



UTILIZAÇÃO DE PERFIS ENFORMADOS A FRIO DE TIPO C EM VIGAS MISTAS EM AÇO E BETÃO

Jorge O. Silva^a, Talita L. Silva^b e Isabel B. Valente^{c,*}

^{a,b,c} Universidade do Minho, ISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal

* Autor para contacto. Tel.: +351 253 510 203; Fax: +351 253 510 217; E-mail: isabelv@civil.uminho.pt

Resumo. Neste trabalho, apresenta-se um novo sistema de vigas mistas onde a componente metálica é formada por perfis tipo ‘C’ enformados a frio, que criam uma secção tipo ‘U’. Esta secção é preenchida com betão e associa-se a uma laje de betão, com ou sem chapa colaborante. Pretende-se que a transferência dos esforços de corte ocorra através da interface aço-betão e por meio das abas do perfil posicionado na base da viga. Através de estudo analítico e modelação numérica foi possível constatar que o sistema permite ser dimensionado para diversos níveis de carregamento e dimensões geométricas e que é capaz de transferir os esforços de corte entre o aço e o betão sem utilização de conectores convencionais.

1. Introdução

Os pavimentos mistos em aço e betão mais comuns são suportados por vigas metálicas em aço laminado a quente. A sua substituição por perfis enformado a frio é defendida por diversos investigadores devido aos benefícios estruturais e ambientais que estes podem conferir, tanto para novas edificações quanto para reabilitações. Estes benefícios incluem a flexibilidade da geometria da secção transversal, a redução da quantidade de material utilizado (por serem mais finos), a possibilidade de redução da altura da laje que resulta da maior leveza dos componentes metálicos, leveza global da estrutura e a menor probabilidade de corrosão devido ao processo de galvanização [1,2].

O maior inconveniente do uso de perfis enformados a frio em vigas mistas de aço e betão está relacionado ao sistema de conexão para transmitir os esforços de corte entre o aço e o betão. Os sistemas de conexão disponíveis são basicamente inadequados para o aço enformado a frio

porque a pequena espessura dos perfis dificulta ou impede a aplicação dos conectores no perfil, que geralmente é feita por soldadura. Por esta razão, durante as últimas décadas alguns pesquisadores dedicaram-se a desenvolver e estudar sistemas de conexão que fossem apropriados para o aço enformado a frio. Infelizmente, muitos dos sistemas desenvolvidos são de difícil aplicação em obra e podem elevar consideravelmente os custos associados.

Em 2006, Lakkavalli & Liu [3] criaram um novo sistema de conexão para vigas mistas onde os perfis enformados a frio eram parcialmente embebidos no betão durante betonagem e a transferência de corte era potenciada através de aberturas circulares, aberturas e cortes ou parafusos colocados nas abas embebidas dos perfis. Em 2018, Chen *et al.* [4] desenvolveram em um sistema de conexão para vigas mistas onde perfis tipo C enformados a frio eram preenchidos com betão e uma chapa trapezoidal era associada à laje de betão. Para melhorar a conexão aço-betão, eram instalados parafusos nos banzos superiores dos perfis e uma chapa nervurada revestia o interior dos perfis para promover uma melhor aderência. Recentemente, Lawson & Taufiq [5] investigaram um novo sistema para pavimentos em aço e betão onde perfis de tipo C são associados a vigas de betão, ficando posicionados na base da viga (região tracionada), e eventualmente nas zonas laterais e também na base para resistir a esforços de corte, para além do reforço longitudinal. A transferência de corte entre o aço e o betão é mobilizada através das abas dos perfis posicionados na base, que ficam embebidas após betonagem onde são também colocados parafusos e relevos nos perfis.

Nesta investigação, propõe-se um sistema de vigas mistas em aço enformado a frio e betão onde a componente metálica é formada pela combinação de perfis tipo C, que forma uma secção tipo U, preenchida com betão (ver Fig. 1), similar ao proposto em [5]. A laje em betão pode ser pré-fabricada ou betonada *in situ* e uma chapa colaborante, também em aço enformado a frio, pode ser associada ao sistema. Os perfis posicionados nas laterais são fixados na base através de parafusos ou por soldadura. A transferência de esforços de corte entre o aço e o betão ocorre através da ligação natural e é mobilizada através das abas do perfil posicionado na base, que ficam embebidas na viga de betão.

Para avaliar o comportamento da solução, foi realizado um estudo analítico onde foram analisadas as limitações do sistema, tendo em consideração a geometria transversal, vãos e cargas atuantes, em relação ao Estado Limite Último (ELU) e ao Estado Limite de Utilização (ELS). Para analisar a transferência de esforços de corte no sistema foi realizado um estudo numérico com base em MEF, onde foram assumidos dois tipos de conexão aço-betão.

2. Estudo analítico

O sistema de viga mista proposto neste trabalho foi analisado de acordo com os procedimentos indicados em [6, 7, 8, 9]. Desta forma, as verificações de segurança relativas a ELU e ELS foram realizadas admitindo que as vigas estão simplesmente apoiadas e considerando que o momento fletor e o esforço transversal resistentes são calculados a partir de uma distribuição plástica das tensões na secção transversal, que as tensões máximas em cada componente da secção são calculadas através de uma distribuição elástica na secção transversal fendilhada e que a deformação é calculada com base no comportamento elástico não fendilhado da secção de betão, considerando os coeficientes de homogeneização para carregamentos de longa duração e ações variáveis.

