

CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA PARA REFORÇO DE UM EDIFÍCIO DE PEQUENO PORTE

Luís Costa Neves¹ e Luciano R. O. de Lima²

RESUMO

Este trabalho refere-se à concepção e processo construtivo de uma estrutura mista aço betão com vista à ampliação e reforço de uma estrutura de betão armado existente.

A demolição de um muro de cave, suporte de uma laje e de pilares suportando dois pisos estruturais superiores, em betão armado, levou à sua substituição por uma viga mista aço-betão com 10 m de vão, apoiada nas suas extremidades por uma parede de betão e por uma viga transversal mista suportada por pilares metálicos.

Os condicionamentos associados ao processo construtivo ditaram a colocação da viga paralelamente ao muro, cuja demolição provoca o funcionamento da viga metálica simples. Nesta fase, foram implantados pilares metálicos provisórios intermédios com vista a limitar os esforços de flexão na viga e as deformações associadas. Posteriormente, foram realizadas aberturas na laje sobre a viga, permitindo instalar no seu banzo superior conectores do tipo *perfobond rib*. Após betonagem, cura, e demolição dos pilares intermédios provisórios, a viga funciona como mista.

Apresenta-se uma descrição geral do problema, a solução estrutural adoptada, o seu processo construtivo, e a análise dos conectores com vista à transmissão da totalidade dos esforços de corte entre a viga metálica e a laje de betão armado.

1. INTRODUÇÃO

Neste artigo descreve-se uma estrutura mista aço-betão colocada num edifício de pequeno porte em construção, com o objectivo de proceder a uma modificação na arquitectura com implicação sobre a estrutura, já edificada. Tratava-se de, entre outras intervenções não descritas neste artigo, executar a ampliação de uma zona de cave, demolindo um muro de cave entre os pontos A e B da Fig. 1 (ver também Fig. 4). Esse muro suportava acções

¹ Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, e Struplano Engenharia,Lda.

² Professor Adjunto, Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Engenheiro Civil - Struplano Engenharia, Lda, Portugal.

verticais relativamente elevadas provenientes da própria laje do tecto da cave (parte já existente e a ampliação representada por BCDE na Fig. 1), e ainda de mais dois pilares apoiados nessa laje, junto ao muro a demolir, que suportavam a laje do tecto do piso 0 e tinham continuidade para suporte da cobertura inclinada (laje maciça de betão armado – não representada na Fig. 1).

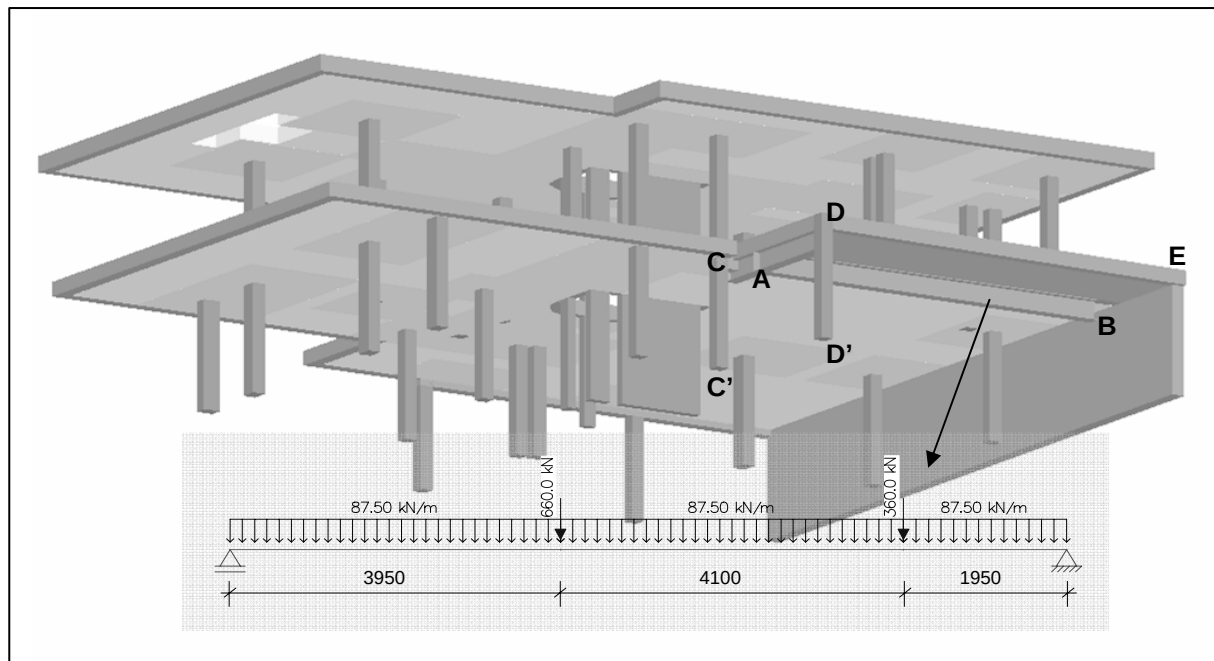


Fig. 1 – Modelo da estrutura. Piso intervencionado e superior.

