

CMNE CILAMCE 2007

CMNE - Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia
XXVII CILAMCE - Congresso Ibero Latino-Americano sobre Métodos
Computacionais em Engenharia

13 . 15 Junho 2007

Porto Portugal

Organizado por:

SEMNI APMJAC abmec

inegi 20 anos

FEUP PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

www.fe.up.pt/cmne2007

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS EM AÇO E BETÃO LEVE

Isabel Valente^{1*}, Paulo J. S. Cruz²

1,2: Departamento de Engenharia Civil
Escola de Engenharia
Universidade do Minho
4800-058 Guimarães

e-mail: isabelv@civil.uminho.pt, pcruz@civil.uminho.pt,

web: <http://www.civil.uminho.pt>

Palavras-chave: Vigas Mistas, Betão Leve, Conexão Aço-Betão Leve

Resumo.

Em estruturas mistas, a substituição de betões de densidade normal por betões leves apresenta algumas vantagens, entre as quais a redução de peso, a melhoria de algumas propriedades físicas e a maior durabilidade [1]. A realização de vigas mistas aço-betão implica o funcionamento conjunto destes dois materiais.

Nesta comunicação, são apresentados resultados do programa de investigação realizado no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, com vista ao estudo da utilização de betões leves em vigas mistas [2]. Assim, apresentam-se resultados experimentais de ensaios em vigas mistas aço-betão leve e a correspondente modelação numérica. 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 experimentais são realizados com controlo de deformação, sendo medidos valores da carga aplicada, de deformação vertical ao longo da viga, de deslizamento relativo entre o perfil metálico e a laje de betão armado e de variação de extensão em determinadas secções transversais.

O funcionamento misto pode ser obtido, impedindo ou limitando o deslocamento relativo entre a secção de aço e a secção de betão. Para tal, são utilizados conectores metálicos cuja tipologia depende das características dos dois materiais e do tipo de ligação que se pretende realizar. A deformabilidade dos conectores metálicos impede que se produza um comportamento misto perfeito. Nas análises experimental e numérica realizadas, procura-se estabelecer qual a influência da deformabilidade dos conectores no comportamento das viga, nomeadamente ao nível da distribuição de tensões nas secções transversais. Procura-se ainda identificar qual o tipo de rotura que condiciona o comportamento das vigas mistas.

1. INTRODUÇÃO

O trabalho aqui apresentado aborda a utilização de betão leve em vigas mistas aço-betão. A opção de utilizar betão leve tem o interesse de reduzir o peso da laje de betão, que nos casos correntes constitui uma parcela considerável das cargas permanentes. O resultado final é uma redução da própria secção de aço, o que pode resultar numa solução global mais leve.

É possível produzir betão leve com resistência à compressão similar à de um betão de densidade normal. Contudo, outras propriedades como a resistência à tracção, o módulo de elasticidade ou a energia de fractura apresentam diferenças que devem ser tidas em conta, quando se faz uma comparação directa entre um betão leve e um betão de densidade normal com a mesma resistência à compressão.

A presente comunicação descreve o dimensionamento, a produção, e as análises experimental e numérica realizadas para duas vigas mistas realizadas em aço e betão leve de elevada resistência. Os parâmetros às vigas testadas são as dimensões da secção transversal, o vão e as condições de apoio. A disposição dos elementos de conexão entre a laje de betão e o perfil metálico são variáveis.

O tipo de conector utilizado e a sua rigidez desempenham um papel importante na distribuição de esforços entre as secções de aço e de betão, bem como na redistribuição de esforço de corte ao longo da viga, [3]. Como conectores são utilizados os pernos de cabeça. Para além dos conectores, todos os elementos que constituem a viga mista são analisados em termos da sua contribuição para a capacidade de carga e capacidade de deformação da viga.

Uma viga mista é dimensionada para a situação de conexão total quando o momento resistente de uma dada secção transversal não é condicionado pela capacidade resistente da conexão. Tal significa que a rotura ocorre ou na secção de aço ou na secção de betão quando um destes materiais atinge uma extensão limite. Neste caso, adicionar um ou mais conectores não faz aumentar a capacidade resistente da viga. Pelo contrário, se a viga mista é dimensionada para a situação de conexão parcial, tal significa que a rotura é condicionada pela conexão, o que faz diminuir a capacidade resistente da viga. Como tal, procura-se descrever o comportamento das vigas testadas identificando os respectivos mecanismos de rotura, que podem resultar de uma rotura por flexão numa dada secção transversal ou numa rotura por corte ao nível da interface entre as secções de aço e de betão, num determinado comprimento.

O dimensionamento de uma viga mista deve ainda ter em conta o seu comportamento em condições de serviço. A interacção total entre as secções de aço e de betão é obtida quando não existe deslizamento relativo entre elas e a interacção parcial existe quando se permite o deslizamento referido. Numa estrutura real, a situação de interacção parcial está sempre presente, mas o grau de interacção depende do número de conectores utilizado, do material, tipologia e geometria do conector e ainda do tipo e classe de resistência do betão utilizado. A consequência de existir interacção parcial é uma perda de acção mista, que resulta numa deformação vertical superior.

2. VIGAS EM ESTUDO

As vigas mistas em estudo são constituídas por um perfil de tipo IPE120 e uma laje de betão leve com as dimensões de 350 mm × 60 mm. Os conectores utilizados são fornecidos pela Kôco® e apresentam 13 mm de diâmetro e 50 mm de altura. A sua distribuição é uniforme ao longo do de da viga e pode dividir-se em dois tipos, de acordo com a Tabela 1 e a Figura 1.

Tipo de conexão	Grau de conexão	Distribuição de conectores
Tipo A	Total	16 pernos com 13 mm de diâmetro e 50 mm altura
Tipo B	Parcial	8 pernos com 13 mm de diâmetro e 50 mm altura

Tabela 1 – Distribuição de pernos de cabeça ao longo das vigas mistas

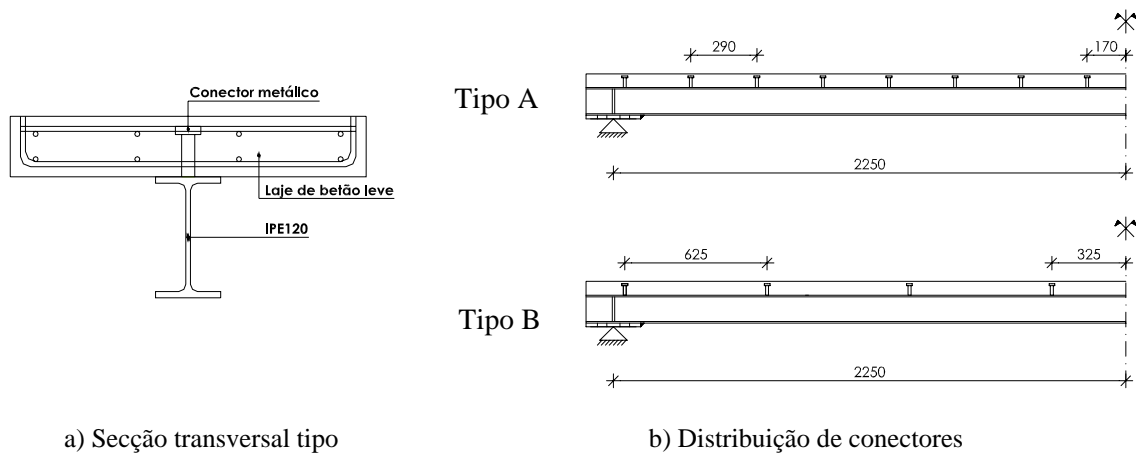


Figura 1 – Secção transversal e distribuição de conectores

O número de conectores utilizado na viga com conexão total é o mínimo que garante a transmissão total do esforço axial que é possível mobilizar ou na secção de betão ou na secção de aço, dependendo da posição do eixo neutro.

