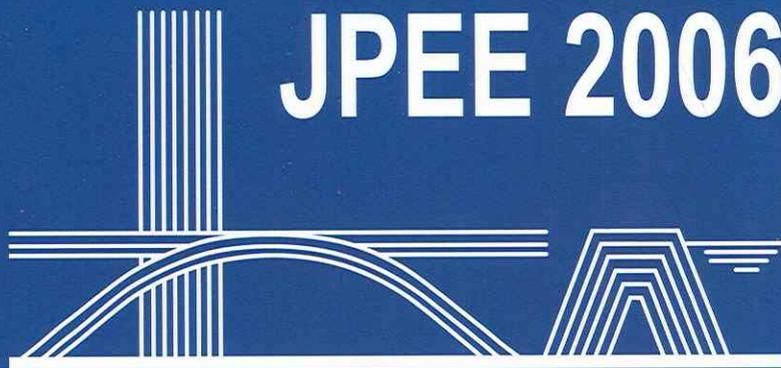


# JPEE 2006



## 4<sup>as</sup> JORNADAS PORTUGUESAS DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Lisboa, LNEC, 13 a 16 de Dezembro de 2006

### Organizadas por:

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

GPBE – Grupo Português do Betão Estrutural



### Colaboração de:

APEE – Associação Portuguesa de Engenharia de Estruturas

CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista

SPES – Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica



### Apoio de:

OE – Ordem dos Engenheiros





## A UTILIZAÇÃO DE BETÕES LEVES EM VIGAS MISTAS AÇO-BETÃO



**Isabel Valente**  
Assistente  
Univ. do Minho  
Guimarães



**Paulo J. S. Cruz**  
Professor Associado  
Univ. do Minho  
Guimarães

### SUMÁRIO

A presente comunicação descreve o conjunto de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST-UM), com vista à avaliação de possibilidades e vantagens da utilização de betões leves de elevada resistência em vigas mistas aço-betão. Numa primeira fase, estudaram-se as propriedades de um betão leve de elevada resistência com maior relevância para o comportamento estrutural. De seguida, procedeu-se ao estudo do comportamento dos elementos de conexão a serem utilizados. Deste modo, realizaram-se ensaios de tipo *Push-out* com conectores de tipo perno de cabeça inseridos em lajes realizadas com o mesmo betão leve anteriormente estudado. Por fim, realizaram-se ensaios experimentais em vigas mistas compostas pelos elementos referidos e por um perfil metálico de tipo comercial.

**Palavras-chave:** betão leve de elevada resistência, conexão aço-betão leve, ensaio de tipo *Push-out*, vigas mistas aço-betão leve, análise experimental

### 1. INTRODUÇÃO

A realização de estruturas mistas aço-betão implica o funcionamento conjunto destes dois materiais. A ligação entre ambos é conseguida à custa de conectores metálicos, cuja tipologia depende das características dos dois materiais e do tipo de ligação que se pretende realizar. O funcionamento misto pode ser obtido, impedindo ou limitando o deslocamento relativo entre elementos de betão e elementos metálicos.

A substituição de betões de massa volúmica normal por betões leves, em estruturas mistas, apresenta algumas vantagens, entre as quais se pode referir a redução de peso, a melhoria de algumas propriedades físicas e a maior durabilidade, [1].

Nesta comunicação são apresentados resultados do programa experimental que está a ser realizado no LEST-UM com vista ao estudo da utilização de betões leves em vigas mistas. Apresentam-se resultados de ensaios de tipo *Push-out* sobre provetes realizados em betão leve de elevada resistência. Este ensaio permite caracterizar a conexão em termos de capacidade de carga, ductilidade e rigidez.

Apresentam-se ainda resultados de ensaios em vigas mistas aço-betão leve. Os carregamentos são de tipo monotónico e a distribuição de elementos de conexão procura materializar as situações de conexão total e conexão parcial. Os ensaios são realizados com controlo de deformação, sendo medidos valores da carga aplicada, de deformação vertical e de deslizamento relativo entre o perfil metálico e a laje de betão armado. Os resultados obtidos nos ensaios de tipo *Push-outs* são considerados na análise dos ensaios de vigas mistas, já que os materiais utilizados e o tipo de conectores são comuns aos dois ensaios.

Nos ensaios de vigas mistas, os parâmetros em estudo são a distribuição dos conectores e o tipo de carregamento. Nesta perspectiva, os ensaios realizados procuram estudar o comportamento das vigas mistas, tendo com o principal objecto de análise a conexão aço-betão leve. Analisa-se ainda a contribuição dos vários elementos que compõem a viga mista para a sua capacidade resistente e sua capacidade de deformação. A máxima capacidade resistente e de deformação das vigas foi mobilizada durante os ensaios realizados, tendo sido identificados diferentes tipos de rotura durante o processo.

## 2. BETÃO LEVE DE ELEVADA RESISTÊNCIA

A principal influência dos agregados leves nas propriedades do betão leve deve-se ao facto de estes corresponderem a valores superiores a 50% do volume do betão. Podem ser apontadas a trabalhabilidade, resistência, módulo de elasticidade, massa volúmica e durabilidade como algumas das propriedades que são influenciadas pela presença deste agregado [2]. O betão leve é, em geral, produzido para ser utilizado quer como betão estrutural, quer como isolamento. A resistência à compressão e o módulo de elasticidade são propriedades decisivas quando o betão leve é utilizado como betão estrutural.