2. ANÁLISE, DIMENSIONAMENTO E FASEAMENTO CONSTRUTIVO

2.1 Generalidades

A estrutura de substituição do muro consistiu numa viga metálica HEA 500 (viga secundária). É suportada em A por um pórtico CC' - DD' (Fig. 1 e Fig. 2b) cuja viga é um perfil do tipo HEA 500 (viga principal) e cujos pilares são perfis do tipo HEA 300. Em B, a viga secundária é suportada directamente por um muro de cave existente, através de um reforço de betão armado.

O dimensionamento de todos os elementos foi efectuado de acordo com o preconizado nos Eurocódigos 2, 3 e 4 ^{[1], [2], [3], [4]}, sendo utilizados os seguintes materiais:

- betão C 30/37 nos novos elementos de betão armado;
- S500 em varões para betão armado;
- aço estrutural: S 355 JR - EN 10025;
- aço de conectores de cabeça: S 460 M ou ML (EN 10113-3);
- parafusos pré-esforçados da classe 10.9.

2.2 Viga principal

A viga principal recebe os esforços provenientes da própria laje e sobretudo da acção transmitida pela viga secundária em A, através de uma ligação resistente apenas ao esforço transversal (Fig. 2a), e liga-se ao pilar através de uma ligação por chapa de topo rasa (Fig. 2b),

ambas dimensionadas de acordo com o preconizado na EN 1993-1-8 [2]. O seu detalhamento é representado na Fig. 3, podendo observar-se os conectores de cabeça (parágrafo 3.1), e pormenor da laje a ampliar.



a) Ligação entre vigas secundária e principal



b) Ligação viga principal - pilar

Fig. 2 – Ligações entre vigas e ligações viga-coluna.

