

## COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO CONECTOR T-PERFOBOND EM VIGAS MISTAS

**Juliana da C. Vianna<sup>a</sup>, Sebastião A.L. de Andrade<sup>a</sup>, Pedro C.G. da S. Vellasco<sup>b</sup> and Luís F. da C. Neves<sup>c</sup>**

<sup>a</sup>*Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, 22453-900, Rio de Janeiro, Brasil, [jcvianna@esp.puc-rio.br](mailto:jcvianna@esp.puc-rio.br), [andrade@puc-rio.br](mailto:andrade@puc-rio.br), <http://www.civ.puc-rio.br/pt/index.php>*

<sup>b</sup>*Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ - Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, Sala 5018A, Maracanã, 22550-900, Rio de Janeiro, Brasil, [vellasco@eng.uerj.br](mailto:vellasco@eng.uerj.br), <http://www.labbas.eng.uerj.br/pgeciv/>*

<sup>c</sup>*Departamento de Engenharia Civil, FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Rua Sílvio Lima, Polo II, FCTUC, 3000, Coimbra, Portugal, [luis@dec.uc.pt](mailto:luis@dec.uc.pt), <https://webserv.dec.uc.pt/weboncampus/>*

**Keywords:** T-Perfobond, análise numérica, análise experimental, estruturas mistas.

**Resumo.** Este trabalho apresenta uma investigação numérica e experimental voltada para a avaliação do desempenho estrutural de conectores de cisalhamento tipo T-Perfobond utilizado em vigas mistas. As vantagens da utilização destes tipos de conectores alternativos incluem: alta resistência, fácil fabricação e instalação e um bom desempenho quanto ao comportamento à fadiga. A principal diferença entre o conector Perfobond já conhecido, e o conector T-Perfobond é a presença de uma mesa, proporcionando uma ancoragem maior ao sistema. Este conector combina a alta resistência do conector tipo bloco com a ductilidade e a resistência dos furos do Perfobond. As simulações numéricas foram desenvolvidas para avaliar a capacidade de deformação da mesa do conector T-Perfobond e investigar as vigas com interação total e parcial. Apresenta-se o projeto e os resultados de ensaios tipo push-out dos conectores tipo T-Perfobond com dois tipos de geometria, no qual variou-se a espessura da mesa do conector. Foram analisados conectores T-Perfobond para lajes de 12cm com dois furos na mesma direção, com armaduras passantes nos furos, variando diâmetro da armadura passante e da armadura dos estribos. Os resultados obtidos indicam que a nova proposta apresenta um comportamento adequado associado às vantagens econômicas e construtivas, bem como a ductilidade desejada.

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por novas tecnologias que atendam não só melhoras sob o ponto de vista estrutural, mas também atendam necessidades econômicas nas construções mistas continua a ser uma motivação nesta linha de pesquisa. O foco desta pesquisa é sobre conectores de cisalhamento.

Conectores de cisalhamento são empregados em estruturas mistas para garantir a ação mista entre o perfil de aço e a laje de concreto. Diversos autores apresentaram trabalhos numéricos e experimentais dentro desta linha de pesquisa. São de referir os trabalhos de [Machacek e Studnika \(2002\)](#), [Valente e Cruz \(2004\)](#), [Vellasco et al. \(2007\)](#), [Martins \(2008\)](#), [Ahn et al. \(2010\)](#). Dentre os diversos tipos existentes destes conectores pode-se citar os pinos com cabeça (stud bolts), perfis C, o Perfobond e o T-Perfobond, [Vianna et al. \(2009\)](#), [Figura 1](#).

Neste trabalho são apresentadas novas geometrias do conector T-Perfobond para utilização em vigas mistas sob momentos positivos. Este conector é formado por uma secção do perfil I, no qual combina a contribuição do conector Perfobond com a contribuição do banzo, que confere uma ancoragem adicional ao sistema. O conector Perfobond é formado por uma placa de aço retangular com furos soldada à viga de aço sendo imersa na laje de concreto, [Vianna et al.\(2008\)](#). Após a cura do concreto uma resistência ao cisalhamento longitudinal e o impedimento a uma separação vertical entre a viga de aço e a laje de concreto são atingidos. Isto se deve a contribuição de cilindros de concreto que se formam nos furos do Perfobond podendo ser ainda mais significativa com o uso de uma armadura adicional passando pelos furos do conector.

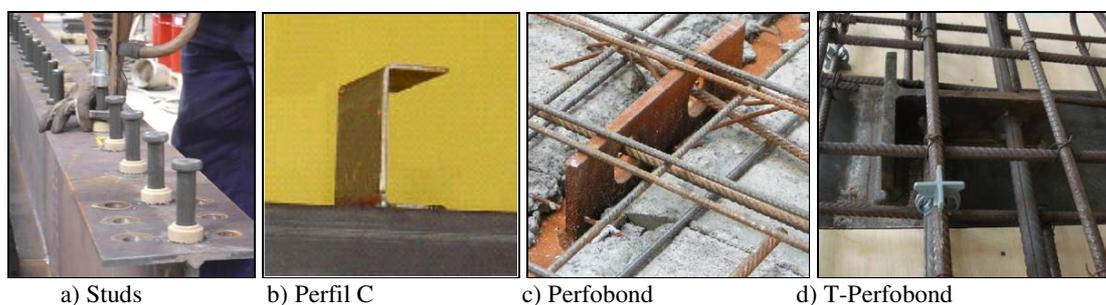


Figura 1: Exemplos de conectores disponíveis, [Vianna et al \(2009\)](#).