O betão leve de elevada resistência utilizado tem como principais características, uma resistência à compressão aos 28 dias entre 55 e 60 MPa e correspondente módulo de elasticidade entre 22 e 25 GPa. Com ensaios realizados aos 3, 7 e 28 dias, verificou-se que este betão atinge valores de resistência à compressão elevados logo às 1<sup>as</sup> idades, tendo-se medido aos 3 dias valores que correspondem a cerca de 90% dos valores medidos aos 28 dias. Tal como para os betões de massa volúmica normal, o módulo de elasticidade sofre apenas um pequeno aumento ao longo do tempo. Em termos absolutos, os valores de módulo de elasticidade determinados experimentalmente correspondem a cerca de 70% do valor que seria de esperar para um betão de massa volúmica normal e igual resistência à compressão.

Os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram determinados em provetes de betão leve provenientes das mesmas amassaduras em que foram betonados os provetes para os ensaios de tipo *Push-out* e ensaios de vigas mistas. Os correspondentes valores são apresentados no Quadro 1 e referem-se à média dos valores da respectiva propriedade obtidos em 3 provetes iguais. A data de ensaio dos provetes de betão é a mesma da data de ensaio do respectivo *Push-out* ou viga mista.

Quadro 1: Propriedades dos materiais

| Ref <sup>a</sup> Material     | Ensaio<br><i>Push-out</i> | Ensaio<br><i>Viga</i> | $f_{cm}$<br>(MPa) | $E_{cm}$<br>(GPa) | $f_{ym}$<br>(MPa) | $f_{um}$<br>(MPa) |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| BL44                          | CN13.1 (laje 1)           | -                     | 56.65             | 23.73             | -                 | -                 |
|                               | CN13.2 (laje 1)           |                       |                   |                   |                   |                   |
| BL45                          | CN13.1 (laje 2)           | -                     | 54.04             | 22.38             | -                 | -                 |
|                               | CN13.2 (laje 2)           |                       |                   |                   |                   |                   |
| BL33                          | -                         | VM4                   | 55.60             | 22.08             | -                 | -                 |
| BL34                          | -                         | VM6                   | 54.72             | 23.82             | -                 | -                 |
| BL38                          | -                         | VM7                   | 58.36             | 22.00             | -                 | -                 |
| BL39                          | -                         | VM8                   | 58.16             | 22.23             | -                 | -                 |
| Perfil metálico               | -                         | todas                 | -                 | -                 | 335.7             | 491.1             |
| Rede electrossoldada $\phi 5$ | -                         | todas                 | -                 | -                 | 583.4             | 606.1             |

### 3. ENSAIO DE TIPO *PUSH-OUT*

O estudo da conexão aço-betão é normalmente realizado através do ensaio de tipo *Push-out*, através do qual é possível efectuar uma análise rigorosa do comportamento da conexão e dos mecanismos de rotura associados ao betão e aos conectores. A razão de ser destes ensaios prende-se com o facto de eles poderem simular os esforços mobilizados numa viga mista de aço-betão. Uma grande vantagem deste ensaio é a de que os esforços instalados nos conectores resultam directamente das forças  $P$  introduzidas pelo actuador, sendo possível a medição do correspondente deslizamento relativo entre laje de betão e perfil metálico. Assim, os resultados são obtidos de forma directa.

Neste trabalho, seguem-se as disposições definidas na EN 1994-1-1, [3], para ensaios de conexão, adaptando-se as dimensões dos provetes, já que a dimensão dos conectores é reduzida. As dimensões das lajes de betão correspondem a  $450 \times 450 \times 100 \text{ mm}^3$  (Figura 1). Estas dimensões são consideradas como válidas após verificação do esforço de corte na laje de betão, ao longo das superfícies de rotura previstas. Nos ensaios realizados, a geometria do conector é constante e igual à dos conectores utilizados nos ensaios de vigas, concretamente, pernos de cabeça com 13 mm de diâmetro e 50 mm de altura. As armaduras da laje estão representadas na Figura 1 e correspondem a uma rede electrossoldada de aço S500, com varões de 5 mm, espaçados de 50 ou 100 mm, nas duas direcções. Esta rede está posicionada em ambas as faces, inferior e superior da laje. Os conectores são soldados ao perfil metálico na sua direcção longitudinal e ficam inseridos na laje de betão após a betonagem.



Para aplicar a carga vertical já referida, é utilizado um sistema óleo-hidráulico ligado a um actuador com capacidade de carga máxima de 5000 kN. Numa primeira fase do ensaio são realizados 25 ciclos de carga e descarga entre patamares de 5 e 40% do valor da carga de rotura esperada. De seguida, o ensaio passa a ser controlado pelo deslocamento relativo medido entre o perfil metálico e a laje de betão. Esta deformação é medida pelo menos até que a carga aplicada seja inferior a 80% da carga máxima. O deslocamento relativo entre as lajes de betão e o perfil metálico é medido em ambas as lajes, em intervalos de tempo regulares. O deslocamento lateral entre as lajes de betão também é medido com igual periodicidade. A montagem do ensaio é traduzida na Figura 3.



Figura 3: Estrutura de reacção e instrumentação para o ensaio de tipo *Push-out*

Com o intuito de reduzir algumas imperfeições nas bases das lajes, são colocadas folhas de neoprene na base dos provetes, sob as quais são colocadas duas chapas de aço e interpostas duas folhas de teflon oleadas. Estas últimas permitem eliminar o confinamento lateral produzido pela fricção entre a laje e o bastidor de ensaio. São ainda colocadas barras metálicas nas faces exteriores das lajes, com o intuito de limitar a separação horizontal entre estes dois elementos, no decorrer da aplicação da carga.