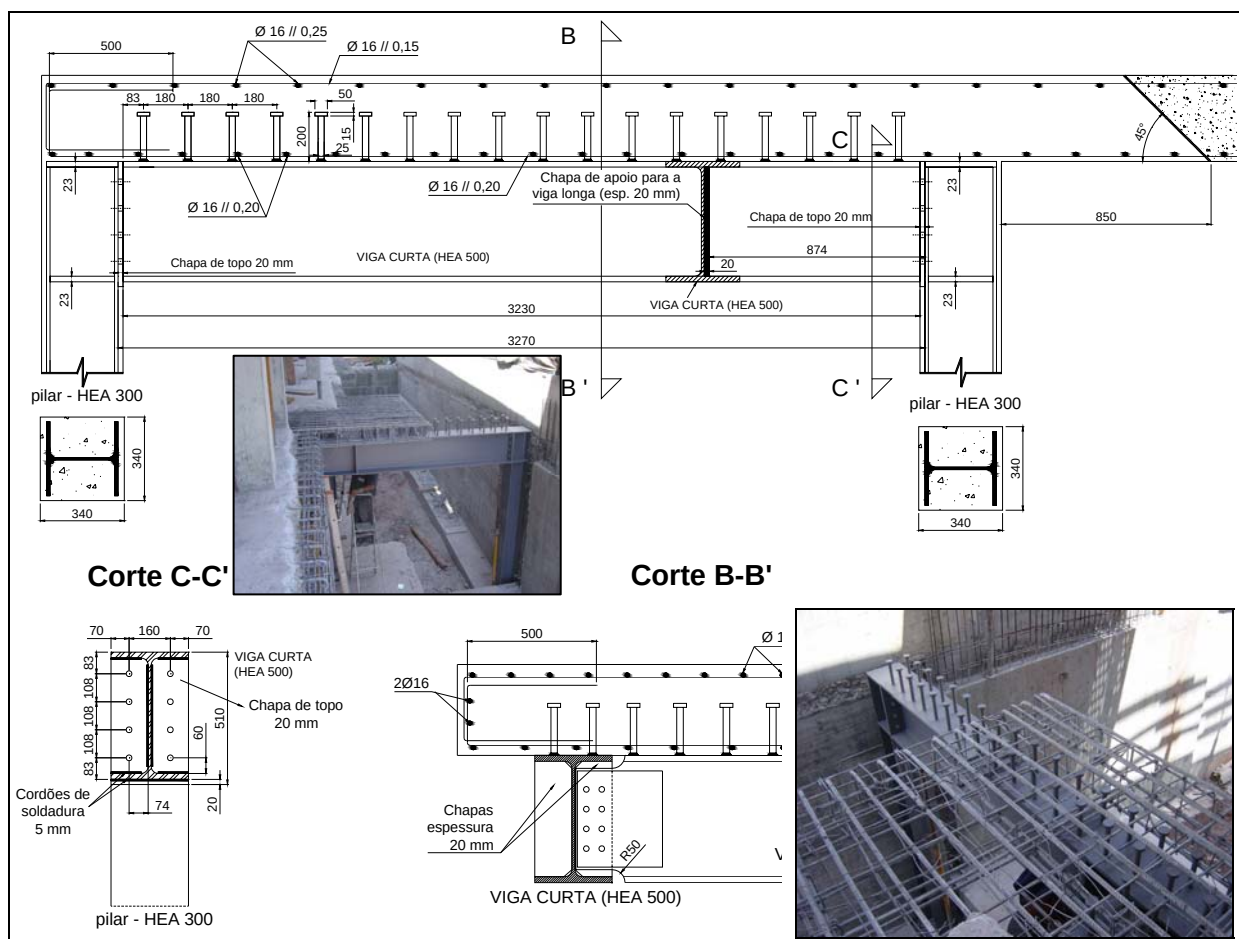


Fig. 3 – Viga principal mista com conectores de cabeça

2.3 Viga secundária

A viga secundária é o elemento estrutural mais crítico, sobretudo pelas condicionantes relacionadas com o seu processo construtivo. A avaliação das acções actantes sobre esta viga

foi realizada com recurso ao modelo estrutural simplificado da Fig. 1.

As condicionantes arquitectónicas limitavam a altura e o número de perfis, pelo que a solução natural apontava para uma viga mista aço-betão.

O problema que se coloca com esta solução tem que ver precisamente com os conectores. Enquanto que na viga principal os tradicionais conectores de cabeça vêm incorporados com a viga de fábrica, pois a laje superior é betonada *a posteriori*, nesta viga secundária tal não é possível. De facto, essa solução foi ponderada, mas implicava o escoramento provisório de toda a laje do tecto da cave, dimensionado para suportar também os pisos superiores, o que seria muito dispendioso. Para além disso, seria necessário ter especial atenção à ligação de corte entre a laje existente e a parte nova, onde o conjunto seria suportado.

Em alternativa, procedeu-se à montagem da viga ao lado do muro a demolir (sob os pilares que nascem na laje), com esse muro parcialmente demolido, e com escoramentos auxiliares na laje - Fig. 4a. Estavam montados conectores de cabeça de fábrica junto às extremidades da viga, onde a laje seria demolida (Fig. 4b), pois a posterior betonagem tornava esse sistema adequado. Fora dessa zona central não havia, nesta fase, qualquer conector. Os conectores nessa zona só seriam colocados mais tarde, como explicado em seguida.

