

MODELAÇÃO NÃO LINEAR DE VIGAS MISTAS EM AÇO E BETÃO

Isabel B. Valente ^a, Ricardo Lage ^b e José António C. Matos ^c

^{a,b,c} *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho*

Resumo. Este trabalho propõe-se a analisar numericamente, o comportamento estrutural de vigas mistas em aço e betão, em que a laje de betão e o perfil metálico estão associados por conetores. Os modelos numéricos construídos contemplam vigas mistas simplesmente apoiadas, com grau de conexão total e parcial e dois tipos de carregamentos, uniformemente distribuído e concentrado a meio vão. Na modelação numérica realizada são utilizados os dados experimentais referentes a geometria, propriedades dos materiais, condições de carregamento, distribuição dos apoios e distribuição dos conetores que são descritos em [1].

1. Introdução

As vigas mistas são elementos estruturais constituídos pela associação de um perfil de metálico com uma laje de betão, visando aproveitar as vantagens estruturais de ambos os materiais. A ligação entre a secção metálica e a secção de betão é normalmente feita através de conetores soldados ao banzo do perfil metálico.

A partir da geometria, configuração e dados de modelos experimentais anteriormente testados [1], realizam-se modelos numéricos que permitem comparar os resultados obtidos numericamente com os resultados obtidos por via experimental. Nesse sentido, constroem-se modelos numéricos de vigas mistas em aço e betão, simplesmente apoiadas, com grau de conexão total ou parcial, com grau de interação parcial e dois tipos de carregamento: concentrado a meio vão e distribuído. Os resultados obtidos são comparados com os correspondentes resultados experimentais de modo a validar os modelos numéricos construídos.

Numa segunda fase, pretende-se introduzir alterações nos modelos base que coloquem em evidência a importância de alguns dos parâmetros mais influentes no comportamento de vigas mistas. Especificamente, pretende-se verificar a influência dos conetores (capacidade resistente e deformabilidade) e de algumas propriedades dos materiais utilizados (tensão de cedência do aço do perfil metálico e módulo de elasticidade do betão). Esta verificação será realizada pela análise do deslocamento vertical a meio vão, da capacidade de carga das vigas mistas e do deslizamento longitudinal na interface da laje de betão e da viga metálica.

Todos os modelos são realizados no programa Atena[®], que tem como base o método dos elementos finitos associado a uma análise não linear material e geométrica.

2. Vigas em estudo

As vigas mistas em estudo são constituídas por um perfil metálico do tipo IPE120 e por uma laje de betão com as dimensões de 350 mm × 60 mm. Os conetores utilizados são pernos de cabeça e apresentam 13 mm de diâmetro e 50 mm de altura. A sua distribuição está dividida em 2 tipos, tal como representado na Fig. 1 e na Tabela 1.

Estas vigas foram anteriormente testadas com recurso a ensaios experimentais realizados no Laboratório de Estruturas de Eng^a Civil da Universidade do Minho [1].

Tabela 1: Distribuição dos conetores ao longo da viga

Tipo de Viga	Grau de Conexão	N.º total de Conetores
Tipo A	Total	16
Tipo B	Parcial	8

A distribuição dos conetores do tipo A confere uma conexão total entre a laje de betão e o perfil metálico. Na distribuição do tipo B, a conexão imposta é parcial. Em todos os casos, os conetores são uniformemente espaçados ao longo da viga.

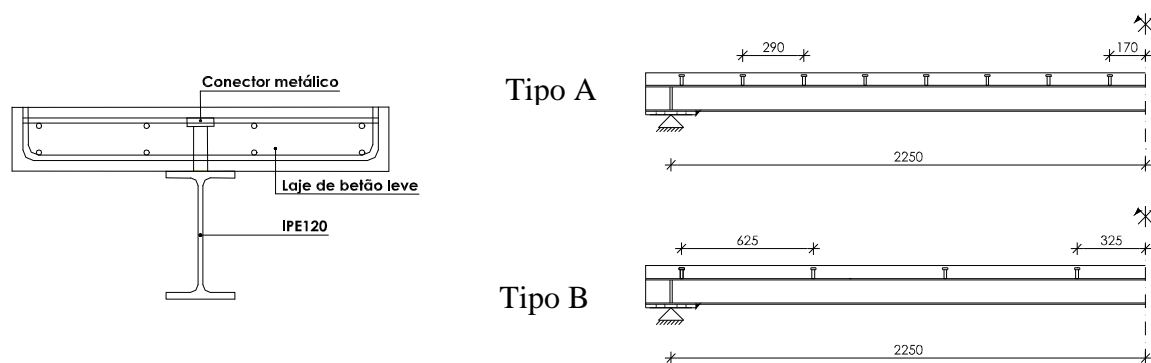


Fig. 1: Seção transversal e distribuição dos conetores

Para a realização do estudo das vigas são considerados dois casos de carga. No primeiro caso, são aplicadas quatro cargas concentradas, distribuídas ao longo da viga com igual espaçamento, de modo a representar, aproximadamente, a situação em que a viga está sujeita a uma carga uniformemente distribuída. No segundo caso, são aplicadas duas cargas concentradas próximas, localizadas na zona de meio vão, de modo a representar uma situação de carga concentrada. A Tabela 2 resume cada viga em estudo, de acordo com a distribuição dos conetores e o correspondente caso de carga. Todas as vigas são dimensionadas de acordo com os pressupostos da EN 1994-1-1 [2].