### 3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TIPO *PUSH-OUT*

Foram construídos e testados dois provetes de tipo *Push-out*, de acordo com a geometria representada na Figura 1. A rotura dos provetes acontece sempre com a rotura por corte dos pernos que estabelecem a conexão e nunca com esmagamento do betão que envolve os elementos de conexão ou corte na laje. Geralmente, a rotura dos pernos ocorre imediatamente acima do cordão de soldadura. No entanto, em alguns dos pernos testados, verifica-se que a rotura se dá ainda na zona do cordão de soldadura (Figura 4.a). Existe sempre uma pequena zona de esmagamento de betão que se localiza sob o conector, e em frente do cordão de soldadura (Figura 4.b).



Figura 4: Roturas por corte na base dos pernos (CN13.1)

As curvas que relacionam a carga aplicada e o deslizamento na interface aço-betão, obtidas nos ensaios, mostram uma relação praticamente linear entre estes dois parâmetros até cerca de 60 a 65% da carga máxima aplicada (Figura 5). O comportamento observado durante a fase inicial do carregamento é muito idêntico para os dois provetes.

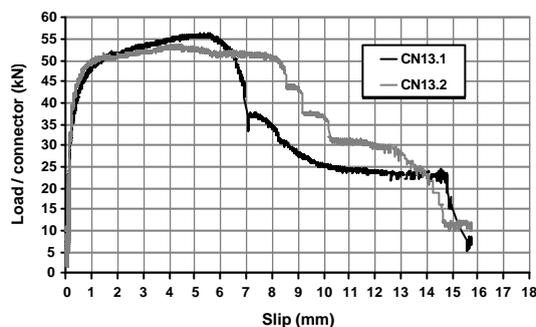


Figura 5: Curvas de carga aplicada vs. deslizamento obtidas nos ensaios de tipo *Push-out* com pernos de 13 mm de diâmetro

Para valores de carga acima do limite referido, o desenvolvimento das curvas altera-se em ambos os ensaios, passando a haver um menor aumento da carga, para o mesmo aumento da deformação. No caso do ensaio de CN13.1, a inclinação deste segundo ramo da curva carga aplicada vs. deslizamento é superior ao que se verifica para CN13.2, conduzindo a uma maior capacidade de carga deste provete (ver Quadro 2). Pelo contrário, o deslizamento máximo medido em CN13.2, antes da rotura do primeiro perno, é superior, tornando a ligação um pouco mais dúctil (ver Figura 5).

Apesar das diferenças apontadas, os valores da capacidade de carga obtidos nos dois ensaios são muito similares, correspondendo a um desvio padrão de 2.0 kN e a um coeficiente de variação de 3.7%. A carga máxima aplicada durante o decorrer do ensaio de tipo *Push-out*, dividida pelo número de conectores metálicos idênticos presentes na ligação, corresponde à capacidade de carga de um conector. A carga última é medida para cada provete e a correspondente capacidade de carga dos conectores é determinada. O valor característico,  $P_k$ , é calculado considerando 90% do menor valor da capacidade de carga determinado para o conjunto de provetes idênticos ensaiados.

O Quadro 2 apresenta o valor de carga máxima,  $P_{u,i}$ , determinado para cada um dos provetes ensaiados, e o correspondente valor característico,  $P_k$ , determinado para o conjunto de dois provetes idênticos ensaiados, CN13.1 e CN13.2.

Determinam-se ainda parâmetros relativos ao deslizamento medido na interface aço-betão.

Quadro 2: Resultados experimentais dos ensaios de tipo *Push-out*

| Ref <sup>a</sup> Provede | $P_{u,i}$<br>(kN) | $P_{médio}$<br>(kN) | $P_k$<br>(kN) | $S_{ki}$<br>(mm) | $S_k$<br>(mm) | $S_{max,i}$<br>(mm) |
|--------------------------|-------------------|---------------------|---------------|------------------|---------------|---------------------|
| CN 13.1                  | 56.4              | 55.0                | 48.19         | 5.76             | 5.18          | 6.94                |
| CN 13.2                  | 53.5              |                     |               | 7.78             |               | 8.51                |

$P_{u,i}$  carga máxima, medida para cada provete

$P_k = 0.9 P_u$  (sendo  $P_u$  o valor mínimo obtido para um conjunto de provetes idênticos)

$S_{ki}$  deslizamento plástico para a carga  $P_k$

$S_k$  0.9 \* deslizamento plástico mínimo determinado num grupo de provete idênticos

$S_{max,i}$  deslizamento máximo medido imediatamente antes da rotura do primeiro perno

A EN 1994-1-1 propõe a equação (1) para a verificação de segurança de um perno de cabeça sujeito a esforços de corte. Como resultado da aplicação da equação (1), verificou-se que os pernos apresentam um valor característico de capacidade de carga igual a 53.09 kN, valor um pouco superior àquele que foi determinado experimentalmente. Este resultado será aplicado à previsão da capacidade resistente das vigas mistas.

$$P_k = 0.8 f_u (\pi d^2 / 4) \tag{1}$$

### 3. VIGAS MISTAS AÇO-BETÃO LEVE EM ESTUDO

A viga mista em estudo é constituída por um perfil metálico IPE 120 e uma laje de betão leve com dimensões de 350x60mm<sup>2</sup> (Figura 6). A conexão é realizada com conectores de tipo perno, de diâmetro igual a 13 mm, 50 mm de altura e espaçamento uniforme entre si.

