

JOÃO VITOR FIORESI ALTOÉ

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS TIPO
CRESTBEAM COM DIFERENTES GRAUS DE CONEXÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo

Coorientador: José Luiz Rangel Paes

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A469e
2024 Altoé, João Vitor Fioresi, 1997-
Estudo do comportamento estrutural de vigas mistas tipo
crestbeam com diferentes graus de conexão / João Vitor Fioresi
Altoé. – Viçosa, MG, 2024.
1 dissertação eletrônica (164 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.200>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Construção mista. 2. Cisalhamento. 3. Análise numérica.
I. Veríssimo, Gustavo de Souza, 1965-. II. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 624.17723

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

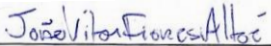
JOÃO VITOR FIORESI ALTOÉ

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS TIPO
CRESTBEAM COM DIFERENTES GRAUS DE CONEXÃO**

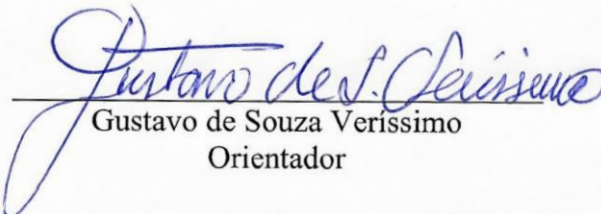
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2024.

Assentimento:



João Vitor Fioresi Altoé
Autor



Gustavo de Souza Verissimo
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por diariamente me conceder saúde.

Aos meus pais, Aduino Altoé e Maria Célia Fioresi Altoé, expresso minha profunda gratidão pelo amor infinito, pelos inúmeros exemplos e conselhos, assim como pelo esforço e sacrifício dedicado para minha formação como ser humano.

Ao meu irmão, João Alberto Fioresi Altoé, e minha cunhada, Lean Carla Oliveira Airão, pelos exemplos e conselhos, por todos os momentos em família e pela amizade e incentivo.

Aos orientadores Prof. Gustavo de Souza Veríssimo e Prof. José Luiz Rangel Paes, pela oportunidade de trabalho conjunto em mais um projeto acadêmico, pelos conhecimentos e conselhos compartilhados que transcendem a área acadêmica, pela prontidão e dedicação para ajudar no desenvolvimento deste trabalho e pela amizade que construímos ao longo dos anos.

Ao Prof. Mateus Couri Petruski, precursor deste trabalho e membro da banca examinadora, pelas inúmeras contribuições e sugestões desde a fase de projeto e pela amizade e companheirismo ao longo dos anos.

Às famílias Fioresi e Altoé e aos meus amigos do PPGEC, da República Os Gambás, de Viçosa, de Venda Nova do Imigrante e de Vitória, agradeço pelo companheirismo, pela amizade e por todos os momentos ao longo dos anos.

À minha amada Camila Spagnol de Faria, seu apoio incansável, compreensão e inspiração foram fundamentais para o sucesso desta pesquisa. Agradeço por compartilhar não apenas os desafios acadêmicos, mas também a jornada diária.

À Universidade Federal de Viçosa, por oferecer a oportunidade singular de aprendizado desde a graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

ALTOÉ, João Vitor Fioresi, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Estudo do comportamento estrutural de vigas mistas tipo *Crestbeam* com diferentes graus de conexão.** Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo. Coorientador: José Luiz Rangel Paes.

Nos elementos mistos de aço e concreto, o comportamento misto é obtido quando os dois materiais trabalham solidários, na maioria dos casos por meio de uma ligação mecânica, proporcionada por conectores de cisalhamento. A busca por conectores com melhor desempenho estrutural para pontes levou ao desenvolvimento de uma categoria de conectores denominada *composite dowels*, ou conectores de pinos mistos, que ainda permanecem como objeto de estudo. Este trabalho consiste em uma investigação sobre uma aplicação do *Crestbond*, um conector de pinos mistos desenvolvido no Brasil, numa tipologia de vigas mistas denominada *Crestbeam*, desenvolvida na UFV. A *Crestbeam* é uma viga mista com uma seção transversal monossimétrica em que a mesa de concreto armado é solidarizada a um perfil de aço T invertido que possui um conector *Crestbond* integrado à alma. Neste trabalho, foi realizada uma investigação do estado da arte dos *composite dowels* e uma análise numérica do comportamento estrutural das vigas *Crestbeam*. São descritos a evolução das geometrias, o comportamento estrutural, modelos mecânicos para dimensionamento nos estados limites último e de fadiga e indicações de novas investigações e perspectivas futuras. A análise numérica permitiu elucidar algumas questões relacionadas à influência de alguns parâmetros no desempenho estrutural da conexão com *Crestbond* e da própria *Crestbeam*. O modelo teórico proposto, para predição do comportamento da *Crestbeam*, apresentou boa correlação com o modelo numérico calibrado com resultados experimentais, com coeficiente de variação da ordem de 3%, evidenciando sua aplicabilidade para o projeto de vigas mistas *Crestbeam* sob carregamento estático.

Palavras-chave: *Crestbeam*; *Crestbond*; *Composite dowels*; Vigas mistas; Análise numérica; Conexão parcial; Conectores de cisalhamento.

ABSTRACT

ALTOÉ, João Vitor Fioresi, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2024. **Study of structural behavior of *Crestbeam* composite beams with different degrees of shear connection.** Advisor: Gustavo de Souza Veríssimo. Co-advisor: José Luiz Rangel Paes.

In steel-concrete composite elements, composite behavior is obtained when the two materials work together, in most cases by means of a mechanical connection, provided by shear connectors. The search for connectors with better structural performance for bridges led to the development of a category of connectors called composite dowels, which still remain the subject of study. This research consists of an investigation into an application of *Crestbond*, a composite dowels connector developed in Brazil, in a type of composite beam called *Crestbeam*, developed at UFV. The *Crestbeam* is a composite beam with a monosymmetrical cross-section in which the reinforced concrete slab is attached to an inverted T steel section which has a *Crestbond* connector integrated into the web. This work investigates the state of the art of *composite dowels* and performs a numerical analysis of the structural behavior of *Crestbeams*. The evolution of geometries, structural behavior, mechanical models for design in the ultimate and fatigue limit states and indications of further research and future prospects are described. The numerical analysis provided insights into some issues related to the influence of certain parameters on the structural performance of the *Crestbond* connection and *Crestbeam* itself. The proposed theoretical model for predicting the behavior of the *Crestbeam* showed good correlation with the numerical model calibrated with experimental results, with a coefficient of variation of around 3%, demonstrating its applicability for the design of *Crestbeam* composite beams under static loading.

Keywords: *Crestbeam*; *Crestbond*; Composite dowels; Composite beams; Numerical analysis; Partial shear connection; Shear connectors.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL	8
1.1 Considerações iniciais	8
1.2 Objetivos	10
1.3 Justificativa	11
1.4 Estrutura da dissertação	12
1.5 Referências	13
CAPÍTULO 2 – UMA REVISÃO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE <i>COMPOSITE DOWELS</i> COMO CONECTORES DE CISALHAMENTO DE VIGAS MISTAS DE AÇO-CONCRETO	18
2.1 Introdução	19
2.1.1 Considerações iniciais	19
2.1.2 Objetivo, escopo e metodologia	21
2.2 Evolução dos <i>composite dowels</i>	22
2.2.1 Visão geral.....	22
2.2.2 Breve história do projeto PreCo-Beam	24
2.2.3 O desenvolvimento do Crestbond no Brasil.....	27
2.3 Comportamento estrutural dos <i>composite dowels</i>	31
2.3.1 Primeiros desenvolvimentos	32
2.3.2 Desenvolvimentos recentes	36
2.3.2.1 Comportamento estrutural dos <i>composite dowels</i> em concreto fissurado.....	36
2.3.2.2 <i>Composite dowels</i> submetidos a esforços de cisalhamento e tração combinados.....	37
2.3.2.3 <i>Composite dowels</i> posicionados próximos à superfície de concreto.....	37
2.4 Modelos mecânicos dos conectores PZ, PZKL e MCL.....	38
2.4.1 Carregamento estático	39
2.4.1.1 Cisalhamento do concreto	39
2.4.1.2 <i>Pry-out</i> do concreto.....	39
2.4.1.3 Falha do aço	40
2.4.1.4 Resistência à tração	43
2.4.1.5 Resistência dos <i>composite dowels</i> ao esforço combinado de cisalhamento-tração....	43
2.4.1.6 <i>Composite dowels</i> posicionados próximos à superfície de concreto.....	44
2.4.1.7 Resumo.....	45
2.4.2 Carregamento cíclico (fadiga).....	46
2.4.3 Disposições construtivas e armaduras mínimas	47
2.5 Modelos mecânicos do <i>Crestbond</i>	49
2.6 Outras investigações	50
2.7 Conclusões finais e observações para futuros trabalhos.....	53
2.7.1 <i>Composite dowels</i> PZ, PZKL e MCL.....	53
2.7.2 Conector Crestbond.....	54
2.8 Referências	55

CAPÍTULO 3 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS TIPO <i>CRESTBEAM</i> COM CONEXÃO PARCIAL	65
3.1 Introdução	66
3.2 Equações de resistência do <i>Crestbond</i>	68
3.3 Modelo numérico.....	70
3.3.1 Modelos experimentais <i>Crestbeam</i>	70
3.3.2 Geometria e malha de elementos finitos	72
3.3.3 Interações, condições de contorno e carregamento	72
3.3.4 Relações constitutivas dos materiais	74
3.4 Validação do modelo numérico	76
3.5 Estudo de variação de parâmetros	83
3.5.1 Considerações iniciais	84
3.5.2 Resultados numéricos.....	87
3.5.3 Resultados calculados × numéricos.....	90
3.5.4 Ajuste da equação de pry-out do <i>Crestbond</i>	98
3.6 Conclusões	102
3.7 Referências	104
CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES	109
4.1 Considerações finais	109
4.2 Sugestões para trabalhos futuros	111
4.3 Referências	112
APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DOS MODOS DE FALHA DO <i>CRESTBOND</i>	113
APÊNDICE B – ESTUDO DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DA <i>CRESTBEAM</i>: PLANILHA ELETRÔNICA DE CÁLCULO.....	115
APÊNDICE C - ESTUDO DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DA <i>CRESTBEAM</i>: OBTENÇÃO DOS VALORES DE Q_{NUM} (PROCESSO ITERATIVO).....	133
APÊNDICE D - ESTUDO DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DA <i>CRESTBEAM</i>: PLANILHA ELETRÔNICA DE CÁLCULO AJUSTADA	148
APÊNDICE E – AVALIAÇÃO DOS MODOS DE FALHA DO <i>CRESTBOND</i> (EQUAÇÃO DE <i>PRY-OUT</i> AJUSTADA).....	163

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Considerações iniciais

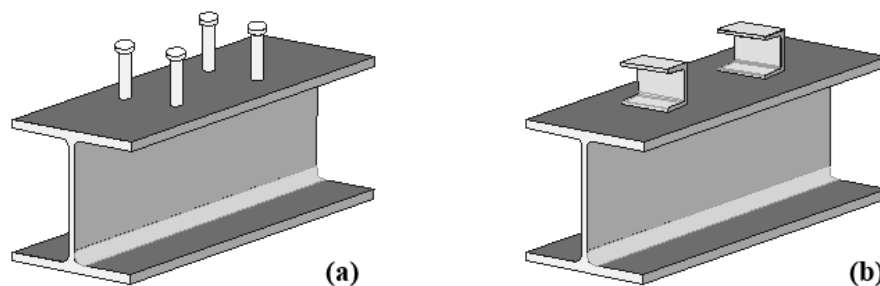
As estruturas mistas de aço e concreto se difundiram mundialmente, sendo empregadas há várias décadas na construção de pontes e edifícios, por apresentarem diversas vantagens estruturais, econômicas e construtivas, tais como ganho de rigidez, redução do consumo de aço e redução da altura das seções transversais em relação a elementos equivalentes não mistos [1,2].

Os elementos mistos de aço e concreto são projetados de tal forma que o concreto trabalhe predominantemente à compressão e o aço à tração, condição em que esses materiais apresentam seu melhor desempenho estrutural. Além disso, o aço e o concreto possuem propriedades mecânicas que favorecem sua utilização conjunta e que se complementam quando combinadas em uma estrutura mista: o aço confere ductilidade à estrutura, enquanto o concreto restringe deslocamentos dos elementos de aço, prevenindo fenômenos de instabilidade [3].

O aço e o concreto desenvolvem comportamento misto quando trabalham solidários. Para isso, é necessário algum meio de ligação capaz de promover a transferência de esforços entre os materiais, que pode se dar por aderência química ou mecânica, por atrito ou, como é mais frequente, por meio de conectores de cisalhamento. Estes últimos normalmente são instalados no elemento de aço por meio de solda, antes da concretagem [4].

Os conectores de cisalhamento mais utilizados no Brasil [5,6] são o pino com cabeça, ou *stud bolt* (Fig. 1.1a), e o perfil U laminado ou formado a frio (Fig. 1.1b). Ambos são regulamentados pela ABNT NBR 8800 [7] e ANSI/AISC 360 [8].

Fig. 1.1 – Conectores de cisalhamento usuais no Brasil: (a) stud bolt; (b) perfil U laminado.



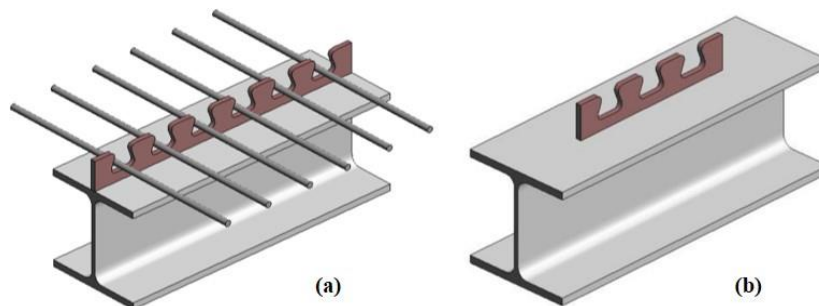
Fonte: Veríssimo [4].

O conector pino com cabeça (*stud bolt*) se tornou mundialmente popular devido à grande produtividade na instalação e ao fato de ele poder ser aplicado sobre uma fôrma de aço, por um

processo de eletrofusão que dura apenas alguns segundos. O *stud bolt* pode ser aplicado em diversos sistemas de lajes que dispensam escoramento e fôrmas de madeira. No entanto, apresenta baixo desempenho à fadiga [9-13], necessita de equipamentos especiais de soldagem [4,14] e a solda pode ser afetada adversamente pelas condições ambientais, pelo estado da superfície da fôrma metálica, ou pela pintura tanto da fôrma como das vigas, caso não sejam tomados cuidados especiais [6,15,16].

O baixo desempenho à fadiga e as dificuldades inerentes à instalação dos conectores *stud bolt* motivaram a busca por alternativas de conexão de elementos mistos de aço e concreto, principalmente para a construção de pontes e passarelas, em que os carregamentos cíclicos são predominantes. Em função disso, diversas pesquisas têm sido realizadas, desde os anos 1980, visando o desenvolvimento de novas soluções, com destaque para os conectores em chapa de aço contínua, perfurada ou recortada, conhecidos como *composite dowels* [4,9,17-34]. Esses conectores constituem o mais novo meio de conexão para estruturas mistas de aço e concreto, proporcionando alto grau de industrialização e rapidez ao canteiro de obras, e têm sido difundidos pela Europa [35-37]. Este trabalho tem seu foco na aplicação do *Crestbond*, um *composite dowels* (conector de pinos mistos) desenvolvido no Brasil por Veríssimo [38] (Fig. 1.2).

Fig. 1.2 - *Crestbond* soldado sobre a mesa superior de perfis I de forma (a) contínua e (b) descontínua.



Fonte: Veríssimo [4].

Mais recentemente, também vêm sendo desenvolvidas pesquisas sobre soluções em vigas mistas pré-fabricadas para pontes e viadutos utilizando *composite dowels*. Uma dessas soluções é a *Crestbeam* [39], uma viga mista com uma seção transversal monossimétrica em que a mesa de concreto armado é solidarizada a um perfil de aço T invertido que possui um conector *Crestbond* integrado à alma (Fig. 1.2), conforme ilustrado na Fig. 1.3.

Fig. 1.3 - Vigas mistas tipo *Crestbeam*: perfis de aço T invertido após operações de corte e solda (a) e vigas após concretagem da laje (b).



(a)

(b)

Fontes: (a) Petruski [39] e (b) o autor.

Os resultados da investigação de Petruski [39] demonstraram que a *Crestbeam* apresenta um desempenho estrutural promissor. Essa solução proporciona maior agilidade na fabricação e montagem da viga mista em relação às vigas mistas convencionais com perfis I, dispensando a instalação de conectores de cisalhamento e reduzindo o consumo de aço em função da eliminação da mesa superior do perfil.

Tendo em vista o momento atual, em que o Brasil carece de soluções tecnológicas que permitam a construção industrializada de pontes, viadutos e passarelas [39], este trabalho propõe avanços no desenvolvimento de um sistema inovador misto de aço e concreto, industrializado, que pode figurar como mais uma alternativa no âmbito nacional e internacional para a solução de demandas por obras de infraestrutura.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é estudar o comportamento estrutural de vigas mistas tipo *Crestbeam* com diferentes graus de conexão.

Foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- aprimorar o modelo de elementos finitos desenvolvido por Petruski [39] para simulação numérica do comportamento estrutural da *Crestbeam*;
- avaliar a influência da variação de alguns parâmetros geométricos (taxa de armadura efetiva, espessura da chapa de aço do conector e cobrimento do conector) e de materiais

- (resistência à compressão do concreto e tensão de escoamento do aço) do *Crestbond* sobre o desempenho estrutural da *Crestbeam*;
- comparar os resultados numéricos obtidos com modelos semiempíricos de predição da capacidade resistente do conector *Crestbond* encontrados na literatura;
 - investigar a relevância do cisalhamento dos pinos de concreto como possível modo de falha do conector *Crestbond*.

1.3 Justificativa

O Brasil possui cerca de 65% e 95% da sua matriz de transporte de cargas e de passageiros, respectivamente, dependente do modal rodoviário. A Confederação Nacional dos Transportes (CNT) [40] avaliou 110.333 km da malha rodoviária pavimentada do país e classificou 66% dessa malha como regular, ruim ou péssima. O déficit histórico de investimentos no setor é o principal fator responsável pelas más condições da infraestrutura rodoviária brasileira. Atualmente, seria necessário um investimento de, aproximadamente, 72 bilhões de reais para corrigir os problemas mais urgentes, que envolvem a construção, manutenção, readequação e sinalização de pavimentos, pontes, viadutos etc. [40].

Segundo Carvalho e Calixto [41], o Brasil possui um sistema rodoviário com grande parte das pontes construídas antes de 1984 e, portanto, com geometrias e capacidades incompatíveis com o tráfego atual. No país existem aproximadamente 137.000 Obras de Artes Especiais (OAE), sendo que 6.612 dessas obras estão sob responsabilidade do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Dessas, 3.351 encontram-se em condições precárias ou em mau estado de conservação [42].

Nota-se que o Brasil ainda apresenta déficit de infraestrutura na malha viária, com elevada demanda de pontes, viadutos e passarelas de pedestres, e carece de soluções tecnológicas que permitam a construção industrializada e eficiente dessas estruturas em curto prazo, de modo a dar uma resposta rápida no caso de necessidade de substituição emergencial de uma dessas estruturas, seja numa via de tráfego intenso ou num cenário pós-catástrofe.

A competitividade do mercado e as demandas sociais atuais têm motivado a inovação tecnológica na busca de maior eficiência na construção civil. O emprego das estruturas mistas de aço e concreto nos sistemas industrializados proporciona diversas vantagens construtivas e econômicas, tais como velocidade e simplicidade de execução, flexibilidade e facilidade de montagem e de alteração, possibilidade de reabilitação e de reforço e obtenção de estruturas leves e capazes de vencer grandes vãos [39].

Atualmente, diversas pesquisas comprovam que os *composite dowels* são elementos inovadores para compor vigas mistas pré-fabricadas de aço e concreto, sobretudo aquelas sujeitas a carregamentos dinâmicos, como é caso de pontes e viadutos [35,36,43-47].

Desde 2004, pesquisadores brasileiros da UFV e da UFMG vêm trabalhando no desenvolvimento do *Crestbond*, um conector de pinos mistos, para aplicação em vigas e pilares mistos [2,49-67]. Recentemente, esse grupo propôs uma solução tecnológica para vigas mistas de aço e concreto pré-fabricadas: a *Crestbeam* [39]. A *Crestbeam* é uma solução tecnológica nacional importante, de rendimento estrutural superior às soluções convencionais para vigas mistas compostas por perfis I duplamente simétricos e monossimétricos, possibilitando a construção industrializada de pontes e passarelas em curto prazo. Além disso, proporciona economia de aço em relação às soluções convencionais e dispensa as operações de instalação e solda de conectores de cisalhamento. No entanto, os estudos experimentais e teóricos sobre a *Crestbeam* são recentes, e ainda não foram realizadas análises sobre o desempenho estrutural da solução a partir da variação de parâmetros geométricos e de materiais.

Por se tratar de uma tecnologia emergente, o estudo do comportamento estrutural de vigas mistas tipo *Crestbeam* com diferentes graus de conexão é útil por diversos motivos, dentre eles: consolidar o desenvolvimento de uma solução tecnológica nacional, que pode figurar como mais uma alternativa industrializada para a solução de demandas por obras de infraestrutura; fornecer subsídios para o dimensionamento de vigas mistas tipo *Crestbeam*; e divulgar a solução tecnológica, bem como as suas potencialidades, para os profissionais da engenharia da construção.

1.4 Estrutura da dissertação

Este documento foi organizado em quatro capítulos.

No CAPÍTULO 1, apresenta-se uma introdução geral sobre o tema abordado, abrangendo as considerações iniciais, os objetivos, as justificativas e a estrutura do trabalho.

No CAPÍTULO 2, apresenta-se uma revisão sobre os conectores de cisalhamento do tipo *composite dowels*, abordando-se os conectores *Puzzle-shaped* e *Clothoidal-shaped*, homologados na Alemanha [48] e o *Crestbond*, desenvolvido no Brasil.

No CAPÍTULO 3, apresenta-se uma avaliação do comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto do tipo *Crestbeam* em situação de conexão parcial, bem como um estudo de variação de parâmetros, por meio de simulação numérica com modelos de elementos finitos.

No CAPÍTULO 4, apresentam-se as conclusões gerais e sugestões para futuros trabalhos.

1.5 Referências

1. Yu-Hang, W.; Jian-Guo, N.; Jian-Jun, L. Study on fatigue property of steel–concrete composite beams and studs. *Journal of Constructional Steel Research*, [S.L.], v. 94, p. 1-10, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.11.004>.
2. Almeida, R. L. J. Simulação numérica de modelos de cálculo para representação dos modos de falha de conectores de cisalhamento Crestbond. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2018. <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/22677>.
3. Calado, L.; Santos, J. Estruturas mistas de aço e betão. IST Press, Lisboa, 2013.
4. Veríssimo, G. S. Desenvolvimento de um Conector de Cisalhamento em Chapa Dentada para Estruturas Mistas de Aço e Concreto e Estudo do seu Comportamento. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. <http://hdl.handle.net/1843/LMCA-7E6HVC>.
5. Barbosa, W. C. S. Estudo de conectores de cisalhamento em barras de aço para vigas mistas de aço e concreto. Tese (Doutorado), Curso de Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2016. <http://dx.doi.org/10.26512/2016.12.T.23188>.
6. Fakury, R. H., Silva. A. L. R. C., Caldas, R.B. Dimensionamento e elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. São Paulo, Brasil: Pearson Education, 2016.
7. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - NBR 8800:2008: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios - Procedimento, 2008.
8. American Institute of Steel Construction (AISC). ANSI/AISC 360-22: Specification for Structural Steel Buildings. AISC. Chicago, 2022.
9. Zellner W. Recent designs of composite bridges and a new type of shear connectors. In: *Composite construction in steel and concrete: proceedings of an engineering foundation conference*. 1987; p. 240–52.
10. Hanswille, G.; Porsch, M.; Ustundag, C. Resistance of headed studs subjected to fatigue loading Part I: experimental study. *Journal of Constructional Steel Research* 2007; 63(4):475-484. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.035>.
11. Classen, M.; Gallwoszus, J. Concrete fatigue in composite dowels. *Structural Concrete* 2016; 17(1):63-7. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201400120>.
12. Christou, G.; Hegger, J.; Classen, M. Fatigue of clothoid shaped rib shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research* 2020; 171:106133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106133>.
13. Kong, F.; Huang, P.; Han, B.; Wang, X.; Liu, C. Experimental study on behavior of corrugated steel-concrete composite bridge decks with MCL shape composite dowels. *Engineering Structures* 2021; 227:111399. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111399>.
14. Zheng, S.; Liu, Y.; Yoda, T.; Lin, W. Parametric study on shear capacity of circular-hole and long-hole perfobond shear connector. *Journal of Constructional Steel Research* 2016; 117:64-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.09.012>.
15. Chien, E.Y.L.; Ritchie, J.K. Design and construction of composite floor systems. Canadian Institute of Steel Construction, Toronto, Ontario, 1984.
16. Ghavami, K. Ultimate load behaviour of flexible and rigid connectors in composite beams. *Journal of Constructional Steel Research* 1998; 46(1-3):208-210. [http://dx.doi.org/10.1016/s0143-974x\(98\)00142-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0143-974x(98)00142-4).

17. Andrä, H. Neuartige Verbundmittel für den Anchluss von Ortbetonplatten an Stahlträger. *Beton und Stahlbetonbau* 1985; p. 325-328. <https://doi.org/10.1002/best.198500580>.
18. Leonhardt, F.; Andrä, W.; Andrä, H.P.; Harre, W. Neues vorteilhaftes verbundmittel für stahlverbund-tragwerk mit höher dauerfestigkeit. *Beton und Stahlbetonbau* 1987; 12:325-331. <https://doi.org/10.1002/best.198700500>.
19. Bode, H.; Künzel, R. Scherversuche zum Tragverhalten eines neuartigen Stahlverbundträgers mit schwalbenschwanzförmigen Stegausehnehmungen als Verbundmittel, *Untersuchungsbericht 2 (88)*, Universität Kaiserslautern, 1988 (não publicado).
20. Kraus, D.; Wurzer, O. Bearing capacity of concrete dowels. *IABSE*, 1997, p. 133-138. <https://doi.org/10.5169/SEALS-957>.
21. Kraus, D.; Wurzer, O. Nonlinear Finite-Element Analysis of Concrete Dowels. *Computers & Structures* 1997; 64(5-6):1271-1279. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(97\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(97)00034-5).
22. Zapfe C. Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln zur Übertragung der Längsschubkräfte. Tese (Doutorado), Universität der Bundeswehr, 2001.
23. Schlaich, J. Development and application of saw-tooth connections for composite structures, In: *International Symposium on Connections Between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, 2001, 2:1105-1118.
24. Schmitt, V., Seidl, G., Hever, M., Zapfe, C. Verbundbrücke Pöcking – Innovative VFT Träger mit Betondübeln. *Stahlbau* 2004; 73(6):387-393. <https://doi.org/10.1002/stab.200490108>.
25. Lorenc, W.; Ignatowicz, R.; Kubica, E. Numerical model of shear connection by concrete dowels. *Recent Developments in Structural Engineering Mechanics and Computation*, Millpress, Rotterdam, Netherlands, 2007.
26. Berthelley J., Seidl G. Les poutres Préco - Une solution économique pour les petites portées, objet d'un programme de recherche européen. *Ouvrages d'art* 2007; 54:22-27. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/newsletters/boa-bulletin-ouvrages-art/derniers-numeros-notre-boa/boa-bulletin-ouvrages-art-ndeg-54>.
27. Fink, J.; Petraschek, T. Tragmodelle zur Bestimmung der Längsschubtragfähigkeit des Kronendübel als neuartiges Verbindungsmittel im Verbundbau. *Stahlbau* 2007; 76(10):761-770. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.200710081>.
28. Vianna, J. C.; Costa-Neves, L. F.; Vellasco, P. C. G. S.; Andrade, S.A.L. Experimental assessment of Perfobond and T-Perfobond shear connectors' structural response. *Journal of Constructional Steel Research* 2009; 65(2):408-421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.02.011>.
29. Seidl, G. Behaviour and load bearing capacity of composite dowels in steel-concrete composite girders. Tese (Doutorado), Wroclaw University of Technology, 2009.
30. Lorenc, W.; Kubica, E.; Kożuch, M. Testing Procedures in Evaluation of Resistance of Innovative Shear Connection with Composite Dowels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2010; 10(3):51-63. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60136-8](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60136-8).
31. Kim, S.; Choi, K.; Park, S.; Park, S.; Jung, C. Experimental shear resistance evaluation of Y-type perfobond rib shear connector. *Journal of Constructional Steel Research* 2013; 82:1-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.12.001>.
32. Lorenc, W.; Koch, M.; Rowiński, S.: The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Part. 1: Experimental study. *Journal of Constructional Steel Research* 2014; 101:482-499. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.013>.
33. Lorenc, W.; Kożuch, M.; Rowinski, S.: The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Part. II: Theoretical investigations. *Journal of Constructional Steel Research* 2014; 101:500-518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.012>.

34. Lacki, P.; Kasza, P.; Adamus, K. Optimization of composite dowels shape in steel-concrete composite floor. *Composite Structures* 2019; 222:110902. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110902>.
35. Seidl, G.; Petzek, E.; Bancila, R. Composite dowels in bridges – efficient solution. *Advanced Materials Research* 2013; 814:193-206. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.814.193>.
36. Seidl, G. *et al.* Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission (PRECO-BEAM). EUR 25321 EN, European Commission, 2013.
37. Lorenc, W.; Kolakowski, T.; Hukowicz, A.; Seidl, G. Verbundbrücke bei Elbląg. *Stahlbau* 2017; 86(2):167-174. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.201710463>.
38. Veríssimo, G. S. Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento. Projeto de Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
39. Petruski, M. C. Avaliação numérico-experimental do comportamento de vigas mistas pré-moldadas tipo *Crestbeam* sujeitas a flexão simples. 2021. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2021. <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.002>.
40. Confederação Nacional Do Transporte (CNT). Pesquisa CNT de rodovias 2022. 2022. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/6b24f1b4-9081-485d-835d-c8aafac2b708>. Acesso em: 13 dez. 2022.
41. Carvalho, D. M.; Calixto, J. M. F. Analysis of strengthening procedures of reinforced concrete highway bridges: a brazilian case study. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais* 2019, 12(1):199-209. <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952019000100013>.
42. Timerman, J. Inspeção de pontes: o estágio atual da normalização. 2015. Disponível em: <https://abcic.org.br/Arquivos/vh4hutlk.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2022.
43. Feldmann, M.; Kopp, M.; Pak, D. Composite dowels as shear connectors for composite beams – background to the German technical approval. *Steel Construction* 2016; 9(2):80–88. <https://doi.org/10.1002/stco.201610020>.
44. Lorenc, W. The Model for a General Composite Section Resulting from the Introduction of Composite Dowels. *Steel Construction* 2017; 10(2):154-167. <https://doi.org/10.1002/stco.201710019>.
45. Kopp, M.; Wolters, K.; Classen, M.; Hegger, J.; Gündel, M.; Gallwoszus, J.; Heinemeyer, S.; Feldmann, M. Composite dowels as shear connectors for composite beams – background to the design concept for static loading. *Journal of Constructional Steel Research* 2018; 147:488–503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.013>.
46. Classen, M.; Hegger, J. Shear tests on composite dowel rib connectors in cracked concrete. *ACI Structural Journal* 2018; 115(3):661-671. <http://dx.doi.org/10.14359/51701145>.
47. Kozuch, M.; Lorenc, W. The behaviour of clothoid-shaped composite dowels: Experimental and numerical investigations. *Journal of Constructional Steel Research* 2020; 167:105962. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105962>.
48. German Institute for Building Technology (DIBT), Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, n. Z-26.4-56, Berlin, 2023
49. Oliveira, A. F. N. Análise do comportamento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para sistemas de piso misto com pré-laje de concreto. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. <http://hdl.handle.net/1843/LMCA-75XKVE>.

50. Silva, M. A. P. Modelos semiempíricos para a estimativa da capacidade resistente de conectores de cisalhamento Crestbond e Perfobond. Dissertação (Mestrado), Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2011. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3748>.
51. Silva, H. P. Simulação numérica do comportamento de conectores de cisalhamento tipo Crestbond. Dissertação (Mestrado), Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2013. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3790>.
52. Dutra, C. M. Estudo do comportamento estrutural do conector Crestbond considerando variações geométricas e mecânicas. Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2014. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3838>.
53. Petruski, M. C. Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto com conectores *Crestbond*. Dissertação (Mestrado), Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2016. <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9811>.
54. Cardoso, H. S. Avaliação do comportamento de conectores constituídos por chapas de aço com recorte retangulares – ênfase em conectores de geometria *Crestbond* aplicados em pilares mistos. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2018. <http://hdl.handle.net/10316/84982>.
55. Cardoso, H. S.; Caldas, R. B.; Fakury, R. H.; Veríssimo, G. S. Estudo do comportamento de conectores *Crestbond* por meio de simulação numérica. Revista da Estrutura de Aço 2018; 7(2):140-159. <http://dx.doi.org/10.17648/aco-2238-9377-7-2-4>.
56. Cardoso, H. S.; Caldas, R. B.; Fakury, R. H.; Veríssimo, G. S.; Almeida, R. L. J. Modelo de Cálculo para o Cisalhamento do Concreto nos Conectores *Crestbond*. Revista da Estrutura de Aço 2018; 7(3):280-299. <http://dx.doi.org/10.17648/aco-2238-9377-7-3-3>.
57. Cardoso, H. S.; Aguiar, O. P.; Caldas, R. B.; Fakury, R. H. Composite dowels as load introduction devices in concrete-filled steel tubular columns. Engineering Structures 2020; 219:110805. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110805>.
58. Almeida, R. L. J.; Veríssimo, G. S.; Ribeiro, J. C. L.; Paes, J. L. R.; Petruski, M. C.; Caldas, R. B. Capacidade resistente do conector *Crestbond* à falha do aço desencadeada por um mecanismo combinado de cisalhamento e flexão. Revista da Estrutura de Aço 2019; 9(1):61-80.
59. Almeida, R. L. J.; Veríssimo, G. S.; Ribeiro, J. C. L.; Paes, J. L. R.; Caldas, R. B.; Cardoso, H. S.; Fakury, R. H. Assessing the bearing capacity of *Crestbond* shear connectors to concrete pry-out. IBRACON Structures and Materials Journal 2023; 16(1):e16107. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000100007>.
60. Aguiar, O. P.; Caldas, R. B.; Oliveira, H. M. S., Fakury, R. H. Estudo de conectores Crestbond em pilares mistos preenchidos com concreto. Revista Estrutura do Aço 2015; 4(3):181–199.
61. Prado, L. F. P. Estudo numérico do conector Crestbond e de chapa passante em pilares mistos tubulares circulares preenchidos com concreto em situação de incêndio. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2017. <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-AVQLQZ>.
62. Aguiar, O. P.; Caldas, R. B.; Rodrigues, F. C.; Fakury, R. H.; Veríssimo, G. S. Crestbond Shear connectors for load transfer in concrete filled tube columns, IBRACON Structures and Materials Journal 2018; 11(5):960–965. <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952018000500004>.
63. Pereira, A. C. Estudo numérico dos conectores Crestbond em pilares mistos tubulares circulares de seção esbelta. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2020. <http://hdl.handle.net/1843/51127>.

64. Santos, L. R. Conectores composite dowels aplicados a pilares mistos de seção tubulares esbelta. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2021. <http://hdl.handle.net/1843/39464>.
65. Prado, L. F. P.; Miranda, L. G. J.; Caldas, R. B. Crestbond Shear connectors for load transfer on concrete filled composite columns in fire, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais 2022; 15(3):e15310. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000300010>.
66. Pereira, A. C.; Miranda, L. G. J.; Santos, L. R.; Caldas, R. B. Development of a numerical model to simulate the behavior of plate shear connectors applied to slender cross-section concrete-filled steel tube. IBRACON Structures and Materials Journal 2023; 16(1):e16108. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000100008>.
67. Santos, R. R.; Carvalho, H.; Santos, R. F.; Bittencourt, T. N.; Caldas, R. B. Comparative study of steel-concrete composite beams for railway bridges. IBRACON Structures and Materials Journal 2024, 17(3):e17302. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000300002>.

CAPÍTULO 2 – UMA REVISÃO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE *COMPOSITE DOWELS* COMO CONECTORES DE CISALHAMENTO DE VIGAS MISTAS DE AÇO-CONCRETO

João Vitor Fioresi Altoé¹, Camila Spagnol de Faria¹, Caio Lopes Pereira¹, Mateus Couri Petruski², José Luiz Rangel Paes¹, Gustavo de Souza Veríssimo¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 36570-900, Brasil.

²Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 85819-110, Brasil.

RESUMO

Composite dowels são conectores de cisalhamento utilizados principalmente em vigas mistas de aço-concreto para construção de edifícios e de pontes mistas pré-fabricadas. Este artigo teve como objetivo investigar o atual estado da arte e contribuir para o desenvolvimento do tema. Desta revisão derivaram as seguintes contribuições: a evolução das geometrias, o comportamento estrutural, os modelos de dimensionamento mecânico para os estados limites último e de fadiga e as disposições construtivas para os *composite dowels*. A revisão se concentrou nas geometrias *Puzzle* e *Clothoidal*, padronizados pela aprovação técnica alemã [1], e no *Crestbond*. Para este último, também é apresentada uma base de dados experimental. Ao final do artigo são indicadas novas investigações e perspectivas futuras.

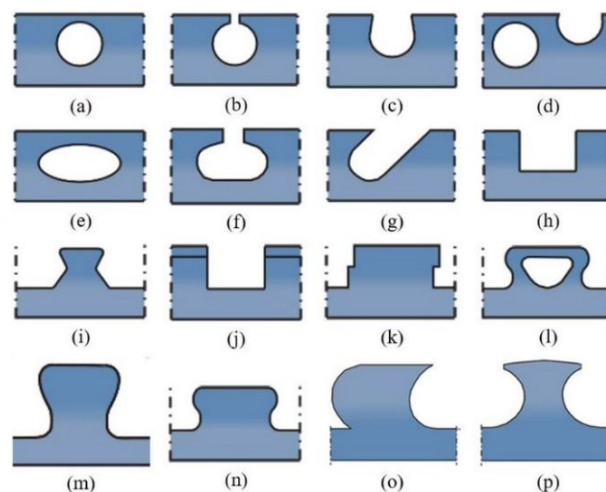
Palavras-chave: *Composite dowels*; *Crestbond*; *Puzzle*; *Clothoidal*, Conectores de cisalhamento; Vigas mistas.

2.1 Introdução

2.1.1 Considerações iniciais

As estruturas mistas de aço e concreto se difundiram mundialmente, sendo empregadas há várias décadas na construção de pontes e edifícios em virtude de diversas vantagens construtivas, econômicas e estruturais, como o ganho de rigidez, a redução do consumo de aço e da altura das seções transversais. O *headed stud* é o conector de cisalhamento mais utilizado mundialmente e é regulamentado por diversos códigos internacionais [2-4]. No entanto, apresenta baixo desempenho à fadiga [5-9], necessita de equipamentos especiais de soldagem [10,11] e a solda pode ser afetada adversamente pelas condições ambientais, pelo estado da superfície da fôrma metálica, ou pela pintura tanto da fôrma como das vigas, caso não sejam tomados cuidados especiais [12-13]. O baixo desempenho à fadiga e as dificuldades inerentes à instalação desses conectores motivaram a busca por alternativas de conexão de elementos mistos de aço e concreto, principalmente para a construção de pontes e passarelas, em que os carregamentos cíclicos são predominantes. Diversas pesquisas têm sido realizadas desde os anos 1980 visando o desenvolvimento de novas soluções, com destaque para os conectores em chapa de aço plana, perfurada ou recortada, obtidos a partir de uma linha de corte, conhecidos como *composite dowels* (Fig. 2.1) [14-38].

Fig. 2.1 - Formas de conectores de cisalhamento tipo *composite dowels* estudados por diferentes autores.

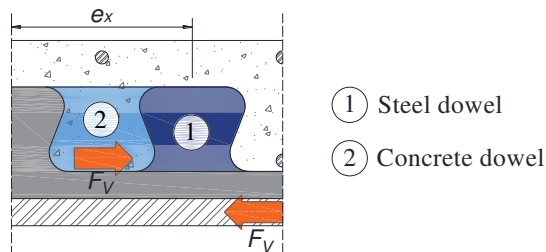


Fonte: Heinemeyer [39].

Inicialmente, os mecanismos de falha desses conectores estavam associados diretamente à ruptura do concreto e, por esta razão, eram conhecidos como *concrete dowels*. Posteriormente, outros estudos demonstraram a possibilidade de ocorrência da falha dos pinos de aço e esses conectores passaram a ser referidos como *composite dowels*. Essa designação faz referência ao

mecanismo de falha misto, que pode ocorrer tanto no pino de aço (*steel dowel*) quanto no pino de concreto (*concrete dowel*) (Fig. 2.2). Nesses conectores, as forças de cisalhamento são transferidas principalmente pela interação entre os pinos de aço e de concreto (igualmente espaçados pelo parâmetro e_x - Fig. 2.2) [40].

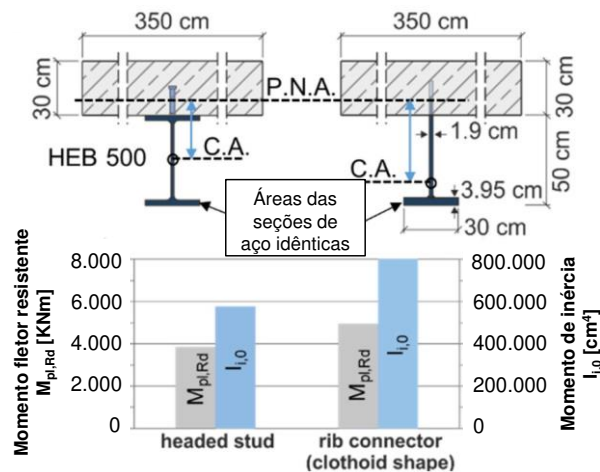
Fig. 2.2 – Mecanismo de falha misto dos *composite dowels*: pino de aço (*steel dowel*) e pino de concreto (*concrete dowel*).



Fonte: adaptado de Cardoso *et al.* [40].

Os principais aspectos positivos dos *composite dowels*, em comparação com os conectores *headed studs*, são a maior capacidade de carga, com elevada rigidez em regime elástico, que é ideal para evitar a falha por fadiga [10], e elevada capacidade de deformação pós-pico, inclusive em concretos de alta resistência [39,41-45], de modo que esses conectores são classificados como dúcteis conforme a EN 1994-1-1 [4]. Na Fig. 2.3 é apresentada uma comparação entre a utilização de *headed studs* e *composite dowels* em vigas mistas de aço e concreto.

Fig. 2.3 – Análise comparativa entre vigas mistas convencionais (*headed studs*) e com *composite dowels*.

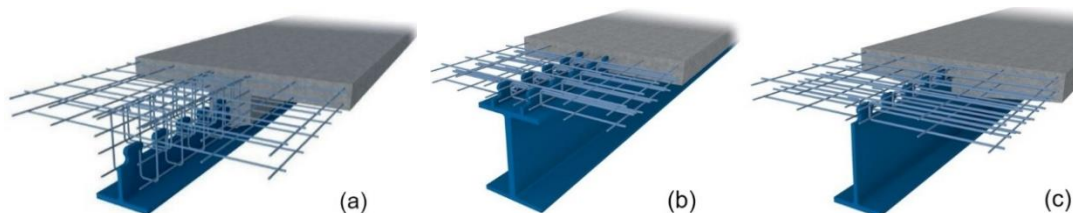


Fonte: adaptado de Classen [46].

Os *composite dowels* podem ser fabricados em chapas de aço soldadas à mesa superior de vigas de aço ou fabricados diretamente na alma de vigas de aço (Fig. 2.4). No entanto, são particularmente econômicos quando utilizados em seções mistas com perfis de aço sem a mesa superior (Fig. 2.4c). Esse procedimento, apresentado primeiramente por Kraus e Wurzer [19],

é muito interessante do ponto de vista estrutural, já que a mesa superior da viga de aço se encontra próxima da linha neutra da seção mista. Logo, o consumo de aço estrutural é reduzido e o processo de soldagem do conector sobre a mesa superior do perfil de aço é eliminado [47,48]. Os conectores ainda podem ser utilizados como reforço externo em vigas T (Fig. 2.4a) - Lorenc *et al.* [49] apresentam definições e bases de dimensionamento para estes últimos casos.

Fig. 2.4 – Exemplos de aplicação de vigas mistas de aço e concreto com *composite dowels*.



Fonte: Gündel *et al.* [50].

Os *composite dowels* podem incrementar o grau de industrialização e a rapidez no canteiro de obras, e têm sido difundidos pela Europa, principalmente para compor vigas mistas pré-fabricadas de aço e concreto de pontes e viadutos (Fig. 2.5) [51]. Até 2018, 38 pontes mistas ferroviárias e rodoviárias haviam sido construídas na Europa utilizando essa tecnologia [48], na Alemanha [23,52,53], na Áustria [54], na Polônia [55,56], na Romênia [57,58] e na República Tcheca [59]. Outros detalhes da construção de pontes pré-fabricadas com *composite dowels* podem ser encontrados na literatura [32,49,60-66].

Fig. 2.5 –Pontes com *composite dowels*: ponte rodoviária sobre a linha ferroviária em Pöcking, Alemanha (a); passarela em Przemysl, Polônia (b).



Fontes: (a) Zanon *et al.* [61] e (b) Lorenc *et al.* [49].

2.1.2 Objetivo, escopo e metodologia

A utilização de vigas mistas de aço e concreto pré-fabricadas com *composite dowels* é vantajosa do ponto de vista estrutural e econômico em comparação às vigas mistas convencionais com *headed studs*. Pontes construídas na Europa atestam a eficácia e a segurança da solução. Por se tratar de uma tecnologia relativamente recente, ainda existe uma carência de estudos e

investigações que dêem subsídio à normatização e que estabeleçam os requisitos básicos a serem atendidos no projeto de estruturas mistas com *composite dowels*, para que a utilização desses conectores seja mais difundida. Assim, este artigo tem como objetivo compilar investigações realizadas sobre os *composite dowels*, abrangendo a evolução histórica, o comportamento estrutural, desenvolvimentos recentes e modelos mecânicos, dentre outros aspectos. Foram priorizados na revisão aspectos relacionados aos conectores *Puzzle* (Fig. 2.1n), *Clothoidal* (Fig. 2.1p) [1] e *Crestbond*, [10] (Fig. 2.1m). Foram examinados artigos de periódicos e de congressos das seguintes bases de dados: *Scopus*, *Science Direct*, *Wiley Online Library*, *Scielo*, *MDPI*, *Google Scholar*, *CAPES Journal Portal* e outros sites editoriais específicos, além de publicações diversas e normas técnicas. Foram considerados os trabalhos desenvolvidos a partir do surgimento dos *composite dowels* nos anos 1980. No fim do artigo, são indicados pontos que podem ser endereçados em novas pesquisas.

2.2 Evolução dos *composite dowels*

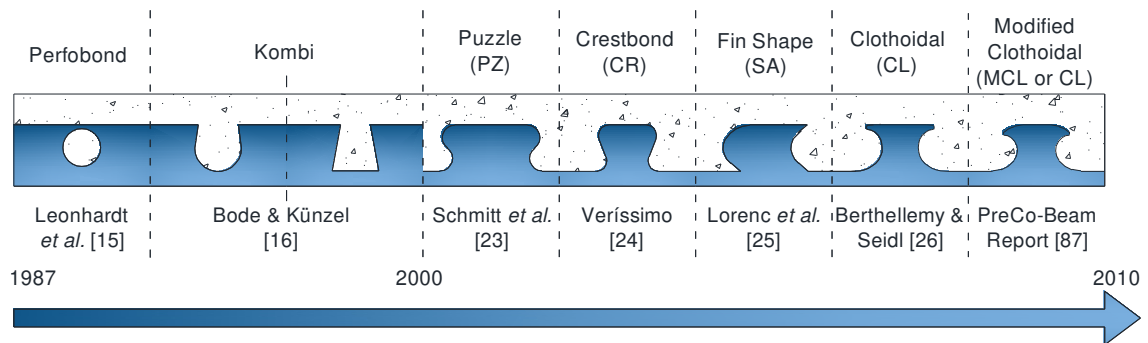
2.2.1 Visão geral

A Fig. 2.6 contém uma linha do tempo com a evolução de alguns dos *composite dowels* desenvolvidos a partir do final dos anos 1980. As geometrias dos conectores estão apresentadas com a mesma altura para que as suas formas geométricas possam ser comparadas.

A origem dos *composite dowels* remonta às pesquisas desenvolvidas por membros da empresa alemã *Leonhardt, Andrä and Partners* [14,15,17]. Andrä [14] investigou o comportamento estrutural de um conector em chapa de aço perfurada, por meio de ensaios *pull-out*. Leonhardt *et al.* [15] desenvolveram o conector de cisalhamento conhecido como *Perfobond* (Fig. 2.6). Nessa solução, o concreto envolve o conector e preenche as aberturas das chapas de aço, criando um mecanismo de pino que resiste aos esforços cisalhantes e previne o *uplift*. O conector foi utilizado pela primeira vez na construção da terceira ponte sobre o Rio Caroni na Venezuela, em 1987 [67]. Desde seu surgimento, o *Perfobond* tem sido objeto de estudo de pesquisadores ao redor do mundo [67-76].

Paralelamente ao desenvolvimento do *Perfobond*, foram conduzidos experimentos na *University of Kaiserslautern*, na Alemanha, para investigar o comportamento de conectores similares com aberturas trapezoidais ou no formato de gota, denominados conectores *Kombi* (Fig. 2.6) [16,39].

Fig. 2.6 – Linha do tempo do desenvolvimento dos *composite dowels*.

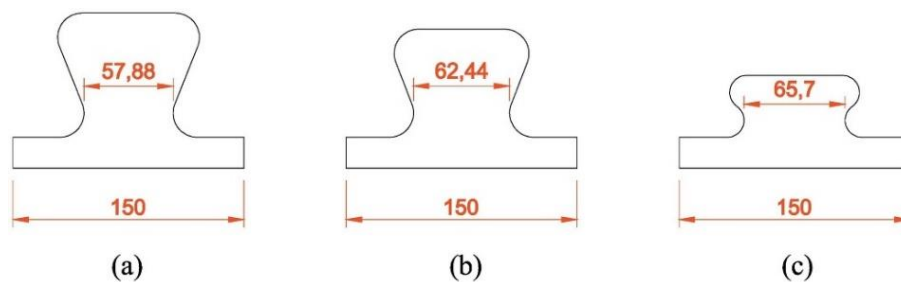


Fonte: o autor.

Os *composite dowels* evoluíram naturalmente para desenhos com geometria aberta que agiliza o processo construtivo, facilitando o posicionamento das armaduras passantes. Além disso, quando o desenho do conector permite um corte simétrico na chapa, é possível realizar um único corte na alma de um perfil I laminado, obtendo-se dois perfis T já com o conector integrado à alma (Fig. 2.4a,c) [19], o que agiliza a fabricação.

No início do século XXI, os conectores *Puzzle* [23] e *Crestbond* [24] foram desenvolvidos quase simultaneamente no Brasil e na Europa, respectivamente. Embora o *Puzzle* e o *Crestbond* apresentem alguma semelhança, eles possuem geometria (Fig. 2.7) e comportamentos estruturais distintos. Segundo Alves *et al.* [77], inicialmente os pesquisadores brasileiros e portugueses [10,77-83] e canadenses [68,69] concentraram seus estudos em soluções para estruturas de edifícios, enquanto os pesquisadores do norte da Europa concentraram seus estudos em soluções para estruturas de pontes e viadutos [14-20,23,29,30,32,42,52-66].

Fig. 2.7 – Diferenças entre os conectores *Crestbond* e *Puzzle*:
(a) *Crestbond* A; (b) *Crestbond* B; (c) *Puzzle*.



Fonte: Alves *et al.* [77].

Nesse contexto de busca por inovações, o projeto europeu *PreCo-Beam* (*Prefabricated Composite Beam*) surgiu no início dos anos 2000 para investigar o comportamento estrutural de diferentes geometrias de *composite dowels*, visando a aplicação em vigas mistas de aço e

concreto pré-fabricadas para pontes. O projeto envolveu pesquisadores de universidades e de empresas do setor da construção civil de vários países da Europa [33].

2.2.2 Breve história do projeto *PreCo-Beam*

Segundo Lorenc *et al.* [84], o conceito básico das vigas mistas *PreCo-Beam* teve origem nos projetos de duas pontes inovadoras construídas pela empresa alemã SSF Ingenieure: a ponte em Pöcking, na Alemanha, e a passarela em Przemysl, na Polônia (Fig. 2.5).

Desde 1998, a SSF Ingenieure constrói na Europa com o método construtivo VFT® [85], que consiste, basicamente, de uma viga de aço conectada a uma pré-laje de concreto pré-moldada por meio de conectores de cisalhamento. Essa pré-laje de concreto possui rigidez suficiente para estabilizar a viga no sentido horizontal durante as fases de transporte e montagem, impedindo a flambagem lateral com torção e tornando desnecessário o uso de reforços na alma da viga ou de elementos temporários de estabilização (Fig. 2.8), além de funcionar como fôrma para a concretagem *in loco* de uma camada adicional de concreto para o tabuleiro da ponte ou passarela [32]. Esse método confere elevado grau de industrialização à construção de pontes, reduzindo o tempo de montagem da estrutura e, conseqüentemente, de interrupções de tráfego das vias e da quantidade de trabalho no canteiro de obras [34].

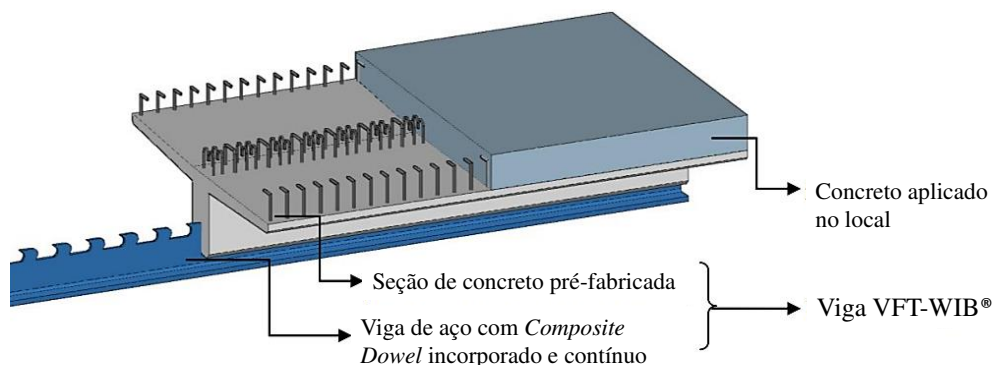
Fig. 2.8 – Estágios da construção da ponte *Pöcking Bridge*.



Fonte: Schmitt *et al.* [23].

Posteriormente, a SSF Ingenieure desenvolveu o método construtivo de pontes denominado VTF-WIB® (Fig. 2.9), que combina o uso de *composite dowels* integrados à alma do perfil de aço com o método construtivo VFT® [32]. A elevada resistência à fadiga, conferida pelos *composite dowels*, e a possibilidade de projetar seções transversais esbeltas tornam o método uma ótima solução para a construção de pontes ferroviárias e rodoviárias de pequenos e médios vãos [34].

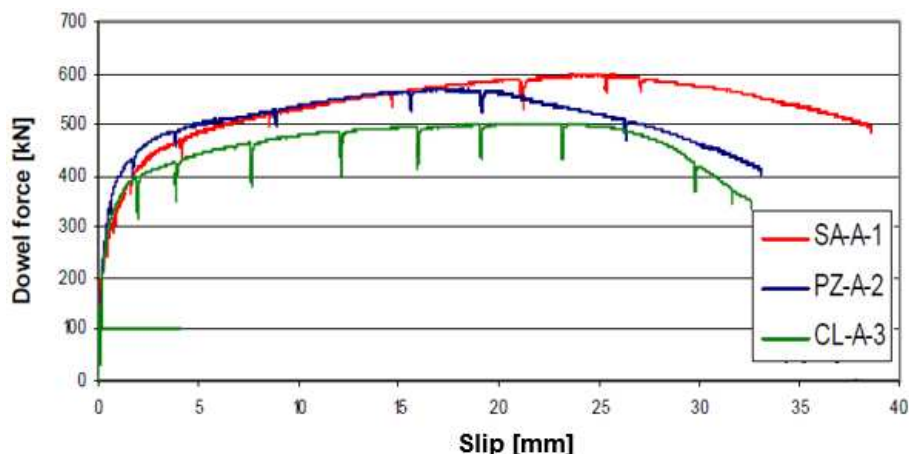
Fig. 2.9 – Viga mista de aço e concreto do tipo VFT-WIB®.



Fonte: adaptado de Seidl, Petzek e Bancila [32].

Os pesquisadores envolvidos no projeto *PreCo-Beam* avaliaram o desempenho estrutural de conectores com diferentes geometrias, estudando aspectos como: a armadura passante, os materiais, o comportamento das vigas em situação de incêndio e de fadiga etc. [33]. Inicialmente, três conectores se destacaram devido ao seu comportamento estrutural (Fig. 2.6): o conector *Puzzle* (PZ), proposto por Günter Seidl (SSF Ingenieure); o conector *Clothoidal* (CL), proposto por Jacques Berthelley (SETRA); e o conector *Fin Shape* ou *Saw Tooth* (SA), proposto por Marc Hever (ArcelorMittal) [61]. Após a realização de uma série de ensaios com os três conectores, constatou-se que, em termos de resistência mecânica e ductilidade, o conector SA possui melhor desempenho estático em relação ao PZ e ao CL (Fig. 2.10). Entretanto, devido à sua geometria assimétrica, o conector SA possibilita a transferência das forças de cisalhamento somente em uma direção. Portanto, a sua utilização é recomendada para estruturas sujeitas a carregamentos estáticos, ou a carregamentos dinâmicos de pequena variação, onde a mudança da direção do fluxo de cisalhamento não é significativa. Além disso, o conector SA apresenta um desempenho à fadiga inferior ao dos conectores PZ e CL, em função do canto com ângulo agudo. O PZ e o CL possuem geometrias simétricas e possibilitam a transmissão uniforme e bidirecional das forças de cisalhamento, o que os tornam mais indicados para aplicação em estruturas de pontes e passarelas, onde os carregamentos cíclicos são predominantes. Sob carregamento estático, o PZ apresenta maior capacidade resistente que o CL (Fig. 2.10). No entanto, o raio de curvatura do CL é três vezes maior que o raio do PZ, proporcionando um melhor desempenho à fadiga [32].

Fig. 2.10 – Comparação de curvas força-deslizamento obtidas em ensaios *push-out* de *composite dowels*.



Fonte: Seidl, Petzek e Bancila [32].

Posteriormente, pesquisadores poloneses da *Wroclaw University of Technology* desenvolveram uma geometria modificada do conector CL, denominada de *Modified Clothoidal Connector* (MCL), para construção da *Wierna Rzeka Bridge*, na Polônia [36,84]. Essa nova geometria, também referida na literatura como *Clothoidal Shaped*, combina elevada resistência mecânica e bom desempenho à fadiga [32]. O MCL resultou de uma evolução do processo de fabricação do CL original, que demandava duas linhas de corte independentes [84]. Seguem ilustrados, na Fig. 2.11, os estágios de fabricação de vigas de aço com recortes no formato do conector MCL.

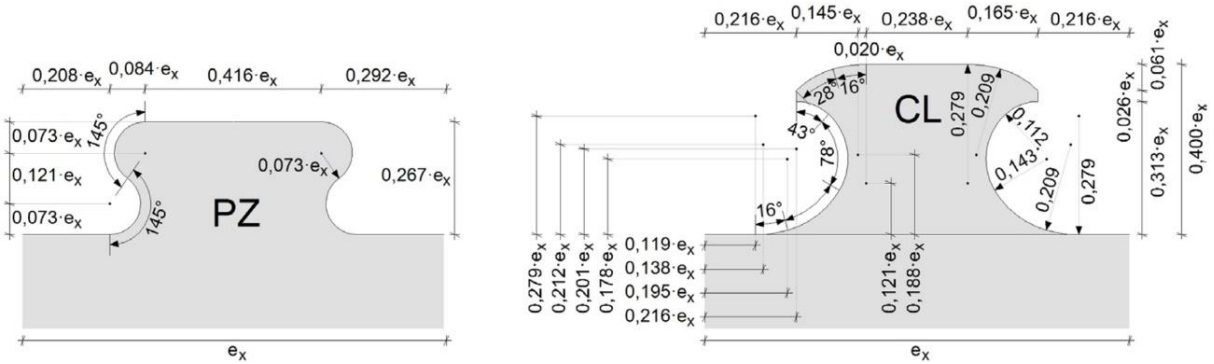
Fig. 2.11 – Estágios de fabricação de vigas de aço T invertido com conector MCL.



Fonte: Kozuch e Lorenc [86].

Como resultado do projeto *PreCo-Beam*, diversos trabalhos técnico-científicos com bancos de dados numérico-experimentais e com expressões para estimar a capacidade resistente dos *composite dowels* podem ser encontrados na literatura [32-34,47,48,86]. Em [29,33,34,84,87] são encontradas descrições mais abrangentes sobre a evolução das geometrias dos *composite dowels* no âmbito do projeto *PreCo-Beam*. Além disso, algumas diretrizes de dimensionamento foram aprovadas pelo *German Institute for Building Technology* (DIBt) e fazem parte da aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [1], que apresenta as diretrizes básicas a serem atendidas para a utilização dos conectores PZ e MCL, as equações para o cálculo da capacidade resistente e as dimensões padronizadas desses conectores (Fig. 2.12).

Fig. 2.12 – Geometria do *Puzzle Shaped* (PZ) e do *Modified Clothoidal Shaped* (CL) em função do passo e_x .