Tabela 2: Vigas em estudo

Viga	Distribuição dos conetores	Casos de carga	Esquema estrutural
VM1	Tipo A (conexão total)	Caso 1	
VM2	Tipo B (conexão parcial)	Caso 1	
VM3	Tipo A (conexão total)	Caso 2	
VM4	Tipo B (conexão parcial)	Caso 2	

São também realizados ensaios experimentais para caracterização das propriedades dos materiais e do comportamento dos conectores inseridos em lajes de betão leve, [1]. Na modelação que se segue, utilizam-se os valores médios das propriedades dos materiais apresentados na Tabela 3, obtidos em ensaios experimentais, [1].

Tabela 3: Propriedades dos Materiais

Viga	Laje de betão leve	Perfil metálico	Armadura da laje de betão	Conexão
VM1	$f_{cm} = 55.6 \text{ MPa}$			
VM2	$E_c = 22.08 \text{ GPa}$	$f_y = 335.7 \text{ MPa}$	$f_y = 583.4 \text{ MPa}$	$K = 220 \text{ kN/mm/conetor}$
VM3	$f_t = 3.9 \text{ MPa}$	$f_u = 491.1 \text{ MPa}$	$f_u = 606.1 \text{ MPa}$	$P_{max} = 55 \text{ kN/conetor}$
VM4	$G_f = 78 \text{ N/m}$			
	$\rho = 1791 \text{ kg/m}^3$			

3. Análise e interpretação dos resultados

Para a modelação e análise não linear do comportamento das vigas mistas, é utilizado o programa de elementos finitos ATENA[®]. Na Figura 2 apresenta-se a malha de elementos finitos utilizada nas vigas submetidas ao Caso de carga 1 (ver Tabela 1), bem como as condições de apoio e de carregamento consideradas. De forma a repetir as condições dos ensaios, o carregamento é aplicado, considerando uma deformação incremental do ponto médio da viga metálica que faz a distribuição da carga. O modelo numérico é descrito com mais pormenor em [3].

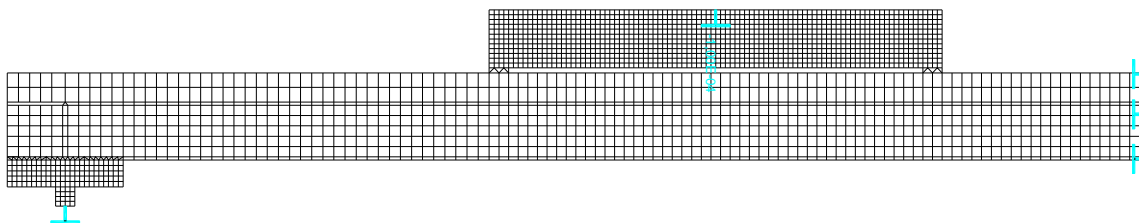


Fig. 2: Malha de elementos finitos, condições de apoio e carregamento

Na modelação realizada, consideram-se elementos de interface entre a laje de betão e o perfil metálico, de forma a simular o comportamento da conexão. Os elementos de interface permitem fazer variar o grau de conexão (conexão total e conexão parcial) e ainda considerar a interação parcial entre o perfil metálico e a laje de betão.

A rotura dos elementos de interface é traduzida por uma lei de Mohr-Coulomb, onde se estabelece o valor da coesão a partir da capacidade resistente dos conectores, tal como se mostra na Eq. (1) e por um ângulo de atrito nulo, já que a tensão tangencial máxima não depende da tensão normal instalada, que por sua vez apresenta valores reduzidos. O comportamento elástico da conexão é traduzido pela respetiva rigidez tangencial, definida de acordo com a Eq. (2), a partir de um valor da rigidez obtido experimentalmente (ver Tabela 3).

$$c = P_{\max} \times N^{\circ} \text{ Conectores} / (\text{Largura da Viga de Aço} \times \text{Comprimento}) \quad (1)$$

$$K_{tt} = K \times N^{\circ} \text{ Conectores} / (\text{Largura da Viga de Aço} \times \text{Comprimento}) \quad (2)$$

3.1 Momento fletor e deformação vertical a meio vão

Na Fig. 3 apresentam-se os resultados obtidos nos modelos das vigas VM1, VM3, VM2 e VM4, que relacionam o momento fletor e o respetivo deslocamento a meio vão. Estes resultados estão sobrepostos com os resultados experimentais de [1].