Quadro 3: Distribuição dos elementos de conexão

| Viga | Conexão | Distribuição                |
|------|---------|-----------------------------|
| VM4  | Total   | 8 $\phi$ 13, em 1/2 da viga |
| VM6  | Parcial | 4 $\phi$ 13, em 1/2 da viga |
| VM7  | Total   | 8 $\phi$ 13, em 1/2 da viga |
| VM8  | Parcial | 4 $\phi$ 13, em 1/2 da viga |

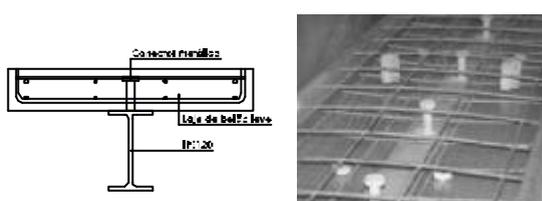


Figura 6: Secção transversal e cofragem

Foram consideradas duas configurações para o carregamento das vigas mistas. A primeira corresponde a quatro cargas concentradas, igualmente espaçadas de 900 mm ao longo das vigas. Esta configuração aproxima-se a um carregamento uniformemente distribuído, tal como se mostra nos diagramas de esforços apresentados na Figura 7. A segunda corresponde a duas cargas concentradas, aplicadas na proximidade do meio vão das vigas. Os correspondentes diagramas de esforços são também apresentados na Figura 7.

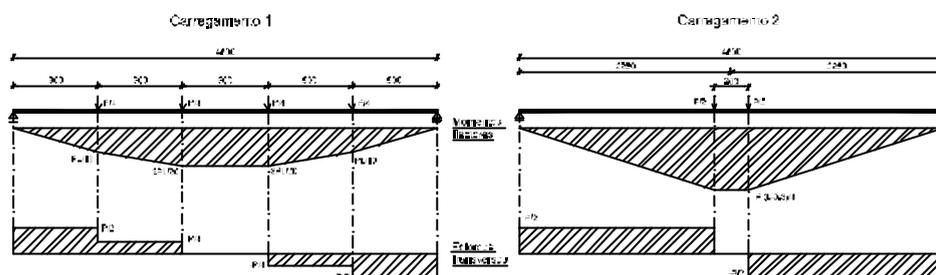


Figura 7: Carregamentos e correspondentes esforços

### 5. MONTAGEM DOS ENSAIOS DE VIGAS MISTAS

O carregamento pretendido foi materializado desmultiplicando em vários pontos a carga aplicada pelo actuador. A configuração do carregamento está esquematizada na Figura 8. Na mesma figura apresenta-se o aspecto final da montagem experimental das vigas.

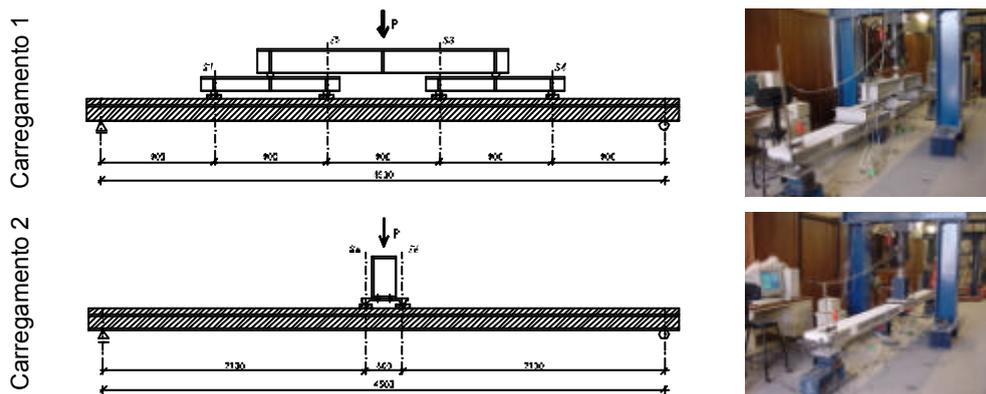


Figura 8: Montagem de ensaio

De forma a melhor localizar as secções de rotura das vigas, definem-se as secções de referência S1 a S4 na Figura 8. As secções AA', B-B' e C-C' da Figura 9 correspondem às secções monitorizadas com extensometria. Na Figura 9 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 relativo entre a laje de betão leve e o perfil metálico (H1 e H2).

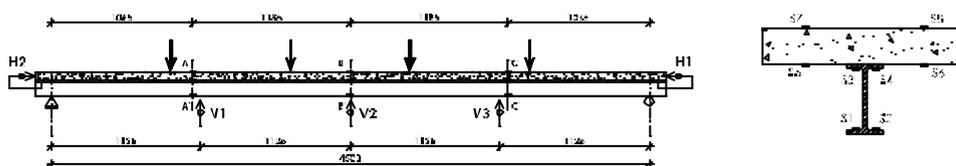


Figura 9: Monitorização e controlo do ensaio

## 7. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VIGAS MISTAS

### 7.1 Modos de rotura

A viga VM4 sofre 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 10).