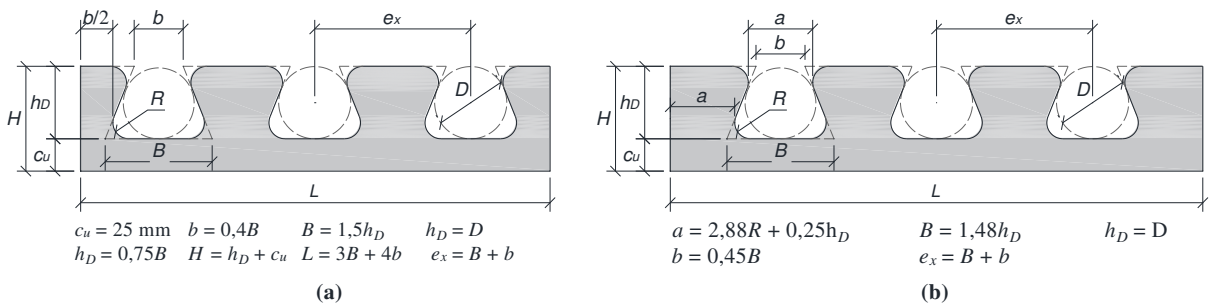
Fonte: Broschart [105].

2.2.3 O desenvolvimento do *Crestbond* no Brasil

O *Crestbond* é um conector de cisalhamento brasileiro, cuja geometria passou a ser desenvolvida a partir de 2004 por Veríssimo [10]. O desenvolvimento desse conector foi estimulado pelas dificuldades inerentes dos conectores de cisalhamento usuais no Brasil (*headed stud* e perfil U), como o alto custo de instalação dos conectores *stud bolt* e a inviabilidade do emprego do perfil U em perfis laminados com mesas estreitas utilizados em vigas de sistemas de pisos mistos que utilizam pré-laje de concreto.

Inicialmente, o comportamento do *Crestbond* foi estudado por meio de 41 ensaios do tipo *push-out*, divididos em 4 grupos: série A (Fig. 2.13a) e séries B, C e D (Fig. 2.13b), dos quais 26 foram realizados na Universidade do Minho (UM) [10], em Portugal, e 15 na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) [10,78], no Brasil. Estes últimos referem-se à série D e foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho do conector em sistemas de piso misto com pré-laje de concreto. A Tabela 2.1 contém os dados de 40 desses experimentos *push-out*. O *Crestbond* apresentou deslizamento característico médio superior a 6,0 mm, podendo ser caracterizado como conector dúctil, segundo a EN 1994-1-1 [4].

Fig. 2.13 - *Crestbond*: (a) série A; (b) séries B, C e D (CR56b).



Fonte: adaptado de Veríssimo [10].

Tabela 2.1 - Banco de dados de ensaios *push-out* com o conector *Crestbond*.

Ref.	#*	Conector**	e_x	h_D	t_w	c_o	c_u	A_b	A_{sf}	f_c	E_{cm}	$P_{máx}$
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ²]	[MPa]	[GPa]	[kN]
	A1	CR40-R10-As10	84,0	45,0	12,5	80	25	78,5	157,1	31,9	31,2	316,3
	A2	CR50-SF	-	81,2	12,5	69	-	-	-	33,0	31,5	193,5
	A3	CR50-R10-As0	105,0	56,2	12,5	69	25	0	0	33,1	31,5	338,4
	A4	CR50-R10-As10	105,0	56,2	12,5	69	25	78,5	157,1	32,5	31,3	372,3
	A5	CR50-R12-As0	105,0	56,2	12,5	69	25	0	0	32,9	31,4	306,7
	A6	CR50-R12-As10	105,0	56,2	12,5	69	25	78,5	157,1	32,6	31,4	369,7
	A7	CR60-R10-As10	126,0	68,0	12,5	57	25	78,5	157,1	33,0	31,5	421,0
	A8	CR60-R15-As10	126,0	68,0	12,5	57	25	78,5	157,1	32,9	31,4	433,0
	X1	CR56b-R12-As10	121,1	56,2	12,0	69	25	78,5	157,1	18,0	26,2	339,9
[10]	B1	CR56b-R12-As0	121,1	56,2	12,0	69	25	0	0	26,6	29,5	296,2
	B2	CR56b-R12-As0	121,1	56,2	12,0	69	25	0	0	26,6	29,5	306,5
	B3	CR56b-R12-As10	121,1	56,2	12,0	69	25	78,5	157,1	27,2	29,7	348,8
	B4	CR56b-R12-As10	121,1	56,2	12,0	69	25	78,5	157,1	26,9	29,6	375,9
	B5	CR56b-R12-As12	121,1	56,2	12,0	69	25	113,1	226,2	28,5	30,1	378,2
	B6	CR56b-R12-As12	121,1	56,2	12,0	69	25	113,1	226,2	24,8	28,9	371,8
	B7	CR56b-SF	-	81,2	12,0	69	-	-	-	28,3	30,1	183,7
	B8	CR56b-SF	-	81,2	12,0	69	-	-	-	24,8	28,9	177,6
	C1	CR56b-R12-As0	121,1	56,2	12,0	69	25	0	0	46,9	35,0	361,3
	C2	CR56b-R12-As0	121,1	56,2	12,0	69	25	0	0	48,1	35,2	377,5
	C3	CR56b-R12-As10	121,1	56,2	12,0	69	25	78,5	157,1	49,1	35,5	493,7
	C4	CR56b-R12-As10	121,1	56,2	12,0	69	25	78,5	157,1	48,7	35,4	506,7
	C5	CR56b-R12-As12	121,1	56,2	12,0	69	25	113,1	226,2	48,7	35,4	465,0
	C6	CR56b-R12-As12	121,1	56,2	12,0	69	25	113,1	226,2	45,9	34,8	496,9
	C7	CR56b-SF	-	81,2	12,0	69	-	-	-	49,4	35,5	215,4
	C8	CR56b-SF	-	81,2	12,0	69	-	-	-	49,7	35,6	217,6
[10, 78]	D1.a	CR56b-PL30iso-As0	121,1	86,2	12,5	34	30	0	0	31,6	31,1	287,1
	D1.b	CR56b-PL30iso-As0	121,1	86,2	12,5	34	30	0	0	31,3	31,0	330,9
	D1.c	CR56b-PL30iso-As0	121,1	86,2	12,5	34	30	0	0	31,3	31,0	320,4
	D2.a	CR56b-PL30iso-As8	121,1	86,2	12,5	34	30	50,3	100,5	31,4	31,0	407,4
	D2.b	CR56b-PL30iso-As8	121,1	86,2	12,5	34	30	50,3	100,5	31,4	31,0	419,4
	D2.c	CR56b-PL30iso-As8	121,1	86,2	12,5	34	30	50,3	100,5	31,3	31,0	398,1
	D3.a	CR56b-PL30-As0	121,1	56,2	12,5	34	60	0	0	31,6	31,1	319,6
	D3.b	CR56b-PL30-As0	121,1	56,2	12,5	34	60	0	0	32,4	31,3	301,6
	D3.c	CR56b-PL30-As0	121,1	56,2	12,5	34	60	0	0	31,1	30,9	318,1
	D4.a	CR56b-PL45iso-As0	121,1	101,2	12,5	34	15	0	0	32,6	31,4	287,4
	D4.b	CR56b-PL45iso-As0	121,1	101,2	12,5	34	15	0	0	32,2	31,2	287,4
	D4.c	CR56b-PL45iso-As0	121,1	101,2	12,5	34	15	0	0	32,2	31,2	299,4
	D5.a	CR56b-As0	121,1	56,2	12,5	34	60	0	0	22,2	28,0	308,4
D5.b	CR56b-As0	121,1	56,2	12,5	34	60	0	0	32,1	31,2	375,9	
D5.c	CR56b-As0	121,1	56,2	12,5	34	60	0	0	31,3	31,0	348,9	

*4 séries de *push-out*: a série A foi prospectiva (Fig. 2.13a); nas séries B e C utilizou-se o conector *CR56b* (Fig. 2.13b), variando o f_c ; e, na série D, utilizou-se o conector *CR56b* com $c_u = 60$ mm, variando-se o material da pré-laje.

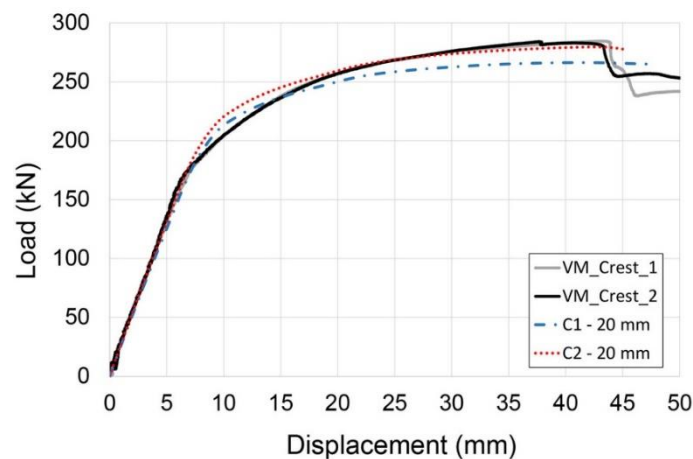
**CR $_{xx}$ -R $_{yy}$ = Crestbond com o diâmetro do círculo inscrito de xx mm e o raio de curvatura dos dentes igual a yy mm; R = raio de curvatura dos dentes (Fig. 2.13a); A $_s$ = armadura transversal; PL = pré-laje de concreto; Iso = poliestireno expandido (Isopor[®]); SF = chapas de aço sem furos.

Fonte: o autor.

A partir dos resultados experimentais, pesquisadores brasileiros propuseram modelos semiempíricos para predição da capacidade resistente do conector e realizaram simulações numéricas de ensaios *push-out* [10,79-81]. Posteriormente, foi desenvolvido na UM um estudo numérico-experimental prospectivo para avaliar o desempenho do conector *Crestbond* soldado sobre a mesa superior de vigas mistas em escala real [82]. No programa experimental foram

ensaiadas duas vigas à flexão: a primeira amostra foi submetida a um carregamento estático e a segunda foi submetida a um carregamento cíclico. Os resultados experimentais (linhas contínuas) e numéricos (linhas tracejadas) de força/deslocamento vertical no centro do vão estão ilustrados na Fig. 2.14. Nota-se que as respostas das duas vigas foram, praticamente, idênticas, evidenciando que não houve degradação da rigidez ou da capacidade resistente da viga submetida a carregamento cíclico, indicando que a conexão com o *Crestbond* se manteve íntegra para um carregamento de serviço [77]. Petruski [83] realizou um estudo numérico de variação de parâmetros de vigas mistas com *Crestbond* soldado sobre a mesa de perfis I.

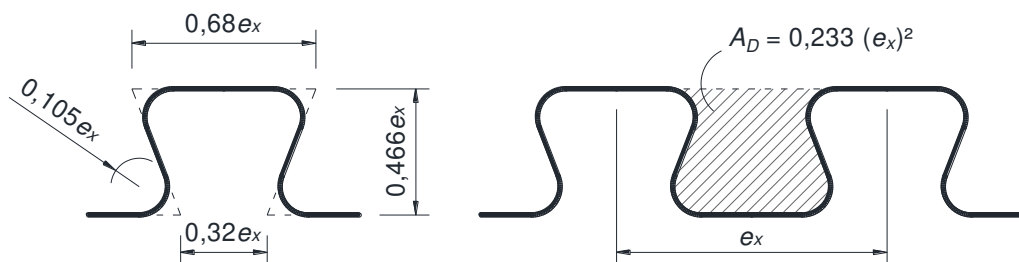
Fig. 2.14 – Curvas de força/deslocamento vertical obtidas nos ensaios experimentais (VMCrest1 e VMCrest2) e numéricos (C1–20mm e C2–20mm) no centro do vão das vigas.



Fonte: Alves *et al.* [77]

Mais recentemente, novos modelos semiempíricos para predição da capacidade resistente do *Crestbond* foram desenvolvidos [88-93]. As equações foram concebidas a partir dos modos de falha previstos na aprovação técnica Z-26.4-56 [1]. Previamente ao desenvolvimento dos modelos semiempíricos, Almeida [91] redesenhou as dimensões do *Crestbond* em função de um passo e_x (Fig. 2.15) de forma a adequá-los aos padrões dos *composite dowels* inclusos na aprovação alemã.

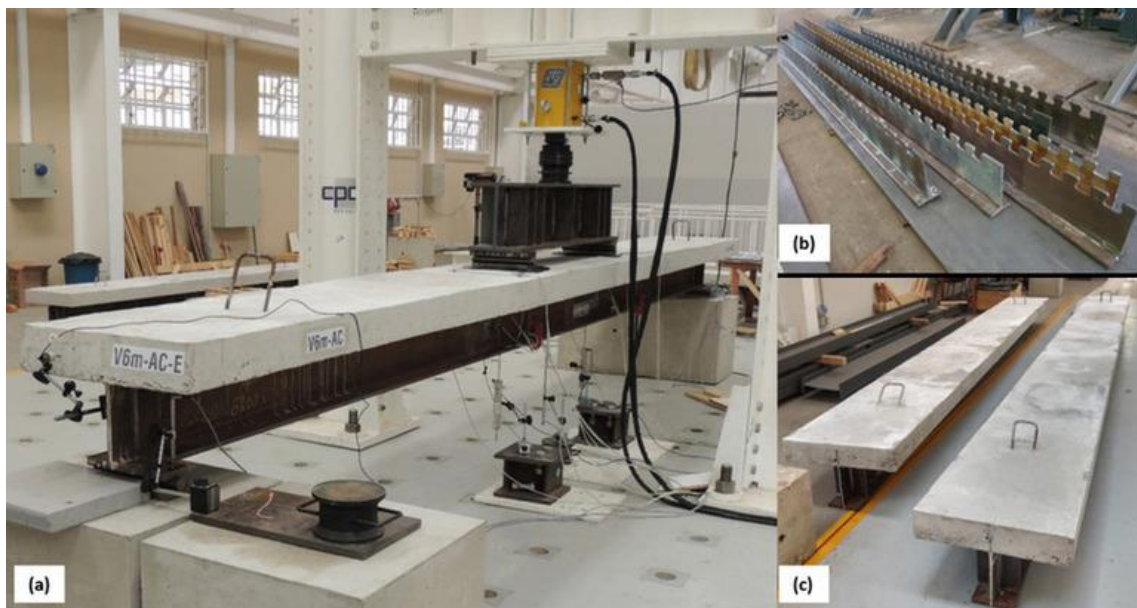
Fig. 2.15 – Dimensões do Crestbond em função do espaçamento dos pinos mistos (passo e_x).



Fonte: adaptado de Almeida [91].

Petrauski [38] realizou uma avaliação numérico-experimental do comportamento de seis vigas mistas pré-moldadas do tipo *Crestbeam* sujeitas a flexão simples (Fig. 2.16) no Laboratório de Estruturas da UFV. A *Crestbeam* consiste em uma viga mista com uma seção transversal monossimétrica em que a mesa de concreto armado é solidarizada a um perfil de aço T invertido que possui um conector *Crestbond* integrado à alma (Fig. 2.16b). A capacidade resistente das *Crestbeam*, observada nos ensaios numérico-experimentais, foi muito próxima à estimada analiticamente através das equações de dimensionamento do *Crestbond* e do método de dimensionamento por plastificação total da seção mista da ABNT NBR 8800 [1]. A força máxima resistida não variou mais de 10% em relação à previsão teórica. O autor ainda realizou um estudo piloto comparativo entre a solução *Crestbeam* e a solução convencional para uma ponte com 13 metros de vão livre. O uso da *Crestbeam* possibilitou a redução de consumo de aço em 30% e a eliminação da operação de instalação de 246 *stud bolts*.

Fig. 2.16 - *Crestbeam*: ensaio de flexão a 4 pontos (a); perfis de aço T invertido que possuem um conector *Crestbond* (composite dowels) integrado à alma (b); aspecto final da viga (c).



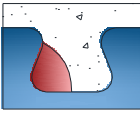
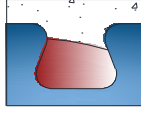

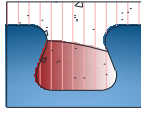



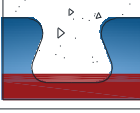
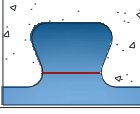
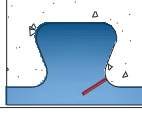
Fonte: adaptado de Petrauski [38].

O *Crestbond* também tem sido objeto de estudo como mecanismo de transferência de esforços em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto. Os pesquisadores realizaram uma série de ensaios experimentais e numéricos para investigar o comportamento do conector no interior dos pilares, variando a forma e o tamanho do tubo, a presença de armadura transversal etc. [40,88,94-96]. Também foram realizados estudos do comportamento dessa ligação em situação de incêndio [97,98] e da aplicação do *Crestbond* em pilares mistos de seção tubular de aço esbelta [99-101].

2.3 Comportamento estrutural dos *composite dowels*

Uma visão geral dos possíveis modos de falha dos *composite dowels* sob carregamentos estáticos e cíclicos que já foram descritos na literatura está apresentada na Fig. 2.17. Atualmente, de acordo com o documento alemão Z-26.4-56 [1], o PZ e o MCL podem sofrer três modos de falha sob carregamento estático: cisalhamento dos pinos de concreto (Fig. 2.17b), ruptura do concreto por *pry-out* (Fig. 2.17c) e falha do aço por mecanismo combinado de cisalhamento e flexão (Fig. 2.17f). Sob carregamento cíclico, todos os modos de falha apresentados na Fig. 2.17 são relevantes.

Fig. 2.17 – Modos de falha dos *composite dowels* sob carregamentos estáticos e cíclicos (fadiga).

	Modos de falha estáticos	Modos de falha cíclicos
Falha do concreto	a) Compressão local excessiva 	g) Aumento do deslizamento relativo devido às solicitações cíclicas 
	b) Cisalhamento do pino de concreto 	h) Dano multiaxial do concreto em lajes fissuradas 
	c) Pry-out ou ruptura cônica 	i) Pry-out (cíclico) 
	d) Cisalhamento longitudinal da laje 	
	e) Pry-out da borda de concreto 	
Falha do aço	f) Mecanismo de cisalhamento e flexão 	j) Fadiga do aço 

Fonte: o autor.

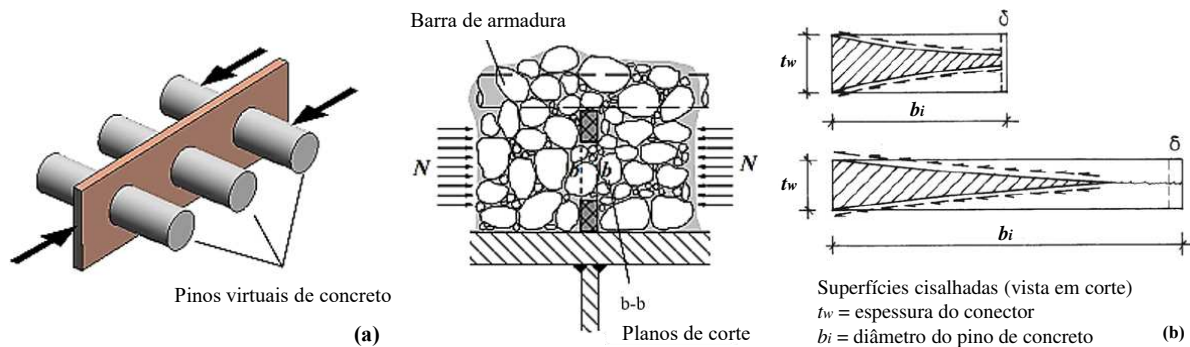
A aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [1] é a única norma vigente que prescreve a utilização dos *composite dowels* e possui tempo de homologação limitado (2028), reduzindo a competitividade desses conectores. Em função disso, pesquisadores da *RWTH Aachen University* e da *University of Kaiserslautern* realizaram diversas investigações [7,8,102-121] e desenvolveram um novo modelo de dimensionamento para *composite dowels* [107], visando sua incorporação à normalização europeia (EN 1994-1-1 [4]), que se encontra em fase de revisão [119]. De acordo com esse novo modelo, os modos de falha sob carregamento estático são: o *pry-out* (Fig. 2.17c), o *pry-out* da borda de concreto (Fig. 2.17e) e a falha do pino de aço

(Fig. 2.17f). Nos próximos subitens estão apresentados aspectos qualitativos sobre o comportamento estrutural dos *composite dowels*.

2.3.1 Primeiros desenvolvimentos

Inicialmente, Leonhardt *et al.* [15] observaram que a falha do *Perfobond* era dada pela ruptura do concreto. Essa ruptura era caracterizada pelo esmagamento do concreto contra a parede do conector no interior das aberturas (Fig. 2.17a), acompanhado pelo cisalhamento do concreto nas aberturas em dois planos de cortes coincidentes com as laterais da chapa do conector. O fenômeno foi descrito como cisalhamento dos pinos virtuais de concreto (Fig. 2.18a).

Fig. 2.18 – Cisalhamento do pino de concreto em dois planos no conector *Perfobond*.



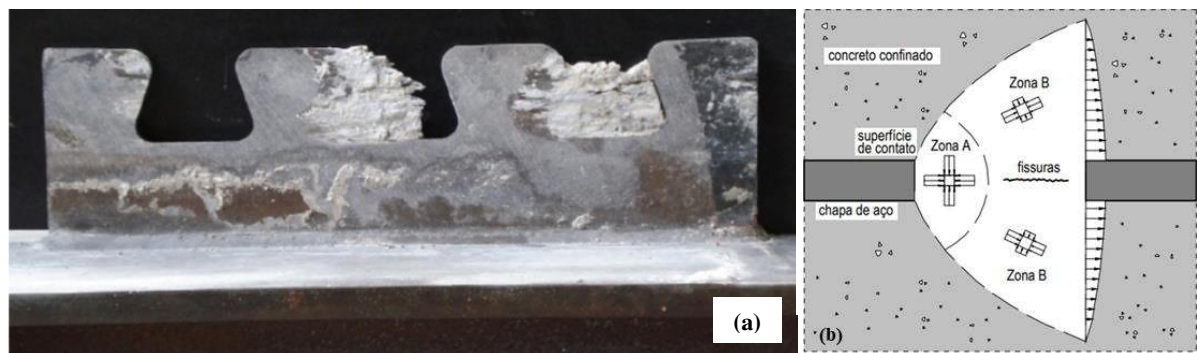
Fontes: (a) Veríssimo [10]; e (b) adaptado de Leonhardt *et al.* [15] e de Mangerig e Zapfe [122].

Kraus e Wurzer [18,19] e Zapfe [20] realizaram uma série de ensaios *push-out* para analisar o comportamento de conectores *Perfobond* e *Kombi* com diferentes geometrias na *Universität der Bundeswehr München*. Zapfe [20] observou que o cisalhamento do concreto ocorre em dois planos de corte não totalmente paralelos às faces laterais da chapa de aço do conector (Fig. 2.18b). Esse modo de falha é predominante em *composite dowels* com pequenas aberturas fabricadas em chapas mais espessas e com resistência ao escoamento do aço mais elevada [48].

Em ensaios desmontados e analisados após a ruptura, Kraus e Wurzer [18,19] observaram a falha por esmagamento do concreto junto à superfície de contato com o pino de aço do conector (Fig. 2.19a) e propuseram um modelo mecânico que ilustra como ocorre a distribuição de tensões no pino de concreto (Fig. 2.19b). O esforço atuante na conexão é transmitido da chapa de aço para a laje de concreto por meio de uma grande força de compressão que se desenvolve na superfície de contato. A região onde as tensões oriundas dessa força se distribuem no pino de concreto foi dividida em duas partes, denominadas Zona A e Zona B (Fig. 2.19b). Na zona A, o concreto encontra-se submetido a compressão triaxial, já que está confinado pela laje ao seu redor. Sob estado triaxial, o concreto pode suportar tensões de compressão superiores à sua

resistência à compressão (f_c), permitindo que a força de contato transmitida pela chapa de aço atinja valores elevados. Quando a tensão nessa região ultrapassa um valor crítico, o concreto sofre poro-colapso, os poros na pasta de cimento implodem, formando uma massa compacta. Na zona B atuam tensões de compressão na direção longitudinal e tensões de tração na direção transversal, responsáveis pela formação de fissuras no concreto e pela separação longitudinal da laje na ausência de armadura transversal - fenômeno conhecido como *splitting* (Fig. 2.17d) [29]. Oguejiofor e Hosain [68] observaram a separação longitudinal da laje em ensaios, conforme Fig. 2.20.

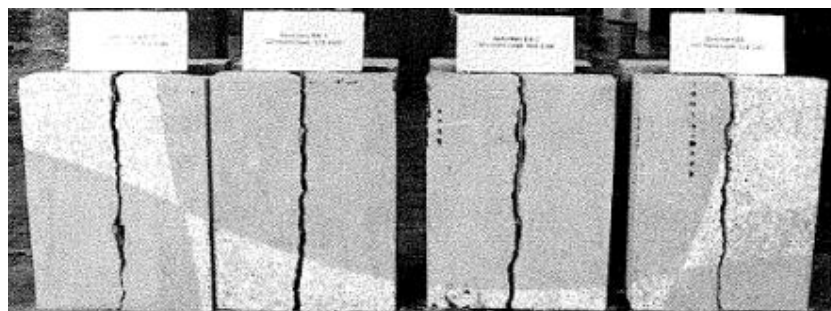
Fig. 2.19 – Comportamento estrutural: (a) pressão local na área de contato entre o concreto e a chapa de aço do conector; (b) distribuição de tensões no concreto.



Fontes: (a) Veríssimo [10] e (b) adaptado de Kraus e Wurzer [18].

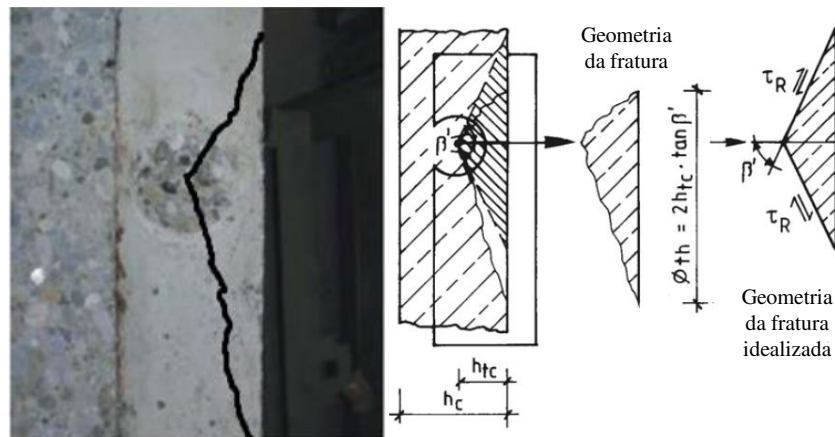
Zapfe [20] observou a ruptura do concreto por *pry-out* (Fig. 2.21) em modelos experimentais que possuíam conectores mais próximos a superfície da laje (menores cobrimentos). A condição de pressão hidrostática na zona de introdução de carga (Zona A, Fig. 2.19b) gera forças de tração transversais (Fig. 2.21), que quando superam a resistência à tração do concreto provocam o *pry-out* [103]. A eventual expulsão de um cone de concreto acarreta o esmagamento das cunhas de concreto no interior da abertura, pois o efeito de confinamento e o estado multiaxial de tensões ao qual o concreto estava submetido se extingue [47].

Fig. 2.20 – Cisalhamento longitudinal da laje de concreto em ensaios *push-out* com *Perfobond*.



Fonte: Oguejiofor e Hosain [68].

Fig. 2.21 – Falha por *pry-out*: cone de ruptura de uma amostra desmontada; e geometria de fratura idealizada para aplicação em procedimentos de cálculo.



Fonte: adaptado de Mangerig e Zapfe [122].

O esmagamento do concreto (Fig. 2.17a) e o *splitting* da laje de concreto (Fig. 2.17d) passaram a ser considerados modos de falha secundários. O primeiro ocorre posteriormente à ruptura do concreto por *pry-out*, já que a ruptura do cone de concreto provoca uma redução do confinamento e, conseqüentemente, da resistência à compressão do concreto situado na Zona A. O *splitting*, por sua vez, é uma ruptura frágil por cisalhamento. Logo, a utilização de armaduras transversais é obrigatória a fim de evitar tal modo de colapso [29]. Heinemeyer [39] propôs o cálculo dessa armadura por meio de um modelo de bielas e tirantes. A aprovação técnica Z-26.4-56 [1] prevê a utilização e o cálculo dessa armadura.

Apesar do concreto governar a falha da conexão na maioria dos experimentos iniciais, Zapfe [20] também observou deformações no aço das amostras e notou grandes fissuras nas chapas de aço submetidas a ensaios cíclicos, indicando que a plastificação e/ou ruptura do aço (Fig. 2.22) é um possível modo de falha dos *composite dowels*. Uma ampla pesquisa sobre a falha do aço sob carregamento estático e cíclico foi realizada por pesquisadores poloneses da *Wroclaw University of Technology* no âmbito do projeto *PreCo-Beam* [29,30,35,36,123-132].

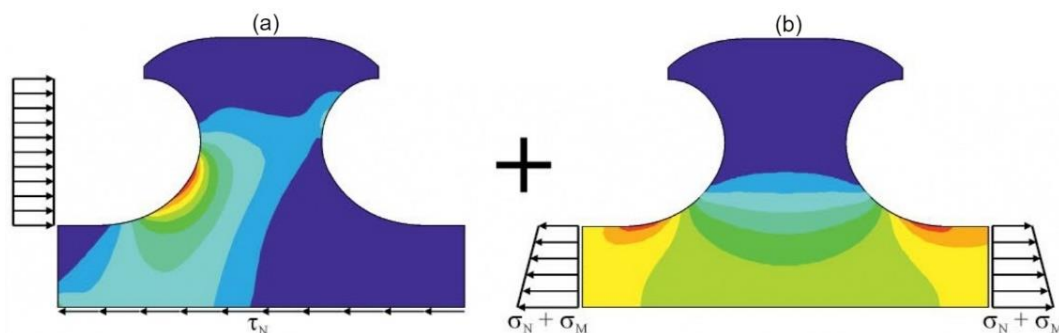
Fig. 2.22 – Falha do aço do conector Crestbond.



Fonte: Veríssimo [10].

O mecanismo de resistência à falha do aço pode ser descrito de duas formas: admitindo o aço em regime elástico e em regime plástico [123,124]. Em regime elástico, verifica-se o desempenho dos *composite dowels* para o estado limite de serviço (ELS) e para o estado limite de fadiga (ELF). Nesses casos, devem ser consideradas as forças de cisalhamento longitudinal transferidas do concreto para o conector (efeito local - Fig. 2.23a) e as tensões normais provenientes da flexão da seção mista (efeito global - Fig. 2.23b) [123]. No dimensionamento de *composite dowels* no ELS e no ELF devem ser introduzidos fatores que consideram os efeitos local e global, de forma a considerar a superposição de tensões na região crítica dos conectores. Esses fatores dependem da geometria do conector e podem ser encontrados na literatura para as geometrias PZ e MCL [1,33,34,123]. Em regime plástico, verifica-se o estado limite último (ELU) considerando apenas o efeito local, já que as tensões normais que atuam na seção transversal do perfil de aço não solicitam o conector de modo a provocar a sua ruptura.

Fig. 2.23 – Falha por fadiga do aço: análise de elementos finitos das tensões devido aos efeitos local (a) e global (b).



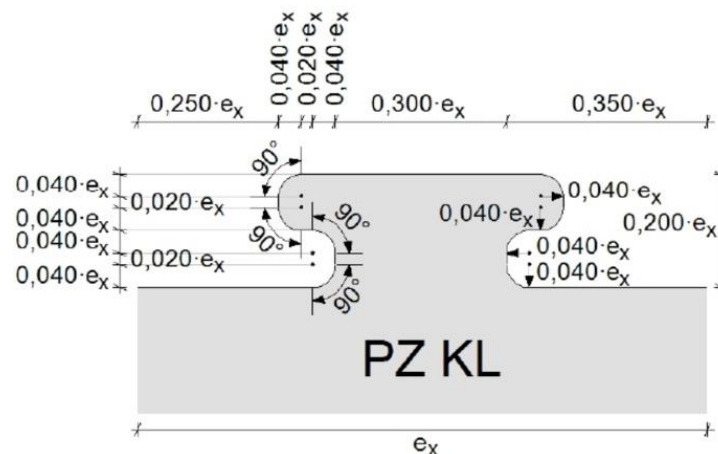
Fonte: Feldmann *et al.* [47].

A falha do concreto por fadiga foi estudada, principalmente, por pesquisadores da *RWTH Aachen University* [7,8,43,113,115,116,118,133]. O *pry-out* cíclico (Fig. 2.17i) ocorre quando os cobrimentos da laje são pequenos e o dano multiaxial ocorre no concreto das regiões em que a laje está submetida a momentos negativos (Fig. 2.17h). No aumento do deslizamento relativo devido às solicitações cíclicas (*cyclic slip increase*) (Fig. 2.17i), deformações plásticas se acumulam na região de compressão multiaxial do pino de concreto (Zona A, Fig. 2.19) conforme aumentam o número de ciclos de carregamento, levando a um aumento do deslizamento relativo entre aço e concreto na conexão [7]. O *cyclic slip increase* é um modo de falha muito relevante na prática, apesar de não caracterizar um estado limite último e, sim, de serviço, já que pode causar elevadas deformações às vigas [118].

2.3.2 Desenvolvimentos recentes

Os estudos mais recentes sobre os *composite dowels*, visando inclusive a aplicação desses conectores na construção de edifícios [46,104-107,119-121], foram produzidos, principalmente, por pesquisadores da *RWTH Aachen University* e da *University of Kaiserslautern*. O comportamento estrutural dos *composite dowels* foi estudado em concretos fissurados e não fissurados [102,103,108,110], sob esforços de tração [111], sob esforços de cisalhamento e tração combinados [110,112], posicionado próximo à superfície de concreto [104-106] e sob carregamentos cíclicos (fadiga) [7,8,43,113-118]. A utilização de vigas mistas em situação de conexão parcial também foi investigada [46,109]. A maioria desses estudos foi compilada no projeto de pesquisa P1208 [107]. Além dos conectores PZ e MCL, o PZKL (Fig. 2.24) também foi investigado e incluído nos novos modelos de dimensionamento [107].

Fig. 2.24 – Geometria do conector PZKL.

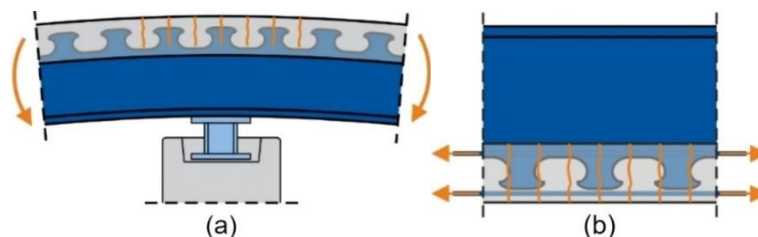


Fonte: Broschart [105].

2.3.2.1 Comportamento estrutural dos *composite dowels* em concreto fissurado

O comportamento estrutural de *composite dowels* em concreto fissurado foi investigado a partir de corpos de prova com fissuras transversais e longitudinais no concreto. Avaliou-se a influência do espaçamento entre fissuras e da largura das mesmas sobre a resistência da conexão. As fissuras longitudinais não reduziram a capacidade resistente da conexão ao cisalhamento e, portanto, não foram consideradas nos modelos de dimensionamento [107]. Por sua vez, as fissuras transversais, que surgem quando a laje de concreto é submetida a tensões de tração (próximo à região dos apoios numa viga mista contínua ou em um sistema de piso misto integrado [119] - Fig. 2.25), afetam a resistência dos conectores submetidos a esforços de tração-cisalhamento combinados [110], bem como ao cisalhamento puro [102,103,108] e à tração pura [107,110].

Fig. 2.25 – Composite dowels em concretos fisurados transversalmente: (a) sobre apoios em vigas mistas contínuas e (b) em um sistema de piso misto integrado.

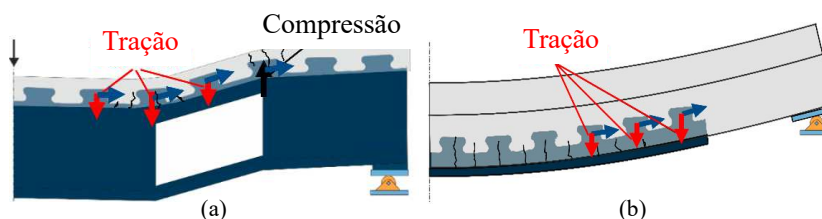


Fonte: P1208 [107].

2.3.2.2 Composite dowels submetidos a esforços de cisalhamento e tração combinados

Os *composite dowels* estão sujeitos a esforços de cisalhamento e tração combinados nos casos em que cargas pontuais são aplicadas sobre a laje de concreto em regiões de discontinuidades de rigidez ao longo do perfil de aço, como em casos de grandes aberturas na alma (Fig. 2.26a), ou quando os conectores estão posicionados nas extremidades das vigas mistas (região tracionada), atuando como reforço externo (Fig. 2.26b) [112].

Fig. 2.26 – Esforços de cisalhamento e tração combinados.



Fonte: adaptado de Christou *et al.* [110].

O comportamento estrutural desses conectores sob esforços combinados de tração e cisalhamento pode ser classificado entre cisalhamento puro e tração pura, dependendo do ângulo de atuação da força [112]. A capacidade resistente ao cisalhamento da conexão é bem conhecida. Por sua vez, existem poucos estudos do comportamento dos conectores sob tração. Classen e Hegger [111] investigaram o comportamento à tração do PZ a partir da realização de 13 ensaios *pull-out* acompanhados de estudos numéricos via MEF. No projeto P1208 [107] são apresentados experimentos *pull-out* com os conectores MCL e PZKL. Christou *et al.* [110] realizaram experimentos com o conector PZ submetido a esforços de cisalhamento e tração combinados em concretos fissurados, variando o ângulo de atuação da força (0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$, 90°), e propuseram um modelo de dimensionamento para o conector.

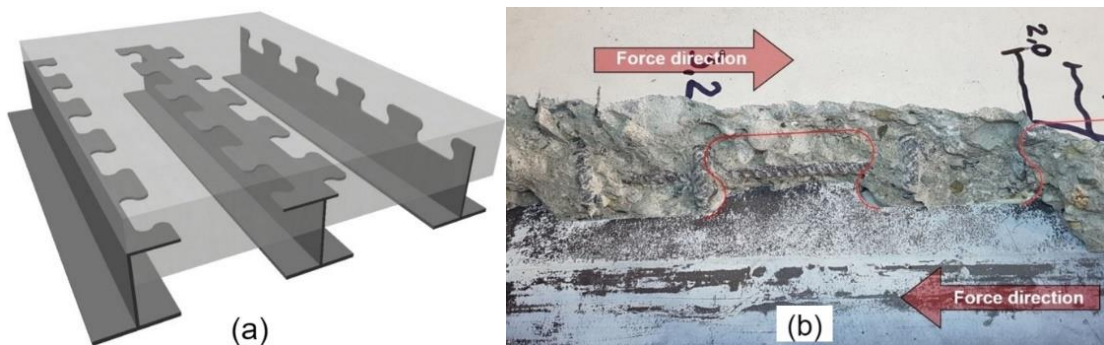
2.3.2.3 Composite dowels posicionados próximos à superfície de concreto

A aplicação dos *composite dowels* em pisos mistos para a construção de edifícios ainda é bastante limitada. Nesses casos, os conectores são inevitavelmente posicionados próximos à

face superior das lajes de concreto (Fig. 2.27), já que as lajes mistas vêm sendo fabricadas cada vez mais esbeltas. Para atingir espessuras de lajes muito reduzidas, os conectores podem ainda ser dispostos horizontalmente dentro da laje de concreto (Fig. 2.27a) [107].

A partir de ensaios *push-out* com *composite dowels*, Broschart *et al.* [106] verificaram que a conexão sofre uma significativa redução de ductilidade e de capacidade resistente ao cisalhamento quando o conector está posicionado próximo à superfície de concreto, ocorrendo um desprendimento do cobrimento da laje de concreto. Esse modo de falha foi denominado de “*pry-out of a concrete edge*” (Fig. 2.27b). Os pesquisadores desenvolveram um modelo de cálculo que foi validado a partir do ensaio de três vigas mistas em escala real com *composite dowels* em diferentes posições próximas à superfície da laje de concreto (Fig. 2.27a). Maiores detalhes sobre esses ensaios experimentais e numéricos podem ser encontrados em [104-107].

Fig. 2.27 - a) Possíveis posições de *composite dowels* próximos a superfície de concreto e b) *pry-out* da superfície de concreto.

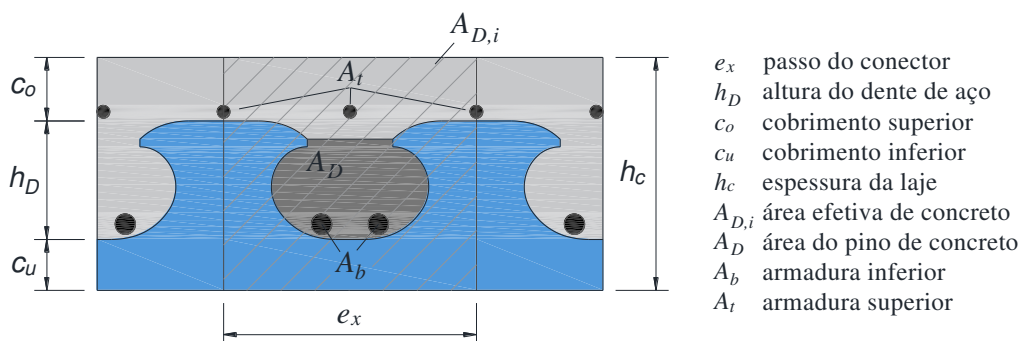


Fonte: Broschart [105].

2.4 Modelos mecânicos dos conectores PZ, PZKL e MCL

Nos itens a seguir estão apresentados alguns dos modelos mecânicos dos *composite dowels* europeus (PZ, MCL e PZKL) encontrados na literatura. Esses modelos levam em consideração parâmetros geométricos do conector, da laje de concreto e da armadura transversal (Fig. 2.28).

Fig. 2.28 – Parâmetros geométricos dos *composite dowels*.



Fonte: o autor.

2.4.1 Carregamento estático

Neste item são apresentados os modelos mecânicos para os modos de falha dos *composite dowels* submetidos a carregamento estático.

2.4.1.1 Cisalhamento do concreto

A capacidade resistente da conexão ao cisalhamento dos pinos de concreto é influenciada pela área de cisalhamento do pino de concreto, pela resistência ao cisalhamento do concreto e pela taxa de armadura transversal [47]. Na Tabela 2.2 estão apresentadas algumas equações desenvolvidas para estimar a resistência da conexão ao cisalhamento (ver Fig. 2.28). Kopp *et al.* [48] apresentam um banco de dados com 13 experimentos que foram utilizados para desenvolver a equação prescrita na aprovação técnica Z-26.4-56 [1].

Tabela 2.2 - Equações de resistência ao cisalhamento do concreto dos *composite dowels*.

Ref.	Equações	Parâmetros	No.
[20]	$P_{sh,k} = 23,4 f_h A_D f_{ctk} \rho_i$ $f_h = 1,2 - h_D/180$ $\rho_i = \left(1 + \left(\frac{E_s}{E_{cm}} - 1 \right) \frac{A_b}{A_D} \right)$	f_h - fator que considera o efeito de junção das superfícies de cisalhamento; ρ_i - taxa de armadura transversal passante através da abertura; f_{ctk} - resistência à tração característica do concreto [N/mm ²].	(2.1)
[29]	i) Sem armaduras transversais $P_{sh,k} = A_D f_c^{2/3} f_y^{1/3}$ ii) Com armaduras transversais $P_{sh,k} = \left(0,9 A_D f_c^{2/3} (\rho f_y)^{1/3} + 1,5 (\varphi_{b1}^2 + \varphi_{b2}^2) \times \right. \\ \left. \times \left(\sqrt{1 + (1,3\varepsilon)^2} - 1,3\varepsilon \right) \sqrt{f_c f_y} \right) / e_x$ $\varepsilon = \frac{3t_w}{2(\varphi_{b1} + \varphi_{b2})} \sqrt{\frac{f_c}{f_y}}$ $\rho = A_b / A_D$	f_c - resistência à compressão característica do concreto [N/mm ²]; f_y - tensão de escoamento do aço do conector [N/mm ²]; ρ - taxa de armadura transversal passante através da abertura; $\varphi_{b1} / \varphi_{b2}$ - diâmetro da primeira e da segunda barra de armadura transversal passante através da abertura [mm]; ε - parâmetro que considera o efeito de pino (<i>dowel action</i>) das armaduras passantes.	(2.2) (2.3)
[1]	$P_{sh,k} = \eta_D e_x^2 \sqrt{f_{ck}} (1 + \rho_D)$ $\rho_D = \frac{E_s A_b}{E_{cm} A_D}$	η_D - fator que considera o efeito de junção das superfícies de cisalhamento: $\eta_{D,PZ} = 2 - (e_x/400)$ $\eta_{D,MCL} = 3 - (e_x/180)$	(2.4)

Fonte: o autor.

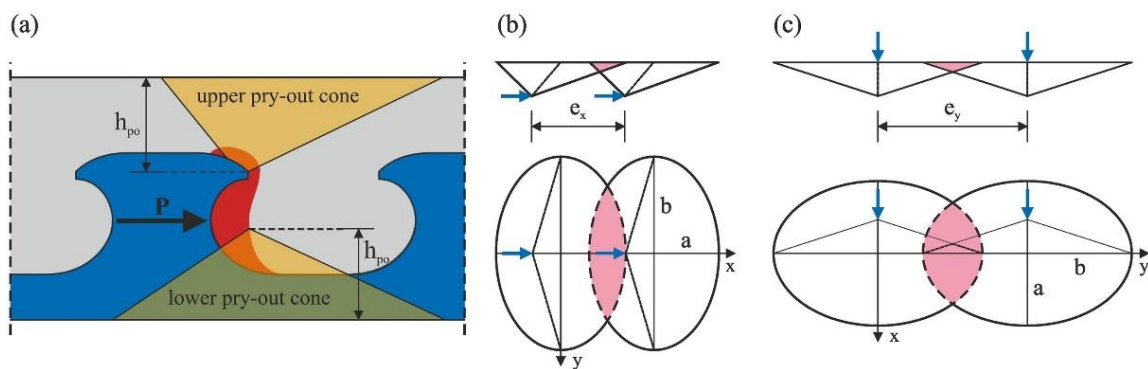
2.4.1.2 Pry-out do concreto

O *pry-out* do concreto pode ocorrer na direção das superfícies superior ou inferior da laje de concreto (Fig. 2.29). A resistência ao *pry-out* é influenciada pela altura do cone de ruptura (Fig. 2.29a) e pode ser afetada pela sobreposição de cones de ruptura nas direções longitudinal

(Fig. 2.29b) e transversal (Fig. 2.29c) [48]. Na Tabela 2.3 estão apresentados alguns modelos mecânicos para determinar a resistência ao *pry-out* (ver Fig. 2.28).

Kopp *et al.* [48] apresentam um banco de dados com 77 experimentos que foram utilizados para desenvolver a equação de resistência ao *pry-out* prescrita na aprovação técnica Z-26.4-56 [1]. A partir de novos resultados experimentais considerando o concreto fissurado [102,103,108], Classen e Hegger [142] propuseram um modelo de cálculo da capacidade resistente dos *composite dowels* ao *pry-out* considerando a fissuração transversal do concreto - Eq. (2.10). Finalmente, no projeto de pesquisa P1208 [107] é apresentado um modelo atualizado – Eq. (2.11) – com mudanças nos coeficientes de ajustes e no cálculo da altura do cone de ruptura de cada conector.

Fig. 2.29 - (a) Esquema de representação de possíveis cones de *pry-out*; e superposição de cones de *pry-out* nas direções (b) longitudinal e (c) transversal.



Fonte: Kopp *et al.* [48].

2.4.1.3 Falha do aço

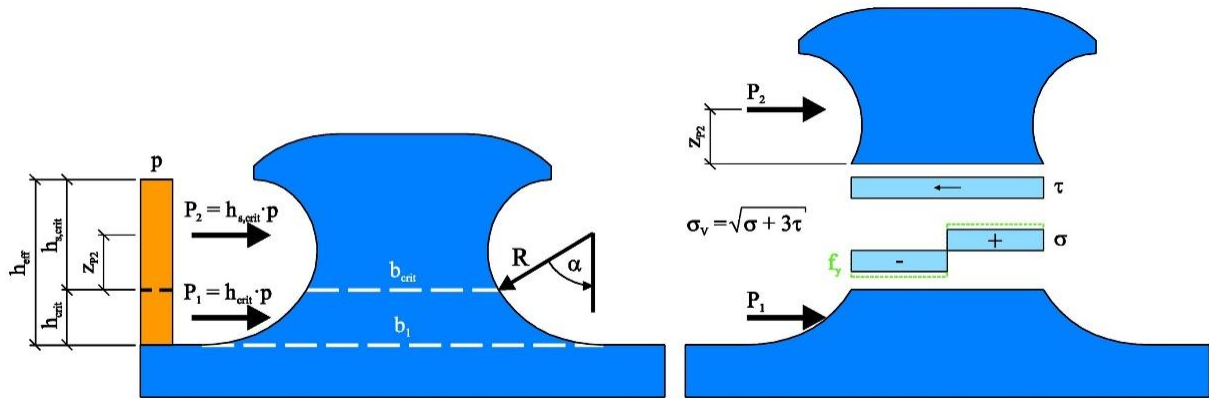
A falha do aço dos *composite dowels* é normalmente observada nos casos em que os conectores são constituídos de uma chapa de aço mais fina ou de menor resistência, profundamente integrados em lajes de concreto com elevada capacidade resistente [47]. Em ELU, esse modo de falha é provocado pela combinação de esforços de cisalhamento e flexão na seção crítica de um dente de aço (Fig. 2.30), que surgem a partir da força longitudinal (força P , Fig. 2.29a) [123,124]. Os modelos de dimensionamento analíticos e semiempíricos encontrados na literatura são baseados no modelo apresentado na Fig. 2.30, que utiliza o critério de falha de von Mises na seção transversal crítica do conector (a primeira seção transversal a ficar totalmente plastificada) [123]. No entanto, as equações diferem quanto à definição da seção crítica e à interação entre o cisalhamento e o momento fletor [48].

Tabela 2.3 - Equações de resistência ao pry-out do concreto dos *composite dowels*.

Ref.	Equações	Parâmetros	No.
[20]	$P_{po,k} = 25,6h_{po}^2 f_{ctk} \left(1 + \left(\frac{E_s}{E_{cm}} - 1 \right) \frac{A_{sf}}{A_D} \right)$	h_{po} - altura do cone de ruptura por pry-out [mm]; $h_{po} = \min\{c_o + 0,07e_x; c_u + 0,13e_x\}$	(2.5)
	i) 1 barra de armadura transversal inferior $P_{po,k} = 16,1 \cdot (2,15\chi h_{po}^2 f_{ctk})$		(2.6)
	ii) 2 barras de armadura transversal inferior $P_{po,k} = 12,7 \left(2,15\chi h_{po}^2 f_{ctk} + \frac{A_{b2} f_y e_{re}}{e_x + e_{re} + 2t_w} \right)$	A_{b2} - área da segunda barra de armadura inferior [mm ²]; e_{re} - distância entre os centros das duas barras de armadura no interior da abertura [mm];	(2.7)
[29]	para $e_x < 6,5h_{po}$: $\chi_x = 1 - \frac{\pi}{2} \left(2 \arccos \frac{e_x}{6,5h_{po}} - \frac{e_x}{3,25h_{po}} \sqrt{1 - \left(\frac{e_x}{6,5h_{po}} \right)^2} \right)$ para $e_y < 9,7h_{po}$: $\chi_y = 1 - \frac{\pi}{2} \left(2 \arccos \frac{e_y}{9,7h_{po}} - \frac{e_y}{4,85h_{po}} \sqrt{1 - \left(\frac{e_y}{4,85h_{po}} \right)^2} \right)$	χ - fator de redução (superposição de cones de pry-out nas direções longitudinal (χ_x) e transversal (χ_y) - Fig. 2.29b e Fig. 2.29c: $\chi = \chi_x \cdot \chi_y$ e_x/e_y - excentricidades (Fig. 2.29);	
[39]	$P_{po,k} = 20,15 \frac{1}{\eta} (1 + \rho_{D,i}) \sqrt{f_{ck}} h_{po}^{1,5}$	η - fator que depende da resistência à compressão do concreto: $\eta = 0,4 - 0,001f_c$	(2.8)
[1]	$P_{po,k} = \chi_x \chi_y 90 h_{po}^{1,5} \sqrt{f_{ck}} (1 + \rho_{D,i})$ para: $e_x < 4,5h_{po}$: $\chi_x = \frac{e_x}{4,5h_{po}} \leq 1$ para $120\text{mm} < e_x < 9h_{po}$: $\chi_y = \frac{1}{2} \left(\frac{e_y}{9h_{po}} + 1 \right) \leq 1$	$\rho_{D,i} = \frac{E_s A_{sf}}{E_{cm} A_{D,i}}$ - taxa de armadura $A_{sf} = A_b + A_t$ - armadura efetiva [mm ²]	(2.9)
[108]	$P_{po,k} = \chi_x \chi_y \frac{41}{\eta} h_{po}^{1,5} \sqrt{f_{ck}} (1 + \rho_{D,i}) \Psi_{crack}$ $\Psi_{crack} = \left[\frac{1}{n} + \sum_{i=1}^{n-1} \min \left\{ \frac{1}{n}; \frac{\tau_{cr} h_i b_i}{41 \sqrt{f_{ck}} h_{po}^{1,5}} \right\} \right]$	Ψ_{crack} - fator que considera um efeito de redução da capacidade resistente devido a fissuras transversais. Mais detalhes para calcular Ψ_{crack} em [108].	(2.10)
[107, 119]	$P_{po,k} = k_1 \chi_x \chi_y h_{po}^{1,5} \sqrt{f_{ck}} (1 + \rho_{D,i}) \Psi_{crack}$ para: $e_x < 4,5h_{po}$: $\chi_x = \frac{e_x}{4,5h_{po}} \leq 1$ para: $120\text{mm} < e_x < 9h_{po}$: $\chi_y = \frac{1}{2} \left(\frac{e_y}{9h_{po}} + 1 \right) \leq 1$ $\Psi_{crack,PZ/PZKL} = \frac{s_r}{6h_{po} + s_r} + \frac{\sqrt{h_{po}}}{9 + 22w_r} \leq 1,0$ $\Psi_{crack,CL} = \frac{s_r}{6h_{po} + s_r} + \frac{\sqrt{h_{po}}}{13 + 31w_r} \leq 1,0$	Diferentes cálculos para h_{po} e Ψ_{crack} (mais detalhes em [107,119]): $h_{po,PZ} = \min\{c_o + 0,07e_x; c_u + 0,08e_x\}$ $h_{po,PZKL} = \min\{c_o + 0,05e_x; c_u + 0,06e_x\}$ $h_{po,CL} = \min\{c_o + 0,07e_x; c_u + 0,13e_x\}$ $k_{1_PZ/PZKL} = 71$ $k_{1_CL} = 95$	(2.11)

Fonte: o autor.

Fig. 2.30 – Esquema ilustrativo do modo de falha do aço dos *composite dowels*.



Fonte: Feldmann *et al.* [47].

A resistência por unidade de comprimento dos *composite dowels* não depende do tamanho do dente de aço e a ductilidade da conexão, para uma mesma geometria, é linearmente proporcional ao tamanho do pino de aço [124]. Como as dimensões dos conectores PZ e MCL são todas descritas em função do passo e_x , a resistência à falha do aço pode ser estimada pela Eq. (2.12).

$$P_{pl,k} = \beta \cdot e_x \cdot t_w \cdot f_{yk} \quad (2.12)$$

Na Eq. (2.12), β é um fator de forma que depende da geometria do conector e do estado limite em estudo: elástico (β_{el}) ou plástico (β_{pl}). O fator de forma em ELU (β_{pl}) é pouco dependente do formato do conector e, por isso, foi considerado constante ($\beta_{pl} = 0,25$) para ambos os conectores (PZ e MCL) abordados pela aprovação técnica alemã [1]. Kopp *et al.* [48] apresentam um banco de dados com 60 experimentos que foram utilizados para o desenvolvimento desta equação [1]. Além disso, o método utilizado (experimental, numérico ou critério de von Mises) e o estado limite estudado também influenciam o valor do fator β [124,129].

Diversos trabalhos encontrados na literatura apresentam valores do fator de forma em regime elástico ou plástico para os *composite dowels* [1,29,33,48,107,124]. Na Tabela 2.4 estão indicados os valores dos fatores dos conectores europeus em ELU que são prescritos pela aprovação técnica [1], por Kopp *et al.* [48] e, mais recentemente, pelo P1208 [107].

Tabela 2.4 - Fatores geométricos dos conectores em ELU (β_{pl}).

Ref.	PZ	PZKL	CL
[1]	0,250	-	0,250
[48]	0,269	-	0,243
[107]	0,286	0,186	0,259

Fonte: o autor.

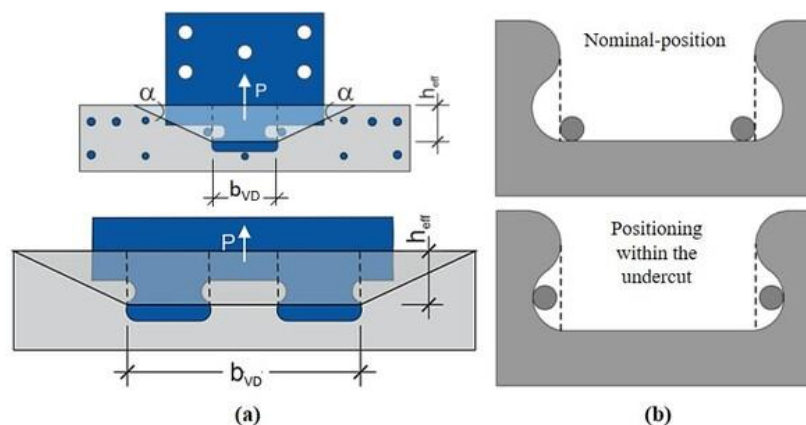
2.4.1.4 Resistência à tração

Os *composite dowels* sob tração sofrem a ruptura de um cone de concreto (semelhante à ruptura por *pry-out*). A capacidade resistente da conexão à tração depende da largura do cone de ruptura do concreto no ponto de aplicação de carga (b_{vD}), da profundidade efetiva (h_{eff}), da resistência à tração do concreto e da disposição da armadura transversal através do pino de concreto (Fig. 2.31) [119]. A capacidade resistente à tração dos *composite dowels* ($P_{T,k}$) é dada pela Eq. (2.13) ou pela Eq. (2.14), dependendo da posição das armaduras transversais passantes através do pino de concreto (Fig. 2.31b) [107]. Garante-se um acréscimo de resistência à tração caso a posição da armadura transversal seja assegurada na posição indicada na Fig. 2.31b (inferior).

$$P_{T,k} = \left(7 + 2 \cdot \frac{b_{vD}}{h_{eff}} \right) h_{eff}^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \quad \text{- Fig. 2.31b (superior)} \quad (2.13)$$

$$P_{T,k} = \left(10,5 + 3,1 \cdot \frac{b_{vD}}{h_{eff}} \right) h_{eff}^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \quad \text{- Fig. 2.31b (inferior)} \quad (2.14)$$

Fig. 2.31 – (a) Superfícies idealizadas de cones de *pry-out* devido ao esforço de tração; (b) posição normal (*nominal position*) das armaduras transversais e posicionamento na porção inferior do corte do *composite dowels* (*positioning within the undercut*).



Fonte: P1208 [107].

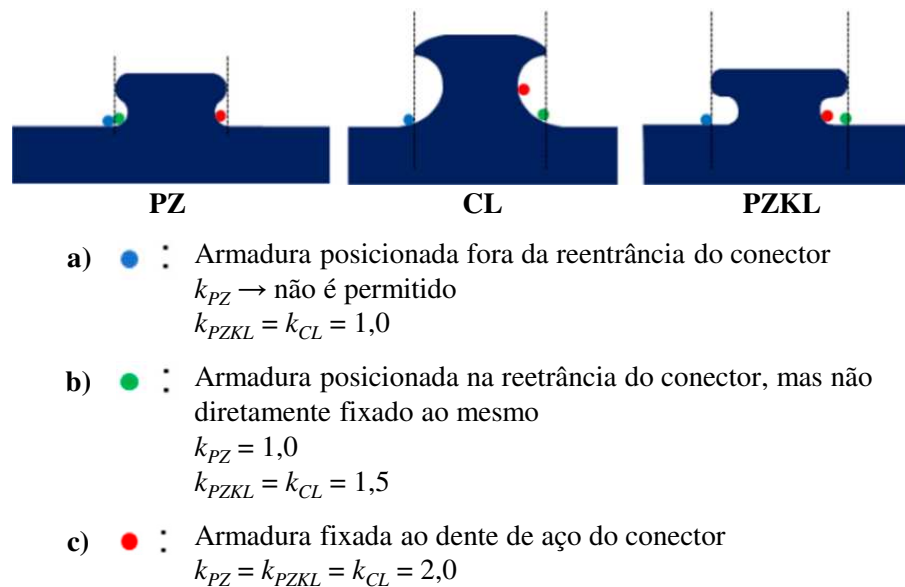
2.4.1.5 Resistência dos *composite dowels* ao esforço combinado de cisalhamento-tração

A capacidade resistente dos *composite dowels* sob ações combinadas de cisalhamento e tração é calculada a partir de uma interação tração-cisalhamento, dada pela Eq. (2.15), que leva em consideração a Eq. (2.11) e a Eq. (2.13) ou a Eq. (2.14) para calcular a resistência ao cisalhamento (*pry-out* de cone de concreto) e à tração, respectivamente [112].

$$\left(\frac{T_{Ed}}{P_{T,d}}\right)^k + \left(\frac{S_{Ed}}{P_{po,d}}\right)^k \leq 1,0 \quad (2.15)$$

Essa interação é significativamente afetada pela posição da armadura transversal através da abertura do pino de concreto, independentemente da geometria do conector, afetando, portanto, o parâmetro k - expoente da Eq. (2.15) [107]. Na Fig. 2.32 estão apresentados os valores desse parâmetro para os três conectores cobertos pelo projeto P1208 [107]. A interação linear ($k = 1$) representa a situação mais desfavorável, enquanto a interação quadrática ($k = 2$) a mais favorável. Os conectores PZKL e MCL possuem maiores reentrâncias e, portanto, maior capacidade resistente à tração. Por isso, também podem ser utilizados com as armaduras transversais posicionadas fora da zona de reentrância nos casos em que são esperadas forças de tração [110]. Mais informações sobre os modelos de cálculo das capacidades resistentes à tração e a esforços combinados de tração e cisalhamento podem ser encontradas com detalhes em [107,110-112,119,121].

Fig. 2.32 – Considerações sobre o expoente k para cálculo da interação cisalhamento-tração.



Fonte: adaptado de P1208 [107].