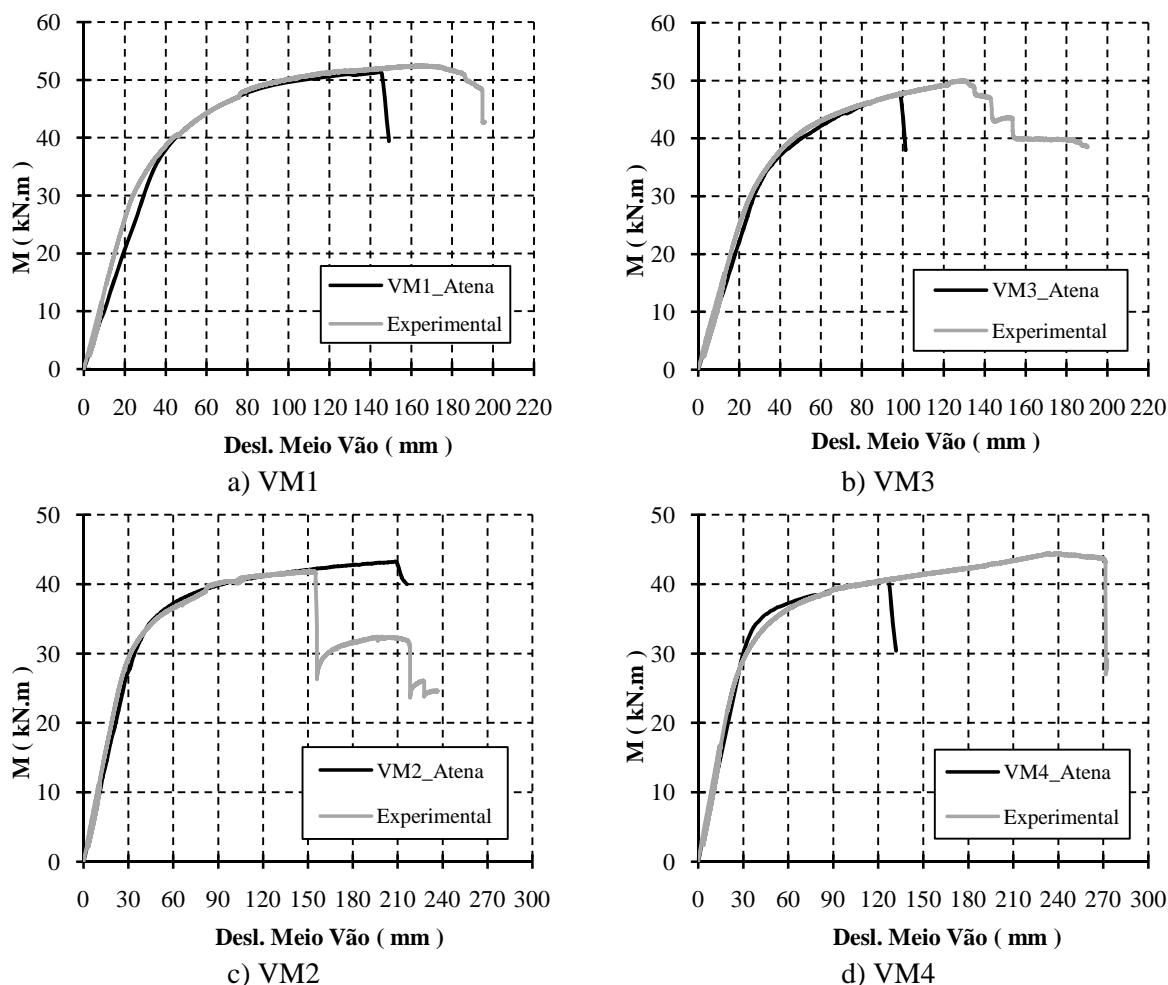


Fig. 3: Momento-deslocamento a meio vão das vigas VM1, VM3, VM2 e VM4

Verifica-se que os modelos numéricos apresentam um comportamento idêntico aos modelos experimentais quando se compara a fase elástica do comportamento. Quando o comportamento deixa de ser elástico, os modelos numéricos também conseguem acompanhar bem essa mudança de comportamento das vigas. Isto indica que os modelos numéricos estão bem calibrados e representam bem o comportamento das vigas mistas. A principal diferença que se encontra entre os modelos numéricos e os resultados experimentais é ao nível da deformação em fase de rotura, onde os modelos numéricos não conseguem desenvolver tanta deformação vertical como a que se verificou durante os ensaios experimentais.

4. Análise paramétrica

É realizada uma análise paramétrica que permite estabelecer quais os parâmetros que mais influenciam o comportamento das vigas mistas. Inicialmente, considera-se a variação dos seguintes parâmetros: módulo de elasticidade do betão, tensão de cedência do aço utilizado

nos perfis metálicos, deformabilidade da conexão (traduzida por K_u) e capacidade resistente da conexão (traduzida por c).

4.1 Tensão de cedência no aço

Na modelação das vigas de referência considerou-se uma classe inicial de um aço S275, já que experimentalmente se determinou a tensão de cedência, $f_y = 335.7$ MPa e a tensão de rotura, $f_u = 491.1$ MPa. Para compreender a influência do aço utilizado no perfil metálico, considera-se uma classe superior, S460, onde $f_y = 460$ MPa e $f_u = 540$ MPa. Esta variação é considerada nas vigas com conexão total submetidas aos carregamentos de tipo 1 e 2 (ver Tabela 2), respetivamente, as vigas VM1 e VM3.

