

ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS MISTAS AÇO-BETÃO LEVE



ISABEL VALENTE
Assistente
Universidade do Minho
Guimarães
isabelv@civil.uminho.pt



PAULO J. S. CRUZ
Prof. Associado
Universidade do Minho
Guimarães
pcruz@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

A presente comunicação descreve os ensaios experimentais de vigas mistas de aço-betão leve simplesmente apoiadas, com 4.5 m de vão. A configuração geométrica e as condições de apoio são idênticas para todas as vigas, variando a distribuição de elementos de conexão entre o perfil metálico e a laje de betão. As vigas são sujeitas a um carregamento em seis pontos.

1. INTRODUÇÃO

O elemento estrutural misto requer o funcionamento conjunto dos materiais aço e betão, sendo a ligação entre os dois assegurada por conectores metálicos. A investigação recente mostrou que a utilização do perno como elemento de conexão é adequada quando se utilizam betões de elevada resistência. O mesmo acontece no caso de betões leves de elevada resistência, tendo-se verificado o seu bom comportamento em ensaios de tipo “Push-Out” realizados no Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST-UM), [1].

Nesta comunicação descrevem-se os ensaios experimentais de vigas mistas de aço-betão leve simplesmente apoiadas, com 4.5 m de vão. A secção transversal, o vão e as condições de apoio são idênticos para todas as vigas, variando a distribuição de elementos de conexão entre o perfil metálico e a laje de betão. A conexão é materializada com conectores de tipo perno. O objectivo dos ensaios realizados é descrever o comportamento de vigas mistas, com especial ênfase na conexão aço-betão. Procura-se ainda analisar a contribuição dos diferentes elementos que compõem a viga em termos de capacidade de carga e deformação.

O principal parâmetro em estudo é a distribuição dos elementos de conexão entre laje de betão e perfil metálico. A distribuição de conectores é de três tipos: uma que garante uma conexão total, outra que permite uma conexão parcial e uma última que assegura uma conexão total, mas agrupando os conectores em pares, na direcção longitudinal da viga. Os carregamentos são aplicados em seis pontos com igual espaçamento longitudinal ao longo da viga e conduzem os provetes à rotura, sendo identificados diferentes tipos de colapso. Todos os ensaios são realizados com controlo da deformação da viga a meio vão e medição dos valores de carga, deformação vertical ao longo da viga, deslizamento relativo e separação vertical entre laje de betão e perfil metálico. São ainda colocados extensómetros em secções transversais representativas, permitindo determinar variações de extensão nessas posições.

2. VIGAS EM ESTUDO

A viga mista é constituída por um perfil metálico IPE 120 e uma laje de betão leve com dimensões de $350 \times 60 \text{ mm}^2$ (Figura 1). As propriedades dos materiais utilizados no fabrico da viga são experimentalmente caracterizadas. Os valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade do betão leve e o valor das tensões de cedência e rotura à tracção do aço são determinados experimentalmente. A conexão é realizada com conectores de tipo perno, de diâmetro igual a 13 mm e 50 mm de altura e espaçamento uniforme entre si. Na tentativa de obter um comportamento mais dúctil da conexão, [2] e [3], optou-se por utilizar também associações de 2 conectores.

Tabela 1 – Distribuição dos elementos de conexão

Viga	Conexão	Distribuição
VM4	Total	8 $\phi 13$, em $\frac{1}{2}$ da viga
VM5	Total	8 $\phi 13$ (agrupados 2 a 2), em $\frac{1}{2}$ da viga
VM6	Parcial	4 $\phi 13$, em $\frac{1}{2}$ da viga

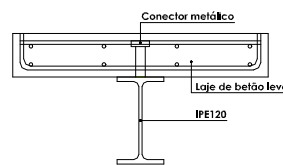


Figura 1 – Secção transversal e cofragem

O carregamento corresponde a um conjunto de quatro cargas pontuais, afastadas entre si de 900mm, com a disposição representada na Figura 2, que procura traduzir um carregamento distribuído ao longo da viga. Na mesma figura apresentam-se os correspondentes diagramas de esforços.