Se parte da força de corte for transmitida por atrito na interface entre aço e betão, isso significa que os esforço de corte nos conectores é menor. Para eliminar esse atrito, é aplicado descofrante na face superior do banzo da viga metálica, com excepção das zonas próximas aos conectores metálicos.

2.1. Distribuição de carga

A distribuição de carga nas vigas mistas corresponde a duas forças concentradas, pouco espaçadas e aplicadas próximas ao meio vão da viga. Esta situação de carregamento está próxima da de uma carga concentrada aplicada no meio vão da viga. O esquema estrutural e os correspondentes diagramas de momento flector e esforço transversal estão representados na Figura 2.

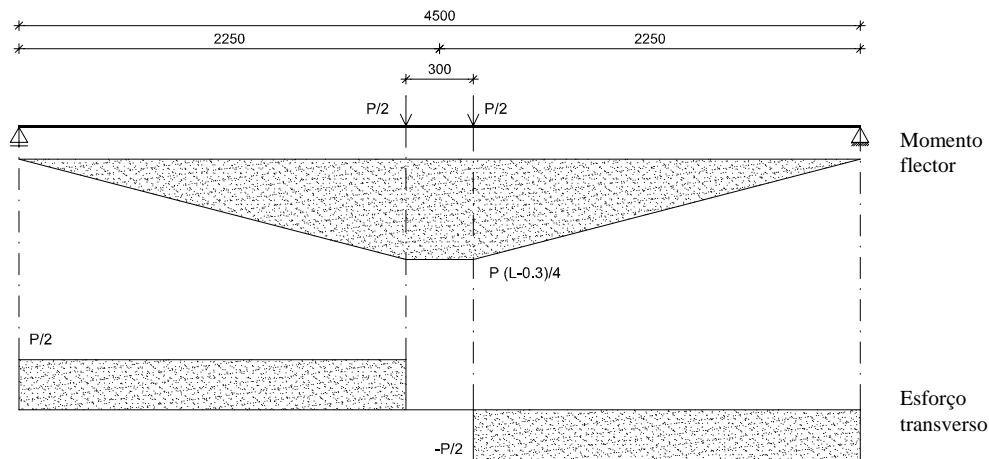


Figura 2 – Esquema estrutural e diagramas de momento flector e esforço transverso

Para o carregamento descrito, o valor do momento flector máximo é dado pela equação (1),

$$M_{max} = \frac{pL^2}{8} + \frac{P(L-0.3)}{4} = 1.225 + 1.05 P \quad (1)$$

onde, P corresponde ao valor da força aplicada pelo sistema óleo-hidráulico mais o valor correspondente ao peso dos elementos metálicos que fazem a distribuição da carga; considera-se ainda a parcela correspondente ao peso próprio das vigas.

2.2. Caracterização dos materiais utilizados

Foram realizados ensaios experimentais para caracterizar as propriedades dos materiais utilizados no fabrico das vigas mistas. As propriedades testadas foram consideradas como as mais influentes para o comportamento das vigas (Figura 3).



a) Resistência à compressão do betão



b) Módulo de elasticidade do betão



c) Resistência à tracção por flexão e energia de fractura do betão



d) Resistência à tracção do aço

Figura 3 – Ensaio dos materiais

Os valores das propriedades do betão são apresentados na Tabela 2. Os provetes utilizados

para a determinação de massa volúmica, resistência à compressão e módulo de elasticidade foram betonados conjuntamente com cada uma das vigas em estudo. Os resultados apresentados correspondem à média dos resultados de 3 provetes ensaiados à mesma data de ensaio das vigas. A composição de betão utilizada é sempre a mesma, pelo que os resultados apresentam apenas variações mínimas. Deste modo, considera-se que os resultados obtidos nos ensaios das vigas podem ser directamente comparados entre si.

Ref ^a Betão	Data de betonagem	Data de ensaio	Ref ^a Viga	Massa volúmica (kg/m ³)	Resistência à compressão f_{cm} (MPa)	Módulo de elasticidade E_{cm} (GPa)
BL38	05/03/04	06/04/04	VM7	1801	58.36	22.00
BL39	12/03/04	14/04/04	VM8	1800	58.16	22.23

Tabela 2 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade do betão leve utilizado nas vigas mistas

Os provetes utilizados para determinar a resistência à tracção por flexão e a energia de fractura foram betonados a uma data diferente da das vigas, já que por limitação da capacidade da betoneira disponível, a quantidade de betão necessária não era suficiente se todos os provetes fossem betonados simultaneamente. Foram então realizadas as amassaduras BL42 e BL43 para caracterização destas propriedades. O valor de resistência à compressão medido para BL42 é muito similar ao valor obtido para BL38 e BL39, pelo que se consideram os valores de resistência à tracção por flexão e energia de fractura aqui obtidos na análise das vigas.

Ref ^a Betão	Data de betonagem	Data de ensaio	Idade	Resistência à compressão f_{icm} (MPa)	Módulo de elasticidade E_{icm} (GPa)	Resistência à tracção f_{lt} (MPa)	Energia de fractura G_{Fm} (kJ/m ²)
BL42	24/03/2004	31/03/2004	7	56.43	21.63	4.26	68.02
BL43	05/05/2004	03/06/2004	28	59.07	22.34	3.84	78.42

Tabela 3 – Resistência à tracção e energia de fractura do betão leve de utilizado nas vigas mistas

Para os ensaios dos aços foram cortados provetes das armaduras e da alma dos perfis metálicos utilizados nas vigas mistas. As dimensões e o procedimento de ensaio seguem as disposições definidas na norma (NP EN 10002-1 1990). A Tabela 4 apresenta os valores de tensão de cedência e tensão última obtidos nos ensaios realizados.

Tipo de provete	Secção transversal (mm ²)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
Aço (cortado do perfil metálico)	19.6×5	335.7	491.1
Armadura	φ5	583.4	606.1

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do aço utilizado nas vigas metálicas e nas armaduras das vigas mistas

Devido ao tamanho reduzido dos pernos utilizados, não foi possível realizar provetes de ensaio a partir destes elementos, pelo que se consideraram os valores determinados nos ensaios com pernos de diâmetros iguais a 19, 22 e 25 mm realizados para outro trabalho, [2]. Os valores médios considerados correspondem a uma tensão de cedência, $f_y = 450$ MPa, e a uma tensão última, $f_u = 550$ MPa que serão considerados nas análises seguintes.

2.3 Classificação da secção transversal e determinação do momento flector resistente

A classificação da secção transversal mista é realizada de acordo com a EN1994-1-1, [4]. Esta classificação é importante para estabelecer qual o tipo de análise que é possível considerar para o dimensionamento da viga. No caso presente, a secção é da classe 1, pelo que se admite o seu comportamento plástico. As equações (2) e (3) permitem calcular a máxima força de compressão ou tracção que é possível mobilizar nas secções de betão e de aço, respectivamente.

$$N_c = b_{\text{eff}} \cdot h_c \cdot \alpha \cdot f_{\text{c,m}} \quad (2)$$

$$N_{\text{pla}} = A_a \cdot f_y \quad (3)$$

No caso de a viga ser dimensionada para ter conexão parcial, admite-se que a rotura ocorre na conexão, resultando num valor inferior do momento flector resistente. Os valores calculados para o momento flector resistente ($M_{pl,R}^+$) são apresentados na Tabela 5. No cálculo da máxima força mobilizável na secção de betão, considera-se que toda a largura da laje é colaborante: $b_{\text{eff}} = 350$ mm.