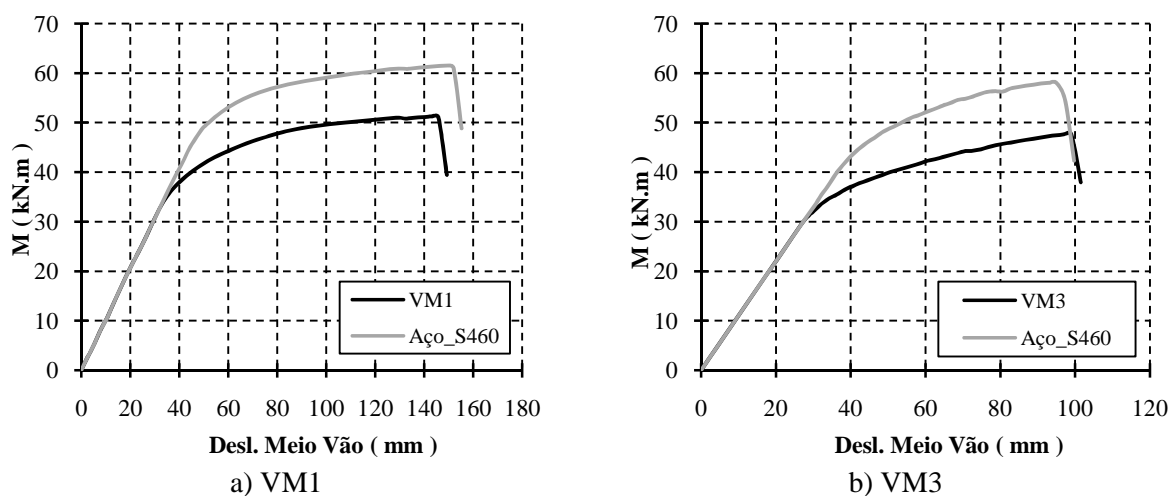


Fig. 4: Variação da tensão de cedência do aço na viga VM1 e VM3

No início do carregamento, ambas as vigas apresentam um comportamento elástico que resulta de ambos os materiais, aço e betão, e dos elementos de conexão se comportarem em regime elástico. Como se associam dois materiais com comportamentos distintos que por sua vez estão ligados através de elementos de conexão, é necessário avaliar qual dos três elementos condiciona a mudança de comportamento que se observa na Fig. 4. Uma vez que a laje de betão está completamente comprimida e o perfil de aço está quase todo tracionado, a alteração do comportamento global da viga resulta do início da plastificação do aço do perfil metálico, do início de comportamento não linear do betão em compressão ou, em alternativa, da plastificação dos conetores metálicos. Considerando o novo tipo de aço, S460, verifica-se que o comportamento linear elástico da viga se mantém para cargas um pouco superiores, o que significa que o início do comportamento não linear observado na Fig. 4 se deve ao início da plastificação do aço tracionado no perfil metálico. A partir deste nível de carregamento, dá-se a progressiva plastificação do perfil metálico, o que proporciona um aumento da carga aplicada à viga mista. Nesta fase, a evolução do comportamento global da viga é muito semelhante ao que é obtido com o aço utilizado nos modelos experimentais. Nas vigas VM1 e VM3, a rotura nunca poderia ser condicionada pela conexão, porque esta foi dimensionada para garantir a transmissão da totalidade do fluxo de corte. Na Fig. 4 pode ainda observar-se que o aumento da tensão de cedência do aço não faz variar a capacidade máxima de deformação das vigas analisadas. Tal, deve-se ao fato da rotura das vigas ser condicionada pelo esmagamento do betão. Verifica-se ainda que o aço inicialmente utilizado ($f_y = 335.7$ MPa), é totalmente “aproveitado”, uma vez que na fase final do carregamento, todas as fibras da secção estão submetidas à tensão máxima.

4.2 Tipo de betão (massa volúmica normal)

Como o betão utilizado nos ensaios é um betão leve, realiza-se agora um modelo com betão de massa volúmica normal. Com esta alteração, parte-se do princípio de que a resistência à compressão do betão leve e a resistência à compressão do betão de massa volúmica normal são iguais. No entanto, dadas as características dos dois betões, considera-se um modo de elasticidade de 37 GPa para o betão de massa volúmica normal. Associado ao aumento do modo de elasticidade do betão, está a rigidez do conetor. Experimentalmente, verifica-se que a rigidez do conetor está relacionada com o tipo de betão utilizado, por isso aumenta-se a rigidez do conetor para $K = 370$ kN/mm/conetor, [1] e [4].

