pelo conector entre o perfil metálico e a laje de betão, uma vez que a micro-modelação em 2D do conector seria muito trabalhosa e desnecessária neste momento. A lei de comportamento *interface 2D* assimila todas as características mecânicas do conector, possibilitando resultados similares aos obtidos com o conector. O Quadro 1 apresenta as características definidas para todos

os materiais constituintes do provete, no software ATENA 2D. O valor da coesão (c) é definido com base nos resultados experimentais obtidos por Veríssimo [1], considerando a carga máxima obtida transformada numa resistência por unidade de comprimento.

Quadro 1. Valores considerados nos parâmetros de definição das leis construtivas definidas no software ATENA 2D.

Aço	Chapas de aço	Betão	Interface
$E = 210 \text{ GPa}$ $\mu = 0.3$ $f_y = 275 \text{ MPa}$	$E = 210 \text{ GPa}$ $\mu = 0.3$	$E = 31 \text{ GPa}$ $\mu = 0.2$ $f_t = 2.6 \text{ MPa}$ $f_c = 33 \text{ MPa}$ $G_f = 1\text{E-}04$ $\varepsilon_c = 1.682 \times 10^{-3}$ $W_d = -1 \text{ mm}$	$K_{nn} = 2 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$ $K_{tt} = 800 \text{ MN/m}^3$ $f_t = 20 \text{ MPa}$ $c = 5 \text{ MPa}$

2.4 Estudo paramétrico

A geometria do provete foi definida iterativamente, com base na variação que foi imposta às dimensões da secção transversal e ao vão da viga. Os resultados foram obtidos no programa de cálculo ATENA 2D e por via analítica.

Na fase de pré-dimensionamento, os parâmetros que foram tomados como variáveis correspondem às dimensões da secção transversal da laje de betão, uma vez que estas permitem alterar a posição do eixo neutro, e ao vão do provete. O Quadro 2 apresenta as hipóteses consideradas para a geometria da viga durante a fase de pré-dimensionamento.

Quadro 2. Opções consideradas para o pré-dimensionamento da viga mista.

Opções	Vão	Secção transversal de betão (largura x altura)
V2.5-S0.3x0.09	2,5 m	0,30 m x 0,09 m
V2.5-S0.3x0.1	2,5 m	0,30 m x 0,10 m
V2.5-S0.4x0.1	2,5 m	0,40 m x 0,10 m
V3.0-S0.3x0.09	3,0 m	0,30 m x 0,09 m
V3.0-S0.3x0.1	3,0 m	0,30 m x 0,10 m
V3.0-S0.4x0.1	3,0 m	0,40 m x 0,10 m

Com base nos pontos de monitorização definidos no programa de cálculo, apresenta-se um diagrama que relaciona a força aplicada à viga com o respetivo deslocamento a meio vão (Figura 6). Esta curva de força-deformação vertical apresentada evidencia duas fases. Numa primeira fase, o comportamento é elástico e aproximadamente linear e numa segunda

fase o comportamento é elastoplástico. Nesta zona, a mudança de andamento da curva força-deformação vertical mostra que há uma alteração de rigidez na viga. Esta alteração resulta da fendilhação da secção de betão e da plastificação da secção de aço que é possível de confirmar através dos diagramas de tensão apresentados na Figura 7.

É possível verificar que, com o aumento da secção transversal da laje de betão, o provete ganha rigidez numa fase inicial do carregamento e capacidade resistente numa fase posterior, tal como seria de esperar. Para cada vão testado, o comportamento das várias vigas tem uma evolução semelhante e a sua capacidade de deformação total é próxima. No entanto, quando se comparam os resultados obtidos para os dois vãos testados (2,5 m e 3,0 m), nota-se um patamar de deformação sob carga aplicada aproximadamente constante que é maior nas vigas de 3,0 m de vão. Verifica-se também que o comportamento observado nos vários exemplos testados é semelhante, mas nas vigas com 2,5 m de vão, o nível de esforço rasante na interface aço-betão resistido pelo conector permite concluir que o modo de rotura da viga é muito condicionado pela conexão.