V_f é a máxima força de corte mobilizável ao longo de meio vão da viga mista. No caso das vigas com conexão parcial, considera-se o valor médio da máxima força de corte determinada em ensaios experimentais de tipo push-out realizados pelos presentes autores, [2], com conectores e laje de betão idênticos aos aqui utilizados nas vigas mistas, sendo,

$$V_f = 55.0 \times 4 = 220 \text{ kN.}$$

Ref ^a Betão / Ref ^a Viga	Grau de Conexão	N_c (equação (2)) (kN)	N_{pla} (equação (3)) (kN)	V_f (kN)	Posição do eixo neutro	z (m)	z' (m)	$M_{pl,R}^+$ (kN.m)	ϵ_y (mm/m)
BL38/VM 7	Total	1041.73	443.46	$\min(N_c, N_{\text{pla}})$	Laje de betão	0.0255	-	47.55	21.17
BL39/VM 8	Parcial	1038.16		220	Laje de betão e banzo do perfil metálico	-	0.0058	37.83	31.60

Tabela 5 – Momento flector máximo previsto

sendo,

N_c – máxima força de compressão mobilizável na secção de betão;

N_{pla} – máxima força de tracção mobilizável na secção de aço;

z – posição do eixo neutro plástico, medido a partir da fibra superior da laje de betão;

z' – distância entre a fibra superior da secção de aço e a posição do eixo neutro na secção de aço (situação de conexão parcial).

3. MONTAGEM E DISPOSIÇÕES DO ENSAIO

A configuração do ensaio, imediatamente antes de ser iniciado o carregamento, é representada na Figura 4.

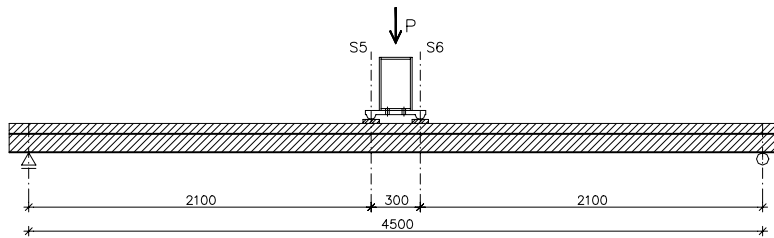


Figura 4 – Montagem de ensaio

A divisão da carga aplicada em duas cargas de igual valor serve apenas para evitar a concentração de tensões no meio vão da viga. Os ensaios são realizados com controlo de deformação e com medição em tempo real da carga aplicada, da deformação vertical ao longo da viga e do deslizamento longitudinal entre as secções de aço e de betão. A deformação a meio vão, que é o parâmetro de controlo, é incrementada à velocidade de 0.02 mm/s. Os transdutores de deslocamento utilizados estão representados na Figura 5 e na Figura 6.

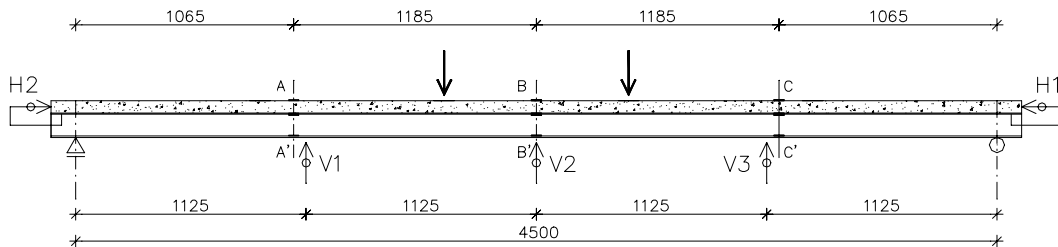


Figura 5 – Monitorização do ensaio



a) Medição de deformação vertical ao longo da viga b) Medição do deslizamento relativo entre secções de aço e de betão, junto aos apoios

Figura 6 – Transdutores de deslocamento distribuídos ao longo da viga

São ainda colocados extensómetros eléctricos nas secções transversais A-A', B-B' e C-C', representadas na Figura 5, de acordo com a disposição apresentada na Figura 7.

Na secção transversal, os extensómetros estão localizados nas faces inferior e superior da laje de betão e nas fibras interiores dos banzos do perfil metálico.

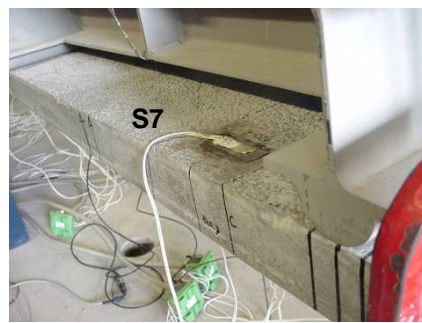
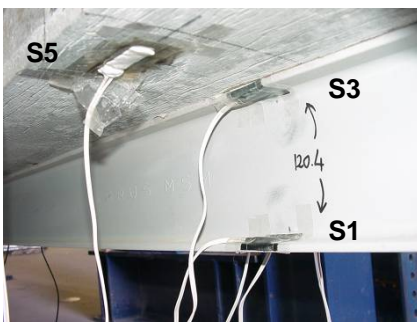
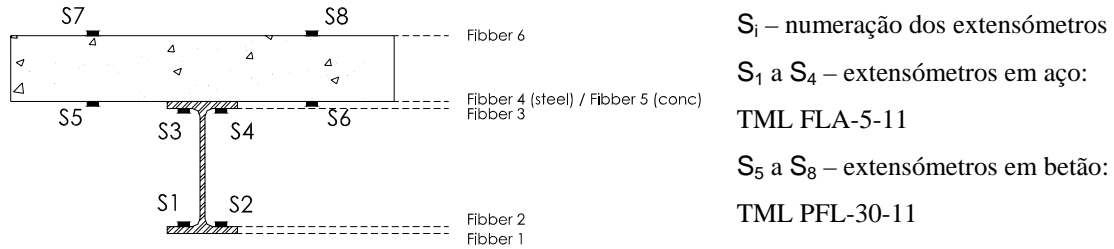


Figura 7 – Disposição dos extensómetros eléctricos na secção transversal da viga mista

Todos os instrumentos de medição utilizados estão ligados a um sistema de aquisição que regista periodicamente os valores medidos, para posterior análise.

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1 Modos de rotura observados

A viga VM7 sofre uma rotura por flexão. A laje de betão leve sofre esmagamento junto à zona de aplicação da carga, na secção S5 (ver Figura 4).

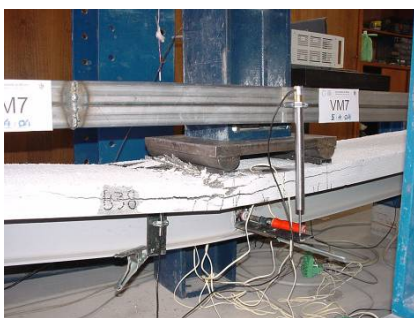


Figura 8 – Viga VM7 em fase de rotura

Nesta zona, forma-se uma fenda longitudinal, a meia altura da laje de betão, que progride em direcção ao meio vão da viga (Figura 8). Na zona de esmagamento do betão, a armadura da laje também sofre encurvadura (Figura 8).

A viga VM8 sofre uma rotura por flexão associada a uma rotura por corte longitudinal na interface entre as secções de aço e de betão (Figura 9). Verifica-se algum esmagamento das fibras superiores da laje de betão, junto às secções S5 e S6, embora muito menos acentuado do que na viga VM7. O esmagamento do betão dá-se em simultâneo com a rotura por corte dos conectores. À rotura dos conectores está associada a uma perda de capacidade de carga.



Figura 9 – Viga VM8 em fase de rotura

Em ambas as vigas testadas, desenvolvem-se fendas transversais na face inferior da laje de betão. Estas fendas apresentam um espaçamento aproximadamente uniforme (Figura 10). O deslizamento na interface entre as secções de aço e de betão é também visível a olho nu (Figura 10).



Figura 10 – Fendilhação distribuída na face inferior da laje e deslizamento aço-betão sobre o apoio

4.2 Momento flector e deformação vertical a meio vão

A Tabela 6 apresenta os valores de momento flector máximo e correspondente deformação vertical, ambos medidos a meio vão da viga. O valor do momento flector medido na viga VM8 é inferior ao valor do momento flector medido na viga VM7.