2.4.1.6 Composite dowels posicionados próximos à superfície de concreto

A capacidade resistente dos *composite dowels* ao *pry-out* da borda de concreto é calculada a partir da Eq. (2.16) e é influenciada pela resistência à compressão do concreto, pela distância da borda de concreto, pela área de contato com o dente de aço e pela quantidade e posicionamento das armaduras transversais no pino de concreto [107].

$$P_{poe,k} = 2,16 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot k \cdot c_{D,s} \cdot \sqrt[3]{t_w \cdot h_{eff}} \cdot \sqrt[3]{e_x} \quad (2.16)$$

em que:

k é o fator de efeito do tamanho: $k = 1 + \sqrt{200/c_{D,s}}$;

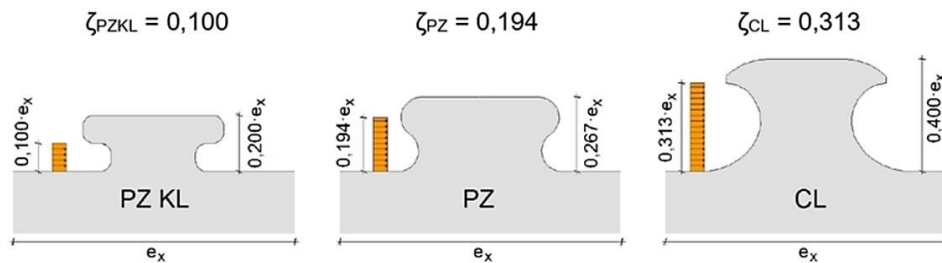
$c_{D,s}$ é a distância lateral à superfície de concreto (mm) (Fig. 2.34);

$h_{d,eff}$ é a altura efetiva do dente de aço (mm): $h_{d,eff} = \zeta_{geo} \cdot e_x$ (Fig. 2.33);

L_{eff} é o comprimento efetivo do cubo de concreto: ($\sqrt[3]{e_x} \approx L_{eff}$) (Fig. 2.34).

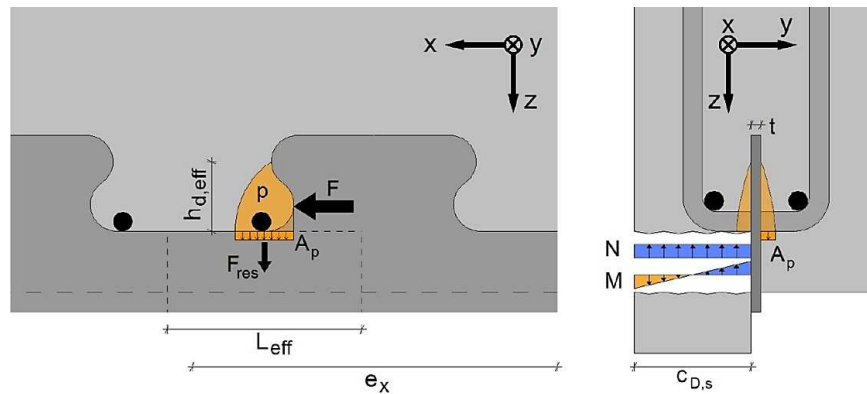
Os parâmetros utilizados na Eq. (2.16) podem ser visualizados na Fig. 2.34. Mais informações sobre o modelo de cálculo podem ser encontradas em [104-107].

Fig. 2.33 – Premissas sobre as alturas efetivas do pino de aço $h_{d,eff}$.



Fonte: Broschart *et al.* [106].

Fig. 2.34 – Premissas sobre a distribuição de tensões nos planos xz e yz e parâmetros de cálculo.



Fonte: Broschart *et al.* [106].

2.4.1.7 Resumo

A Tabela 2.5 contém um resumo com as equações de dimensionamento para a resistência ao cisalhamento longitudinal dos *composite dowels*, considerando carregamento estático, de acordo com a aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [1] e com o projeto P1208 [107].

Tabela 2.5 - Resumo das equações de resistência ao cisalhamento longitudinal dos *composite dowels*.

Ref.	Equações	No.
[1]	$P_{PZ/MCL,k} = \min \begin{cases} P_{sh,k} = \eta_D \cdot e_x^2 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (1 + \rho_D) \\ P_{po,k} = \chi_x \cdot \chi_y \cdot 90 \cdot h_{po}^{1,5} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (1 + \rho_{D,i}) \\ P_{pl,k} = 0,25 \cdot e_x \cdot t_w \cdot f_y \end{cases}$	(2.17)
[131]	$P_{PZ/PZKL/MCL,k} = \min \begin{cases} P_{po,k} = k_1 \cdot \chi_x \cdot \chi_y \cdot h_{po}^{1,5} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (1 + \rho_{D,i}) \cdot \Psi_{crack} \\ P_{poe,k} = 2,16 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot k \cdot c_{D,s} \cdot \sqrt[3]{t_w h_{D,eff}} \cdot \sqrt[3]{e_x} \\ P_{pl,k} = \lambda_{geo} \cdot e_x \cdot t_w \cdot f_y \end{cases}$	(2.18)

Fonte: o autor.

2.4.2 Carregamento cíclico (fadiga)

O dimensionamento à fadiga de vigas mistas com *composite dowels* compreende a fadiga do aço e do concreto. Para a verificação à fadiga do dente de aço, foi utilizado o método de tensão geométrica (ou Método *Hot Spot Stress*, HSS), que consiste na determinação da amplitude de tensão geométrica no ponto crítico da base do conector a partir da Eq. (2.19), que considera o somatório dos efeitos local (tensão de cisalhamento longitudinal) e global (tensão normal) [47]:

$$\Delta\sigma = \left| k_{f,L} \frac{\Delta V \cdot \Delta S_y}{I_y \cdot t_w} \right| + \left| k_{f,G} \left(\frac{\Delta N}{A} + \frac{\Delta M}{I_y} \cdot z_D \right) \right| \quad (2.19)$$

em que A é a área da seção transversal; S_y é o momento de área da seção mista; I_y é momento de inércia da seção mista; z_D é a distância entre a linha neutra da seção mista e o centroide da área efetiva de concreto; e t_w é a espessura da alma do perfil de aço. Os fatores de concentração de tensões locais ($k_{f,L,MCL} = 7,3$ e $k_{f,L,PZ} = 8,6$) e globais ($k_{f,G,MCL} = 1,5$ e $k_{f,G,PZ} = 1,9$) dependem da geometria do conector e são determinados por meio de análises experimentais e numéricas. Esses fatores são aplicáveis para seções de aço em T invertido (Fig. 2.4a,c) e para concretos de classe C20 ou superior [47]. A diretriz alemã [1] apresenta critérios para excluir a fadiga de baixo ciclo (em que o material rompe para um número relativamente pequeno de solicitações).

A falha por fadiga devido ao dano multiaxial do concreto em lajes fissuradas pode ser evitada limitando a abertura de fissuras a 0,15 mm em regiões em que os *composite dowels* estejam sob tração. O *pry-out* cíclico pode ser evitado limitando-se a carga superior a 70% da capacidade resistente estática característica da viga, uma vez que, até este nível de carga, o comportamento é considerado predominantemente elástico [47,134]. Estabelecer um limite de carregamento superior também evita a degradação do pino de concreto devido ao carregamento cíclico e a perda de rigidez da conexão, evitando que ocorra falha prematura por fadiga do concreto ou do

aço como consequência do aumento do deslizamento relativo (*cyclic slip increase*) [118]. O posicionamento da armadura na seção transversal de concreto também exerce influência sobre a vida útil à fadiga, uma vez que, se posicionada próxima à superfície, com cobrimento insuficiente, gera descontinuidade na matriz cimentícia e fissuração precoce devido à quebra do confinamento [43]. Segundo a diretriz alemã [1], para assegurar a rigidez da conexão e evitar a ruptura do concreto pelo efeito cíclico de *pry-out*, deve-se limitar a capacidade resistente da seção ao cisalhamento longitudinal através da Eq. (2.20).

$$P_{cyc,conc} = \min \begin{cases} 0,7 \min(P_{sh,k}, P_{po,k}) \\ 3,1 \cdot t_w \cdot h_D \cdot f_{ck} \end{cases} \quad (2.20)$$

2.4.3 Disposições construtivas e armaduras mínimas

A aprovação técnica Z-26.4-56 [1] e o projeto P1208 [107] prescrevem limites construtivos e de materiais para utilização dos *composite dowels*. A Tabela 2.6 contém um resumo desses limites (ver Fig. 2.28, Fig. 2.29 e Fig. 2.34).

Tabela 2.6 - Limites de aplicação para o dimensionamento dos *composite dowels* de acordo com a aprovação técnica Z-26.4-56 [1] e com o projeto P1208 [107].

Parâmetros	Z-26.4-56 [1]	P1208 [107]
Concreto	C20/25 – C60/75	C20/25 – C60/75
Aço	S235-S460	S235-S460
Passo do conector	$150 \text{ mm} \leq e_x \leq 500 \text{ mm}$	$150 \text{ mm} \leq e_x \leq 500 \text{ mm}$
Espessura da alma	$6 \text{ mm} \leq t_w \leq 40 \text{ mm}$	$4 \text{ mm} \leq t_w \leq 40 \text{ mm}$
Relação espessura/altura	$0,08 \leq t_w/h_D \leq 0,5$	-
Distância para a borda na direção longitudinal	$e_x \geq 2,5 h_{po}$	-
Distância para a borda na direção transversal	$e_y \geq 5,0 h_{po}$	-
Distância perpendicular entre dois conectores	$\geq 120 \text{ mm}$	$\geq 120 \text{ mm}$
Cobrimento superior	$c_o \geq 20 \text{ mm}$	$c_o \geq 30 \text{ mm}$
Cobrimento inferior	$c_u \geq 20 \text{ mm}$	$c_u \geq 30 \text{ mm}$
Cobrimento lateral	-	$c_{D,s} \geq 45 \text{ mm}$

Fonte: o autor.

Os *composite dowels* podem ser usados em regiões de momento positivo e negativo para carregamentos estáticos e cíclicos [1]. No entanto, sob carregamentos cíclicos, elementos estruturais com forças de tração perpendiculares aos *composite dowels* ainda não são permitidos, pois essas forças exercem influência na conexão e elevam o deslizamento relativo, o que pode vir a resultar em uma deterioração inaceitável da conexão [48,113].

O processo de fabricação dos *composite dowels* exerce influência no desempenho à fadiga dos conectores. Aspectos como a tecnologia de corte, o tipo de tratamento térmico e o preparo e a

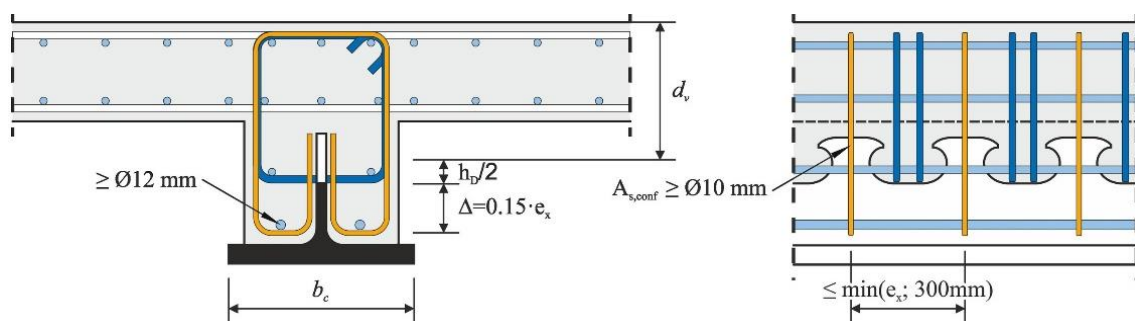
retificação das arestas podem afetar o processo de abertura e propagação de fissuras, por terem a capacidade de alterar a estrutura do material e a distribuição de tensões residuais e de provocar o surgimento de microfissuras, gerando pontos de concentração de tensões [125,126]. Segundo Kopp *et al.* [48], o corte dos conectores deve ser realizado a partir do oxicorte (corte a gás) ou por um processo equivalente, em termos de resistência à fadiga, e a qualidade do corte deve estar de acordo com as prescrições estabelecidas pela EN 1090-1 [135] e EN 1090-2 [136].

A armadura transversal inferior que passa pelo interior das aberturas dos *composite dowels* (A_b) deve ser calculada a partir da Eq. (2.21), que foi baseada em um modelo de bielas e tirantes proposto por Heinemeyer [39]. Na Fig. 2.35 e na Fig. 2.36 são apresentados os detalhamentos das armaduras de vigas mistas com *composite dowels* [48]. Nos casos em que os *composite dowels* são utilizados como reforço externo das seções T de vigas mistas (Fig. 2.4a, Fig. 2.35), pode ocorrer uma falha frágil por cisalhamento horizontal do concreto (*horizontal splitting*), principalmente em vigas com almas de concreto esbeltas. Para esses casos, deve ser calculada uma armadura de confinamento mínima conforme a Eq. (2.22). No projeto P1208 [107] estão apresentados detalhes construtivos dos *composite dowels* posicionados próximos à superfície de concreto (Fig. 2.37).

$$A_b = 0,5 \cdot P_d / f_{sd} \quad (2.21)$$

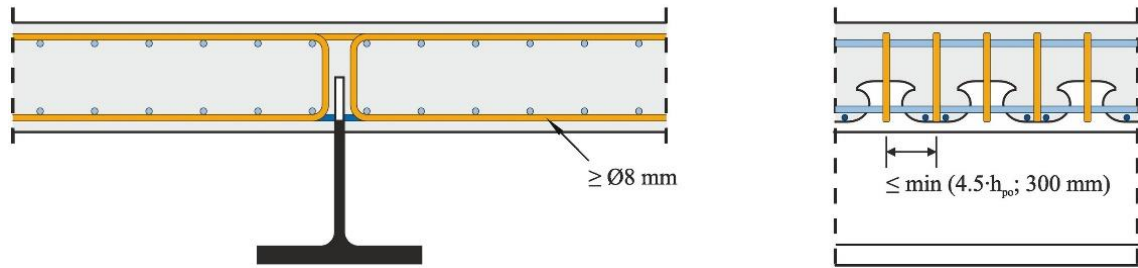
$$A_{s,conf} = 0,3 \cdot P_d / f_{sd} \quad (2.22)$$

Fig. 2.35 – Detalhamento das armaduras de vigas mistas com armaduras transversais na alma de concreto e *composite dowels*.



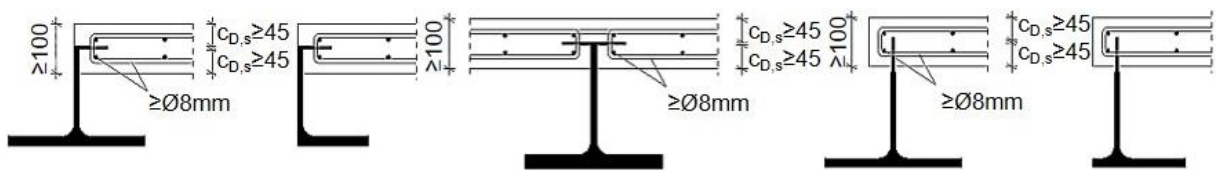
Fonte: Kopp *et al.* [48].

Fig. 2.36 - Detalhamento das armaduras de vigas mistas com armaduras transversais na laje de concreto e *composite dowels*.



Fonte: Kopp *et al.* [48].

Fig. 2.37 – Especificações geométricas e de armaduras para *composite dowels* posicionados próximos à superfície de concreto.



Fonte: adaptado de P1208 [107].

2.5 Modelos mecânicos do *Crestbond*

Inicialmente, Veríssimo [10] e Silva [79] desenvolveram equações de resistência para o *Crestbond* com base no modelo desenvolvido por Oguejiofor e Hosain [69], que estima a capacidade resistente do *Perfobond*. Nesses modelos, assim como no proposto por Dutra [81], considerou-se apenas o cisalhamento dos pinos de concreto como modo de falha da conexão [91]. A partir do desenvolvimento dos *composite dowels*, sobretudo no âmbito do Projeto *PreCo-Beam*, verificou-se que a falha da conexão pode ser desencadeada por outros mecanismos: falha do pino de aço e ruptura do concreto por *pry-out*. Diante disso, pesquisadores brasileiros propuseram novas equações de dimensionamento para o *Crestbond* a partir de resultados experimentais e numéricos, tomando como ponto de partida as equações de resistência da diretriz alemã Z-26.4-56 [1], devido à semelhança entre os conectores PZ e *Crestbond* [89,92,93]. As equações e os resultados experimentais utilizados por cada autor para validação dos modelos numéricos estão apresentados na Tabela 2.7 (ver Fig. 2.15 e Fig. 2.28).

Nota-se que Cardoso *et al.* [89] desenvolveram a equação de resistência ao cisalhamento do *Crestbond* para ser utilizada em três situações (Eq. (2.25)): (i) com alta taxa de armadura passante entre as aberturas do conector, submetendo o concreto a um alto nível de confinamento (Fig. 2.38a); (ii) com baixa taxa de armadura passante no interior da abertura, conferindo um baixo nível de confinamento do concreto (Fig. 2.38b,c); e (iii) com ausência de armadura passante entre as aberturas do conector, também submetendo o concreto a um baixo nível de

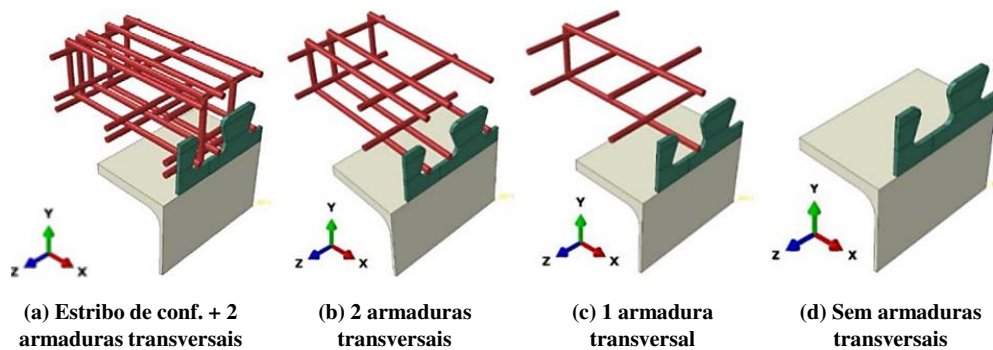
confinamento (Fig. 2.38d). A não utilização de armaduras transversais passantes provoca uma drástica redução de resistência e de ductilidade, portanto, essa solução não é recomendada [89]. A utilização de, no mínimo, duas armaduras passantes promove elevada capacidade resistente e ductilidade à conexão [32]. Observa-se ainda, que a Eq. (2.23) possui uma primeira parcela referente à capacidade resistente frontal do conector, que foi adaptada do modelo de cálculo de Oguejiofor e Hosain [69]. Esse termo da equação só deve ser considerado caso o conector seja utilizado de forma descontínua, como é comum no caso de pilares mistos.

Tabela 2.7 - Novos modelos mecânicos do Crestbond.

Ref.	Modos de falha	Equações	Validação numérica	No.
		$P_{sh} = \eta_f (h_D + c_u) t_w f_c + \eta_D e_x^2 \sqrt{f_c} (1 + \rho_D)$		(2.23)
[89]	Cisalhamento dos pinos de concreto	$\eta_f = -0,095 f_c + 8,310$	Ensaio <i>push-out</i> de Veríssimo [10] – séries B e C (Tabela 2.1).	(2.24)
		$\eta_D = \begin{cases} 2,507 - e_x/400 \rightarrow \text{(i)} \\ 1,176 - e_x/400 \rightarrow \text{(ii)} \\ 0,873 - e_x/400 \rightarrow \text{(iii)} \end{cases}$		(2.25)
[93]	<i>Pry-out</i>	$P_{po} = \frac{37}{\eta} \chi_x h_{po}^{1.5} \sqrt{f_c} (1 + \rho_{d,i})$	Ensaio <i>push-out</i> de Veríssimo [10] – série D (Tabela 2.1).	(2.26)
[92]	Falha dos pinos de aço	$P_{pl} = 0,233 e_x t_w f_y$	Experimentos de Lorenc <i>et al.</i> [35,36,123,124].	(2.27)

Fonte: o autor.

Fig. 2.38 – Alto nível de confinamento (a); baixo confinamento (b,c) e ausência de armaduras transversais (d).



Fonte: adaptado de Cardoso *et al.* [89].

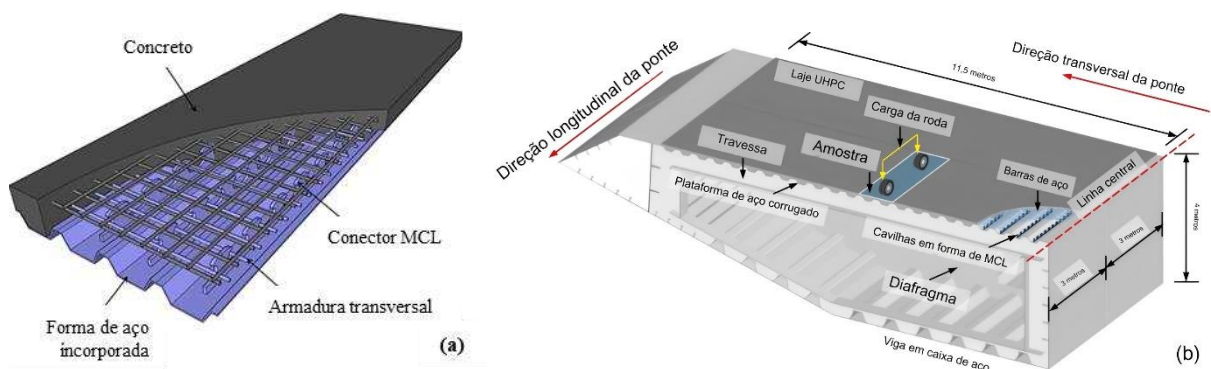
2.6 Outras investigações

As investigações e os modelos de dimensionamento apresentados anteriormente já formam uma base consistente de conhecimento sobre a aplicação dos *composite dowels* em pontes e edifícios. Além disso, outros estudos são encontrados na literatura. O comportamento dos *composite dowels* em concretos de ultra alto desempenho (UHPC) sob carregamento cíclico em ensaios *pull-out* foi investigado em [112,133]. Lorenc [134] analisou a falha do concreto para *composite*

dowels submetidos a carregamentos cíclicos a partir de testes em escala real realizados para a construção das vigas da ponte *Wierna Rzeka Bridge*. Lechner *et al.* [44] investigaram o comportamento estrutural de *composite dowels* em elementos esbeltos de UHPC. Luo e Mensinger [137] investigaram a ancoragem de *composite dowels* posicionados como armadura externa nos encontros de pontes e viadutos. Os autores também incluem uma visão geral sobre experimentos com vigas e pilares mistos com *composite dowels*. Harsányi *et al.* [138] investigaram o comportamento do PZ e do MCL fabricados a partir de um aço de alta resistência S460ML em combinação com um concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (UHPRFC) por meio de ensaios *push-out*.

Pesquisadores da *Chang'an University* desenvolveram um novo tipo de laje mista, que consiste em uma fôrma de aço incorporada com conectores *composite dowels* soldados sobre o deck (Fig. 2.39a) [9,139,140]. Nessa solução, similar às lajes de aço ortotrópicas (*Orthotropic Steel Deck – OSD*), os conectores também atuam como enrijecedores longitudinais da fôrma de aço. Kong *et al.* [9] avaliaram o comportamento estático a partir de dois ensaios de flexão, enquanto Huang *et al.* [139] avaliaram o comportamento à fadiga a partir de três ensaios de flexão cíclicos dessas lajes mistas. Além disso, Kong *et al.* [9] realizaram ensaios *push-out* com conectores *Perfobond* e MCL com furos elípticos na chapa de aço soldados em lajes mistas com fôrma de aço incorporada e, da mesma forma, Huang *et al.* [140] conduziram os mesmos experimentos com os conectores *Perfobond* e PZ. Tanto o MCL quanto o PZ apresentaram maior capacidade resistente, rigidez e ductilidade em comparação ao *Perfobond*. Em ambos os casos, os furos elípticos nas chapas de aço promoveram um incremento de resistência. Cheng *et al.* [45] avaliaram o comportamento à flexão de uma laje mista de pontes composta por fôrma de aço incorporada com UHPC. Essa proposta, muito similar às soluções apresentadas em [9,139], foram projetadas para serem aplicadas em vigas mistas caixão (Fig. 2.39b).

Fig. 2.39 - (a) esquema de laje mista de aço-concreto com fôrma de aço incorporada com *composite dowels*; (b) proposta de laje mista para ser aplicada em uma seção caixão de aço típica para pontes.

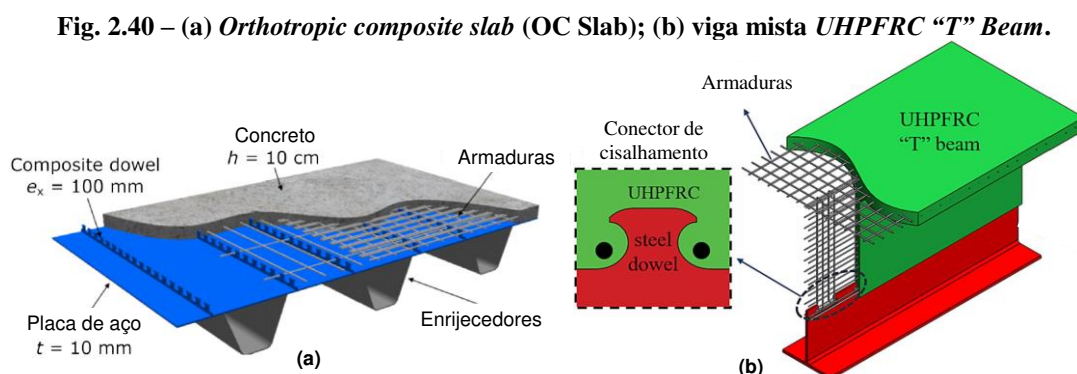


Fontes: adaptado de (a) Kong *et al.* [9] e de (b) Cheng *et al.* [45].

Pesquisadores alemães da *Technische Universität Dresden* também desenvolveram um novo tipo de laje mista, que consiste na aplicação do MCL em lajes mistas ortotrópicas semelhantes às citadas anteriormente [141-144]. No sistema alemão, os conectores são soldados sobre uma placa de aço que compõe a OSD convencional, isto é, sem a utilização de fôrma de aço colaborante (Fig. 2.40a). Ungermann *et al.* [145] investigaram a resistência à fadiga de *composite dowels* fabricados a partir de chapas de aço galvanizadas por imersão a quente.

Em [37,146], um tipo de *composite dowels* similar ao *Crestbond* foi testado numericamente para ser utilizado em lajes mistas de edifícios industriais com cargas de utilização de 20-25 kN/m². Em [37], três variações do *composite dowels* foram analisadas a partir de simulações numéricas de *push-out* e de vigas mistas, visando a otimização da geometria do conector. Já em [146] foi realizado um estudo paramétrico para otimizar a solução da viga mista com *composite dowels* soldados sobre a mesa superior do perfil de aço. Em um estudo de caso para estrutura de armazém, os autores mostraram que a solução com *composite dowels* reduz o consumo de aço em 12% em comparação a solução convencional (com *headed studs*).

Reis *et al.* [147] avaliaram a aplicação de enrijecedores longitudinais com conector CL na estabilidade de placas de aço, que normalmente compõem a seção transversal de pontes mistas de aço e concreto com seção I ou seção caixão projetadas para vencer grandes vãos. Santos *et al.* [148] realizaram um estudo de caso comparativo de soluções para vigas mistas de aço e concreto empregadas na superestrutura de uma ponte ferroviária de duas vias com vão biapoiado. As vigas mistas com *composite dowels* e a *Pre-Cambered Composite Beams (Preflex beams)* apresentaram vantagens econômicas e estruturais quando comparadas com o sistema misto tradicional. He *et al.* [148] apresentaram uma nova proposta de viga mista de aço e concreto (*UHPFRC "T" Beam*), que se utiliza UHPFRC, tanto na zona comprimida quanto na zona tracionada da seção, e um perfil de aço T invertido com conector MCL integrado à alma do perfil (Fig. 2.40b).



Fonte: adaptado de (a) Stroetmann *et al.* [144] e de (b) de He *et al.* [148].

2.7 Conclusões finais e observações para futuros trabalhos

Neste artigo é apresentada uma revisão geral sobre os *composite dowels* como conectores de cisalhamento para vigas mistas de aço e concreto. Essa revisão abrangeu os seguintes tópicos: a evolução da geometria dos conectores; o comportamento estrutural; os modelos mecânicos referentes aos modos de falha cobertos pela aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [1] e pelo projeto de pesquisa P1208 [107], que contém um modelo de dimensionamento atualizado para os conectores PZ, PZKL e MCL; um banco de dados experimentais e as equações de dimensionamento do *Crestbond*; e, no fim do artigo, outras investigações foram apontadas, com destaque para a utilização dos *composite dowels* em novas soluções de laje mista de pontes, que consistem em variações das lajes de aço ortotrópicas (ODS).

2.7.1 *Composite dowels PZ, PZKL e MCL*

Mostrou-se que os modelos de dimensionamento mais recentes [107] divergem daqueles apresentados pela aprovação técnica alemã [1] nos seguintes aspectos: o cisalhamento dos pinos de concreto não é mais considerado um modo de falha dos *composite dowels* sob cisalhamento longitudinal (carregamento estático); o *pry-out* da borda de concreto foi incluído como possível modo de falha; o novo modelo de dimensionamento passou a cobrir o conector PZKL (além do PZ e MCL); coeficientes que dependem da geometria do conector foram adotados para as equações de *pry-out* e de falha do aço; as fissuras transversais influenciam na capacidade resistente da conexão e essas influências foram incorporadas às equações de dimensionamento; e foram desenvolvidas equações de resistência à tração e de interação cisalhamento-tração.

Apesar dos avanços recentes realizados, principalmente, na *RWTH Aachen University* e na *University of Kaiserslautern*, na Alemanha, ainda existem lacunas de conhecimento que carecem de investigações para consolidação de um modelo de dimensionamento mais consistente para os *composite dowels* PZ, PZKL e MCL:

- a investigação do comportamento estrutural dos *composite dowels* em UHPFRC [107];
- a consolidação de um modelo de dimensionamento mais atualizado para o estado limite de fadiga [107];
- a realização de ensaios experimentais de interação cisalhamento-tração com as armaduras transversais com pequenas excentricidades em relação às reentrâncias do pino de aço, de forma a avaliar a influência das fissuras transversais do concreto na capacidade resistente dos *composite dowels* quando estes falham por *pry-out* [110];

- a realização de ensaios *pull-out*, de interação cisalhamento-tração e de vigas mistas em escala real em concretos fissurados com os conectores PZKL e MCL [110];
- a realização de ensaios experimentais para investigação do comportamento estrutural dos *composite dowels* sob esforços de cisalhamento-tração combinados para o caso de falha do aço [112];
- a investigação do grau mínimo de conexão ao cisalhamento para vãos maiores que 25 m (vigas mistas com *composite dowels* muito dúcteis podem apresentar conexão parcial mesmo para vãos acima dos 30 m), ampliando o estudo paramétrico (por exemplo, a resistência ao escoamento do aço), e a extensão da equação prevista por Classen [46] para outros tipos de conectores de cisalhamento;
- a investigação da possibilidade de se considerar o desenvolvimento e a propagação das fissuras, a resistência residual dos pinos, a degradação da conexão e a redistribuição dos esforços nos projetos de vigas mistas. Atualmente, a vida útil de uma viga mista com *composite dowels* submetida a carregamento cíclico é limitada pela probabilidade de fissura de um dente de aço e pela degradação da conexão mista, não se levando em consideração a redistribuição dos esforços internos. Estudos promissores nesse sentido já estão sendo realizados [116,117].

2.7.2 Conector *Crestbond*

Quanto ao conector *Crestbond*, o atual estado da arte permite a determinação do momento fletor resistente de uma viga mista do tipo *Crestbeam*. Petruski [38] observou boa correlação entre o comportamento estrutural previsto analiticamente e os resultados experimentais e numéricos. Os ensaios experimentais do tipo *push-out* encontrados na literatura [10] não possuem as disposições construtivas (passo e_x , taxa de armadura etc.) em conformidade com as prescrições indicadas em [1,107] e a resistência frontal do conector sempre esteve presente. Os conectores ensaiados possuem pequenas aberturas e pequenas taxas de armadura passante. Esses casos podem ser úteis para sistemas de piso de edifícios, em que o carregamento é de menor magnitude, praticamente monotônico e a viga fica sujeita apenas a momentos positivos, no entanto, investigações mais aprofundadas são necessárias para verificar a capacidade resistente e a ductilidade. A realização de ensaios experimentais do tipo *push-out*, respeitando-se os limites de aplicação prescritos em [1,107], é indicada para verificar o comportamento estrutural e para comparar os resultados experimentais obtidos com as equações mais recentes [88,89-93], que foram adaptadas dos conectores europeus [91].

Apesar do *Crestbond* ser um conector de elevada capacidade resistente e ductilidade e das vigas mistas *Crestbeam* serem uma solução pré-fabricada inovadora e econômica em comparação as vigas mistas convencionais, nota-se, no decorrer deste artigo, que ainda existem lacunas de conhecimento sobre a utilização do *Crestbond* em comparação aos conectores europeus, como:

- a verificação da ocorrência ou não de cisalhamento dos pinos de concreto como possível modo de falha estático [38];
- a influência da fissuração do concreto na capacidade resistente;
- a realização de ensaios experimentais de fadiga, de *pull-out*, de interação cisalhamento-tração e com o conector próximo a borda de concreto;
- a investigação do comportamento do *Crestbond* e da *Crestbeam* em concretos com diferentes materiais (UHPC, UHPFRC etc.);
- a investigação do comportamento do *Crestbond* em lajes mistas com fôrma de aço incorporada, em vigas caixão de aço, em painéis ortotrópicos etc. (estudos semelhantes são encontrados na literatura: [9,45,139-144]);
- a realização de estudos de confiabilidade com o objetivo de determinar os coeficientes de ponderação das resistências para os possíveis modos de falha [38];
- o desenvolvimento de uma equação para determinação do grau mínimo de conexão de vigas mistas com *Crestbond* (estudo similar ao realizado por Classen [46]) [38];
- a investigação de um conjunto de parâmetros geométricos e de materiais que exercem influência sobre o desempenho estrutural da *Crestbeam* sob carregamento estático;
- a investigação do comportamento das vigas *Crestbeam* sob carregamentos cíclicos [38];
- e a realização de estudos de casos comparando a solução *Crestbeam* com outras alternativas construtivas [38] (estudo similar ao realizado por Santos *et al.* [148]).

2.8 Referências

1. German Institute for Building Technology (DIBT), Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, n. Z-26.4-56, Berlin, 2023.
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - NBR 8800:2008: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios - Procedimento, 2008.
3. American Institute of Steel Construction (AISC). ANSI/AISC 360-22: Specification for Structural Steel Buildings. AISC. Chicago, 2022.
4. European Committee for Standardization – EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, 2004.
5. Zellner W. Recent designs of composite bridges and a new type of shear connectors. In: Composite construction in steel and concrete: proceedings of an engineering foundation conference. 1987; p. 240–52.

6. Hanswille, G.; Porsch, M.; Ustundag, C. Resistance of headed studs subjected to fatigue loading Part I: experimental study. *Journal of Constructional Steel Research* 2007; 63(4):475-484. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.035>.
7. Classen, M.; Gallwoszus, J. Concrete fatigue in composite dowels. *Structural Concrete* 2016; 17(1):63-7. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201400120>.
8. Christou, G.; Hegger, J.; Classen, M. Fatigue of clothoid shaped rib shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research* 2020; 171:106133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106133>.
9. Kong, F.; Huang, P.; Han, B.; Wang, X.; Liu, C. Experimental study on behavior of corrugated steel-concrete composite bridge decks with MCL shape composite dowels. *Engineering Structures* 2021; 227:111399. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111399>.
10. Veríssimo, G. S. Desenvolvimento de um Conector de Cisalhamento em Chapa Dentada para Estruturas Mistas de Aço e Concreto e Estudo do seu Comportamento. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. <http://hdl.handle.net/1843/LMCA-7E6HVC>.
11. Zheng, S.; Liu, Y.; Yoda, T.; Lin, W. Parametric study on shear capacity of circular-hole and long-hole perfobond shear connector. *Journal of Constructional Steel Research* 2016; 117:64-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.09.012>.
12. Chien, E.Y.L.; Ritchie, J.K. Design and construction of composite floor systems. Canadian Institute of Steel Construction, Toronto, Ontario, 1984.
13. Ghavami, K. Ultimate load behaviour of flexible and rigid connectors in composite beams. *Journal of Constructional Steel Research* 1998; 46(1-3):208-210. [http://dx.doi.org/10.1016/s0143-974x\(98\)00142-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0143-974x(98)00142-4).
14. Andrä, H. Neuartige Verbundmittel für den Anschluß von Ortbetonplatten an Stahlträger. *Beton und Stahlbetonbau* 1985; p. 325-328. <https://doi.org/10.1002/best.198500580>.
15. Leonhardt, F.; Andrä, W.; Andrä, H.P.; Harre, W. Neues vorteilhaftes verbundmittel für stahlverbund-tragwerk mit höher dauerfestigkeit. *Beton und Stahlbetonbau* 1987; 12:325-331. <https://doi.org/10.1002/best.198700500>.
16. Bode, H.; Künzel, R. Scherversuche zum Tragverhalten eines neuartigen Stahlverbundträgers mit schwalbenschwanzförmigen Stegausehnehmungen als Verbundmittel, Untersuchungsbericht 2 (88), Universität Kaiserslautern, 1988 (não publicado).
17. Andrä, H. Economical shear connectors with high fatigue strength. *IABSE*, jul. 1990, 60:167-172. <http://dx.doi.org/10.5169/SEALS-46457>.
18. Kraus, D.; Wurzer, O. Bearing capacity of concrete dowels. *IABSE*, 1997, p. 133-138. <https://doi.org/10.5169/SEALS-957>.
19. Kraus, D.; Wurzer, O. Nonlinear Finite-Element Analysis of Concrete Dowels. *Computers & Structures* 1997; 64(5-6):1271-1279. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(97\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(97)00034-5).
20. Zapfe C. Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln zur Übertragung der Längsschubkräfte. Tese (Doutorado), Universität der Bundeswehr, 2001.
21. Schlaich, J. Development and application of saw-tooth connections for composite structures, In: *International Symposium on Connections Between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, 2001, 2:1105-1118.
22. Hegger, J.; Sedlacek, G.; Döinghaus, P.; Trumpf, H. Studies on the ductility of shear connectors when using high-strength concrete, In: *International Symposium on Connections Between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, 2001, 2:1024-1045.
23. Schmitt, V., Seidl, G., Hever, M., Zapfe, C. Verbundbrücke Pöcking – Innovative VFT Träger mit Betondübeln. *Stahlbau* 2004; 73(6):387-393. <https://doi.org/10.1002/stab.200490108>.

24. Veríssimo, G. S. Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento. Projeto de Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
25. Lorenc, W.; Ignatowicz, R.; Kubica, E. Numerical model of shear connection by concrete dowels. Recent Developments in Structural Engineering Mechanics and Computation, Millpress, Rotterdam, Netherlands, 2007.
26. Berthelley J., Seidl G. Les poutres Préco - Une solution économique pour les petites portées, objet d'un programme de recherche européen. Ouvrages d'art 2007; 54:22-27.
<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/newsletters/boa-bulletin-ouvrages-art/derniers-numeros-notre-boa/boa-bulletin-ouvrages-art-ndeg-54>.
27. Fink, J.; Petraschek, T. Tragmodelle zur Bestimmung der Längsschubtragfähigkeit des Kronendübels als neuartiges Verbindungsmittel im Verbundbau. Stahlbau 2007; 76(10):761-770.
<http://dx.doi.org/10.1002/stab.200710081>.
28. Vianna, J. C.; Costa-Neves, L. F.; Vellasco, P. C. G. S.; Andrade, S.A.L. Experimental assessment of Perfobond and T-Perfobond shear connectors' structural response. Journal of Constructional Steel Research 2009; 65(2):408-421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.02.011>.
29. Seidl, G. Behaviour and load bearing capacity of composite dowels in steel-concrete composite girders. Tese (Doutorado), Wroclaw University of Technology, 2009.
30. Lorenc, W.; Kubica, E.; Kożuch, M. Testing Procedures in Evaluation of Resistance of Innovative Shear Connection with Composite Dowels. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2010; 10(3):51-63. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60136-8](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60136-8).
31. Kim, S.; Choi, K.; Park, S.; Park, S.; Jung, C. Experimental shear resistance evaluation of Y-type perfobond rib shear connector. Journal of Constructional Steel Research 2013; 82:1-18.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.12.001>.
32. Seidl, G.; Petzek, E.; Bancila, R. Composite dowels in bridges – efficient solution. Advanced Materials Research 2013; 814:193-206.
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.814.193>.
33. Seidl, G. *et al.* Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission (PRECO-BEAM). EUR 25321 EN, European Commission, 2013.
34. Seidl, G. *et al.* PRECO+: Prefabricated Enduring Composite Beams Based on Innovative Shear Transmission. Research Fund for Coal and Steel – Final Report, 2013.
35. Lorenc, W.; Koch, M.; Rowiński, S.: The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Part. 1: Experimental study. Journal of Constructional Steel Research 2014; 101:482–499.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.013>.
36. Lorenc, W.; Kożuch, M.; Rowinski, S.: The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Part. II: Theoretical investigations. Journal of Constructional Steel Research 2014; 101:500-518.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.012>.
37. Lacki, P.; Kasza, P.; Adamus, K. Optimization of composite dowels shape in steel-concrete composite floor. Composite Structures 2019; 222:110902.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110902>.
38. Petruski, M. C. Avaliação numérico-experimental do comportamento de vigas mistas pré-moldadas tipo *Crestbeam* sujeitas a flexão simples. 2021. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2021.
<https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.002>.
39. Heinemeyer S. Load and deformation behavior of composite beams with ultra high performance concrete and composite dowels. Tese (Doutorado), RWTH Aachen, 2011.

40. Cardoso, H. S.; Aguiar, O. P.; Caldas, R. B.; Fakury, R. H. Composite dowels as load introduction devices in concrete-filled steel tubular columns. *Engineering Structures* 2020; 219:110805. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110805>.
41. He, S.; Fang, Z.; Mosallam, A. S. Push-out tests for perfobond strip connectors with UHPC grout in the joints of steel-concrete hybrid bridge girders. *Engineering Structures* 2017; 135:177-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.008>.
42. Feldmann, M.; Hechler, P.; Hegger, J.; Rausher, S. Fatigue behavior of shear connectors in high performance concrete. *Composite Construction in Steel and Concrete Conference VI: Proc of the 6th Int Conf. ASCE, USA 2008*, pp. 39–51. [http://dx.doi.org/10.1061/41142\(396\)4](http://dx.doi.org/10.1061/41142(396)4).
43. Classen, M.; Gallwoszus, J.; Stark, A. Anchorage of composite dowels in UHPC under fatigue loading. *Structural Concrete* 2016; 17(2):183-193. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201500034>.
44. Lechner, T.; Gehrlein, S.F.; Fischer, O. Structural behaviour of composite dowels in thin UHPC elements. *Steel Construction* 2016; 9(2):132–137. <https://doi.org/10.1002/stco.201610012>.
45. Cheng Z., Zhang Q., Bao Y., Deng P., Wei C., Li M. Flexural behavior of corrugated steel-UHPC composite bridge decks. *Engineering Structures* 2021; 246:113066. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113066>.
46. Classen, M. Limitations on the use of partial shear connection in composite beams with steel T sections and uniformly spaced rib shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research* 2018; 142:99–112. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.11.023>.
47. Feldmann, M.; Kopp, M.; Pak, D. Composite dowels as shear connectors for composite beams – background to the German technical approval. *Steel Construction* 2016; 9(2):80–88. <https://doi.org/10.1002/stco.201610020>.
48. Kopp, M.; Wolters, K.; Classen, M.; Hegger, J.; Gündel, M.; Gallwoszus, J.; Heinemeyer, S.; Feldmann, M. Composite dowels as shear connectors for composite beams – background to the design concept for static loading. *Journal of Constructional Steel Research* 2018; 147:488–503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.013>.
49. Lorenc, W.; Kurz, W.; Seidl, G. Hybrid steel–concrete sections for bridges: Definition and basis for design. *Engineering Structures* 2022; 270:114902. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114902>.
50. Gündel, M.; Kopp, M.; Feldmann, M.; Gallwoszus, J.; Hegger, J.; Seidl, G. Design of composite dowels according to the new national technical approval. *Stahlbau* 2014; 83(2):112–121. <https://doi.org/10.1002/stab.201410137>.
51. Lorenc, W. The Model for a General Composite Section Resulting from the Introduction of Composite Dowels. *Steel Construction* 2017; 10(2):154-167. <https://doi.org/10.1002/stco.201710019>.
52. G. Seidl, M. Mensinger, E. Koch, F. Hugle, Report on the railway overpass Simmerbach, Germany – pilot project in VFT-rail construction method with external reinforcement. *Stahlbau* 2012; 81(2):100–107. <https://doi.org/10.1002/stab.201201520>.
53. Feldmann, M.; Pak, D.; Kopp, M.; Schillo, N.; Wirth, T.; Seidl, G.; Mensinger, M.; Koch, E.. Eisenbahnüberführung Simmerbach. *Stahlbau* 2012; 81(10):737-747. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.201201610>.
54. Seidl, G.; Braun, A. VFT-WIB-Brücke bei Vigaun - Verbundbrücke mit externer Bewehrung. *Stahlbau* 2009; 78(2):86-93. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.200910009>.
55. Lorenc, W.; Kołakowski, T. Modern composite bridges by VFT-WIB method in Poland realized at new express road S7 at Olsztynek-Nidzica sector: ecobridge, in: E. Petzek, R. Băncilă (Eds.), *Economical Bridge Solutions Based on Innovative Composite Dowels and Integrated Abutments:*

- Ecobridge, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, pp. 93–110. https://doi.org/10.1007/978-3-658-06417-4_6.
56. Lorenc, W.; Kołakowski, T.; Hukowicz, A.; Seidl, G. Composite bridge nearby Elbląg: enhancements of the precast-concrete construction method, *Stahlbau* 2017; 86(2):167–174, <https://doi.org/10.1002/stab.201710463>.
 57. Petzek, E.; Toma, L.; Meteş, E.; Băncilă, R. Innovative composite overpasses on the Romanian A1 motorway, in: E. Petzek, R. Băncilă (Eds.), *Economical Bridge Solutions Based on Innovative Composite Dowels and Integrated Abutments: Ecobridge*, Springer Vieweg, Wiesbaden 2015, p. 155–179. https://doi.org/10.1007/978-3-658-06417-4_10.
 58. Petzek, E.; Schmitt, V.; Meteş, E.; Ispășoiu, G.; Turcan, A. Romanian projects and integral bridge solutions based on composite dowels. *Steel Construction* 2016; 9(3):161-169. <http://dx.doi.org/10.1002/stco.201610022>.
 59. Simon, P.; Hrdlicka, L.; Dráb, A.; Zvěřina, V. A composite dowel bridge in the Czech Republic. *Steel Construction* 2016; 9(3):191-199. <http://dx.doi.org/10.1002/stco.201610027>.
 60. Seidl, G.; Stambuk, M.; Lorenc, W.; Kołakowski, T.; Petzek, E. Wirtschaftliche Verbundbauweisen im Brückenbau - Bauweisen mit Verbunddübelleisten. *Stahlbau* 2013; 82(7):510-521. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.201310072>.
 61. Zanon, R.; Berthelley, J.; Seidl, G.; Lorenc, W. An innovative solution for small span bridges - Precobeam. 2014 World Steel Bridge Symposium (WSBS). Conference Proceedings. Toronto, 2014.
 62. Pak, D.; Kopp, M.; Feldmann, M.; Seidl, G.. Condition monitoring of VFT-Rail@slab-track railway bridges. *Steel Construction* 2016; 9(3):170-178. <http://dx.doi.org/10.1002/stco.201610023>.
 63. Berthelley, J.; Schavits, D.; Erre, C. Crossing motorways under traffic without intermediate piers. *Steel Construction* 2016; 9(3):200-206. <http://dx.doi.org/10.1002/stco.201610028>.
 64. Berthelley, J.; Seidl, G.; Lorenc, W. Recent Structures and Bridges built with the CL Steel-concrete Connection. IABSE Symposium, Nantes 2018: Tomorrow's Megastructures, 2018. <http://dx.doi.org/10.2749/nantes.2018.s2-51>.
 65. Lorenc, W.; Kolakowski, T.; Hukowicz, A.; Seidl, G. Verbundbrücke bei Elbląg. *Stahlbau* 2017; 86(2):167-174. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.201710463>.
 66. Petzek, E., Meteş, E., Toma, L., Schmitt, V. New Integral Bridges Solutions for the Romanian Motorway. In: Petzek, E., Bancila, R. (eds) *The Eight International Conference "Bridges in Danube Basin"*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-658-03714-7_25.
 67. Valente, I.; Cruz, P. J. S. Experimental analysis of Perfobond shear connections between steel and lightweight concrete. *Journal of Constructional Steel Research* 2004; 60(3-5):465-479. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00124-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00124-X).
 68. Oguejiofor, E. C.; Hosain, M. U. A parametric study of Perfobond rib shear connectors. *Canadian Journal of Civil Engineering* 1994; 21:614-625. <https://doi.org/10.1139/194-063>.
 69. Oguejiofor, E. C.; Hosain, M. U. Numerical analysis of push-out specimens with Perfobond rib connectors. *Computer and Structures* 1997; 62(4):617-624. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(96\)00270-2](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(96)00270-2).
 70. Cândido-Martins, J.P.S.; Costa-Neves, L.F.; Vellasco, P.C.G. da S. Experimental evaluation of the structural response of Perfobond shear connectors. *Engineering Structures* 2010; 32(8):1976-1985. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.02.031>.

71. Ahn, J.; Lee, C.; Won, J.; Kim, S. Shear resistance of the perfobond-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement. *Journal of Constructional Steel Research* 2010; 66(10):1295-1307. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.04.008>.
72. Costa-Neves, L.F.; Figueiredo, J.P.; Vellasco, P.C.G. da S.; Vianna, J. C. Perforated shear connectors on composite girders under monotonic loading: an experimental approach. *Engineering Structures* 2013; 56:721-737. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.06.004>.
73. Zhao, C.; Li, Z.; Deng, K.; Wang, W. Experimental investigation on the bearing mechanism of Perfobond rib shear connectors. *Engineering Structures* 2018; 159:172-184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.047>.
74. Liu, Y.; Wang, S.; Xin, H.; Liu, Y. Evaluation on out-of-plane shear stiffness and ultimate capacity of perfobond connector. *Journal of Constructional Steel Research* 2020; 167:105850. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105850>.
75. Zou, Y.; Di, J.; Zhou, J.; Zhang, Z.; Li, X.; Zhang, H.; Qin, F. Shear behavior of perfobond connectors in the steel-concrete joints of hybrid bridges. *Journal of Constructional Steel Research* 2020; 172:106217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106217>.
76. Suzuki, A.; Suzuki, K.; Kimura, Y. Ultimate shear strength of perfobond shear connectors subjected to fully reversed cyclic loading. *Engineering Structures* 2021; 248:113240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113240>.
77. Alves, A. R. L.; Valente, I. B.; Vieira, W. B. Veríssimo, G. S. Prospective study on the behavior of composite beams with an indented shear connector. *Journal of Constructional Steel Research* 2018; 148:508–524. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.015>.
78. Oliveira, A. F. N. Análise do comportamento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para sistemas de piso misto com pré-laje de concreto. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. <http://hdl.handle.net/1843/LMCA-75XKVE>.
79. Silva, M. A. P. Modelos semiempíricos para a estimativa da capacidade resistente de conectores de cisalhamento Crestbond e Perfobond. Dissertação (Mestrado), Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2011. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3748>.
80. Silva, H. P. Simulação numérica do comportamento de conectores de cisalhamento tipo Crestbond. Dissertação (Mestrado), Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2013. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3790>.
81. Dutra, C. M. Estudo do comportamento estrutural do conector Crestbond considerando variações geométricas e mecânicas. Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2014. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3838>.
82. Alves, A. R. L. Avaliação do comportamento do conector Crestbond em vigas mistas. Dissertação (Mestrado), Universidade do Minho, 2014. <https://hdl.handle.net/1822/36093>.
83. Petruski, M. C. Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto com conectores *Crestbond*. Dissertação (Mestrado), Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2016. <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9811>.
84. Lorenc, W.; Seidl, G.; Berthelley, J. The evolution of the shape of composite dowels. *Studia Geotechnica et Mechanica* 2022; 44(4):296-316. <http://dx.doi.org/10.2478/sgem-2022-0021>.
85. Doss, W; Gebeshuber A.; Friedrich, N.; Schmitt, V.; Seidl, G.; Weizenegger, M. VFT-Bauweise, Entwicklung von Verbundfertigteilträgern im Brückenbau. *Beton- und Stahlbetonbau* 2001; 96(4):171-180. <https://doi.org/10.1002/best.200100280>.

86. Kozuch, M.; Lorenc, W. The behaviour of clothoid-shaped composite dowels: Experimental and numerical investigations. *Journal of Constructional Steel Research* 2020; 167:105962. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105962>.
87. Preco-Beam, Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission RFSR-CT-2006-00030, final report, Project carried out with the financial grant of the Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, 2009.
88. Cardoso, H. S. Avaliação do comportamento de conectores constituídos por chapas de aço com recorte retangulares – ênfase em conectores de geometria *Crestbond* aplicados em pilares mistos. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2018. <http://hdl.handle.net/10316/84982>.
89. Cardoso, H. S.; Caldas, R. B.; Fakury, R. H.; Veríssimo, G. S. Estudo do comportamento de conectores *Crestbond* por meio de simulação numérica. *Revista da Estrutura de Aço* 2018; 7(2):140-159. <http://dx.doi.org/10.17648/aco-2238-9377-7-2-4>.
90. Cardoso, H. S.; Caldas, R. B.; Fakury, R. H.; Veríssimo, G. S.; Almeida, R. L. J. Modelo de Cálculo para o Cisalhamento do Concreto nos Conectores *Crestbond*. *Revista da Estrutura de Aço* 2018; 7(3):280-299. <http://dx.doi.org/10.17648/aco-2238-9377-7-3-3>.
91. Almeida, R. L. J. Simulação numérica de modelos de cálculo para representação dos modos de falha de conectores de cisalhamento *Crestbond*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2018. <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/22677>.
92. Almeida, R. L. J.; Veríssimo, G. S.; Ribeiro, J. C. L.; Paes, J. L. R.; Petruski, M. C.; Caldas, R. B. Capacidade resistente do conector *Crestbond* à falha do aço desencadeada por um mecanismo combinado de cisalhamento e flexão. *Revista da Estrutura de Aço* 2019; 9(1):61-80.
93. Almeida, R. L. J.; Veríssimo, G. S.; Ribeiro, J. C. L.; Paes, J. L. R.; Caldas, R. B.; Cardoso, H. S.; Fakury, R. H. Assessing the bearing capacity of *Crestbond* shear connectors to concrete pry-out. *IBRACON Structures and Materials Journal* 2023; 16(1):e16107. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000100007>.
94. Aguiar, O. P. Estudo do comportamento de conectores *Crestbond* em pilares mistos tubulares preenchidos de concreto. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2018. <http://hdl.handle.net/1843/BUBD-9WVH7D>.
95. Aguiar, O. P.; Caldas, R. B.; Oliveira, H. M. S., Fakury, R. H. Estudo de conectores *Crestbond* em pilares mistos preenchidos com concreto. *Revista Estrutura do Aço* 2015; 4(3):181–199.
96. Aguiar, O. P.; Caldas, R. B.; Rodrigues, F. C.; Fakury, R. H.; Veríssimo, G. S. *Crestbond* Shear connectors for load transfer in concrete filled tube columns, *IBRACON Structures and Materials Journal* 2018; 11(5):960–965. <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952018000500004>.
97. Prado, L. F. P. Estudo numérico do conector *Crestbond* e de chapa passante em pilares mistos tubulares circulares preenchidos com concreto em situação de incêndio. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2017. <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-AVQLQZ>.
98. Prado, L. F. P.; Miranda, L. G. J.; Caldas, R. B. *Crestbond* Shear connectors for load transfer on concrete filled composite columns in fire, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 2022; 15(3):e15310. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000300010>.
99. Pereira, A. C. Estudo numérico dos conectores *Crestbond* em pilares mistos tubulares circulares de seção esbelta. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2020. <http://hdl.handle.net/1843/51127>.
100. Pereira, A. C.; Miranda, L. G. J.; Santos, L. R.; Caldas, R. B. Development of a numerical model to simulate the behavior of plate shear connectors applied to slender cross-section concrete-filled

- steel tube. IBRACON Structures and Materials Journal 2023; 16(1):e16108. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000100008>.
101. Santos, L. R. Conectores composite dowels aplicados a pilares mistos de seção tubulares esbelta. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2021. <http://hdl.handle.net/1843/39464>.
 102. Classen, M.; Hegger, J. Shear tests on composite dowel rib connectors in cracked concrete. ACI Structural Journal 2018; 115(3):661-671. <http://dx.doi.org/10.14359/51701145>.
 103. Classen, M.; Herbrand, M. Shear behavior of composite dowels in transversely cracked concrete. Ernst & Sohn, Structural Concrete 2015; 16(2):195-206. <https://doi.org/10.1002/suco.201400100>.
 104. Broschart, Y.; Kurz, W.; Wolters, K.; Christou, G.; Classen, M. Influencing parameters on the load-bearing capacity of composite dowels positioned close to the free Surface of Concrete Slabs. ce/papers 2019; 3(3-4):295-300. <https://doi.org/10.1002/cepa.1059>.
 105. Broschart, Y. Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten oberflächennaher Verbunddübelleisten. Tese (Doutorado). Technische Universität Kaiserslautern, 2020. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-61028>.
 106. Broschart Y.; Kurz W, Wolters K.; Christou, G.; Classen, M. Development of a new design approach for composite dowels positioned close to the concrete surface. ce/papers 2021; 4(2-4):598-605. <https://doi.org/10.1002/cepa.1337>.
 107. Feldmann M. *et al.* Konsistentes Bemessungsmodell für fertigungsoptimierte Verbunddübelleisten - Grundlagen für DASt-Richtlinie und Überführung im Eurocode 4: Abschlussbericht P 1208; 2021.
 108. Classen, M.; Hegger, J. Assessing the pry-out resistance of open rib shear connectors in cracked concrete – Engineering model with aggregate interlock. Engineering Structures 2017; 148:254-262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.050>.
 109. Classen, M.; Hegger, J. Shear-slip behaviour and ductility of composite dowel connectors with pry-out failure. Engineering Structures 2017; 150:428-437. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.065>
 110. Christou, G; Wolters, K; Ungermann, J; Classen, M; Hegger, J. Combined shear-tension loading of composite dowels in cracked concrete - experimental investigations and design. Applied Sciences 2022; 12(3):14-49. <http://dx.doi.org/10.3390/app12031449>.
 111. Classen, M.; Hegger, J. Anchorage of composite dowels. Steel Construction 2016; 9(2):138-150. <https://doi.org/10.1002/stco.201610011>.
 112. Classen, M.; Herbrand, M.; Adam, V.; Kueres, D.; Sarac, M. Puzzle-shaped rib shear connectors subjected to combined shear and tension. Journal of Constructional Steel Research 2018; 145:232-243. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.02.036>.
 113. Kopp, M.; Pak, D.; Feldmann, M. Effects of transverse tension load on the static capacity and fatigue resistance of composite dowels. Steel Construction 2016; 9(2):115-121. <http://dx.doi.org/10.1002/stco.201610013>.
 114. Wolters, K.; Feldmann, M. Fatigue and crack propagation investigations on composite dowels using an inclined single push-out test. Proceedings 12Th International Conference On Advances In Steel-Concrete Composite Structures - AscCs 2018, València, Spain, p. 725-732, 27 jun. 2018. Universitat Politècnica València. <http://dx.doi.org/10.4995/asccs2018.2018.7074>.
 115. Christou, G., Classen, M., Wolters, K.; Broschart, Y. Fatigue of composite constructions with composite dowels. Ce/Papers 2019; 3(3-4):277-282. <https://doi.org/10.1002/cepa.1056>.
 116. Christou, G.; Hegger, J.; Classen, M. Concrete fatigue of composite constructions with rib shear connectors. Ce/Papers 2021; 4(2-4):635-640. <http://dx.doi.org/10.1002/cepa.1342>.

117. Wolters, K.; Christou, G.; Feldmann, Ma. Crack propagation and residual load-bearing behavior of composite dowels – effects on the global behavior of composite girders under cyclic loading. *Ce/Papers* 2021; 4(2-4):657-665. <http://dx.doi.org/10.1002/cepa.1345>.
118. Christou, G.; Schmidt, C.; Hegger, J.; Classen, M. The effect of concrete fatigue on the cyclic behaviour of composite dowels - derivation of a design approach based on experimental findings. *Engineering Structures* 2022; 253:113743. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113743>.
119. Broschart, Y.; Kurz, W.; Wolters, K.; Christou, G.; Feldmann, M.; Hegger, J.; Classen, M. Development of a consistent design concept for composite dowels. *Ce/Papers* 2023; 6(1):658-669. <https://doi.org/10.1002/cepa.1945>.
120. Kopp, M.; Christou, G.; Stark, A.; Hegger, J.; Feldmann, M. An integrated steel composite floor slab system. *Stahlbau* 2018; 87(2):136-148. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.201810569>.
121. Classen, M. Zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Verbunddübeln und großen Stegöffnungen. Tese (Doutorado). RWTH Aachen; 2016.
122. Mangerig, I.; Zapfe, C. Concrete dowels in composite construction. Japanese-German Bridge Symposium, Osaka, Japan, 2003.
123. Lorenc, W. The design concept for the steel part of a composite dowel shear connection. *Steel Construction* 2016; 9(2):89-97. <https://doi.org/10.1002/stco.201610014>.
124. Lorenc, W. Non-linear behavior of steel dowels in shear connections with composite dowels: design models and approach using finite elements. *Steel Construction* 2016; 9(2):98-106. <https://doi.org/10.1002/stco.201610015>.
125. Dudzinski, W., Pekalski, G., Harnatkiewicz, P., Kopczynski, A., Lorenc, W., Kożuch, M., Rowiński, S.: Study on fatigue cracks in steel-concrete shear connection with composite dowels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2011; 11(4):839–858. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60081-8](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60081-8).
126. Harnatkiewicz, P., Kopczynski, A., Kożuch, M., Lorenc, W., Rowiński, S.: Research on fatigue cracks in composite dowel shear connection. *Engineering Failure Analysis* 2011; 18(5):1279–1294. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.03.016>.
127. Kożuch, M. Resistance of MCL open steel connectors in steel-concrete composite beams. Report PRE No. 3/2012 Tese (Doutorado), Wrocław University of Technology, 2012.
128. Rowiński, S.: Fatigue strength of steel dowels in innovative shear connection of steel-concrete composite beam. Tese (Doutorado), Wrocław University of Technology, 2012.
129. Lorenc, W.; Kożuch, M.; Seidl, G. Zur Grenztragfähigkeit von Verbunddübeln mit Klothoidenform. *Stahlbau* 2013; 82(3):196-207. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.201310030>.
130. Rowiński, S., Lorenc, W., Kożuch, M.: Study on fatigue cracks in steel-concrete shear connectors composite dowels MCL. *Key Engineering Materials* 2014; 598:207–212. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.598.207>.
131. Kożuch, M., Rowiński, S.: Elastic behaviour of steel part of shear connection by MCL composite dowels. *Steel Construction* 2016; 9(2):107–114. <https://doi.org/10.1002/stco.201610019>.
132. Kożuch, M.; Lorenc, W. Stress concentration factors of shear connection by composite dowels with MCL shape. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2019; 19(1):32-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2018.08.006>.
133. Gallwoszus J, Classen M. Fatigue of composite dowels in under cyclic pull out loading. *Bautechnik* 2015; 92(7):509-521. <https://doi.org/10.1002/bate.201500020>.