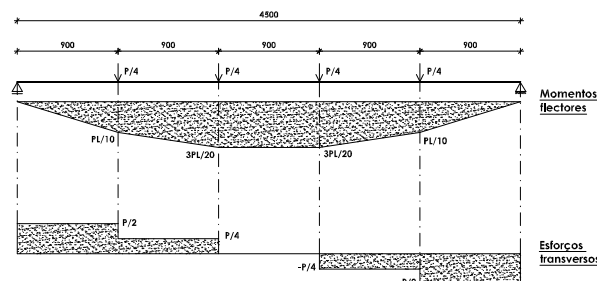


Figura 2 – Carregamento e correspondentes esforços

3. MONTAGEM DE ENSAIO

O carregamento pretendido foi materializado desmultiplicando em vários pontos a carga aplicada pelo actuador. A configuração do carregamento está esquematizada na Figura 3. Na mesma figura apresenta-se o aspecto final da montagem experimental das vigas.

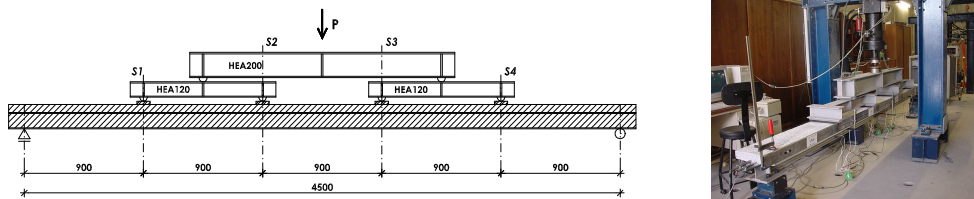


Figura 3 – Montagem de ensaio

De forma a melhor localizar as secções de rotura das vigas, definem-se as secções de referência S1 a S4 na Figura 3. As secções A-A', B-B' e C-C' da Figura 4 correspondem às secções instrumentadas com extensometria. Na Figura 4 representam-se ainda os transdutores de deslocamento colocados em 3 pontos da direcção longitudinal da viga (V1 a V3) e os transdutores de deslocamento que mediram o deslizamento horizontal entre a laje de betão leve e o perfil metálico (H1 e H2).

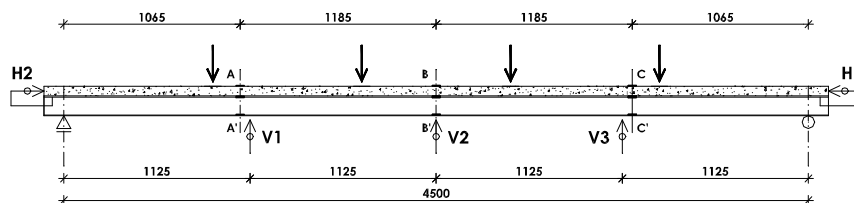


Figura 4 – Monitorização e controlo do ensaio

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1 Modos de rotura

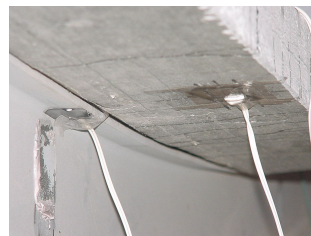
A viga VM4 tem uma rotura por flexão. O betão esmaga junto à zona de aplicação da carga na posição S3. Também na posição S2 se inicia nesta altura o esmagamento do betão na face superior da laje. Para além do esmagamento do betão na face superior, a rotura acontece com formação de uma fenda longitudinal a meia altura da laje de betão leve, prolongando-se em direcção ao meio vão da viga (Figura 5). Também a rotura da viga VM5 se dá por flexão. O betão esmaga junto à zona de aplicação da carga na posição S2. Na posição S3 inicia-se nesta altura o esmagamento do betão na face superior da laje. É uma rotura semelhante à ocorrida em VM4. A viga VM6 tem uma rotura por corte na ligação entre a laje de betão e o perfil metálico. A rotura dos conectores é faseada, com perdas de carga associadas à rotura de cada conector. Deste modo, há um descolamento entre a laje e o perfil nas zonas de rotura dos conectores. A rotura dos conectores deu-se essencialmente de um dos lados da viga (Figura 6).