Ref ^a Betão	Ref ^a Viga	Distribuição de conectores	Tipo de rotura	M_{\max} (kNm)	$d_{z,\text{meio vão}} (M_{\max})$ (mm)
BL38	VM7	Tipo A	Flexão	50.10	124.2 a 130.9
BL39	VM8	Tipo B	Flexão e Corte long.	44.51	236.1 a 244.9

Tabela 6– Momento flector máximo e correspondente deformação vertical (medidos a meio vão das vigas)

A comparação entre a Tabela 5 e a Tabela 6 mostra algumas diferenças. Os valores de momento flector medidos durante os ensaios experimentais são sempre superiores aos valores inicialmente previstos. Estas diferenças podem por um lado resultar da capacidade resistente do aço, já que os valores previstos consideram a sua tensão de cedência, e durante o ensaio é possível que a tensão instalada na secção de aço seja superior a esse valor. Por outro lado, é possível existirem pequenas variações de geometria dos modelos experimentais em relação aos modelos idealizados, apesar de todos os esforços para garantir a geometria definida e de se ter verificado após as amassaduras que em geral todas as dimensões foram respeitadas. Na viga VM8, dimensionada para uma conexão parcial, a diferença referida pode resultar do facto de se subestimar a deformabilidade da conexão, o que resulta numa diminuição do fluxo de corte, e retarda a rotura, já que o esforço de corte nos conectores é inferior ao previsto.

A Figura 11 apresenta os diagramas que relacionam momento flector e deformação vertical, medidos a meio vão das vigas. Observa-se um comportamento elástico na fase inicial de carregamento, já que a relação entre as duas grandezas referidas é linear. Este comportamento era esperado, pois os materiais utilizados – aço e betão leve – apresentaram comportamentos elásticos durante a fase inicial dos ensaios realizados para a sua caracterização.

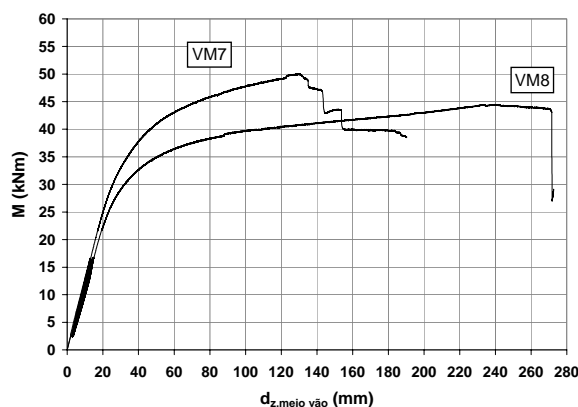


Figura 11 – Momento flector e correspondente deformação vertical medida a meio vão das vigas

Quando $M > 0.45 M_{\max}$, o aumento de deformação dá-se para um menor crescimento do valor de carga aplicada. Deste modo, verifica-se uma perda de rigidez das vigas. Numa fase posterior dos ensaios, ambas as vigas apresentam um comportamento dúctil, já que desenvolvem elevada deformação vertical para um nível de carga que apresenta um crescimento muito mais lento do que na fase elástica de comportamento.

Na fase em que a carga máxima é aplicada à viga, esta apresenta uma deformação crescente para um nível de carga aproximadamente constante, pelo que se apresenta o valor de deformação em forma de intervalo (ver Tabela 6).

A viga VM8, dimensionada para uma conexão parcial, apresenta uma rigidez elástica inicial inferior à da viga VM7, dimensionada para uma conexão total. Como são colocados menos conectores ao longo da interface, é aplicada uma maior carga a cada conector, o que resulta numa maior deformação desse mesmo conector para o mesmo carregamento total aplicado à viga. A deformabilidade da conexão proporciona uma menor interação entre a laje de betão e o perfil metálico, o que resulta num aumento da deformação vertical da viga.

4.3 Diagramas de extensão

A Figura 12 ilustra os diagramas de extensão medidos a meio vão das vigas VM7 e VM8. Os diagramas representados correspondem aos valores de momento flector máximo aplicado e a 90% e 40% desse valor.

Para $0.4M_{\max}$, a distribuição de extensões é uniforme, com compatibilidade quase total entre as secções de aço e de betão, nas duas vigas, o que significa que enquanto $M < 0.4M_{\max}$, a conexão entre as secções de aço e de betão garante a transmissão da força de corte e a sua deformabilidade praticamente não influencia o comportamento global da viga.

Para $M = 0.9M_{\max}$ ou $M = M_{\max}$, a hipótese de interação total não é válida, já que os diagramas de extensão deixam de ser uniformes, verificando-se uma variação de extensão entre a viga metálica e a laje de betão. Para $M = 0.9M_{\max}$, a variação de extensão na interface aço-betão da viga VM8 é muito superior à que se verifica na viga VM7, provocando uma alteração significativa no diagrama de extensões. As fibras superiores da secção de aço passam a estar traccionadas e as extensões nas fibras inferiores apresentam valores muito superiores aos da viga VM7. Do mesmo modo, as extensões de tracção nas fibras inferiores da secção de betão são muito superiores em VM8.

Devido à ruína dos extensómetros, não foi possível de obter o diagrama de extensões da viga VM8 para $M = M_{\max}$.

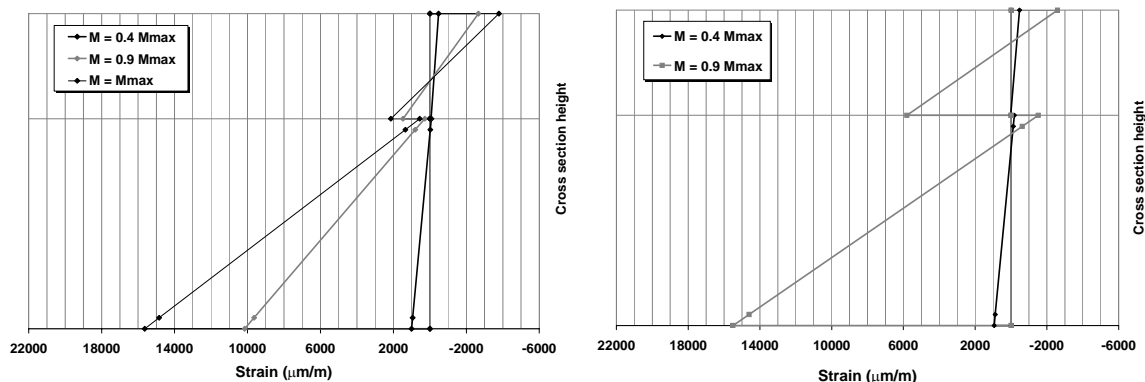


Figura 12 – Diagramas de extensão para as vigas VM7 (esquerda) e VM8 (direita)

A Figura 13 apresenta os diagramas de variação de extensão na interface aço-betão, para as vigas VM7 e VM8. A viga VM8 apresenta um crescimento da extensão de deslizamento desde os primeiros carregamentos, enquanto que a viga VM7 apenas apresenta esse crescimento quando $M > 0.4M_{max}$.