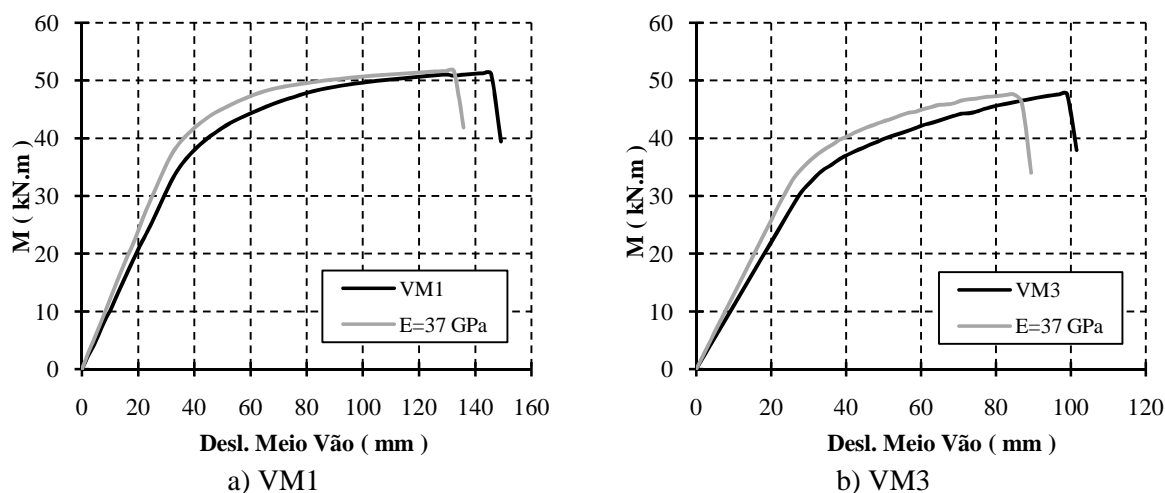


Fig. 5: Variação do modo de elasticidade e da tensão de corte máxima no betão

Comparando os resultados obtidos, verifica-se que a viga em que se utiliza betão de massa volúmica normal apresenta um comportamento mais rígido em regime elástico. Esse aumento de rigidez em fase elástica do comportamento deve-se principalmente ao aumento do modo de elasticidade do betão. Quando o comportamento da viga deixa de ser elástico, verifica-se que os aumentos no modo de elasticidade do betão e na rigidez da conexão apenas conduzem a uma diminuição da deformação vertical da viga. A carga máxima aplicada à viga praticamente não se altera em relação à carga máxima aplicada à viga de referência, VM1. O mesmo acontece com a viga submetida a cargas concentradas, VM3.

4.3 Tensão tangencial mobilizada na interface em função da rigidez dos conetores

De acordo com resultados experimentais anteriormente obtidos por [1] e [4], sabe-se que os pernos de cabeça são conetores flexíveis, podendo-se estimar o valor da sua deformabilidade em função do nível de carregamento a que estão submetidos. No caso dos modelos numéricos, considera-se a existência de elementos de interface entre a secção metálica e a secção de betão, pelo que se torna necessário definir uma rigidez na interface, calculada a partir da rigidez de cada perno, tal como foi demonstrado em [3]. O valor de rigidez definido a partir de ensaios experimentais e utilizado para definir o modelo numérico de referência das vigas VM1 a VM4 é $K = 220$ kN/mm/conetor. A partir deste valor de referência, faz-se variar o valor da rigidez dos conetores, respetivamente com os valores $K = 300$ e 1000 kN/mm/conetor.

Quando existe uma variação da rigidez tangencial na interface verifica-se em primeiro lugar, a influência desta variação em regime elástico, havendo um aumento de rigidez global das vigas mistas. Na viga VM1, a variação da rigidez na interface não introduz grandes

alterações, quer na carga máxima aplicada à viga, quer na deformação máxima desenvolvida. Isto significa que, nesta viga, a redistribuição de esforço de corte ao longo da interface se produz sem esgotar a capacidade resistente da conexão. Deste modo, a viga é capaz de atingir uma rotura por flexão e não por corte longitudinal, qualquer que seja o valor de rigidez da conexão.