Este estudo analítico foi realizado para avaliar quais as dimensões assumidas pela solução proposta, em função das cargas atuantes e dos vãos considerados. Por isso, alguns parâmetros geométricos e propriedades dos materiais foram fixados durante as análises paramétricas desenvolvidas. Os quatro parâmetros fixados foram o espaçamento entre vigas consecutivas (3 m - representativo de um vão médio de uma laje mista com chapa colaborante); a altura da laje

(130 mm - 60 mm referente à chapa colaborante e 70 mm acima da chapa); a espessura da chapa colaborante (1 mm) e; a classe do betão (C25/30). A nomenclatura das vigas analisadas indica as variantes consideradas na análise: vão da viga (L igual a 5, 8 ou 10 m), tipo de utilização (A - atividades domésticas e residenciais - ou E - escritórios), dimensões dos perfis metálicos (P - consoante os perfis metálicos indicados na Tabela 1, obtidos a partir de tabelas comerciais), classe do aço dos perfis metálicos (S250, S280, S320 ou S350) e em determinados casos reforço longitudinal para que certos requisitos fossem cumpridos (R - consoante as armaduras indicadas na Tabela 1). Os resultados da análise paramétrica são apresentados na Tabela 1.

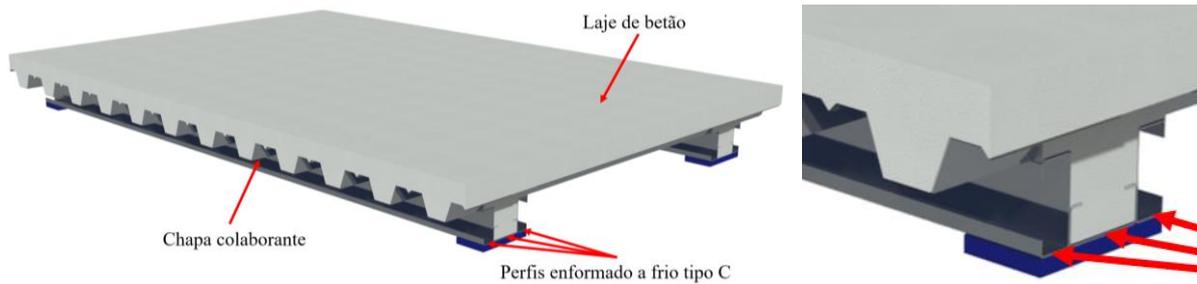


Fig. 1: Pavimento misto com utilização de perfis enformados a frio de tipo C

Tabela 1: Vigas mistas analisadas - verificações de segurança ELU e ELS

Viga	Estado Limite Último (ELU)						Estado Limite de Serviço (ELS)					
	V_{Ed} (kN/m)	$V_{pl,Rd}$ (kN/m)		M_{Ed} (kNm/m)	M_{Rd} (kNm/m)		σ_a (MPa)		σ_c (MPa)		δ_{total} (mm)	
L5-A-P1-S250	31.8	43.3	V	39.7	38.2	N	211.7	N	2.5	V	6.9	V
L5-A-P2-S250	31.8	57.7	V	39.8	49.9	V	164.7	V	2.3	V	6.1	V
L5-A-P1-S280	31.8	48.5	V	39.7	42.6	V	211.7	V	2.5	V	6.9	V
L5-E-P2-S250	36.5	57.7	V	45.7	49.9	V	187.8	V	2.5	V	7.2	V
L8-A-P3-S250	80.6	103.9	V	161.2	87.8	N	384.3	N	5.1	V	36.3	N
L8-A-P4-S250	86.4	207.8	V	172.8	186.7	V	194.7	V	2.8	V	9.8	V
L8-E-P4-S250	98.4	207.8	V	196.8	186.7	N	220.3	N	3.0	V	11.6	V
L8-E-P4-S280	98.4	232.8	V	196.8	207.9	V	220.3	V	3.0	V	11.6	V
L10-A-P5-S250	140.4	259.8	V	351.0	287.8	N	252.8	N	3.7	V	15.1	V
L10-A-P5-S320	140.4	332.6	V	351.0	364.0	V	252.8	V	3.7	V	15.1	V
L10-E-P5-S350	159.2	363.7	V	397.9	396.1	N	284.6	N	3.9	V	17.8	V
L10-E-P5-S350-R1	159.2	363.7	V	398.0	407.5	V	276.1	V	3.8	V	17.6	V

Onde,

P1 = Lateral/Base – C 100×42×1.5

P2 = Lateral/Base – C 100×42×2

P3 = Lateral – C 120×52×3 / Base – C 100×42×3

P4 = Lateral – C 240×54.5×3 / Base – C 200×52×3

P5 = Lateral/Base – C 300×77×3

N - indica que a razão entre os esforços atuantes e resistentes é > 1

V - indica que a razão entre os esforços atuantes e resistentes é ≤ 1

$$\delta_{max} = L/250$$

$$\sigma_{a,max} = 0.80 f_y$$

$$\sigma_{c,max} = 0.45 f_{ck}$$

$$R1 = 3\phi 6 [A400]$$

Para o vão de 5.0m foram selecionados perfis metálicos com pequena espessura (1.5 mm) e com a classe de resistência do aço mais baixa (S250). Estas hipóteses mostraram-se insuficientes em algumas das verificações de ELU e ELS, nomeadamente momento fletor resistente e tensões atuantes no perfil metálico. Todavia, com o aumento da espessura dos perfis ou da classe do aço, todos os requisitos passaram a ser atingidos, para os dois tipos de utilização considerados (A e E).