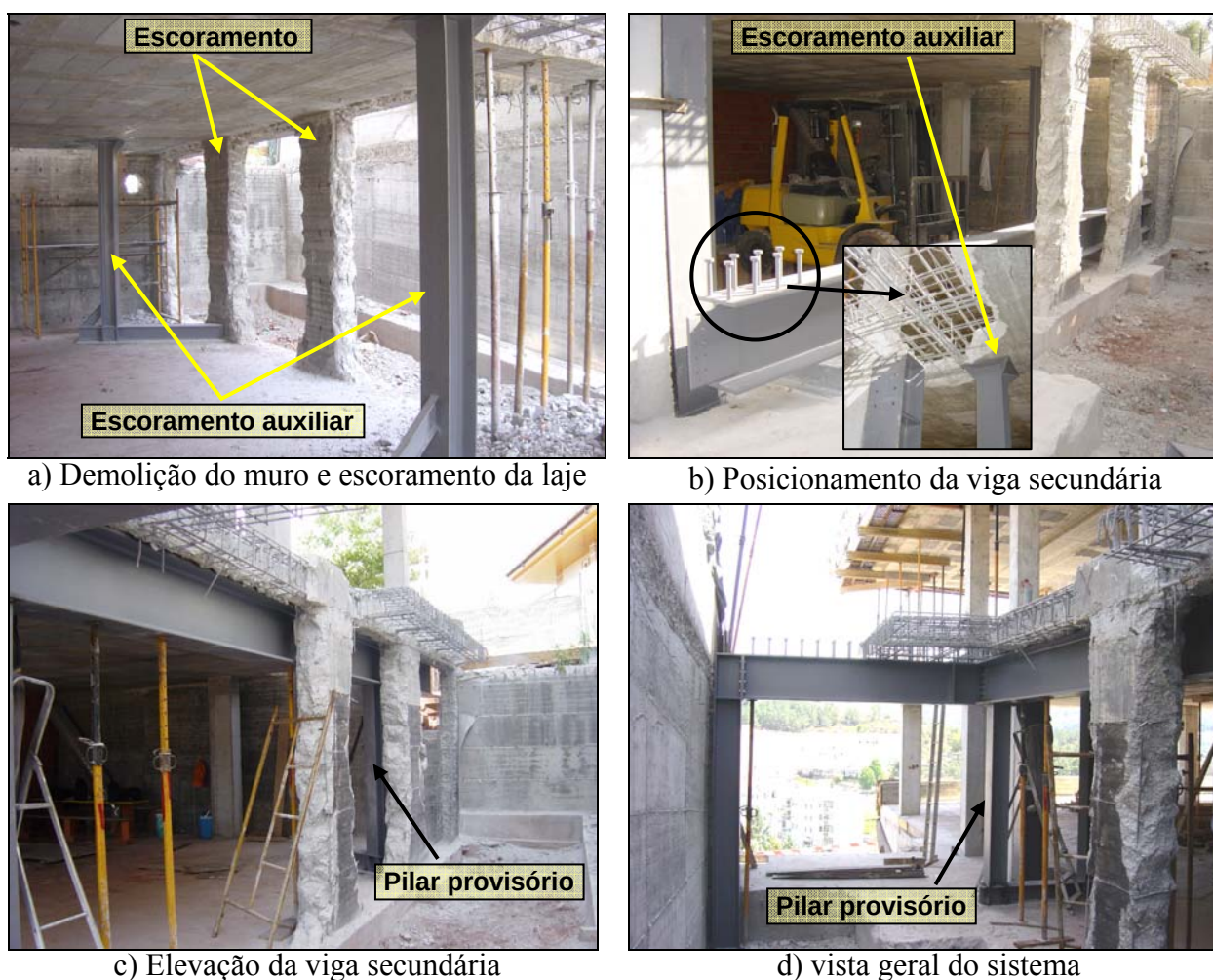


Fig. 4 – Processo construtivo da viga secundária.

A fase seguinte foi a demolição dos troços remanescentes de muro, tendo a viga passado a ter esforços, funcionando como metálica, mas mantendo-se os escoramentos auxiliares da laje e naturalmente os pilares provisórios metálicos sobre a viga.

Estava-se agora em condições de proceder à montagem das armaduras e betonagem da laje e do apoio da viga junto ao muro.

Após esta fase, a estrutura ficou com o aspecto representado na Fig. 5a, ainda com escoramentos auxiliares e pilares provisórios.

A última fase consiste na montagem posterior dos conectores tipo *perfobond rib*, e betonagem da sua envolvente, ficando a viga, após retirada dos pilares provisórios, a funcionar como mista com interacção total (Fig. 5b). A Fig. 6 mostra esquematicamente a viga na sua fase de exploração.



a) apoios provisórios - viga metálica

b) apoios provisórios retirados - viga mista.

Fig. 5 - Visualização da viga antes e depois da instalação dos conectores de corte.