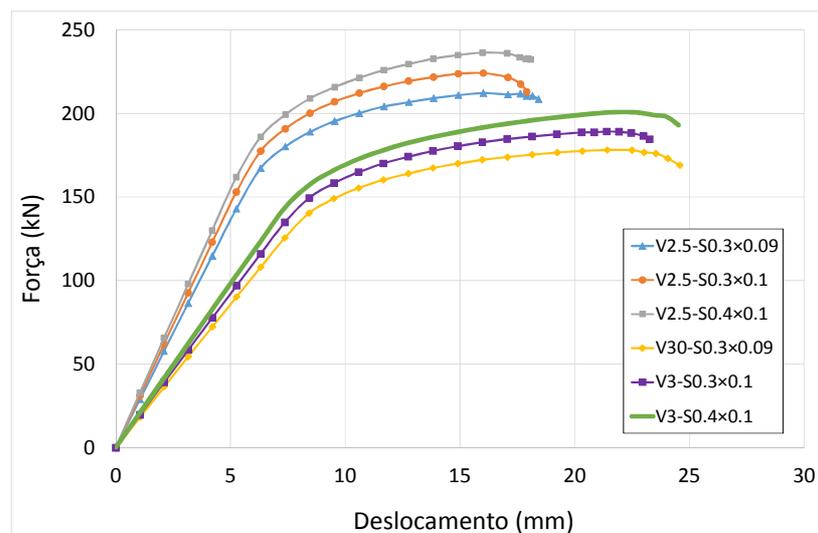


Figura 6. Relação entre a força total aplicada na viga e o deslocamento vertical medido a meio vão, para cada uma das geometrias analisadas.

Foi analisado o valor das tensões principais na laje de betão e no perfil metálico ao longo dos vários níveis de carregamento aplicados, até se dar a rotura da viga mista. Na Figura 7 são apresentados diagramas de tensões principais e tensões na interface correspondentes a dois níveis de carregamento: (a) início da fendilhação na laje e (b) carga máxima, para a viga V3.0-S0.4x0.1. A viga V3.0-S0.4x0.1 foi a solução escolhida para posterior ensaio.

Os diagramas de tensão apresentados na Figura 7 mostram que: 1) o início da fendilhação da laje ocorre para um nível de carga baixo; 2) quando é atingida a carga máxima, o perfil metálico está praticamente todo plastificado com exceção de uma pequena parte do banzo superior, 3) o nível de esforço rasante na interface é máximo desde o apoio até ao ponto de aplicação da carga.

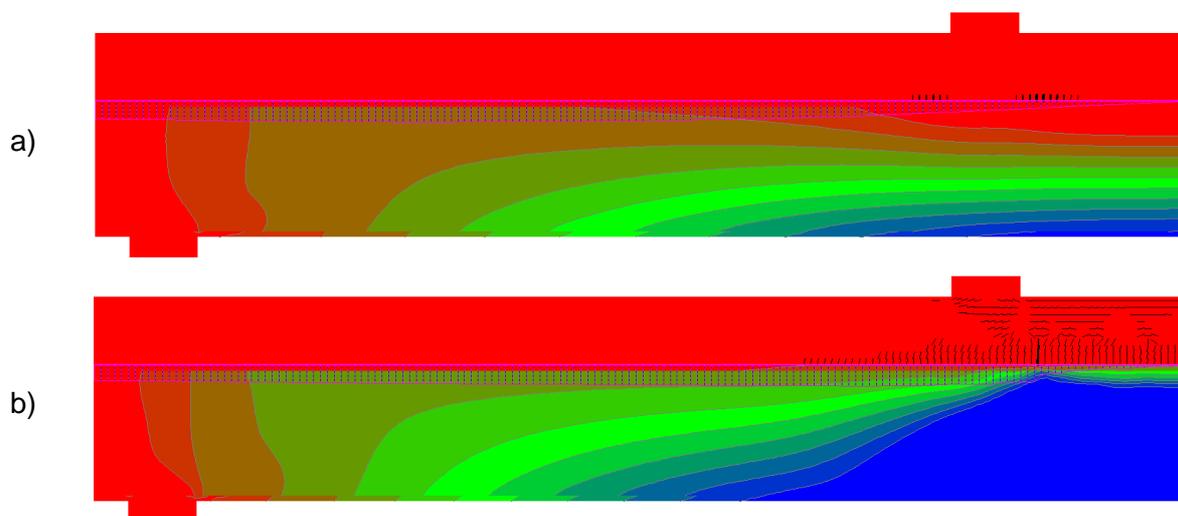


Figura 7. Distribuição de tensões na viga V3.0-S0.4x0.1: a) Início da fendilhação na laje ($P = 62,4$ kN); b) Carga máxima ($P = 200,8$ kN).