Figura 10: Rotura de VM4



Figura 11: Rotura de VM6



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 dá-se essencialmente de um dos lados da viga (Figura 11). A viga VM7 sofre uma rotura por flexão. O betão esmaga nas fibras superiores da laje de betão, junto à posição S5, com a formação de uma fenda longitudinal localizada a meia altura da laje, que se desenvolve em direcção ao meio vão da viga (Figura 12). A armadura distribuída da laje apresenta alguma encurvadura local junto à zona onde se verificou esmagamento do betão. A viga VM8 sofre uma rotura da conexão aço-betão leve, associada a uma rotura por flexão (Figura 13). O betão apresenta esmagamento nas fibras superiores da laje de betão, junto às secções S5 e S6. Na fase final do carregamento, dá-se a rotura faseada de alguns conectores metálicos, verificando-se perdas de carga associadas a cada rotura.



Figura 12: Rotura de VM7



Figura 13: Rotura de VM8



Figura 14: Fendilhação distribuída



Figura 15: Deslizamento relativo

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 14). Verifica-se também o deslizamento horizontal na interface entre a laje de betão e o perfil metálico (Figura 15).

## 7.2 Momento flector resistente e deformação vertical

De acordo com a EN 1994-1-1, [3], as vigas dimensionadas para uma conexão total sofrem roturas por flexão, quer por esmagamento do betão comprimido quer por extensão excessiva da secção de aço. Estes limites são condicionados pelas características da secção transversal. A distribuição plástica de tensões na secção transversal pode ser admitida desde que esta seja classificada na classe 1, de acordo com o estipulado na EN 1994-1-1. As vigas dimensionadas para uma conexão parcial sofrem roturas associadas à conexão entre aço e betão, resultando geralmente em valores inferiores do momento flector resistente.

No Quadro 4 apresentam-se os valores previstos para o momento flector resistente de cada viga mista testada. Para as vigas com conexão total, considera-se que a rotura é condicionada pela extensão máxima de 3.5 mm/m na fibra mais comprimida da laje de betão. Para as vigas com conexão parcial considera-se que a rotura ocorre ao nível da conexão aço-betão.

Quadro 4: Previsão do momento flector resistente

| Betão | Viga | $F_{cf}$<br>(kN) | $F_{af}$<br>(kN) | Posição do eixo neutro         | $x$<br>(m) | $M_{pl,R}^*$<br>(kN.m) | $\epsilon_s$<br>(mm/m) |
|-------|------|------------------|------------------|--------------------------------|------------|------------------------|------------------------|
| BL33  | VM4  | 992.46           |                  | Laje de betão                  | 0.0268     | 47.27                  | 20.00                  |
| BL34  | VM6  | 976.75           | 443.46           | Laje de betão e banzo metálico | -          | 37.34                  | 30.75                  |
| BL38  | VM7  | 1041.73          |                  | Laje de betão                  | 0.0255     | 47.55                  | 21.17                  |
| BL39  | VM8  | 1038.16          |                  | Laje de betão e banzo metálico | -          | 37.43                  | 32.69                  |

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

$F_{af}$  – força de tracção máxima mobilizável na secção de aço ( $F_{af} = f_{ym} \times A_a$ )

$x$  – posição do eixo neutro, medido a partir da fibra superior da laje de betão

$\epsilon_s$  – valor de extensão medido na fibra inferior da secção de aço

A Figura 16 apresenta os diagramas que relacionam o momento flector aplicado com a deformação vertical, ambos medidos no meio vão das vigas. Todas as vigas apresentam um comportamento inicial aproximadamente elástico, já que existe uma relação linear entre os dois parâmetros. Considerando esta primeira fase do comportamento das vigas, verifica-se que as vigas dimensionadas para uma conexão total, VM4 e VM7, apresentam uma rigidez maior do que as vigas dimensionadas para uma conexão parcial, VM6 e VM8. A fase de comportamento aproximadamente elástico que foi referida, deixa de se verificar quando o momento flector aplicado é superior a cerca de 0.45  $M_{max}$ . Antes da rotura, as vigas VM6 e VM8 (conexão parcial) apresentam sempre deformação vertical superior à que se verifica para as vigas com conexão total, tendo em consideração o mesmo nível de carregamento.