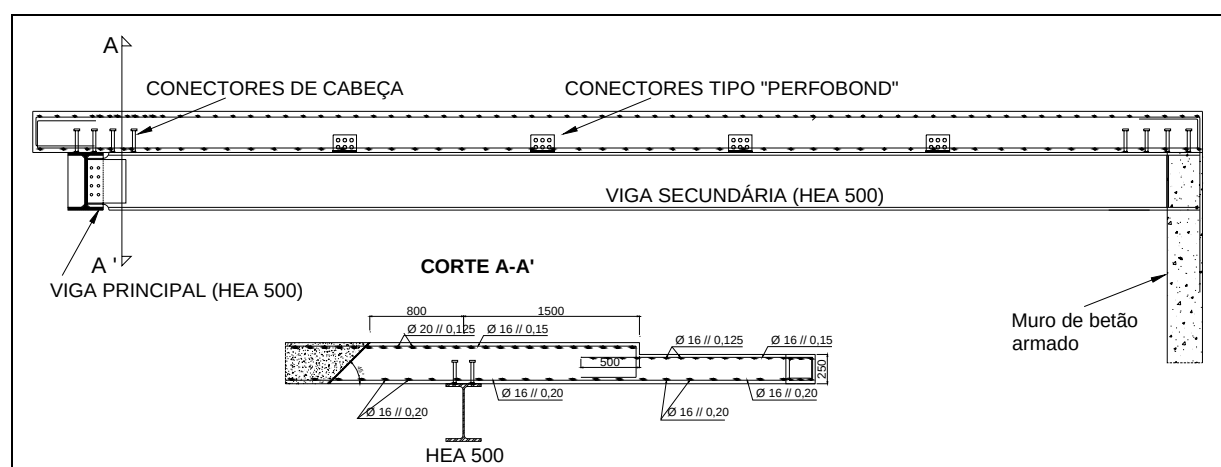


Fig. 6 – Viga secundária mista com conectores de cabeça e tipo *perfobond*

3. CONECTORES DE CORTE

Neste parágrafo procede-se a uma breve apresentação dos conectores usados, com o objectivo de demonstrar a eficácia do conector tipo *perfobond* neste tipo de aplicações.

3.1 Conector de cabeça (*Headed Stud*)

Os conectores de cabeça (*stud*) como os usados nesta estrutura - Fig. 7a - devem ser dimensionados face a diversos estados limites últimos ^[4]: esmagamento do betão que envolve o conector, ruptura por flexão do conector, ruptura por corte do conector e ruptura da solda do

conector com o banzo superior da viga. A resistência ao corte de um conector de cabeça ^{[4], [5]} é dada pelo menor valor obtido das equações (1) e (2):

$$P_{Rd} = \frac{0,8 f_u \pi d^2 / 4}{\gamma_V} \quad (1)$$

ou

$$P_{Rd} = \frac{0,29 \alpha d^2 \sqrt{f_u E_{cm}}}{\gamma_V} \quad (2)$$

com

$$\alpha = 0,2 \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1 \right) \quad \text{para } 3 \leq h_{sc} / d \leq 4 \quad (3)$$

$$\alpha = 1 \quad \text{para } h_{sc} / d > 4 \quad (4)$$

onde

γ_V é o factor de segurança (normalmente 1,25);

d é o diâmetro da cabeça do conector *stud*;

f_u é a resistência última do conector que deve ser menor do que 500 N/mm²;

f_{ck} é a resistência característica à compressão do betão obtida de um ensaio de provete cilíndrico com densidade superior a 1750 kg/m³;

h_{sc} é a altura nominal do conector.

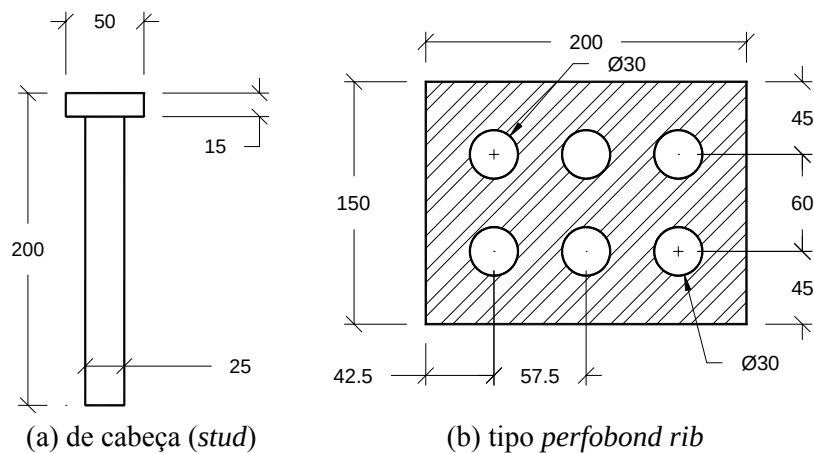


Fig. 7 - Conectores de corte usados.

A utilização deste tipo de conector na viga secundária para absorver o esforço de corte máximo rasante na interface, de cerca de 7000 kN em sensivelmente 4,0 m, obtido de uma análise plástica da estrutura, e admitindo uma distribuição plástica entre conectores, levaria à adopção dos conectores da Fig. 7a (que respeitam as condicionantes geométricas de ^[4]) em pares, espaçados de 180 mm.