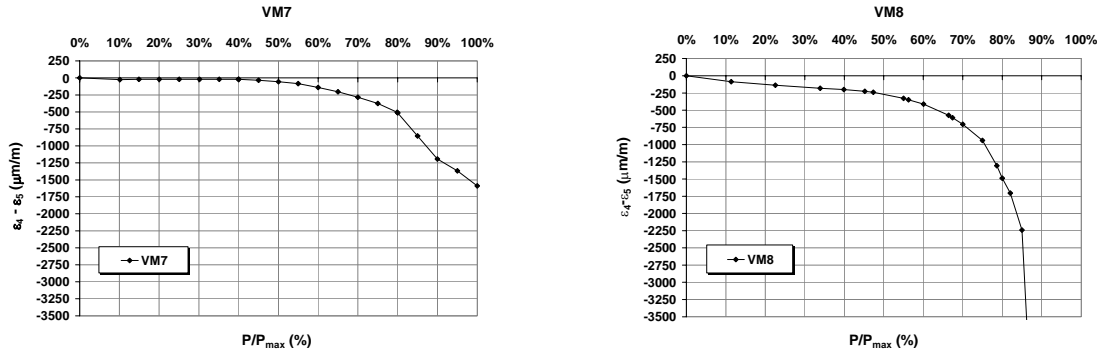
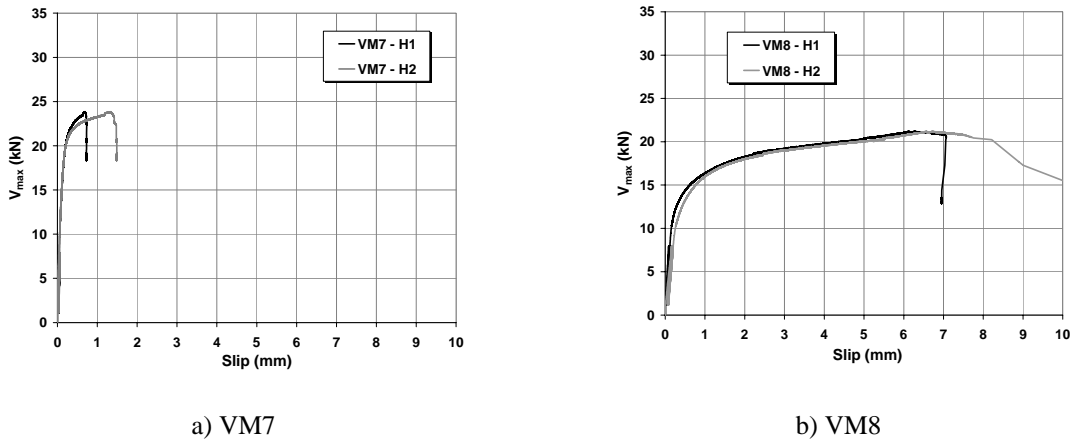


Figura 13 – Variação da extensão de deslizamento na interface aço-betão ($\epsilon_4 - \epsilon_5$), para VM7 e VM8

4.4 Deslizamento na interface entre as secções de aço e de betão leve

A Figura 14 apresenta os valores de deslizamento medidos na interface entre as secções de aço e de betão das vigas VM7 e VM8, junto a cada um dos apoios. O deslizamento medido nos dois apoios é similar em ambas as vigas, durante uma fase inicial do carregamento. À medida que a carga aplicada aumenta, o deslizamento tende a ser superior de um dos lados da viga. A rotura, seja por esmagamento do betão ou por corte na conexão tende a verificar-se do lado onde os deslizamentos são maiores. Os valores de deslizamento medidos para VM8 são muito superiores aos valores de deslizamento medidos para VM7. Estas diferença observa-se também na fase inicial do carregamento.



a) VM7

b) VM8

Figura 14 – Força de corte vs. deslizamento junto aos apoios para as vigas VM7 e VM8

O dimensionamento para uma conexão parcial impede que a rotura por flexão ocorra antes da rotura por conexão longitudinal. Deste modo, desenvolvem-se elevados valores de deslizamento antes da rotura. Tal como se tinha observado em relação à deformação vertical das vigas, verifica-se em ambas as vigas que a conexão é dúctil, já que se desenvolvem elevados valores de deslizamento enquanto a capacidade de carga da viga é mantida. A deformação vertical das vigas é influenciada pela ocorrência de deslizamento, já que para o mesmo valor de carga aplicada, a deformação vertical da viga VM8 é significativamente superior à deformação vertical da viga VM7. Deste modo, as medições de deslizamento mostram que o comportamento dúctil das vigas mistas resulta do comportamento dúctil aço, do comportamento dúctil da associação aço-betão e ainda do comportamento dúctil da conexão entre os dois materiais.

A investigação experimental desenvolvida por [5], mostrou que a relação entre força de corte e o deslizamento, verificada para pernos de cabeça inseridos em lajes maciças de betão de massa volúmica normal, apresenta uma fase de comportamento dúctil até um valor de deslizamento máximo correspondente a s_f . Uma análise estatística dos resultados obtidos em ensaios experimentais permitiu aos autores definir uma relação entre o valor de s_f , o diâmetro dos conectores e a resistência à compressão do betão utilizado, que é dada pela equação (4),

$$s_f / d = 0.45 - 0.0021 f_{cm} \quad (4)$$

onde,

s_f – deslizamento máximo, medido imediatamente antes da rotura do perno;

f_{cm} – resistência à compressão do betão, medida em provetes cilíndricos;

d – diâmetro da haste do perno.

Por sua vez, o valor do deslizamento correspondente à carga máxima aplicada ao conector é definido com a equação (5),

$$s_u / d = 0.41 - 0.0030 f_{cm} \quad (5)$$

onde, s_u é o valor de deslizamento correspondente ao valor de carga máxima.

A Tabela 7 apresenta uma comparação entre os valores de deslizamento medidos experimentalmente e os valores de deslizamento obtidos com as equações (4) e (5) para a viga VM8 (dimensionada para uma conexão parcial). Os valores de deslizamento obtidos com as equações referidas são significativamente inferiores aos valores de deslizamento obtidos experimentalmente. Esta comparação mostra que o deslizamento medido em pernos de cabeça inseridos em lajes maciças de betão normal tende a ser inferior ao deslizamento obtido em lajes maciças de betão leve.

	f_{cm} (MPa)	s_u (experimental) (mm)	s_f (experimental) (mm)	s_u (equação (4)) (mm)	s_f (equação (5)) (mm)
VM8	58.16	6.51	7.37	3.06	4.26

Tabela 7 – Comparação entre os valores de deslizamento medidos experimentalmente na viga VM8 e obtidos com as equações (4) e (5)

5. ANÁLISE NUMÉRICA

As vigas ensaiadas foram simuladas com um modelo de elementos finitos 2D que procura reproduzir o comportamento das vigas quando sujeitas ao carregamento definido. Este modelo numérico foi construído com o software ATENA[®]. A geometria dos modelos, a malha de elementos finitos, os apoios e o carregamento são representados na Figura 15. Por efeito de simetria, apenas metade da viga é considerada na análise. A malha de elementos finitos é composta por elementos rectangulares e triangulares com 0.01 m. São considerados elementos de interface entre as secções de aço e de betão leve.

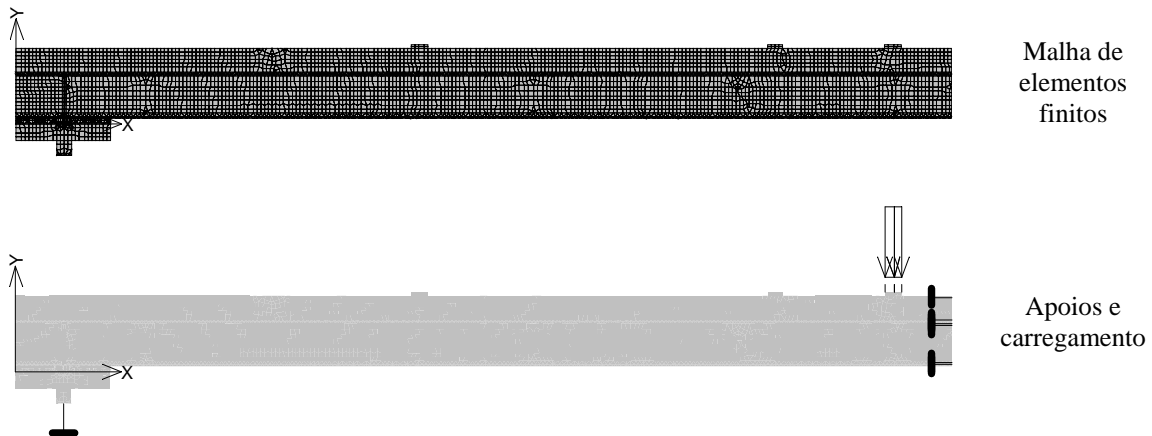


Figura 15 – Malha de elementos finitos, apoios e carregamento

5.1 Análise linear para avaliar a rigidez à flexão das vigas mistas

A rigidez à flexão de vigas mistas é afectada pela perda de interacção entre a laje de betão e o perfil metálico. A perda de interacção resulta da deformabilidade da conexão, que usualmente apresenta um comportamento elástico na fase inicial do diagrama força de corte/deslizamento. Isto significa, que mesmo para cargas de valor reduzido, existe sempre deslizamento na interface aço-betão e consequentemente perda de interacção entre as secções de aço e de betão. Quando a força de corte é elevada, o comportamento da conexão deixa de ser elástico, já que se verificam valores de deslizamento progressivamente crescentes para pequenos acréscimos de carga. Nesta fase, a perda de interacção é maior.