134. Lorenc W. Concrete failure of composite dowels under cyclic loading during full-scale tests of beams for the “Wiarna Rzeki” bridge. *Engineering Structures* 2020; 209:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114902>.
135. EN 1090-1, Execution of Steel Structures and Aluminium Structures – Part 1: Requirements for Conformity Assessment of Structural Components, 2009.
136. EN 1090-2, Execution of Steel Structures and Aluminium Structures – Part 2: Technical Requirements for Steel Structures, 2008.
137. Luo, G.; Mensinger, M. Anchorage of external reinforcement in the case of rigid clamping, *Steel Construction* 2016; 9(2):122–131. <https://doi.org/10.1002/stco.201610017>.
138. Harsányi P, Randl N, Tue N. DIC-based failure analysis of high-strength continuous steel shear dowels for composite UHPFRC steel construction. *Engineering Structures* 2021; 247:113093. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113093>.
139. Huang, P.; Li, X.; Mei, K.; Zhao, Y. Fatigue tests of composite decks with mcl connectors. *Advanced Steel Construction* 2022; 18(4):793-803. <http://dx.doi.org/10.18057/ijasc.2022.18.4.7>.
140. Huang, P.; He, J.; Kong, F.; Mei K.; Li, X. Experimental study on the bearing capacity of PZ shape composite dowel shear connectors with elliptical holes. *Scientific Reports* 2022; 12:2457. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06387-1>.
141. Stroetmann, R.; Karge, C.; Mansperger, T. Development of an orthotropic composite slab system for road bridges. *Ce/Papers* 2023; 6(1):130-139. <https://doi.org/10.1002/cepa.1898>.
142. Karge, C.; Stroetmann, R.; Wisnewski, J. Experimental and numerical investigation of dowel strips for longitudinal and transverse loading. *Ce/Papers* 2023; 6(1):670-681. <https://doi.org/10.1002/cepa.1946>.
143. Wisnewski, J.; Stroetmann, R. Experimental determination of the fatigue behavior of dowel strips in ortho-composite slabs for road bridges. *Ce/Papers* 2023; 6(3-4):130-135. <https://doi.org/10.1002/cepa.2538>.
144. Stroetmann, R.; Wisnewski, J.; Mansperger, T. Orthotropic composite slabs for road bridges. *Ce/Papers* 2023; 6(3-4):1013-1018. <https://doi.org/10.1002/cepa.2442>.
145. Ungermann, D.; Holtkamp, S.; Rademacher, D. Hot-dip galvanized composite dowel strips, *Steel Construction* 2016, 9(3):179–183, <https://doi.org/10.1002/stco.201610025>.
146. Lacki P, Derlatka A, Kasza P, Gao S. Numerical study of steel–concrete composite beam with composite dowels connectors. *Computers & Structures* 2021; 255:106618. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106618>.
147. Reis, J. F.; Barbosa, D. A.; Caldas, R. B. Aplicação de enrijecedores longitudinais com formato clothoidal na estabilidade de placas de aço. *Revista da Estrutura de Aço* 2022; 11(3):212-231.
148. Santos, R. R.; Carvalho, H.; Santos, R. F.; Bittencourt, T. N.; Caldas, R. B. Comparative study of steel-concrete composite beams for railway bridges. *IBRACON Structures and Materials Journal* 2024, 17(3):e17302. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000300002>.
149. He, Y.; Shen, X.; Chen, G.; Shao, X. A new steel – UHPFRC composite beam with in-built composite dowels as connectors: Concept and design principles. *Engineering Structures* 2024; 298:117089. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117089>.

CAPÍTULO 3 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS TIPO *CRESTBEAM* COM CONEXÃO PARCIAL

João Vitor Fioresi Altoé¹, Mateus Couri Petruski², Camila Spagnol de Faria¹, Paloma Renata Parassen¹, Caio Lopes Pereira¹, José Luiz Rangel Paes¹, Gustavo de Souza Veríssimo¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 36570-900, Brasil.

²Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 85819-110, Brasil.

RESUMO

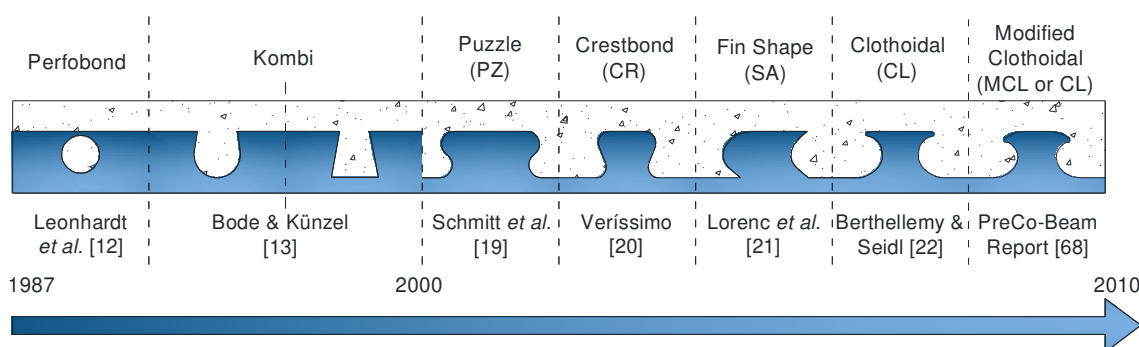
Neste artigo é apresentada uma análise numérica do comportamento estrutural de uma viga mista de aço e concreto, denominada *Crestbeam*, que possui uma seção transversal monossimétrica em que a mesa de concreto armado é solidarizada a um perfil de aço T invertido que possui um conector *Crestbond* integrado à alma. Essa tipologia de viga mista emergiu a partir da evolução dos conectores de cisalhamento do tipo *composite dowels*, e seu comportamento estrutural ainda é objeto de estudo. Esta pesquisa envolveu a validação de um modelo numérico de elementos finitos, a realização de um estudo para avaliar a influência da variação de alguns parâmetros da viga sobre seu comportamento estrutural em situação de conexão parcial e a proposição de um ajuste da equação de predição da resistência do *Crestbond* ao *pry-out* do concreto. Os resultados obtidos permitiram elucidar algumas questões relacionadas ao comportamento estrutural das vigas e como os parâmetros variados influenciam na resistência da conexão com *Crestbond* e da própria *Crestbeam*. O modelo teórico proposto, para predição do comportamento da *Crestbeam*, apresentou boa correlação com o modelo numérico calibrado com resultados experimentais, com coeficiente de variação da ordem de 3%. Esses resultados indicam que o atual estado da arte possibilita a previsão do comportamento resistente de vigas mistas tipo *Crestbeam* sob carregamento estático.

Palavras-chave: *Crestbond*; *Crestbeam*; Viga mista; Simulação numérica; Conexão parcial; Conector de cisalhamento; *Composite dowels*.

3.1 Introdução

O *headed stud* é o conector de cisalhamento mais utilizado mundialmente e é regulamentado por diversos códigos internacionais [1-3]. No entanto, apresenta baixo desempenho à fadiga [4-8] e exige equipamentos especiais para sua instalação [9,10]. Essas desvantagens motivaram a busca por alternativas de conexão para elementos mistos de aço e concreto projetados para a construção de pontes e passarelas, em que os carregamentos cíclicos são predominantes. Diversas pesquisas têm sido realizadas desde os anos 1980 visando o desenvolvimento de novas soluções, como os conectores em chapa de aço plana recortada ou perfurada, conhecidos como *composite dowels* (Fig. 3.1) [11-33]. Leonhardt *et al.* [12] desenvolveram o conector de cisalhamento conhecido como *Perfobond*. Posteriormente, diversos autores propuseram configurações alternativas com geometrias abertas, que aceleram o processo construtivo, por facilitar o posicionamento das armaduras passantes, e o processo de fabricação, por permitir a produção de dois conectores com um único corte, diretamente na alma de um perfil I, gerando dois perfis T (Fig. 3.2a,c) [15].

Fig. 3.1 – Linha do tempo do desenvolvimento dos *composite dowels*.

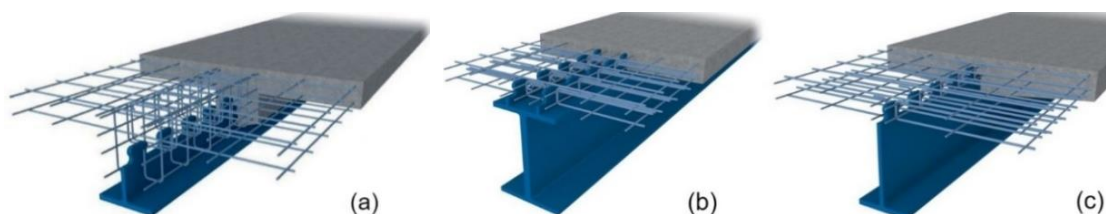


Fonte: o autor.

O conector *Crestbond* foi desenvolvido no Brasil, por Veríssimo [20], a partir de 2004, visando a aplicação em sistemas de piso de edifícios. Os conectores PZ, SA, CL e MCL foram desenvolvidos no âmbito do projeto europeu *PreCo-Beam (Prefabricated Composite Beam)* [27] para aplicação em vigas de pontes e viadutos [34]. Como resultado desse projeto, diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura [26-30,35,36]. Desses trabalhos emergiram algumas diretrizes de dimensionamento para os *composite dowels* europeus, que foram aprovadas pelo *German Institute for Building Technology (DIBt)* e fazem parte da aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [37], atualmente a única norma que estabelece diretrizes básicas para a utilização de *composite dowels*.

Os *composite dowels* podem ser fabricados a partir de chapas de aço e posteriormente podem ser soldados à mesa superior de perfis de aço, ou podem ser cortados diretamente na alma de perfis laminados (Fig. 3.2). São particularmente econômicos quando utilizados em seções mistas com perfis de aço sem a mesa superior (Fig. 3.2c). Este último sistema é muito interessante do ponto de vista estrutural, dispensando a mesa superior da viga de aço, que na configuração com um perfil I convencional se encontra próxima da linha neutra da seção mista e, portanto, sujeita a tensões quase nulas. Além disso, o processo de soldagem do conector sobre a mesa é eliminado [35-38].

Fig. 3.2 – Exemplos de aplicação de vigas mistas de aço e concreto com *composite dowels*.

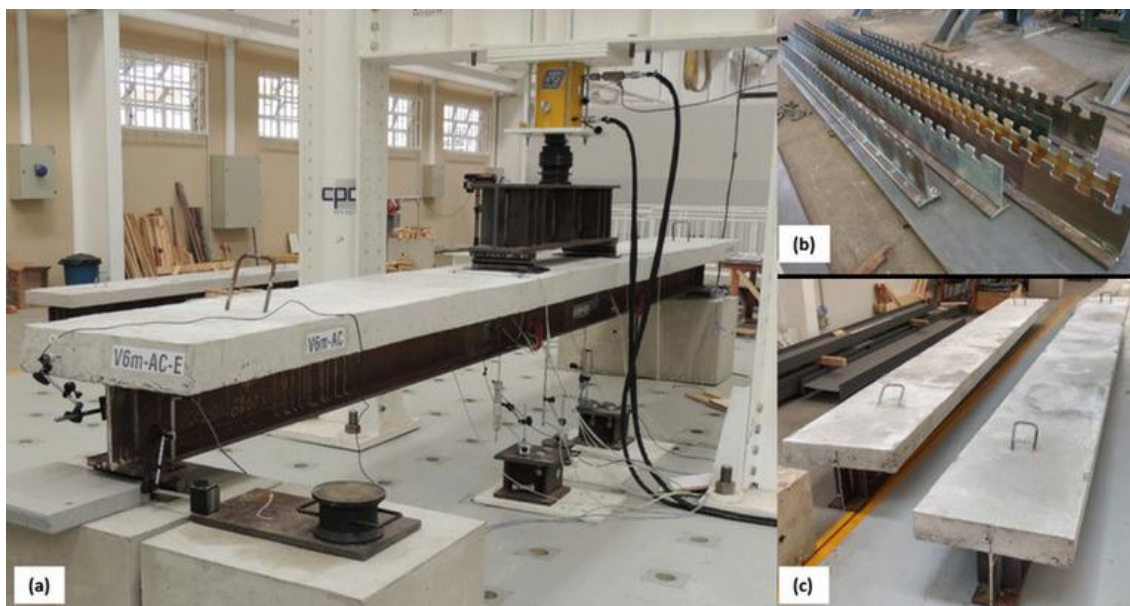


Fonte: Gündel *et al.* [39].

Segundo Kopp *et al.* [36], as principais vantagens dos *composite dowels* em comparação aos *headed studs* são a maior capacidade de carga com elevada capacidade de deformação, inclusive em concretos de ultra alto desempenho [40-46], que os caracterizam como conectores dúcteis de acordo com a EN 1994-1-1 [3], e a elevada rigidez em regime elástico, ideal para evitar a falha por fadiga [47]. Os conectores *composite dowels* favorecem alto grau de industrialização na fabricação de vigas mistas pré-fabricadas de aço e concreto, bem como agilidade na montagem de pontes e viadutos, e vêm sendo empregados recentemente em diversas obras na Europa [48,49].

Tendo em vista o potencial das vigas mistas pré-fabricadas para a construção rápida de pontes e viadutos, somado às possibilidades de industrialização e aos aspectos de sustentabilidade, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento estrutural da *Crestbeam*, uma nova tipologia de viga mista, por meio de modelos numéricos de elementos finitos. A *Crestbeam* é uma viga mista pré-fabricada com seção transversal monossimétrica, em que uma mesa de concreto armado é solidarizada a um perfil de aço T invertido que possui um conector *Crestbond* (*composite dowels*) integrado à alma (Fig. 3.3). Este trabalho aprofunda a investigação sobre os fenômenos observados durante os ensaios de flexão realizados por Petrauski [32] no Laboratório de Estruturas (LBE) da UFV, avaliando a influência da variação de alguns parâmetros sobre o desempenho estrutural da *Crestbeam* e comparando os resultados numéricos obtidos com modelos semiempíricos que consideram a resistência do *Crestbond*.

Fig. 3.3 - *Crestbeam*: ensaio de flexão a 4 pontos no LBE/UFV (a); perfis de aço T invertido com conector *Crestbond* integrado à alma (b); aspecto final da *Crestbeam* (c).



Fonte: o autor.

3.2 Equações de resistência do *Crestbond*

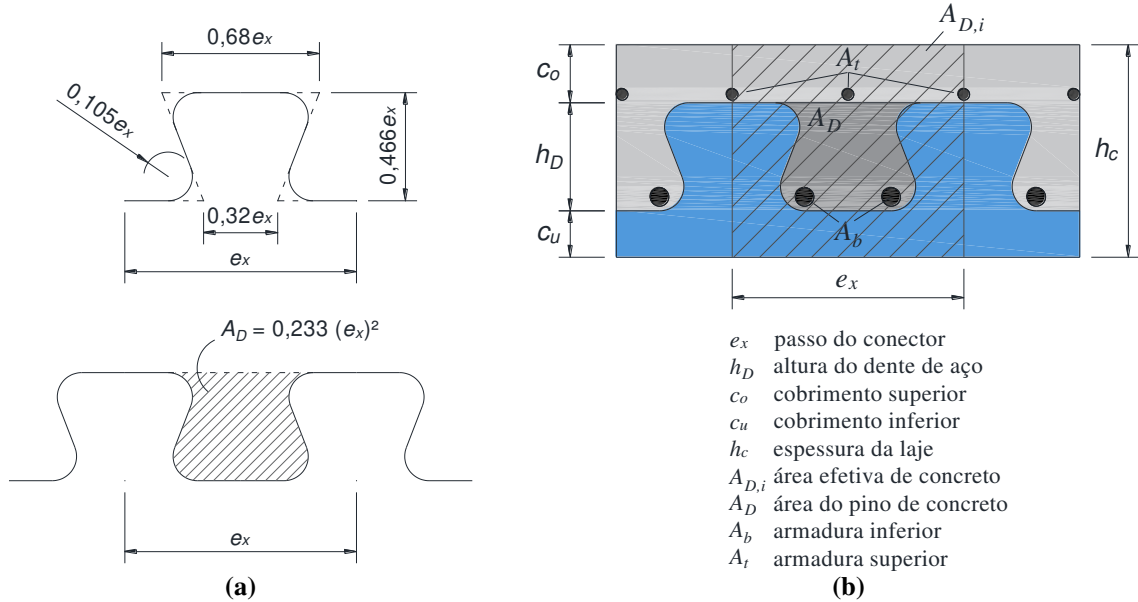
De acordo com a aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [37], o PZ e o MCL podem sofrer três modos de falha sob carregamento estático: cisalhamento dos pinos de concreto (P_{sh}), ruptura do concreto por *pry-out* (P_{po}) e falha do aço do conector por mecanismo combinado de cisalhamento e flexão (P_{pl}). No caso do *Crestbond*, os modelos semiempíricos mais atualizados foram propostos a partir de resultados experimentais e numéricos tomando como ponto de partida as equações apresentadas no documento alemão, devido à semelhança do *Crestbond* com o conector PZ [50-55]. De acordo com a Eq. (3.1), a resistência oferecida pelo *Crestbond* será a menor entre as três possibilidades de falha supracitadas. Os modelos mecânicos estão apresentados na Tabela 3.1 (ver parâmetros geométricos na Fig. 3.4).

$$P_{CR} = \min \{ P_{sh}; P_{po}; P_{pl} \} \quad (3.1)$$

Cardoso *et al.* [52] desenvolveram a Eq. (3.2) de resistência ao cisalhamento do *Crestbond* para ser utilizada em três situações (Tabela 3.1): (i) com alta taxa de armadura passante entre as aberturas do conector, submetendo o concreto a um alto nível de confinamento (Fig. 3.4a); (ii) com baixa taxa de armadura passante no interior da abertura, conferindo um baixo nível de confinamento ao concreto (Fig. 3.4b,c); e (iii) com ausência de armadura passante entre as aberturas do conector, também submetendo o concreto a um baixo nível de confinamento

(Fig. 3.4d). Contudo, esta última situação, sem armaduras passantes, provoca uma drástica redução de resistência e de ductilidade, não sendo recomendada [52].

Fig. 3.4 – (a) Dimensões do Crestbond dadas em função do passo e_x ; (b) parâmetros geométricos dos composite dowels.



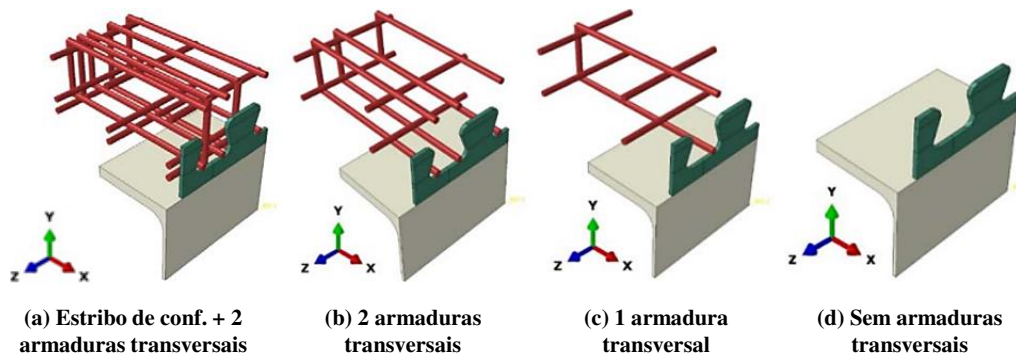
Fonte: (a) adaptado de Almeida *et al.* [55] e (b) o autor.

Tabela 3.1 - Modelos semiempíricos do Crestbond.

Ref.	Modos de falha	Equações	No.
Cardoso <i>et al.</i> [52]	Cisalhamento dos pinos de concreto	$P_{sh} = \eta_f (h_D + c_u) t_w f_c + \eta_D e_x^2 \sqrt{f_c} (1 + \rho_D)$	(3.2)
		$\eta_D = \begin{cases} 2,507 - e_x/400 \rightarrow (i) \\ 1,176 - e_x/400 \rightarrow (ii) \\ 0,873 - e_x/400 \rightarrow (iii) \end{cases}$	(3.3)
			(3.4)
Almeida <i>et al.</i> [55]	Pry-out	$P_{po} = \frac{37}{\eta} \chi_x h_{po}^{1,5} \sqrt{f_c} (1 + \rho_{d,i})$	(3.6)
Almeida <i>et al.</i> [54]	Falha dos pinos de aço	$P_{pl} = 0,233 e_x t_w f_y$	(3.7)

Fonte: o autor.

Fig. 3.5 – Configurações de armaduras utilizadas por Cardoso *et al.* [52]: alto nível de confinamento (a), baixo nível de confinamento (b,c) e ausência de armaduras transversais (d).



Fonte: adaptado de Cardoso *et al.* [52].

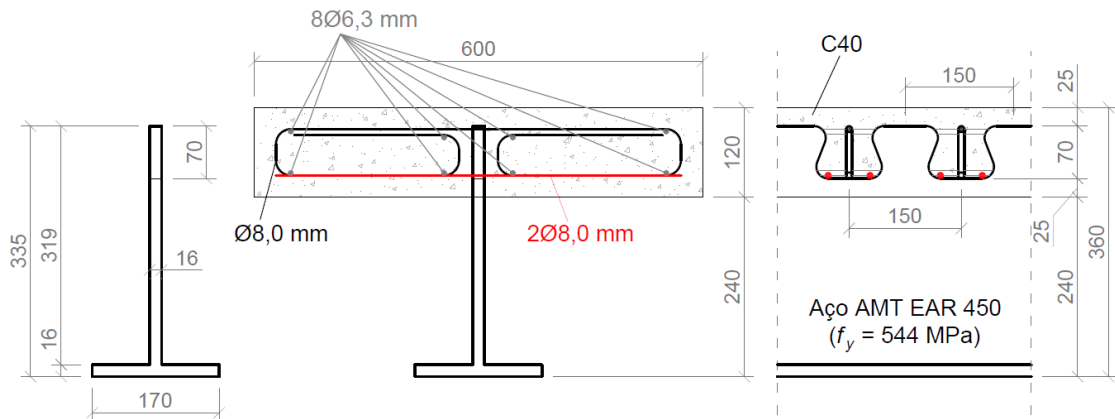
3.3 Modelo numérico

Neste trabalho foram realizadas simulações numéricas de vigas mistas com o auxílio do software ABAQUS/Standart, utilizando análise estática (*Static/General*). A descrição do modelo numérico está apresentada nas próximas seções.

3.3.1 Modelos experimentais Crestbeam

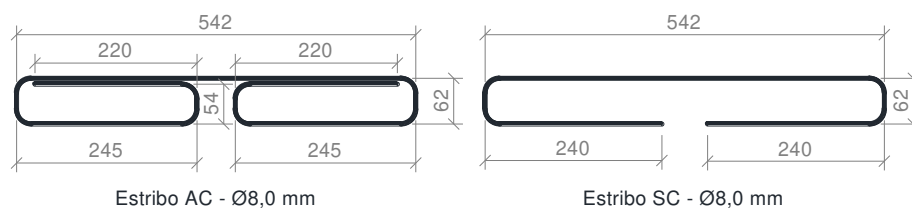
Petrauski [32] realizou ensaios de flexão a quatro pontos de 6 vigas mistas tipo *Crestbeam* no LBE/UFV (Fig. 3.3). Foram ensaiados três pares de vigas com 4, 5 e 6 metros de vão livre, obtendo-se vigas com diferentes graus de conexão parcial. A seção transversal de todas as vigas é a mesma e está apresentada na Fig. 3.6. Os perfis de aço soldados foram fabricados a partir de chapas com 16 mm de espessura e aço AMT EAR 450 ($f_y = 544$ MPa); as lajes foram projetadas com dimensões de 120 mm \times 600 mm e concreto C40 e foram utilizadas barras de armadura de 6,3 mm e 8,0 mm de diâmetro em aço CA-50. Foram utilizadas 2 barras de 8,0 mm como armadura passante em cada abertura do conector e um dos modelos dos pares de 4 e 6 metros de vão foi executado com estribos fechados (armadura de confinamento - AC) enquanto o outro não (sem armadura de confinamento - SC) (Fig. 3.7), com o objetivo de avaliar a influência da armadura de confinamento no desempenho das vigas.

Fig. 3.6 - Seção transversal única projetada para as vigas mistas experimentais (dimensões em mm).



Fonte: adaptado de Petrauski [32].

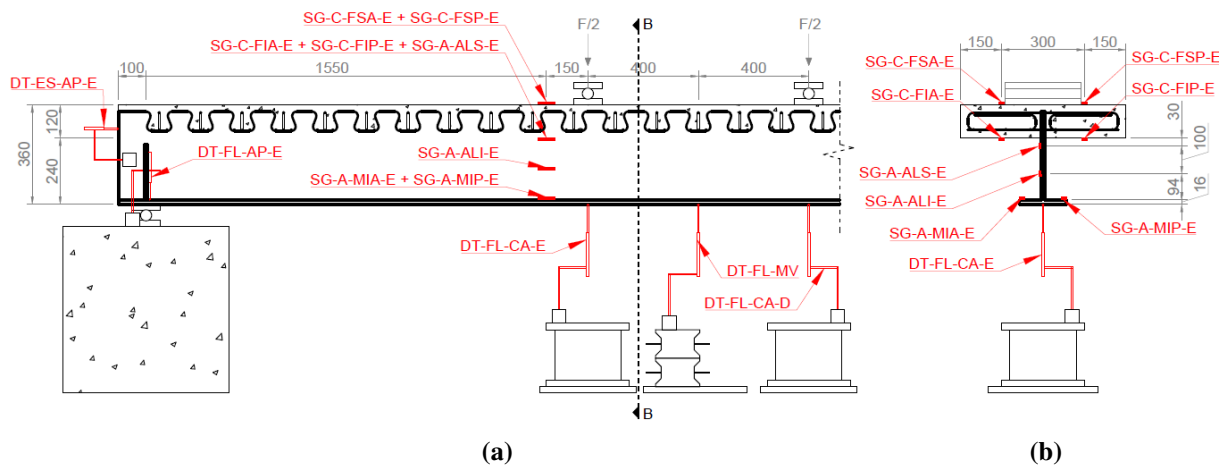
Fig. 3.7 - Detalhe das armaduras transversais de alto confinamento (AC) e baixo confinamento (BC) (dimensões em mm).



Fonte: adaptado de Petrauski [32].

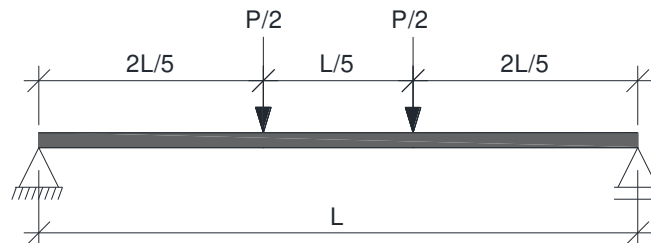
Na Fig. 3.8a é apresentado um esquema da instrumentação aplicada nas vigas *Crestbeam*. O esquema contém os detalhes para a metade esquerda da viga. A mesma instrumentação foi instalada na metade direita. Na Fig. 3.8b é apresentada uma seção transversal localizada próxima a um dos pontos de aplicação de carga (Corte BB), onde foram instalados os extensômetros. Foram aplicadas duas forças concentradas em dois pontos equidistantes em relação ao centro do vão de $L/5$, sendo L o vão entre apoios, conforme Fig. 3.9.

Fig. 3.8 – (a) esquema de instrumentação; (b) corte BB da viga V4-AC (lado esquerdo).



Fonte: adaptado de Petruski [32].

Fig. 3.9 – Esquema estático adotado para os ensaios de flexão.



Fonte: o autor.

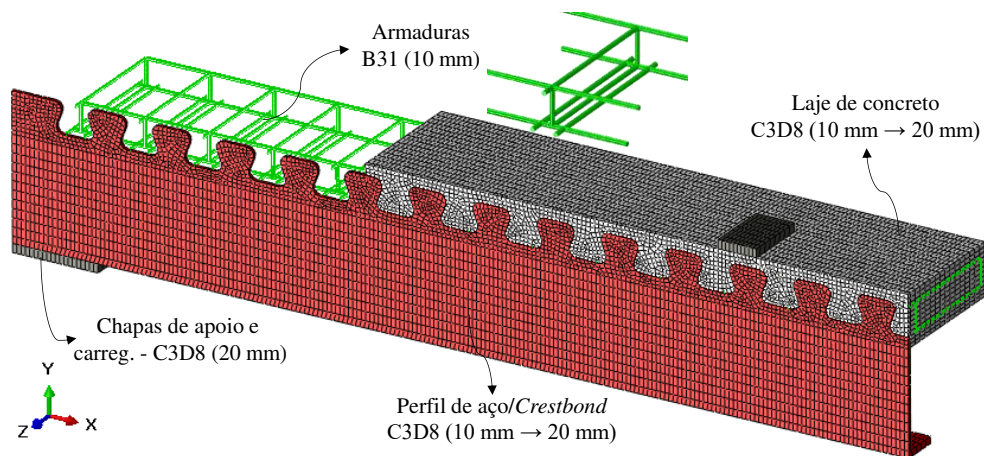
Observando a Fig. 3.8, pode-se notar que cada viga foi instrumentada com 7 transdutores de deslocamento (DT). O transdutor DT-FL-MV foi instalado no meio do vão para registro da flecha no centro do vão. Os transdutores DT-ES-AP-E e DT-ES-AP-D foram instalados horizontalmente, nas duas extremidades das vigas, para registrar os deslizamentos relativos entre o perfil de aço e a laje de concreto (*endslip*). Também foram instalados 16 extensômetros de resistência elétrica (SG) para medir as deformações longitudinais ocorridas em seções transversais distantes de 15 cm dos pontos de aplicação de força, no sentido da extremidade da viga, nos lados esquerdo e direito. Em cada lado, os sensores foram posicionados em várias alturas na laje de concreto e no perfil de aço: um par na face superior da laje (SG-C-FS), um

par na face inferior da laje (SG-C-FI), em duas posições na alma do perfil de aço (SG-A-ALS e SG-A-ALI) e um par na mesa inferior do perfil de aço (SG-A-MI).

3.3.2 Geometria e malha de elementos finitos

Em função da dupla simetria da viga *Crestbeam*, apenas um quarto da viga foi modelado (Fig. 3.10), compreendendo: perfil de aço T invertido com conector *Crestbond* integrado à alma, laje de concreto, armadura da laje, uma chapa de aço para aplicação de força e uma chapa de aço para a região do apoio. A armadura da laje foi modelada como elemento de viga de dois nós, com seis graus de liberdade por nó (elemento B31). Todas as demais partes do modelo numérico foram modeladas com elementos sólidos hexaédricos, com oito nós, três graus de liberdade por nó e funções de interpolação linear (elemento C3D8). O modelo numérico desenvolvido neste trabalho é uma evolução do modelo previamente elaborado por Petrauski [32,56], que, a partir de um estudo de refinamento de malha, definiu as seguintes dimensões para os elementos: 10 mm para as armaduras e para a região do conector na laje de concreto, e 20 mm nas demais partes da viga (Fig. 3.10).

Fig. 3.10 – Geometria, discretização e tipos de elementos finitos utilizados (viga V4-AC).



Fonte: o autor.

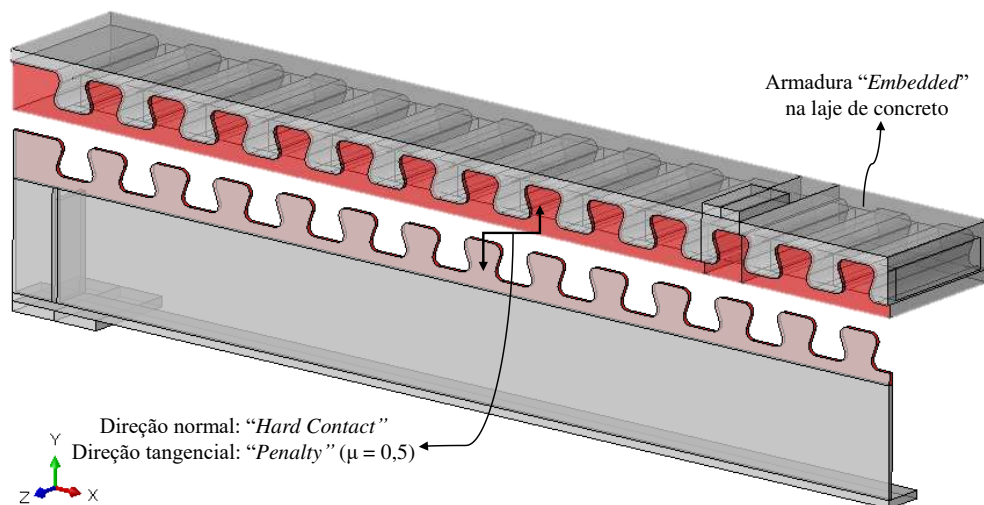
3.3.3 Interações, condições de contorno e carregamento

Na modelagem das vigas mistas *Crestbeam* foram definidos dois tipos de interação entre as diferentes partes que compõe o modelo numérico: a interação entre a laje de concreto e a armadura e a interação entre o perfil de aço/conector e a laje na região da conexão (Fig. 3.11).

A chapa de apoio e o perfil foram modelados como uma peça única, porém com materiais diferentes, bem como a laje e a chapa para aplicação do carregamento. A armadura foi considerada completamente embutida na laje de concreto (*embedded constrain*). Nesse tipo de

interação todas as translações nodais das armaduras são compatibilizadas com as do concreto circunjacente. Para a interação entre o perfil de aço e a laje, definiu-se uma interação de contato entre as superfícies dos elementos. Na direção normal, definiu-se um contato rígido (*hard contact*) e, na direção tangencial, considerou-se uma interação de contato que admite atrito entre os elementos (*penalty*). Para isso, utilizou-se um coeficiente de atrito $\mu = 0,5$. Este valor foi utilizado ou recomendado por outros autores que investigaram numericamente o comportamento de conectores de cisalhamento [23,47,51,57].

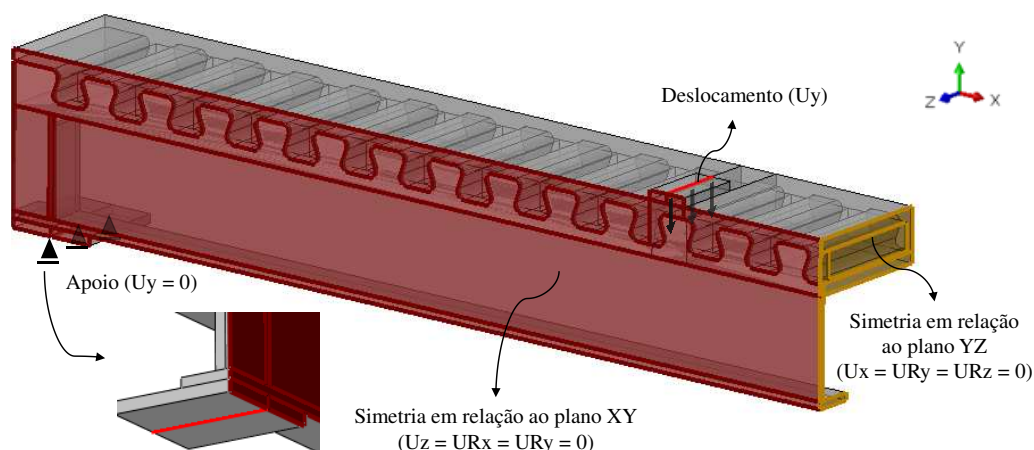
Fig. 3.11 – Interações consideradas no modelo numérico.



Fonte: o autor.

Na Fig. 3.12 são apresentadas as condições de contorno utilizadas no modelo numérico. Essas condições consistem na representação do apoio, do ponto de aplicação de força e no estabelecimento das restrições de simetria nos planos destacados na Fig. 3.12, já que apenas um quarto das vigas foi modelado. Foram utilizadas as condições de simetria em relação ao plano XY e em relação ao plano YZ . Nos experimentos, os apoios e os pontos de aplicação de carga consistiram em chapas de aço suportadas por barras cilíndricas de aço. Portanto, nas chapas de apoio e de carregamento foram impostas condições de contorno em uma linha situada na face inferior ou superior dessas chapas. No apoio, utilizou-se a condição de deslocamento vertical nulo ($U_y = 0$) e, na chapa de carregamento, o carregamento foi imposto através de deslocamentos prescritos na direção vertical (U_y).

Fig. 3.12 – Condições de contorno do modelo numérico.



Fonte: o autor.

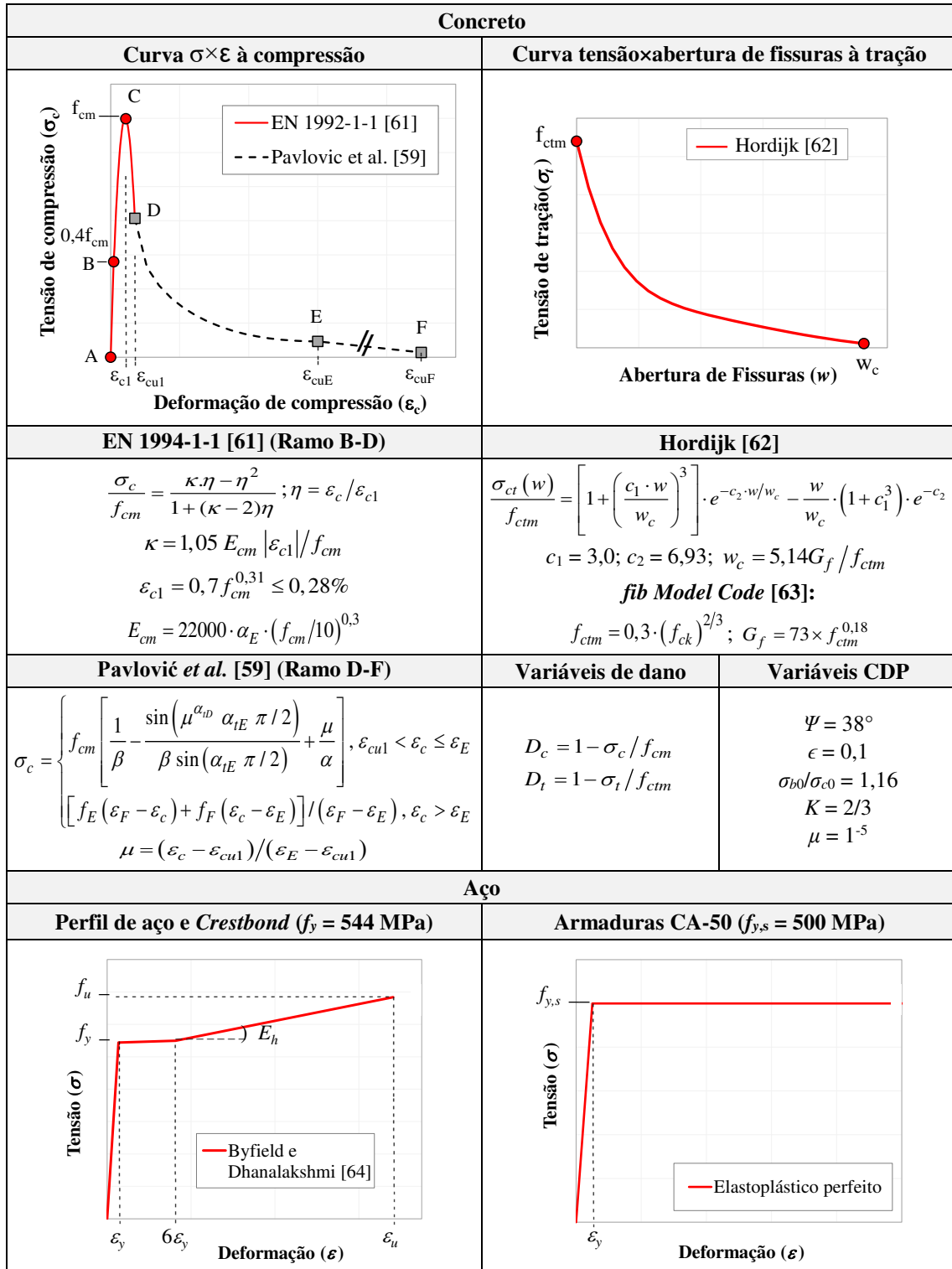
3.3.4 Relações constitutivas dos materiais

O comportamento não-linear do concreto foi simulado através do modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) disponível na biblioteca do ABAQUS. Os parâmetros de entrada desse modelo foram adotados segundo recomendações de trabalhos com conectores de cisalhamento encontrados na literatura [23,32,50-60] e estão apresentados na Fig. 3.13.

O comportamento do concreto à compressão foi simulado a partir do modelo proposto por Pavlović *et al.* [59], que adota uma extensão para a curva apresentada na EN 1992-1-1 [61], que é limitada a uma deformação última $\varepsilon_{cu1} = 3,5\%$. Segundo Pavlović *et al.* [59], surgem grandes deformações no concreto localizado na região da conexão de alguns elementos mistos de aço e concreto em função do confinamento. Nesses casos, considerar que os níveis de tensão não se reduzem após a deformação máxima do concreto (ε_{cu1}) acarretaria em tensões irreais no concreto, superestimando a resistência do conector em estudo.

O comportamento à tração do concreto foi representado pela curva exponencial de tensão×abertura de fissuras proposta por Hordijk [62]. A abertura de fissuras (w_c) foi calculada utilizando-se a energia de fratura (G_F) que, por sua vez, foi determinada de acordo com o *fib Model Code* [63]. Na Fig. 3.13 estão apresentadas as curvas tensão×deformação genéricas do comportamento do concreto comprimido e tracionado, os parâmetros e equações utilizados e as variáveis de dano que foram implementadas no modelo numérico. Foram utilizados os valores médios de resistência à compressão do concreto (f_{cm}) obtidos através do controle tecnológico realizado por Petruski [32] (Tabela 3.2) e o módulo de elasticidade do concreto foi calculado a partir da equação apresentada na EN 1992-1-1 [61].

Fig. 3.13 – Relações constitutivas para o concreto (comprimido e tracionado), para o aço estrutural e para o aço das armaduras.



Fonte: o autor.

As propriedades dos componentes de aço das vigas *Crestbeam* também estão apresentadas na Fig. 3.13. Para o aço do perfil e do conector *Crestbond* foi adotado um modelo de tensão×deformação com representação do patamar de escoamento e do encruamento. Para o

regime elástico, adotou-se módulo de elasticidade $E_a = 200000$ MPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. Em regime plástico, definiu-se o final do patamar de escoamento até uma deformação correspondente a $6\varepsilon_y$ e adotou-se o módulo de encruamento (E_h) igual a 2700 MPa - valor sugerido por Byfield e Dhanalakshmi [64]. O aço das armaduras foi representado com comportamento elastoplástico perfeito. Adotou-se os valores nominais de resistência ao escoamento e módulo de elasticidade do aço CA-50 iguais a $f_{y,s} = 500$ MPa e $E_s = 210000$ MPa, respectivamente, além do coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. Finalmente, para as chapas de apoio e de carregamento considerou-se um material elástico-linear, com módulo de elasticidade $E_a = 200000$ MPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$.

3.4 Validação do modelo numérico

Nesta seção estão apresentados os resultados da validação do modelo numérico. Apresenta-se na Tabela 3.2 um comparativo dos valores da rigidez inicial, da força máxima e do deslocamento vertical no centro do vão obtidos dos modelos experimentais e numéricos. Na sequência são apresentadas as curvas força×deslocamento no meio do vão (Fig. 3.14), força×deslizamento relativo entre o aço e o concreto (*endslip*) (Fig. 3.15) e força×deformações longitudinais (Fig. 3.16). Finalmente, são ilustrados alguns resultados da análise numérica, como fissuras e modo de ruptura, que corroboram fenômenos observados experimentalmente.

Tabela 3.2- Comparativo dos resultados numéricos e experimentais das vigas mistas *Crestbeam*.

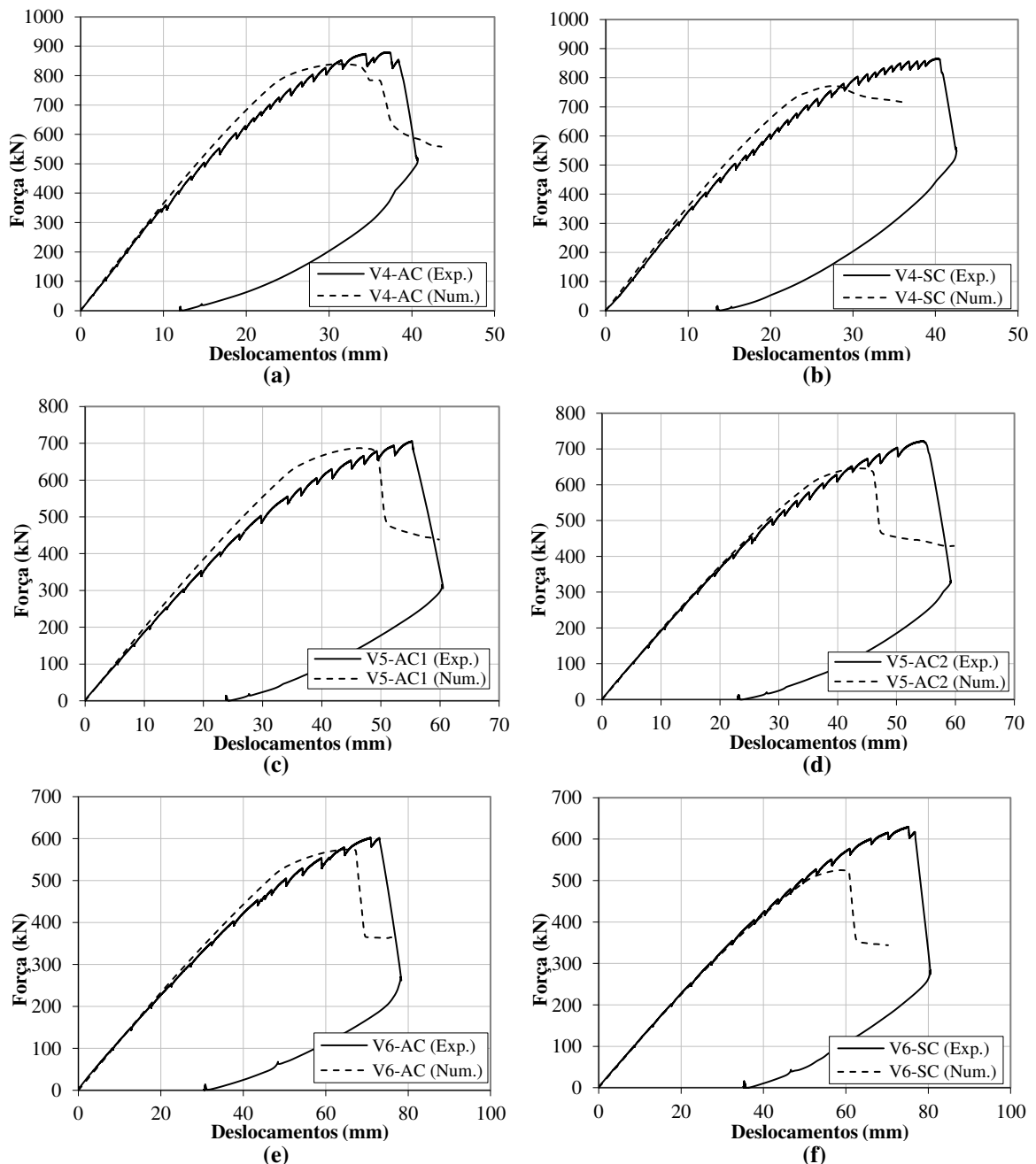
Modelo	f_{cm} (MPa)	Rigidez elástica (kN/mm)			Força máxima (kN)			Flecha máxima (mm)		
		Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp
V4-AC	44,0	36,5	37,3	1,02	879,8	839,4	0,95	37,0	31,8	0,86
V4-SC	39,7	31,0	37,0	1,19	866,2	771,7	0,89	40,3	27,8	0,69
V5-AC1	43,7	19,8	19,9	1,01	706,3	686,9	0,97	55,2	46,5	0,84
V5-AC2	36,7	20,0	19,6	0,98	722,9	645,5	0,89	54,5	43,9	0,80
V6-AC	43,2	12,9	11,9	0,92	602,3	574,2	0,95	70,9	64,9	0,92
V6-SC	34,2	12,7	11,7	0,92	630,1	525,4	0,83	75,2	58,7	0,78
Médias				1,01			0,92			0,82
CV				10,0%			5,8%			9,5%

Fonte: o autor.

Analisando a Tabela 3.2, observa-se que os modelos numéricos apresentam uma boa correlação com os resultados experimentais. No entanto, há uma tendência de subestimar a resistência e a ductilidade (evidenciada pela ocorrência de menores deslocamentos verticais antes da ruptura) das vigas *Crestbeam*. O erro percentual médio foi de 1% para a rigidez inicial, 8% para a força máxima e 18% para a flecha máxima no centro do vão. O coeficiente de variação (CV) mais elevado registrado foi de 10% para a rigidez inicial.

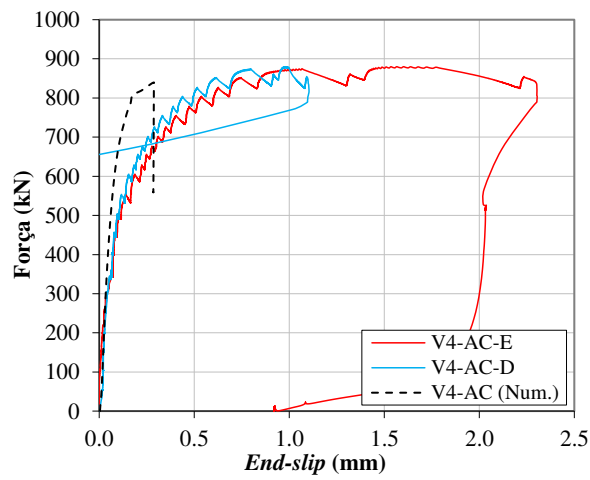
Observa-se, ainda, que os piores resultados numéricos referem-se aos modelos confeccionados na segunda concretagem (V4-SC, V5-AC2 e V6-SC), prejudicando os valores estatísticos obtidos. Conforme as observações de Petrauski [32], os resultados experimentais das vigas da segunda concretagem também apresentaram maiores discrepâncias em relação às estimativas teóricas. Essas diferenças podem estar relacionadas a imperfeições geométricas, como variações na espessura das lajes, às tensões residuais no perfil de aço e à maior heterogeneidade do concreto dessas vigas em relação às da primeira concretagem.

Fig. 3.14 - Curvas força×deslocamento no centro do vão (mm) nas vigas (a) V4-AC, (b) V4-SC, (c) V5-AC1, (d) V5-AC2, (e) V6-AC e (f) V6-SC.

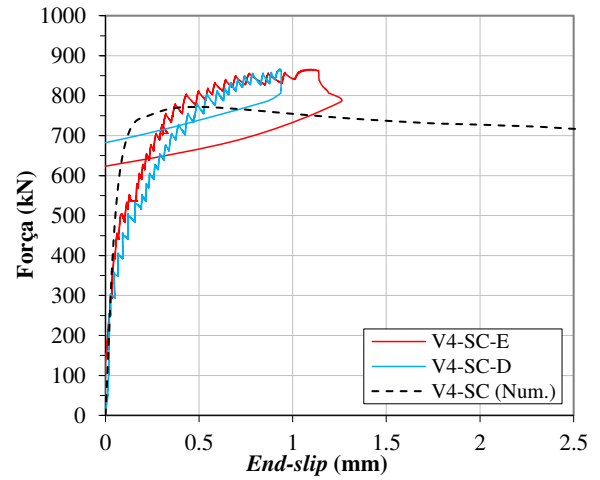


Fonte: o autor.

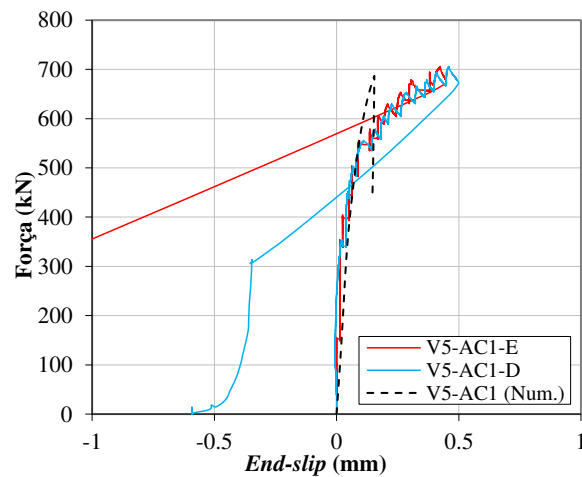
Fig. 3.15 - Curvas força×deslizamento relativo (*end-slip*) entre aço e concreto nas vigas (a) V4-AC, (b) V4-SC, (c) V5-AC1, (d) V5-AC2, (e) V6-AC e (f) V6-SC.



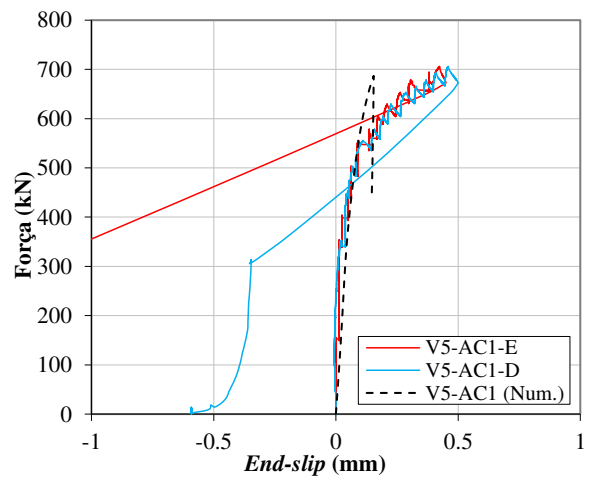
(a)



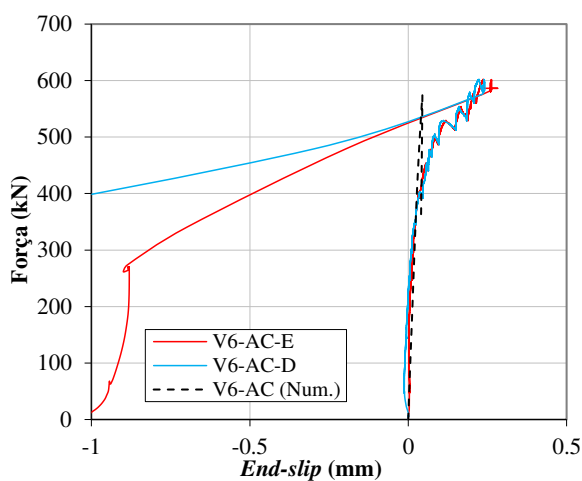
(b)



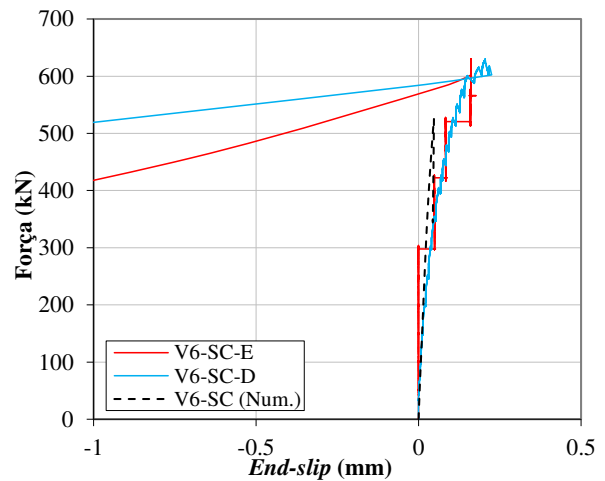
(c)



(d)



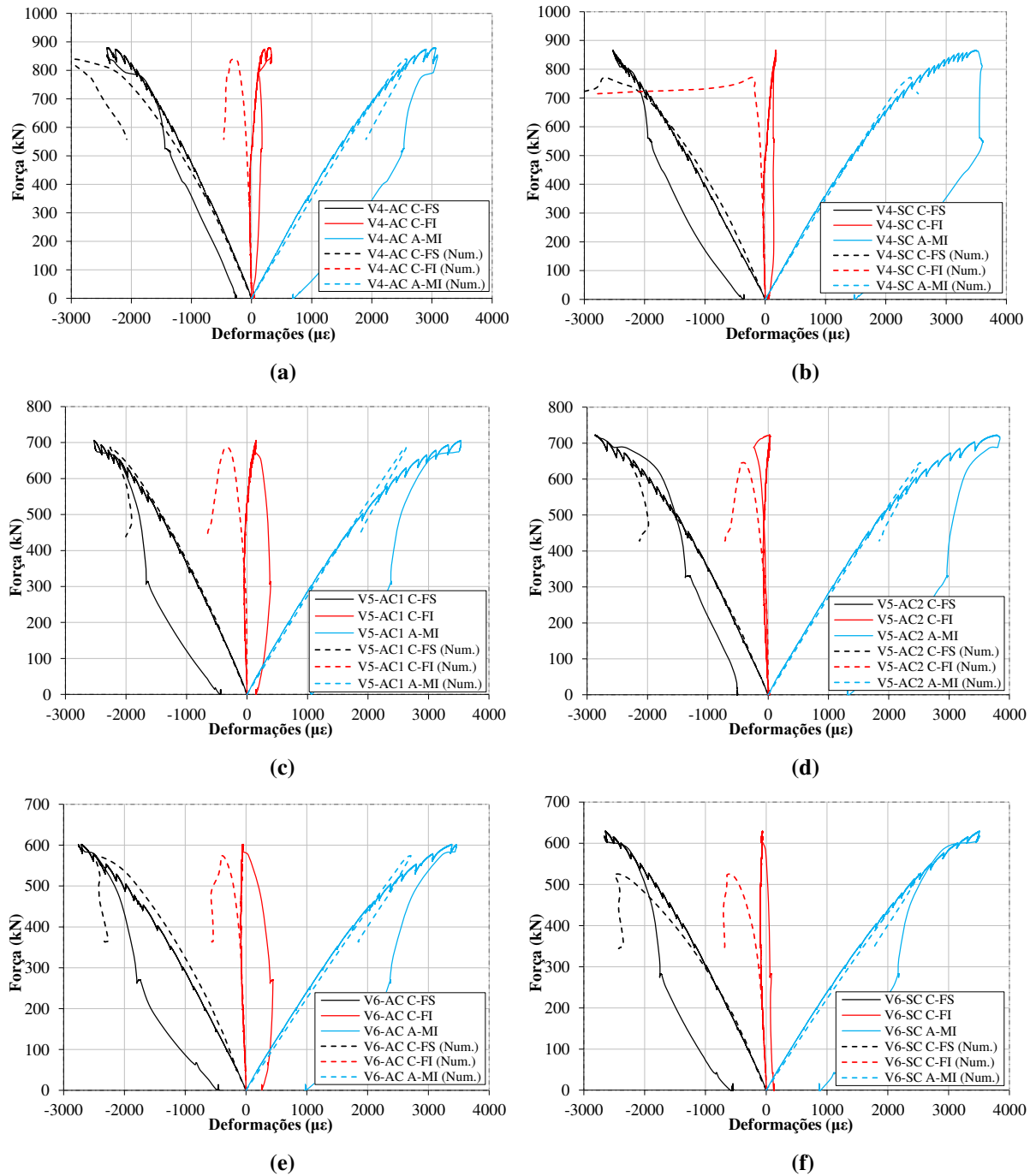
(e)



(f)

Fonte: o autor.

Fig. 3.16 - Curvas força×deformações longitudinais ($\mu\epsilon$) nas vigas (a) V4-AC, (b) V4-SC, (c) V5-AC1, (d) V5-AC2, (e) V6-AC e (f) V6-SC.



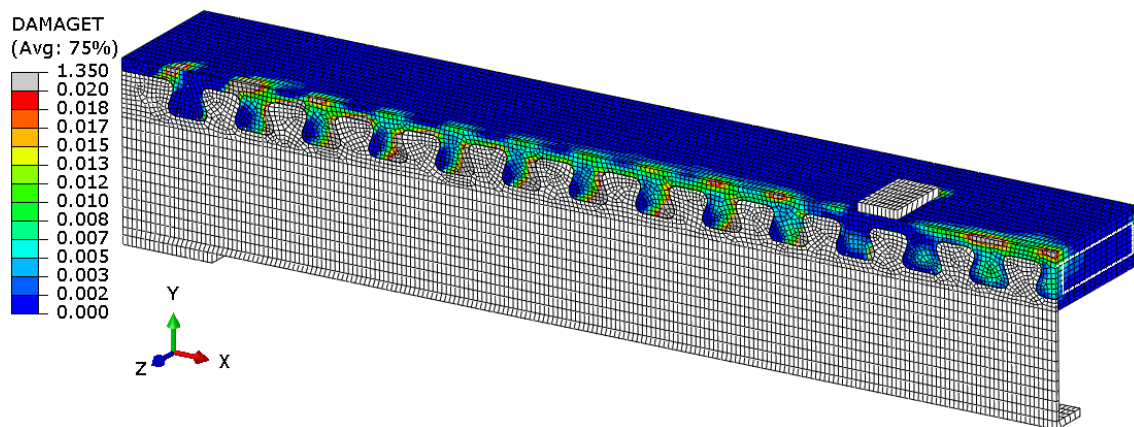
Fonte: o autor.