Neste artigo são apresentados os resultados de ensaios experimentais realizados em duas etapas para avaliar o desempenho do conector T-Perfobond e uma abordagem numérica que auxiliaram no estudo da capacidade de deformação da mesa do conector T-Perfobond, e na investigação das vigas com interação total ou parcial de cisalhamento.

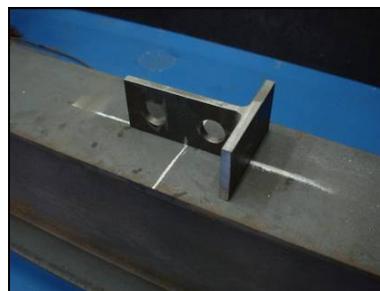
A primeira etapa dos ensaios experimentais foi realizada no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra e a segunda na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Na primeira etapa, o conector T-Perfobond foi fabricado a partir do perfil laminado IPN 340, [Figura 2a](#), composta pelo aço S275, [Vianna et al. \(2008\)](#). Na segunda, o conector T-Perfobond apresentou uma nova geometria, fabricado a partir de um perfil HP200x53, equivalente ao perfil americano HP8x36, [Figura 2b](#), em aço ASTM A572 Grau 50, equivalente ao S355. Esta nova proposta surgiu da idéia de avaliar um conector que possuísse mesma espessura de alma e mesa.

Os conectores T-Perfobond foram fabricados para lajes de 120mm de espessura, com resistência à compressão do concreto nominal correspondente a um concreto da classe

C30/37.



a) IPN 340 – Universidade de Coimbra



b) HP 200x53 – PUC-Rio

Figura 2: Conectores T-Perfobond, [Vianna et al \(2009\)](#).

## 2 MODELAGEM NUMÉRICA

Neste trabalho são apresentados os modelos numéricos bidimensionais e tridimensionais desenvolvidos. O modelo bidimensional foi adotado na simulação do conector T-Perfobond, e o tridimensional na simulação de um ensaio em escala real. A simulação numérica foi realizada por meio da ferramenta ANSYS 10.0 cujo procedimento de análise e cálculo baseia-se no Método dos Elementos Finitos.

### 2.1 Conectores T-Perfobond

Como descrito anteriormente, a segunda etapa de ensaios de push-out foi realizada a fim de se buscar um conector com características mais dúcteis. Para isto, optou-se em adotar para a nova geometria do conector T-Perfobond, um conector com espessura de alma e mesa iguais, em torno de 12 mm. Um estudo foi realizado através de simulação numérica para verificar a capacidade de deformação do conector com a nova geometria comparando com a geometria adotada na primeira etapa de ensaios.

O elemento Shell 63 foi utilizado para discretizar a mesa do conector T-Perfobond. Trata-se de um elemento plano, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó, três translações e três rotações. O elemento em questão permite a consideração de não-linearidade do material, além de outras características não utilizadas nesta análise.

A fim de se verificar a capacidade de deformação da mesa do conector, a simulação foi realizada utilizando simplificação de simetria. Os nós correspondentes ao apoio, representando parte da solda do conector no perfil, e os nós pertencentes a linha de simetria da mesa, foram restringidos em todos os graus de liberdade. Desta forma, tornou-se possível verificar a capacidade máxima de deformação da extremidade da mesa do conector.

A solicitação foi aplicada em forma de pressão na área da mesa, simulando o carregamento da laje de concreto no ensaio de push-out, correspondendo a uma pressão de 48,85MPa. A seção da mesa modelada está apresentada na [Figura 3](#), região destacada.

A [Figura 4](#) apresenta a modelagem da mesa do conector, [Vianna et al. \(2010\)](#). Neste estudo, foi considerado o comportamento linear dos materiais, com propriedade estrutural isotrópica. O módulo de elasticidade foi de 205000 MPa e coeficiente de Poisson 0,3.

A [Tabela 1](#) apresenta a capacidade de deslocamento e deformação elástica nodal na direção Z relacionados ao nó 9, apresentado na [Figura 4](#). A espessura 18,3mm corresponde a espessura da mesa dos conectores T-Perfobond utilizados na primeira fase de ensaios push-out. A espessura de 12 mm foi uma espessura aproximada para início do estudo.

A máxima capacidade de deslocamento na direção Z da chapa de 18,3 mm de espessura foi de 0,49 mm, enquanto que na chapa de 12 mm foi de 1,74 mm. Com a diminuição da espessura da chapa, houve um ganho de 255% na capacidade de deformação.

Um estudo foi realizado com a chapa de espessura de 11,3mm. Essa espessura corresponde a espessura da mesa e alma do perfil HP200x53. A máxima capacidade de deslocamento na direção Z da chapa de 11,3mm foi de 2,089 mm. Comparando com a espessura de 18,3 mm houve um ganho de 326% na capacidade de deformação.