No Quadro 3 são apresentados valores máximos de tensão principal na laje e no perfil e de tensão rasante na interface dos dois materiais, para cada nível de carregamento apresentado nas figuras: a) início da fendilhação na laje de betão ($P = 62,4$ kN), b) carga máxima aplicada ($P = 200,8$ kN).

Quadro 3. Tensões principais na viga e na interface para dois níveis de carregamento.

Opções	Carga máxima (kN)	Níveis de carregamento	Tensão principal máxima de compressão na laje (MPa)	Tensão principal máxima de tração no perfil metálico (MPa)	Tensão rasante máxima na interface (MPa)
V2.5-S0.3x0.09	212,2	(a)	-11,6	148,7	-1,36
		(b)	-32,2	276,9	-4,06
V2.5-S0.3x0.1	224,2	(a)	-8,3	101,2	-0,96
		(b)	-33,0	277,0	-4,17
V2.5-S0.4x0.1	236,4	(a)	-7,7	103,3	-1,02
		(b)	-33,3	277,1	-4,55
V3.0-S0.3x0.09	178,2	(a)	-14,1	189,0	-1,52
		(b)	-33,3	275,6	-3,52
V3.0-S0.3x0.1	189,2	(a)	-11,9	155,0	-1,30
		(b)	-32,9	275,6	-3,78
V3.0-S0.4x0.1	200,8	(a)	-8,4	119,4	-1,04
		(b)	-32,4	273,4	-4,33

Os valores apresentados no Quadro 3 e na Figura 7 mostram quando se inicia a fendilhação, o perfil metálico ainda não apresenta plastificação em nenhuma zona e o nível de tensão rasante é inferior ao máximo. Quando se atinge a carga máxima, o perfil está praticamente todo plastificado e existem zonas da laje de betão submetidas a uma tensão de compressão elevada, que provoca o correspondente esmagamento. Nesse momento, o valor da tensão rasante máxima é inferior ao valor da respetiva capacidade resistente.

3. ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 Descrição dos modelos testados

Considerando os resultados obtidos no ponto 2., decidiu-se que o provete a testar consiste 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 $0,40 \times 0,10 \text{ m}^2$. O provete apresenta um vão de 3,0 m e um comprimento total de 3,2 m.

3.2 Propriedades dos materiais utilizados

Foram realizados ensaios de caracterização do betão em simultâneo com os ensaios realizados às vigas mistas. Deste modo, foram feitos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 29 e aos 36 dias de cura, uma vez que os ensaios das vigas mistas decorreram entre os 28 e 41 dias de idade dos provetes. O Quadro 4 apresenta os correspondentes resultados.

Quadro 4. Caracterização do betão.

Nº de provetes ensaiados	Massa volúmica aparente média (kg/m ³)	Idade do betão	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (MPa)
3	2386	29	38,13	31,56
3		36	39,15	31,08

No Quadro 5 estão apresentados os valores médios obtidos em ensaios de tração realizados em quatro provetes de material utilizado no conector, na viga metálica e três provetes de material usado na armadura, para os quais foram determinados a força máxima (F_{max}), a tensão última (σ_u), a tensão de cedência (σ_y) e a extensão última (ϵ_u). Os resultados de cada parâmetro são validados através dos valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Quadro 5. Caracterização da armadura e do aço utilizado no conector.

		F_{max} (kN)	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_u
Aço utilizado no conector	Média	143,93	409,42	282,41	0,36
	Desvio padrão (Δ)	0,897	2,744	2,867	0,024
	Coef. de variação (δ)	0,62%	0,67%	1,02%	6,65%
Aço utilizado na armadura	Média	18,25	645,34	551,75	0,14
	Desvio padrão (Δ)	1,019	36,032	26,748	0,004
	Coef. de variação (δ)	5,58%	5,58%	4,85%	2,80%
Aço utilizado na viga metálica	Média	78,54	455,68	325,75	0,26
	Desvio padrão (Δ)	0,700	6,244	5,814	0,034
	Coef. de variação (δ)	0,89%	1,37%	1,78%	13,01%

3.3 Fabrico

A viga metálica foi fabricada com um perfil IPE200, ao qual foram soldadas chapas planas na zona de apoio para evitar problemas de instabilidade local. O conector foi soldado ao perfil IPE200 e as partes que não iam ser embebidas no betão foram pintadas (Figura 8).