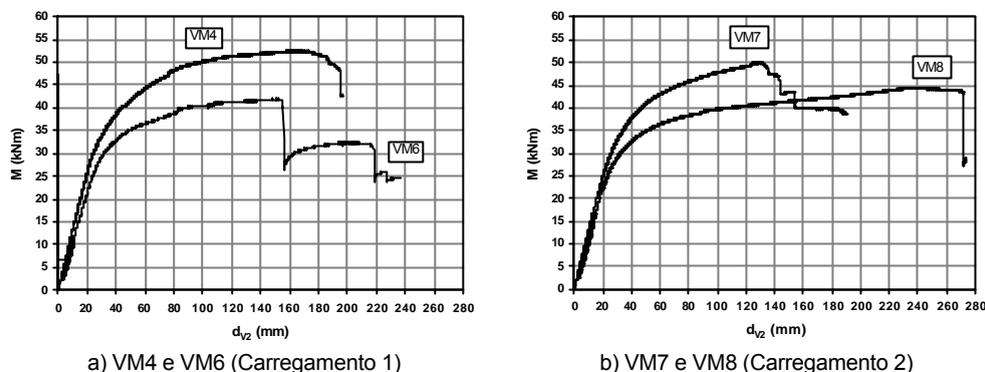


Figura 16: Momento flector vs. deformação vertical, medidos a meio vão das vigas

No Quadro 5 apresentam-se os valores experimentais obtidos para o momento flector máximo aplicado e a correspondente deformação vertical medida. A comparação entre os valores apresentados no Quadro 4 e no Quadro 5 põe em evidência algumas diferenças entre valores previstos e realmente medidos durante os ensaios. Os valores de momento flector máximo medidos são sempre superiores aos inicialmente previstos. A diferença é pequena no caso das vigas com conexão total, e mais expressiva no caso das vigas com conexão parcial. No caso das vigas com conexão total, as diferenças observadas podem resultar do facto de ser possível mobilizar na secção de aço valores mais elevados de tensão do que o valor da tensão de cedência. Outra possibilidade seria a de existirem pequenas diferenças geométricas na laje de betão, que não se verificaram pois houve um grande esforço, durante as betonagens, para manter as dimensões estabelecidas.

Quadro 5: Momento flector máximo e correspondente deformação vertical, medidos a meio vão

| Betão | Viga | Data de ensaio | Tipo de rotura            | $M_{max}$<br>(kNm) | $\epsilon_s$<br>(mm/m) | $\epsilon_c$<br>(mm/m) | $x$<br>(m) | $d (M_{max})$<br>(mm) |
|-------|------|----------------|---------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------|-----------------------|
| BL33  | VM4  | 06-02-04       | Flexão                    | 52.60              | 8.46                   | -3.12                  | 0.0412     | 161.5 a 170.1         |
| BL34  | VM6  | 10-02-04       | Corte na conexão          | 41.96              | 10.48                  | -1.94                  | -          | 146.6 a 154.3         |
| BL38  | VM7  | 05-04-04       | Flexão                    | 50.10              | 15.64                  | -3.79                  | 0.0383     | 124.2 a 130.9         |
| BL39  | VM8  | 16-04-04       | Flexão e corte na conexão | 44.51              | *                      | -4.59                  | -          | 236.1 a 244.9         |

\* - devido à ruína do extensómetro, este valor não foi medido

$\epsilon_c$  – valor de extensão medido na fibra superior da secção de betão

Nos ensaios de tipo *Push-out*, verificou-se que a capacidade resistente dos conectores é um pouco inferior à que foi prevista com a equação (1). Deste modo, o facto do momento flector resistente verificado para as vigas mistas com conexão parcial, ser superior ao previsto, não resulta da maior capacidade de resistente dos conectores, como se poderia pensar. Possivelmente, mobilizou-se algum atrito na interface aço-betão leve, apesar desta zona ter sido oleada para evitar esse efeito.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o comportamento da laje de betão leve inserida na viga mista, se aproxima do comportamento que seria de esperar para um betão de massa volúmica normal, pelo que a análise realizada é válida para o dimensionamento de vigas mistas aço-betão leve.

### 7.3 Diagramas de extensão na secção transversal

Nas vigas dimensionadas com conexão total, a rotura deu-se por esmagamento da fibra de betão mais comprimida, numa secção transversal definida da viga. Em todas as vigas testadas, os valores de extensão medidos na secção de aço, para o momento flector máximo aplicado, são inferiores ao previsto. Este aspecto foi confirmado durante os ensaios experimentais, como se mostra no Quadro 4 e no Quadro 5. Conclui-se que a posição do eixo neutro na fase de rotura está abaixo do previsto. Do mesmo modo, o equilíbrio interno só é garantido se as forças mobilizadas na secção de aço forem superiores, ultrapassando a respectiva tensão de cedência. Nas vigas sujeitas ao Carregamento 2 são atingidos valores de extensão superiores, mas o mesmo não acontece ao valor de momento flector. A posição do eixo neutro é próxima daquela que foi obtida para as vigas sujeitas ao Carregamento 1, o que significa que ambos os materiais, aço e betão leve, atingem extensões plásticas superiores, resultando num aumento de curvatura e de deformação vertical. A Figura 17 ilustra os diagramas de extensão relativos a 40%, 90% e totalidade do momento flector máximo aplicado, correspondentes à secção de meio vão das vigas mistas.