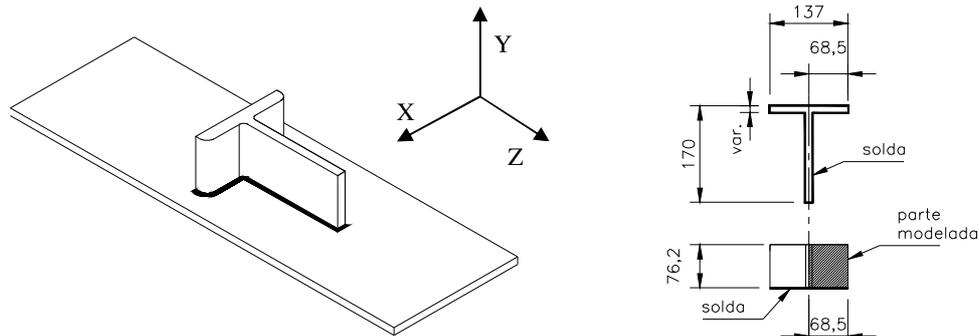


Figura 3: Conector T-Perfobond

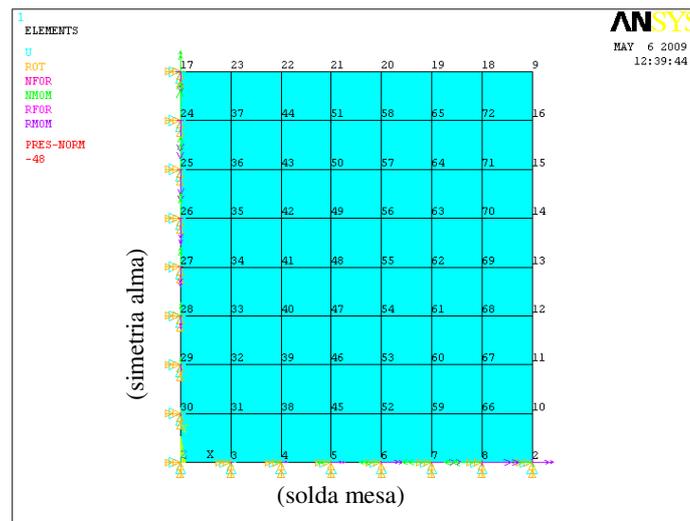


Figura 4: Malha e restrições da mesa do conector

Espessura da mesa (mm)	Deslocamento (mm)	Deformação elástica ( $\mu\epsilon$ )
18.3	0.49	203
12.0	1.74	574
11.3	2.09	657

Tabela 1: Resultados da modelagem numérica da mesa do conector

## 2.2 Ensaio em escala real

Uma simulação numérica foi realizada para avaliação do desempenho estrutural dos conectores de cisalhamento em vigas mistas. Os conectores estudados foram os: Perfobond, T-Perfobond e os Studs. Os conectores Perfobond e T-Perfobond-IN modelados neste estudo foram calibrados com os resultados obtidos dos ensaios de push-out realizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Para os T-Perfobond-IN, foram utilizados os resultados do ensaio no qual foram utilizados armaduras passantes de 12mm nos furos e nos estribos, com resistência a compressão do concreto dentro da classe C30/37, e o conector foi formado a partir de um perfil IPN340. Outro conector modelado neste estudo foi o T-Perfobond-IN-12-16, formado a partir de um perfil HP200x53. Este conector foi calibrado com os resultados obtidos do ensaio de push-out realizado no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Este protótipo adotou uma armadura passante de 16 mm nos furos de diâmetro 35 mm, e nos estribos, armadura de 12mm, com resistência do concreto a compressão na classe de C25/30. A [Figura 5](#) apresenta a curva carga normalizada versus deslizamento destes conectores. Para a apresentação dos resultados com diferenças de resistência à compressão do concreto empregado, foram utilizados valores normalizados. Os conectores Studs foram calibrados com os resultados obtidos em [Chapman & Balakrishnan \(1964\)](#). Neste ponto, é importante salientar que a rigidez do conector e sua resistência última utilizada na modelagem numérica foram baseadas em evidências experimentais reais.

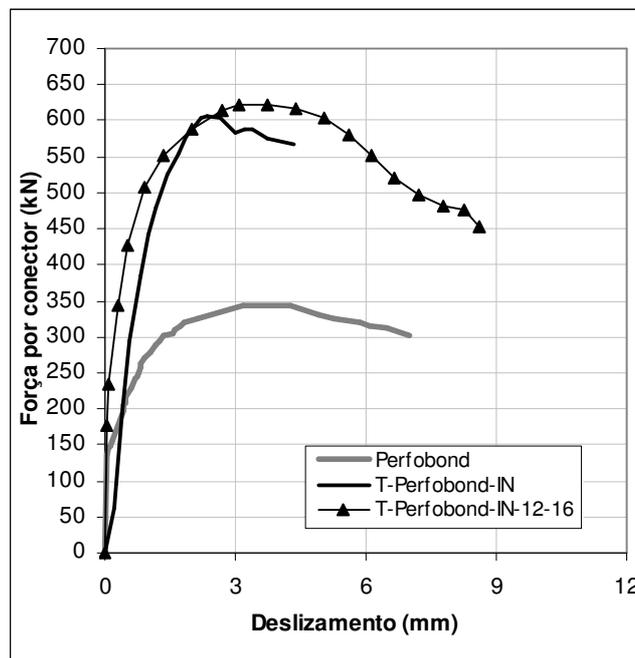


Figura 5: Resultados push-out Perfobond e T-Perfobond

A modelagem numérica foi validada através das comparações com os modelos apresentados por [Queiroz et al.\(2007\)](#). Os testes numéricos executados por [Queiroz et al.\(2007\)](#) com êxito, ilustram o comportamento do sistema misto que foi aqui investigado. As vigas consideradas tiveram um vão de 5490 mm em perfil laminado I com altura de 305 mm (12" x 6" x 44 lb/ft BSB) e a laje de concreto teve 120mm de espessura e 1220mm de largura.