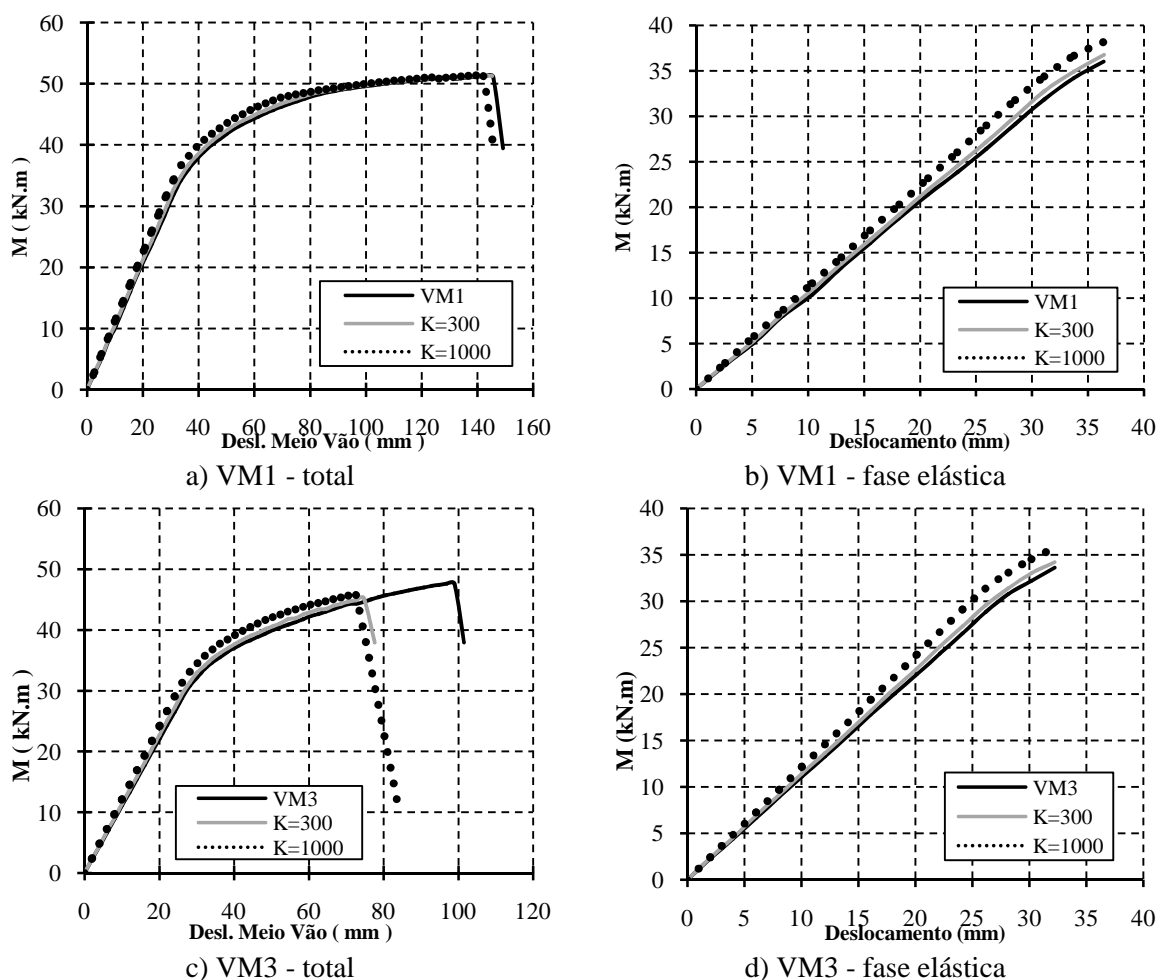


Fig. 6: Variação da tensão tangencial mobilizada na interface na vigas VM1 e VM3

Na viga VM3, o comportamento é diferente do que foi observado na viga VM1. Em primeiro lugar, verifica-se um aumento da rigidez da viga em regime elástico, tal como acontece nas restantes vigas. No entanto, com o aumento da rigidez tangencial, regista-se uma diminuição da capacidade de deformação e da capacidade resistente de VM3. No caso de VM3, o diagrama de esforço rasante é constante ao longo da viga (com exceção apenas da curta zona entre os dois pontos de aplicação de carga). Deste modo, o aumento da rigidez tangencial vai fazer com que se mobilize mais esforço de corte na interface, para menores valores da carga vertical aplicada. Como a rotura se dá pela conexão, verifica-se que quanto mais cedo se mobiliza o esforço de corte máximo, mais cedo essa rotura acontece. Associada a um menor valor da capacidade de carga resulta também um menor valor de deformação vertical última.

Em VM2 e VM4, a rotura dá-se na conexão, uma vez que estas vigas foram dimensionadas com conexão parcial. Nestes casos, considerar maiores valores de rigidez na conexão, não afeta grandemente os resultados. Seria de esperar, tal com aconteceu em VM3, que maiores valores de rigidez implicassem maiores esforços de corte na interface e deste modo, uma

rotura mais precoce. Isto não se verificou em nenhum dos modelos de VM2 e VM4, o que significa que há uma redistribuição total de esforço ao longo da interface e que a interface tem uma capacidade de deformação plástica que lhe permite manter a capacidade de carga.

4.4 Coesão na interface

Outro dos parâmetros em estudo é a coesão. Nas vigas de referência de tipo A foi considerada uma coesão igual a 3.0 MPa, valor este que resultou do cálculo efetuado à capacidade resistente da conexão em [3]. Neste caso, consideram-se também valores de coesão de 3.5 e 4.0 MPa, mantendo todos os restantes parâmetros constantes. Tal como foi discutido em [2], a coesão traduz a capacidade resistente da conexão e o seu valor é calculado a partir da capacidade resistente individual de conetores inseridos em lajes maciças do mesmo betão considerado. Os valores apresentados foram obtidos a partir de ensaios experimentais anteriormente realizados, [1].

Verifica-se na Fig. 7 que, em regime elástico, a coesão não influencia o comportamento das vigas mistas. A influência deste parâmetro ocorre em regime plástico, com o aumento da capacidade resistente da viga e a diminuição da capacidade de deformação máxima da mesma, no caso da viga VM1.