Figura 5 – Rotura de VM4



Figura 6 – rotura de VM6



Em todas as vigas testadas, verificam-se fendas de tracção na face inferior da laje, na proximidade das secções de rotura. Essa fendilhação é distribuída, com espaçamento uniforme entre fendas (Figura 7). Verifica-se também o deslizamento horizontal na interface entre a laje de betão e o perfil metálico (Figura 8).

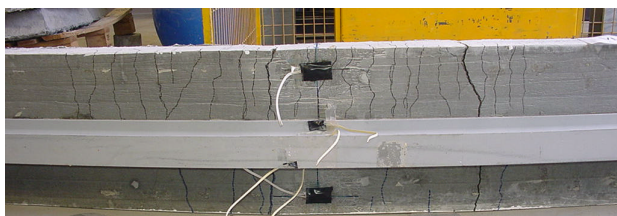


Figura 7 – Fendas distribuídas



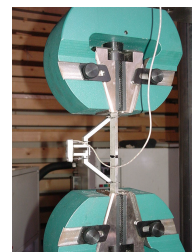
Figura 8 – Deslizamento horizontal

4.2 Capacidade de carga e deformabilidade

Previamente à realização dos ensaios, são previstas as cargas de rotura, calculadas a partir dos esforços considerados nos diagramas da Figura 2. Na Tabela 2 apresentam-se os valores médios das características mecânicas dos materiais utilizados na fabricação das vigas. Para o betão leve foram caracterizados a resistência à compressão, [4], e o módulo de elasticidade, [5], a partir de três provetes betonados ao mesmo tempo que as vigas, dos quais se calcula o valor médio (Tabela 2). Para o aço foi realizado o ensaio de tracção para caracterização da tensão de cedência e tensão de rotura, [6], a partir de provetes cortados da alma do perfil metálico. Cada valor apresentado resulta da média de 3 ensaios realizados.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais

Ref. Material	Viga	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (GPa)	f_{ym} (MPa)	f_{um} (MPa)
BL32	VM5	64.40	25.00		
BL33	VM4	55.60	22.08	-	-
BL34	VM6	54.72	23.82		
Aço perfil	todas	-	-	335.7	491.1



De acordo com o EC4, [7], considera-se uma rotura por flexão para as vigas com conexão total e admite-se o comportamento plástico da secção transversal, já que se trata de uma secção de classe 1. No caso das vigas com conexão parcial, prevê-se uma rotura pela conexão, pelo que o momento flector máximo previsto é inferior ao momento flector plástico. Na Tabela 3 apresentam-se os valores previstos para o momento flector positivo resistente ($M_{pl,R}^+$). Na Tabela 4 apresentam-se os esforços aplicados e correspondente deformação obtidos experimentalmente.

Tabela 3 – Cargas de rotura previstas

Ref. Betão	Viga	F_{cf} (kN)	F_{af} (kN)	Localização do eixo neutro	x (m)	$M_{pl,R}^+$ (kN.m)
BL32	VM5	1149.54		laje de betão	0.0231	48.08
BL33	VM4	992.46	443.46	laje de betão	0.0268	47.27
BL34	VM6	976.75		laje de betão	-	31.93

sendo,

F_{cf} – força de compressão máxima mobilizável na laje de betão ($F_{cf} = 0.85 \times f_{cm} \times A_c$)

F_{af} – força de tracção máxima mobilizável no perfil metálico ($F_{af} = f_{ym} \times A_a$)

Tabela 4 – Carga de rotura e deformação vertical medidas experimentalmente

Ref. Betão	Viga	Data de ensaio	Tipo de rotura	$M_{máx}$ (kNm)	d ($M_{máx}$) (mm)
BL32	VM5	18-02-04	por flexão	47.52	patamar entre 172.9 e 195.4
BL33	VM4	06-02-04	por flexão	52.60	patamar entre 161.5 e 170.1
BL34	VM6	10-02-04	pela conexão	41.96	patamar entre 146.6 e 154.3