3.2 Conector Tipo *Perfobond Rib*

O conector de corte tipo *perfobond rib* foi utilizado pela primeira vez por Leonhardt na terceira ponte Caroni situada na Venezuela, de modo a superar problemas de fadiga ^[6]. Este conector é fabricado a partir de uma placa de aço com furos como mostrado na Fig. 7b, e permite normalmente uma resistência muito superior aos conectores de cabeça, logo um

maior espaçamento, essencial nesta obra, onde seria necessário destruir a laje de betão para aceder ao banzo superior da viga.

A resistência mecânica deste tipo de conector depende fortemente da resistência da laje de betão onde ele será incorporado. À medida que o betão endurece, formam-se tarugos de betão dentro dos furos do conector. Estes tarugos contribuem para a resistência ao corte do conector evitando o deslizamento na interface aço/betão e a separação vertical entre os dois materiais. A resistência ao corte deste tipo de conector é substancialmente aumentada com a utilização de barras de armadura dentro dos furos do conector *perfobond rib*.

Apresentam uma outra vantagem considerável quando comparado com conectores de cabeça (“*stud*”), para além do menor número de conectores: necessitam somente de equipamentos simples para que seja efectuada a soldadura na face superior da viga de aço, dispensando a necessidade de grande amperagem requerida para instalação dos conectores de cabeça, facto que foi comprovado por uma série de ensaios experimentais. Ensaios do tipo *push-out* em que o número de furos e altura da placa foram avaliadas em relação à espessura da laje de betão adoptada conduziram a uma forma óptima para o conector *perfobond rib*, Oguejiofor *et al.* [7]. O conector de corte foi adaptado para uso em edifícios passando a ter uma altura menor devido à reduzida espessura da laje de betão, Ferreira *et al.* [8],[9]. Esta investigação também compreendeu uma série de ensaios experimentais que validaram o seu uso em vigas mistas de edifícios e avaliou pela primeira vez a contribuição da face do conector ao esmagamento na resistência ao corte do mesmo.

A resistência ao corte de conectores *perfobond rib*, eq. (5), foi desenvolvida por Oguejiofor *et al.* [7] a partir da identificação de três parcelas que contribuem para a resistência. Estes termos independentes levam em conta a resistência do betão ao esmagamento na face do conector, das barras de armadura usadas nos furos do conector e dos tarugos de betão que se formam nestes mesmos furos:

$$q_n = 4.50h_{sc}t_{sc}f_{ck} + 0.91A_{tr}f_y^{Arm} + 3,31nD^2\sqrt{f_{ck}} \quad (5)$$

onde:

D é o diâmetro dos furos do *perfobond rib*;

n é o número de furos do *perfobond rib*;

h_{sc} é a altura do conector *perfobond rib*;

t_{sc} é a espessura do conector *perfobond rib*;

f_{ck} é a resistência característica do betão à compressão

f_y^{Arm} é a tensão de cedência nominal das armaduras

A_{tr} é a área da seção transversal das armaduras

No caso do presente estudo, para a força solicitante de corte, e por forma a manter um espaçamento compatível com a facilidade de execução e com as recomendações existentes [7], adoptaram-se ao longo do comprimento da viga, como mostra a Fig. 6, quatro conjuntos de três conectores com a geometria indicada na Fig. 7b, lado a lado, e em cujos orifícios foram dispostos varões de betão armado $\phi 16$ - Fig. 8. Foi especificado um betão com resistência f_{ck} igual a 50 MPa, obtendo assim, da eq. (5), uma resistência individual de 1350 kN, isto é, 4050 kN em cada conjunto de três conectores paralelos, o que é suficiente. A Fig. 8 mostra detalhes da sua colocação.

Esta formulação admite que a resistência do betão é condicionante, não se debruçando sobre o próprio conector. No presente estudo, dada a geometria particular adoptada para o conector, foi desenvolvido um modelo de elementos finitos para averiguar a sua resistência, que se apresenta no parágrafo seguinte.