A laje foi longitudinalmente armada com quatro barras superiores e quatro barras inferiores de 8 mm. A armadura transversal incorporada na superfície superior e inferior foi de 12,7mm a cada 152 mm, e 12,7 a cada 305mm, respectivamente. A resistência a tração, o módulo Young e o coeficiente de Poisson das armaduras foram  $320 \text{ N/mm}^2$ ,  $205000 \text{ N/mm}^2$  and 0.3, respectivamente. Uma descrição completa da viga é apresentada na [Figura 6](#).

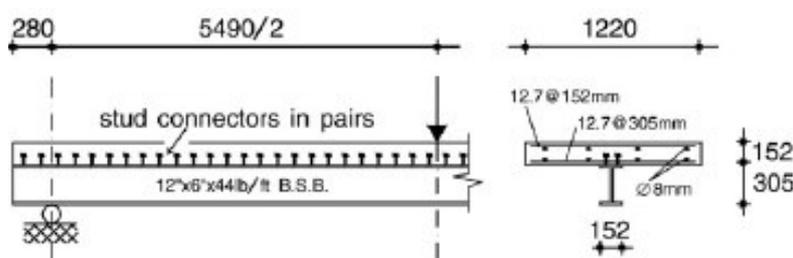


Figura 6: Layout da viga simplesmente apoiada, [Queiroz et al. \(2007\)](#)

Os elementos finitos adotados na modelagem numérica foram o elemento de casca elasto-plástico (SHELL43) para a seção de aço, o sólido (SOLID65) para a laje de concreto, e a mola não linear (COMBIN39) para representar o conector de cisalhamento. As armaduras longitudinais e transversais da laje de concreto foram consideradas dispersas em todo o elemento sólido.

O elemento concreto armado tridimensional SOLID 65 foi utilizado para a discretização da laje de concreto. Este elemento é constituído por oito nós e cada nó possui três graus de liberdade, no caso, translações em x, y e z. O elemento Solid 65 permite simular fissuração na tração (nas três direções ortogonais), esmagamento na compressão, deformação plástica, e fluência. Este elemento possibilita também a inclusão das barras de armadura na forma de taxas, denominada armadura dispersa, as quais são resistentes apenas a esforços de tração e de compressão. No entanto, caso seja de interesse, o elemento Solid 65 permite ainda a introdução de barras de armadura na forma discreta.

O elemento SHELL43 foi utilizado para discretizar o perfil de aço. Trata-se de um elemento plano com quatro nós com seis graus de liberdade, em cada modalidade, três translações e três rotações. O elemento tem plasticidade, fluência, rigidez, grande capacidade de deflexão e deformação.

O elemento COMBIN39, utilizado na modelagem dos conectores, é um elemento unidirecional com capacidade de força-deformação não linear que pode ser utilizado em qualquer análise. O elemento tem capacidade de deformação em três dimensões. A opção longitudinal permite ter um elemento uniaxial tração-compressão com até três graus de liberdade em cada nó: translações nodais nas direções x, y, e z. Não é considerada flexão ou torção. O elemento tem grande capacidade de deslocamento que pode haver dois ou três graus de liberdade em cada nó.

Considerando a simetria da viga, somente metade desta foi modelada. A discretização típica do modelo de elemento finito da viga mista é apresentada na [Figura 7](#).

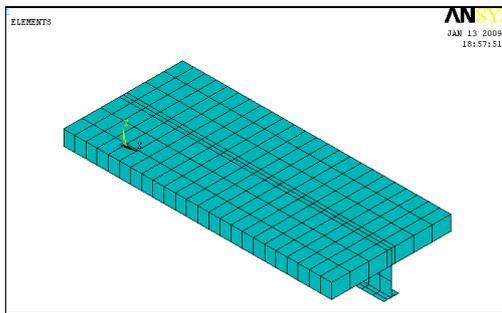
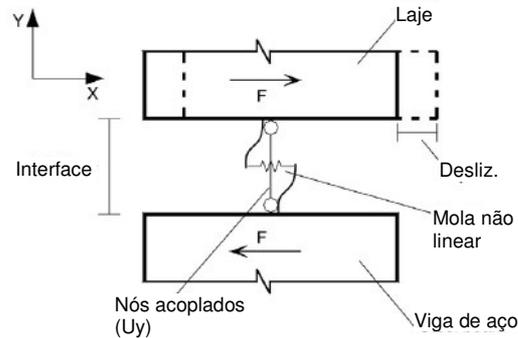


Figura 7: Discretização típica da viga mista

Figura 8: Modelagem dos conectores, [Queiroz et al. \(2007\)](#)

O critério de escoamento de Von Mises com encruamento isotrópico (material multilinear) foi utilizado para representar a viga de aço. A relação tensão-deformação é linear elástica até o escoamento, perfeitamente plástica entre o limite elástico e o início do encruamento da deformação, e segue a lei constitutiva utilizada por [Gattesco \(1999\)](#) e apresentado por [Queiroz et al. \(2007\)](#) para a deformação-encruamento.

O critério de escoamento de Von Mises com encruamento isotrópico também foi utilizado para as armaduras da laje. Um trabalho elástico-linear de endurecimento do material foi considerado, com o módulo tangente igual a 1/10000 do módulo elástico, a fim de evitar problemas numéricos. Os valores medidos nos ensaios experimentais realizados por [Chapman e Balakrishnan \(1964\)](#) foram utilizados para modelar as propriedades dos materiais dos componentes de aço (viga de aço e armaduras).