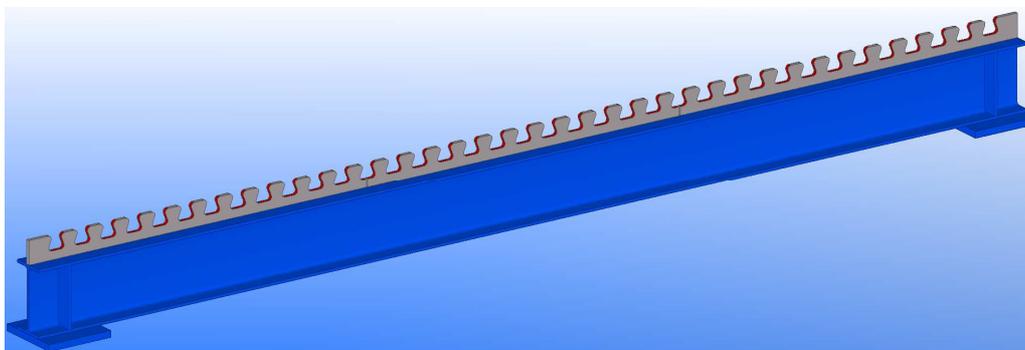


Figura 8. Fabrico da viga metálica e do conector.

Para executar a laje de betão, foi concebida e fabricada uma cofragem, garantindo uma adequada betonagem da laje por cima da viga metálica, embebendo o conector.

Foi definida a armadura necessária a introduzir no provete, de acordo com a NP EN 1992-1-1 [7], de modo a que a armadura transversal estivesse distribuída ao longo de toda a viga. Colocou-se um varão com 6 mm de diâmetro em cada intervalo entre dentes do conector (Figura 9). Esta armadura também contribui para a capacidade resistente da conexão. Durante a fase de betonagem do provete foi necessário ter bastante cuidado com o processo de vibração e retificação da parte superior da laje para que esta apresentasse as dimensões projetadas ao longo do seu comprimento. A Figura 9 apresenta a sequência de montagem da cofragem, colocação da armadura e betonagem da laje.



Figura 9. Processo de montagem da cofragem, da armadura e betonagem da laje.

3.4 Montagem e instrumentação dos ensaios

Num primeiro momento, foi feito o levantamento das medidas do pórtico e do espaço disponível para o ensaio, de modo a garantir o correto posicionamento da viga mista a ensaiar e a existência de todo o equipamento necessário à realização do ensaio.

Durante a realização dos ensaios monotónicos das vigas mistas, a deformação vertical é medida nos dois lados da viga. No lado 1 da viga são colocados três transdutores a medir o deslocamento na laje de betão e no outro (lado 2) são colocados dois transdutores a medir a deformação vertical da viga metálica. O escorregamento e a separação vertical (*uplift*) entre a viga de aço e a laje de betão são medidos nas extremidades da viga (Figura 10).