A partir da análise das curvas apresentadas na Fig. 3.14, Fig. 3.15 e Fig. 3.16, observa-se novamente uma boa correlação entre os resultados experimentais e numéricos, sobretudo na região elástica-linear. A principal diferença a se destacar é que nos modelos numéricos a face inferior da laje de concreto se mantém com deformações negativas para todas as vigas analisadas, contrariando os resultados experimentais obtidos para as vigas com 4 e 5 metros de vão, que apresentaram alongamentos para a força máxima (Fig. 3.16a,b,c,d).

Conforme descrito por Petruski [32], nos ensaios experimentais o comportamento resistente das seis vigas *Crestbeam* foi muito similar: ocorreu o aparecimento de uma fissura longitudinal na face superior da laje de concreto para carregamentos de aproximadamente 65% da força máxima, alinhada com a alma do perfil de aço, seguido da ruptura abrupta de uma cunha de concreto próxima a uma das chapas de carregamento ou no meio do vão. Apesar da falha frágil, destaca-se que todas as vigas apresentaram deslocamentos verticais excessivos para seus vãos (L) antes da falha. As flechas foram da ordem de: $L/100$, para as vigas com 4 metros de vão; $L/90$, para as vigas com 5 metros; e $L/80$, para as vigas com 6 metros. Essas flechas são superiores aos limites de serviço normalmente preconizados pelas normas para vigas mistas de aço e concreto.

Na Fig. 3.17 é apresentada a formação da fissura longitudinal, alinhada com o conector, na face superior da laje de concreto do modelo numérico da viga V4-AC, para um carregamento de cerca de 66% da força máxima. Utilizou-se a variável de dano à tração do concreto (DAMAGET) do ABAQUS para evidenciar a formação dessa fissura longitudinal.

Fig. 3.17 – Formação da fissura longitudinal na viga V4-AC evidenciada pela variável de dano à tração no concreto (DAMAGET). Carga atuante: 553,51 kN (corresponde a 66% da força máxima).



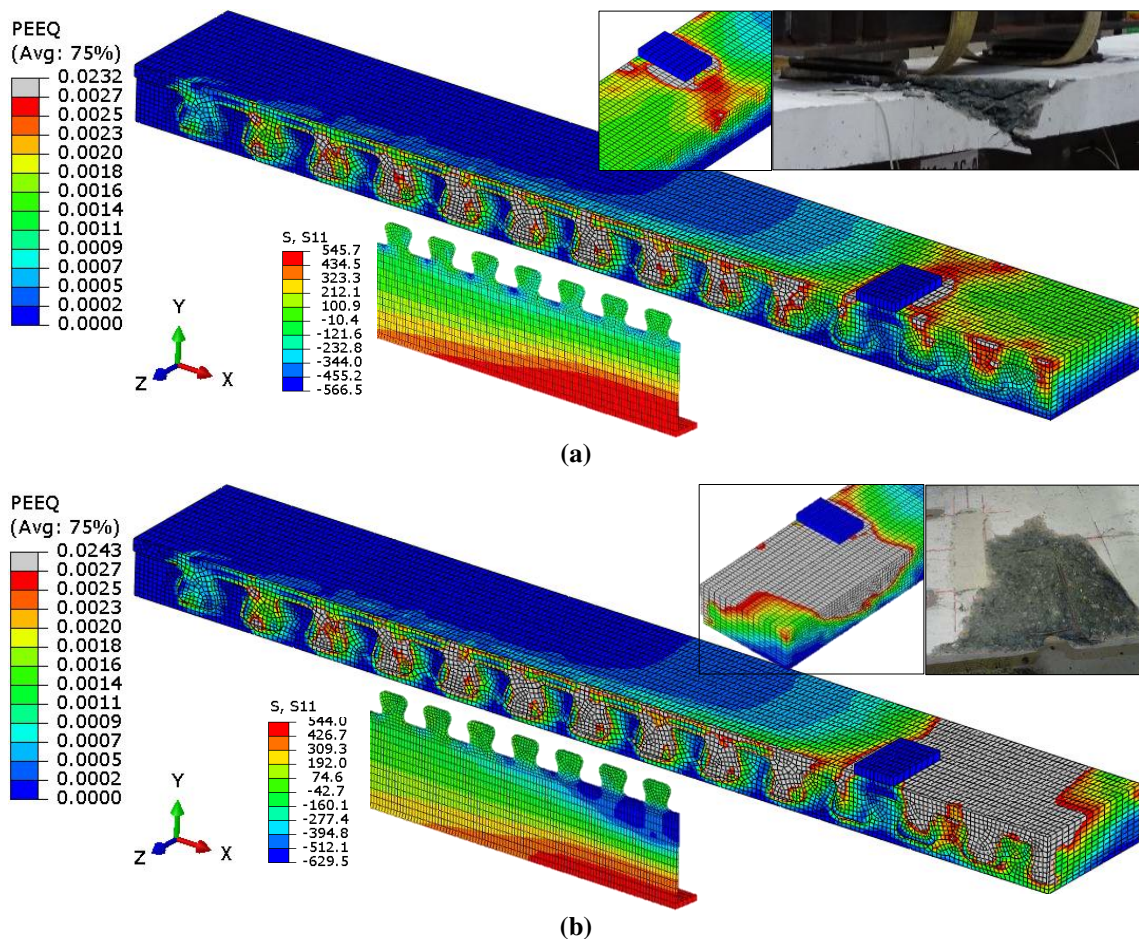
Fonte: o autor.

Na Fig. 3.18 são exibidas imagens do modelo numérico da viga V4-AC no momento de aplicação da força máxima e em um incremento na região de pós-pico, correspondente a uma força de aproximadamente 90% da carga máxima. A variável de deformações plásticas equivalentes (PEEQ) do ABAQUS foi empregada para representar a deformação inelástica do concreto. Se PEEQ é superior a zero, isso denota que o material está em regime plástico. Geralmente, essa variável é utilizada para indicar a ocorrência ou não de falha por compressão no concreto [65]. Ressalta-se que as escalas de PEEQ da Fig. 3.18 foram fixadas no valor de deformação plástica correspondente à deformação total de 3,5‰ (ponto “D” da curva de relação

constitutiva do concreto à compressão – Fig. 3.13). No caso específico da viga V4-AC, a deformação plástica equivalente no ponto “D” é de 2,7%. Esse mesmo procedimento foi adotado em todas as análises deste trabalho que incorporam a variável PEEQ.

As regiões em cinza na Fig. 3.18 são aquelas que alcançaram, no mínimo, uma deformação plástica de 2,7%. Nota-se, portanto, que a ruptura da viga V4-AC ocorreu próxima ao ponto de aplicação de carregamento no sentido do meio do vão. Esse fenômeno também foi observado no modelo experimental, em que ocorreu a expulsão de uma cunha de concreto devido ao fenômeno de *pry-out* próxima à chapa de carregamento [32]. Observa-se na Fig. 3.18b que as deformações plásticas da laje de concreto alcançaram o valor de 2,7% em uma área significativa na região de pós-pico, caracterizando a falha de uma cunha de concreto.

Fig. 3.18 – Viga V4-AC: deformação plástica equivalente (PEEQ) da laje de concreto e tensão normal na direção longitudinal (“S11”) do perfil de aço no momento de ruptura (a) e na região de pós-pico para um carregamento correspondente a 90% do valor máximo (b).



Fonte: o autor.

Adicionalmente, observa-se que os pinos de concreto na conexão apresentam danos significativos durante o colapso da viga V4-AC (Fig. 3.18a), especialmente aqueles localizados

entre a chapa de carregamento e as extremidades da viga, região onde o fluxo de cisalhamento é maior. Este fenômeno é esperado, haja vista que as vigas com 4 metros de vão possuem menores graus de conexão. Ressalta-se que Petrauski [32] não cortou as vigas ensaiadas, impossibilitando a observação de eventuais danos nessas regiões entre as chapas de carregamento e as extremidades das vigas.

Na Fig. 3.18 também foi destacada a tensão normal longitudinal (“S11”) atuante no perfil de aço e nos conectores da viga V4-AC. É interessante notar que, após a ruptura da laje de concreto, o perfil T invertido de aço passa a resistir sozinho na zona onde a laje rompeu (região central da viga, entre as chapas de carregamento), indicando a dissolução do comportamento misto entre os elementos. Observa-se, na Fig. 3.18(b), que ocorreu a plastificação da porção superior do perfil T devido a tensões de compressão, e que a linha neutra plástica da seção se deslocou para baixo, no sentido da mesa do perfil de aço, de forma a garantir o reequilíbrio da seção de aço.

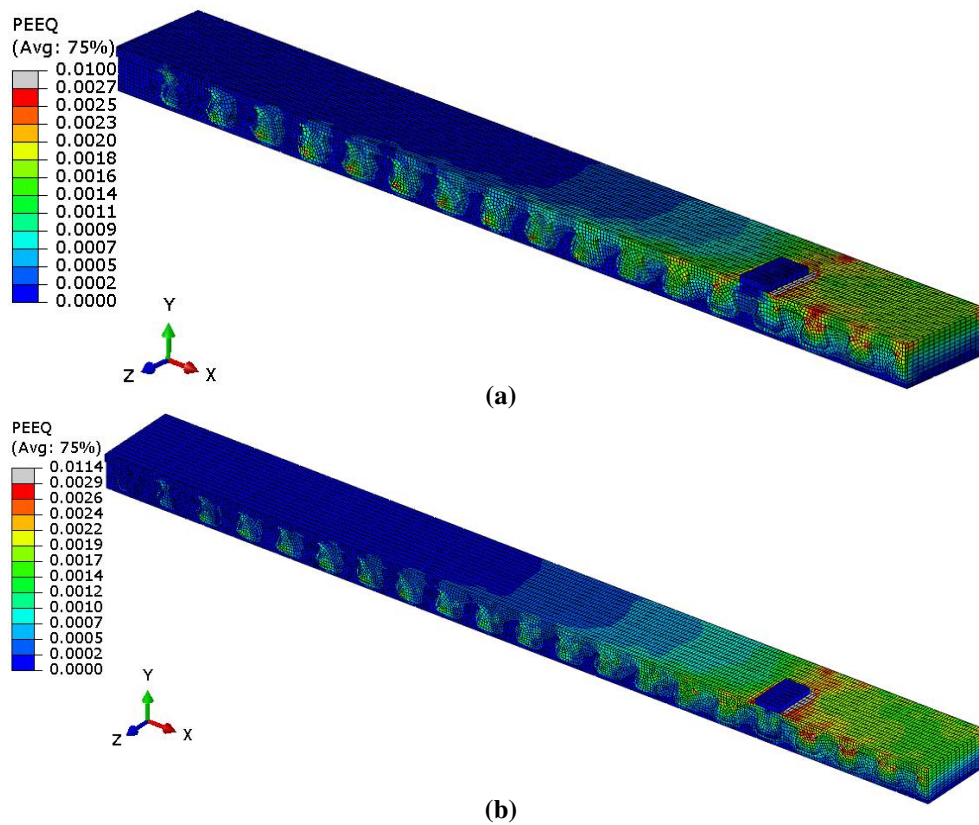
O comportamento das demais vigas simuladas numericamente foi muito similar ao apresentado para a viga V4-AC. Em todos os modelos numéricos observou-se o desenvolvimento de uma fissura longitudinal (Fig. 3.17) de modo similar aos ensaios experimentais. Além disso, também observou-se o início da ruptura na face superior da laje de concreto nas regiões próximas à chapa de carregamento no incremento correspondente à força máxima (Fig. 3.18a) e o desenvolvimento dessas deformações plásticas no concreto para grandes porções da laje no pós-pico (Fig. 3.18b). Nota-se, portanto, que houve algumas diferenças entre o comportamento numérico e experimental. Segundo Petrauski [32], a viga V4-SC ensaiada experimentalmente teve a cunha de ruptura formada próximo ao ponto de aplicação de carga, porém no sentido da extremidade da viga, enquanto a viga V5-AC1, por sua vez, apresentou ruptura de uma cunha de concreto no centro do vão.

A principal diferença entre os modelos numéricos com 4 metros de vão em relação aos modelos com 5 e 6 metros é que os pinos de concreto foram menos danificados nestes últimos, isto é, apresentaram menores deformações plásticas equivalentes, conforme pode ser visualizado na Fig. 3.19. Esse resultado era esperado, já que os graus de conexão dessas vigas são mais elevados, resultando em menor deslizamento relativo entre o perfil de aço/conector e a laje de concreto e, conseqüentemente, menor degradação dos pinos de concreto.

Ressalta-se que praticamente não foram feitos ajustes específicos nos modelos numéricos. Com exceção das resistências do concreto (Tabela 3.2), foram utilizadas as dimensões nominais de

projeto para a geometria das vigas e as resistências nominais para os aços das armaduras e do perfil/*Crestbond*, sem adoção de imperfeições iniciais geométricas e de material. Essas considerações, além da heterogeneidade do concreto, podem explicar as discrepâncias observadas entre os modelos numéricos e experimentais. No entanto, a partir dos resultados apresentados anteriormente, considera-se a metodologia de modelagem numérica adequada para representar o comportamento estrutural de vigas mistas tipo *Crestbeam*.

Fig. 3.19 - Deformação plástica equivalente (PEEQ) no momento de ruptura das vigas V5-AC1 (a) e V6-SC (b).



Fonte: o autor.

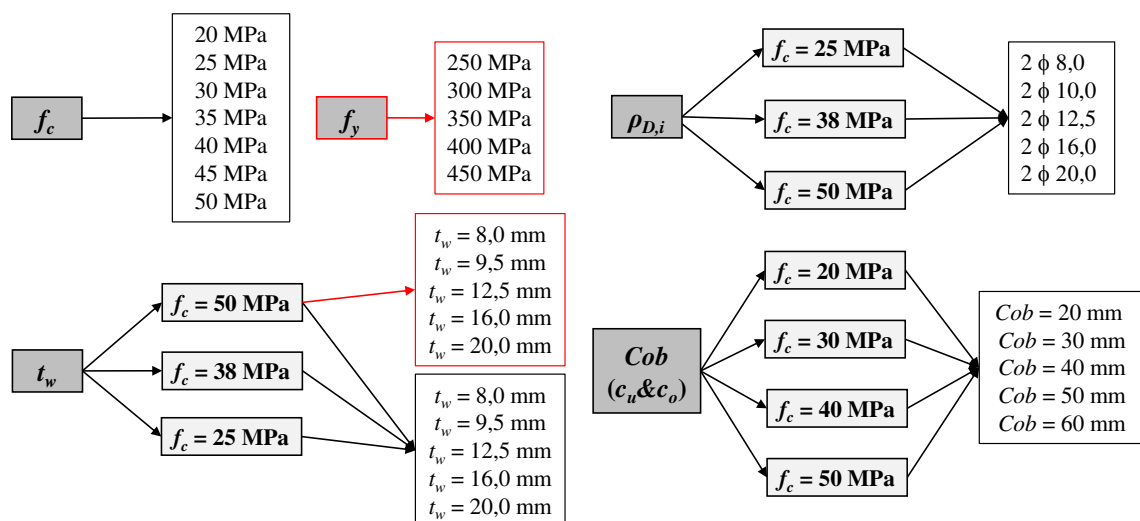
3.5 Estudo de variação de parâmetros

Nesta seção, apresentam-se os resultados de um estudo de variação de parâmetros para vigas mistas de aço e concreto tipo *Crestbeam*. Esse estudo foi realizado com o objetivo de avaliar a influência da variação de algumas características do conector *Crestbond* sobre o comportamento estrutural das vigas em situação de conexão parcial. Além disso, também foi possível comparar os resultados obtidos numericamente com os modelos de predição da capacidade resistente do conector e da viga presentes na literatura.

3.5.1 Considerações iniciais

O estudo de variação de parâmetros foi desenvolvido utilizando o modelo numérico apresentado no Item 3.3. Optou-se pela variação dos parâmetros geométricos e de materiais que compõe as equações de estimativa da capacidade resistente do *Crestbond* (Tabela 3.1) e, portanto, deveriam exercer maior influência na resistência da conexão das vigas mistas tipo *Crestbeam* em situação de conexão parcial. Os parâmetros estudados foram: a resistência à compressão do concreto (f_c); a resistência ao escoamento do aço (f_y); a taxa de armadura efetiva ($\rho_{D,i}$) ou o diâmetro das armaduras passantes através das aberturas dos conectores; a espessura do *Crestbond* (t_w); e o cobrimento do conector (c_u/c_o). Estes três últimos parâmetros foram estudados em conjunto com a variação da resistência à compressão do concreto. A Fig. 3.20 contém um esquema do estudo de variação de parâmetros realizado. Nos itens em vermelho a alteração do parâmetro principal resultou em falha do aço do *Crestbond*, enquanto nos demais itens a capacidade resistente da conexão foi governada pela ruptura do concreto por *pry-out*.

Fig. 3.20 – Estudo de variação de parâmetros das vigas *Crestbeam* (em vermelho: falha nos pinos de aço do conector *Crestbond*).



Fonte: o autor.

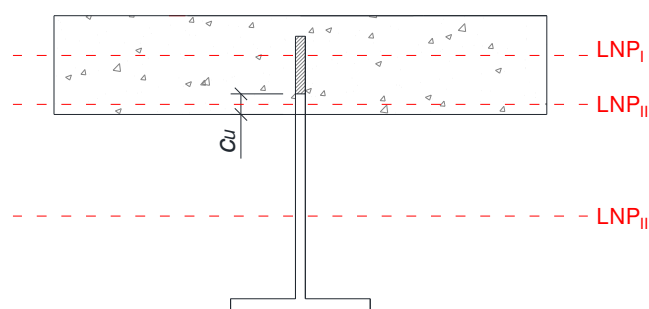
É importante destacar que a alteração das propriedades geométricas ou de materiais da conexão resulta na alteração das propriedades mecânicas da viga mista *Crestbeam*, uma vez que o conector está incorporado à alma do perfil de aço. Diferentemente de Petruski [56], que conduziu um estudo de variação de parâmetros de vigas mistas com o *Crestbond* soldado sobre a mesa superior de perfis I, não é possível alterar a espessura ou a resistência ao escoamento do conector, por exemplo, sem afetar essas propriedades no perfil de aço. Portanto, as modificações realizadas na conexão têm impacto na resistência da própria conexão e da viga

mista. Embora essas duas resistências estejam interligadas, a relação entre elas não é linear e não pode ser facilmente determinada pela inversão das funções que as relacionam [56].

Observa-se, na Fig. 3.20, que a espessura do conector foi o único parâmetro variado considerando a falha tanto no pino de aço quanto no pino de concreto da conexão. Conforme as equações de resistência do *Crestbond*, o parâmetro t_w influencia exclusivamente a resistência dos pinos de aço. No entanto, esse parâmetro estava associado à resistência do concreto nos primeiros modelos de cálculo do conector desenvolvidos por Veríssimo [9], Silva [66] e Dutra [67] e, por conseguinte, optou-se por variá-lo em situações nas quais o concreto governa a resistência da conexão, variando conjuntamente a resistência à compressão do concreto.

Os modelos do estudo de variação de parâmetros também foram calculados com o auxílio de uma planilha eletrônica desenvolvida para calcular o momento de plastificação da seção (e o carregamento correspondente) através do procedimento de dimensionamento plástico de vigas mistas prescrito pela ABNT NBR 8800 [1]. Foram realizadas alterações para adequar a formulação da norma à *Crestbeam*, pois, neste caso, existe uma situação intermediária de posicionamento da linha neutra plástica (LNP_{III}), que consiste na LNP ao longo da altura correspondente ao cobrimento inferior do conector (c_u), passando tanto pelo concreto quanto pelo aço (Fig. 3.21). No caso de conexão parcial, calculam-se duas LNP: uma na seção de concreto (LNP_I ou LNP_{III}) e outra na seção de aço (LNP_{II} ou LNP_{III}). A planilha utilizada é uma versão atualizada daquelas apresentadas por Petrauski [56] e Parassen [69].

Fig. 3.21 – Possíveis posições da LNP na viga mista tipo *Crestbeam*.

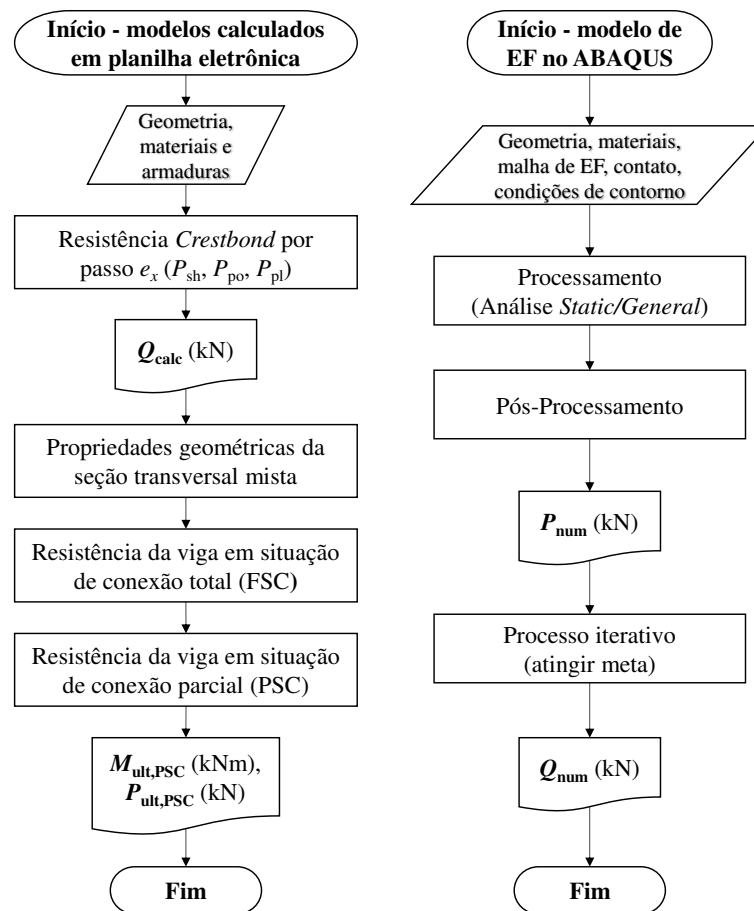


Fonte: Parassen [69].

Nesta pesquisa, foram investigadas vigas com um vão livre de 4 metros em condição de conexão parcial, submetidas a ensaios de flexão a 4 pontos, conforme esquema estático apresentado na Fig. 3.9. Com exceção do parâmetro em estudo, procurou-se preservar as mesmas características do modelo experimental V4-AC (Fig. 3.6), como a armadura de alto confinamento (Fig. 3.7). Por conseguinte, a capacidade resistente dos modelos foi limitada pela ruptura do concreto por *pry-out* ou pela falha do pino de aço, já que o cisalhamento dos pinos

de concreto é improvável em vigas com alto confinamento do concreto. No APÊNDICE A é exposto um estudo analítico que evidencia que este modo de falha não governa a resistência em conexões com o *Crestbond*, desde que as diretrizes da Z-26.4-56 [37] sejam verificadas. Ressalta-se que ao se estudar as variações de f_y e t_w foram necessárias outras modificações geométricas em relação ao modelo V4-AC, de referência, para garantir a ocorrência da falha dos pinos de aço e da conexão parcial, tais como (APÊNDICE B): cobrimentos (50 mm) e passo do *Crestbond* (200 mm), altura do perfil de aço (450 mm) etc.

Fig. 3.22 – Macro-fluxograma utilizado no estudo de variação de parâmetros das vigas *Crestbeam*.



Fonte: o autor.

Na Fig. 3.22 é apresentado um macro-fluxograma do procedimento seguido no estudo de variação de parâmetros. Primeiramente, todos os modelos de vigas *Crestbeam* foram calculados por meio da planilha eletrônica. As propriedades geométricas e de materiais foram definidas de forma a garantir a situação de conexão parcial e a falha, ora do pino de aço, ora do pino de concreto, de acordo com o parâmetro estudado. Foram calculados o momento de plastificação em situação de conexão parcial ($M_{PL,PSC}$) e o carregamento correspondente ($P_{ult,PSC}$). As definições preliminares das vigas *Crestbeam* e os cálculos realizados com o auxílio da planilha

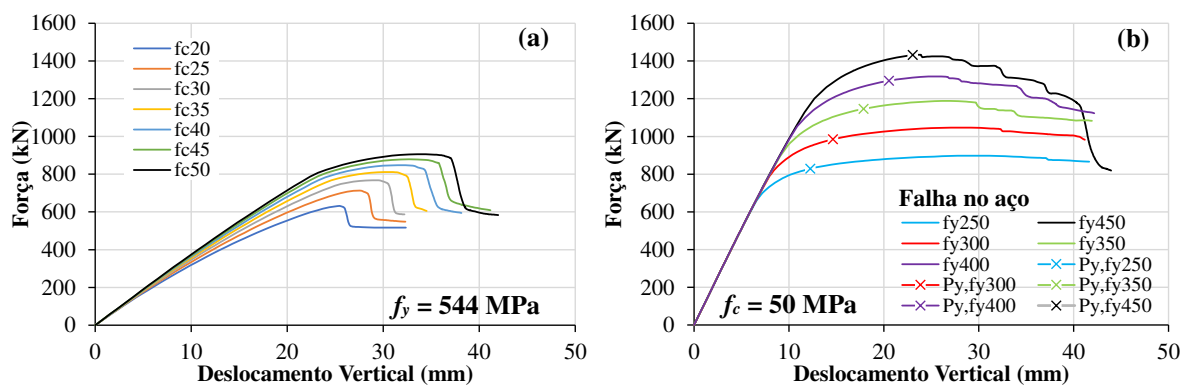
eletrônica encontram-se apresentados no APÊNDICE B. Na sequência, os modelos foram simulados numericamente com auxílio do software ABAQUS, obtendo-se a resistência máxima das vigas (P_{num}). Implementou-se uma rotina iterativa na planilha eletrônica apresentada no APÊNDICE B para obtenção da resistência da conexão (Q_{num}) a partir da força máxima numérica (P_{num}). Estes cálculos estão apresentados no APÊNDICE C. Finalmente, avaliou-se a influência de cada parâmetro variado na resistência da conexão e da *Crestbeam*, e compararam-se os resultados numéricos obtidos com os de modelos semiempíricos que consideram a resistência do *Crestbond*. Esses resultados estão apresentados ao longo desta seção.

3.5.2 Resultados numéricos

Nesta seção são apresentados os resultados dos modelos numéricos (força×deslocamento vertical) dos estudos de variação de parâmetros, distribuídos em quatro grupos: na Fig. 3.23, encontram-se os resultados dos estudos de variação da resistência à compressão do concreto e da resistência ao escoamento do aço; na Fig. 3.24, os resultados da variação da taxa de armadura efetiva (ou diâmetro do par de armaduras); na Fig. 3.25, os resultados da variação da espessura do conector; e na Fig. 3.26, os resultados da variação do cobrimento do conector.

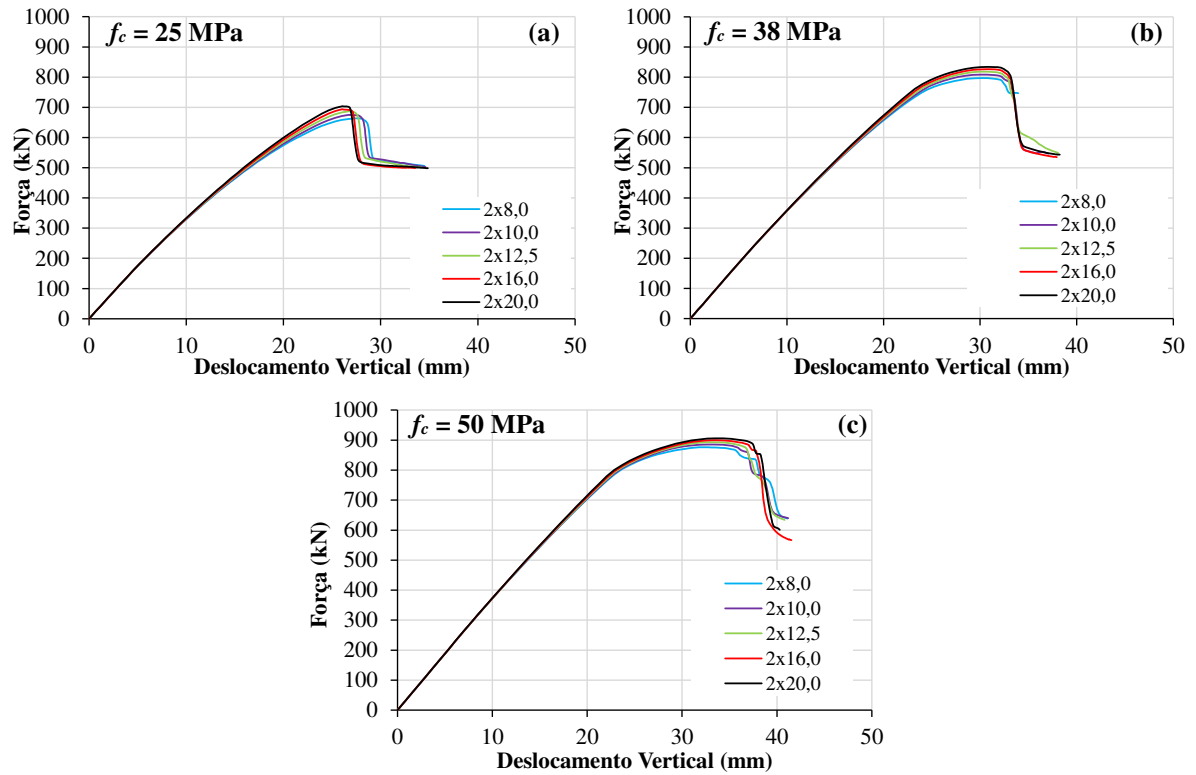
Inicialmente, enfatiza-se que a relação entre a resistência da conexão e a resistência da viga mista *Crestbeam* não é linear e, também, não é obtida facilmente pela inversão das funções que as relacionam [56]. Portanto, as curvas força×deslocamento vertical apresentadas não são indicadas para analisar se o parâmetro variado tem maior ou menor influência na resistência da conexão e da viga. Para contornar este problema, na próxima seção os resultados são apresentados em função da variação do parâmetro em estudo, possibilitando a avaliação da sua influência na resistência da conexão (Q) e da viga (P).

Fig. 3.23 - Curvas força×deslocamento vertical: (a) variação de f_c ; (b) variação de f_y .



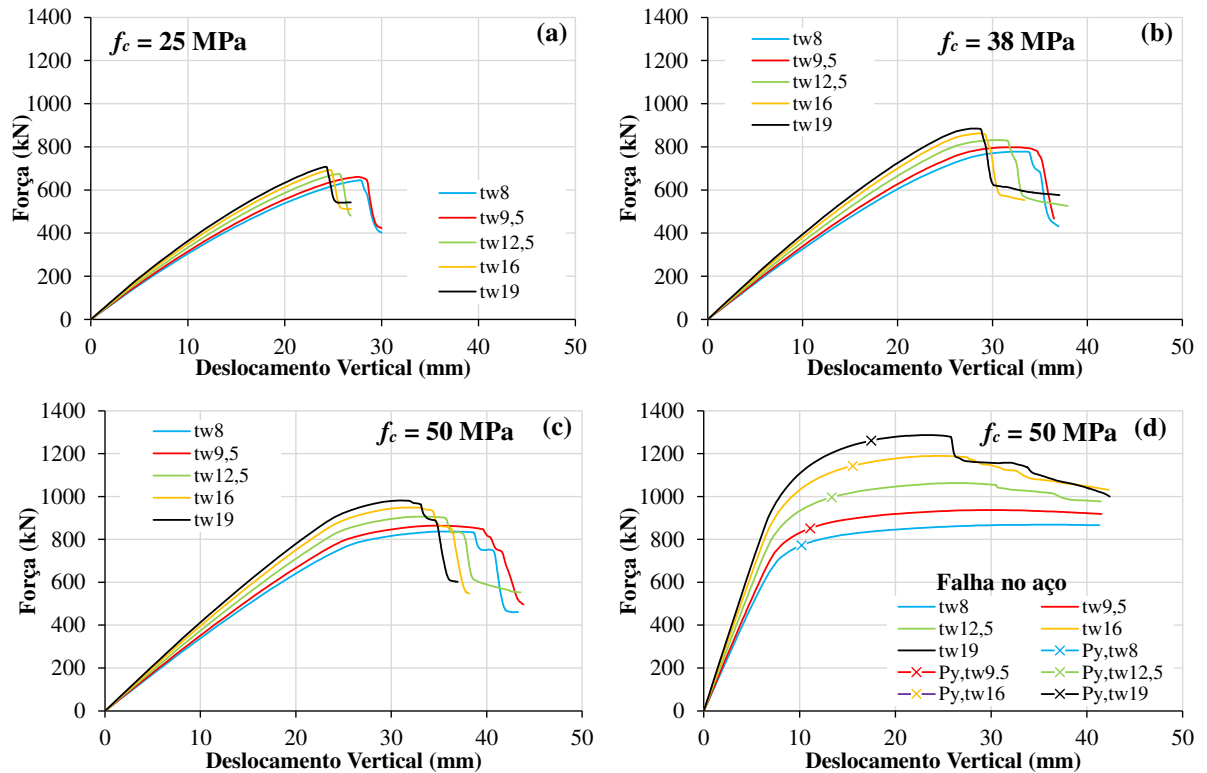
Fonte: o autor.

Fig. 3.24 - Curvas força×deslocamento vertical - variação do diâmetro das armaduras passantes para f_c igual a 25 MPa (a), 38 MPa (b) e 50 MPa (c).



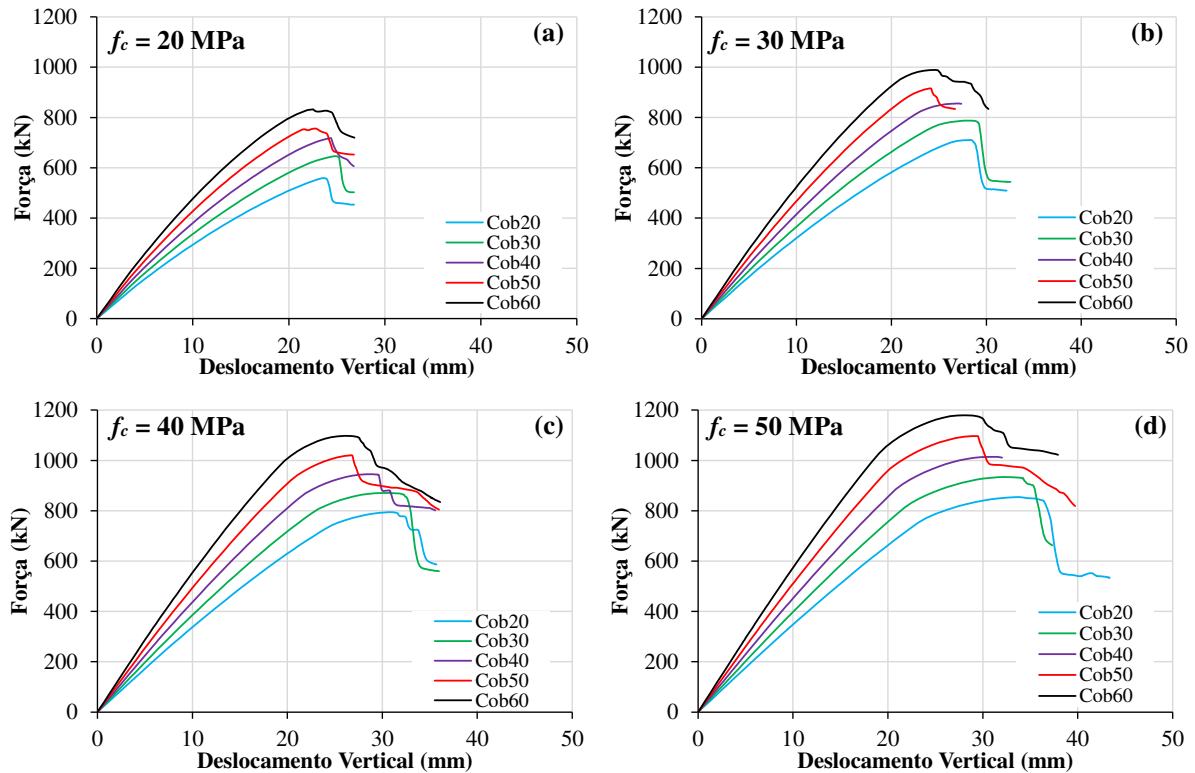
Fonte: o autor.

Fig. 3.25 - Curvas força×deslocamento vertical - variação de t_w considerando falha no concreto para f_c igual a 25 MPa (a), 38 MPa (b) e 50 MPa (c) e falha no aço (d).



Fonte: o autor.

Fig. 3.26 - Curvas força×deslocamento vertical - variação dos cobrimentos inferior e superior para f_c igual a 20 MPa (a), 30 MPa (b), 40 MPa (c) e 50 MPa (d).



Fonte: o autor.

Na Fig. 3.23 é possível observar que o comportamento estrutural é consistente com a variação da resistência do aço e do concreto. Obteve-se uma relação diretamente proporcional entre a variação das resistências dos materiais e a resistência dos modelos numéricos. Na Fig. 3.24, na Fig. 3.25 e na Fig. 3.26 também observou-se que o comportamento estrutural é consistente com a variação da resistência do concreto. Na Fig. 3.24 nota-se que a variação da taxa de armadura efetiva ou do diâmetro das armaduras passantes através dos pinos de concreto do *Crestbond*, entre 8,0 e 20,0 mm, mantendo-se constantes as demais características das vigas, praticamente não alterou a resistência da *Crestbeam*.

O comportamento quando a falha da conexão se dá no concreto é bem característico, e diferente de quando se dá no aço. Quando a conexão atinge sua resistência última pelo esgotamento da capacidade concreto, nota-se uma queda brusca da resistência da viga (Fig. 3.23a; Fig. 3.24; Fig. 3.25a,b,c; Fig. 3.26). Por outro lado, quando governa a falha do aço do conector, o comportamento é muito dúctil (Fig. 3.23b e da Fig. 3.25d).

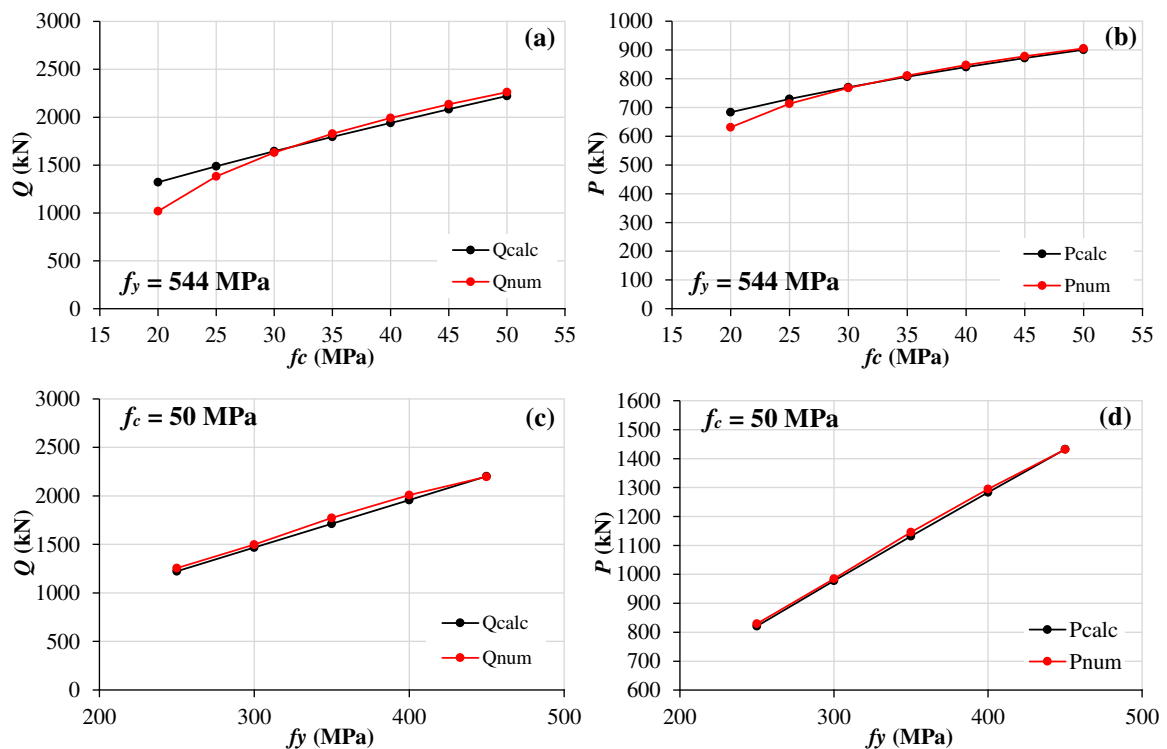
Os pontos marcados com “x” nas curvas força×deslocamento da Fig. 3.23b e da Fig. 3.25d correspondem aos instantes em que os conectores *Crestbond* atingiram plastificação total da seção crítica [30,54]. No decorrer dos ensaios numéricos, a plastificação dos conectores e das

vigas continuou a aumentar até ao ponto em que as seções de concreto colapsaram (pontos de força máxima nas curvas numéricas). É importante destacar que nos modelos em que a falha do aço do conector era prevista, optou-se por utilizar uma curva elastoplástica perfeita para representar a relação constitutiva do aço do perfil e do *Crestbond*, modificando o modelo numérico validado no Item 3.3. Essa adaptação foi admitida porque, quando foi utilizado um modelo constitutivo para o aço estrutural com encruamento, os resultados numéricos pareceram superestimados em relação às resistências calculadas para as vigas *Crestbeam*.

3.5.3 Resultados calculados × numéricos

Nesta seção, as resistências da conexão (Q) e da *Crestbeam* (P) dos modelos calculados e numéricos são apresentadas em função da variação do parâmetro em estudo: na Fig. 3.27, estão os resultados dos estudos de variação do f_c e do f_y ; na Fig. 3.28, os resultados da variação da taxa de armadura efetiva; na Fig. 3.29, os resultados da variação de t_w ; e na Fig. 3.30, os resultados da variação do cobrimento, mantendo-se os valores do cobrimento inferior (c_u) e do cobrimento superior (c_o) constantes em cada variação do parâmetro.

Fig. 3.27 - Curvas de resistências da conexão (Q) (à esquerda) e da viga (P) (à direita) × parâmetro de estudo: f_c (a,b) e f_y (c,d).

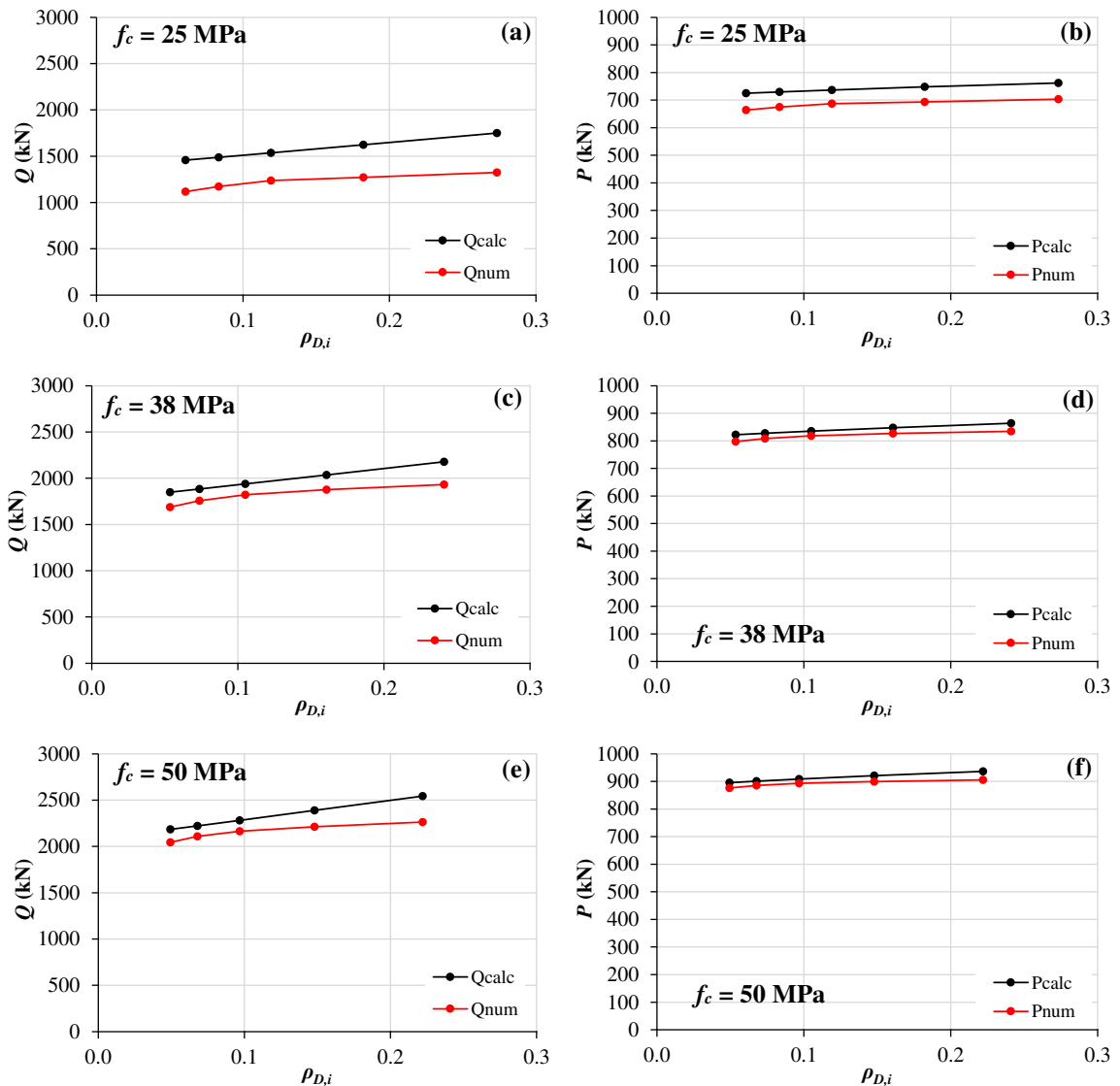


Fonte: o autor.

Ao analisar a Fig. 3.27, nota-se uma boa correlação entre os resultados calculados e numéricos. As resistências da conexão e da *Crestbeam* são diretamente proporcionais à resistência à

compressão do concreto e à tensão de escoamento do aço. Verificou-se um aumento de 122% na resistência da conexão ao variar f_c e um aumento de 75% ao variar f_y para as faixas de variação consideradas. Percebe-se, ainda, que o modelo semiempírico superestima a capacidade resistente da conexão e da viga para valores de f_c abaixo de 30 MPa em comparação ao modelo numérico.

Fig. 3.28 - Curvas de resistências da conexão (Q) (à esquerda) e da viga (P) (à direita) \times taxa de armadura efetiva, para f_c igual a 25 MPa (a,b), 38 MPa (c,d) e 50 MPa (e,f).



Fonte: o autor.

A partir da Fig. 3.28, nota-se boa correlação entre os resultados calculados e numéricos do estudo de variação da taxa de armadura efetiva. Os resultados numéricos obtidos considerando f_c igual a 25 MPa foram os mais subestimados em relação às resistências calculadas, com um erro percentual médio de 8% para a resistência da viga e 28% para a resistência da conexão. Isso indica, novamente, que o modelo semiempírico tende a superestimar a resistência da

Crestbeam à medida que o f_c diminui. Além disso, observa-se que a taxa de armadura efetiva teve pouca influência na capacidade resistente da viga e da conexão. Ao substituir duas barras de armadura passante de 8,0 mm por duas barras de 20,0 mm, observa-se um ganho médio de aproximadamente 5% na resistência da *Crestbeam* e 15% na resistência da conexão.

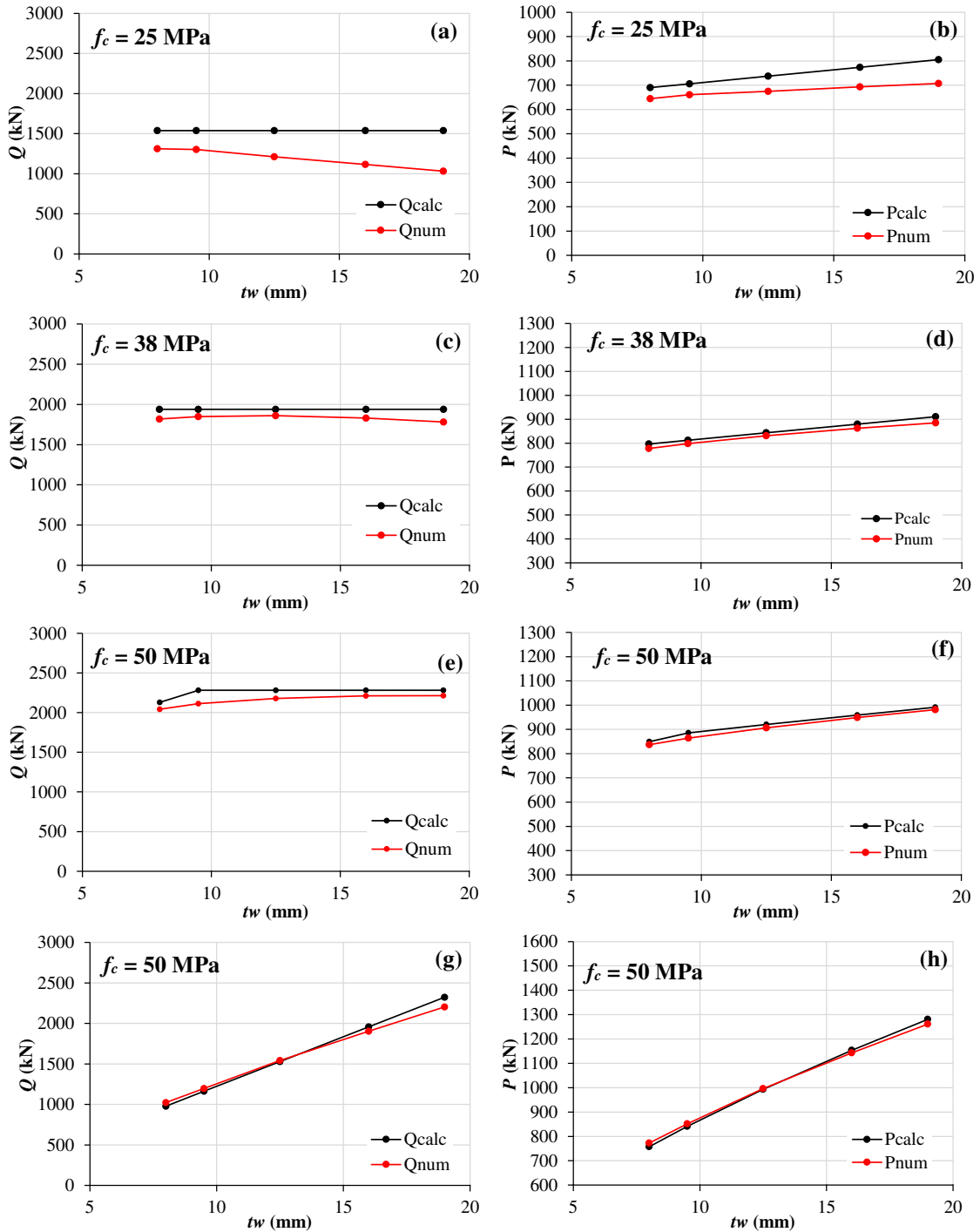
De acordo com os resultados mostrados na Fig. 3.29b, a capacidade da *Crestbeam* é diretamente proporcional à espessura do conector. Mas, contraintuitivamente, a capacidade da conexão se mostrou inversamente proporcional à espessura do conector para o concreto de resistência mais baixa ($f_c = 25$ MPa) (Fig. 3.29a). Embora não seja simples visualizar o bulbo de tensões no concreto relacionado com o *pry-out*, pode-se inferir que a superfície limítrofe desse bulbo provavelmente não aumentará na mesma proporção do aumento da espessura do conector. Além disso, os resultados demonstraram que, com o aumento da espessura da alma do perfil, o grau de interação caiu de 0,73 ($t_w = 8,0$ mm) para 0,58 ($t_w = 19,0$ mm). Em todos os casos analisados, as vigas estavam com interação parcial, e, nessa situação, a capacidade da conexão decresce com o aumento da espessura do conector, na mesma razão do grau de interação. Esta seria uma explicação para o comportamento paradoxal observado nas Fig. 3.29a e Fig. 3.29b. Um fenômeno similar, porém bem menos pronunciado, pode ser observado nas Fig. 3.29c e Fig. 3.29d para $f_c = 38$ MPa. Para $f_c = 50$ MPa esse fenômeno já não é perceptível.

As curvas numéricas de resistência do conector apresentadas na Fig. 3.29 indicam pouca influência da variação da espessura sobre a resistência da conexão quando a falha do concreto por *pry-out* governa. Esses resultados corroboram os obtidos por Petrauski [56], que realizou simulações numéricas de vigas mistas com conectores *Crestbond* com espessuras entre 6,3 mm e 16 mm, soldados sobre a mesa de perfis de aço em seção I duplamente simétrica. Por outro lado, as curvas numéricas apresentadas na Fig. 3.29g e na Fig. 3.29h indicam uma influência notável da variação da espessura sobre a resistência da conexão quando a falha do pino de aço governa. Quando a capacidade resistente é governada pela plastificação do pino de aço, as capacidades resistentes do conector e da *Crestbeam* são diretamente proporcionais à espessura do conector. Obteve-se um ganho de 115% na resistência da conexão variando a espessura entre 8,0 mm e 19,0 mm.

De forma geral, nota-se uma boa correlação entre as resistências das vigas mistas obtidas pelos modelos numéricos e semiempíricos no estudo de variação de t_w . Quando a falha do aço governa, verificou-se um erro percentual médio de 1% e um coeficiente de variação de 4,1%, entre os valores calculados e os determinados numericamente. Nas situações de falha do

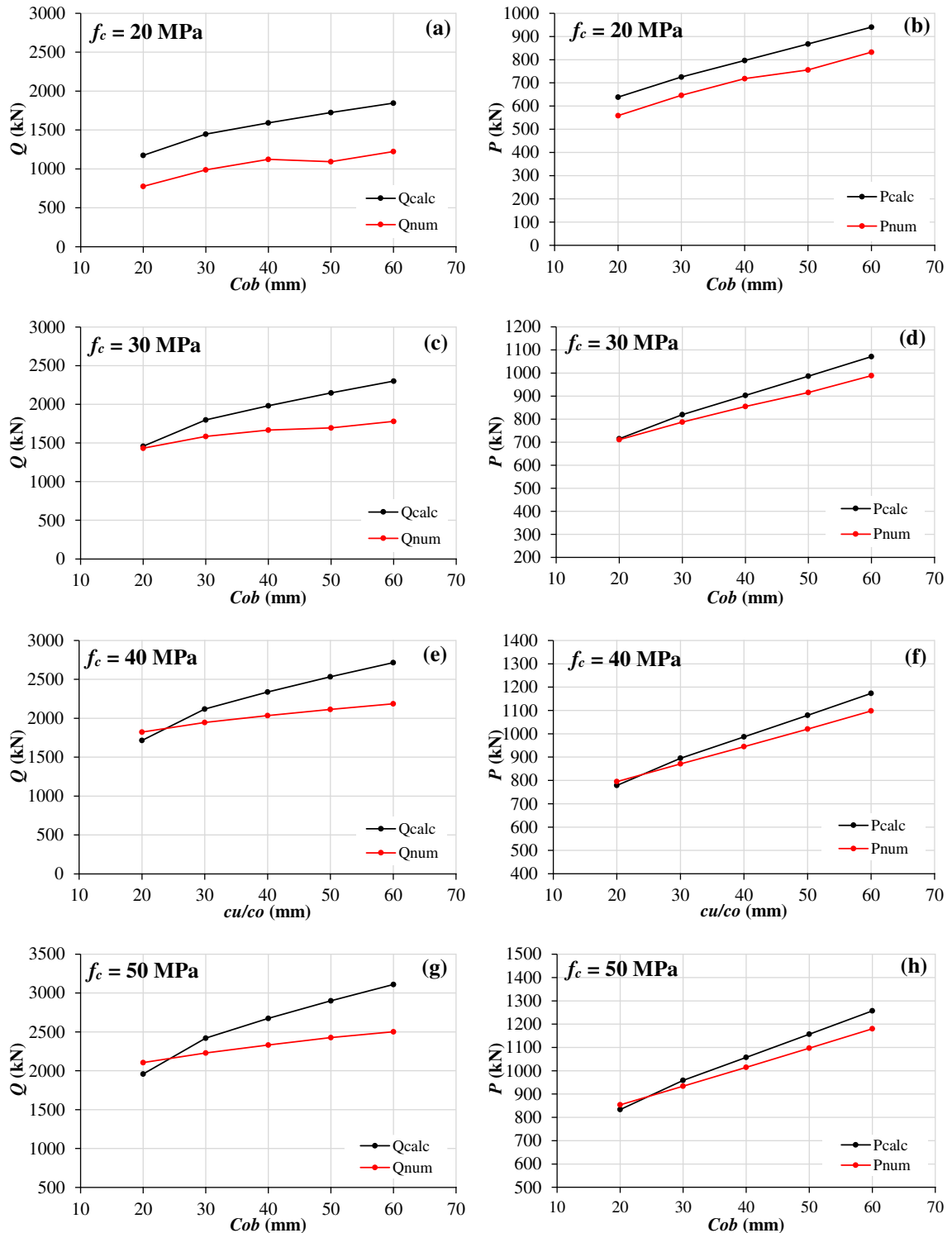
concreto por *pry-out*, a expectativa era de uma variação mínima, ou mesmo inexistente, na resistência da conexão. Essa previsão foi confirmada numericamente. Nesses casos, obteve-se um erro percentual médio de 4% e um coeficiente de variação de 4,0%.

Fig. 3.29 – Curvas de resistências da conexão (Q) (à esquerda) e da viga (P) (à direita) \times espessura do *Crestbond*, considerando falha no concreto (a,b,c,d,e,f) e falha no aço (g,h).



Fonte: o autor.

Fig. 3.30 - Curvas de resistências da conexão (Q) (à esquerda) e da viga (P) (à direita) \times cobrimento do *Crestbond*, para f_c igual a 20 MPa (a,b), 30 MPa (c,d), 40 MPa (e,f) e 50 MPa (g,h).



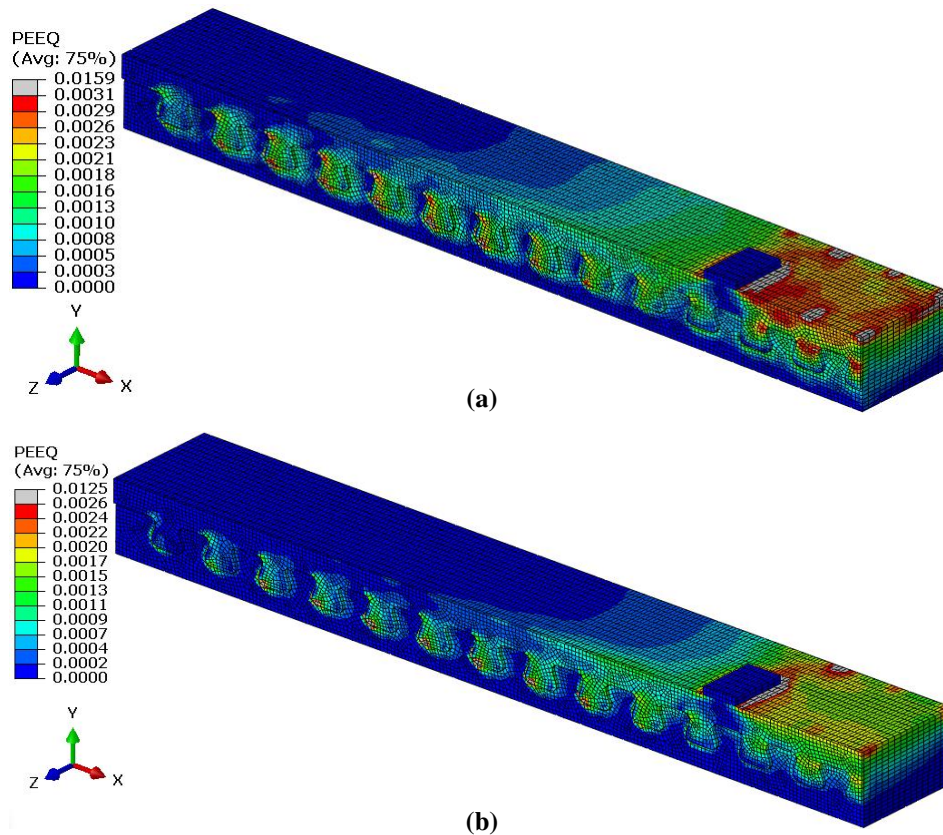
Fonte: o autor.

As maiores disparidades entre os resultados calculados e os numéricos, tanto para a resistência da conexão quanto para a resistência da viga, foram identificadas no estudo de variação do cobrimento do *Crestbond* (Fig. 3.30), especialmente quando a variação deste parâmetro foi

realizada em conjunto com f_c igual a 20 MPa (Fig. 3.30a,b). Neste caso específico, os erros percentuais médios foram de 13% para a resistência das vigas e 50% para a resistência da conexão. Ao analisar a Fig. 3.30, nota-se que as resistências da conexão e da viga são diretamente proporcionais ao cobrimento do conector, e a discrepância entre os resultados calculados e numéricos tende a aumentar para maiores valores de cobrimento. Esses resultados indicam que a equação de resistência ao *pry-out* do concreto tende a superestimar a resistência do *Crestbond* à medida que os cobrimentos aumentam. Essas diferenças provavelmente decorrem do processo de calibração conduzido por Almeida *et al.* [55]. Os modelos *push-out* simulados numericamente por aqueles autores possuíam características distintas daquelas utilizadas no presente estudo. Os autores utilizaram conectores *Crestbond* com passo $e_x = 107,30$ mm (valor inferior ao mínimo permitido pela Z-26.4-56 [37]) e variando o cobrimento superior de 20 mm a 40 mm, mantendo o cobrimento inferior constante (30 mm). Apesar das particularidades mencionadas, quando se considera todos os casos estudados, o modelo de cálculo forneceu boas estimativas da capacidade resistente da *Crestbeam* quando o cobrimento do conector foi variado. Obteve-se um erro percentual médio de 6% e um coeficiente de variação de 4,6%, entre os valores calculados e os determinados numericamente.