O comportamento da laje de concreto foi modelado pelo relacionamento do endurecimento multilinear isotrópico, usando o critério de Von Mises associado a um trabalho de endurecimento isotrópico. O comportamento uniaxial foi modelado pela curva multilinear tensão total versus deformação total, começando pela origem, com valores de tensões e deformações positivas, considerando-se a força de compressão concreto ( $f_c$ ) correspondente a uma deformação de 0,2%. A curva tensão-deformação também pressupõe um aumento total de  $0,05 \text{ N/mm}^2$  na força de compressão até 0,35% da deformação do concreto, para evitar problemas numéricos devido a um fluxo irrestrito de escoamento. Os coeficientes de transferência de cisalhamento no elemento de concreto foram os seguintes: 0,2 (fissura aberta) e 0,6 (fissura fechada). Os valores típicos variam de 0 a 1, em que 0 representaram uma fissura considerável (completa perda de transferência de cisalhamento) e 1 uma fissura pequena (sem perda de transferência de cisalhamento). A capacidade de esmagamento do elemento de concreto foi desabilitada para melhorar a convergência.

A resistência a compressão do concreto utilizada foi obtida dos ensaios à compressão dos corpos de prova cilíndricos. A resistência a tração do concreto considerada foi de 1/10 da sua resistência a compressão, e o coeficiente de Poisson foi de 0,2. O módulo de elasticidade do concreto foi avaliado de acordo com o [EUROCODE 4 \(2003\)](#).

O modelo permitiu adotar várias distribuições dos conectores, variando assim o número de conectores e espaçamento. As curvas carga versus deslizamento dos conectores (obtidas dos ensaios de push-out) foram utilizadas como dados de entrada para os elementos de mola não linear. As molas foram modeladas na interface aço-concreto, [Figura 8](#).

O carregamento foi aplicado de forma incremental, por meio de controle de deslocamento. Para o critério de convergência foi considerada a norma L2 dos deslocamentos (raiz quadrada da soma dos quadrados). A tolerância associada a este critério de convergência (CNVTOL

comando da ANSYS) e o incremento do passo de carga sofreu variação para solução de eventuais problemas numéricos. Sempre que a solução não convergia para o conjunto de parâmetros considerados, como o tamanho do passo de carga e o critério de convergência eram interligados, o comando de RESTART era restabelecido em conjunto com a opção CNVTOL, [Queiroz et al.\(2007\)](#).

Dois limites foram estabelecidos para definir a carga máxima de cada investigação no modelo numérico: um inferior e um superior, correspondendo a deformação do concreto a compressão de 0,2% e 0,35%, respectivamente, [Figura 9](#). Estes dois limites definem o intervalo no qual a falha da viga mista é atingida. Para o conector de cisalhamento, se o ponto da falha é localizado antes de atingir o limite inferior do concreto, então significa que o modo de falha da viga mista ocorrerá devido a falha da ligação aço-concreto. Por outro lado, se o ponto de falha é localizado depois do limite superior do concreto, o modo de falha é assumido devido ao esmagamento do concreto. Para o caso intermediário, onde a falha da ligação ocorre entre o limite inferior e superior do concreto, então o modo de falha poderia ser qualquer um deles. Portanto, o modelo de elementos finitos proposto tem capacidade de prever os dois modos de falha.

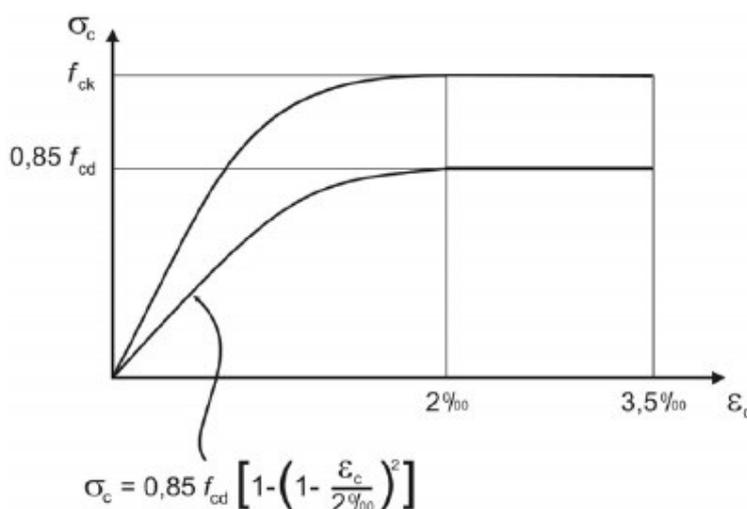


Figura 9: Diagrama tensão-deformação idealizado do concreto, [NBR 6118 \(2002\)](#)

A [Tabela 2](#) apresenta o tipo de conector considerado, a quantidade utilizada, o espaçamento entre os conectores, e as respectivas cargas últimas correspondentes ao modo de falha do concreto. No modelo com conectores Studs, foram utilizados 25 pares de conectores com 19mm de diâmetro, espaçados a cada 114,4mm, totalizando em 50 conectores de cisalhamento.

A [Figura 10](#) apresenta a curva típica carga versus deslocamento vertical das configurações investigadas como também os limites relacionados com a falha do concreto, de 0,2% e 0,35%, como mencionado anteriormente.

De todas as configurações avaliadas, a que apresentou maior rigidez inicial foi a configuração com 9 conectores Perfobond, simulando uma interação total. As outras configurações, com 5 e 3 conectores Perfobond, foram para simular uma interação parcial.