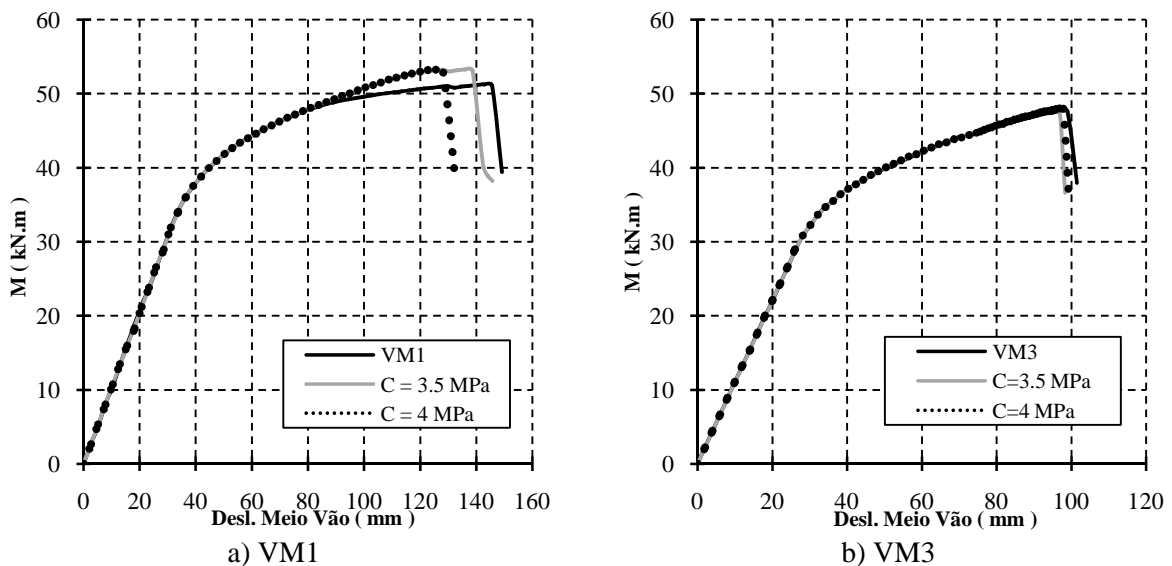


Fig. 7: Variação da coesão na viga VM1 e VM3

Verifica-se que um aumento no valor da coesão proporciona um aumento da capacidade resistente da viga que resulta de menores escorregamentos na interface em fase de comportamento plástico da conexão, que por sua vez permitem diminuir o valor das extensões ao longo da secção transversal. Deste modo, estes modelos admitem menores valores de deformação e permitem ainda acréscimos de carga até se atingir o valor de carga máxima. Na Fig. 8 é apresentada a tensão de corte mobilizada na interface para o nível máximo de carregamento na viga VM1. Como se verifica nesta figura, a tensão de corte está completamente mobilizada na interface, quando $c = 3$ MPa e $c = 3.5$ MPa e isso indica-nos que a conexão não tem capacidade para mobilizar mais tensão de corte. No entanto, tem capacidade para mobilizar mais deformação, admitindo-se que a viga sofra mais deformação vertical. Neste momento, a rotura não é condicionada pela conexão, apesar de esta já estar a funcionar sob uma tensão de corte máxima, mas é condicionada por flexão com esmagamento do betão.

Quando se aumenta a coesão para 4.0 MPa, quase não há aumento de capacidade de carga na viga, porque a rotura por flexão ocorre antes que seja possível mobilizar a máxima tensão de corte de 4.0 MPa ao longo de toda a interface.

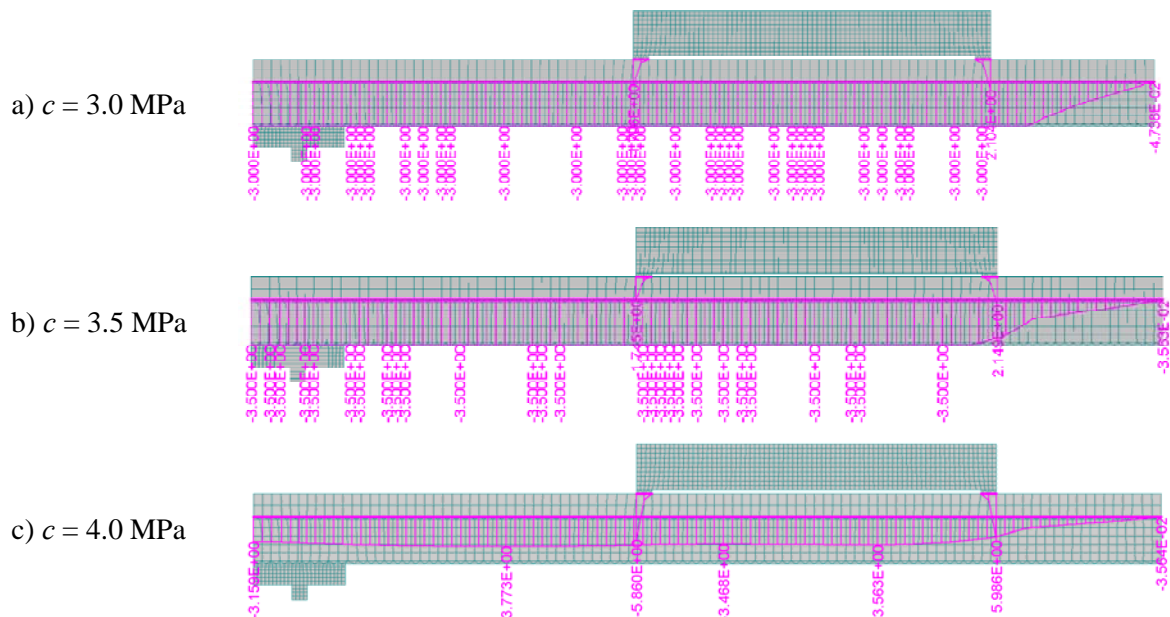


Fig. 8: Tensão de corte mobilizada na interface para o nível máximo de carregamento na viga VM1

Na viga VM3, verifica-se que a capacidade resistente e a capacidade de deformação não sofrem praticamente alteração com o aumento do valor da coesão. Os resultados obtidos nesta viga mostram que aqui a variação da coesão não é relevante. De fato, verifica-se que para o valor de carga máxima, ainda não está desenvolvida a máxima tensão de corte ao longo de toda a interface aço-betão pelo que não há vantagem em aumentar o valor da coesão. Esse comportamento é apresentado na Fig. 9, onde se verifica que a tensão de corte ainda não foi completamente mobilizada ao longo de toda a interface, com qualquer dos valores de coesão considerados e para a carga máxima aplicada.