Em todas as secções de vigas analisadas verificou-se que o esforço transversal atuante (V_{Ed}) é inferior ao esforço transversal resistente ($V_{pl,Rd}$). O mesmo foi observado em relação às tensões no betão, onde as tensões atuantes (σ_c) são sempre inferiores às tensões máximas permitidas ($\sigma_{c,max} = 0.45 f_{ck}$). Entretanto, verificou-se que o momento positivo resistente (M_{Rd}) e tensões atuantes no perfil metálico (σ_a) são parâmetros condicionantes. Quando isto ocorreu, foi possível cumprir os critérios de segurança, alterando as dimensões da secção transversal e mudando o tipo de perfis metálicos, aumentando a classe de resistência do aço ou adicionando reforço longitudinal na parte inferior da viga mista. Relativamente às verificações das deformações na secção, onde a flecha máxima foi limitada a $L/250$, apenas um modelo não cumpriu esta condição, mas o aumento de área na secção de aço também permitiu sua verificação.

3. Modelação numérica

A modelação numérica foi realizada com o auxílio do software Atena 3D, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Durante as análises foi avaliado o comportamento global das vigas, considerando as especificidades da sua geometria, as propriedades dos materiais e a não linearidade do seu comportamento e do contato entre os diferentes componentes.

A partir do estudo numérico foi realizada uma análise de sensibilidade com objetivo de avaliar a transferência de corte do sistema quando a conexão entre o aço e o betão é total ou parcial.

3.1 Modelo numérico e propriedade dos materiais

O modelo numérico desenvolvido consiste numa viga mista (VN) simplesmente apoiada com 1.3 m de comprimento total e vão igual a 1.2 m. O vão foi selecionado para favorecer uma rotura por corte longitudinal. A modelação foi realizada considerando a simetria da estrutura, logo foi modelado 1/4 da mesma. Para além da viga de aço e laje de betão, foram criados os elementos que representam o suporte e o aplicador de carga (ver modelo na Fig. 2.a). A estrutura foi carregada a meio vão através de incrementos de deslocamento iguais a 0.1 mm. O carregamento foi calculado a partir das reações originadas pelos deslocamentos impostos e foram medidas as deformações a meio vão da viga.

A viga mista foi inicialmente analisada, assumindo uma ligação rígida na conexão entre o aço e o betão, o que indica que não há escorregamento nesta interface entre os diferentes materiais. Posteriormente atribuiu-se um material de interface para avaliar o comportamento da estrutura quando existe uma interação parcial nesta interface aço-betão. As propriedades atribuídas ao betão, ao aço e ao material de interface 3D estão descritas na Tabela 2.

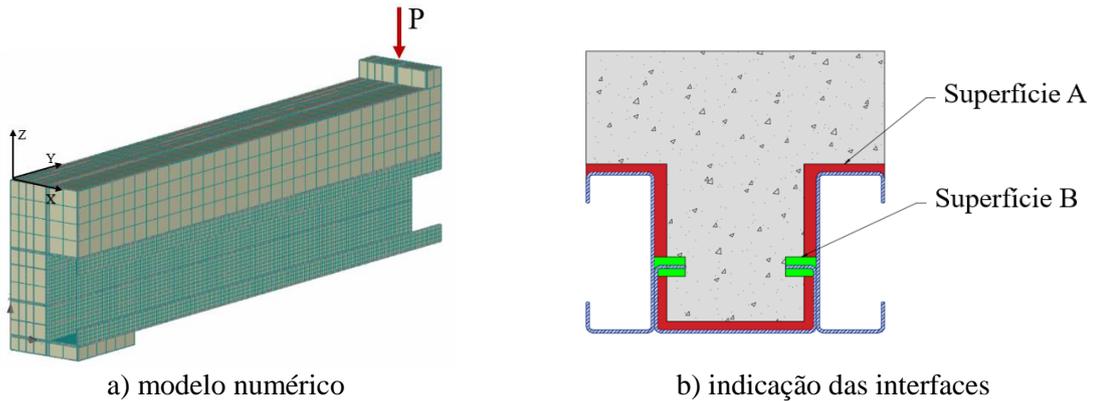


Fig. 2: Pormenores da modelação numérica

Tabela 2: Propriedades dos materiais do modelo numérico

Betão		Aço enformado a frio		Interface	
"3D Nonlinear Cementitious"		"3D Bilinear Steel Von Mises"		"3D Interface material"	
E (GPa)	33	E (GPa)	210	K_{tt} (MN/mm ³)	2000
ν	0.2	ν	0.3	K_{nn} (MN/mm ³)	8000
f_t (MPa)	2.9	f_y (MPa)	280	c (MPa)	0.5
f_{cm} (MPa)	-38			ϕ (MPa)	0
				f_t (MPa)	1.5