Observou-se que as simulações com 5 conectores T-Perfobond (T-Perf-120-IN-12) e 3 conectores T-Perfobond (T-Perf-120-IN-12-16) apresentaram praticamente a mesma rigidez inicial adotando quantidades diferentes de conectores.

Tipo de Conector	Número de Conectores	s (mm)*	Carga (kN)	
			0.20%	0.35%
Perfobond	9	343.2	100.01	121.27
	5	686.25	56.88	64.42
	3	1372.5	35.43	39.92
T-Perfobond (IPN 340)	5	686.25	63.14	66.90
	3	1372.5	39.97	44.51
T-Perfobond (W200x46,1)	3	1372.5	34.11	39.04
Studs	50	114.4	67.29	98.39

\* s - espaçamento

Tabela 2: Configurações dos modelos e resultados

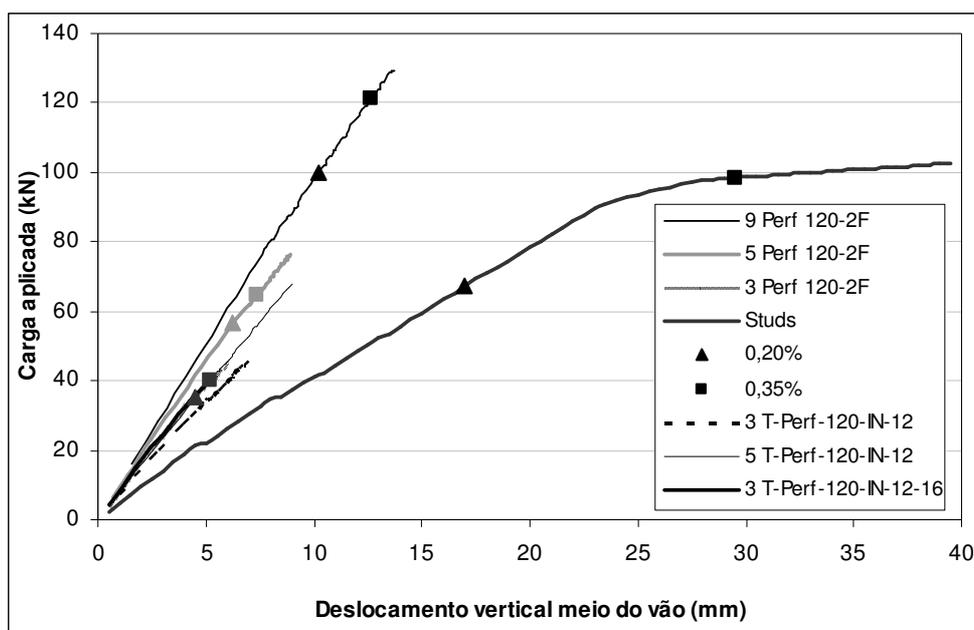


Figura 10: Carga versus deslocamento vertical no meio do vão

Os resultados também mostraram que os conectores Perfobond e T-Perfobond apresentaram uma boa correlação em termos das cargas últimas e da resposta estrutural, embora as curvas associadas aos ensaios de push-out de cada conector serem bastante distintas, Figura 5. Uma simples inspeção destas curvas indica que a carga de colapso do conector T-Perfobond corresponde ao dobro da capacidade de carga ao equivalente conector Perfobond. Uma possível explicação para o comportamento estrutural semelhante destes dois diferentes conectores pode estar relacionada ao fato de que na viga mista, o comportamento à flexão é predominante, ao contrário do ensaio de cisalhamento direto que é o ensaio de push-out.

Outra razão para esta tendência semelhante pode ser interpretada a partir do fato de que em

todas as simulações a ruptura do concreto foi diretamente responsável pela falha da viga mista, impedindo que o conector de cisalhamento pudesse alcançar sua capacidade última de resistência. A [Figura 11](#) apresenta a distribuição de deformação da viga mista de um dos diversos modelos investigados próximos a fase última de carregamento.

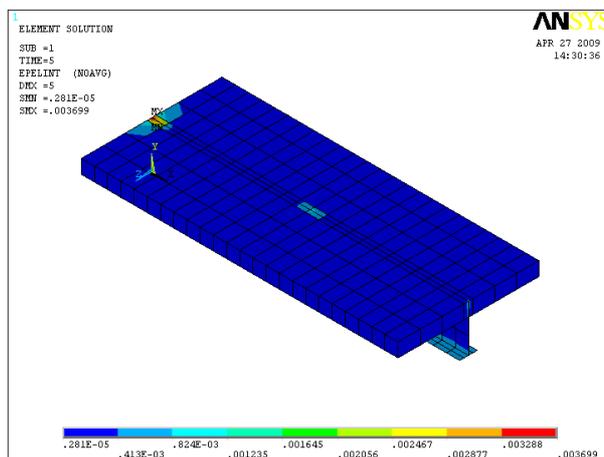


Figura 11: Deformação da laje de concreto – 3 T-Perfobonds (HP200x46,1).

### 3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A configuração e o procedimento seguido nos ensaios de push-out seguiram a recomendação do [Eurocode 4 \(2003\)](#). Os ensaios do tipo push-out permitem obter as relações entre forças aplicadas e deformações correspondentes de forma mais simples e direta do que nos ensaios de flexão.

O programa experimental dividido em duas etapas consistiu em dois ensaios na primeira etapa, seguido de mais três ensaios na segunda. Todos os conectores possuíam dois furos, altura de 76,2 mm, e comprimento 170 mm, [Vianna et al. \(2010\)](#).