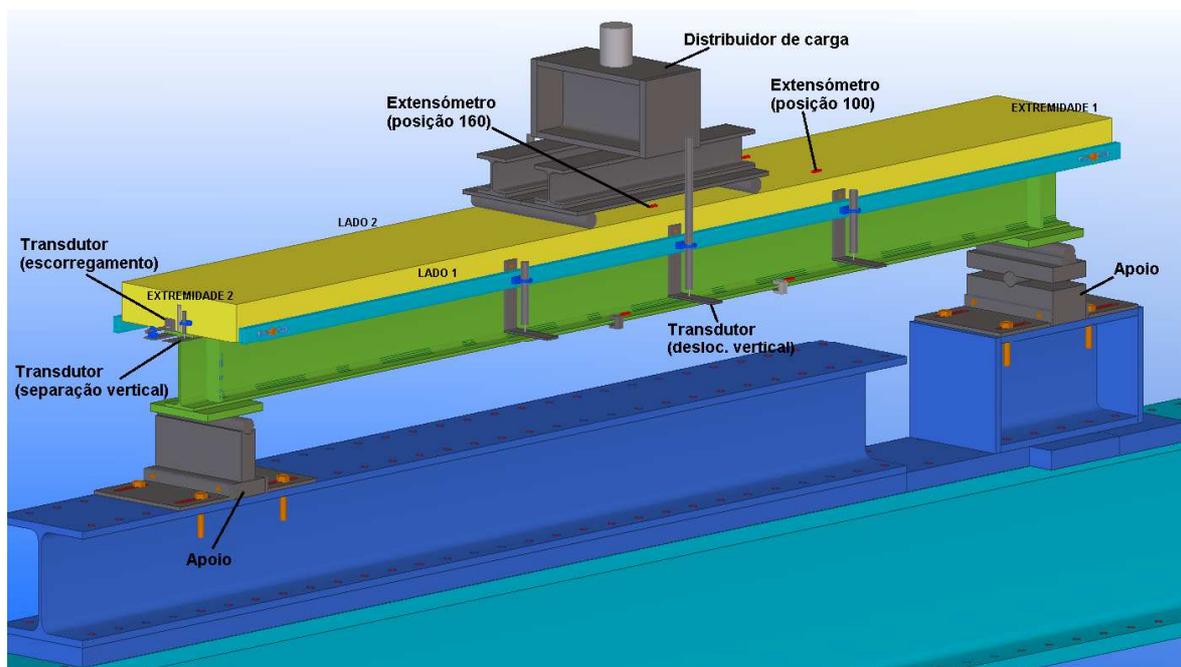


Figura 10. Aspecto da montagem adotada no ensaio.

São também colocados extensómetros em duas secções transversais da viga: a meio vão (posição 160) e numa secção intermédia, posicionada a 100 cm da extremidade. Na secção transversal, os extensómetros são colados nas faces superior e inferior da laje de betão e nas faces internas dos banzos da viga de aço. São sempre posicionados dois extensómetros em cada nível, a fim de considerar o correspondente valor médio. Assim, é garantida a medição numa fibra caso um extensómetro se apresente danificado (Figura 11).

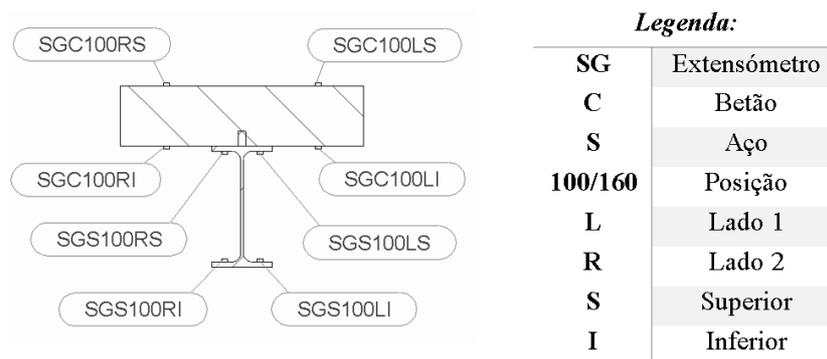


Figura 11. Disposição dos extensómetros na secção transversal da viga.

Durante o ensaio, são medidos os seguintes parâmetros: carga aplicada; extensões em fibras extremas das secções de aço e de betão da viga; deformação vertical ao longo da viga; escorregamento longitudinal e separação vertical entre o perfil de aço e a laje de betão.

Foram fabricadas duas vigas mistas iguais para avaliar o seu comportamento com o conector *Crestbond*, com base em carregamento monotónico e carregamento cíclico. Até ao momento, apenas foi realizado o ensaio com carregamento monotónico do qual são apresentados resultados.

O ensaio monotónico é configurado com base em duas etapas. A primeira delas consiste em ativar as várias componentes do provete aplicando um conjunto de 25 ciclos em que a carga varia entre 5 e 20 kN, com uma taxa de 0,5 kN/s. A segunda etapa consiste em aplicar uma deformação progressivamente crescente, com uma taxa 10 $\mu\text{m/s}$, nos pontos de aplicação da carga até ser atingida a rotura do provete.

3.5 Resultados

No ensaio da viga VM_Crest_1, observou-se que a rotura ocorreu na secção de meio vão em posição próxima do distribuidor de carga, decorrente do esmagamento do betão.