A consequência de haver uma perda de interacção é a menor rigidez da viga e consequentemente o aumento da sua deformação vertical. O objectivo da análise que se segue é verificar se o valor da rigidez da conexão, determinado a partir dos resultados obtidos em ensaios de tipo push-out, [2], é adequado para a análise de vigas mistas e ainda verificar qual o nível de carga para o qual o comportamento da conexão deixa de ser elástico.

O comportamento não linear dos materiais que constituem as vigas, aço e betão, não é considerado nesta fase da análise. Considera-se ainda que na fase inicial de carregamento, existe uma relação linear entre as forças de corte aplicadas na conexão e o deslizamento que

aí se desenvolve, tal como se verificou em ensaios de tipo push-out realizados, [6]. A rigidez da conexão é dada pela relação entre força de corte aplicada e correspondente deslizamento, para um valor de carga pré-definido. O valor da rigidez da conexão determinado é igual a $k=220$ kN/mm/perno, [2]. A ligação entre as secções de aço e de betão é modelada com elementos de interface. No modelo numérico considera-se que:

K_N = rigidez de um perno de cabeça \times número de pernos colocados / (largura do banzo da viga metálica \times vão da viga)

Vigas do Tipo A (VM7): $K_N = 220 \times 16 / (0.064 \times 4.5) = 12222$ kN/m²/mm

Vigas do Tipo B (VM8): $K_N = 220 \times 8 / (0.064 \times 4.5) = 6111$ kN/m²/mm

Os resultados da análise efectuada são representados na Figura 16. Verifica-se que existe uma boa concordância entre os resultados experimentais e os resultados numéricos na fase inicial de carregamento. Os diagramas apresentados na Figura 16 mostram que a perda de rigidez das vigas se inicia para níveis de carga próximos de $0.5P_{max}$. A partir deste nível de carregamento, a relação entre a carga aplicada à viga e a deformação vertical medida deixa de ser linear.

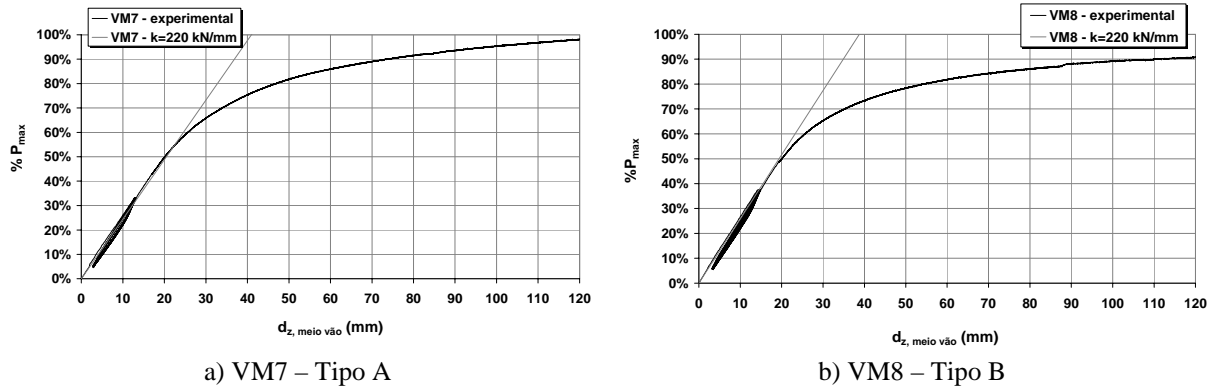


Figura 16 – Relação entre a carga aplicada e a correspondente deformação vertical medida a meio vão

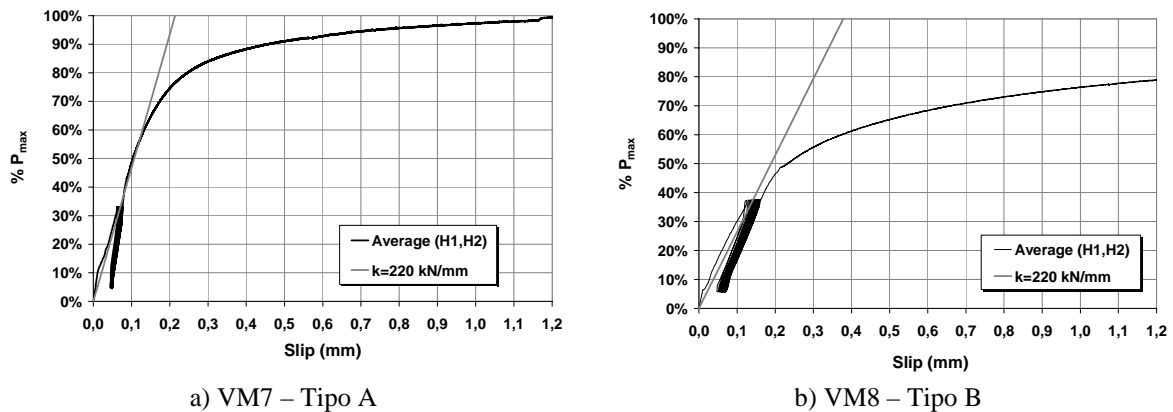


Figura 17 – Relação entre o nível de carga aplicado à viga e o correspondente deslizamento

A mesma comparação pode agora ser estabelecida entre o deslizamento na interface aço-betão sobre os apoios e a carga total aplicada às vigas, tal como se apresenta na Figura 17.

Mais uma vez se verifica uma boa concordância entre os resultados obtidos com o modelo numérico e os resultados experimentais, sendo a fase de comportamento elástico da conexão bem traduzida pelos modelos numéricos.

Nos diagramas apresentados na Figura 17 é mais difícil identificar o início do comportamento não linear da conexão do que nos diagramas da Figura 16. De qualquer modo, confirma-se que a mudança de inclinação das curvas experimentais ocorre aproximadamente para $P = 0.5P_{\max}$ no caso de VM7 e para um valor um pouco inferior no caso de VM8.

5.2 Comportamento não linear

O objectivo principal da análise que se segue é identificar se a fase de comportamento não linear verificado durante os ensaios experimentais das vigas VM7 e VM8 é mais afectada pelo comportamento não linear da conexão ou pelo comportamento não linear dos materiais estruturais utilizados nas vigas.

Neste caso, considera-se no modelo numérico o diagrama de tensão-extensão completo relativo a cada um dos materiais utilizados. As curvas de tensão-extensão definidas para o betão leve consideram os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade apresentados na Tabela 2. O modelo constitutivo considera ainda os valores de resistência à tracção e energia de fractura determinados experimentalmente e apresentados na Tabela 3. Os valores de resistência à tracção e energia de fractura considerados no modelo numérico correspondem a $f_{lt} = 3.9 \text{ MPa}$ e $G_{Fm} = 78 \text{ N/m}^2$.

Para o aço, é definida uma relação bilinear entre tensão e extensão. O módulo de elasticidade considerado é igual a 210 GPa para a fase inicial de carregamento. A tensão de cedência está definida na Tabela 4. Após a tensão de cedência, considera-se um módulo de elasticidade por endurecimento igual a 1.5 GPa. Este parâmetro foi calculado a partir dos resultados obtidos em ensaios de tracção realizados em provetes de aço idênticos aos utilizados nas vigas.