O gráfico da [Figura 12](#) apresenta os resultados dos ensaios realizados na primeira e na segunda etapa com objetivo de avaliar a contribuição do conector projetado na segunda etapa de ensaio, após a análise numérica, na qual adoptou-se um conector mais flexível, onde as espessuras do banzo e da alma foram iguais.

Como os resultados de cada série possuíam diferentes resistências à compressão do concreto, o valor da força por conector foi normalizado ([Vianna et al. \(2010\)](#)).

A partir das curvas do gráfico da [Figura 12](#), conclui-se que os conectores *T-Perfobond* fabricados a partir do perfil HP 200x53, com espessura de mesa e alma iguais, apresentaram uma melhor capacidade de deslizamento, sendo portanto, conectores mais dúcteis. O conector que apresentou a melhor capacidade de carga foi o conector fabricado a partir do HP 200x53, que utilizou armaduras de 12mm nos estribos e de 16mm nos furos, TP-2F-AR-120-A-IN-12-16. Em relação ao conector TP-2F-AR-120-A-IN-10, da primeira etapa, este apresentou um ganho de 13% na resistência característica e 137% na capacidade de deslizamento. Os conectores fabricados a partir do IPN 340 apresentaram maior capacidade de carga, quando comparado aos outros dois ensaios da segunda etapa, porém estes apresentaram pouca ductilidade.

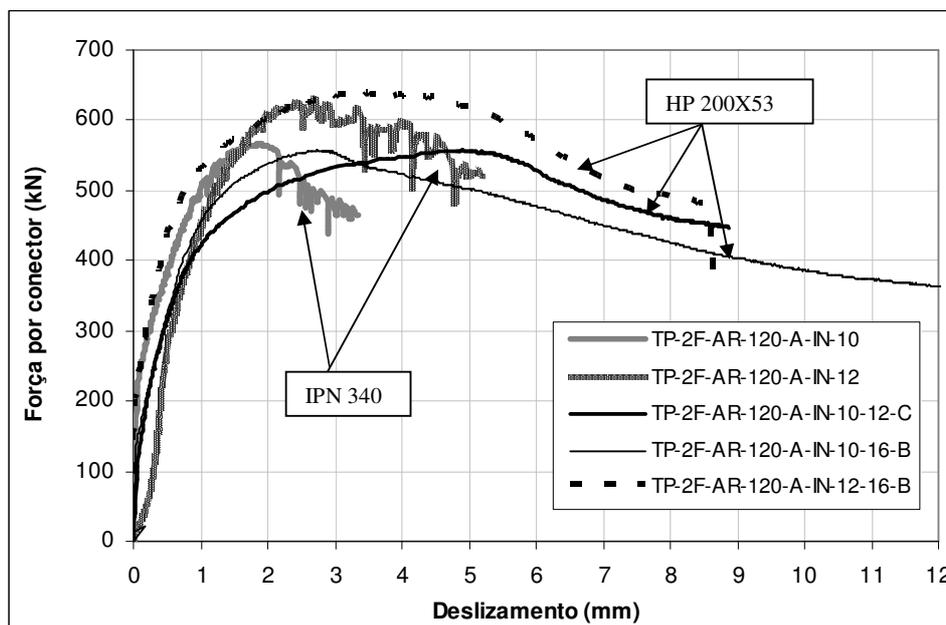


Figura 12: Comparação do T-Perfobond IPN 340 versus HP 200x53.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos após a normalização dos dados onde as variáveis significam:

$q_{u,test}$	resistência do conector ao cisalhamento do ensaio,
$P_{rk}$	resistência característica do conector,
$P_{rkNormaliz}$	resistência característica ao cisalhamento normalizada do conector,
$\delta_u$	capacidade de deslizamento,
$\delta_{uk}$	capacidade de deslizamento característico.

	Protótipo	$f_{ck}$ MPa	$q_{u,test}$ kN	$P_{rk}$ kN	$P_{rkNorm}$ kN	$\delta_u$ mm	$\delta_{uk}$ mm
Primeira etapa	TP-2F-AR-120-A-IN-10	33,00	585,30	526,77	509,22	2,54	2,29
	TP-2F-AR-120-B-IN-12		649,10	584,19	564,72	4,19	3,77
Segunda etapa	TP-2F-AR-IN-10-12-C	35,15	594,62	535,16	501,26	6,75	6,08
	TP-2F-AR-IN-10-16-B	29,18	541,97	487,77	501,44	5,15	4,64
	TP-2F-AR-IN-12-16-B	26,02	585,86	527,27	574,01	6,03	5,43

Tabela 3: Comparação entre a primeira e segunda etapa

#### 4 CONCLUSÕES

Após um breve estudo das espessuras das chapas que compõem as mesas dos conectores T-Perfobond, verificou-se que reduzindo a espessura da mesa do conector de 18,3mm para 12mm, um ganho significativo foi alcançado na capacidade de deformação da extremidade do conector.

Buscou-se então um perfil que possuísse tais espessuras, e optou-se em adotar o perfil HP200x53, que apresentava espessura de 11,3mm para a mesa e alma. Comparando com os

resultados da chapa de 18,3mm, constatou-se um aumento em torno de quatro vezes na capacidade de deslocamento da extremidade do conector. A partir deste resultado, optou-se em se realizar uma segunda etapa de ensaio do tipo push-out com um conector com tais características. O perfil HP200x53 já adotado em tal estudo, foi utilizado para a fabricação dos conectores. Esperava-se que tais conectores apresentassem uma capacidade de deformação maior, sendo, portanto um conector com características dúcteis. Isto foi comprovado pelos resultados obtidos dos ensaios de push-out.