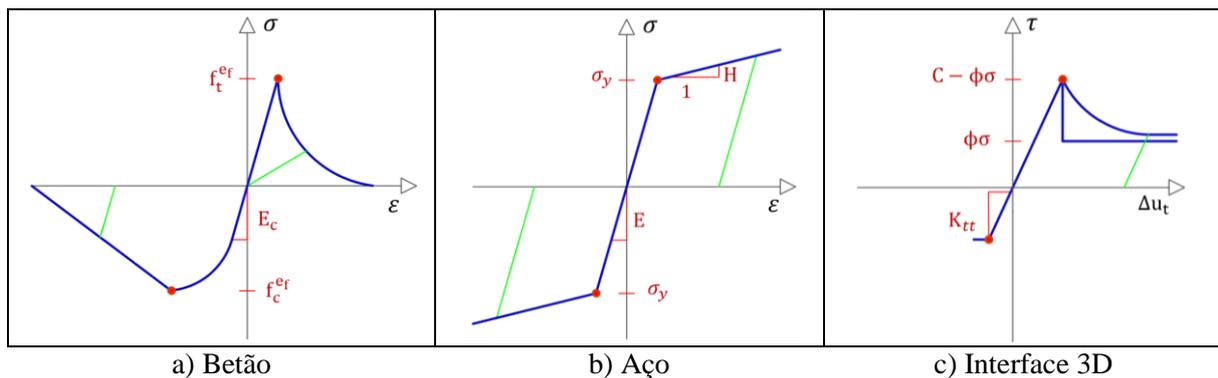


Fig. 3: Leis constitutivas adotadas

3.2 Conexão total e conexão parcial

Na análise realizada, foi desenvolvido um primeiro modelo onde se considerou conexão total e interação total na interface aço-betão, o que indica que não é possível haver escorregamento entre as superfícies de aço e de betão, mobilizando-se a transferência total de esforços entre elas. Num segundo modelo, foi atribuída uma conexão parcial, assumindo-se que as superfícies de aço e betão em contacto se podem movimentar entre si e que a capacidade de transferir esforços de corte é menor.

A Fig. 4.a apresenta as curvas que relacionam a força aplicada e a deformação medida a meio vão, para os dois modelos numéricos referidos (VN-CT - conexão total, VN-CP - conexão parcial). Adicionalmente, a curva VA-CT foi obtida a partir do cálculo analítico desenvolvido, assumindo uma conexão total e rígida na interface aço-betão. As deformações obtidas no estudo analítico foram determinadas considerando a secção homogeneizada para efeitos de curta duração, em concordância com as propriedades dos materiais assumidas no modelo numérico.

Através da Fig. 4.a, verifica-se que a viga numérica (VN-CT) apresenta um comportamento elástico até atingir uma capacidade de aproximadamente 60 kN. A partir deste nível de carregamento, ocorre plastificação sucessiva da viga e o modelo atinge sua capacidade de carga máxima, $P_{\max} = 82.4$ kN.

Comparando os resultados obtidos de forma analítica e numérica, pode-se constatar que embora a ligação aço-betão seja rígida para ambos os casos, isto é, sem a possibilidade de ocorrer qualquer escorregamento entre ambos os materiais, a curva analítica (VA-CT) apresenta um comportamento mais rígido do que o verificado na curva numérica (VN-CT).

O processo de fendilhação inicia-se no banzo inferior da viga de betão, na região do momento fletor máximo, desde os primeiros incrementos de deslocamento, com fendas com largura inferior a 0.03 mm. Fendas com largura igual ou superior a este valor, originam-se com aplicação de um carregamento de aproximadamente 60 kN, o que corresponde ao final da fase elástica de comportamento da viga.