Considera-se que os elementos de interface utilizados simulam bem a situação de conectores uniformemente espaçados ao longo da viga. A tensão de corte máxima na conexão é simulada com o valor da coesão, c . Nos ensaios de tipo push-out realizados verificou-se que a carga última de um conector tipo perno de cabeça embebido numa laje de betão leve com as características já descritas é igual a 55 kN, [2]. Deste modo calcula-se o valor da coesão para cada uma das vigas testadas:

$$\text{Viga de tipo A – VM7: } c = 55.0 \times 8 / (0.064 \times 2.25) = 3.06 \text{ MPa} \cong 3 \text{ MPa}$$

$$\text{Viga de tipo B – VM8: } c = 55.0 \times 4 / (0.064 \times 2.25) = 1.53 \text{ MPa} \cong 1.5 \text{ MPa}$$

A curva força de corte vs. deslizamento considerada no modelo numérico é também bilinear. A inclinação correspondente à segunda fase é considerada nula.

A existência de armadura na laje de betão leve também é considerada. O aço utilizado nas armaduras é modelado tal como aconteceu para o aço utilizado nas vigas metálicas. O valor da respectiva tensão de cedência é apresentado na Tabela 4.

No caso de VM7, a intersecção entre as curvas numérica e experimental verifica-se quando P/P_{\max} é aproximadamente igual 0.55, tanto para a curva carga-deformação vertical como para a curva carga-deslizamento. Para este nível de carga, os diagramas de extensão a meio vão das vigas mostram que tanto a secção de aço como a secção de betão estão a funcionar em

regime elástico (Figura 18^a). As fibras posicionadas no banzo inferior do perfil metálico apresentam um valor de extensão próximo da extensão de cedência do aço ($\varepsilon_y = 1599 \mu\text{m/m}$), o que significa que o comportamento não linear da viga VM7 observado quando $P/P_{\text{max}} > 0.55$ é inicialmente condicionado pela secção de aço. De acordo com as extensões medidas, as primeiras fendas na secção de betão de VM7 só aparecem quando $P/P_{\text{max}} > 0.70$. Para a viga VM8, verifica-se que a intersecção entre as curvas numérica e experimental de carga-deformação vertical ocorre quando P/P_{max} é aproximadamente igual 0.45. Por sua vez, a intersecção entre as curvas numérica e experimental de carga-deslizamento ocorre entre 45% and 50% de P_{max} . O diagrama apresentado na Figura 18b mostra que nem a secção de aço nem a secção de betão estão a condicionar o comportamento não linear de VM8, já que os valores de extensão medidos estão longe dos limites que condicionam o comportamento não linear dos materiais em causa. Deste modo, o comportamento não linear da viga apenas pode resultar do comportamento não linear da conexão entre as secções de aço e de betão leve.

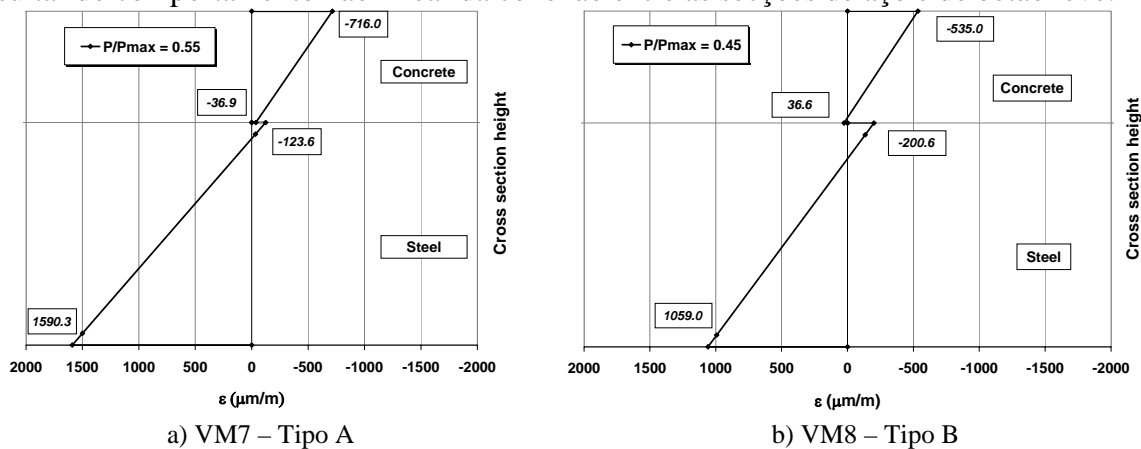


Figura 18 – Diagramas de extensão nas vigas VM7 (quando $P/P_{\text{max}} = 0.55$) e VM8 (quando $P/P_{\text{max}} = 0.45$)

As curvas completas de carga-deformação vertical são também obtidas com os modelos numéricos. Estes modelos confirmam que a existência de deslizamento na interface aço-betão induz redistribuição de esforços ao longo da interface entre as secções que compõem o elemento estrutural misto. Por sua vez, a redistribuição de tensões ao nível da secção transversal resulta de uma transferência de esforço da secção de betão para a secção de aço. A redistribuição de esforços ao longo da interface resulta numa transferência de força de corte dos conectores mais solicitados para os conectores menos solicitados.

A Tabela 8 apresenta uma comparação ente os valores experimentais de momento flector máximo e deformação vertical medidos a meio vão das vigas e os correspondentes valores obtidos com os modelos numéricos construídos no programa ATENA[®]. Verifica-se que os valores numéricos de momento flector são um pouco inferiores aos valores experimentais medidos. Tal como se apresenta na Tabela 8, a relação entre momento flector máximo numérico e momento flector máximo experimental varia entre 84% e 95% para as vigas analisadas. A comparação entre deformação vertical máxima apresenta já diferenças consideráveis. Verifica-se que os modelos numéricos não são capazes de prever a deformação

máxima que estas vigas podem atingir.

Refª betão	Refª viga	$M_{\max, \text{exp}}$ (kNm)	$d_{z, \text{meio vão}} (M_{\max})$ (mm)	$M_{\max, \text{Atena}}$ (kNm)	$d_{z, \text{meio vão}} (M_{\max})$ (mm)	$M_{\max, \text{Atena}} / M_{\max, \text{exp}}$ (%)
BL38	VM7	50.10	124.2 to 130.9	47.48	93.7	94.8
BL39	VM8	44.51	236.1 to 244.9	37.25	134.6	83.8

Tabela 8 – Momento flector máximo e correspondente deformação vertical, medidos a meio vão: comparação entre resultados experimentais e numéricos

A Figura 19 apresenta uma comparação entre as curvas experimentais e numéricas que relacionam o momento flector e a correspondente deformação vertical medidos a meio vão das vigas mistas. Numa fase inicial do carregamento, as curvas experimental e numérica apresentam uma evolução praticamente idêntica. As curvas numéricas acompanham ainda a mudança de comportamento de ambas as vigas, quando se verifica uma perda da sua rigidez, o que é de salientar, já que como se viu antes, a perda de rigidez da viga VM7 está associada à cedência das fibras traccionadas da secção de aço, enquanto que a perda de rigidez da viga VM8 está associada ao comportamento da conexão. Os modos de rotura identificados com os modelos numéricos são concordantes com os modos de rotura identificados na análise experimental:

- verifica-se o esmagamento das fibras superiores da laje de betão nas zonas de aplicação da carga para a viga VM7;

- verifica-se o esmagamento das fibras superiores da laje de betão nas zonas de aplicação da carga para a viga VM8, associada à impossibilidade de redistribuir mais tensões de corte ao longo da interface aço-betão, já que a tensão máxima está instalada ao longo de todo o seu desenvolvimento.