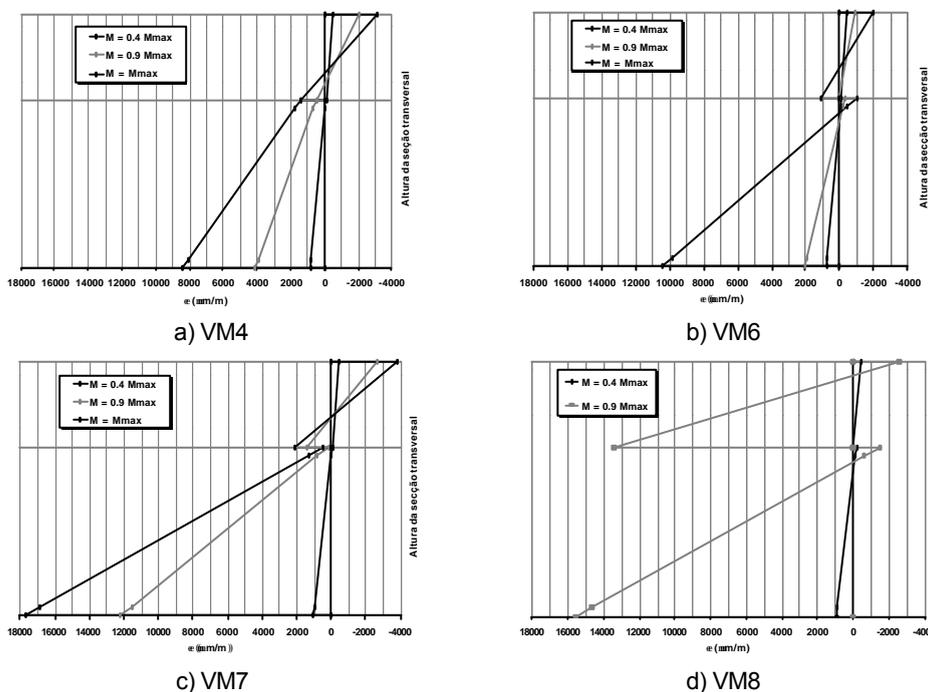
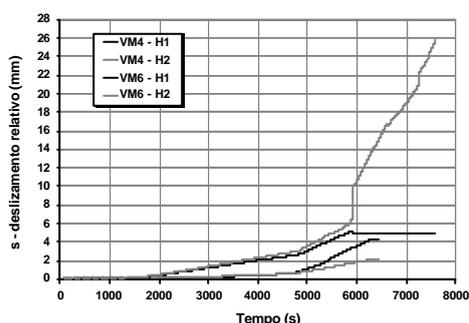


Figura 17: Diagrama de extensões para as vigas mistas aço-betão leve

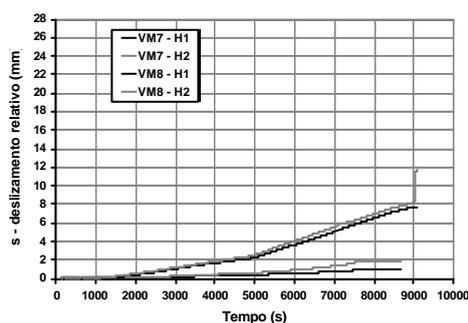
Os diagramas representados resultam dos valores medidos com extensómetros distribuídos de acordo com o esquema representado na Figura 9. De forma geral, o diagrama de extensões é uniforme para o nível de carregamento de  $0.4 M_{max}$ , com total compatibilidade entre as secções de aço e de betão. A conexão aço-betão garante a transmissão da totalidade do esforço de corte, mesmo para as vigas dimensionadas para uma conexão parcial. Deste modo, verifica-se que, para a viga VM4, a hipótese de interacção total é válida, mesmo para momento flector máximo. No caso da viga VM7, também dimensionada para uma conexão total, verifica-se a influência da flexibilidade da conexão, já que não existe compatibilidade total entre as extensões medidas na secção de aço e na secção de betão. A respectiva secção de aço mantém-se toda traccionada até ao fim do carregamento. Para VM6, verifica-se a influência da conexão parcial, já que para níveis de carga ainda longe do valor de carga máximo, passa a haver deslizamento importante na interface entre os dois materiais. A perda de acção mista é significativa, verificando-se que a zona superior da secção de aço passa a estar comprimida. Para VM8, verifica-se um comportamento semelhante ao observado para VM6, mas a perda de conexão entre as secções de aço e de betão é muito mais acentuada. Deste modo, a extensão de tracção na secção de aço é muito superior ao que se mediu na viga VM6, para um nível de carregamento semelhante. Não foi possível medir os valores de extensão para momento flector máximo, por ruína de alguns extensómetros.

#### 7.4 Deslizamento na interface aço-betão

A Figura 18 mostra o deslizamento relativo medido entre a secção de aço e a secção de betão para todas as vigas testadas. Na fase inicial do carregamento de VM4, ambos os transdutores, H1 e H2, medem valores de deslizamento similares. Na fase final do respectivo ensaio, H1 mede valores de deslizamento superiores a H2. A rotura de VM4 inicia-se na secção S3, que corresponde ao lado onde se medem deslizamentos superiores. Os valores de deslizamento medidos para VM6 são superiores aos medidos para VM4 e crescem mais de um dos lados da viga (medidos por H2). Após se dar a rotura de um dos conectores, a evolução do deslizamento concentra-se na correspondente metade da viga, terminando com a rotura total dos conectores distribuídos nessa mesma zona.



a) VM4 e VM6



b) VM7 e VM8

Figura 18: Deslizamento relativo entre as secções de aço e betão

Na viga VM7, os dois transdutores medem inicialmente valores similares de deslizamento (Figura 18). Numa fase adiantada de ensaio, H2 mede valores superiores a H1. Posteriormente, a rotura dá-se na secção S5, posicionada na metade da viga correspondente a H2. Os valores de deslizamento correspondentes a VM7 são da mesma ordem de grandeza daqueles que foram medidos para VM4. Para a viga VM8, o deslizamento é da ordem de grandeza do que foi medido para VM6, mas significativamente superior ao que foi medido para VM4 ou VM7. Nesta viga, ambos os transdutores medem valores de deslizamento muito similares até ao momento em que se dá a rotura dos pernos. Em geral, os valores de deslizamento medidos para as vigas sujeitas ao Carregamento 1 são superiores aos valores de deslizamento relativos às vigas sujeitas ao Carregamento 2, o que seria de esperar, já que o valor da carga total aplicada é superior.