Da comparação entre a Tabela 3 e a Tabela 4, resulta uma diferença entre os momentos flectores máximos verificados durante os ensaios e os momentos flectores previstos, sendo os primeiros superiores aos segundos, com excepção da viga VM5. Essa diferença pode-se dever ao comportamento do aço que admite tensões de tracção superiores à tensão de cedência do material, tal como se apresenta na Tabela 2. A diferença encontrada entre o momento flector resistente previsto e o momento flector resistente medido na viga com conexão parcial (VM6) resulta de dois aspectos. Uma vez que a rotura da conexão se deu por corte na base dos conectores, considerou-se a equação (1) no dimensionamento do nº de conectores necessários para esta viga, [7]. A resistência ao corte da conexão pode ter sido subestimada pela equação referida, tal como já verificado em ensaios experimentais de tipo “Push-Out”, [1]. Por outro lado, a flexibilidade dos conectores tipo perno resulta numa diminuição do fluxo de forças de corte, com redistribuição de esforço para os outros elementos que constituem a secção transversal, quer seja o perfil metálico ou a laje de betão, retardando a sua rotura.

$$P_R = 0.8 f_u (p d^2 / 4) \quad (1)$$

Na Figura 9 estão representadas as curvas de momento flector vs. deformação, ambos contabilizados na secção de meio vão da viga. Verifica-se o comportamento inicial elástico das vigas, próximo do estimado, admitindo uma conexão total entre laje de betão leve e o perfil de

aço. Apesar disto, identifica-se, desde os primeiros carregamentos, uma maior rigidez associada à viga com conexão total (VM4), seguida da viga com conexão total mas conectores associados 2 a 2 (VM5) e por último a viga com conexão parcial (VM6). Da análise desta figura, verifica-se a perda de rigidez para níveis de esforço próximos de $0.45 M_{máx}$ verificado para cada ensaio, respectivamente. A deformação vertical correspondente ao momento flector máximo atingido é similar para os dois ensaios com conexão total, apesar dos diferentes níveis de carregamento. Antes da rotura, VM6 apresenta sempre maiores deformações do que as outras vigas, para o mesmo nível de carregamento.

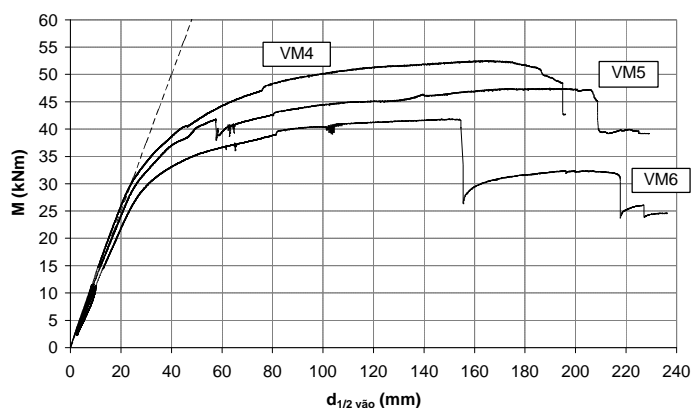


Figura 9 – Momento flector vs. deformação vertical (meio vão da viga)

Na Figura 10 observam-se os valores de deslizamento horizontal entre a laje de betão leve e o perfil metálico para as vigas VM4 (conexão total) e VM6 (conexão parcial). O deslizamento medido é muito superior em VM6 e verifica-se sobretudo num dos lados da viga (medido com o transdutor H2). Numa primeira fase do ensaio a evolução do deslizamento medida nos dois transdutores, H1 e H2, é muito similar. De seguida, observa-se um incremento localizado no transdutor H2, que está associado à rotura de um conector, e é traduzida em termos globais pela primeira perda de capacidade resistente verificada em VM6 (Figura 9). A partir desse momento, esta metade da viga apresenta uma conexão com menor capacidade resistente, pelo que a evolução do deslizamento se concentra nessa zona, dando origem à rotura por conexão da viga, entre o apoio e a secção S2.