Deste modo, quando se aumenta o valor da coesão, não se verifica aumento da capacidade resistente, como aconteceu na viga VM1, porque antes de se mobilizar maior tensão de corte na interface, ocorre rotura por flexão.

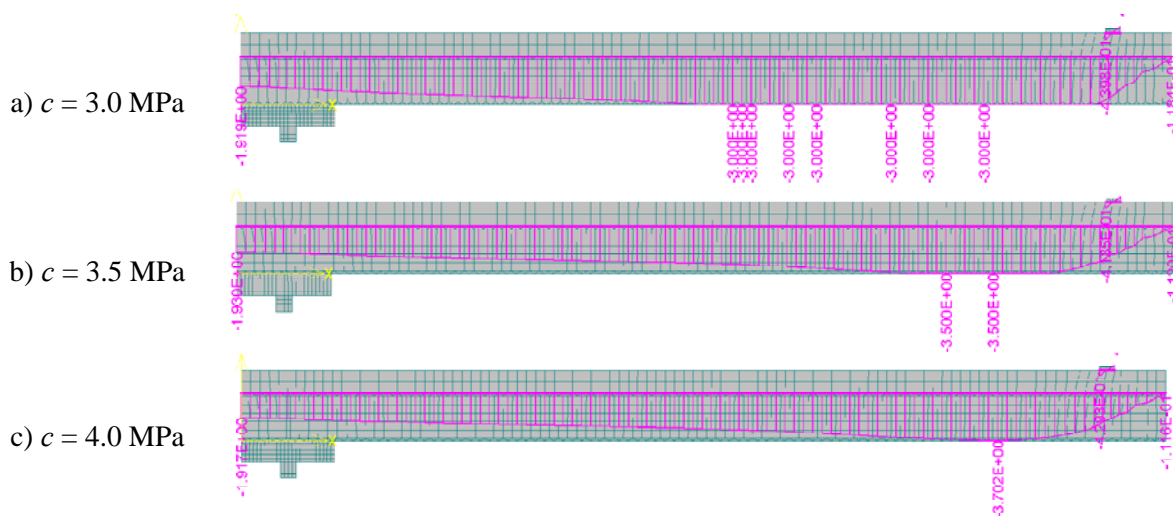


Fig. 9: Tensão de corte mobilizada na interface para o nível máximo de carregamento na viga VM3

5. Conclusões

Este trabalho propõe-se analisar, através de uma modelação numérica, o comportamento estrutural de vigas mistas em aço e betão, em que a laje de betão e o perfil metálico estão associados por conetores metálicos. Os modelos contemplam vigas mistas simplesmente apoiadas, com grau de conexão total e parcial e dois tipos de carregamento, uniformemente distribuído e concentrado a meio vão. Na modelação realizada, consideram-se elementos de interface entre a laje de betão e o perfil metálico, de forma a simular o comportamento da conexão. Deste modo, considera-se que existe uma interação parcial entre o perfil metálico e a laje de betão.

A primeira análise dos modelos tem como principal objetivo validar os modelos desenvolvidos através da comparação com os resultados experimentais obtidos em [1]. Os modelos utilizados são planos. Dessa comparação conclui-se que os modelos numéricos desenvolvidos conseguem prever uma forma bastante adequada o comportamento global das vigas mistas testadas experimentalmente.

De seguida, e com os modelos validados, realiza-se uma análise paramétrica com o intuito de perceber quais os parâmetros que mais influenciam o comportamento estrutural das vigas mistas. Existem parâmetros que influenciam o comportamento em regime elástico da viga e outros que influenciam o seu comportamento não linear.

Os parâmetros analisados são a tensão de cedência no aço, o módulo de elasticidade do betão, a tensão tangencial mobilizada na interface e a coesão na interface. Da análise destes parâmetros, conclui-se que com o aumento da tensão de cedência as vigas sofrem um acréscimo da sua capacidade resistente, o que mostra que o aço inicialmente escolhido é plenamente aproveitado em termos da sua capacidade resistente.

A influência do tipo de betão ocorre em regime elástico, onde o aumento do modo de elasticidade do betão e o conseqüente aumento da rigidez da conexão faz com que a viga apresente maior rigidez e com isso haja uma redução da sua deformabilidade. Neste caso, não há variação na capacidade resistente da viga.

O aumento do valor da coesão ou da resistência ao corte indica que haverá um aumento da capacidade resistente das vigas na fase final do carregamento, devido à possibilidade de se mobilizarem maiores tensões de corte na interface. No entanto, essa influência pode não chegar a ser efetiva, se a rotura por flexão acontecer antes de ser possível mobilizar esse acréscimo de tensão na interface.

Referências

- [1] Valente, I. (2007), "*Experimental Studies on Shear Connection Systems in Steel and Lightweight Concrete Composite Bridges*", Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Portugal, Julho 2007. (em inglês)
- [2] NP EN 1994-1-1 (2011), "*Eurocódigo 4: Projeto de estruturas mistas em aço-betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*", IPQ.
- [3] Lage, R. (2010), "*Modelação Não Linear de Vigas Mistas em Aço e Betão*", Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Portugal, Dezembro 2010.
- [4] Hegger, J., Sedlacek, G., Döinghaus, P., Trumpf, H. (2001), "Studies on the ductility of shear connectors when using high-strength concrete. International Symposium on Connections between Steel and Concrete", University of Stuttgart, vol.2, pp. 1025-1045.