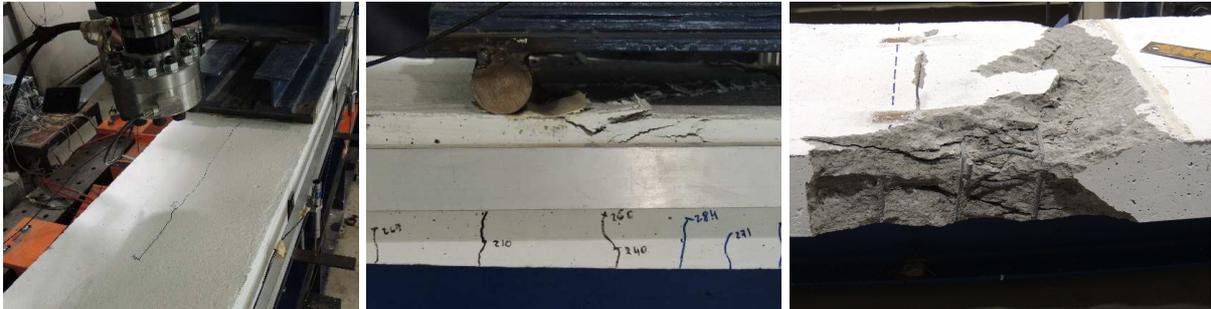


Figura 12. Modo de rotura do ensaio VM_Crest_1.

Na Figura 13.a estão apresentados os resultados referentes à curva força - deslocamento. Durante o decorrer do ensaio, foram observados três pontos críticos: início de fendilhação na parte inferior do betão na secção a meio vão (1), abertura de uma fenda na secção superior do betão situada a meio vão na zona do conector (2) e a carga máxima atingida pela viga (3).

Na Figura 13.b mostra-se que a evolução do escorregamento nas duas extremidades da viga é muito similar, concluindo-se que o conector *Crestbond* permitiu um comportamento simétrico da viga. Os valores de escorregamento registados são muito reduzidos, o que indica que o conector apresenta elevada rigidez, sendo capaz de garantir uma interação quase total entre as secções de aço e de betão.

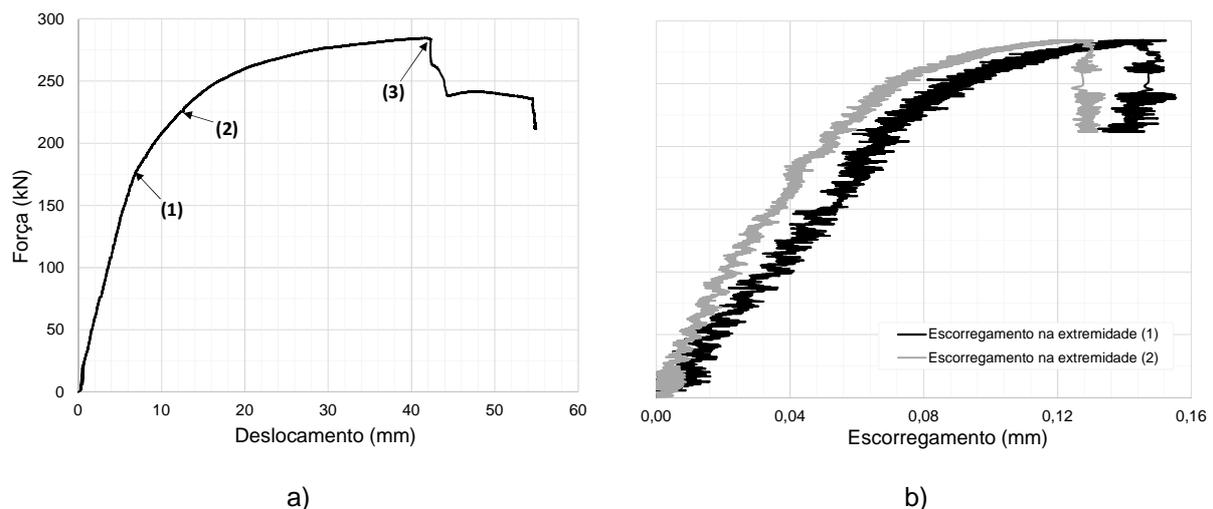


Figura 13. Curvas a) força-deslocamento e b) força-escorregamento, relativas aos ensaios monotónicos.