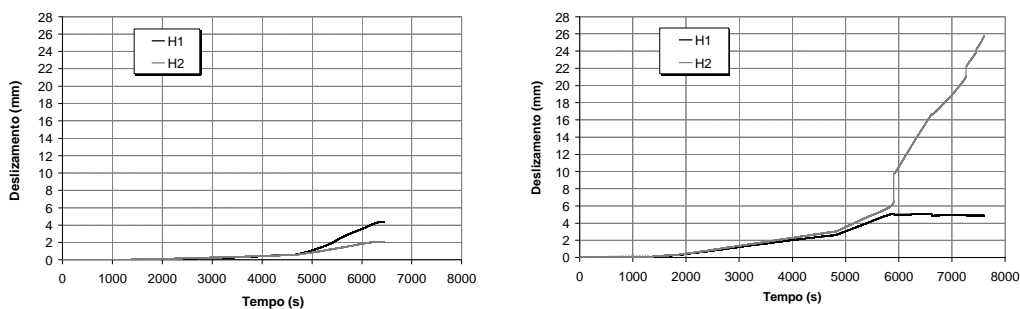


Figura 10 – Deslizamento horizontal das vigas VM4 (esq.) e VM6 (dir.)

Na viga VM4, ambos os transdutores mediram deslizamentos de valor quase idêntico na primeira fase do carregamento. Na fase final do ensaio, o transdutor H1 mediu maiores deformações. Tal como referido em 4.1, a rotura deu-se por flexão, iniciada com o esmagamento do betão na Secção S3, em concordância com a metade da viga onde H1 mediu maiores deslizamentos.

Na Figura 11 e na Figura 12 representam-se os diagramas de extensão nas secções de meio vão das vigas, para o momento flector máximo aplicado e para 40% desse valor. Verifica-se que para $0.4M_{máx}$ a distribuição de extensões é uniforme, com compatibilidade entre os dois materiais. Para este nível de esforço, a conexão garante a transmissão de esforços entre a viga de aço e a laje de betão leve em qualquer das vigas, mesmo para a viga com conexão parcial (VM6). Para o momento flector máximo, mantém-se a compatibilidade de deformação para a viga com conexão total. Verifica-se uma distribuição de extensões similar entre VM4 e VM5, mas comprova-se a importância do deslizamento entre o perfil metálico e a laje de betão leve pela diferença de extensões nesta interface verificada em VM5. Um diagrama de extensões, similar para VM4 e VM5, implica que a deformação vertical das vigas seja também próxima, o que se pode verificar na Figura 9 e na Tabela 4. O facto de os momentos flectores máximos de VM4 e VM5 não serem iguais, resulta de uma menor eficiência da conexão escolhida para VM5, que tendo esgotado a capacidade resistente na laje de betão, não é capaz de transmitir os acréscimo de esforços ao perfil metálico. Deste modo, a opção por colocar os conectores agrupados dois a dois resultou numa perda de capacidade de carga.

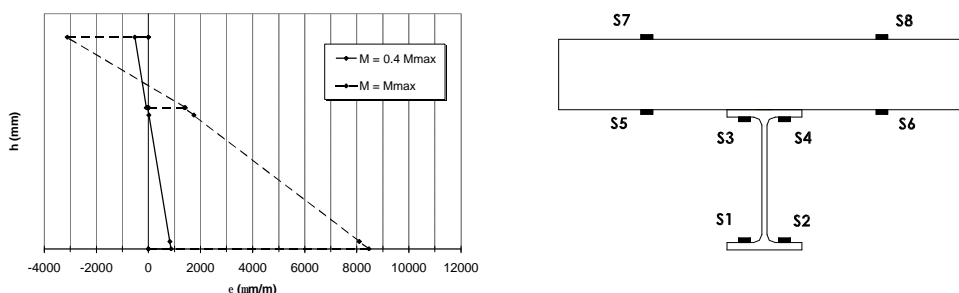


Figura 11 – Diagrama de extensões em VM4 (esq.) e disposição dos extensómetros (dir.)