A possibilidade de falha por cisalhamento dos pinos de concreto foi outro ponto importante analisado no estudo de variação do cobrimento do *Crestbond*. Teoricamente, o aumento do cobrimento do conector eleva exclusivamente a resistência ao *pry-out*, proporcionando condições para uma eventual falha por cisalhamento. Isso poderia explicar a considerável diferença de resistência do conector obtida pelos modelos semiempírico e numérico (Fig. 3.30) e, ao mesmo tempo, indicaria que o cisalhamento dos pinos de concreto é um modo de falha relevante para o *Crestbond*. No entanto, conforme ilustrado na Fig. 3.31, os pinos de concreto dos modelos V4-AC-fc20-c60 (Fig. 3.31a) e V4-AC-fc50-c60 (Fig. 3.31b), que são os modelos com maior cobrimento (60 mm), com f_c de 20 MPa e 50 MPa, respectivamente, apresentaram deformações totais maiores que 3,5‰ em áreas muito pequenas, não caracterizando a ruptura por cisalhamento dos pinos de concreto. A falha de todos os modelos do estudo de variação do cobrimento ocorreu de forma similar à falha dos modelos numéricos dos ensaios experimentais de Petrauski [32] (Fig. 3.18), com a ruptura de uma cunha de concreto adjacente à chapa de carregamento.

Fig. 3.31 - Deformação plástica equivalente (PEEQ) para a força máxima dos modelos V4-AC-fc20-c60 (a) e V4-AC-fc50-c60 (b).



Fonte: o autor.

Na Tabela 3.3 estão apresentados os resultados calculados e numéricos de todos os modelos do estudo de variação de parâmetros. Nota-se que os resultados calculados apresentaram boa correlação com os resultados numéricos, sobretudo para estimar a força máxima resistida pela *Crestbeam*. Considerando todos os modelos analisados, obteve-se um erro percentual médio de 4% e um coeficiente de variação de 4,2% para a resistência das vigas, enquanto para a resistência das conexões obteve-se um erro percentual médio de 14% e um coeficiente de variação de 13,8%. Analisando os resultados em função do tipo de falha (no aço ou no concreto), observa-se que o modelo de cálculo tende a superestimar a resistência da *Crestbeam* e da conexão quando a falha ocorre no concreto, e a subestimá-la quando a falha ocorre no aço. Os resultados apresentados nesta seção indicam que o método de cálculo da capacidade resistente da *Crestbeam*, baseado no dimensionamento plástico da ABNT NBR 8800 [1] e nas equações de predição da capacidade resistente do *Crestbond* (Tabela 3.1), é consistente. Enfim, a formulação de cálculo é capaz de prever o comportamento resistente de vigas mistas tipo *Crestbeam*.

Tabela 3.3 – Resultados calculados e numéricos do estudo de variação de parâmetros (continua).

#	Modelo paramétrico	η	Q_{calc} (kN)	$P_{ult,PSC}$ (kN)	P_{num} (kN)	$P_{ult,PSC}/P_{num}$	Q_{num} (kN)	Q_{calc}/Q_{num}
1	V4-AC-fc20	92%	1320,7	683,6	631,5	1,08	1018,4	1,30
2	V4-AC-fc25	83%	1488,4	729,6	713,0	1,02	1382,0	1,08
3	V4-AC-fc30	77%	1645,7	770,2	768,1	1,00	1631,6	1,01
4	V4-AC-fc35	72%	1795,9	806,9	811,3	0,99	1827,1	0,98
5	V4-AC-fc40	68%	1941,2	840,6	847,5	0,99	1991,9	0,97
6	V4-AC-fc45	65%	2083,1	871,7	878,6	0,99	2135,0	0,98
7	V4-AC-fc50	66%	2222,6	900,8	905,6	0,99	2260,7	0,98
8	V4-AC-fy250	69%	1223,3	820,8	829,2	0,99	1255,6	0,97
9	V4-AC-fy300	69%	1467,9	977,5	985,1	0,99	1498,5	0,98
10	V4-AC-fy350	69%	1712,6	1131,7	1145,9	0,99	1773,0	0,97
11	V4-AC-fy400	69%	1957,2	1283,4	1295,2	0,99	2009,1	0,97
12	V4-AC-fy450	69%	2201,9	1432,6	1431,4	1,00	2196,5	1,00
13	V4-AC-fc25-2 ϕ 8,0	81%	1457,1	724,9	663,7	1,09	1118,3	1,30
14	V4-AC-fc25-2 ϕ 10,0	83%	1488,4	729,6	674,6	1,08	1171,9	1,27
15	V4-AC-fc25-2 ϕ 12,5	86%	1537,3	736,5	687,3	1,07	1237,3	1,24
16	V4-AC-fc25-2 ϕ 16,0	91%	1624,0	747,9	693,5	1,08	1270,7	1,28
17	V4-AC-fc25-2 ϕ 20,0	98%	1749,1	762,1	703,2	1,08	1325,0	1,32
18	V4-AC-fc38-2 ϕ 8,0	68%	1848,3	822,3	797,3	1,03	1688,6	1,09
19	V4-AC-fc38-2 ϕ 10,0	69%	1883,6	827,4	808,4	1,02	1757,0	1,07
20	V4-AC-fc38-2 ϕ 12,5	71%	1938,7	835,0	818,4	1,02	1821,7	1,06
21	V4-AC-fc38-2 ϕ 16,0	75%	2036,3	847,6	826,6	1,03	1877,7	1,08
22	V4-AC-fc38-2 ϕ 20,0	80%	2177,3	863,7	834,3	1,04	1932,9	1,13
23	V4-AC-fc50-2 ϕ 8,0	65%	2184,1	895,8	876,0	1,02	2043,6	1,07
24	V4-AC-fc50-2 ϕ 10,0	66%	2222,6	900,8	885,6	1,02	2109,5	1,05
25	V4-AC-fc50-2 ϕ 12,5	68%	2282,8	908,3	893,2	1,02	2164,5	1,05
26	V4-AC-fc50-2 ϕ 16,0	71%	2389,5	920,7	899,5	1,02	2212,2	1,08
27	V4-AC-fc50-2 ϕ 20,0	76%	2543,5	936,2	905,8	1,03	2262,2	1,12
28	V4-AC-fc25-tw8	86%	1537,3	690,1	644,8	1,07	1311,6	1,17
29	V4-AC-fc25-tw9,5	86%	1537,3	706,0	660,6	1,07	1302,9	1,18
30	V4-AC-fc25-tw12,5	86%	1537,3	737,5	674,7	1,09	1210,6	1,27
31	V4-AC-fc25-tw16	86%	1537,3	773,9	693,2	1,12	1116,6	1,38
32	V4-AC-fc25-tw19	86%	1537,3	805,0	707,4	1,14	1031,9	1,49
33	V4-AC-fc38-tw8	73%	1938,7	796,2	777,8	1,02	1817,4	1,07
34	V4-AC-fc38-tw9,5	71%	1938,7	812,0	798,2	1,02	1847,6	1,05
35	V4-AC-fc38-tw12,5	71%	1938,7	843,4	831,2	1,01	1860,3	1,04
36	V4-AC-fc38-tw16	71%	1938,7	879,7	862,4	1,02	1830,4	1,06
37	V4-AC-fc38-tw19	71%	1938,7	910,8	884,8	1,03	1780,9	1,09
38	V4-AC-fc50-tw8	75%	2129,4	849,2	837,0	1,01	2041,5	1,04
39	V4-AC-fc50-tw9,5	77%	2282,8	885,5	863,8	1,03	2112,3	1,08
40	V4-AC-fc50-tw12,5	70%	2282,8	920,4	906,3	1,02	2179,1	1,05
41	V4-AC-fc50-tw16	65%	2282,8	959,2	948,9	1,01	2210,8	1,03
42	V4-AC-fc50-tw19	64%	2282,8	991,6	981,2	1,01	2212,7	1,03
43	V4-AC-tw8-faco	59%	978,6	757,2	772,7	0,98	1023,4	0,96
44	V4-AC-tw9,5-faco	63%	1162,1	841,1	851,5	0,99	1196,8	0,97
45	V4-AC-tw12,5-faco	71%	1529,1	993,0	996,4	1,00	1543,3	0,99
46	V4-AC-tw16-faco	77%	1957,2	1153,3	1143,1	1,01	1904,3	1,03
47	V4-AC-tw19-faco	81%	2324,2	1280,5	1261,1	1,02	2204,4	1,05
48	V4-AC-fc20-c20	89%	1175,3	638,2	559,0	1,14	776,6	1,51
49	V4-AC-fc20-c30	93%	1447,0	725,6	646,1	1,12	988,7	1,46
50	V4-AC-fc20-c40	89%	1592,8	796,4	718,2	1,11	1124,1	1,42
51	V4-AC-fc20-c50	85%	1724,1	867,8	755,9	1,15	1093,1	1,58
52	V4-AC-fc20-c60	82%	1844,8	940,4	832,2	1,13	1222,3	1,51
53	V4-AC-fc30-c20	74%	1457,7	714,9	710,5	1,01	1431,5	1,02
54	V4-AC-fc30-c30	77%	1798,2	819,5	787,5	1,04	1586,1	1,13
55	V4-AC-fc30-c40	74%	1982,3	902,6	855,1	1,06	1667,2	1,19
56	V4-AC-fc30-c50	71%	2148,2	986,2	915,7	1,08	1695,9	1,27
57	V4-AC-fc30-c60	73%	2300,7	1071,1	988,8	1,08	1780,2	1,29

Fonte: o autor.

Tabela 3.3 - Resultados calculados e numéricos do estudo de variação de parâmetros (conclusão).

#	Modelo paramétrico	η	Q_{calc} (kN)	$P_{ult,PSC}$ (kN)	P_{num} (kN)	$P_{ult,PSC}/P_{num}$	Q_{num} (kN)	Q_{calc}/Q_{num}
58	V4-AC-fc40-c20	65%	1714,3	778,2	794,5	0,98	1821,5	0,94
59	V4-AC-fc40-c30	68%	2117,4	894,6	871,0	1,03	1946,2	1,09
60	V4-AC-fc40-c40	71%	2336,4	986,8	944,9	1,04	2033,4	1,15
61	V4-AC-fc40-c50	74%	2533,9	1079,3	1020,4	1,06	2112,1	1,20
62	V4-AC-fc40-c60	75%	2715,4	1173,2	1097,4	1,07	2184,4	1,24
63	V4-AC-fc50-c20	60%	1958,4	833,2	853,9	0,98	2105,2	0,93
64	V4-AC-fc50-c30	71%	2421,3	958,2	933,9	1,03	2228,4	1,09
65	V4-AC-fc50-c40	74%	2673,5	1057,2	1014,5	1,04	2331,4	1,15
66	V4-AC-fc50-c50	77%	2901,0	1156,5	1097,0	1,05	2426,4	1,20
67	V4-AC-fc50-c60	79%	3110,2	1257,3	1179,7	1,07	2503,0	1,24
Média (total)						1,04	1,14	
CV						4,2%	13,8%	
Média (falha no concreto)						1,05	1,16	
CV						4,1%	13,5%	
Média (falha no aço)						0,99	0,99	
CV						1,1%	3,1%	

Fonte: o autor.

3.5.4 Ajuste da equação de pry-out do Crestbond

Os resultados do estudo de variação de parâmetros apresentados anteriormente indicaram que o atual método de cálculo da capacidade resistente da *Crestbeam* é consistente (Tabela 3.1). Apesar disso, neste item propõe-se um ajuste da Eq. (3.6), que estima a resistência do *Crestbond* ao *pry-out* do concreto, que conduz a resultados com melhor correlação com as simulações numéricas.

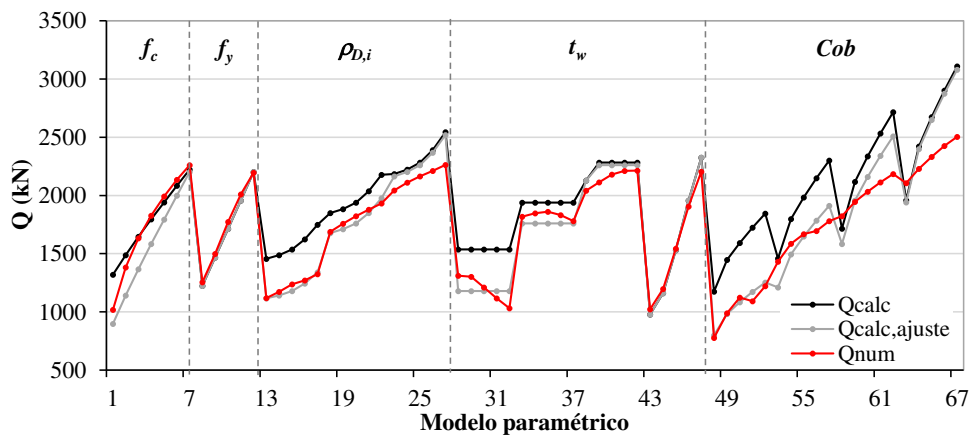
O ajuste do modelo semiempírico também é importante pelo fato de que a resistência da conexão (Q) é um parâmetro de cálculo de algumas propriedades geométricas de vigas mistas de aço e concreto, tais como o momento de inércia efetivo (I_{ef}) e o módulo de resistência efetivo (W_{ef}) [1]. O I_{ef} é utilizado para a verificação dos deslocamentos em estado limite de serviço através de análise elástica. Portanto, uma melhor estimativa de Q permite simular o comportamento em serviço das vigas *Crestbeam* de forma mais realista.

As equações para estimativa da resistência ao *pry-out* encontradas na literatura possuem um coeficiente de ajuste (k) obtido a partir de uma análise de regressão considerando dados experimentais e/ou numéricos [17,24,33,37,55]. No caso da Eq. (3.6) de predição da resistência do *Crestbond* ao *pry-out*, Almeida *et al.* [55] obtiveram um coeficiente de ajuste $k = 36$. Para ajustar a Eq. (3.6) de *pry-out* do *Crestbond* aos resultados numéricos obtidos no item 3.5.3, foram feitas duas alterações (Eq. (3.8)): admitiu-se a resistência à tração do concreto f_{ctm} , calculada conforme o *fib Model Code* [63], e o coeficiente k foi ajustado para $k = 71,5$.

$$P_{po} = \frac{71,5}{\eta} \chi_x h_{po}^{1,5} f_{ctm} (1 + \rho_{d,i}) \quad (3.8)$$

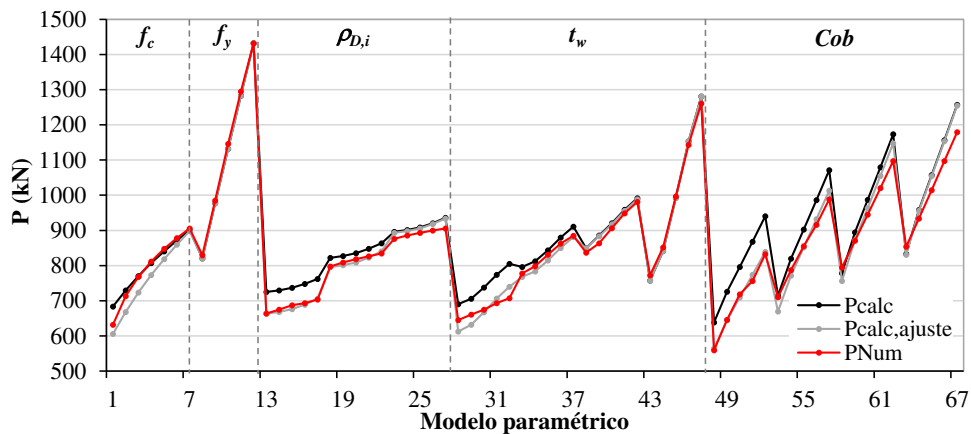
Na Fig. 3.32 e na Fig. 3.33 estão ilustrados, na cor cinza, os resultados de resistência da conexão e de resistência da *Crestbeam* obtidos a partir do ajuste da equação de resistência à falha do concreto do *Crestbond* por *pry-out*, respectivamente, bem como os resultados numéricos e calculados apresentados no Item 3.5.3.

Fig. 3.32 – Resultados calculados e numéricos de resistência da conexão.



Fonte: o autor.

Fig. 3.33 – Resultados calculados e numéricos de resistência da *Crestbeam*.



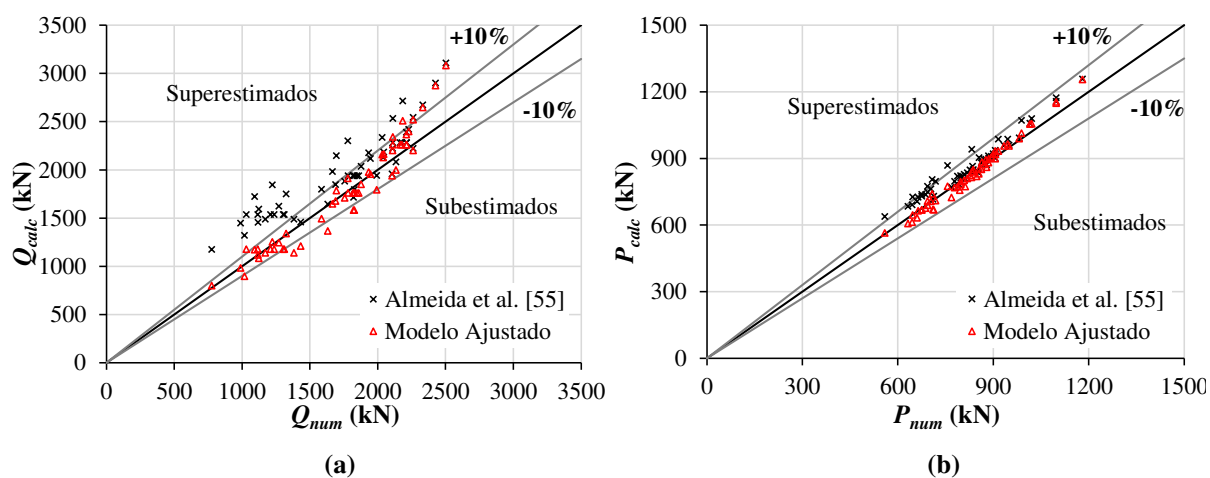
Fonte: o autor.

Analisando a Fig. 3.32 e a Fig. 3.33, verifica-se que o ajuste da equação de *pry-out* melhorou a correlação entre os resultados calculados e numéricos. No entanto, no estudo de variação do f_c é possível observar que o modelo semiempírico piorou a correlação entre os resultados. Neste caso, as resistências calculadas subestimam as resistências numéricas, principalmente para menores valores de f_c . Nota-se ainda que as maiores diferenças entre os resultados calculados e numéricos ocorreram no estudo de variação do cobrimento (*Cob*) do *Crestbond*. O modelo ajustado melhora a correlação com os resultados numéricos. No entanto, verifica-se uma

diferença visível entre o comportamento das curvas numéricas e calculadas a partir do ajuste, sobretudo para valores de f_c iguais a 40 MPa e 50 MPa.

Na Fig. 3.34a e na Fig. 3.34b são apresentadas comparações dos valores de resistências da conexão (Q) e da *Crestbeam* (P), respectivamente, obtidos dos modelos numéricos e semiempíricos, no estudo de variação de parâmetros apresentado no item 3.5.3. No caso dos modelos semiempíricos, são apresentados os resultados obtidos considerando a Eq. (3.6) de resistência à falha do *Crestbond* por *pry-out* proposta por Almeida *et al.* [55] e a Eq. (3.8), ajustada neste trabalho. Observa-se na Fig. 3.34 que o modelo semiempírico ajustado melhora a correlação entre os valores calculados e os obtidos numericamente. A partir do ajuste, grande parte das resistências da conexão calculadas passaram a se situar dentro da faixa de $\pm 10\%$ de variação (Fig. 3.34a). Com relação à resistência das vigas, verifica-se que todos os resultados ajustados passaram a se situar dentro da faixa de $\pm 10\%$ de variação (Fig. 3.34b).

Fig. 3.34 – Valores de resistências da conexão (a) e da *Crestbeam* (b) calculadas considerando o modelo semiempírico de resistência ao *pry-out*, proposto por Almeida *et al.* [55] (Eq. (3.6)), e o modelo proposto neste trabalho (Eq. (3.8)) × resultados numéricos.



Fonte: o autor.

Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados calculados ajustados (APÊNDICE D) e os resultados numéricos. Considerando todos os modelos analisados, obtém-se um coeficiente de variação de 2,7% para a resistência das vigas e um coeficiente de variação de 8,0% para a resistência das conexões, entre os valores calculados e os determinados numericamente.

Além disso, o estudo teórico sobre os modos de falha do conector *Crestbond* apresentado no Apêndice A foi repetido utilizando-se a Eq. (3.8) para estimar a resistência ao *pry-out* do concreto. De acordo com os resultados obtidos, apresentados no APÊNDICE E, nota-se que é pouco provável a ocorrência do cisalhamento dos pinos de concreto em vigas com alto grau de confinamento do concreto, dentro da faixa de parâmetros considerada no presente trabalho.

Tabela 3.4 - Resultados ajustados e numéricos do estudo de variação de parâmetros (continua).

#	Modelo paramétrico	η	$Q_{calc,ajuste}$ (kN)	$P_{calc,ajuste}$ (kN)	P_{num} (kN)	$P_{calc,ajuste}/P_{num}$	Q_{num} (kN)	$Q_{calc,ajuste}/Q_{num}$
1	V4-AC-fc20	63%	897,4	605,8	631,5	0,96	1018,4	0,88
2	V4-AC-fc25	64%	1141,0	668,4	713,0	0,94	1382,0	0,83
3	V4-AC-fc30	64%	1367,6	723,6	768,1	0,94	1631,6	0,84
4	V4-AC-fc35	63%	1583,9	773,2	811,3	0,95	1827,1	0,87
5	V4-AC-fc40	63%	1793,5	818,5	847,5	0,97	1991,9	0,90
6	V4-AC-fc45	62%	1998,9	860,0	878,6	0,98	2135,0	0,94
7	V4-AC-fc50	66%	2201,7	898,1	905,6	0,99	2260,7	0,97
8	V4-AC-fy250	69%	1223,3	820,8	829,2	0,99	1255,6	0,97
9	V4-AC-fy300	69%	1467,9	977,5	985,1	0,99	1498,5	0,98
10	V4-AC-fy350	69%	1712,6	1131,7	1145,9	0,99	1773,0	0,97
11	V4-AC-fy400	69%	1957,2	1283,4	1295,2	0,99	2009,1	0,97
12	V4-AC-fy450	69%	2201,9	1432,6	1431,4	1,00	2196,5	1,00
13	V4-AC-fc25-2 ϕ 8,0	62%	1117,0	663,5	663,7	1,00	1118,3	1,00
14	V4-AC-fc25-2 ϕ 10,0	64%	1141,0	668,4	674,6	0,99	1171,9	0,97
15	V4-AC-fc25-2 ϕ 12,5	66%	1178,4	675,9	687,3	0,98	1237,3	0,95
16	V4-AC-fc25-2 ϕ 16,0	70%	1244,9	688,7	693,5	0,99	1270,7	0,98
17	V4-AC-fc25-2 ϕ 20,0	75%	1340,9	706,0	703,2	1,00	1325,0	1,01
18	V4-AC-fc38-2 ϕ 8,0	62%	1678,3	795,6	797,3	1,00	1688,6	0,99
19	V4-AC-fc38-2 ϕ 10,0	63%	1710,3	800,9	808,4	0,99	1757,0	0,97
20	V4-AC-fc38-2 ϕ 12,5	65%	1760,3	808,9	818,4	0,99	1821,7	0,97
21	V4-AC-fc38-2 ϕ 16,0	68%	1849,0	822,4	826,6	0,99	1877,7	0,98
22	V4-AC-fc38-2 ϕ 20,0	73%	1977,0	840,1	834,3	1,01	1932,9	1,02
23	V4-AC-fc50-2 ϕ 8,0	65%	2163,6	893,0	876,0	1,02	2043,6	1,06
24	V4-AC-fc50-2 ϕ 10,0	66%	2201,7	898,1	885,6	1,01	2109,5	1,04
25	V4-AC-fc50-2 ϕ 12,5	68%	2261,4	905,7	893,2	1,01	2164,5	1,04
26	V4-AC-fc50-2 ϕ 16,0	71%	2367,1	918,2	899,5	1,02	2212,2	1,07
27	V4-AC-fc50-2 ϕ 20,0	75%	2519,7	934,0	905,8	1,03	2262,2	1,11
28	V4-AC-fc25-tw8	66%	1178,4	612,5	644,8	0,95	1311,6	0,90
29	V4-AC-fc25-tw9,5	66%	1178,4	631,8	660,6	0,96	1302,9	0,90
30	V4-AC-fc25-tw12,5	66%	1178,4	667,5	674,7	0,99	1210,6	0,97
31	V4-AC-fc25-tw16	66%	1178,4	706,9	693,2	1,02	1116,6	1,06
32	V4-AC-fc25-tw19	66%	1178,4	739,6	707,4	1,05	1031,9	1,14
33	V4-AC-fc38-tw8	67%	1760,3	768,1	777,8	0,99	1817,4	0,97
34	V4-AC-fc38-tw9,5	65%	1760,3	783,5	798,2	0,98	1847,6	0,95
35	V4-AC-fc38-tw12,5	65%	1760,3	814,4	831,2	0,98	1860,3	0,95
36	V4-AC-fc38-tw16	65%	1760,3	850,4	862,4	0,99	1830,4	0,96
37	V4-AC-fc38-tw19	65%	1760,3	881,2	884,8	1,00	1780,9	0,99
38	V4-AC-fc50-tw8	75%	2129,4	849,2	837,0	1,01	2041,5	1,04
39	V4-AC-fc50-tw9,5	76%	2261,4	883,1	863,8	1,02	2112,3	1,07
40	V4-AC-fc50-tw12,5	70%	2261,4	917,6	906,3	1,01	2179,1	1,04
41	V4-AC-fc50-tw16	64%	2261,4	956,2	948,9	1,01	2210,8	1,02
42	V4-AC-fc50-tw19	63%	2261,4	988,5	981,2	1,01	2212,7	1,02
43	V4-AC-tw8-faco	59%	978,6	757,2	772,7	0,98	1023,4	0,96
44	V4-AC-tw9,5-faco	63%	1162,1	841,1	851,5	0,99	1196,8	0,97
45	V4-AC-tw12,5-faco	71%	1529,1	993,0	996,4	1,00	1543,3	0,99
46	V4-AC-tw16-faco	77%	1957,2	1153,3	1143,1	1,01	1904,3	1,03
47	V4-AC-tw19-faco	81%	2324,2	1280,5	1261,1	1,02	2204,4	1,05
48	V4-AC-fc20-c20	61%	798,6	564,1	559,0	1,01	776,6	1,03
49	V4-AC-fc20-c30	63%	983,2	645,0	646,1	1,00	988,7	0,99
50	V4-AC-fc20-c40	61%	1082,2	709,2	718,2	0,99	1124,1	0,96
51	V4-AC-fc20-c50	58%	1171,5	773,8	755,9	1,02	1093,1	1,07
52	V4-AC-fc20-c60	55%	1253,5	839,3	832,2	1,01	1222,3	1,03
53	V4-AC-fc30-c20	61%	1211,4	669,9	710,5	0,94	1431,5	0,85
54	V4-AC-fc30-c30	64%	1494,4	771,7	787,5	0,98	1586,1	0,94
55	V4-AC-fc30-c40	61%	1647,3	851,6	855,1	1,00	1667,2	0,99
56	V4-AC-fc30-c50	59%	1785,2	931,9	915,7	1,02	1695,9	1,05
57	V4-AC-fc30-c60	61%	1911,9	1013,2	988,8	1,02	1780,2	1,07

Fonte: o autor.

Tabela 3.4 - Resultados ajustados e numéricos do estudo de variação de parâmetros (conclusão).

#	Modelo paramétrico	η	$Q_{calc,ajuste}$ (kN)	$P_{calc,ajuste}$ (kN)	P_{num} (kN)	$P_{calc,ajuste}/P_{num}$	Q_{num} (kN)	$Q_{calc,ajuste}/Q_{num}$
58	V4-AC-fc40-c20	60%	1583,8	756,4	794,5	0,95	1821,5	0,87
59	V4-AC-fc40-c30	63%	1956,3	872,5	871,0	1,00	1946,2	1,01
60	V4-AC-fc40-c40	66%	2158,6	963,6	944,9	1,02	2033,4	1,06
61	V4-AC-fc40-c50	68%	2341,1	1055,1	1020,4	1,03	2112,1	1,11
62	V4-AC-fc40-c60	70%	2508,7	1147,9	1097,4	1,05	2184,4	1,15
63	V4-AC-fc50-c20	59%	1940,1	830,5	853,9	0,97	2105,2	0,92
64	V4-AC-fc50-c30	70%	2398,6	955,6	933,9	1,02	2228,4	1,08
65	V4-AC-fc50-c40	74%	2648,4	1054,5	1014,5	1,04	2331,4	1,14
66	V4-AC-fc50-c50	76%	2873,8	1153,8	1097,0	1,05	2426,4	1,18
67	V4-AC-fc50-c60	78%	3081,0	1254,5	1179,7	1,06	2503,0	1,23
Média (total)						1,00		
CV						2,7%	8,0%	
Média (falha no concreto)						1,00		
CV						2,9%	8,5%	
Média (falha no aço)						0,99		
CV						1,1%	3,1%	

Fonte: o autor.

3.6 Conclusões

Neste trabalho foi realizada uma análise numérica do comportamento estrutural de uma nova tipologia de viga mista de aço e concreto denominada *Crestbeam*, que consiste em uma viga mista com uma seção transversal monossimétrica em que a mesa de concreto armado é solidarizada a um perfil de aço T invertido com um conector *Crestbond* integrado à alma. Realizou-se a validação de um modelo numérico de elementos finitos no ABAQUS, um estudo para avaliar a influência da variação de alguns parâmetros do *Crestbond* sobre o comportamento estrutural das vigas em situação de conexão parcial e a proposição de um ajuste da equação de resistência do *Crestbond* ao *pry-out* do concreto.

A metodologia de modelagem numérica mostrou-se adequada para representar o comportamento estrutural das vigas *Crestbeam*. Em comparação aos resultados experimentais obtidos por Petrauski [32], obteve-se um erro percentual médio de 8% para a força máxima e um coeficiente de variação de 5,8%. Além disso, nos modelos numéricos verificou-se um comportamento similar ao observado nos modelos experimentais, qual seja, desenvolvimento de uma fissura longitudinal seguido de ruptura na face superior da laje de concreto em regiões próximas à chapa de carregamento. Notou-se ainda o desenvolvimento de deformações plásticas no concreto para grandes porções da laje na fase pós-pico do carregamento.

Os resultados obtidos no estudo de variação de parâmetros permitiram elucidar algumas questões relacionadas ao comportamento estrutural das vigas *Crestbeam*, tais como:

- a resistência à compressão do concreto tem uma relação diretamente proporcional com as resistências da conexão e da viga mista e, no geral, observou-se boa correlação entre

os modelos numérico e semiempírico. Durante todo o estudo, verificou-se ainda que o modelo semiempírico tende a superestimar as resistências em relação aos modelos numéricos para valores baixos de f_c (na faixa de 20 a 30 MPa);

- a variação da taxa de armadura efetiva ou do diâmetro das barras de armadura passante através dos pinos de concreto resultou em pouco acréscimo de resistência à conexão e à viga. Apesar disso, a aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [37] prevê a disposição de um par de barras de armadura passante através dos pinos de concreto, bem como a verificação de uma armadura mínima, para garantir o comportamento dúctil das vigas mistas de aço-concreto com *composite dowels*;
- a variação da espessura do conector exerceu pouca influência sobre a resistência da conexão quando a ruptura do concreto por *pry-out* governou o dimensionamento. De acordo com as equações para estimativa da capacidade do *Crestbond*, a expectativa era de uma variação nula na resistência da conexão;
- a tensão de escoamento do aço e a espessura do *Crestbond* têm uma relação diretamente proporcional com as resistências do conector e da viga, quando a capacidade das vigas *Crestbeam* é governada pela falha dos pinos de aço do *Crestbond*. Verificou-se excelente correlação entre os resultados calculados e numéricos e maior ductilidade em comparação aos modelos em que a capacidade foi limitada pela falha do concreto por *pry-out*;
- o cobrimento do *Crestbond* tem relação diretamente proporcional com as resistências da viga e da conexão. No estudo de variação do cobrimento foram obtidas as maiores diferenças entre os resultados calculados e os numéricos. Notou-se que a equação de resistência ao *pry-out* do concreto, proposta por Almeida *et al.* [55], tende a superestimar a resistência do *Crestbond* à medida que os cobrimentos aumentam. Em função disso, um novo modelo de cálculo para a resistência do *Crestbond* ao *pry-out* foi proposto a partir de ajustes da equação de Almeida *et al.* [55], considerando os resultados numéricos dos estudos de variação de parâmetros deste trabalho.

De maneira geral, os resultados calculados apresentaram boa correlação com os resultados numéricos, especialmente para estimar a força máxima resistida pela *Crestbeam*. Apesar disso, vislumbrou-se a possibilidade de melhorar a correlação do modelo semiempírico propondo um ajuste na equação de *pry-out*. Com esse ajuste, o erro percentual médio diminuiu de 14% para 0% e o coeficiente de variação diminuiu de 13,8% para 8% para a resistência da conexão. Com

relação à resistência das vigas, o erro percentual médio diminuiu de 4% para 0% e o coeficiente de variação de 4,2% para 2,7%, considerando todos os 67 modelos do estudo de variação de parâmetros. Além disso, uma melhor estimativa da resistência da conexão permite simular o comportamento em serviço das vigas *Crestbeam* de forma mais realista.

Esses resultados mostram que o método de cálculo da capacidade resistente da *Crestbeam*, baseado no dimensionamento plástico da ABNT NBR 8800 [1] e nas equações de previsão da capacidade resistente do *Crestbond* encontradas na literatura, é consistente. O atual estado da arte possibilita a previsão do comportamento resistente das vigas mistas *Crestbeam*.

Finalmente, buscou-se investigar a ocorrência do cisalhamento dos pinos de concreto nos modelos numéricos dos experimentos e nos estudos de variação de parâmetros. Não foram encontrados indícios da ocorrência do fenômeno em nenhum caso, inclusive nos modelos numéricos com elevados valores de cobertura do conector. De acordo com o estudo apresentado no APÊNDICE A, é improvável que o modo de falha por cisalhamento dos pinos de concreto governe a capacidade da conexão com *Crestbond* em situação de alto confinamento do concreto. Além disso, Petrauski [32] destacou o fato de que a utilização da armadura de confinamento não influenciou o comportamento experimental das vigas ensaiadas. Diante das evidências mencionadas acima, pode-se afirmar que o cisalhamento dos pinos de concreto é um modo de falha secundário para o *Crestbond*, desde que as diretrizes construtivas da aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [37] sejam atendidas.

Este trabalho permitiu aprofundar o entendimento sobre o comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto do tipo *Crestbeam* com interação parcial.

3.7 Referências

1. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - NBR 8800:2008: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios - Procedimento, 2008.
2. American Institute of Steel Construction (AISC). ANSI/AISC 360-22: Specification for Structural Steel Buildings. AISC. Chicago, 2022.
3. European Committee for Standardization – EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, 2004.
4. Zellner W. Recent designs of composite bridges and a new type of shear connectors. In: Composite construction in steel and concrete: proceedings of an engineering foundation conference. 1987; p. 240–52.
5. Hanswille, G.; Porsch, M.; Ustundag, C. Resistance of headed studs subjected to fatigue loading Part I: experimental study. Journal of Constructional Steel Research 2007; 63(4):475-484. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.035>.

6. Classen, M.; Gallwoszus, J. Concrete fatigue in composite dowels. *Structural Concrete* 2016; 17(1):63-7. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201400120>.
7. Christou, G.; Hegger, J.; Classen, M. Fatigue of clothoid shaped rib shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research* 2020; 171:106133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106133>.
8. Kong, F.; Huang, P.; Han, B.; Wang, X.; Liu, C. Experimental study on behavior of corrugated steel-concrete composite bridge decks with MCL shape composite dowels. *Engineering Structures* 2021; 227:111399. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111399>.
9. Veríssimo, G. S. Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. <http://hdl.handle.net/1843/LMCA-7E6HVC>.
10. Zheng, S.; Liu, Y.; Yoda, T.; Lin, W. Parametric study on shear capacity of circular-hole and long-hole perfobond shear connector. *Journal of Constructional Steel Research* 2016; 117:64-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.09.012>.
11. Andrä, H. Neuartige Verbundmittel für den Anschluß von Ortbetonplatten an Stahlträger. *Beton und Stahlbetonbau* 1985; p. 325-328. <https://doi.org/10.1002/best.198500580>.
12. Leonhardt, F.; Andrä, W.; Andrä, H.P.; Harre, W. Neues vorteilhaftes verbundmittel für stahlverbund-tragwerk mit höher dauerfestigkeit. *Beton und Stahlbetonbau* 1987; 12:325-331. <https://doi.org/10.1002/best.198700500>.
13. Bode, H.; Künzel, R. Scherversuche zum Tragverhalten eines neuartigen Stahlverbundträgers mit schwalbenschwanzförmigen Stegausehnehmungen als Verbundmittel, *Untersuchungsbericht 2 (88)*, Universität Kaiserslautern, 1988 (não publicado).
14. Andrä, H. Economical shear connectors with high fatigue strength. *IABSE*, 1990, 60:167-172. <http://dx.doi.org/10.5169/SEALS-46457>.
15. Kraus, D.; Wurzer, O. Bearing capacity of concrete dowels. *IABSE*, 1997, p. 133-138. <https://doi.org/10.5169/SEALS-957>.
16. Kraus, D.; Wurzer, O. Nonlinear Finite-Element Analysis of Concrete Dowels. *Computers & Structures* 1997; 64(5-6):1271-1279. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(97\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(97)00034-5).
17. Zapfe C. Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln zur Übertragung der Längsschubkräfte. Tese (Doutorado), Universität der Bundeswehr, 2001.
18. Schlaich, J. Development and application of saw-tooth connections for composite structures, In: *International Symposium on Connections Between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, 2001, 2:1105-1118.
19. Schmitt, V., Seidl, G., Hever, M., Zapfe, C. Verbundbrücke Pöcking – Innovative VFT Träger mit Betondübeln. *Stahlbau* 2004; 73(6):387-393. <https://doi.org/10.1002/stab.200490108>.
20. Veríssimo, G. S. Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento. Projeto de Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
21. Lorenc, W.; Ignatowicz, R.; Kubica, E. Numerical model of shear connection by concrete dowels. *Recent Developments in Structural Engineering Mechanics and Computation*, Millpress, Rotterdam, Netherlands, 2007.
22. Berthelley J., Seidl G. Les poutres Préco - Une solution économique pour les petites portées, objet d'un programme de recherche européen. *Ouvrages d'art* 2007; 54:22-27. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/newsletters/boa-bulletin-ouvrages-art/derniers-numeros-notre-boa/boa-bulletin-ouvrages-art-ndeg-54>.

23. Fink, J.; Petraschek, T. Tragmodelle zur Bestimmung der Längsschubtragfähigkeit des Kronendübels als neuartiges Verbindungsmittel im Verbundbau. *Stahlbau* 2007; 76(10):761-770. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.200710081>.
24. Seidl, G. Behaviour and load bearing capacity of composite dowels in steel-concrete composite girders. Tese (Doutorado), Wroclaw University of Technology, 2009.
25. Lorenc, W.; Kubica, E.; Kożuch, M. Testing Procedures in Evaluation of Resistance of Innovative Shear Connection with Composite Dowels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2010; 10(3):51-63. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60136-8](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60136-8).
26. Seidl, G.; Petzek, E.; Bancila, R. Composite dowels in bridges – efficient solution. *Advanced Materials Research* 2013; 814:193-206. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.814.193>.
27. Seidl, G. *et al.*: Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission (PRECO-BEAM). EUR 25321 EN, European Commission, 2013.
28. Seidl, G. *et al.* PRECO+: Prefabricated Enduring Composite Beams Based on Innovative Shear Transmission. Research Fund for Coal and Steel – Final Report, 2013.
29. Lorenc, W.; Koch, M.; Rowiński, S.: The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Part. 1: Experimental study. *Journal of Constructional Steel Research* 2014; 101:482–499. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.013>.
30. Lorenc, W.; Kożuch, M.; Rowinski, S.: The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Part. II: Theoretical investigations. *Journal of Constructional Steel Research* 2014; 101:500-518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.012>.
31. Lacki, P.; Kasza, P.; Adamus, K. Optimization of composite dowels shape in steel-concrete composite floor. *Composite Structures* 2019; 222:110902. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110902>.
32. Petruski, M. C. Avaliação numérico-experimental do comportamento de vigas mistas pré-moldadas tipo Crestbeam sujeitas a flexão simples. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2021. <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.002>
33. Heinemeyer S. Load and deformation behavior of composite beams with ultra high performance concrete and composite dowels. Tese (Doutorado), RWTH Aachen, 2011.
34. Alves, A. R. L.; Valente, I. B.; Vieira, W. B. Veríssimo, G. S. Prospective study on the behavior of composite beams with an indented shear connector. *Journal of Constructional Steel Research* 2018; 148:508–524. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.015>.
35. Feldmann, M.; Kopp, M.; Pak, D. Composite dowels as shear connectors for composite beams – background to the German technical approval. *Steel Construction* 2016; 9(2):80–88. <https://doi.org/10.1002/stco.201610020>.
36. Kopp, M.; Wolters, K.; Classen, M.; Hegger, J.; Gundel, M.; Gallwoszus, J.; Heinemeyer, S.; Feldmann, M. Composite dowels as shear connectors for composite beams – background to the design concept for static loading. *Journal of Constructional Steel Research* 2018; 147:488–503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.013>.
37. German Institute for Building Technology (DIBT), Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, n. Z-26.4-56, Berlin, 2023.
38. Lorenc, W. The Model for a General Composite Section Resulting from the Introduction of Composite Dowels. *Steel Construction* 2017; 10(2):154-167. <https://doi.org/10.1002/stco.201710019>.

39. Gündel, M.; Kopp, M.; Feldmann, M.; Gallwoszus, J.; Hegger, J.; Seidl, G. Design of composite dowels according to the new national technical approval. *Stahlbau* 2014; 83(2):112–121. <https://doi.org/10.1002/stab.201410137>.
40. He, S.; Fang, Z.; Mosallam, A. S. Push-out tests for perfbond strip connectors with UHPC grout in the joints of steel-concrete hybrid bridge girders. *Engineering Structures* 2017; 135:177-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.008>.
41. Feldmann, M.; Hechler, P.; Hegger, J.; Rausher, S. Fatigue behavior of shear connectors in high performance concrete. *Composite Construction in Steel and Concrete Conference VI: Proc of the 6th Int Conf. ASCE, USA 2008*, pp. 39–51. [http://dx.doi.org/10.1061/41142\(396\)4](http://dx.doi.org/10.1061/41142(396)4).
42. Classen, M.; Gallwoszus, J.; Stark, A. Anchorage of composite dowels in UHPC under fatigue loading. *Structural Concrete* 2016; 17(2):183-193. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201500034>.
43. Lechner, T.; Gehrlein, S.F.; Fischer, O. Structural behaviour of composite dowels in thin UHPC elements. *Steel Construction* 2016; 9(2):132–137. <https://doi.org/10.1002/stco.201610012>.
44. Harsányi P, Randl N, Tue N. DIC-based failure analysis of high-strength continuous steel shear dowels for composite UHPFRC steel construction. *Engineering Structures* 2021; 247:113093. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113093>.
45. Cheng Z., Zhang Q., Bao Y., Deng P., Wei C., Li M. Flexural behavior of corrugated steel-UHPC composite bridge decks. *Engineering Structures* 2021; 246:113066. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113066>.
46. He, Y.; Shen, X.; Chen, G.; Shao, X. A new steel – UHPFRC composite beam with in-built composite dowels as connectors: Concept and design principles. *Engineering Structures* 2024; 298:117089. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117089>.
47. Cardoso, H. S.; Aguiar, O. P.; Caldas, R. B.; Fakury, R. H. Composite dowels as load introduction devices in concrete-filled steel tubular columns. *Engineering Structures* 2020; 219:110805. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110805>.
48. Classen, M.; Hegger, J. Shear tests on composite dowel rib connectors in cracked concrete. *ACI Structural Journal* 2018; 115(3):661-671. <http://dx.doi.org/10.14359/51701145>.
49. Kozuch, M.; Lorenc, W. The behaviour of clothoid-shaped composite dowels: Experimental and numerical investigations. *Journal of Constructional Steel Research* 2020; 167:105962. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105962>.
50. Cardoso, H. S. Avaliação do comportamento de conectores constituídos por chapas de aço com recorte retangulares – ênfase em conectores de geometria *Crestbond* aplicados em pilares mistos. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2018. <http://hdl.handle.net/10316/84982>.
51. Cardoso, H. S.; Caldas, R. B.; Fakury, R. H.; Veríssimo, G. S. Estudo do comportamento de conectores *Crestbond* por meio de simulação numérica. *Revista da Estrutura de Aço* 2018; 7(2):140-159. <http://dx.doi.org/10.17648/aco-2238-9377-7-2-4>.
52. Cardoso, H. S.; Caldas, R. B.; Fakury, R. H.; Veríssimo, G. S.; Almeida, R. L. J. Modelo de Cálculo para o Cisalhamento do Concreto nos Conectores *Crestbond*. *Revista da Estrutura de Aço* 2018; 7(3):280-299. <http://dx.doi.org/10.17648/aco-2238-9377-7-3-3>.
53. Almeida, R. L. J. Simulação numérica de modelos de cálculo para representação dos modos de falha de conectores de cisalhamento *Crestbond*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2018. <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/22677>.
54. Almeida, R. L. J.; Veríssimo, G. S.; Ribeiro, J. C. L.; Paes, J. L. R.; Petruski, M. C.; Caldas, R. B. Capacidade resistente do conector *Crestbond* à falha do aço desencadeada por um mecanismo combinado de cisalhamento e flexão. *Revista da Estrutura de Aço* 2019; 9(1):61-80.

55. Almeida, R. L. J.; Veríssimo, G. S.; Ribeiro, J. C. L.; Paes, J. L. R.; Caldas, R. B.; Cardoso, H. S.; Fakury, R. H. Assessing the bearing capacity of *Crestbond* shear connectors to concrete pry-out. *IBRACON Structures and Materials Journal* 2023; 16(1):e16107. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000100007>.
56. Petruski, M. C. Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto com conectores *Crestbond*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2016. <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9811>.
57. Pereira, A. C.; Miranda, L. G. J.; Santos, L. R.; Caldas, R. B. Development of a numerical model to simulate the behavior of plate shear connectors applied to slender cross-section concrete-filled steel tube. *IBRACON Structures and Materials Journal* 2023; 16(1):e16108. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000100008>.
58. Classen, M. Limitations on the use of partial shear connection in composite beams with steel T sections and uniformly spaced rib shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research* 2018; 142:99–112. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.11.023>.
59. Pavlović, M.; Marković, Z.; Veljković, M.; Buđevac, D. Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. *Journal of Constructional Steel Research* 2013; 88(134–149). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.05.003>.
60. Classen, M.; Herbrand, M.; Adam, V.; Kueres, D.; Sarac, M. Puzzle-shaped rib shear connectors subjected to combined shear and tension. *Journal of Constructional Steel Research* 2018; 145:232–243. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.02.036>.
61. European Committee for Standardization - EN 1992-1-1:2010. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, 2010.
62. Hordijk, D. A. Local approach to fatigue of concrete. Tese (Doutorado), Delft University of Technology, Delft, 1991.
63. Fédération Internationale du Béton. (2010). fib Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne. <http://dx.doi.org/10.1002/9783433604090>.
64. Byfield M. P.; Dhanalakshmi, M. Analysis of strain hardening in steel beams using mill tests. *Adv. Steel Struct.* 2002; 1(139-146). <http://dx.doi.org/10.1016/B978-008044017-0/50015-9>.
65. SIMULIA. ABAQUS analysis user's manual. Providence, USA, 2012.
66. Silva, M. A. P. Modelos semiempíricos para a estimativa da capacidade resistente de conectores de cisalhamento *Crestbond* e *Perfobond*. Dissertação (Mestrado), Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2011. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3748>.
67. Dutra, C. M. Estudo do comportamento estrutural do conector *Crestbond* considerando variações geométricas e mecânicas. Programação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2014. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3838>.
68. Preco-Beam, Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission RFSR-CT-2006-00030, final report, Project carried out with the financial grant of the Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, 2009.
69. Parassen, P. R. Estudo numérico da conexão parcial em vigas mistas de aço e concreto tipo *Crestbeam*. 2022. 149 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2022.

CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES

4.1 Considerações finais

Neste trabalho foram realizadas uma investigação sobre o estado da arte dos conectores de cisalhamento do tipo *composite dowels* e uma análise numérica do comportamento estrutural de uma nova tipologia de viga mista de aço e concreto, denominada *Crestbeam*, que possui uma seção transversal monossimétrica em que a mesa de concreto armado é solidarizada a um perfil de aço com seção em T invertido com um conector *Crestbond* integrado à alma. Essa tipologia de viga mista foi proposta por Petrauski [1], que realizou ensaios de flexão com vigas *Crestbeam* no Laboratório de Estruturas da UFV.

A partir da revisão de literatura sobre o surgimento e a evolução dos *composite dowels*, foram apresentados aspectos relacionados às diversas geometrias propostas, ao comportamento estrutural e às equações de dimensionamento dos conectores. Novas investigações e perspectivas futuras também foram indicadas. Ressalta-se que alguns modelos de dimensionamento propostos recentemente no P1208 [2] apresentam pontos distintos em comparação com a aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [3], a saber:

- o cisalhamento dos pinos de concreto não é mais considerado um modo de falha dos *composite dowels* sob carregamento estático;
- o *pry-out* da borda de concreto foi incluído como novo critério de falha estático;
- o efeito das fissuras transversais na capacidade resistente dos *composite dowels* foi incorporado à equação de *pry-out* por meio de um fator de redução;
- e novas equações para calcular a capacidade resistente dos *composite dowels* em diferentes situações de uso foram desenvolvidas.

A análise numérica da *Crestbeam* compreendeu a validação de um modelo numérico de elementos finitos com o auxílio do software ABAQUS. A metodologia de modelagem numérica adotada se mostrou adequada para representar o comportamento estrutural das vigas ensaiadas experimentalmente por Petrauski [1], viabilizando o estudo de variação de parâmetros apresentado. Nesse estudo, avaliou-se a influência da variação de algumas características da conexão sobre o comportamento estrutural das vigas *Crestbeam* em situação de conexão parcial. Buscou-se variar os parâmetros geométricos e de materiais que compõem as equações de dimensionamento do *Crestbond* presentes na literatura. As seguintes conclusões foram obtidas:

- o modelo semiempírico para a falha da conexão por *pry-out* tende a superestimar a capacidade da conexão quando a resistência à compressão do concreto é inferior a 30 MPa;
- os resultados demonstraram que a variação da taxa de armadura passante através dos pinos de concreto praticamente não altera as resistências da conexão e da viga. Não obstante, de acordo com a diretriz alemã Z-26.4-56 [3] é obrigatória a disposição de duas barras de armadura, bem como a verificação de uma armadura mínima, para garantir a ductilidade das vigas mistas com *composite dowels*;
- as maiores diferenças entre os resultados calculados e numéricos foram obtidas no estudo de variação do cobrimento do conector. A equação de resistência ao *pry-out* do concreto, proposta por Almeida *et al.* [4], tende a superestimar a resistência do *Crestbond* à medida que os cobrimentos aumentam. Em função disso, foram propostos ajustes à equação de Almeida *et al.* [55], considerando os resultados numéricos dos estudos de variação de parâmetros realizados, que resultaram na melhoria de correlação entre as capacidades calculada e simulada numericamente;
- obteve-se excelente correlação entre os modelos semiempírico e numérico nos casos de falha do aço dos conectores. Destaca-se que é necessário definir um modelo elastoplástico perfeito para a relação constitutiva do aço do *Crestbond* para realizar as simulações numéricas, visto que o escoamento ao longo de toda uma seção crítica do conector é suficiente para caracterizar a capacidade resistente em tempo de projeto;
- o modo de falha por cisalhamento dos pinos de concreto não é determinante para o *Crestbond*, quando são seguidas as disposições construtivas da diretriz alemã Z-26.4-56 [3];
- de maneira geral, os resultados calculados apresentaram boa correlação com os resultados numéricos, especialmente para estimar a força máxima resistida pela *Crestbeam*. Apesar disso, vislumbrou-se a possibilidade de melhorar a correlação do modelo semiempírico propondo um ajuste na equação de *pry-out*. Com esse ajuste, o erro percentual médio diminuiu de 14% para 0% e o coeficiente de variação diminuiu de 13,8% para 8% para a resistência da conexão. Com relação à resistência das vigas, o erro percentual médio diminuiu de 4% para 0% e o coeficiente de variação de 4,2% para 2,7%, considerando todos os 67 modelos do estudo de variação de parâmetros. Além

disso, uma melhor estimativa da resistência da conexão permite simular o comportamento em serviço das vigas *Crestbeam* de forma mais realista.

Tendo em vista o que foi observado ao longo de todo o trabalho, fica evidente que o método de cálculo da capacidade resistente da *Crestbeam*, baseado no dimensionamento plástico da ABNT NBR 8800 [5] e nas equações de predição da capacidade resistente do *Crestbond* encontradas na literatura, é consistente. O atual estado da arte possibilita a previsão do comportamento resistente do *Crestbond* sob carregamento estático e, especialmente, da estimativa da força máxima resistida pela viga mista de aço-concreto tipo *Crestbeam*. Ainda existem algumas lacunas de conhecimento sobre o comportamento estrutural do *Crestbond* relacionados a configurações especiais, como, por exemplo, com a conexão sob tração, sob esforços combinados de cisalhamento e de tração, e quando o conector é utilizado próximo à borda da parte de concreto.

4.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir da investigação realizada neste trabalho, sugerem-se os seguintes temas para aprofundamento em estudos futuros:

- realizar o dimensionamento de vigas *Crestbeam* para aplicação em pontes utilizando vãos usuais, entre 12 e 40 metros, visando investigar se ocorre conexão total ou parcial em casos reais. É possível avaliar o que acontece ao longo da conexão nessas vigas longas por meio de modelos numéricos. A partir de estudos de casos, pode-se comparar o desempenho da *Crestbeam* com soluções convencionais;
- avaliar o comportamento do *Crestbond* em vigas mistas *Crestbeam* contínuas, verificando-se a influência da fissuração longitudinal e transversal do concreto na capacidade resistente da conexão;
- avaliar o comportamento do *Crestbond* submetido a esforços de tração e esforços combinados de cisalhamento e tração;
- investigar o comportamento do *Crestbond* quando sujeito a cargas cíclicas, no sentido de obter os fatores de concentração de tensões local e global, para calcular a amplitude de tensão geométrica no ponto crítico da base do conector;
- realizar ensaios de flexão de vigas *Crestbeam* com o conector *Crestbond* próximo à superfície de concreto;

- investigar o comportamento da *Crestbeam* associada a materiais de elevado desempenho: concreto de ultra alto desempenho (UHPC), concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC), aços de elevadas resistências (HSS) etc.;
- e investigar o comportamento do *Crestbond* associado a fôrmas de aço incorporadas para aplicação em lajes mistas, em vigas caixão de aço, em painéis ortotrópicos etc.

4.3 Referências

1. Petruski, M. C. Avaliação numérico-experimental do comportamento de vigas mistas pré-moldadas tipo *Crestbeam* sujeitas a flexão simples. 2021. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, 2021. <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.002>.
2. Feldmann M. *et al.* Konsistentes Bemessungsmodell für fertigungsoptimierte Verbunddübelleisten - Grundlagen für DAST-Richtlinie und Überführung im Eurocode 4: Abschlussbericht P 1208; 2021.
3. German Institute for Building Technology (DIBT), Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, n. Z-26.4-56, Berlin, 2023
4. Almeida, R. L. J.; Veríssimo, G. S.; Ribeiro, J. C. L.; Paes, J. L. R.; Caldas, R. B; Cardoso, H. S.; Fakury, R. H. Assessing the bearing capacity of *Crestbond* shear connectors to concrete pry-out. IBRACON Structures and Materials Journal 2023; 16(1):e16107. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000100007>.
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - NBR 8800:2008: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios - Procedimento, 2008.

APÊNDICE A – Avaliação dos modos de falha do *Crestbond*

Neste Apêndice encontra-se um estudo dos modelos semiempíricos de predição da capacidade resistente do *Crestbond* considerando as três equações de cálculo apresentadas na Tabela A.1. Para isso, foi realizado um estudo de variação de parâmetros levando-se em conta as prescrições construtivas da aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [1]. Os parâmetros variados estão apresentados na Tabela A.2.

Tabela A.1 - Modelos semiempíricos do *Crestbond*.

Referências	Modo de falha	Equações
Cardoso <i>et al.</i> [2]	Cisalhamento dos pinos de concreto:	$P_{sh,k} = \eta_f (h_D + c_u) t_w f_c + \eta_D e_x^2 \sqrt{f_c} (1 + \rho_D)$
	(i) alto confinamento, (ii) baixo confinamento e (iii) sem armadura passante.	$\eta_D = \begin{cases} 2,507 - e_x/400 \rightarrow (i) \\ 1,176 - e_x/400 \rightarrow (ii) \\ 0,873 - e_x/400 \rightarrow (iii) \end{cases}$
Almeida <i>et al.</i> [3]	<i>Pry-out</i>	$P_{po,k} = \frac{37}{\eta} \chi_x h_{po}^{1.5} \sqrt{f_c} (1 + \rho_{d,i})$
Almeida <i>et al.</i> [4]	Falha dos pinos de aço	$P_{pl,k} = 0,233 e_x t_w f_y$

Fonte: o autor.

Tabela A.2 – Parâmetros variados.

t_w (mm)	f_c (MPa)	f_y (MPa)	<i>Cob.</i> (mm)	e_x (mm)
6,3	20	250	20	150
8,0	25	300	25	200
9,5	30	350	30	250
12,5	35	400	35	300
16,0	40	450	40	350
19,0	45	500	45	400
22,4	50	-	50	450
-	-	-	55	500
-	-	-	60	-

Fonte: o autor.

A partir da variação dos parâmetros apresentados na Tabela A.2, encontram-se 21.618 possibilidades de conexões com o *Crestbond*. No entanto, somente em 8.866 modelos paramétricos (41%) os limites construtivos (Tabela 2.6) apontados em Z-26.4-56 [1] são verificados.

Diferentes situações de confinamento do concreto foram estudadas, variando o fator de junção das superfícies cisalhantes dos *composite dowels* (η_D). Os resultados estão apresentados na Tabela A.3. Nota-se que em situação de alto confinamento do concreto do conector, o modo de falha por cisalhamento dos pinos de concreto é irrelevante para o *Crestbond*. O mesmo

resultado é obtido utilizando-se o fator η_D igual a 2,0, valor prescrito pela aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [1] para o conector *Puzzle*. Em situação de baixo confinamento, no entanto, o cisalhamento dos pinos de concreto é um modo de falha relevante e poderia ocorrer em 52% dos casos analisados. Ressalta-se que, segundo o documento alemão, as vigas mistas de aço e concreto com *composite dowels* devem ter armadura de confinamento para garantir um comportamento dúctil.

Tabela A.3 – Resultados da avaliação dos modelos semiempíricos do *Crestbond*.

Modos de falha	Alto confinamento ($\eta_D = 2,507$)		Fator <i>Puzzle</i> ($\eta_D = 2,0$)		Baixo confinamento ($\eta_D = 1,176$)	
Cisalhamento do pino de concreto	0	0%	0	0%	4.654	52%
<i>Pry-out</i> do concreto	6.639	75%	6.639	75%	2.364	27%
Falha do pino de aço	2.227	25%	2.227	25%	1.848	21%
TOTAL	8.866	100%	8.866	100%	8.866	100%

Fonte: o autor.

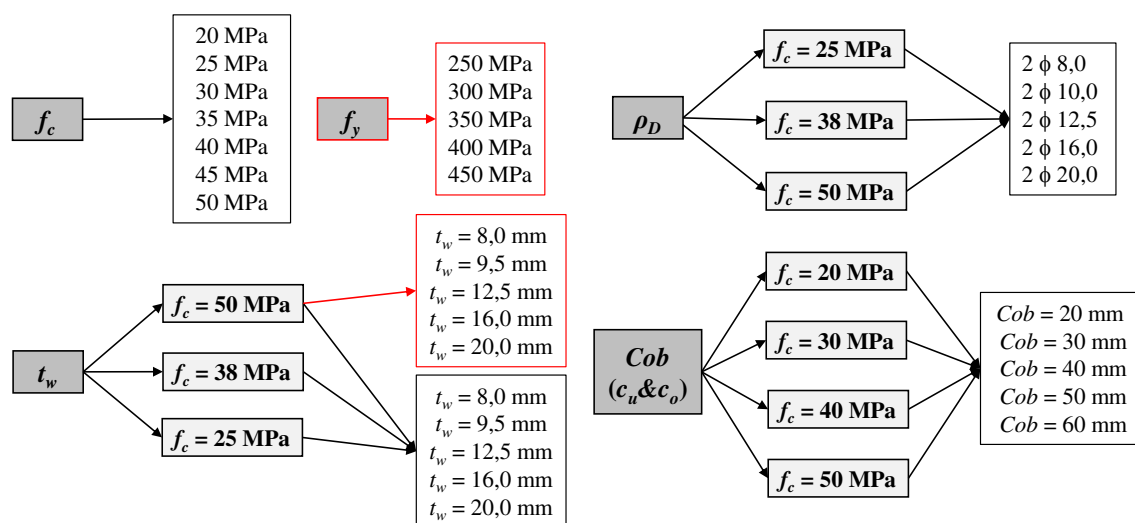
REFERÊNCIAS:

1. German Institute for Building Technology (DIBT). Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, n. Z-26.4-56, Berlin, 2023.
2. Cardoso, H. S.; Caldas, R. B.; Fakury, R. H.; Veríssimo, G. S.; Almeida, R. L. J. Modelo de Cálculo para o Cisalhamento do Concreto nos Conectores *Crestbond*. Revista da Estrutura de Aço 2018; 7(3):280-299. <http://dx.doi.org/10.17648/aco-2238-9377-7-3-3>.
3. Almeida, R. L. J.; Veríssimo, G. S.; Ribeiro, J. C. L.; Paes, J. L. R.; Caldas, R. B.; Cardoso, H. S.; Fakury, R. H. Assessing the bearing capacity of *Crestbond* shear connectors to concrete *pry-out*. IBRACON Structures and Materials Journal 2023; 16(1):e16107. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000100007>.
4. Almeida, R. L. J.; Veríssimo, G. S.; Ribeiro, J. C. L.; Paes, J. L. R.; Petruski, M. C.; Caldas, R. B. Capacidade resistente do conector *Crestbond* à falha do aço desencadeada por um mecanismo combinado de cisalhamento e flexão. Revista da Estrutura de Aço 2019; 9(1):61-80.