## 8. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE VIGAS MISTAS E ENSAIOS DE TIPO *PUSH-OUT*

As vigas dimensionadas para uma conexão parcial, VM6 e VM8, sofreram roturas na interface aço-betão, tendo os elementos de conexão sofrido roturas por corte. Os valores de deslizamento medidos em cada uma destas vigas são, por isso, comparados com os resultados obtidos nos ensaios de tipo *Push-out* realizados com o mesmo tipo de conector.

Quadro 6: Comparação entre valores de deslizamento obtidos em ensaios de tipo *Push-out* e ensaios de vigas mistas

| Prov.  | Tipo de rotura            | $M_{max}$<br>(kNm) | $V_{max}$<br>(kN) | Valores para $M_{max}$ (ou $P_{max}$ ) |                  |                                  | Valores para $s_{max}$ |                      |                                       |
|--------|---------------------------|--------------------|-------------------|--|------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------|---------------------------------------|
|        |                           |                    |                   | $S_{H1}$<br>(mm)                       | $S_{H2}$<br>(mm) | $S_{average}$<br>(H1,H2)<br>(mm) | $S_{H1,max}$<br>(mm)   | $S_{H2,max}$<br>(mm) | $S_{average}$<br>(H1,H2), max<br>(mm) |
| VM6    | Corte na conexão          | 41.96              | 30.22             | 5.03                                   | 5.95             | -                                | 5.10                   | 6.66                 | -                                     |
| VM8    | Flexão e corte na conexão | 44.51              | 21.20             | 6.95                                   | 7.40             | -                                | 7.77                   | 8.43                 | -                                     |
| CN13.1 | Corte na conexão          | -                  | -                 | -                                      | -                | 5.62                             | -                      | -                    | 6.94                                  |
| CN13.2 | Corte na conexão          | -                  | -                 | -                                      | -                | 4.46                             | -                      | -                    | 8.51                                  |

$s_{max}$  – deslizamento máximo, medido imediatamente antes da rotura do primeiro perno

cinzento – resultados dos ensaios de tipo *Push-out*

A viga VM6 sofreu uma rotura por corte ao nível da interface aço-betão. Na Figura 16 podem identificar-se perdas de carga localizadas que ocorrem em simultâneo com a rotura de um ou mais pernos posicionados numa das metades da viga. Durante o decorrer dos ensaios foi possível identificar o som correspondente à rotura de cada perno e verificar que coincidiam exactamente com as perdas de carga associadas à viga. Tal como se apresenta no Quadro 6, imediatamente antes da rotura do primeiro perno, o valor do deslizamento relativo na interface aço-betão era igual 5.10 mm e 6.66 mm, respectivamente, em cada extremidade da viga. O valor de 6.66 mm foi medido no mesmo lado que condicionou a rotura da viga. Este valor é

muito próximo do valor de deslizamento máximo medido nos ensaios de tipo *Push-out* apresentados, o que significa que a rotura das vigas é condicionada pelo deslizamento excessivo que se produz na interface aço-betão, já que a carga máxima tinha sido atingida algum tempo antes. A viga VM8 também sofreu rotura ao nível da conexão, que foi atingida aproximadamente em simultâneo com uma rotura por flexão. Mais uma vez, a rotura dos pernos verificou-se essencialmente numa das metades da viga. Os valores de deslizamento relativo medidos entre a laje de betão e o perfil metálico junto aos apoios, correspondem a 7.77 mm e 8.43 mm, tal como se apresenta no Quadro 6. Estes valores são mais elevados do que os anteriormente medidos para a viga VM6, mas mantêm-se na gama de valores que foram medidos durante os ensaios de tipo *Push-out*.

Dos resultados obtidos podem-se referir três aspectos fundamentais: o primeiro é de que os ensaios de tipo *Push-out* realizados podem avaliar de forma adequada não só a capacidade de carga de um conector, mas também a sua capacidade de deformação. Desta forma, confirma-se que este tipo de ensaio é adequado para o estudo do fenómeno da conexão entre aço e betão leve. O segundo aspecto é que, em ambos os tipos de ensaio, a rotura só se verifica algum tempo depois da carga máxima ter sido atingida. Isto mostra que a conexão entre aço e betão leve realizada com pernos de cabeça é dúctil, pois desenvolve elevada deformação mantendo a sua capacidade de carga praticamente constante. O terceiro aspecto é que a elevada capacidade de deformação da conexão altera a acção mista que se desenvolve entre as secções de aço e de betão, permitindo que a viga mista atinja valores de deformação vertical superiores.

## 9. CONCLUSÕES

Este trabalho procurou fazer uma avaliação da utilização de betões leves em vigas mistas aço-betão. Verificou-se que o comportamento e os mecanismos de rotura dos betões leves quando incluídos em vigas mistas são similares aos que se obtêm com a utilização de betões de massa volúmica normal, apesar de pequenas diferenças relacionadas com as propriedades dos betões leves. Os resultados obtidos nos ensaios de tipo *Push-out* foram concordantes com os resultados obtidos nos ensaios de vigas mistas, provando que este tipo de ensaio é adequado para o estudo da conexão entre aço e betão leve.

## 10. REFERÊNCIAS

- [1] Daly, A. F. G., "Use of LWAC in Bridges", Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Kristiansand, Norway, 18-22 June 2000, pp. 345-354.
- [2] Vieira, M.: "High performance lightweight aggregate concrete. Durability and microstructure", MSc Thesis, IST, Lisbon 2000.
- [3] EN1994-1-1 2004. Design of steel and concrete composite structures. European Committee for Standardization (CEN).