Os modelos numéricos construídos com o software ATENA[®] mostram que existe redistribuição das tensões de corte ao longo da interface entre as secções de aço e de betão. Tendo em conta que os valores de deslizamento medidos experimentalmente são superiores aos valores de deslizamento obtidos no modelo numérico, considera-se que também se verificou a redistribuição total de tensões de corte ao longo da interface nos modelos experimentais.

É importante ter em conta que a redistribuição das tensões de corte só é possível por que os pernos de cabeça possuem uma elevada capacidade de deformação. Este aspecto é particularmente importante, já que o comportamento dúctil da viga mista só é garantido se essa capacidade de deformação existir. Se a conexão for rígida, os conectores posicionados junto aos apoios sofrem rotura assim que a tensão máxima de corte se verificar, o que corresponde a uma carga total aplicada à viga de valor inferior.

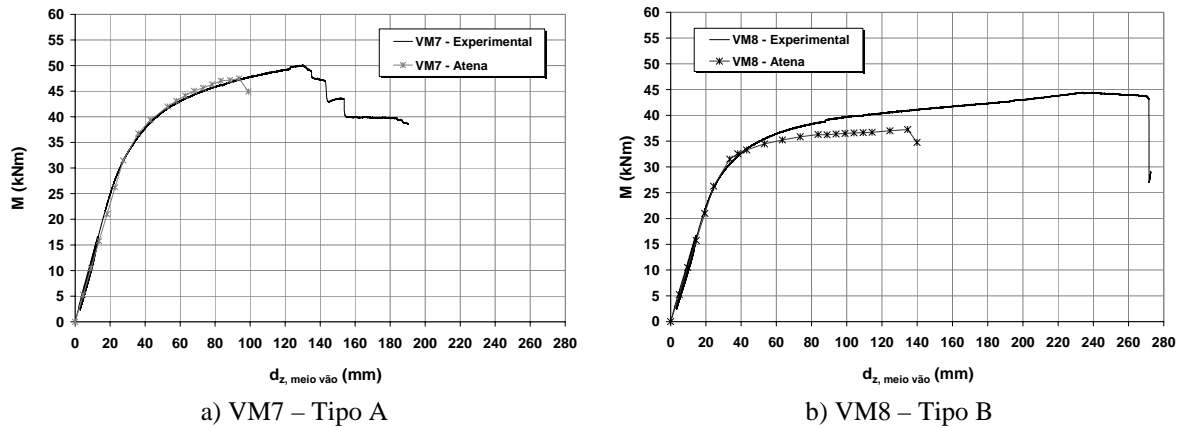


Figura 19 – Momento flector vs. deformação vertical, medidos a meio vão das vigas mistas: comparação entre resultados experimentais e numéricos

A Figura 20 apresenta uma comparação entre o valor do esforço transversal máximo e o valor do deslizamento sobre o apoio. Na fase inicial de carregamento, verifica-se uma boa concordância entre as curvas numérica e experimental. Na fase final do carregamento, o valor experimental de deslizamento máximo é sempre superior ao valor de deslizamento obtido numericamente. Para a viga VM7, o deslizamento desenvolvido no modelo numérico é sempre elástico. Em ambas as vigas, os deslizamentos máximos obtidos numericamente correspondem a cargas aplicadas que são inferiores às cargas máximas obtidas experimentalmente. Estes resultados são coerentes com os valores de deformação vertical do modelo numérico, já que um valor inferior de deslizamento no modelo numérico corresponde a um valor inferior de deformação vertical, quando se compara como os modelos experimentais.

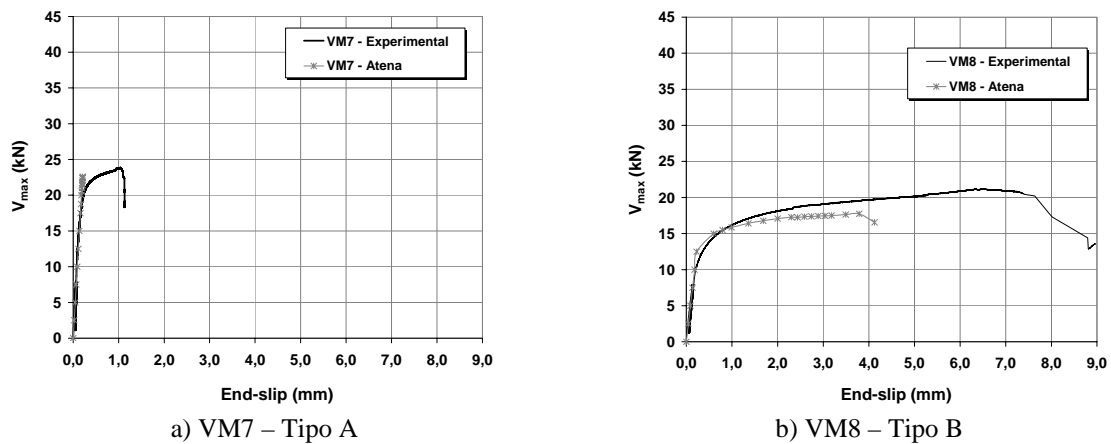


Figura 20 – Esforço transversal vs. deslizamento sobre o apoio: comparação entre resultados experimentais e numéricos

7. CONCLUSÕES

O trabalho realizado permitiu analisar o comportamento de vigas mistas aço-betão leve, em que a laje de betão e o perfil metálico estão associados por meio de pernos de cabeça. Em termos gerais, o comportamento observado é parecido com o que se poderia esperar se fosse utilizado um betão de massa volúmica normal. O comportamento da conexão entre aço e betão é similar ao que tinha sido anteriormente observado em ensaios de tipo push-out. A rotura dá-se por corte nos conectores posicionados mais próximo dos apoios, junto à sua base. Nas vigas testadas, não foi identificada fendilhação nas faces superiores das lajes de betão leve, junto aos conectores mais solicitados.

Nas vigas dimensionadas para uma conexão parcial verificou-se uma rotura por corte longitudinal e maior deslizamento entre as secções de aço e de betão, enquanto que nas vigas dimensionadas para uma conexão total se verificou uma rotura por flexão e menor deslizamento. A deformabilidade da conexão é um aspecto fundamental, já que influencia o comportamento das vigas.

Os valores máximos de carga e de momento flector aplicados à viga mostram que foi necessário haver redistribuição de esforço de corte ao longo da interface entre aço e betão. As vigas sofreram roturas de tipo dúctil, já que se desenvolveu elevada deformação enquanto a capacidade de carga se mantinha mais ou menos constante. Os modelos numéricos conseguiram prever aproximadamente o valor das cargas máximas a aplicar às vigas, mas não conseguiram prever com boa aproximação a deformação vertical máxima daí resultante. Apesar disso, os modos de rotura puderam ser identificados.

REFERÊNCIAS

- [1] Daly, A. F. G., “Use of LWAC in Bridges”, Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Kristiansand, Norway, Junho de 2000, pp. 345-354.
- [2] I. Valente e P. J. S. Cruz, “A utilização de betões leves em vigas mistas aço-betão”, Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Dezembro de 2006 (em CD-Rom).
- [3] J. Hegger et al., “Studies on the ductility of shear connectors when using high-strength concrete”, International Symposium on Connections between Steel and Concrete, University of Stuttgart, Setembro 2001, Vol.2, pp. 1024-1045.
- [4] EN 1994-1-1, ENV 1994: Design of composite steel and concrete structures. CEN, 1994.
- [5] D. J. Oehlers, C. G. Coughlan, “The shear stiffness of stud shear connectors in composite beams”, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, Outubro 1986, Vol. 6, pp. 273-284.
- [6] I. Valente, P. J. S. Cruz, J. Hegger, C. Goralski e S. Rauscher, “Experimental studies on shear connection between steel and lightweight concrete using studs”, Eurosteel 2005 – 4th European Conference on Steel and Composite Structures, Junho de 2005, Volume B, pp. 4.3-75 a 4.3-82.