Um modelo de elementos finitos tridimensional de viga mista foi adotado utilizando o programa comercial Ansys, baseando-se no estudo de [Queiroz et al.\(2007\)](#). Este se mostrou efetivo em termos de prever a resposta de carga e deflexão para vigas sujeitas a cargas concentradas ou uniformemente distribuídas, o deslizamento longitudinal na interface aço-concreto, a força de cisalhamento no conector e o modo de falha (falha do conector ou da laje de concreto por esmagamento). O modelo também foi capaz de investigar as vigas com interação total ou parcial ao cisalhamento.

A proposta de modelo tridimensional proporciona entre outras vantagens a oportunidade de desenvolver conhecimentos que seria praticamente impossível utilizando ensaios experimentais, devido aos custos e, sobretudo, com a dispersão das propriedades dos materiais que inevitavelmente ocorre no trabalho de laboratório.

As vantagens estruturais e construtivas de utilizar os tipos de conectores alternativos apresentados nesse trabalho estão relacionadas com a alta resistência que oferecem, sendo necessários menos conectores por viga, quer se considere interação total, quer parcial. Este fato pode ainda possibilitar interação total onde com outro tipo de conectores fosse conseguida apenas interação parcial. A sua colocação, porque é muito mais espaçada do que a dos Studs, pode ser discreta, sendo especialmente adequado em intervenções de reforço de estruturas existentes, o que não seria possível com Studs. Por outro lado, a solda corrente evita equipamentos especiais de solda com elevada potência elétrica, necessários para instalar os Studs. São facilmente produzidos em qualquer fábrica de estruturas metálicas.

Os conectores tipo Perfobond e T-Perfobond fornecem vantagem adicional de bom desempenho em situações de cargas cíclicas e fadiga em conectores. Quando comparados ao comportamento de conectores tipo Stud-bolt o correspondente detalhe de fadiga dos Perfobonds fornece valores de resistências mais elevadas. Estas considerações de projeto são muito importantes em estruturas submetidas à ações de tráfego e ações sísmicas.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelas agências brasileiras de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico: FAPERJ, CNPq, CAPES.

## REFERÊNCIAS

- Ahn, J.-H.; Lee, C.-G.; Won, J.-H.; Kim, S.-H. Shear resistance of perfobond rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement. *Journal of Constructional Steel Research*, 66, pp. 1295-1307, 2010.
- Chapman, J. C., Balakrishnan, S. Experiments on composite beams. *The Structural Engineer*, 42, 11, 369–383, 1964.
- EUROCODE 4. EN 1994. Design of composite steel and concrete structures Part 1.1 General rules and rules for buildings. CEN, *European Committee for Standardisation*, Brussels, 2003.

- Gattesco, N.; Analytical modelling of non linear behaviour of composite beams with deformable connection. *Journal of Constructional Steel Research*; 52, 195-218, 1999.
- Machacek, J.; Studnicka, J. Perforated shear connector. *Steel and Composite Structures*, vol. 2, no 1 (2002), pp. 51-66.
- Martins, J.P.S.C. Avaliação do comportamento estrutural de conectores em estruturas mistas: o perfobond. *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 64p., 2008.
- NBR 6118:2002. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas concreto – Procedimento, 2002.
- Oguejiofor, E. C.; Hosain, M. U.: A parametric study of perfobond rib shear connectors, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21, pp. 614-625, 1994.
- Queiroz, F. D., Vellasco, P.C.G.S., Nethercot, D.A. “Finite element modelling of composite beams with full and partial shear connection”, *Journal of Constructional Steel Research*, 63, pp. 505-521, 2007.
- Valente, M. I. B.; Cruz, P. J. S. Experimental analysis of Perfobond shear connection between steel and lightweight concrete, *Journal of Constructional Steel Research*, 60, pp. 465-479, 2004.
- Vellasco, P.C.G.S.; Andrade, S. A. L.; Ferreira, L.T.S.; Lima, L.R.O. Semi-rigid composite frames with perfobond and T-rib connectors Part 1: Full scale tests, *Journal of Constructional Steel Research*, 63, pp. 263-279, 2007.
- Vianna, J.C., Neves, L.F.C., Vellasco, P.C.G.S., Andrade, S.A.L., “Comportamento estrutural do conector t-perfobond para vigas mistas aço-concreto”. *Congresso de Construção Metálica e Mista*, VII CMM, Lisboa, 2009 (in portuguese).
- Vianna, J.C., Andrade, S.A.L., Vellasco, P.C.G.S., Costa-Neves, LF. Análise experimental e estudo comparativo de conectores de cisalhamento para estruturas mistas de aço e concreto. XXIX CILAMCE 2008, Maceió-Al., Brasil, 2008
- Vianna, J.C. Avaliação do Comportamento Estrutural de Conectores Perfobond e T-Perfobond para Vigas Mistas. *Tese de Doutorado*, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2009, 307p.
- Vianna, J.C., Andrade, S.A.L., Vellasco, P.C.G.S., Costa-Neves, LF. A parametric analysis of composite beams with T-perfobond shear connectors. SDSS’Rio 2010 Stability and Ductility of Steel Structures, Rio de Janeiro, Brazil. Proceedings of SDSS’Rio, v.2, pp.879-886, 2010.