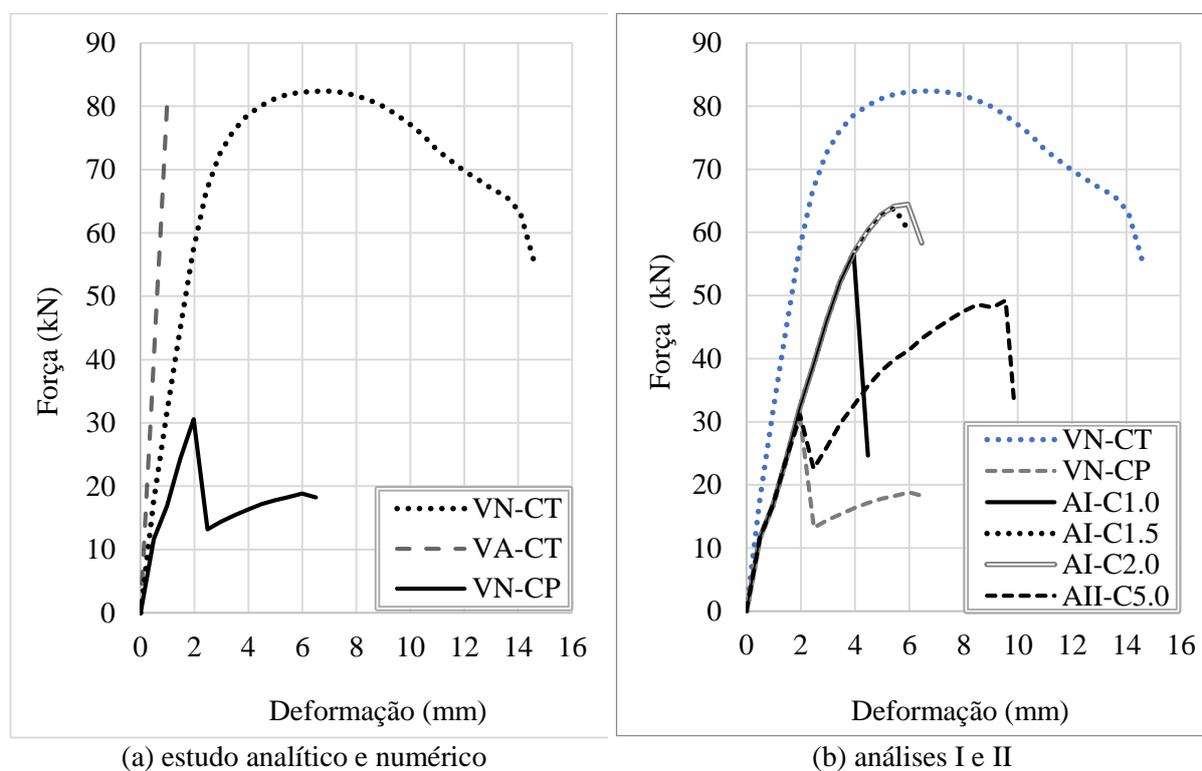


Fig. 4: Relação entre força aplicada e deformação a meio vão

Quando a viga atinge sua capacidade de carga máxima, estas fendas já envolvem toda a zona de meio vão e são, em geral, verticais e paralelas à aplicação do carregamento, o que sugere rotura por flexão. Nesta fase, também são observadas fendas horizontais na zona superior da laje de betão, que indicam esmagamento do betão na zona comprimida (ver Fig. 5.a).

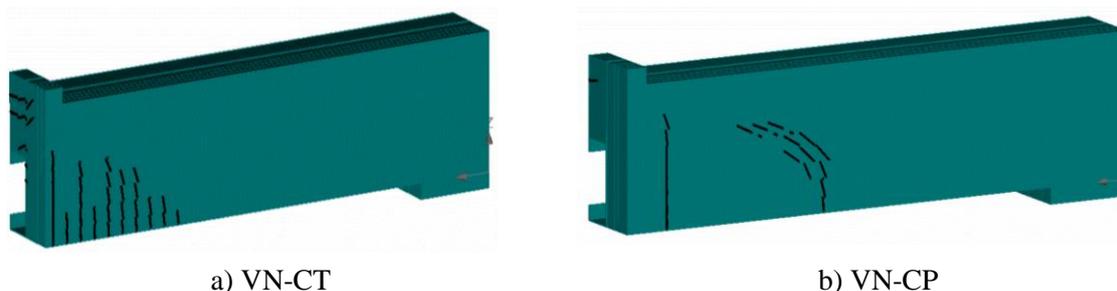


Fig. 5: Fendilhação durante a aplicação de carga máxima (largura de fenda $\geq 0,03$ mm).

Com base no diagrama de tensões principais, verifica-se que as tensões máximas de tração e de compressão estão localizadas a meio vão da viga. Quando se atingiu a carga máxima, a tensão máxima na secção de aço foi obtida na região de momento máximo. Essa tensão máxima desenvolve-se ao longo de toda a secção transversal de aço, o que indica que a carga máxima no modelo VN-CT ocorreu por esgotamento da capacidade resistente da secção metálica (ver Fig. 6.a).

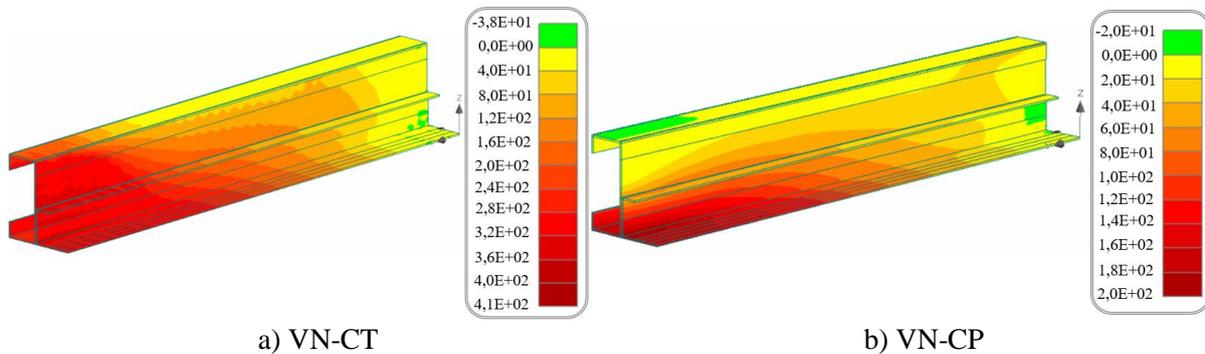


Fig. 6: Diagrama de tensões nos perfis metálicos para a carga máxima. Unidade: MPa