A Figura 14 ilustra os diagramas de extensão na secção transversal posicionada a meio vão da viga. Os diagramas de extensão representados correspondem aos patamares de carga relativos a $0,2P_{max}$ (mudança de declive da curva força-deslocamento), $0,5P_{max}$ (fendilhação na parte inferior do betão), $0,6P_{max}$ (fenda longitudinal na parte superior do betão) e $0,9P_{max}$ a P_{max} (esmagamento do betão).

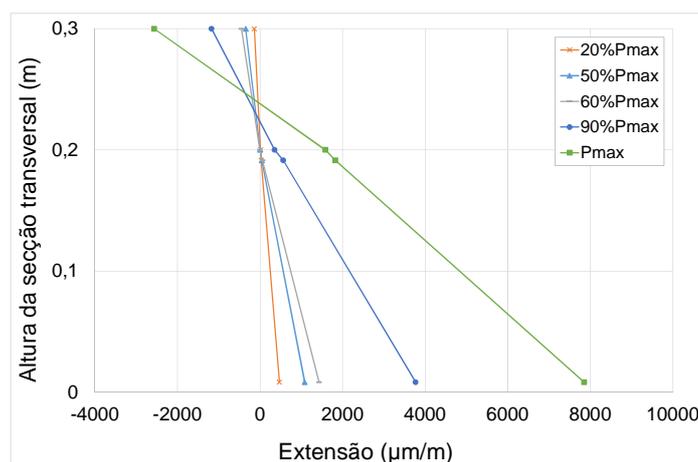


Figura 14. Diagramas de extensão na secção transversal da viga.

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.

A secção de rotura está localizada junto de um dos pontos de aplicação da carga, tal como é visível na Figura 12. A secção de meio vão, onde foram medidas extensões ao longo do ensaio, apesar de estar submetida a momento fletor máximo, não corresponde à secção que condicionou a rotura. Apesar disso, observa-se que a extensão máxima de compressão na secção de betão é igual a $2563,39 \mu\text{m/m}$, valor próximo da extensão limite de $3500 \mu\text{m/m}$ e a extensão máxima de tração na secção metálica é igual a $7258,6 \mu\text{m/m}$, mostrando que existe plastificação na seção metálica. Também para P_{max} , observa-se que o valor da extensão, ao longo de toda a secção metálica é superior ao valor nominal da extensão de cedência que corresponde a cerca de $1310 \mu\text{m/m}$, mostrando que toda a secção metálica está plastificada.

4. CONCLUSÕES

O pré-dimensionamento efetuado com base em modelos numéricos permitiu definir adequadamente a geometria da seção transversal e do vão da viga mista a estudar. Pretendia-se que a conexão ficasse submetida a um elevado esforço de corte para avaliar o desempenho do conector no elemento misto, mantendo-se o modo de rotura global da viga, por flexão.

Durante a realização dos ensaios, foi evidente a capacidade de redistribuição dos esforços ao longo do conector assim como o bom desempenho que este apresenta. O conector registou um comportamento simétrico ao longo das duas metades da viga, garantindo uma conexão total entre as duas secções. Para além disto, o conector apresentou um comportamento bastante rígido, tendo-se medido valores reduzidos de escorregamento entre a laje de betão e o perfil metálico. Tendo em conta o resultado referido e evolução dos diagramas de extensão ao longo do carregamento, considera-se a conexão foi capaz de proporcionar uma interação total na viga.

Conclui-se que o conector tem um desempenho adequado quando aplicado em vigas mistas de aço e betão com laje maciça, proporcionando o desenvolvimento da capacidade resistente total da secção transversal.

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 o contributo científico e a colaboração dos técnicos António Matos e Marco Jorge.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Silva, M. A. P. – “*Modelos semiempíricos para estimativa da capacidade resistente de conectores de cisalhamento crestbond e perfobond*”, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Brasil, Maio 2011.
- [4] Silva, H. P. – “*Simulação numérica do comportamento da ligação aço-concreto com conectores crestbond*”, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Brasil, Janeiro 2013.
- [5] Dutra, C. M. – “*Estudo do comportamento estrutural do conector Crestbond considerando variações geométricas e mecânicas*”, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Brasil, Outubro 2014.
- [6] Červenka, J. – “*ATENA Program Documentation. Part 4-1: Tutorial for Program ATENA 2D*”, Červenka Consulting, Prague, Junho 2013.
- [7] NP EN 1992-1-1 – “*Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*”. IPQ, Março 2010.