APÊNDICE B – Estudo de variação de parâmetros da *Crestbeam*: planilha eletrônica de cálculo

Neste Apêndice encontra-se a planilha eletrônica desenvolvida para calcular a capacidade resistente das vigas mistas de aço e concreto tipo *Crestbeam*. Nas tabelas ilustradas encontram-se os cálculos semiempíricos e analíticos de todos os 67 modelos do estudo de variação de parâmetros (Fig. B.1) apresentado ao longo do Capítulo 3.

Fig. B.1 - Estudo de variação de parâmetros das vigas *Crestbeam*
(em vermelho: falha nos pinos de aço do conector *Crestbond*).



Fonte: o autor.

A seguir, é apresentada a lista de símbolos referentes às células de cálculo da planilha:

- f_y - tensão de escoamento do aço;
- E - módulo de elasticidade do aço;
- $f_{y,s}$ - resistência do aço da armadura ao escoamento;
- E_s - módulo de elasticidade do aço do perfil;
- f_{cm} - resistência média do concreto à compressão;
- α_E - parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade do concreto;
- E_{cm} - módulo de elasticidade médio do concreto;
- d_A - altura do perfil de aço até a face inferior da laje de concreto;
- b_f - largura da mesa do perfil de aço;
- t_f - espessura da mesa do perfil de aço;
- t_w - espessura da alma do perfil de aço;
- R - raio de concordância;

h_A	- altura do perfil de aço, considerando a face superior da mesa do perfil até a face inferior da laje de concreto;
A_{A1}	- área do perfil de aço desconsiderando a região imersa no concreto;
e_x	- passo do conector;
h_D	- altura do dente de aço do <i>Crestbond</i> ;
b	- menor lado do trapézio no qual o <i>Crestbond</i> é inscrito;
B	- maior lado do trapézio no qual o <i>Crestbond</i> é inscrito;
R_{cr}	- raio de curvatura do dente do <i>Crestbond</i> ;
A_D	- área do pino de concreto do <i>Crestbond</i> ;
c_u ou c_b	- cobertura inferior do <i>Crestbond</i> ;
t_c	- espessura da laje de concreto
c_o ou c_t	- cobertura inferior do <i>Crestbond</i> ;
b_c	- largura da laje de concreto
b_{ef}	- largura efetiva da laje de concreto;
n_b	- número de barras de armaduras passantes através dos pinos de concreto;
ϕ_b	- diâmetro das barras de armaduras passantes através dos pinos de concreto;
A_b	- área das barras de armaduras passantes através dos pinos de concreto;
n_t	- número de barras de armaduras superiores;
ϕ_t	- diâmetro das barras de armaduras superiores;
A_t	- área das barras de armaduras superiores;
A_{sf}	- área efetiva das barras de armaduras ($A_{sf} = A_b + A_t$);
η_D	- fator que considera o efeito de junção das superfícies cisalhantes do <i>Crestbond</i> ;
ρ_D	- taxa de armadura passante através dos pinos de concreto;
P_{sh}	- resistência do <i>Crestbond</i> ao cisalhamento dos pinos de concreto;
h_{po}	- altura do cone de <i>pry-out</i> do <i>Crestbond</i> ;
χ_x	- fator que considera a sobreposição longitudinal dos cones de <i>pry-out</i> ;
$\rho_{D,i}$	- taxa de armadura efetiva;
P_{po}	- resistência do <i>Crestbond</i> ao <i>pry-out</i> do concreto;
P_{pl}	- resistência a falha do pino de aço do <i>Crestbond</i> por mecanismo combinado de cisalhamento e flexão;
N_{sc}	- número total de pinos mistos da <i>Crestbeam</i> ;
$N_{sc,ef}$	- número total efetivo de pinos mistos da <i>Crestbeam</i> ;
Q	- resistência do <i>Crestbond</i> ;
$S_{m\acute{a}x}$ da A_t	- espaçamento máximo da armadura superior (estribo de confinamento);
$A_{b,m\acute{i}n}$	- armadura passante mínima através dos pinos de concreto;

d	- altura total do perfil de aço;
h	- altura do perfil de aço, considerando a face superior da mesa do perfil até a face inferior do início do dente do conector;
y_a	- altura do centro geométrico do perfil de aço;
I_x	- inércia da seção transversal do perfil de aço na direção x;
I_y	- inércia da seção transversal do perfil de aço na direção y;
y_c	- altura do centro geométrico do concreto;
z_{EL}	- braço de alavanca da seção mista em regime elástico;
A_A	- área total do perfil de aço;
$P_{lin,ap}$	- peso linear aparente do aço;
$P_{lin,real}$	- peso linear real do aço;
A_c	- área da seção de concreto;
C_I	- força de compressão na seção mista quando a LNP estiver a uma altura c_u da face inferior da laje de concreto;
T_I	- força de tração na seção mista quando a LNP estiver a uma altura c_u da face inferior da laje de concreto;
C_{II}	- força de compressão na seção mista quando a LNP estiver na face inferior da laje de concreto;
T_{II}	- força de tração na seção mista quando a LNP estiver na face inferior da laje de concreto;
$C_{II,c}$	- força máxima resistida pela laje de concreto;
y_{LNP}	- altura da linha neutra plástica da seção mista;
T_a	- força de tração na seção de aço;
C_a	- força de compressão na seção de aço;
C_c	- força de compressão na seção de concreto;
y_T	- altura do centro geométrico da seção de aço tracionada;
y_{Ca}	- altura do centro geométrico da seção de aço comprimida;
y_{Cc}	- altura do centro geométrico da seção de concreto comprimida;
$M_{PL,FSC}$	- momento de plastificação em situação de conexão total;
$P_{ult,FSC}$	- força máxima resistida pela viga mista quando em situação de conexão total;
$Q_{mín,FSC}$	- resistência mínima do conector em situação de conexão total;
η	- grau de conexão;
$C_{c,PSC}$	- força efetivamente transmitida para o concreto em caso de conexão parcial (equivale à resistência do conector caso se verifique conexão parcial);
$Y_{LNP,PSC,c}$	- altura da linha neutra plástica do concreto quando em situação de conexão parcial;
$C_{a,PSC}$	- força de compressão no aço quando em situação de conexão parcial;

$T_{a,PSC}$	- força de tração no aço quando em situação de conexão parcial;
$Y_{LNP,PSC,a}$	- altura da linha neutra plástica do aço quando em situação de conexão parcial;
$y_{T,PSC}$	- altura do centro geométrico da seção de aço tracionada quando em situação de conexão parcial;
$y_{Ca,PSC}$	- altura do centro geométrico da seção de aço comprimida quando em situação de conexão parcial;
$M_{PL,PSC}$	- momento de plastificação da seção mista quando em situação de conexão parcial;
$P_{ult,PSC}$	- força máxima resistida pela viga mista quando em situação de conexão parcial;
$y_{LNP,a}$	- altura da linha neutra plástica da seção de aço isolada;
y_{at}	- altura do centro geométrico da porção tracionada da seção de aço isolada;
y_{ac}	- altura do centro geométrico da porção comprimida da seção de aço isolada;
z_a	- braço de alavanca da seção de aço isolada;
$M_{pl,a,R}$	- momento de plastificação da seção de aço isolada;
δ_u	- capacidade última de deslizamento do Crestbond;
η_{min}	- grau de conexão mínimo;
d_{mista}	- altura total da seção mista;
K	- relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto (E/E_{cm});
$b_{ef,1}$	- largura da laje homogeneizada na região onde o conector é imerso no concreto;
$b_{ef,2}$	- largura da laje homogeneizada;
$y_{mista,EL}$	- altura do centro geométrico da seção mista homogeneizada em regime elástico;
$I_{x,mista}$	- momento de inércia da seção mista homogeneizada na direção x;
$I_{x,ef}$	- momento de inércia efetivo da seção mista homogeneizada na direção x;
EI_{mista}	- rigidez elástica da seção mista (produto do módulo de elasticidade do aço pelo momento de inércia efetivo da seção mista homogeneizada na direção x);
$W_{mista,inf}$	- módulo de resistência elástico inferior da seção mista;
$W_{mista,sup}$	- módulo de resistência elástico superior da seção mista;
W_{ef}	- módulo de resistência elástico efetivo;
M_{el}	- momento fletor resistente em regime elástico;
P_{el}	- força máxima resistida pela viga mista quando em regime elástico;
δ_{el}	- deslocamento máximo vertical em regime elástico;

Tabela B.1 - Propriedades dos materiais.

#	Designação	f_y (MPa)	E (MPa)	$f_{y,s}$ (MPa)	E_s (MPa)	f_{cm} (MPa)	α_E	E_{cm} (MPa)
1	V4-AC-fc20	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
2	V4-AC-fc25	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
3	V4-AC-fc30	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
4	V4-AC-fc35	544	200000	500	210000	35,0	1	32036
5	V4-AC-fc40	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
6	V4-AC-fc45	544	200000	500	210000	45,0	1	34545
7	V4-AC-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
8	V4-AC-fy250	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
9	V4-AC-fy300	300	200000	500	210000	50,0	1	35654
10	V4-AC-fy350	350	200000	500	210000	50,0	1	35654
11	V4-AC-fy400	400	200000	500	210000	50,0	1	35654
12	V4-AC-fy450	450	200000	500	210000	50,0	1	35654
13	V4-AC-fc25-2 ϕ 8,0	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
14	V4-AC-fc25-2 ϕ 10,0	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
15	V4-AC-fc25-2 ϕ 12,5	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
16	V4-AC-fc25-2 ϕ 16,0	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
17	V4-AC-fc25-2 ϕ 20,0	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
18	V4-AC-fc38-2 ϕ 8,0	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
19	V4-AC-fc38-2 ϕ 10,0	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
20	V4-AC-fc38-2 ϕ 12,5	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
21	V4-AC-fc38-2 ϕ 16,0	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
22	V4-AC-fc38-2 ϕ 20,0	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
23	V4-AC-fc50-2 ϕ 8,0	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
24	V4-AC-fc50-2 ϕ 10,0	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
25	V4-AC-fc50-2 ϕ 12,5	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
26	V4-AC-fc50-2 ϕ 16,0	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
27	V4-AC-fc50-2 ϕ 20,0	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
28	V4-AC-fc25-tw8	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
29	V4-AC-fc25-tw9.5	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
30	V4-AC-fc25-tw12.5	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
31	V4-AC-fc25-tw16	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
32	V4-AC-fc25-tw19	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
33	V4-AC-fc38-tw8	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
34	V4-AC-fc38-tw9.5	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
35	V4-AC-fc38-tw12.5	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
36	V4-AC-fc38-tw16	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
37	V4-AC-fc38-tw19	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
38	V4-AC-fc50-tw8	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
39	V4-AC-fc50-tw9.5	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
40	V4-AC-fc50-tw12.5	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
41	V4-AC-fc50-tw16	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
42	V4-AC-fc50-tw19	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
43	V4-AC-tw8-faco	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
44	V4-AC-tw9,5-faco	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
45	V4-AC-tw12,5-faco	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
46	V4-AC-tw16-faco	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
47	V4-AC-tw19-faco	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
48	V4-AC-fc20-c20	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
49	V4-AC-fc20-c30	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
50	V4-AC-fc20-c40	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
51	V4-AC-fc20-c50	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
52	V4-AC-fc20-c60	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
53	V4-AC-fc30-c20	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
54	V4-AC-fc30-c30	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
55	V4-AC-fc30-c40	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
56	V4-AC-fc30-c50	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
57	V4-AC-fc30-c60	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
58	V4-AC-fc40-c20	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
59	V4-AC-fc40-c30	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
60	V4-AC-fc40-c40	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
61	V4-AC-fc40-c50	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
62	V4-AC-fc40-c60	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
63	V4m-AC-c25-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
64	V4m-AC-c30-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
65	V4m-AC-c35-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
66	V4m-AC-c40-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
67	V4m-AC-c45-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654

Fonte: o autor.

Tabela B.2 - Geometria do perfil de aço T invertido.

#	Vão (m)	d _A (mm)	b _r (mm)	t _r (mm)	t _w (mm)	R (mm)	h _A (mm)	A _{A1} (cm ²)	h/t _w	h/t _w ≤ 3,76*raiz(E/f _y)
1	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
2	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
3	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
4	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
5	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
6	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
7	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
8	4	400	170	16,0	10,0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
9	4	400	170	16,0	10,0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
10	4	400	170	16,0	10,0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
11	4	400	170	16,0	10,0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
12	4	400	170	16,0	10,0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
13	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
14	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
15	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
16	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
17	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
18	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
19	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
20	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
21	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
22	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
23	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
24	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
25	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
26	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
27	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
28	4	240	170	19,0	8,0	0	221,0	49,98	27,63	Viga Compacta
29	4	240	170	19,0	9,5	0	221,0	53,30	23,26	Viga Compacta
30	4	240	170	19,0	12,5	0	221,0	59,93	17,68	Viga Compacta
31	4	240	170	19,0	16,0	0	221,0	67,66	13,81	Viga Compacta
32	4	240	170	19,0	19,0	0	221,0	74,29	11,63	Viga Compacta
33	4	240	170	19,0	8,0	0	221,0	49,98	27,63	Viga Compacta
34	4	240	170	19,0	9,5	0	221,0	53,30	23,26	Viga Compacta
35	4	240	170	19,0	12,5	0	221,0	59,93	17,68	Viga Compacta
36	4	240	170	19,0	16,0	0	221,0	67,66	13,81	Viga Compacta
37	4	240	170	19,0	19,0	0	221,0	74,29	11,63	Viga Compacta
38	4	240	170	19,0	8,0	0	221,0	49,98	27,63	Viga Compacta
39	4	240	170	19,0	9,5	0	221,0	53,30	23,26	Viga Compacta
40	4	240	170	19,0	12,5	0	221,0	59,93	17,68	Viga Compacta
41	4	240	170	19,0	16,0	0	221,0	67,66	13,81	Viga Compacta
42	4	240	170	19,0	19,0	0	221,0	74,29	11,63	Viga Compacta
43	4	400	170	19,0	8,0	0	381,0	62,78	47,63	Viga Compacta
44	4	400	170	19,0	9,5	0	381,0	68,50	40,11	Viga Compacta
45	4	400	170	19,0	12,5	0	381,0	79,93	30,48	Viga Compacta
46	4	400	170	19,0	16,0	0	381,0	93,26	23,81	Viga Compacta
47	4	400	170	19,0	19,0	0	381,0	104,69	20,05	Viga Compacta
48	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
49	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
50	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
51	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
52	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
53	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
54	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
55	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
56	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
57	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
58	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
59	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
60	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
61	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
62	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
63	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
64	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
65	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
66	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
67	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta

Fonte: o autor.

Tabela B.3 - Propriedades geométricas do *Crestbond* e da laje de concreto armado.

#	e_x (mm)	h_D (mm)	b (mm)	B (mm)	R_{cr} (mm)	A_D (cm ²)	c_u/c_b (mm)	t_c (mm)	c_o/c_t (mm)	b_c (mm)	b_{ef} (mm)	Verif. $b_c \leq b_{ef}$
1	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
2	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
3	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
4	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
5	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
6	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
7	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
8	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
9	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
10	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
11	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
12	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
13	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
14	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
15	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
16	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
17	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
18	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
19	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
20	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
21	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
22	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
23	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
24	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
25	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
26	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
27	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
28	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
29	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
30	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
31	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
32	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
33	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
34	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
35	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
36	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
37	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
38	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
39	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
40	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
41	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
42	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
43	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
44	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
45	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
46	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
47	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
48	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
49	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
50	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
51	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
52	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!
53	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
54	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
55	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
56	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
57	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!
58	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
59	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
60	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
61	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
62	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!
63	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
64	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
65	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
66	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
67	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!

Fonte: o autor.

Tabela B.4 - Armadura passante (A_b) e armadura superior (A_t).

#	n_b	\varnothing_b (mm)	A_b (cm ²)	n_t	\varnothing_t (mm)	A_t (cm ²)	A_{sf} (cm ²)	Arm. Conf.
1	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
2	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
3	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
4	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
5	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
6	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
7	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
8	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
9	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
10	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
11	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
12	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
13	2	8,0	1,01	1	8,0	0,50	1,51	Sim
14	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
15	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
16	2	16,0	4,02	1	8,0	0,50	4,52	Sim
17	2	20,0	6,28	1	8,0	0,50	6,79	Sim
18	2	8,0	1,01	1	8,0	0,50	1,51	Sim
19	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
20	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
21	2	16,0	4,02	1	8,0	0,50	4,52	Sim
22	2	20,0	6,28	1	8,0	0,50	6,79	Sim
23	2	8,0	1,01	1	8,0	0,50	1,51	Sim
24	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
25	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
26	2	16,0	4,02	1	8,0	0,50	4,52	Sim
27	2	20,0	6,28	1	8,0	0,50	6,79	Sim
28	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
29	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
30	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
31	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
32	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
33	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
34	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
35	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
36	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
37	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
38	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
39	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
40	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
41	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
42	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
43	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
44	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
45	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
46	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
47	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
48	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
49	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
50	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
51	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
52	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
53	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
54	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
55	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
56	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
57	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
58	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
59	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
60	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
61	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
62	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
63	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
64	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
65	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
66	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
67	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim

Fonte: o autor.

Tabela B.5 - Resistência do Crestbond.

#	η_D	ρ_D	P_{sh} (kN/ex)	h_{po} (mm)	χ_x	$\rho_{D,i}$	P_{po} (kN/ex)	P_{pl} (kN/ex)	Falha	N_{sc}	$N_{sc,ef}$	Q (kN)
1	2,132	0,232	264,4	35,6	0,94	0,089	94,3	304,2	PO	28,0	28,0	1320,7
2	2,132	0,217	292,0	35,6	0,94	0,084	106,3	304,2	PO	28,0	28,0	1488,4
3	2,132	0,206	316,8	35,6	0,94	0,079	117,5	304,2	PO	28,0	28,0	1645,7
4	2,132	0,196	339,5	35,6	0,94	0,076	128,3	304,2	PO	28,0	28,0	1795,9
5	2,132	0,189	360,6	35,6	0,94	0,073	138,7	304,2	PO	28,0	28,0	1941,2
6	2,132	0,182	380,4	35,6	0,94	0,070	148,8	304,2	PO	28,0	28,0	2083,1
7	2,132	0,176	399,1	35,6	0,94	0,068	158,8	304,2	PO	28,0	28,0	2222,6
8	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	116,5	Aço	21,0	21,0	1223,3
9	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	139,8	Aço	21,0	21,0	1467,9
10	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	163,1	Aço	21,0	21,0	1712,6
11	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	186,4	Aço	21,0	21,0	1957,2
12	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	209,7	Aço	21,0	21,0	2201,9
13	2,132	0,139	273,2	35,6	0,94	0,061	104,1	304,2	PO	28,0	28,0	1457,1
14	2,132	0,217	292,0	35,6	0,94	0,084	106,3	304,2	PO	28,0	28,0	1488,4
15	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	304,2	PO	28,0	28,0	1537,3
16	2,132	0,556	373,3	35,6	0,94	0,182	116,0	304,2	PO	28,0	28,0	1624,0
17	2,132	0,869	448,3	35,6	0,94	0,273	124,9	304,2	PO	28,0	28,0	1749,1
18	2,132	0,123	332,0	35,6	0,94	0,054	132,0	304,2	PO	28,0	28,0	1848,3
19	2,132	0,192	352,4	35,6	0,94	0,074	134,5	304,2	PO	28,0	28,0	1883,6
20	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	304,2	PO	28,0	28,0	1938,7
21	2,132	0,491	440,8	35,6	0,94	0,161	145,5	304,2	PO	28,0	28,0	2036,3
22	2,132	0,766	522,4	35,6	0,94	0,241	155,5	304,2	PO	28,0	28,0	2177,3
23	2,132	0,113	377,5	35,6	0,94	0,049	156,0	304,2	PO	28,0	28,0	2184,1
24	2,132	0,176	399,1	35,6	0,94	0,068	158,8	304,2	PO	28,0	28,0	2222,6
25	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	304,2	PO	28,0	28,0	2282,8
26	2,132	0,452	492,4	35,6	0,94	0,148	170,7	304,2	PO	28,0	28,0	2389,5
27	2,132	0,706	578,6	35,6	0,94	0,222	181,7	304,2	PO	28,0	28,0	2543,5
28	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	152,1	PO	28,0	28,0	1537,3
29	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	180,6	PO	28,0	28,0	1537,3
30	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	237,7	PO	28,0	28,0	1537,3
31	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	304,2	PO	28,0	28,0	1537,3
32	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	361,2	PO	28,0	28,0	1537,3
33	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	152,1	PO	28,0	28,0	1938,7
34	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	180,6	PO	28,0	28,0	1938,7
35	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	237,7	PO	28,0	28,0	1938,7
36	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	304,2	PO	28,0	28,0	1938,7
37	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	361,2	PO	28,0	28,0	1938,7
38	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	152,1	Aço	28,0	28,0	2129,4
39	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	180,6	PO	28,0	28,0	2282,8
40	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	237,7	PO	28,0	28,0	2282,8
41	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	304,2	PO	28,0	28,0	2282,8
42	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	361,2	PO	28,0	28,0	2282,8
43	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	93,2	Aço	21,0	21,0	978,6
44	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	110,7	Aço	21,0	21,0	1162,1
45	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	145,6	Aço	21,0	21,0	1529,1
46	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	186,4	Aço	21,0	21,0	1957,2
47	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	221,4	Aço	21,0	21,0	2324,2
48	2,132	0,363	292,4	30,6	1,00	0,139	83,9	304,2	PO	28,0	28,0	1175,3
49	2,132	0,363	292,4	40,6	0,82	0,118	103,4	304,2	PO	28,0	28,0	1447,0
50	2,132	0,363	292,4	50,6	0,66	0,102	113,8	304,2	PO	28,0	28,0	1592,8
51	2,132	0,363	292,4	60,6	0,55	0,090	123,2	304,2	PO	28,0	28,0	1724,1
52	2,132	0,363	292,4	70,6	0,47	0,080	131,8	304,2	PO	28,0	28,0	1844,8
53	2,132	0,321	347,2	30,6	1,00	0,123	104,1	304,2	PO	28,0	28,0	1457,7
54	2,132	0,321	347,2	40,6	0,82	0,104	128,4	304,2	PO	28,0	28,0	1798,2
55	2,132	0,321	347,2	50,6	0,66	0,090	141,6	304,2	PO	28,0	28,0	1982,3
56	2,132	0,321	347,2	60,6	0,55	0,080	153,4	304,2	PO	28,0	28,0	2148,2
57	2,132	0,321	347,2	70,6	0,47	0,071	164,3	304,2	PO	28,0	28,0	2300,7
58	2,132	0,295	392,8	30,6	1,00	0,113	122,4	304,2	PO	28,0	28,0	1714,3
59	2,132	0,295	392,8	40,6	0,82	0,095	151,2	304,2	PO	28,0	28,0	2117,4
60	2,132	0,295	392,8	50,6	0,66	0,083	166,9	304,2	PO	28,0	28,0	2336,4
61	2,132	0,295	392,8	60,6	0,55	0,073	181,0	304,2	PO	28,0	28,0	2533,9
62	2,132	0,295	392,8	70,6	0,47	0,065	194,0	304,2	PO	28,0	28,0	2715,4
63	2,132	0,276	432,7	30,6	1,00	0,106	139,9	304,2	PO	28,0	28,0	1958,4
64	2,132	0,276	432,7	40,6	0,82	0,089	172,9	304,2	PO	28,0	28,0	2421,3
65	2,132	0,276	432,7	50,6	0,66	0,077	191,0	304,2	PO	28,0	28,0	2673,5
66	2,132	0,276	432,7	60,6	0,55	0,068	207,2	304,2	PO	28,0	28,0	2901,0
67	2,132	0,276	432,7	70,6	0,47	0,061	222,2	304,2	PO	28,0	28,0	3110,2

Fonte: o autor.

Tabela B.6 - Verificações Z-26.4-56:2023.

#	t_w/h_D	$e_x \geq 2,5h_{po}$	$S_{m\acute{a}x}$ da A_t	Verif. S_{max}	$A_{b,min}$ (cm ²)	Verif. $A_{b,min}$
1	OK!	OK!	160,2	OK!	0,94	OK!
2	OK!	OK!	160,2	OK!	1,06	OK!
3	OK!	OK!	160,2	OK!	1,18	OK!
4	OK!	OK!	160,2	OK!	1,28	OK!
5	OK!	OK!	160,2	OK!	1,39	OK!
6	OK!	OK!	160,2	OK!	1,49	OK!
7	OK!	OK!	160,2	OK!	1,59	Não OK!
8	OK!	OK!	287,1	OK!	1,17	OK!
9	OK!	OK!	287,1	OK!	1,40	OK!
10	OK!	OK!	287,1	OK!	1,63	OK!
11	OK!	OK!	287,1	OK!	1,86	OK!
12	OK!	OK!	287,1	OK!	2,10	OK!
13	OK!	OK!	160,2	OK!	1,04	Não OK!
14	OK!	OK!	160,2	OK!	1,06	OK!
15	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
16	OK!	OK!	160,2	OK!	1,16	OK!
17	OK!	OK!	160,2	OK!	1,25	OK!
18	OK!	OK!	160,2	OK!	1,32	Não OK!
19	OK!	OK!	160,2	OK!	1,35	OK!
20	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
21	OK!	OK!	160,2	OK!	1,45	OK!
22	OK!	OK!	160,2	OK!	1,56	OK!
23	OK!	OK!	160,2	OK!	1,56	Não OK!
24	OK!	OK!	160,2	OK!	1,59	Não OK!
25	OK!	OK!	160,2	OK!	1,63	OK!
26	OK!	OK!	160,2	OK!	1,71	OK!
27	OK!	OK!	160,2	OK!	1,82	OK!
28	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
29	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
30	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
31	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
32	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
33	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
34	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
35	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
36	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
37	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
38	OK!	OK!	160,2	OK!	1,52	OK!
39	OK!	OK!	160,2	OK!	1,63	OK!
40	OK!	OK!	160,2	OK!	1,63	OK!
41	OK!	OK!	160,2	OK!	1,63	OK!
42	OK!	OK!	160,2	OK!	1,63	OK!
43	OK!	OK!	287,1	OK!	0,93	OK!
44	OK!	OK!	287,1	OK!	1,11	OK!
45	OK!	OK!	287,1	OK!	1,46	OK!
46	OK!	OK!	287,1	OK!	1,86	OK!
47	OK!	OK!	287,1	OK!	2,21	OK!
48	OK!	OK!	137,7	Não OK!	0,84	OK!
49	OK!	OK!	182,7	OK!	1,03	OK!
50	OK!	OK!	227,7	OK!	1,14	OK!
51	OK!	Não OK!	272,7	OK!	1,23	OK!
52	OK!	Não OK!	300,0	OK!	1,32	OK!
53	OK!	OK!	137,7	Não OK!	1,04	OK!
54	OK!	OK!	182,7	OK!	1,28	OK!
55	OK!	OK!	227,7	OK!	1,42	OK!
56	OK!	Não OK!	272,7	OK!	1,53	OK!
57	OK!	Não OK!	300,0	OK!	1,64	OK!
58	OK!	OK!	137,7	Não OK!	1,22	OK!
59	OK!	OK!	182,7	OK!	1,51	OK!
60	OK!	OK!	227,7	OK!	1,67	OK!
61	OK!	Não OK!	272,7	OK!	1,81	OK!
62	OK!	Não OK!	300,0	OK!	1,94	OK!
63	OK!	OK!	137,7	Não OK!	1,40	OK!
64	OK!	OK!	182,7	OK!	1,73	OK!
65	OK!	OK!	227,7	OK!	1,91	OK!
66	OK!	Não OK!	272,7	OK!	2,07	OK!
67	OK!	Não OK!	300,0	OK!	2,22	OK!

Fonte: o autor.

Tabela B.7 - Propriedades da seção de aço - considerando a altura total do perfil igual a $d = d_A + c_u$.

#	d (mm)	h (mm)	y _a (mm)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	y _c (mm)	z _{EL} (mm)	A _A (cm ²)	P _{lin,ap} (kg/m)	P _{lin,real} (kg/m)	A _c (cm ²)
1	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
2	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
3	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
4	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
5	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
6	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
7	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
8	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
9	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
10	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
11	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
12	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
13	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
14	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
15	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
16	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
17	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
18	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
19	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
20	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
21	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
22	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
23	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
24	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
25	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
26	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
27	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
28	265,0	246,0	59,67	3149	778,9	300,13	240,5	52,0	40,8	43,0	718,0
29	265,0	246,0	65,12	3569	779,6	300,16	235,0	55,7	43,7	46,3	717,6
30	265,0	246,0	74,12	4326	781,9	300,21	226,1	63,1	49,5	52,9	716,9
31	265,0	246,0	82,28	5109	786,3	300,27	218,0	71,7	56,3	60,6	716,0
32	265,0	246,0	87,85	5720	792,0	300,32	212,5	79,0	62,0	67,3	715,3
33	265,0	246,0	59,67	3149	778,9	300,13	240,5	52,0	40,8	43,0	718,0
34	265,0	246,0	65,12	3569	779,6	300,16	235,0	55,7	43,7	46,3	717,6
35	265,0	246,0	74,12	4326	781,9	300,21	226,1	63,1	49,5	52,9	716,9
36	265,0	246,0	82,28	5109	786,3	300,27	218,0	71,7	56,3	60,6	716,0
37	265,0	246,0	87,85	5720	792,0	300,32	212,5	79,0	62,0	67,3	715,3
38	265,0	246,0	59,67	3149	778,9	300,13	240,5	52,0	40,8	43,0	718,0
39	265,0	246,0	65,12	3569	779,6	300,16	235,0	55,7	43,7	46,3	717,6
40	265,0	246,0	74,12	4326	781,9	300,21	226,1	63,1	49,5	52,9	716,9
41	265,0	246,0	82,28	5109	786,3	300,27	218,0	71,7	56,3	60,6	716,0
42	265,0	246,0	87,85	5720	792,0	300,32	212,5	79,0	62,0	67,3	715,3
43	450,0	431,0	125,67	13790	779,7	496,75	371,1	66,8	52,4	55,3	1154,0
44	450,0	431,0	135,28	15489	781,0	496,79	361,5	73,2	57,5	61,0	1153,3
45	450,0	431,0	150,17	18572	784,9	496,89	346,7	86,2	67,6	72,2	1151,8
46	450,0	431,0	162,73	21821	792,6	497,00	334,3	101,3	79,5	85,3	1150,0
47	450,0	431,0	170,86	24413	802,5	497,09	326,2	114,2	89,6	96,6	1148,5
48	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
49	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
50	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
51	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
52	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4
53	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
54	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
55	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
56	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
57	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4
58	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
59	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
60	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
61	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
62	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4
63	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
64	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
65	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
66	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
67	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4

Fonte: o autor.

Tabela B.8 - Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão total (FSC) - parte 1.

#	C _I (kN)	T _I (kN)	C _{II} (kN)	T _{II} (kN)	C _{II,c} (kN)	a (mm)	x (mm)	y _{LNP} (mm)	Situação LNP
1	1140,0	3647,0	1649,6	3429,4	1432,0	303,9	102,2	137,8	II
2	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
3	1710,0	3647,0	2365,6	3429,4	2148,0	202,6	61,1	178,9	II
4	1995,0	3647,0	2723,6	3429,4	2506,0	173,7	40,5	199,5	II
5	2280,0	3647,0	3081,6	3429,4	2864,0	152,0	20,0	220,0	II
6	2565,0	3647,0	3439,6	3429,4	3222,0	135,1	-0,6	240,2	III
7	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
8	4290,0	1765,0	5890,0	1640,0	5765,0	58,8	-850,0	534,2	I
9	4290,0	2118,0	5915,0	1968,0	5765,0	70,6	-657,8	522,4	I
10	4290,0	2471,0	5940,0	2296,0	5765,0	82,4	-520,6	510,6	I
11	4290,0	2824,0	5965,0	2624,0	5765,0	94,1	-417,6	498,9	I
12	4290,0	3177,0	5990,0	2952,0	5765,0	105,9	-337,6	487,1	I
13	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
14	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
15	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
16	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
17	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
18	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
19	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
20	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
21	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
22	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
23	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
24	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
25	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
26	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
27	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
28	1425,0	2827,7	1903,8	2718,9	1795,0	188,5	93,6	146,4	II
29	1425,0	3028,4	1923,3	2899,2	1794,1	201,9	94,4	145,6	II
30	1425,0	3429,9	1962,2	3259,9	1792,2	228,7	95,4	144,6	II
31	1425,0	3898,3	2007,6	3680,7	1790,0	259,9	96,1	143,9	II
32	1425,0	4299,8	2046,5	4041,4	1788,1	286,7	96,5	143,5	II
33	2166,0	2827,7	2837,2	2718,9	2728,4	124,0	-13,6	243,8	III
34	2166,0	3028,4	2856,2	2899,2	2727,0	132,8	4,2	235,8	II
35	2166,0	3429,9	2894,1	3259,9	2724,1	150,4	26,9	213,1	II
36	2166,0	3898,3	2938,4	3680,7	2720,8	171,0	42,6	197,4	II
37	2166,0	4299,8	2976,4	4041,4	2718,0	188,6	51,5	188,5	II
38	2850,0	2827,7	3698,8	2718,9	3590,0	94,3	-112,6	265,7	I
39	2850,0	3028,4	3717,3	2899,2	3588,1	100,9	-79,1	260,5	III
40	2850,0	3429,9	3754,4	3259,9	3584,4	114,3	-36,4	251,5	III
41	2850,0	3898,3	3797,6	3680,7	3580,0	129,9	-6,7	242,5	III
42	2850,0	4299,8	3834,7	4041,4	3576,3	143,3	10,0	230,0	II
43	4290,0	1669,5	5870,0	1569,5	5770,0	55,7	-1075,1	537,4	I
44	4290,0	1831,1	5885,0	1712,4	5766,3	61,0	-878,4	532,0	I
45	4290,0	2154,4	5915,0	1998,1	5758,8	71,8	-626,7	521,2	I
46	4290,0	2531,5	5950,0	2331,5	5750,0	84,4	-452,3	508,6	I
47	4290,0	2854,8	5980,0	2617,3	5742,5	95,2	-354,0	497,8	I
48	1080,0	3603,5	1487,7	3429,4	1313,6	300,3	111,5	128,5	II
49	1200,0	3690,5	1811,5	3429,4	1550,4	307,5	92,9	147,1	II
50	1320,0	3777,5	2135,4	3429,4	1787,2	314,8	74,3	165,7	II
51	1440,0	3864,6	2459,2	3429,4	2024,0	322,0	55,7	184,3	II
52	1560,0	3951,6	2783,0	3429,4	2260,8	329,3	37,1	202,9	II
53	1620,0	3603,5	2144,5	3429,4	1970,4	200,2	73,8	166,2	II
54	1800,0	3690,5	2586,7	3429,4	2325,6	205,0	48,4	191,6	II
55	1980,0	3777,5	3029,0	3429,4	2680,8	209,9	23,0	217,0	II
56	2160,0	3864,6	3471,2	3429,4	3036,0	214,7	-2,4	241,2	III
57	2340,0	3951,6	3913,4	3429,4	3391,2	219,5	-27,8	253,9	III
58	2160,0	3603,5	2801,3	3429,4	2627,2	150,1	36,1	203,9	II
59	2400,0	3690,5	3361,9	3429,4	3100,8	153,8	3,9	236,1	II
60	2640,0	3777,5	3922,6	3429,4	3574,4	157,4	-28,3	252,1	III
61	2880,0	3864,6	4483,2	3429,4	4048,0	161,0	-60,5	265,8	III
62	3120,0	3951,6	5043,8	3429,4	4521,6	164,7	-92,7	279,6	III
63	2700,0	3603,5	3458,1	3429,4	3284,0	120,1	-1,6	240,6	III
64	3000,0	3690,5	4137,1	3429,4	3876,0	123,0	-40,7	255,2	III
65	3300,0	3777,5	4816,2	3429,4	4468,0	125,9	-79,7	269,8	III
66	3600,0	3864,6	5495,2	3429,4	5060,0	128,8	-118,7	284,3	III
67	3900,0	3951,6	6174,2	3429,4	5652,0	131,7	-157,7	298,9	III

Fonte: o autor.

Tabela B.9 - Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão total (FSC) - parte 2.

#	T _a (kN)	C _a (kN)	C _c (kN)	Verific.	y _T (mm)	y _{Ca} (mm)	y _{Cc} (mm)	M _{PL,FSC} (kN.m)	P _{ult,FSC} (kN) ou Q _{ult,FSC} (kN/m)	Q _{mín,FSC} (kN)	η
1	2539,5	1107,5	1432,0	OK	25,6	201,4	300,3	588,0	735,0	1432,0	0,92
2	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,83
3	2897,5	749,5	2148,0	OK	41,1	221,9	300,3	692,1	865,2	2148,0	0,77
4	3076,5	570,5	2506,0	OK	50,4	232,2	300,3	729,9	912,3	2506,0	0,72
5	3255,5	391,5	2864,0	OK	60,7	242,5	300,3	757,3	946,6	2864,0	0,68
6	3431,4	215,6	3215,8	OK	71,8	252,6	300,4	774,0	967,5	3215,8	0,65
7	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,66
8	1765,0	0,0	1765,0	OK	146,3	0,0	563,6	736,5	920,6	1765,0	0,69
9	2118,0	0,0	2118,0	OK	146,3	0,0	557,7	871,3	1089,1	2118,0	0,69
10	2471,0	0,0	2471,0	OK	146,3	0,0	551,8	1002,0	1252,5	2471,0	0,69
11	2824,0	0,0	2824,0	OK	146,3	0,0	545,9	1128,5	1410,7	2824,0	0,69
12	3177,0	0,0	3177,0	OK	146,3	0,0	540,1	1250,9	1563,6	3177,0	0,69
13	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,81
14	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,83
15	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,86
16	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,91
17	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,98
18	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,68
19	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,69
20	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,71
21	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,75
22	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,80
23	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,65
24	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,66
25	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,68
26	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,71
27	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,76
28	2311,4	516,4	1795,0	OK	22,1	205,7	300,1	593,8	742,3	1795,0	0,86
29	2411,3	617,2	1794,1	OK	23,3	205,3	300,2	609,1	761,3	1794,1	0,86
30	2611,1	818,9	1792,2	OK	25,2	204,8	300,2	639,8	799,8	1792,2	0,86
31	2844,2	1054,2	1790,0	OK	27,0	204,4	300,3	676,2	845,3	1790,0	0,86
32	3044,0	1255,8	1788,1	OK	28,2	204,2	300,3	707,7	884,6	1788,1	0,86
33	2735,4	92,3	2643,1	OK	51,4	254,4	302,0	681,2	851,5	2643,1	0,73
34	2877,7	150,7	2727,0	OK	52,7	250,4	300,2	704,7	880,9	2727,0	0,71
35	3077,0	352,9	2724,1	OK	49,5	239,1	300,2	749,8	937,2	2724,1	0,71
36	3309,6	588,8	2720,8	OK	47,4	231,2	300,3	796,3	995,4	2720,8	0,71
37	3508,9	790,9	2718,0	OK	46,1	226,7	300,3	833,7	1042,1	2718,0	0,71
38	2827,7	0,0	2827,7	OK	59,7	0,0	312,9	716,0	895,0	2827,7	0,75
39	3005,3	23,1	2982,2	OK	63,1	262,8	310,3	741,8	927,2	2982,2	0,77
40	3338,2	91,8	3246,4	OK	67,2	258,3	305,9	792,3	990,4	3246,4	0,70
41	3702,5	195,8	3506,8	OK	69,5	253,8	301,5	849,5	1061,9	3506,8	0,65
42	3938,0	361,8	3576,3	OK	67,0	247,5	300,3	899,6	1124,5	3576,3	0,64
43	1669,5	0,0	1669,5	OK	125,7	0,0	565,2	733,7	917,2	1669,5	0,59
44	1831,1	0,0	1831,1	OK	135,3	0,0	562,5	782,3	977,8	1831,1	0,63
45	2154,4	0,0	2154,4	OK	150,2	0,0	557,1	876,7	1095,8	2154,4	0,71
46	2531,5	0,0	2531,5	OK	162,7	0,0	550,8	982,4	1228,0	2531,5	0,77
47	2854,8	0,0	2854,8	OK	170,9	0,0	545,4	1069,3	1336,6	2854,8	0,81
48	2458,5	1144,9	1313,6	OK	22,9	194,2	295,2	553,9	692,3	1313,6	0,89
49	2620,4	1070,0	1550,4	OK	28,4	208,5	305,3	622,0	777,6	1550,4	0,93
50	2782,4	995,2	1787,2	OK	34,5	222,8	315,4	689,6	861,9	1787,2	0,89
51	2944,3	920,3	2024,0	OK	41,0	237,1	325,5	756,2	945,3	2024,0	0,85
52	3106,2	845,4	2260,8	OK	48,0	251,4	335,6	822,0	1027,4	2260,8	0,82
53	2786,9	816,5	1970,4	OK	36,3	213,1	295,2	654,4	818,1	1970,4	0,74
54	3008,0	682,4	2325,6	OK	46,2	230,8	305,3	728,6	910,7	2325,6	0,77
55	3229,2	548,4	2680,8	OK	57,1	248,5	315,4	797,4	996,8	2680,8	0,74
56	3439,8	424,8	3015,0	OK	68,3	265,6	326,1	861,0	1076,3	3015,0	0,71
57	3550,0	401,6	3148,4	OK	73,7	276,9	342,4	927,6	1159,5	3148,4	0,73
58	3115,3	488,1	2627,2	OK	53,2	232,0	295,2	723,1	903,9	2627,2	0,65
59	3395,6	294,8	3100,8	OK	68,7	253,1	305,3	788,2	985,2	3100,8	0,68
60	3534,7	242,9	3291,8	OK	76,1	266,0	321,3	853,6	1067,0	3291,8	0,71
61	3654,4	210,2	3444,2	OK	82,4	277,9	338,2	922,2	1152,8	3444,2	0,74
62	3774,1	177,6	3596,5	OK	88,8	289,8	355,0	993,2	1241,5	3596,5	0,75
63	3434,7	168,7	3266,0	OK	72,9	250,3	295,5	757,0	946,3	3266,0	0,60
64	3561,5	128,9	3432,6	OK	79,7	262,6	312,8	823,6	1029,5	3432,6	0,71
65	3688,4	89,2	3599,2	OK	86,7	274,9	330,0	892,6	1115,7	3599,2	0,74
66	3815,2	49,4	3765,8	OK	93,8	287,2	347,2	963,9	1204,9	3765,8	0,77
67	3942,0	9,6	3932,3	OK	101,1	299,4	364,5	1037,5	1296,9	3932,3	0,79

Fonte: o autor.

Tabela B.10 - Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão parcial (PSC) - parte 1.

#	C _{c,PSC} (kN)	Y _{LNP,PSC,c} (mm)	Situação Y _{LNP,PSC,C}	C _{a,PSC} (kN)	T _{a,PSC} (kN)	Y _{LNP,PSC,A} (mm)	Situação Y _{LNP,PSC,A}
1	1320,7	249,5	III	1163,1	2483,9	131,4	II
2	1488,4	260,7	III	1079,3	2567,7	141,0	II
3	1645,7	268,6	I	1000,6	2646,3	150,0	II
4	1795,9	274,5	I	925,5	2721,5	158,7	II
5	1941,2	279,1	I	852,9	2794,1	167,0	II
6	2083,1	282,8	I	781,9	2865,0	175,2	II
7	2222,6	285,9	I	712,2	2934,8	183,2	II
8	1223,3	552,2	I	270,9	1494,1	341,7	II
9	1467,9	544,1	I	325,1	1793,0	341,7	II
10	1712,6	535,9	I	379,2	2091,8	341,7	II
11	1957,2	527,8	I	433,4	2390,6	341,7	II
12	2201,9	519,6	I	487,6	2689,4	341,7	II
13	1457,1	262,8	III	1094,9	2552,0	139,2	II
14	1488,4	260,7	III	1079,3	2567,7	141,0	II
15	1537,3	257,3	III	1054,9	2592,1	143,8	II
16	1624,0	251,4	III	1011,5	2635,5	148,8	II
17	1749,1	242,8	III	948,9	2698,1	156,0	II
18	1848,3	278,9	I	899,3	2747,7	161,7	II
19	1883,6	277,4	I	881,7	2765,3	163,7	II
20	1938,7	275,0	I	854,2	2792,8	166,9	II
21	2036,3	270,7	I	805,3	2841,7	172,5	II
22	2177,3	264,5	III	734,8	2912,1	180,6	II
23	2184,1	287,2	I	731,4	2915,5	181,0	II
24	2222,6	285,9	I	712,2	2934,8	183,2	II
25	2282,8	283,9	I	682,1	2964,9	186,6	II
26	2389,5	280,4	I	628,7	3018,2	192,8	II
27	2543,5	275,2	I	551,7	3095,3	201,6	II
28	1537,3	257,4	III	645,2	2182,5	116,7	II
29	1537,3	257,4	III	745,6	2282,9	120,7	II
30	1537,3	257,4	III	946,3	2483,6	125,8	II
31	1537,3	257,3	III	1180,5	2717,8	129,4	II
32	1537,3	257,3	III	1381,3	2918,5	131,4	II
33	1938,7	275,0	I	444,5	2383,2	162,9	II
34	1938,7	275,0	I	544,9	2483,6	159,6	II
35	1938,7	275,0	I	745,6	2684,3	155,3	II
36	1938,7	275,0	I	979,8	2918,5	152,4	II
37	1938,7	275,0	I	1180,6	3119,2	150,8	II
38	2129,4	289,0	I	349,1	2478,6	184,8	II
39	2282,8	283,9	I	372,8	2655,6	192,9	II
40	2282,8	283,9	I	573,6	2856,3	180,7	II
41	2282,8	283,9	I	807,8	3090,5	172,2	II
42	2282,8	283,9	I	1008,5	3291,3	167,4	II
43	978,6	560,4	I	345,5	1324,1	277,3	II
44	1162,1	554,3	I	334,5	1496,6	309,2	II
45	1529,1	542,0	I	312,7	1841,7	350,0	II
46	1957,2	527,8	I	287,2	2244,4	378,2	II
47	2324,2	515,5	I	265,3	2589,5	394,2	II
48	1175,3	251,8	III	1214,1	2389,4	120,5	II
49	1447,0	248,8	III	1121,7	2568,8	141,1	II
50	1592,8	256,6	III	1092,4	2685,2	154,5	II
51	1724,1	265,7	III	1070,2	2794,3	167,0	II
52	1844,8	275,6	III	1053,4	2898,2	179,0	II
53	1457,7	269,0	I	1072,9	2530,6	136,7	II
54	1798,2	270,1	I	946,1	2744,4	161,3	II
55	1982,3	279,9	III	897,6	2879,9	176,9	II
56	2148,2	290,7	I	858,2	3006,4	191,4	II
57	2300,7	302,2	I	825,5	3126,1	205,2	II
58	1714,3	278,6	I	944,6	2658,9	151,5	II
59	2117,4	281,8	I	786,5	2904,0	179,6	II
60	2336,4	292,7	I	720,6	3057,0	197,2	II
61	2533,9	304,4	I	665,4	3199,2	213,6	II
62	2715,4	316,9	I	618,1	3333,5	229,0	II
63	1958,4	284,7	I	822,5	2780,9	165,5	II
64	2421,3	289,3	I	634,6	3055,9	197,1	II
65	2673,5	300,9	I	552,0	3225,5	216,6	II
66	2901,0	313,3	I	481,8	3382,8	234,7	II
67	3110,2	326,3	I	420,7	3530,9	251,7	III

Fonte: o autor.

Tabela B.11 - Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão parcial (PSC) - parte 2.

#	Y _{T,PSC} (mm)	Y _{Ca,PSC} (mm)	Y _{Ce,PSC} (mm)	M _{PL,PSC} (kN.m)	P _{ult,PSC} (kN) ou Q _{ult,PSC} (kN/m)	P _{PSC} /P _{FSC} (%)
1	34,6	198,2	304,5	546,9	683,6	93,0%
2	37,9	203,0	310,3	583,7	729,6	90,5%
3	41,1	207,5	314,3	616,2	770,2	89,0%
4	44,2	211,8	317,2	645,5	806,9	88,4%
5	47,3	216,0	319,6	672,4	840,6	88,8%
6	50,3	220,1	321,4	697,4	871,7	90,1%
7	53,4	224,1	323,0	720,6	900,8	91,2%
8	101,1	395,8	572,6	656,6	820,8	89,2%
9	101,1	395,8	568,5	782,0	977,5	89,7%
10	101,1	395,8	564,5	905,3	1131,7	90,4%
11	101,1	395,8	560,4	1026,7	1283,4	91,0%
12	101,1	395,8	556,3	1146,0	1432,6	91,6%
13	37,2	202,1	311,4	579,9	724,9	90,0%
14	37,9	203,0	310,3	583,7	729,6	90,5%
15	38,9	204,4	308,5	589,2	736,5	91,4%
16	40,6	206,9	305,5	598,3	747,9	92,8%
17	43,2	210,5	301,0	609,7	762,1	94,6%
18	45,3	213,3	319,5	657,9	822,3	88,0%
19	46,1	214,4	318,7	661,9	827,4	88,5%
20	47,2	215,9	317,5	668,0	835,0	89,4%
21	49,3	218,7	315,3	678,1	847,6	90,7%
22	52,4	222,8	312,2	690,9	863,7	92,4%
23	52,6	223,0	323,6	716,6	895,8	90,7%
24	53,4	224,1	323,0	720,6	900,8	91,2%
25	54,7	225,8	322,0	726,7	908,3	92,0%
26	57,1	228,9	320,2	736,5	920,7	93,2%
27	60,6	233,3	317,6	748,9	936,2	94,8%
28	20,9	190,9	308,7	552,1	690,1	93,0%
29	23,4	192,9	308,6	564,8	706,0	92,7%
30	27,9	195,4	308,6	590,0	737,5	92,2%
31	32,4	197,2	308,5	619,1	773,9	91,6%
32	35,6	198,2	308,5	644,0	805,0	91,0%
33	30,9	213,9	317,5	637,0	796,2	93,5%
34	32,8	212,3	317,5	649,6	812,0	92,2%
35	36,3	210,2	317,5	674,7	843,4	90,0%
36	39,8	208,7	317,5	703,8	879,7	88,4%
37	42,4	207,9	317,5	728,6	910,8	87,4%
38	36,4	224,9	324,5	679,3	849,2	94,9%
39	42,1	228,9	322,0	708,4	885,5	95,5%
40	44,3	222,8	322,0	736,3	920,4	92,9%
41	46,6	218,6	322,0	767,4	959,2	90,3%
42	48,5	216,2	322,0	793,3	991,6	88,2%
43	63,6	363,6	576,7	605,8	757,2	82,6%
44	80,7	379,6	573,6	672,8	841,1	86,0%
45	107,8	400,0	567,5	794,4	993,0	90,6%
46	130,6	414,1	560,4	922,6	1153,3	93,9%
47	145,1	422,1	554,3	1024,4	1280,5	95,8%
48	30,9	190,3	300,8	510,6	638,2	92,2%
49	37,9	205,6	309,1	580,5	725,6	93,3%
50	42,7	217,2	323,0	637,1	796,4	92,4%
51	47,3	228,5	337,5	694,2	867,8	91,8%
52	51,8	239,5	352,4	752,3	940,4	91,5%
53	36,4	198,4	309,5	571,9	714,9	87,4%
54	45,2	215,6	320,0	655,6	819,5	90,0%
55	51,0	228,4	334,9	722,1	902,6	90,6%
56	56,6	240,7	350,3	789,0	986,2	91,6%
57	62,0	252,6	366,1	856,9	1071,1	92,4%
58	41,6	205,7	314,3	622,5	778,2	86,1%
59	52,1	224,8	325,9	715,7	894,6	90,8%
60	58,9	238,6	341,3	789,4	986,8	92,5%
61	65,4	251,8	357,2	863,4	1079,3	93,6%
62	71,7	264,5	373,4	938,6	1173,2	94,5%
63	46,7	212,8	317,4	666,6	833,2	88,1%
64	58,8	233,5	329,6	766,6	958,2	93,1%
65	66,6	248,3	345,4	845,7	1057,2	94,8%
66	74,0	262,3	361,6	925,2	1156,5	96,0%
67	81,1	275,8	378,2	1005,9	1257,3	96,9%

Fonte: o autor.

Tabela B.12 - Propriedades da seção de aço isolada e grau mínimo de interação parcial.

#	$y_{LNP,a}$ (mm)	y_{at} (mm)	y_{ac} (mm)	z_a (mm)	$M_{PL,a,R}$ (kN.m)	$M_{PL,a,R}/M_{PL,FSC}$ (%)	$M_{PL,a,R}/M_{PL,PSC}$ (%)	δ_u (mm)	$\eta_{Mín}$
1	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	46,8%	50,4%	5,00	0,556
2	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	47,2%	5,00	0,556
3	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	39,8%	44,7%	5,00	0,556
4	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	37,7%	42,7%	5,00	0,556
5	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,4%	41,0%	5,00	0,556
6	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	35,6%	39,5%	5,00	0,556
7	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	38,2%	5,00	0,556
8	97,0	19,1	277,5	258,4	228,0	31,0%	34,7%	5,00	0,556
9	97,0	19,1	277,5	258,4	273,6	31,4%	35,0%	5,00	0,556
10	97,0	19,1	277,5	258,4	319,2	31,9%	35,3%	5,00	0,556
11	97,0	19,1	277,5	258,4	364,8	32,3%	35,5%	5,00	0,556
12	97,0	19,1	277,5	258,4	410,4	32,8%	35,8%	5,00	0,556
13	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	47,5%	5,00	0,556
14	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	47,2%	5,00	0,556
15	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	46,7%	5,00	0,556
16	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	46,0%	5,00	0,556
17	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	45,2%	5,00	0,556
18	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,8%	41,9%	5,00	0,556
19	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,8%	41,6%	5,00	0,556
20	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,8%	41,2%	5,00	0,556
21	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,8%	40,6%	5,00	0,556
22	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,8%	39,9%	5,00	0,556
23	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	38,4%	5,00	0,556
24	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	38,2%	5,00	0,556
25	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	37,9%	5,00	0,556
26	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	37,4%	5,00	0,556
27	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	36,8%	5,00	0,556
28	15,3	9,4	182,5	173,0	188,1	31,7%	34,1%	5,00	0,556
29	16,4	9,4	167,6	158,2	203,3	33,4%	36,0%	5,00	0,556
30	18,5	9,5	149,4	139,9	234,5	36,6%	39,7%	5,00	0,556
31	41,1	11,5	157,8	146,3	285,1	42,2%	46,0%	5,00	0,556
32	57,0	14,7	165,8	151,0	324,7	45,9%	50,4%	5,00	0,556
33	15,3	9,4	182,5	173,0	188,1	27,6%	29,5%	5,00	0,556
34	16,4	9,4	167,6	158,2	203,3	28,8%	31,3%	5,00	0,556
35	18,5	9,5	149,4	139,9	234,5	31,3%	34,8%	5,00	0,556
36	41,1	11,5	157,8	146,3	285,1	35,8%	40,5%	5,00	0,556
37	57,0	14,7	165,8	151,0	324,7	39,0%	44,6%	5,00	0,556
38	15,3	9,4	182,5	173,0	188,1	26,3%	27,7%	5,00	0,556
39	16,4	9,4	167,6	158,2	203,3	27,4%	28,7%	5,00	0,556
40	18,5	9,5	149,4	139,9	234,5	29,6%	31,8%	5,00	0,556
41	41,1	11,5	157,8	146,3	285,1	33,6%	37,2%	5,00	0,556
42	57,0	14,7	165,8	151,0	324,7	36,1%	40,9%	5,00	0,556
43	32,6	10,0	246,1	236,0	197,0	26,9%	32,5%	5,00	0,556
44	64,5	13,3	262,0	248,7	227,7	29,1%	33,8%	5,00	0,556
45	105,3	22,7	282,4	259,7	279,8	31,9%	35,2%	5,00	0,556
46	133,6	33,7	296,5	262,9	332,7	33,9%	36,1%	5,00	0,556
47	149,5	42,0	304,5	262,5	374,7	35,0%	36,6%	5,00	0,556
48	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	48,1%	52,1%	5,00	0,556
49	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	45,8%	49,0%	5,00	0,556
50	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	44,0%	47,6%	5,00	0,556
51	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	42,7%	46,5%	5,00	0,556
52	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	41,7%	45,5%	5,00	0,556
53	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	40,7%	46,6%	5,00	0,556
54	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	39,1%	43,4%	5,00	0,556
55	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	38,1%	42,0%	5,00	0,556
56	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	37,5%	40,9%	5,00	0,556
57	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	36,9%	40,0%	5,00	0,556
58	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	36,8%	42,8%	5,00	0,556
59	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	36,1%	39,8%	5,00	0,556
60	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	35,6%	38,4%	5,00	0,556
61	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	35,0%	37,4%	5,00	0,556
62	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	34,5%	36,5%	5,00	0,556
63	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	35,2%	39,9%	5,00	0,556
64	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	34,6%	37,1%	5,00	0,556
65	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	34,0%	35,9%	5,00	0,556
66	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	33,5%	34,9%	5,00	0,556
67	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	33,0%	34,0%	5,00	0,556

Fonte: o autor.

Tabela B.13 – Propriedades elásticas da seção transversal - parte 1.

#	d_{mista} (mm)	K	$b_{ef,1}$ (mm)	$b_{ef,2}$ (mm)	$y_{mista,EL}$ (mm)	$I_{x,mista}$ (cm ⁴)	$I_{x,ef}$ (cm ⁴)	EI_{mista} (kN.m ²)
1	360,0	7,38	79,1	81,3	213,0	24131	23369	46737
2	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	22957	45914
3	360,0	6,54	89,3	91,8	219,2	25168	22641	45282
4	360,0	6,24	93,5	96,1	221,5	25561	22391	44782
5	360,0	6,00	97,4	100,0	223,5	25900	22190	44380
6	360,0	5,79	100,9	103,6	225,2	26199	22043	44085
7	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22468	44936
8	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74321	148643
9	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74321	148643
10	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74321	148643
11	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74321	148643
12	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74321	148643
13	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	22766	45533
14	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	22957	45914
15	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	23251	46503
16	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	23762	47523
17	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	24475	48950
18	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	22102	44204
19	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	22265	44530
20	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	22517	45034
21	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	22955	45911
22	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	23570	47140
23	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22315	44631
24	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22468	44936
25	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22704	45409
26	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	23116	46231
27	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	23694	47387
28	360,0	6,91	85,7	86,9	220,0	24432	22845	45690
29	360,0	6,91	85,5	86,9	218,2	24837	23256	46512
30	360,0	6,91	85,1	86,9	214,8	25616	24044	48089
31	360,0	6,91	84,6	86,9	211,2	26482	24916	49832
32	360,0	6,91	84,1	86,9	208,4	27191	25628	51256
33	360,0	6,09	97,2	98,5	226,5	25419	22222	44444
34	360,0	6,09	96,9	98,5	224,7	25863	22367	44733
35	360,0	6,09	96,5	98,5	221,3	26719	23216	46433
36	360,0	6,09	95,9	98,5	217,7	27668	24152	48304
37	360,0	6,09	95,4	98,5	214,8	28446	24913	49827
38	360,0	5,61	105,5	107,0	230,7	26057	23029	46057
39	360,0	5,61	105,3	107,0	228,9	26527	23656	47311
40	360,0	5,61	104,7	107,0	225,5	27434	23704	47407
41	360,0	5,61	104,1	107,0	221,9	28442	23934	47869
42	360,0	5,61	103,6	107,0	219,0	29266	24532	49065
43	593,0	5,61	105,5	107,0	405,8	89580	71816	143632
44	593,0	5,61	105,3	107,0	401,8	92433	76786	153571
45	593,0	5,61	104,7	107,0	394,4	97892	85396	170792
46	593,0	5,61	104,1	107,0	386,5	103888	93981	187962
47	593,0	5,61	103,6	107,0	380,3	108749	100510	201019
48	350,0	7,38	79,1	81,3	205,3	22383	21424	42848
49	370,0	7,38	79,1	81,3	220,3	25936	25231	50463
50	390,0	7,38	79,1	81,3	234,4	29751	28405	56810
51	410,0	7,38	79,1	81,3	247,6	33883	31756	63513
52	430,0	7,38	79,1	81,3	260,3	38384	35339	70678
53	350,0	6,54	89,3	91,8	211,5	23364	20747	41493
54	370,0	6,54	89,3	91,8	226,5	27035	24395	48791
55	390,0	6,54	89,3	91,8	240,5	30992	27449	54898
56	410,0	6,54	89,3	91,8	253,8	35298	30774	61547
57	430,0	6,54	89,3	91,8	266,4	40007	35199	70398
58	350,0	6,00	97,4	100,0	215,8	24057	20327	40653
59	370,0	6,00	97,4	100,0	230,8	27812	23879	47757
60	390,0	6,00	97,4	100,0	244,7	31874	27751	55502
61	410,0	6,00	97,4	100,0	257,9	36308	32036	64072
62	430,0	6,00	97,4	100,0	270,5	41174	36679	73359
63	350,0	5,61	104,1	107,0	219,1	24591	20092	40183
64	370,0	5,61	104,1	107,0	234,0	28412	24689	49378
65	390,0	5,61	104,1	107,0	247,9	32558	28848	57696
66	410,0	5,61	104,1	107,0	261,1	37097	33328	66656
67	430,0	5,61	104,1	107,0	273,6	42090	38195	76390

Fonte: o autor.

Tabela B.14 - Propriedades elásticas da seção transversal - parte 2.