a) Abertura dos orifício na laje



a) Pormenor do orifício



c) Pormenores dos conectores tipo *perfobond rib*



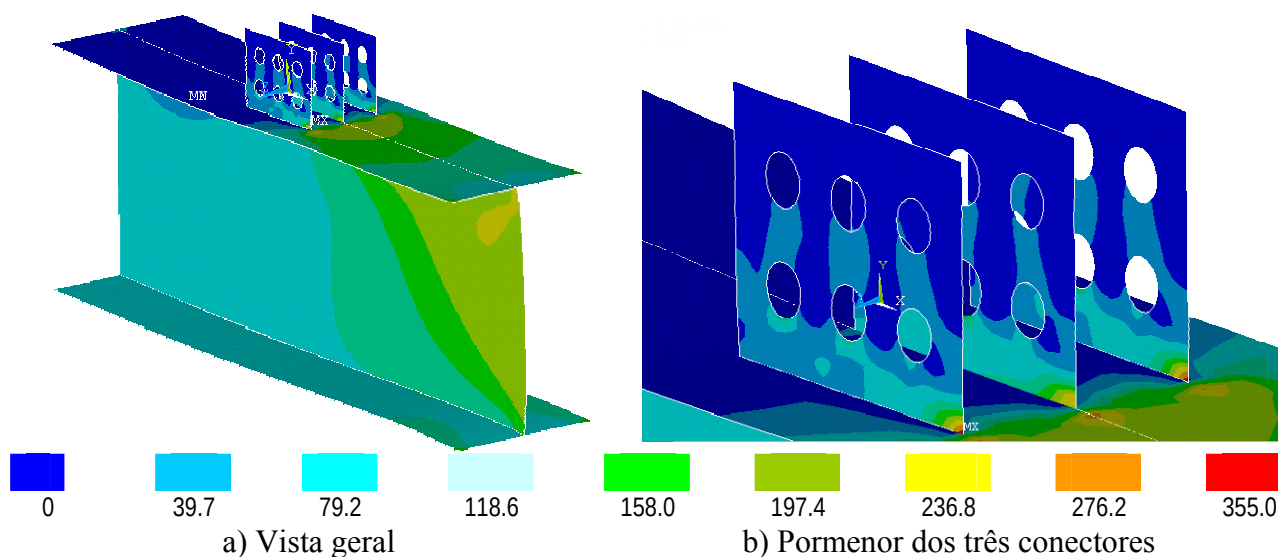
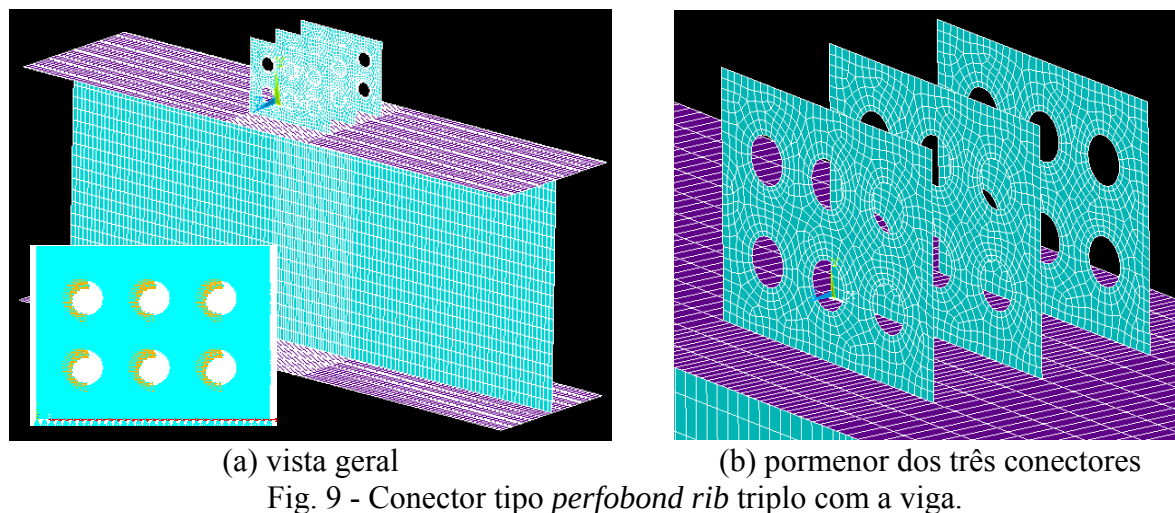
Fig. 8 - Instalação dos conectores tipo *perfobond rib*.