Ao observar o modelo com conexão parcial (VN-CP), verifica-se que na fase elástica existe um comportamento menos rígido do que obtido com o modelo com conexão total (VN-CT). Além disso, a curva que relaciona a força aplicada e a deformação a meio vão apresenta-se aproximadamente linear elástica até que se atinge a capacidade de carga máxima. Como esperado, a capacidade de carga do modelo VN-CP é significativamente inferior à do modelo VN-CT, verificando-se uma redução de 63%.

Após o pico de carga ($P_{\max} = 30.6$ kN), o modelo VN-CP apresenta um comportamento frágil, com uma perda de carga acentuada, que está associada à fendilhação do betão e ao esgotamento da capacidade resistente na interface. Com base no diagrama de tensões tangenciais (ver Fig. 7.a), verifica-se que durante a aplicação da carga máxima, as tensões de corte nas regiões dos banzos, abas embebidas e parte das almas apresentam valores muito próximos do valor limite estabelecido para a coesão na interface (ver Tabela 2), entre 0.34 e 0.49 MPa, o que significa que nessas áreas a capacidade resistente a esforços de corte está praticamente esgotada. Após atingir a capacidade resistente (ver Fig. 7.b), as tensões de corte reduzem-se para valores próximos de zero em grande parte da superfície de contacto, ou seja, numa parte significativa da viga deixou de haver transferência de esforços de corte na interface aço-betão. Apesar disso, o modelo mantém alguma capacidade de carga para níveis de deformação superiores porque é possível mobilizar alguma resistência ao corte na zona de meio vão da viga, onde os esforços de corte são inicialmente inferiores. À medida que são impostos maiores deslocamentos verticais, as zonas onde é possível mobilizar tensões de corte são progressivamente menores.

A propagação de fendas apresenta-se com menor expressão no modelo VN-CP do que no modelo VN-CT. Em contrapartida, as fendas do modelo VN-CP apresentam maiores larguras para níveis de carga inferiores. No intervalo de carregamento entre 12 e 17 kN observou-se a formação de uma fenda vertical, a meio vão, com largura de aproximadamente 0.17 mm, o que ocasionou uma alteração de rigidez da curva força-deslocamento a partir deste nível de carregamento (ver Fig. 4.a).

Quando o modelo atinge o pico de carga, esta fenda atinge a laje de betão, prolongando-se acima dos perfis metálicos. Durante esta fase, também foram observadas, no vão de corte, novas fendas com inclinação de aproximadamente 45° que se estendem pela altura da viga até uma zona acima do perfil metálico, o que sugere uma rotura por corte transversal na secção de betão (ver Fig. 5.b).

Os níveis de tensão máximos de tração e de compressão também se verificam a meio vão da viga, embora os valores sejam sempre inferiores à capacidade resistente dos materiais em qualquer fase do carregamento. As tensões máximas de tração na secção de aço concentram-se apenas no banzo inferior (ver Fig. 6.b).

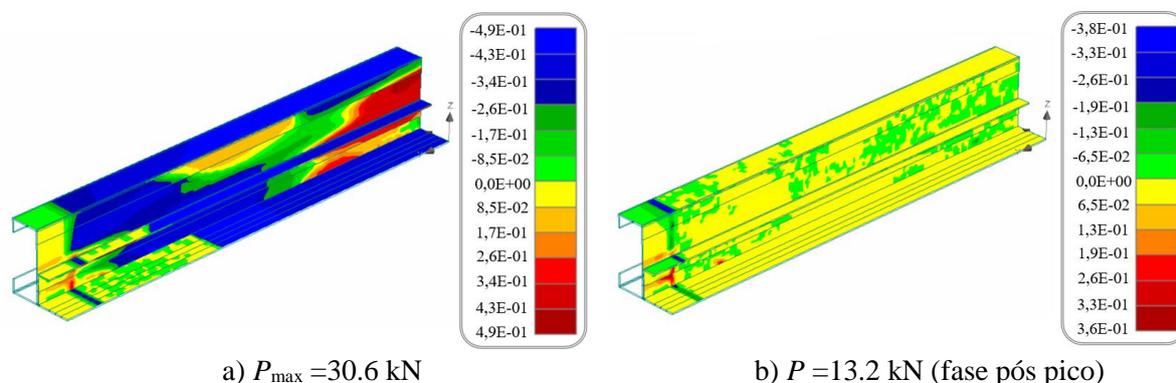


Fig. 7: Diagrama de tensões de corte no modelo VN-CP. Unidade: MPa

3.3 Influência do valor da coesão

A estrutura foi analisada com uma conexão parcial entre as superfícies de aço e de betão, aplicando um material de interface 3D entre estas. Este material de interface é baseado no critério Mohr-Coulomb e é traduzido por cinco propriedades principais: rigidez normal (K_{nn}), rigidez tangencial (K_{tt}), resistência a tração (f_t), coesão (c) e coeficiente de fricção (ϕ) [10].