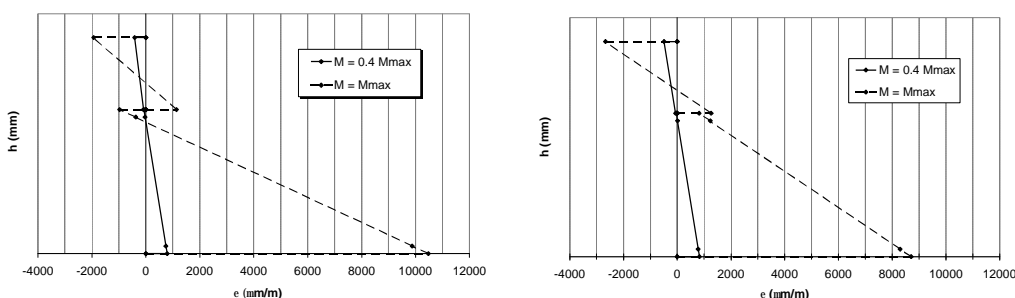


Figura 12 - Diagramas de extensões em VM6 (esq.) e VM5 (dir.)

Na fase inicial do carregamento, toda a laje de betão leve está comprimida, em qualquer dos ensaios. Com o seu decorrer, o eixo neutro sobe e passam a existir tracções nas fibras inferiores da laje. Esta alteração ocorre para valores de 37.11 kNm e 36.2 kNm no caso de VM4 e VM5, respectivamente. Estes valores estão muito próximos, o que mostra a eficiência dos dois tipos de conexão para este nível de carregamento. Para a viga VM6, as tracções na laje de betão ocorrem para o valor de 32.5 kNm, tendo já ocorrido deslizamentos importantes para este nível de esforço.

5. CONCLUSÕES

Durante este trabalho, foi possível realizar uma análise ao comportamento vigas mistas aço-betão leve. Verificou-se o bom comportamento deste tipo de betão ao nível global, em tudo similar a um betão de massa volúmica normal. Do mesmo modo, verificou-se um bom comportamento ao nível local, já que não se observaram roturas por esmagamento do betão na zona da conexão, tendo estas roturas antes ocorrido por corte do conector metálico. A conexão total com uma distribuição uniforme dos conectores foi o tipo de ligação mais eficaz, atingindo a maior capacidade de carga. Apesar da sua maior capacidade de deformação, o agrupamento de conectores provocou uma redução na capacidade de carga da vigas, mostrando ser menos eficaz.

6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financiado pelo Projecto de investigação *Sapiens* ECM/33067/99 - “*Steel-concrete composite bridges: Use of lightweight high performance concrete*”, do Programa PRAXIS XXI. Agradece-se também ao Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho, onde o programa experimental foi realizado.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Valente, I., Cruz, P. J.S.: “*Caracterização da ductilidade de ligações aço-betão leve com conectores tipo perno*”, 4º Congresso de Construção Metálica e Mista, 4 e 5 de Dezembro de 2003, Lisboa, IST, Portugal.
- [2] Hegger, J. et al: *Studies on the ductility of shear connectors when using high-strength concrete*; Int. Symp. on Connections between Steel and concrete, Vol.2, pp 1025-1045, University of Stuttgart, 10-12 Setembro 2001.
- [3] Döinghaus, P.: *Zum Zusammenwirken hochfester Baustoffe in Verbundkonstruktionen*, Tese de doutoramento, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2001.
- [4] Especificação E-226 do LNEC (1968): *Betão – Ensaio de compressão*.
- [5] Especificação E-397 do LNEC (1993): *Betão – Ensaio de módulo de elasticidade*.
- [6] NP-EN 10002-1 (1992): *Materiais metálicos. Ensaio de tracção. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*.
- [7] Eurocode 4, ENV 1994: *Design of composite steel and concrete structures*. CEN, 1994.