4. ANÁLISE NUMÉRICA DO CONECTOR TIPO *PERFOBOND*

O modelo de elementos finitos utilizado neste artigo para avaliação dos conectores tipo *perfobond rib* foi constituído de elementos de casca espessa com quatro nós (SHELL181 - Ansys Manual Reference, 2003) ^[10] levando em consideração os efeitos de flexão, corte e membrana. A malha utilizada foi escolhida de forma que os elementos tivessem um tamanho proporcional, evitando assim problemas numéricos. A Fig. 9 apresenta o modelo constituído pela viga e pelos três conectores *perfobond rib*, bem como as condições de contorno, nomeadamente representadas pelos tarugos de betão formados no interior dos furos e as cargas consideradas. A carga aplicada no modelo individual foi equivalente à carga de ruína do conector apresentado na Fig. 7 obtida através da eq. (5), aplicada incrementalmente, através de uma análise não linear, sob o ponto de vista material e geométrico, esta última sem grande importância neste caso. O resultados indicados na Fig. 10 mostram que o conector está em segurança para a força máxima que pode ser suportada pelo betão.

As propriedades do material utilizado foram: módulo de elasticidade $E = 210$ GPa, coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ para um aço S355 com tensão de cedência de 355 MPa.

Deve-se salientar que este trabalho apresenta uma avaliação de conectores de corte tipo *perfobond rib*, desconsiderando-se a interação com o betão.



5. CONCLUSÕES

O presente artigo ilustrou a concepção de uma estrutura metálica e mista aço betão com vista à ampliação e reforço de uma estrutura de betão armado existente.

Diversos condicionamentos ditaram a colocação de uma viga que funcionava como metálica numa fase intermédia, em que não havia conectores instalados, mas estava dotada de apoios provisórios. Posteriormente, foram realizadas aberturas na laje sobre a viga, permitindo instalar no seu banzo superior conectores do tipo *perfobond* que, após betonagem, cura, e demolição dos pilares intermédios provisórios, fazem a viga funcionar como mista.

Apresentou-se uma descrição geral do problema, a solução estrutural adoptada, regras gerais de análise e dimensionamento, e o seu processo construtivo.

Finalmente, foi colocado especial ênfase na análise dos conectores tipo *perfobond*, cuja utilização é pouco frequente, mas que neste caso permitia uma interacção total com um número reduzido de conectores (e portanto de orifícios na laje). Para além de critérios de dimensionamento disponíveis na literatura tendo em consideração o modo de ruína normalmente condicionante – o esmagamento e corte do betão – foi desenvolvido um modelo

de elementos finitos para avaliar a segurança relativamente a outro modo de ruína - a resistência do próprio conector.

Conseguiu-se assim a especificação de uma estrutura compatível com as exigências de projecto, ao mesmo tempo que se minoraram os custos inerentes ao seu processo construtivo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] EN 1992-1-1. Eurocode 2, Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules and Rules for Buildings, CEN, Brussels, 2003.
- [2] EN 1993-1-8. Eurocode 3, Design of Steel Structures. Part 1-8: Design of Joints, CEN, Brussels, 2004.
- [3] EN 1993-1-1. Eurocode 3, Design of Steel Structures. Part 1-1: General rules and Rules for Buildings, CEN, Brussels, 2003.
- [4] EN 1994-1-1. Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1-1. General rules and Rules for Buildings, CEN, Brussels, 2003.
- [5] Oguejiofor, E. C., Hosain, M. U., “Behavior of Perfobond Rib Shear Connectors in Composite Beams: Full Size Tests”, *Canad. J. Civ. Eng.*, 19, pp. 224-235, 1992.
- [6] Zellner, W., “Recent Designs of Composite Bridges and a New Type of Shear Connectors”, *Proceedings of the ASCE/IABSE Engineering Foundation Conference on Composite Construction*, Henniker, pp. 240-252, 1987.
- [7] Oguejiofor, E. C. e Hosain, M. U., “A Parametric Study of Perfobond Rib Shear Connectors”, *Canad. J. of Civil Eng.*, 21, pp. 614-625, 1994.
- [8] Ferreira, L.T.S., Andrade, S.A.L. de; Vellasco, P.C.G. da S.; “Chapter 6 CONNECTIONS - A Design Model for Bolted Composite Semi-Rigid Connections”, *Stability and Ductility of Steel Structures*, Tsutomu Usami & Yoshito Itoh editors, pp. 293 – 306, ISBN 0-08-0433 20-0, 1998.
- [9] Ferreira, L.T.S., Andrade, S.A.L. de; Vellasco, P.C.G. da S.; “Composite Semi-Rigid Connections for Edge and Corner Columns”, *Eurosteel, Second European Conference on Steel Structures*, Praga, República Tcheca, pp. 569-572, (abridge paper), trabalho completo publicado em CD-ROM 12 pags, 1999.
- [10] ANSYS, Swanson Analysis Systems”, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, version 8.0, Basic analysis procedures, Second edition, 2003.