Estas propriedades foram calibradas de acordo com as indicações de [10] e os resultados obtidos por [11]. Foram definidas duas interfaces A e B (ver Fig. 2.b), onde o valor da coesão foi alterado durante as análises realizadas. Os valores das restantes propriedades permaneceram sempre iguais ao que é descrito na Tabela 2.

Para verificar se é possível melhorar o comportamento da viga, nomeadamente a sua capacidade de carga e ductilidade, procurou-se simular um aumento da transferência de esforços de corte na interface aço-betão que seria obtida com sistemas de conexão adicionais, sejam eles mecânicos ou por aderência. Com esse objetivo, o modelo foi calculado com valores de coesão mais elevados. Assim, foram realizados dois tipos de análise, consoante as diferentes regiões da interface aço-betão, para melhor analisar a resposta da viga.

Numa primeira análise o modelo foi calculado, modificando o valor da coesão de 0.5 MPa para 1.0 MPa, 1.5 MPa e 2.0 MPa em todas as superfícies, A e B, obtendo-se respetivamente, os modelos VN-AI-C1.0, VN-AI-C1.5, VN-AI-C2.0. Na segunda análise, a superfície A foi mantida com os parâmetros do modelo VN-CP (coesão igual a 0.5 MPa) e na superfície B (ver Fig. 2.b) atribuiu-se um valor de coesão significativamente mais elevado, igual 5.0 MPa, obtendo-se o modelo VN-AII-C5.0. Este modelo procura simular a possível existência de conectores mecânicos na aba do perfil que fica embebida na secção de betão.

O comportamento dos modelos VN-AI-C1.0, VN-AI-C1.5, VN-AI-C2.0 é idêntico ao que foi observado no modelo VN-CP durante a fase elástica. Como esperado, a capacidade de carga aumenta com o aumento do valor da coesão. Todavia, a partir do modelo VN-AI-C2.0 o aumento da capacidade de carga não é proporcional ao aumento do valor da coesão. Isto acontece porque um valor de coesão superior a 2.0 MPa já garante uma conexão total.

O comportamento do modelo VN-AII-C5.0 é similar ao comportamento dos modelos VN-AI-C0.5, VN-AI-C1.0, VN-AI-C1.5 e VN-AI-C2.0 durante os primeiros incrementos de carga (ver Fig. 4.b). Para níveis de carga mais elevados, o comportamento do modelo

VN-AII-C5.0 diferencia-se dos restantes modelos. Enquanto que os modelos da análise I apresentam um pico de capacidade de carga e de seguida uma redução rápida dessa capacidade, apresentando um comportamento frágil, o modelo VN-AII-C5.0 apresenta um comportamento inicial idêntico ao do modelo VN-AI-C0.5, ao qual se segue uma recuperação da capacidade carga, até que atinge uma capacidade de carga muito superior à do modelo VN-AI-C0.5. O modelo VN-AII-C5.0 é também capaz de desenvolver maiores níveis de deformação vertical do que o dos modelos VN-AI, ainda que, no final, também sofra uma perda de carga rápida que é indicativa de um comportamento frágil.

A recuperação da capacidade resistente e os maiores níveis de deformação verificados no modelo VN-AII-C5.0 estão associados às elevadas tensões de corte que é possível mobilizar na superfície B. Essas tensões aumentam em todas as superfícies (A e B) até ao primeiro pico de carga. Como se verifica no diagrama de tensões apresentado na Fig. 8.a, as tensões na superfície A são significativamente e uniformemente reduzidas após o primeiro pico, o que promove a redução da capacidade resistente da viga. Em contrapartida, o nível de tensões na superfície B continua a crescer até que a interface atinge sua máxima capacidade de carga (ver Fig. 8.b). De qualquer forma, as tensões máximas medidas foram inferiores ao valor da coesão aplicada nas abas do perfil metálico (5.0 MPa) e não se apresentavam uniformemente distribuídas nas superfícies envolvidas. A máxima tensão observada foi de aproximadamente 3.0 MPa e concentrada no vão de corte.

Para que haja redistribuição dos esforços após a tensão máxima da interface ser atingida é necessário modificar a lei constitutiva adotada na interface aço-betão. Por defeito, o *software* Atena 3D considera que o valor da tensão de corte diminui para zero após o seu valor máximo ser atingido (ver Fig. 3.c). Para que o modelo demonstre um comportamento mais dúctil na fase pós-pico, a lei constitutiva deve ser calibrada a partir de resultados experimentais, obtendo-se uma relação entre a tensão máxima e o escorregamento na interface relativa ao sistema de conexão aço-betão escolhido.

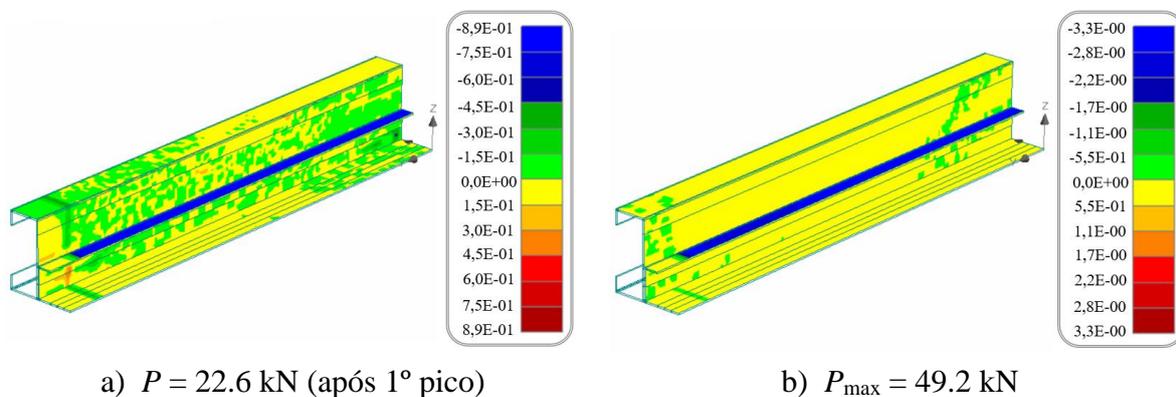


Fig. 8: Diagrama de tensões de corte no modelo VN-AII-C5.0. Unidade: MPa

4. Conclusões

Neste trabalho foi abordado o comportamento estrutural de vigas mistas onde a componente metálica é formada pela combinação de perfis tipo C enformados a frio, resultando numa secção em U, preenchida com betão. Uma vez que a conexão entre o aço e o betão ocorre inicialmente por aderência, sem a utilização de conectores mecânicos, era necessário investigar a transferência de esforços de corte, admitindo um grau de conexão e de interação parciais. Através do estudo da viga, por via analítica e numérica, foi constatado que:

1. O sistema permite ser dimensionado para diversos níveis de carregamento e dimensões geométricas e cumprir as verificações dos ELU e dos ELS. Os vãos maiores e as situações de carregamento mais desfavoráveis foram resolvidas com o aumento da área de aço dos perfis metálicos e o aumento da classe de resistência do aço, bem como com a aplicação de reforço longitudinal na parte inferior da viga mista.
2. A capacidade resistente da viga mista obtida de forma analítica foi similar à obtida por via numérica, embora o comportamento numérico tenha demonstrado uma menor rigidez.
3. Quando se atribuiu uma conexão parcial, a viga apresentou menor capacidade resistente e menor ductilidade. A menor capacidade de carga era expectável porque em vigas mistas com conexão parcial a sua capacidade resistente é condicionada pelo número de conectores, ou neste caso, pela resistência da ligação entre o aço e o betão.
4. A propagação de fendas mostrou ser influenciada pelo nível de interação entre o aço e o betão. A fendilhação ocorre com menor expressão nos modelos com conexão parcial, mas com maiores larguras de fenda para níveis de carga inferiores, devido à menor transferência de esforços entre o perfil metálico e a laje de betão.
5. Com base nas análises realizadas, nomeadamente a variação do valor da coesão, verificou-se que é possível melhorar o comportamento da estrutura quando existe uma conexão parcial. Essa melhoria é conseguida implementando sistemas de conexão adicionais. A melhoria do comportamento varia em função das regiões da interface onde são aplicados os conectores.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FCT - Fundação para Ciência e Tecnologia, ao abrigo do contrato da bolsa de doutoramento (SFRH/BD/148382/2019) atribuída ao autor ^b.

Referências

- [1] Hanaor, A. (2000). Tests of composite beams with cold-formed sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 54(2), 245–264.
- [2] Irwan, J. M., Hanizah, A. H., Azmi, I., & Koh, H. B. (2011). Large-scale test of symmetric cold-formed steel (CFS)concrete composite beams with BTTST enhancement. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(4), 720–726.
- [3] Lakkavalli, B. S., & Liu, Y. (2006). Experimental study of composite cold-formed steel C-section floor joists. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(10), 995–1006.
- [4] Chen, L. hua, Li, S. ting, Zhang, H. yang, & Wu, X. feng. (2018). Experimental study on mechanical performance of checkered steel-encased concrete composite beam. *Journal of Constructional Steel Research*, 143, 223–232.
- [5] Lawson, R. M., & Taufiq, H. (2019). Partial shear connection in light steel composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 154, 55–66.
- [6] NP EN 1994-1-1: 2011 - Eurocódigo 4 - Projecto de estruturas mistas aço-betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.
- [7] NP EN 1993-1-1: 2010. Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.
- [8] NP EN 1992-1-1: 2010 - Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.
- [9] NP EN 1990: 2009 - Eurocódigo 0 - Bases para o projecto de estruturas.
- [10] Červenka, V., Jendele, L., & Červenka, J. (2016). ATENA Program Documentation - Part 1: Theory. In Červenka Consulting s.r.o.
- [11] Cruz, Fábio Q. (2019). Innovative structural systems for durable and resilient complex marine constructions. Thesis Project for the Doctoral Programme in Civil Eng. at Univ. of Minho.