#	$W_{mista,inf}$ (cm ³)	$W_{mista,sup}$ (cm ³)	W_{ef} (cm ³)	M_{el} (kN.m)	P_{el} (kN) ou q_{el} (kN/m)	$\delta_{v,EL}$ (mm)	Rigidez Elástica (kN/mm)
1	1133	1641	1110	242,40	303,00	8,16	37,13
2	1141	1720	1091	297,03	371,28	10,18	36,48
3	1148	1787	1076	350,58	438,23	12,18	35,98
4	1154	1846	1064	403,25	504,06	14,17	35,58
5	1159	1897	1054	455,15	568,93	16,14	35,26
6	1163	1944	1047	506,38	632,97	18,07	35,03
7	1167	1986	1056	557,01	696,26	19,50	35,70
8	2117	4639	1937	484,32	605,40	5,13	118,10
9	2117	4639	1937	581,18	726,47	6,15	118,10
10	2117	4639	1937	678,04	847,55	7,18	118,10
11	2117	4639	1937	774,91	968,63	8,20	118,10
12	2117	4639	1937	871,77	1089,71	9,23	118,10
13	1141	1720	1085	297,03	371,28	10,26	36,18
14	1141	1720	1091	297,03	371,28	10,18	36,48
15	1141	1720	1099	297,03	371,28	10,05	36,95
16	1141	1720	1114	297,03	371,28	9,83	37,76
17	1141	1720	1135	297,03	371,28	9,55	38,89
18	1157	1877	1053	434,47	543,09	15,46	35,12
19	1157	1877	1058	434,47	543,09	15,35	35,38
20	1157	1877	1065	434,47	543,09	15,18	35,78
21	1157	1877	1077	434,47	543,09	14,89	36,48
22	1157	1877	1095	434,47	543,09	14,50	37,45
23	1167	1986	1051	557,01	696,26	19,64	35,46
24	1167	1986	1056	557,01	696,26	19,50	35,70
25	1167	1986	1062	557,01	696,26	19,30	36,08
26	1167	1986	1074	557,01	696,26	18,96	36,73
27	1167	1986	1090	557,01	696,26	18,49	37,65
28	1111	1745	1067	301,26	376,57	10,37	36,30
29	1138	1751	1095	302,33	377,91	10,23	36,95
30	1193	1764	1148	304,54	380,68	9,96	38,21
31	1254	1779	1208	307,21	384,02	9,70	39,59
32	1305	1793	1257	309,57	386,96	9,50	40,72
33	1122	1905	1037	440,85	551,06	15,61	35,31
34	1151	1912	1056	442,55	553,19	15,57	35,54
35	1207	1927	1110	445,99	557,49	15,11	36,89
36	1271	1944	1170	450,05	562,56	14,66	38,38
37	1324	1960	1219	453,56	566,95	14,32	39,59
38	1130	2015	1050	565,15	706,43	19,31	36,59
39	1159	2023	1083	567,49	709,36	18,87	37,59
40	1217	2040	1114	572,15	715,19	18,99	37,66
41	1282	2059	1154	577,57	721,96	18,98	38,03
42	1336	2076	1199	582,20	727,75	18,67	38,98
43	2207	4786	1947	486,81	608,51	5,33	114,11
44	2300	4835	2065	516,34	645,42	5,29	122,01
45	2482	4929	2286	571,48	714,35	5,26	135,69
46	2688	5030	2525	631,36	789,20	5,28	149,33
47	2860	5113	2720	679,97	849,96	5,32	159,71
48	1090	1547	1061	228,49	285,61	8,39	34,04
49	1177	1733	1157	255,95	319,93	7,98	40,09
50	1269	1912	1233	282,31	352,89	7,82	45,13
51	1368	2087	1312	308,20	385,25	7,63	50,46
52	1474	2262	1397	334,11	417,64	7,44	56,15
53	1105	1687	1027	330,97	413,72	12,55	32,97
54	1193	1884	1119	369,64	462,05	11,92	38,76
55	1289	2073	1194	406,69	508,37	11,66	43,62
56	1391	2259	1275	443,12	553,90	11,33	48,90
57	1502	2445	1382	479,68	599,60	10,72	55,93
58	1115	1793	1006	430,20	537,75	16,65	32,30
59	1205	1998	1097	479,37	599,21	15,79	37,94
60	1302	2194	1194	526,44	658,05	14,92	44,10
61	1408	2388	1299	572,79	715,99	14,07	50,90
62	1522	2582	1411	619,44	774,30	13,29	58,28
63	1122	1879	993	526,99	658,73	20,63	31,93
64	1214	2090	1113	586,14	732,67	18,68	39,23
65	1313	2292	1216	642,75	803,44	17,53	45,84
66	1421	2491	1326	698,58	873,22	16,49	52,96
67	1538	2692	1443	754,93	943,66	15,55	60,69

Fonte: o autor.

APÊNDICE C - Estudo de variação de parâmetros da *Crestbeam*: obtenção dos valores de Q_{num} (processo iterativo)

Os 67 modelos do estudo de variação de parâmetros apresentado ao longo do Capítulo 3 foram simulados numericamente com auxílio do ABAQUS, obtendo-se a resistência máxima das vigas (P_{num}). Uma rotina iterativa foi implementada na planilha eletrônica apresentada no APÊNDICE B para obtenção da resistência numérica da conexão (Q_{num}) a partir da força máxima numérica (P_{num}), utilizando-se do teste de hipótese “atingir meta”. Portanto, aplicou-se o teste de hipótese para que a célula referente à força máxima resistida pela viga mista quando em situação de conexão parcial “ $P_{ult,PSC}$ kN) ou $q_{ult,PSC}$ (kN/m)” (Tabela C.11) atingisse o valor de força máxima obtida numericamente, variando a célula de resistência da conexão “ Q (kN)” (Tabela C.5). Nas tabelas ilustradas neste apêndice encontram-se os cálculos efetuados.

Tabela C.1 - Propriedades dos materiais.

#	Designação	f_y (MPa)	E (MPa)	$f_{y,s}$ (MPa)	E_s (MPa)	f_{cm} (MPa)	α_E	E_{cm} (MPa)
1	V4-AC-fc20	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
2	V4-AC-fc25	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
3	V4-AC-fc30	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
4	V4-AC-fc35	544	200000	500	210000	35,0	1	32036
5	V4-AC-fc40	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
6	V4-AC-fc45	544	200000	500	210000	45,0	1	34545
7	V4-AC-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
8	V4-AC-fy250	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
9	V4-AC-fy300	300	200000	500	210000	50,0	1	35654
10	V4-AC-fy350	350	200000	500	210000	50,0	1	35654
11	V4-AC-fy400	400	200000	500	210000	50,0	1	35654
12	V4-AC-fy450	450	200000	500	210000	50,0	1	35654
13	V4-AC-fc25-2φ8,0	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
14	V4-AC-fc25-2φ10,0	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
15	V4-AC-fc25-2φ12,5	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
16	V4-AC-fc25-2φ16,0	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
17	V4-AC-fc25-2φ20,0	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
18	V4-AC-fc38-2φ8,0	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
19	V4-AC-fc38-2φ10,0	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
20	V4-AC-fc38-2φ12,5	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
21	V4-AC-fc38-2φ16,0	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
22	V4-AC-fc38-2φ20,0	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
23	V4-AC-fc50-2φ8,0	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
24	V4-AC-fc50-2φ10,0	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
25	V4-AC-fc50-2φ12,5	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
26	V4-AC-fc50-2φ16,0	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
27	V4-AC-fc50-2φ20,0	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
28	V4-AC-fc25-tw8	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
29	V4-AC-fc25-tw9,5	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
30	V4-AC-fc25-tw12,5	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
31	V4-AC-fc25-tw16	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
32	V4-AC-fc25-tw19	544	200000	500	210000	25,0	1	28960
33	V4-AC-fc38-tw8	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
34	V4-AC-fc38-tw9,5	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
35	V4-AC-fc38-tw12,5	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
36	V4-AC-fc38-tw16	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
37	V4-AC-fc38-tw19	544	200000	500	210000	38,0	1	32837
38	V4-AC-fc50-tw8	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
39	V4-AC-fc50-tw9,5	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
40	V4-AC-fc50-tw12,5	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
41	V4-AC-fc50-tw16	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
42	V4-AC-fc50-tw19	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
43	V4-AC-tw8-faco	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
44	V4-AC-tw9,5-faco	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
45	V4-AC-tw12,5-faco	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
46	V4-AC-tw16-faco	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
47	V4-AC-tw19-faco	250	200000	500	210000	50,0	1	35654
48	V4-AC-fc20-c20	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
49	V4-AC-fc20-c30	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
50	V4-AC-fc20-c40	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
51	V4-AC-fc20-c50	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
52	V4-AC-fc20-c60	544	200000	500	210000	20,0	1	27085
53	V4-AC-fc30-c20	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
54	V4-AC-fc30-c30	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
55	V4-AC-fc30-c40	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
56	V4-AC-fc30-c50	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
57	V4-AC-fc30-c60	544	200000	500	210000	30,0	1	30589
58	V4-AC-fc40-c20	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
59	V4-AC-fc40-c30	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
60	V4-AC-fc40-c40	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
61	V4-AC-fc40-c50	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
62	V4-AC-fc40-c60	544	200000	500	210000	40,0	1	33346
63	V4m-AC-c25-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
64	V4m-AC-c30-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
65	V4m-AC-c35-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
66	V4m-AC-c40-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654
67	V4m-AC-c45-fc50	544	200000	500	210000	50,0	1	35654

Fonte: o autor.

Tabela C.2 - Geometria do perfil de aço T invertido.

#	Vão (m)	d _A (mm)	b _r (mm)	t _r (mm)	t _w (mm)	R (mm)	h _A (mm)	A _{A1} (cm ²)	h/t _w	h/t _w ≤ 3.76*raiz(E/f _y)
1	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
2	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
3	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
4	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
5	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
6	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
7	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
8	4	400	170	16,0	10,0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
9	4	400	170	16,0	10,0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
10	4	400	170	16,0	10,0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
11	4	400	170	16,0	10,0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
12	4	400	170	16,0	10,0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
13	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
14	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
15	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
16	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
17	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
18	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
19	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
20	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
21	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
22	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
23	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
24	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
25	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
26	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
27	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
28	4	240	170	19,0	8,0	0	221,0	49,98	27,63	Viga Compacta
29	4	240	170	19,0	9,5	0	221,0	53,30	23,26	Viga Compacta
30	4	240	170	19,0	12,5	0	221,0	59,93	17,68	Viga Compacta
31	4	240	170	19,0	16,0	0	221,0	67,66	13,81	Viga Compacta
32	4	240	170	19,0	19,0	0	221,0	74,29	11,63	Viga Compacta
33	4	240	170	19,0	8,0	0	221,0	49,98	27,63	Viga Compacta
34	4	240	170	19,0	9,5	0	221,0	53,30	23,26	Viga Compacta
35	4	240	170	19,0	12,5	0	221,0	59,93	17,68	Viga Compacta
36	4	240	170	19,0	16,0	0	221,0	67,66	13,81	Viga Compacta
37	4	240	170	19,0	19,0	0	221,0	74,29	11,63	Viga Compacta
38	4	240	170	19,0	8,0	0	221,0	49,98	27,63	Viga Compacta
39	4	240	170	19,0	9,5	0	221,0	53,30	23,26	Viga Compacta
40	4	240	170	19,0	12,5	0	221,0	59,93	17,68	Viga Compacta
41	4	240	170	19,0	16,0	0	221,0	67,66	13,81	Viga Compacta
42	4	240	170	19,0	19,0	0	221,0	74,29	11,63	Viga Compacta
43	4	400	170	19,0	8,0	0	381,0	62,78	47,63	Viga Compacta
44	4	400	170	19,0	9,5	0	381,0	68,50	40,11	Viga Compacta
45	4	400	170	19,0	12,5	0	381,0	79,93	30,48	Viga Compacta
46	4	400	170	19,0	16,0	0	381,0	93,26	23,81	Viga Compacta
47	4	400	170	19,0	19,0	0	381,0	104,69	20,05	Viga Compacta
48	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
49	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
50	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
51	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
52	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
53	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
54	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
55	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
56	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
57	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
58	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
59	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
60	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
61	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
62	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
63	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
64	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
65	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
66	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
67	4	240	170	16,0	16,0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta

Fonte: o autor.

Tabela C.3 - Propriedades geométricas do *Crestbond* e da laje de concreto armado.

#	e_x (mm)	h_D (mm)	b (mm)	B (mm)	R_{cr} (mm)	A_D (cm ²)	c_u/c_b (mm)	t_c (mm)	c_o/c_t (mm)	b_c (mm)	b_{ef} (mm)	Verif. $b_c \leq b_{ef}$
1	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
2	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
3	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
4	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
5	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
6	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
7	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
8	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
9	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
10	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
11	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
12	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
13	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
14	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
15	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
16	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
17	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
18	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
19	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
20	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
21	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
22	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
23	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
24	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
25	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
26	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
27	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
28	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
29	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
30	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
31	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
32	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
33	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
34	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
35	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
36	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
37	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
38	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
39	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
40	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
41	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
42	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
43	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
44	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
45	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
46	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
47	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
48	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
49	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
50	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
51	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
52	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!
53	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
54	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
55	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
56	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
57	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!
58	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
59	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
60	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
61	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
62	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!
63	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
64	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
65	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
66	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
67	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!

Fonte: o autor.

Tabela C.4 - Armadura passante (A_b) e armadura superior (A_t).

#	n_b	\varnothing_b (mm)	A_b (cm ²)	n_t	\varnothing_t (mm)	A_t (cm ²)	A_{sf} (cm ²)	Arm. Conf.
1	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
2	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
3	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
4	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
5	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
6	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
7	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
8	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
9	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
10	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
11	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
12	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
13	2	8,0	1,01	1	8,0	0,50	1,51	Sim
14	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
15	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
16	2	16,0	4,02	1	8,0	0,50	4,52	Sim
17	2	20,0	6,28	1	8,0	0,50	6,79	Sim
18	2	8,0	1,01	1	8,0	0,50	1,51	Sim
19	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
20	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
21	2	16,0	4,02	1	8,0	0,50	4,52	Sim
22	2	20,0	6,28	1	8,0	0,50	6,79	Sim
23	2	8,0	1,01	1	8,0	0,50	1,51	Sim
24	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
25	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
26	2	16,0	4,02	1	8,0	0,50	4,52	Sim
27	2	20,0	6,28	1	8,0	0,50	6,79	Sim
28	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
29	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
30	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
31	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
32	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
33	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
34	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
35	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
36	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
37	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
38	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
39	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
40	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
41	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
42	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
43	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
44	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
45	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
46	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
47	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
48	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
49	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
50	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
51	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
52	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
53	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
54	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
55	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
56	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
57	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
58	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
59	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
60	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
61	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
62	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
63	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
64	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
65	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
66	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
67	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim

Fonte: o autor.

Tabela C.5 - Resistência do *Crestbond*.

#	η_D	ρ_D	P_{sh} (kN/ex)	h_{po} (mm)	χ_x	$\rho_{D,i}$	P_{po} (kN/ex)	P_{pl} (kN/ex)	Falha	N_{sc}	$N_{sc,ef}$	Q (kN)
1	2,132	0,232	264,4	35,6	0,94	0,089	94,3	304,2	PO	28,0	28,0	1018,4
2	2,132	0,217	292,0	35,6	0,94	0,084	106,3	304,2	PO	28,0	28,0	1382,0
3	2,132	0,206	316,8	35,6	0,94	0,079	117,5	304,2	PO	28,0	28,0	1631,6
4	2,132	0,196	339,5	35,6	0,94	0,076	128,3	304,2	PO	28,0	28,0	1827,1
5	2,132	0,189	360,6	35,6	0,94	0,073	138,7	304,2	PO	28,0	28,0	1991,9
6	2,132	0,182	380,4	35,6	0,94	0,070	148,8	304,2	PO	28,0	28,0	2135,0
7	2,132	0,176	399,1	35,6	0,94	0,068	158,8	304,2	PO	28,0	28,0	2260,7
8	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	116,5	Aço	21,0	21,0	1255,6
9	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	139,8	Aço	21,0	21,0	1498,5
10	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	163,1	Aço	21,0	21,0	1773,0
11	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	186,4	Aço	21,0	21,0	2009,1
12	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	209,7	Aço	21,0	21,0	2196,5
13	2,132	0,139	273,2	35,6	0,94	0,061	104,1	304,2	PO	28,0	28,0	1118,3
14	2,132	0,217	292,0	35,6	0,94	0,084	106,3	304,2	PO	28,0	28,0	1171,9
15	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	304,2	PO	28,0	28,0	1237,3
16	2,132	0,556	373,3	35,6	0,94	0,182	116,0	304,2	PO	28,0	28,0	1270,7
17	2,132	0,869	448,3	35,6	0,94	0,273	124,9	304,2	PO	28,0	28,0	1325,0
18	2,132	0,123	332,0	35,6	0,94	0,054	132,0	304,2	PO	28,0	28,0	1688,6
19	2,132	0,192	352,4	35,6	0,94	0,074	134,5	304,2	PO	28,0	28,0	1757,0
20	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	304,2	PO	28,0	28,0	1821,7
21	2,132	0,491	440,8	35,6	0,94	0,161	145,5	304,2	PO	28,0	28,0	1877,7
22	2,132	0,766	522,4	35,6	0,94	0,241	155,5	304,2	PO	28,0	28,0	1932,9
23	2,132	0,113	377,5	35,6	0,94	0,049	156,0	304,2	PO	28,0	28,0	2043,6
24	2,132	0,176	399,1	35,6	0,94	0,068	158,8	304,2	PO	28,0	28,0	2109,5
25	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	304,2	PO	28,0	28,0	2164,5
26	2,132	0,452	492,4	35,6	0,94	0,148	170,7	304,2	PO	28,0	28,0	2212,2
27	2,132	0,706	578,6	35,6	0,94	0,222	181,7	304,2	PO	28,0	28,0	2262,2
28	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	152,1	PO	28,0	28,0	1311,6
29	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	180,6	PO	28,0	28,0	1302,9
30	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	237,7	PO	28,0	28,0	1210,6
31	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	304,2	PO	28,0	28,0	1116,6
32	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	109,8	361,2	PO	28,0	28,0	1031,9
33	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	152,1	PO	28,0	28,0	1817,4
34	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	180,6	PO	28,0	28,0	1847,6
35	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	237,7	PO	28,0	28,0	1860,3
36	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	304,2	PO	28,0	28,0	1830,4
37	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	138,5	361,2	PO	28,0	28,0	1780,9
38	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	152,1	Aço	28,0	28,0	2041,5
39	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	180,6	PO	28,0	28,0	2112,3
40	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	237,7	PO	28,0	28,0	2179,1
41	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	304,2	PO	28,0	28,0	2210,8
42	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	163,1	361,2	PO	28,0	28,0	2212,7
43	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	93,2	Aço	21,0	21,0	1023,4
44	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	110,7	Aço	21,0	21,0	1196,8
45	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	145,6	Aço	21,0	21,0	1543,3
46	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	186,4	Aço	21,0	21,0	1904,3
47	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	277,3	221,4	Aço	21,0	21,0	2204,4
48	2,132	0,363	292,4	30,6	1,00	0,139	83,9	304,2	PO	28,0	28,0	776,6
49	2,132	0,363	292,4	40,6	0,82	0,118	103,4	304,2	PO	28,0	28,0	988,7
50	2,132	0,363	292,4	50,6	0,66	0,102	113,8	304,2	PO	28,0	28,0	1124,1
51	2,132	0,363	292,4	60,6	0,55	0,090	123,2	304,2	PO	28,0	28,0	1093,1
52	2,132	0,363	292,4	70,6	0,47	0,080	131,8	304,2	PO	28,0	28,0	1222,3
53	2,132	0,321	347,2	30,6	1,00	0,123	104,1	304,2	PO	28,0	28,0	1431,5
54	2,132	0,321	347,2	40,6	0,82	0,104	128,4	304,2	PO	28,0	28,0	1586,1
55	2,132	0,321	347,2	50,6	0,66	0,090	141,6	304,2	PO	28,0	28,0	1667,2
56	2,132	0,321	347,2	60,6	0,55	0,080	153,4	304,2	PO	28,0	28,0	1695,9
57	2,132	0,321	347,2	70,6	0,47	0,071	164,3	304,2	PO	28,0	28,0	1780,2
58	2,132	0,295	392,8	30,6	1,00	0,113	122,4	304,2	PO	28,0	28,0	1821,5
59	2,132	0,295	392,8	40,6	0,82	0,095	151,2	304,2	PO	28,0	28,0	1946,2
60	2,132	0,295	392,8	50,6	0,66	0,083	166,9	304,2	PO	28,0	28,0	2033,4
61	2,132	0,295	392,8	60,6	0,55	0,073	181,0	304,2	PO	28,0	28,0	2112,1
62	2,132	0,295	392,8	70,6	0,47	0,065	194,0	304,2	PO	28,0	28,0	2184,4
63	2,132	0,276	432,7	30,6	1,00	0,106	139,9	304,2	PO	28,0	28,0	2105,2
64	2,132	0,276	432,7	40,6	0,82	0,089	172,9	304,2	PO	28,0	28,0	2228,4
65	2,132	0,276	432,7	50,6	0,66	0,077	191,0	304,2	PO	28,0	28,0	2331,4
66	2,132	0,276	432,7	60,6	0,55	0,068	207,2	304,2	PO	28,0	28,0	2426,4
67	2,132	0,276	432,7	70,6	0,47	0,061	222,2	304,2	PO	28,0	28,0	2503,0

Fonte: o autor.

Tabela C.6 - Verificações Z-26.4-56:2023.

#	t_w/h_D	$e_x \geq 2,5h_{po}$	$S_{m\acute{a}x}$ da A_t	Verif. S_{max}	$A_{b,min}$ (cm ²)	Verif. $A_{b,min}$
1	OK!	OK!	160,2	OK!	0,94	OK!
2	OK!	OK!	160,2	OK!	1,06	OK!
3	OK!	OK!	160,2	OK!	1,18	OK!
4	OK!	OK!	160,2	OK!	1,28	OK!
5	OK!	OK!	160,2	OK!	1,39	OK!
6	OK!	OK!	160,2	OK!	1,49	OK!
7	OK!	OK!	160,2	OK!	1,59	Não OK!
8	OK!	OK!	287,1	OK!	1,17	OK!
9	OK!	OK!	287,1	OK!	1,40	OK!
10	OK!	OK!	287,1	OK!	1,63	OK!
11	OK!	OK!	287,1	OK!	1,86	OK!
12	OK!	OK!	287,1	OK!	2,10	OK!
13	OK!	OK!	160,2	OK!	1,04	Não OK!
14	OK!	OK!	160,2	OK!	1,06	OK!
15	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
16	OK!	OK!	160,2	OK!	1,16	OK!
17	OK!	OK!	160,2	OK!	1,25	OK!
18	OK!	OK!	160,2	OK!	1,32	Não OK!
19	OK!	OK!	160,2	OK!	1,35	OK!
20	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
21	OK!	OK!	160,2	OK!	1,45	OK!
22	OK!	OK!	160,2	OK!	1,56	OK!
23	OK!	OK!	160,2	OK!	1,56	Não OK!
24	OK!	OK!	160,2	OK!	1,59	Não OK!
25	OK!	OK!	160,2	OK!	1,63	OK!
26	OK!	OK!	160,2	OK!	1,71	OK!
27	OK!	OK!	160,2	OK!	1,82	OK!
28	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
29	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
30	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
31	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
32	OK!	OK!	160,2	OK!	1,10	OK!
33	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
34	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
35	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
36	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
37	OK!	OK!	160,2	OK!	1,38	OK!
38	OK!	OK!	160,2	OK!	1,52	OK!
39	OK!	OK!	160,2	OK!	1,63	OK!
40	OK!	OK!	160,2	OK!	1,63	OK!
41	OK!	OK!	160,2	OK!	1,63	OK!
42	OK!	OK!	160,2	OK!	1,63	OK!
43	OK!	OK!	287,1	OK!	0,93	OK!
44	OK!	OK!	287,1	OK!	1,11	OK!
45	OK!	OK!	287,1	OK!	1,46	OK!
46	OK!	OK!	287,1	OK!	1,86	OK!
47	OK!	OK!	287,1	OK!	2,21	OK!
48	OK!	OK!	137,7	Não OK!	0,84	OK!
49	OK!	OK!	182,7	OK!	1,03	OK!
50	OK!	OK!	227,7	OK!	1,14	OK!
51	OK!	Não OK!	272,7	OK!	1,23	OK!
52	OK!	Não OK!	300,0	OK!	1,32	OK!
53	OK!	OK!	137,7	Não OK!	1,04	OK!
54	OK!	OK!	182,7	OK!	1,28	OK!
55	OK!	OK!	227,7	OK!	1,42	OK!
56	OK!	Não OK!	272,7	OK!	1,53	OK!
57	OK!	Não OK!	300,0	OK!	1,64	OK!
58	OK!	OK!	137,7	Não OK!	1,22	OK!
59	OK!	OK!	182,7	OK!	1,51	OK!
60	OK!	OK!	227,7	OK!	1,67	OK!
61	OK!	Não OK!	272,7	OK!	1,81	OK!
62	OK!	Não OK!	300,0	OK!	1,94	OK!
63	OK!	OK!	137,7	Não OK!	1,40	OK!
64	OK!	OK!	182,7	OK!	1,73	OK!
65	OK!	OK!	227,7	OK!	1,91	OK!
66	OK!	Não OK!	272,7	OK!	2,07	OK!
67	OK!	Não OK!	300,0	OK!	2,22	OK!

Fonte: o autor.

Tabela C.7 - Propriedades da seção de aço - considerando a altura total do perfil igual a $d = d_A + c_u$.

#	d (mm)	h (mm)	y _a (mm)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	y _c (mm)	z _{EL} (mm)	A _A (cm ²)	P _{lin,ap} (kg/m)	P _{lin,real} (kg/m)	A _c (cm ²)
1	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
2	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
3	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
4	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
5	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
6	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
7	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
8	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
9	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
10	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
11	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
12	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
13	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
14	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
15	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
16	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
17	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
18	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
19	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
20	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
21	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
22	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
23	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
24	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
25	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
26	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
27	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
28	265,0	246,0	59,67	3149	778,9	300,13	240,5	52,0	40,8	43,0	718,0
29	265,0	246,0	65,12	3569	779,6	300,16	235,0	55,7	43,7	46,3	717,6
30	265,0	246,0	74,12	4326	781,9	300,21	226,1	63,1	49,5	52,9	716,9
31	265,0	246,0	82,28	5109	786,3	300,27	218,0	71,7	56,3	60,6	716,0
32	265,0	246,0	87,85	5720	792,0	300,32	212,5	79,0	62,0	67,3	715,3
33	265,0	246,0	59,67	3149	778,9	300,13	240,5	52,0	40,8	43,0	718,0
34	265,0	246,0	65,12	3569	779,6	300,16	235,0	55,7	43,7	46,3	717,6
35	265,0	246,0	74,12	4326	781,9	300,21	226,1	63,1	49,5	52,9	716,9
36	265,0	246,0	82,28	5109	786,3	300,27	218,0	71,7	56,3	60,6	716,0
37	265,0	246,0	87,85	5720	792,0	300,32	212,5	79,0	62,0	67,3	715,3
38	265,0	246,0	59,67	3149	778,9	300,13	240,5	52,0	40,8	43,0	718,0
39	265,0	246,0	65,12	3569	779,6	300,16	235,0	55,7	43,7	46,3	717,6
40	265,0	246,0	74,12	4326	781,9	300,21	226,1	63,1	49,5	52,9	716,9
41	265,0	246,0	82,28	5109	786,3	300,27	218,0	71,7	56,3	60,6	716,0
42	265,0	246,0	87,85	5720	792,0	300,32	212,5	79,0	62,0	67,3	715,3
43	450,0	431,0	125,67	13790	779,7	496,75	371,1	66,8	52,4	55,3	1154,0
44	450,0	431,0	135,28	15489	781,0	496,79	361,5	73,2	57,5	61,0	1153,3
45	450,0	431,0	150,17	18572	784,9	496,89	346,7	86,2	67,6	72,2	1151,8
46	450,0	431,0	162,73	21821	792,6	497,00	334,3	101,3	79,5	85,3	1150,0
47	450,0	431,0	170,86	24413	802,5	497,09	326,2	114,2	89,6	96,6	1148,5
48	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
49	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
50	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
51	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
52	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4
53	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
54	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
55	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
56	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
57	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4
58	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
59	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
60	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
61	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
62	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4
63	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
64	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
65	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
66	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
67	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4

Fonte: o autor.

Tabela C.8 - Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão total (FSC) - parte 1.

#	C _I (kN)	T _I (kN)	C _{II} (kN)	T _{II} (kN)	C _{II,c} (kN)	a (mm)	x (mm)	y _{LNP} (mm)	Situação LNP
1	1140,0	3647,0	1649,6	3429,4	1432,0	303,9	102,2	137,8	II
2	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
3	1710,0	3647,0	2365,6	3429,4	2148,0	202,6	61,1	178,9	II
4	1995,0	3647,0	2723,6	3429,4	2506,0	173,7	40,5	199,5	II
5	2280,0	3647,0	3081,6	3429,4	2864,0	152,0	20,0	220,0	II
6	2565,0	3647,0	3439,6	3429,4	3222,0	135,1	-0,6	240,2	III
7	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
8	4290,0	1765,0	5890,0	1640,0	5765,0	58,8	-850,0	534,2	I
9	4290,0	2118,0	5915,0	1968,0	5765,0	70,6	-657,8	522,4	I
10	4290,0	2471,0	5940,0	2296,0	5765,0	82,4	-520,6	510,6	I
11	4290,0	2824,0	5965,0	2624,0	5765,0	94,1	-417,6	498,9	I
12	4290,0	3177,0	5990,0	2952,0	5765,0	105,9	-337,6	487,1	I
13	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
14	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
15	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
16	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
17	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
18	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
19	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
20	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
21	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
22	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
23	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
24	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
25	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
26	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
27	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
28	1425,0	2827,7	1903,8	2718,9	1795,0	188,5	93,6	146,4	II
29	1425,0	3028,4	1923,3	2899,2	1794,1	201,9	94,4	145,6	II
30	1425,0	3429,9	1962,2	3259,9	1792,2	228,7	95,4	144,6	II
31	1425,0	3898,3	2007,6	3680,7	1790,0	259,9	96,1	143,9	II
32	1425,0	4299,8	2046,5	4041,4	1788,1	286,7	96,5	143,5	II
33	2166,0	2827,7	2837,2	2718,9	2728,4	124,0	-13,6	243,8	III
34	2166,0	3028,4	2856,2	2899,2	2727,0	132,8	4,2	235,8	II
35	2166,0	3429,9	2894,1	3259,9	2724,1	150,4	26,9	213,1	II
36	2166,0	3898,3	2938,4	3680,7	2720,8	171,0	42,6	197,4	II
37	2166,0	4299,8	2976,4	4041,4	2718,0	188,6	51,5	188,5	II
38	2850,0	2827,7	3698,8	2718,9	3590,0	94,3	-112,6	265,7	I
39	2850,0	3028,4	3717,3	2899,2	3588,1	100,9	-79,1	260,5	III
40	2850,0	3429,9	3754,4	3259,9	3584,4	114,3	-36,4	251,5	III
41	2850,0	3898,3	3797,6	3680,7	3580,0	129,9	-6,7	242,5	III
42	2850,0	4299,8	3834,7	4041,4	3576,3	143,3	10,0	230,0	II
43	4290,0	1669,5	5870,0	1569,5	5770,0	55,7	-1075,1	537,4	I
44	4290,0	1831,1	5885,0	1712,4	5766,3	61,0	-878,4	532,0	I
45	4290,0	2154,4	5915,0	1998,1	5758,8	71,8	-626,7	521,2	I
46	4290,0	2531,5	5950,0	2331,5	5750,0	84,4	-452,3	508,6	I
47	4290,0	2854,8	5980,0	2617,3	5742,5	95,2	-354,0	497,8	I
48	1080,0	3603,5	1487,7	3429,4	1313,6	300,3	111,5	128,5	II
49	1200,0	3690,5	1811,5	3429,4	1550,4	307,5	92,9	147,1	II
50	1320,0	3777,5	2135,4	3429,4	1787,2	314,8	74,3	165,7	II
51	1440,0	3864,6	2459,2	3429,4	2024,0	322,0	55,7	184,3	II
52	1560,0	3951,6	2783,0	3429,4	2260,8	329,3	37,1	202,9	II
53	1620,0	3603,5	2144,5	3429,4	1970,4	200,2	73,8	166,2	II
54	1800,0	3690,5	2586,7	3429,4	2325,6	205,0	48,4	191,6	II
55	1980,0	3777,5	3029,0	3429,4	2680,8	209,9	23,0	217,0	II
56	2160,0	3864,6	3471,2	3429,4	3036,0	214,7	-2,4	241,2	III
57	2340,0	3951,6	3913,4	3429,4	3391,2	219,5	-27,8	253,9	III
58	2160,0	3603,5	2801,3	3429,4	2627,2	150,1	36,1	203,9	II
59	2400,0	3690,5	3361,9	3429,4	3100,8	153,8	3,9	236,1	II
60	2640,0	3777,5	3922,6	3429,4	3574,4	157,4	-28,3	252,1	III
61	2880,0	3864,6	4483,2	3429,4	4048,0	161,0	-60,5	265,8	III
62	3120,0	3951,6	5043,8	3429,4	4521,6	164,7	-92,7	279,6	III
63	2700,0	3603,5	3458,1	3429,4	3284,0	120,1	-1,6	240,6	III
64	3000,0	3690,5	4137,1	3429,4	3876,0	123,0	-40,7	255,2	III
65	3300,0	3777,5	4816,2	3429,4	4468,0	125,9	-79,7	269,8	III
66	3600,0	3864,6	5495,2	3429,4	5060,0	128,8	-118,7	284,3	III
67	3900,0	3951,6	6174,2	3429,4	5652,0	131,7	-157,7	298,9	III

Fonte: o autor.

Tabela C.9 - Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão total (FSC) - parte 2.

#	T _a (kN)	C _a (kN)	C _c (kN)	Verific.	y _T (mm)	y _{Ca} (mm)	y _{Cc} (mm)	M _{PL,FSC} (kN.m)	P _{ult,FSC} (kN) ou Q _{ult,FSC} (kN/m)	Q _{mín,FSC} (kN)	η
1	2539,5	1107,5	1432,0	OK	25,6	201,4	300,3	588,0	735,0	1432,0	0,71
2	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,77
3	2897,5	749,5	2148,0	OK	41,1	221,9	300,3	692,1	865,2	2148,0	0,76
4	3076,5	570,5	2506,0	OK	50,4	232,2	300,3	729,9	912,3	2506,0	0,73
5	3255,5	391,5	2864,0	OK	60,7	242,5	300,3	757,3	946,6	2864,0	0,70
6	3431,4	215,6	3215,8	OK	71,8	252,6	300,4	774,0	967,5	3215,8	0,66
7	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,67
8	1765,0	0,0	1765,0	OK	146,3	0,0	563,6	736,5	920,6	1765,0	0,71
9	2118,0	0,0	2118,0	OK	146,3	0,0	557,7	871,3	1089,1	2118,0	0,71
10	2471,0	0,0	2471,0	OK	146,3	0,0	551,8	1002,0	1252,5	2471,0	0,72
11	2824,0	0,0	2824,0	OK	146,3	0,0	545,9	1128,5	1410,7	2824,0	0,71
12	3177,0	0,0	3177,0	OK	146,3	0,0	540,1	1250,9	1563,6	3177,0	0,69
13	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,62
14	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,65
15	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,69
16	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,71
17	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,74
18	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,62
19	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,65
20	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,67
21	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,69
22	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,71
23	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,61
24	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,63
25	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,65
26	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,66
27	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,68
28	2311,4	516,4	1795,0	OK	22,1	205,7	300,1	593,8	742,3	1795,0	0,73
29	2411,3	617,2	1794,1	OK	23,3	205,3	300,2	609,1	761,3	1794,1	0,73
30	2611,1	818,9	1792,2	OK	25,2	204,8	300,2	639,8	799,8	1792,2	0,68
31	2844,2	1054,2	1790,0	OK	27,0	204,4	300,3	676,2	845,3	1790,0	0,62
32	3044,0	1255,8	1788,1	OK	28,2	204,2	300,3	707,7	884,6	1788,1	0,58
33	2735,4	92,3	2643,1	OK	51,4	254,4	302,0	681,2	851,5	2643,1	0,69
34	2877,7	150,7	2727,0	OK	52,7	250,4	300,2	704,7	880,9	2727,0	0,68
35	3077,0	352,9	2724,1	OK	49,5	239,1	300,2	749,8	937,2	2724,1	0,68
36	3309,6	588,8	2720,8	OK	47,4	231,2	300,3	796,3	995,4	2720,8	0,67
37	3508,9	790,9	2718,0	OK	46,1	226,7	300,3	833,7	1042,1	2718,0	0,66
38	2827,7	0,0	2827,7	OK	59,7	0,0	312,9	716,0	895,0	2827,7	0,72
39	3005,3	23,1	2982,2	OK	63,1	262,8	310,3	741,8	927,2	2982,2	0,71
40	3338,2	91,8	3246,4	OK	67,2	258,3	305,9	792,3	990,4	3246,4	0,67
41	3702,5	195,8	3506,8	OK	69,5	253,8	301,5	849,5	1061,9	3506,8	0,63
42	3938,0	361,8	3576,3	OK	67,0	247,5	300,3	899,6	1124,5	3576,3	0,62
43	1669,5	0,0	1669,5	OK	125,7	0,0	565,2	733,7	917,2	1669,5	0,61
44	1831,1	0,0	1831,1	OK	135,3	0,0	562,5	782,3	977,8	1831,1	0,65
45	2154,4	0,0	2154,4	OK	150,2	0,0	557,1	876,7	1095,8	2154,4	0,72
46	2531,5	0,0	2531,5	OK	162,7	0,0	550,8	982,4	1228,0	2531,5	0,75
47	2854,8	0,0	2854,8	OK	170,9	0,0	545,4	1069,3	1336,6	2854,8	0,77
48	2458,5	1144,9	1313,6	OK	22,9	194,2	295,2	553,9	692,3	1313,6	0,59
49	2620,4	1070,0	1550,4	OK	28,4	208,5	305,3	622,0	777,6	1550,4	0,64
50	2782,4	995,2	1787,2	OK	34,5	222,8	315,4	689,6	861,9	1787,2	0,63
51	2944,3	920,3	2024,0	OK	41,0	237,1	325,5	756,2	945,3	2024,0	0,54
52	3106,2	845,4	2260,8	OK	48,0	251,4	335,6	822,0	1027,4	2260,8	0,54
53	2786,9	816,5	1970,4	OK	36,3	213,1	295,2	654,4	818,1	1970,4	0,73
54	3008,0	682,4	2325,6	OK	46,2	230,8	305,3	728,6	910,7	2325,6	0,68
55	3229,2	548,4	2680,8	OK	57,1	248,5	315,4	797,4	996,8	2680,8	0,62
56	3439,8	424,8	3015,0	OK	68,3	265,6	326,1	861,0	1076,3	3015,0	0,56
57	3550,0	401,6	3148,4	OK	73,7	276,9	342,4	927,6	1159,5	3148,4	0,57
58	3115,3	488,1	2627,2	OK	53,2	232,0	295,2	723,1	903,9	2627,2	0,69
59	3395,6	294,8	3100,8	OK	68,7	253,1	305,3	788,2	985,2	3100,8	0,63
60	3534,7	242,9	3291,8	OK	76,1	266,0	321,3	853,6	1067,0	3291,8	0,62
61	3654,4	210,2	3444,2	OK	82,4	277,9	338,2	922,2	1152,8	3444,2	0,61
62	3774,1	177,6	3596,5	OK	88,8	289,8	355,0	993,2	1241,5	3596,5	0,61
63	3434,7	168,7	3266,0	OK	72,9	250,3	295,5	757,0	946,3	3266,0	0,64
64	3561,5	128,9	3432,6	OK	79,7	262,6	312,8	823,6	1029,5	3432,6	0,65
65	3688,4	89,2	3599,2	OK	86,7	274,9	330,0	892,6	1115,7	3599,2	0,65
66	3815,2	49,4	3765,8	OK	93,8	287,2	347,2	963,9	1204,9	3765,8	0,64
67	3942,0	9,6	3932,3	OK	101,1	299,4	364,5	1037,5	1296,9	3932,3	0,64

Fonte: o autor.

Tabela C.10 - Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão parcial (PSC) - parte 1.

#	C _{c,PSC} (kN)	Y _{LNP,PSC,c} (mm)	Situação Y _{LNP,PSC,C}	C _{a,PSC} (kN)	T _{a,PSC} (kN)	Y _{LNP,PSC,A} (mm)	Situação Y _{LNP,PSC,A}
1	1018,4	275,1	I	1314,3	2332,7	114,0	II
2	1382,0	267,9	I	1132,5	2514,5	134,9	II
3	1631,6	269,4	I	1007,7	2639,3	149,2	II
4	1827,1	273,0	I	909,9	2737,1	160,5	II
5	1991,9	277,0	I	827,5	2819,4	169,9	II
6	2135,0	280,9	I	756,0	2891,0	178,1	II
7	2260,7	284,6	I	693,1	2953,8	185,4	II
8	1255,6	551,1	I	254,7	1510,3	348,1	II
9	1498,5	543,1	I	309,8	1808,2	346,7	II
10	1773,0	533,9	I	349,0	2122,0	350,3	II
11	2009,1	526,0	I	407,4	2416,6	348,1	II
12	2196,5	519,8	I	490,2	2686,8	341,1	II
13	1118,3	285,4	I	1264,3	2382,6	119,7	II
14	1171,9	281,9	I	1237,5	2409,5	122,8	II
15	1237,3	277,5	I	1204,8	2442,2	126,6	II
16	1270,7	275,3	I	1188,1	2458,8	128,5	II
17	1325,0	271,7	I	1161,0	2486,0	131,6	II
18	1688,6	285,9	I	979,2	2667,8	152,5	II
19	1757,0	282,9	I	945,0	2702,0	156,4	II
20	1821,7	280,1	I	912,6	2734,4	160,1	II
21	1877,7	277,6	I	884,6	2762,3	163,4	II
22	1932,9	275,2	I	857,0	2790,0	166,5	II
23	2043,6	291,9	I	801,7	2845,3	172,9	II
24	2109,5	289,7	I	768,7	2878,2	176,7	II
25	2164,5	287,8	I	741,2	2905,7	179,8	II
26	2212,2	286,3	I	717,4	2929,6	182,6	II
27	2262,2	284,6	I	692,4	2954,6	185,5	II
28	1311,6	272,6	I	758,0	2069,7	90,8	II
29	1302,9	273,1	I	862,8	2165,7	98,1	II
30	1210,6	279,3	I	1109,7	2320,3	101,8	II
31	1116,6	285,6	I	1390,9	2507,4	105,2	II
32	1031,9	291,2	I	1633,9	2665,8	106,9	II
33	1817,4	280,3	I	505,1	2322,6	148,9	II
34	1847,6	279,0	I	590,4	2438,0	150,8	II
35	1860,3	278,4	I	784,8	2645,1	149,6	II
36	1830,4	279,7	I	1034,0	2864,3	146,2	II
37	1780,9	281,9	I	1259,4	3040,4	143,2	II
38	2041,5	292,0	I	393,1	2434,6	174,7	II
39	2112,3	289,6	I	458,1	2570,4	176,4	II
40	2179,1	287,4	I	625,4	2804,5	173,0	II
41	2210,8	286,3	I	843,8	3054,5	168,1	II
42	2212,7	286,2	I	1043,5	3256,3	164,0	II
43	1023,4	558,9	I	323,1	1346,4	288,5	II
44	1196,8	553,1	I	317,2	1514,0	316,5	II
45	1543,3	541,6	I	305,5	1848,8	352,2	II
46	1904,3	529,5	I	313,6	2217,9	371,6	II
47	2204,4	519,5	I	325,2	2529,6	381,5	II
48	776,6	285,3	I	1413,5	2190,0	97,6	II
49	988,7	287,6	I	1350,9	2339,6	114,8	II
50	1124,1	296,3	I	1326,7	2450,8	127,6	II
51	1093,1	318,9	I	1385,8	2478,8	130,8	II
52	1222,3	328,1	I	1364,7	2587,0	143,2	II
53	1431,5	270,5	I	1086,0	2517,5	135,2	II
54	1586,1	281,9	I	1052,2	2638,3	149,1	II
55	1667,2	297,4	I	1055,2	2722,4	158,8	II
56	1695,9	315,8	I	1084,4	2780,2	165,4	II
57	1780,2	331,1	I	1085,7	2865,9	175,3	II
58	1821,5	274,1	I	891,0	2712,5	157,6	II
59	1946,2	288,9	I	872,2	2818,3	169,8	II
60	2033,4	305,3	I	872,1	2905,5	179,8	II
61	2112,1	322,0	I	876,2	2988,4	189,3	II
62	2184,4	339,0	I	883,6	3068,0	198,5	II
63	2105,2	279,8	I	749,1	2854,4	173,9	II
64	2228,4	295,7	I	731,1	2959,4	186,0	II
65	2331,4	312,3	I	723,1	3054,5	196,9	II
66	2426,4	329,1	I	719,1	3145,5	207,4	II
67	2503,0	346,6	I	724,3	3227,3	216,8	II

Fonte: o autor.

Tabela C.11 - Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão parcial (PSC) - parte 2.

#	Y _{T,PSC} (mm)	Y _{Ca,PSC} (mm)	Y _{Ce,PSC} (mm)	M _{PL,PSC} (kN.m)	P _{ult,PSC} (kN) ou Q _{ult,PSC} (kN/m)	P _{PSC} /P _{FSC} (%)
1	28,8	189,5	317,6	505,2	631,5	85,9%
2	35,8	199,9	313,9	570,4	713,0	88,5%
3	40,8	207,1	314,7	614,5	768,1	88,8%
4	44,9	212,7	316,5	649,1	811,3	88,9%
5	48,4	217,5	318,5	678,0	847,5	89,5%
6	51,5	221,6	320,5	702,9	878,6	90,8%
7	54,3	225,2	322,3	724,5	905,6	91,7%
8	103,7	399,1	572,1	663,3	829,2	90,1%
9	103,1	398,4	568,0	788,1	985,1	90,4%
10	104,6	400,1	563,5	916,8	1145,9	91,5%
11	103,7	399,1	559,5	1036,1	1295,2	91,8%
12	100,8	395,5	556,4	1145,1	1431,4	91,5%
13	30,7	192,4	322,7	531,0	663,7	82,4%
14	31,7	193,9	320,9	539,7	674,6	83,7%
15	32,9	195,8	318,8	549,8	687,3	85,3%
16	33,6	196,7	317,6	554,8	693,5	86,1%
17	34,6	198,3	315,8	562,6	703,2	87,3%
18	42,0	208,8	323,0	637,8	797,3	85,3%
19	43,4	210,7	321,5	646,7	808,4	86,5%
20	44,7	212,6	320,0	654,7	818,4	87,6%
21	45,9	214,2	318,8	661,3	826,6	88,5%
22	47,1	215,8	317,6	667,4	834,3	89,3%
23	49,5	218,9	325,9	700,8	876,0	88,7%
24	50,9	220,8	324,8	708,4	885,6	89,7%
25	52,1	222,4	323,9	714,5	893,2	90,4%
26	53,2	223,8	323,1	719,6	899,5	91,1%
27	54,3	225,2	322,3	724,6	905,8	91,7%
28	16,4	177,9	316,3	515,8	644,8	86,9%
29	18,7	181,5	316,6	528,5	660,6	86,8%
30	21,9	183,4	319,6	539,8	674,7	84,4%
31	25,2	185,1	322,8	554,6	693,2	82,0%
32	27,7	186,0	325,6	565,9	707,4	80,0%
33	27,6	207,0	320,1	622,2	777,8	91,3%
34	30,6	207,9	319,5	638,5	798,2	90,6%
35	34,6	207,3	319,2	665,0	831,2	88,7%
36	37,8	205,6	319,9	689,9	862,4	86,6%
37	39,7	204,1	320,9	707,9	884,8	84,9%
38	33,8	219,8	326,0	669,6	837,0	93,5%
39	37,4	220,7	324,8	691,0	863,8	93,2%
40	41,8	219,0	323,7	725,1	906,3	91,5%
41	45,2	216,5	323,2	759,1	948,8	89,4%
42	47,3	214,5	323,1	784,9	981,2	87,3%
43	67,2	369,2	575,9	618,2	772,7	84,2%
44	83,3	383,2	573,1	681,2	851,5	87,1%
45	108,7	401,1	567,3	797,1	996,4	90,9%
46	127,7	410,8	561,3	914,5	1143,1	93,1%
47	139,4	415,8	556,3	1008,9	1261,1	94,3%
48	23,8	178,8	317,6	447,2	559,0	80,7%
49	29,1	192,4	328,8	516,9	646,1	83,1%
50	33,3	203,8	343,2	574,6	718,2	83,3%
51	34,4	210,4	364,5	604,8	755,9	80,0%
52	38,6	221,6	379,1	665,8	832,2	81,0%
53	35,9	197,6	310,2	568,4	710,5	86,9%
54	40,7	209,6	325,9	630,0	787,5	86,5%
55	44,2	219,4	343,7	684,1	855,1	85,8%
56	46,7	227,7	362,9	732,5	915,7	85,1%
57	50,4	237,6	380,6	791,0	988,8	85,3%
58	43,8	208,8	312,1	635,6	794,5	87,9%
59	48,3	219,9	329,5	696,8	871,0	88,4%
60	52,1	229,9	347,6	756,0	944,9	88,6%
61	55,8	239,7	366,0	816,3	1020,4	88,5%
62	59,4	249,2	384,5	877,9	1097,4	88,4%
63	49,9	217,0	314,9	683,1	853,9	90,2%
64	54,5	228,0	332,9	747,1	933,9	90,7%
65	58,8	238,5	351,1	811,6	1014,5	90,9%
66	62,9	248,7	369,6	877,6	1097,0	91,1%
67	66,7	258,4	388,3	943,8	1179,7	91,0%

Fonte: o autor.

Tabela C.12 - Propriedades da seção de aço isolada e grau mínimo de interação parcial.

#	$y_{LNP,a}$ (mm)	y_{at} (mm)	y_{ac} (mm)	z_a (mm)	$M_{PL,a,R}$ (kN.m)	$M_{PL,a,R}/M_{PL,FSC}$ (%)	$M_{PL,a,R}/M_{PL,PSC}$ (%)	δ_u (mm)	$\eta_{Mín}$
1	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	46,8%	54,5%	5,00	0,556
2	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	48,3%	5,00	0,556
3	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	39,8%	44,8%	5,00	0,556
4	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	37,7%	42,4%	5,00	0,556
5	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,4%	40,6%	5,00	0,556
6	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	35,6%	39,2%	5,00	0,556
7	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	38,0%	5,00	0,556
8	97,0	19,1	277,5	258,4	228,0	31,0%	34,4%	5,00	0,556
9	97,0	19,1	277,5	258,4	273,6	31,4%	34,7%	5,00	0,556
10	97,0	19,1	277,5	258,4	319,2	31,9%	34,8%	5,00	0,556
11	97,0	19,1	277,5	258,4	364,8	32,3%	35,2%	5,00	0,556
12	97,0	19,1	277,5	258,4	410,4	32,8%	35,8%	5,00	0,556
13	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	51,9%	5,00	0,556
14	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	51,0%	5,00	0,556
15	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	50,1%	5,00	0,556
16	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	49,6%	5,00	0,556
17	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	42,7%	48,9%	5,00	0,556
18	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,8%	43,2%	5,00	0,556
19	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,8%	42,6%	5,00	0,556
20	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,8%	42,1%	5,00	0,556
21	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,8%	41,6%	5,00	0,556
22	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	36,8%	41,3%	5,00	0,556
23	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	39,3%	5,00	0,556
24	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	38,9%	5,00	0,556
25	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	38,5%	5,00	0,556
26	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	38,3%	5,00	0,556
27	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	34,9%	38,0%	5,00	0,556
28	15,3	9,4	182,5	173,0	188,1	31,7%	36,5%	5,00	0,556
29	16,4	9,4	167,6	158,2	203,3	33,4%	38,5%	5,00	0,556
30	18,5	9,5	149,4	139,9	234,5	36,6%	43,4%	5,00	0,556
31	41,1	11,5	157,8	146,3	285,1	42,2%	51,4%	5,00	0,556
32	57,0	14,7	165,8	151,0	324,7	45,9%	57,4%	5,00	0,556
33	15,3	9,4	182,5	173,0	188,1	27,6%	30,2%	5,00	0,556
34	16,4	9,4	167,6	158,2	203,3	28,8%	31,8%	5,00	0,556
35	18,5	9,5	149,4	139,9	234,5	31,3%	35,3%	5,00	0,556
36	41,1	11,5	157,8	146,3	285,1	35,8%	41,3%	5,00	0,556
37	57,0	14,7	165,8	151,0	324,7	39,0%	45,9%	5,00	0,556
38	15,3	9,4	182,5	173,0	188,1	26,3%	28,1%	5,00	0,556
39	16,4	9,4	167,6	158,2	203,3	27,4%	29,4%	5,00	0,556
40	18,5	9,5	149,4	139,9	234,5	29,6%	32,3%	5,00	0,556
41	41,1	11,5	157,8	146,3	285,1	33,6%	37,6%	5,00	0,556
42	57,0	14,7	165,8	151,0	324,7	36,1%	41,4%	5,00	0,556
43	32,6	10,0	246,1	236,0	197,0	26,9%	31,9%	5,00	0,556
44	64,5	13,3	262,0	248,7	227,7	29,1%	33,4%	5,00	0,556
45	105,3	22,7	282,4	259,7	279,8	31,9%	35,1%	5,00	0,556
46	133,6	33,7	296,5	262,9	332,7	33,9%	36,4%	5,00	0,556
47	149,5	42,0	304,5	262,5	374,7	35,0%	37,1%	5,00	0,556
48	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	48,1%	59,5%	5,00	0,556
49	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	45,8%	55,1%	5,00	0,556
50	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	44,0%	52,8%	5,00	0,556
51	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	42,7%	53,4%	5,00	0,556
52	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	41,7%	51,4%	5,00	0,556
53	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	40,7%	46,8%	5,00	0,556
54	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	39,1%	45,2%	5,00	0,556
55	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	38,1%	44,4%	5,00	0,556
56	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	37,5%	44,1%	5,00	0,556
57	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	36,9%	43,3%	5,00	0,556
58	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	36,8%	41,9%	5,00	0,556
59	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	36,1%	40,9%	5,00	0,556
60	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	35,6%	40,1%	5,00	0,556
61	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	35,0%	39,5%	5,00	0,556
62	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	34,5%	39,0%	5,00	0,556
63	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	35,2%	39,0%	5,00	0,556
64	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	34,6%	38,1%	5,00	0,556
65	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	34,0%	37,4%	5,00	0,556
66	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	33,5%	36,8%	5,00	0,556
67	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	33,0%	36,3%	5,00	0,556

Fonte: o autor.

Tabela C.13 – Propriedades elásticas da seção transversal - parte 1.

#	d _{mista} (mm)	K	b _{ef,1} (mm)	b _{ef,2} (mm)	y _{mista,EL} (mm)	I _{x,mista} (cm ⁴)	I _{x,ef} (cm ⁴)	EI _{mista} (kN.m ²)
1	360,0	7,38	79,1	81,3	213,0	24131	21118	42236
2	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	22300	44600
3	360,0	6,54	89,3	91,8	219,2	25168	22565	45130
4	360,0	6,24	93,5	96,1	221,5	25561	22542	45084
5	360,0	6,00	97,4	100,0	223,5	25900	22414	44828
6	360,0	5,79	100,9	103,6	225,2	26199	22255	44510
7	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22618	45236
8	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	75098	150196
9	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74933	149867
10	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	75354	150709
11	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	75100	150200
12	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74250	148500
13	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	20552	41104
14	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	20923	41846
15	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	21364	42728
16	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	21585	43169
17	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	21937	43874
18	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	21342	42684
19	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	21671	43343
20	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	21978	43955
21	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	22238	44476
22	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	22491	44982
23	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	21746	43492
24	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22015	44031
25	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22237	44474
26	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22427	44854
27	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22624	45248
28	360,0	6,91	85,7	86,9	220,0	24432	21342	42684
29	360,0	6,91	85,5	86,9	218,2	24837	21693	43386
30	360,0	6,91	85,1	86,9	214,8	25616	21824	43648
31	360,0	6,91	84,6	86,9	211,2	26482	21990	43979
32	360,0	6,91	84,1	86,9	208,4	27191	22031	44062
33	360,0	6,09	97,2	98,5	226,5	25419	21616	43232
34	360,0	6,09	96,9	98,5	224,7	25863	21920	43839
35	360,0	6,09	96,5	98,5	221,3	26719	22831	45662
36	360,0	6,09	95,9	98,5	217,7	27668	23612	47224
37	360,0	6,09	95,4	98,5	214,8	28446	24116	48232
38	360,0	5,61	105,5	107,0	230,7	26057	22614	45228
39	360,0	5,61	105,3	107,0	228,9	26527	22891	45782
40	360,0	5,61	104,7	107,0	225,5	27434	23259	46517
41	360,0	5,61	104,1	107,0	221,9	28442	23635	47270
42	360,0	5,61	103,6	107,0	219,0	29266	24241	48483
43	593,0	5,61	105,5	107,0	405,8	89580	73129	146257
44	593,0	5,61	105,3	107,0	401,8	92433	77695	155389
45	593,0	5,61	104,7	107,0	394,4	97892	85707	171414
46	593,0	5,61	104,1	107,0	386,5	103888	92999	185999
47	593,0	5,61	103,6	107,0	380,3	108749	98523	197047
48	350,0	7,38	79,1	81,3	205,3	22383	18285	36570
49	370,0	7,38	79,1	81,3	220,3	25936	21751	43502
50	390,0	7,38	79,1	81,3	234,4	29751	24774	49549
51	410,0	7,38	79,1	81,3	247,6	33883	26565	53129
52	430,0	7,38	79,1	81,3	260,3	38384	30047	60093
53	350,0	6,54	89,3	91,8	211,5	23364	20602	41203
54	370,0	6,54	89,3	91,8	226,5	27035	23225	46450
55	390,0	6,54	89,3	91,8	240,5	30992	25646	51292
56	410,0	6,54	89,3	91,8	253,8	35298	28042	56085
57	430,0	6,54	89,3	91,8	266,4	40007	31792	63583
58	350,0	6,00	97,4	100,0	215,8	24057	20809	41619
59	370,0	6,00	97,4	100,0	230,8	27812	23106	46211
60	390,0	6,00	97,4	100,0	244,7	31874	26272	52544
61	410,0	6,00	97,4	100,0	257,9	36308	29795	59590
62	430,0	6,00	97,4	100,0	270,5	41174	33608	67217
63	350,0	5,61	104,1	107,0	219,1	24591	20660	41320
64	370,0	5,61	104,1	107,0	234,0	28412	23895	47790
65	390,0	5,61	104,1	107,0	247,9	32558	27316	54633
66	410,0	5,61	104,1	107,0	261,1	37097	31016	62033
67	430,0	5,61	104,1	107,0	273,6	42090	34973	69946

Fonte: o autor.

Tabela C.14 - Propriedades elásticas da seção transversal - parte 2.

#	$W_{mista,inf}$ (cm ³)	$W_{mista,sup}$ (cm ³)	W_{ef} (cm ³)	M_{el} (kN.m)	P_{el} (kN) ou q_{el} (kN/m)	$\delta_{v,EL}$ (mm)	Rigidez Elástica (kN/mm)
1	1133	1641	1044	242,40	303,00	9,03	33,56
2	1141	1720	1072	297,03	371,28	10,48	35,43
3	1148	1787	1073	350,58	438,23	12,22	35,86
4	1154	1846	1068	403,25	504,06	14,07	35,82
5	1159	1897	1060	455,15	568,93	15,97	35,62
6	1163	1944	1053	506,38	632,97	17,90	35,36
7	1167	1986	1060	557,01	696,26	19,37	35,94
8	2117	4639	1949	487,25	609,06	5,10	119,33
9	2117	4639	1947	583,95	729,94	6,13	119,07
10	2117	4639	1953	683,51	854,39	7,14	119,74
11	2117	4639	1949	779,61	974,52	8,17	119,33
12	2117	4639	1936	871,28	1089,10	9,23	117,98
13	1141	1720	1021	297,03	371,28	11,37	32,66
14	1141	1720	1031	297,03	371,28	11,17	33,25
15	1141	1720	1044	297,03	371,28	10,94	33,95
16	1141	1720	1051	297,03	371,28	10,83	34,30
17	1141	1720	1061	297,03	371,28	10,65	34,86
18	1157	1877	1031	434,47	543,09	16,01	33,91
19	1157	1877	1041	434,47	543,09	15,77	34,44
20	1157	1877	1049	434,47	543,09	15,55	34,92
21	1157	1877	1057	434,47	543,09	15,37	35,34
22	1157	1877	1064	434,47	543,09	15,20	35,74
23	1167	1986	1035	557,01	696,26	20,15	34,55
24	1167	1986	1043	557,01	696,26	19,90	34,98
25	1167	1986	1049	557,01	696,26	19,70	35,33
26	1167	1986	1054	557,01	696,26	19,54	35,64
27	1167	1986	1060	557,01	696,26	19,37	35,95
28	1111	1745	1026	301,26	376,57	11,10	33,91
29	1138	1751	1051	302,33	377,91	10,96	34,47
30	1193	1764	1084	304,54	380,68	10,98	34,68
31	1254	1779	1121	307,21	384,02	10,99	34,94
32	1305	1793	1148	309,57	386,96	11,05	35,01
33	1122	1905	1021	440,85	551,06	16,04	34,35
34	1151	1912	1044	442,55	553,19	15,88	34,83
35	1207	1927	1099	445,99	557,49	15,37	36,28
36	1271	1944	1154	450,05	562,56	14,99	37,52
37	1324	1960	1196	453,56	566,95	14,80	38,32
38	1130	2015	1039	565,15	706,43	19,66	35,93
39	1159	2023	1062	567,49	709,36	19,50	36,37
40	1217	2040	1102	572,15	715,19	19,35	36,96
41	1282	2059	1146	577,57	721,96	19,22	37,56
42	1336	2076	1190	582,20	727,75	18,89	38,52
43	2207	4786	1966	491,61	614,52	5,29	116,20
44	2300	4835	2079	519,75	649,69	5,26	123,46
45	2482	4929	2291	572,70	715,88	5,26	136,19
46	2688	5030	2509	627,33	784,16	5,31	147,77
47	2860	5113	2686	671,54	839,43	5,36	156,55
48	1090	1547	965	228,49	285,61	9,83	29,05
49	1177	1733	1057	255,95	319,93	9,26	34,56
50	1269	1912	1133	282,31	352,89	8,96	39,37
51	1368	2087	1176	308,20	385,25	9,13	42,21
52	1474	2262	1263	334,11	417,64	8,75	47,74
53	1105	1687	1023	330,97	413,72	12,64	32,74
54	1193	1884	1087	369,64	462,05	12,52	36,90
55	1289	2073	1146	406,69	508,37	12,47	40,75
56	1391	2259	1204	443,12	553,90	12,43	44,56
57	1502	2445	1297	479,68	599,60	11,87	50,52
58	1115	1793	1020	430,20	537,75	16,26	33,07
59	1205	1998	1075	479,37	599,21	16,32	36,71
60	1302	2194	1155	526,44	658,05	15,76	41,75
61	1408	2388	1242	572,79	715,99	15,12	47,34
62	1522	2582	1335	619,44	774,30	14,50	53,40
63	1122	1879	1009	526,99	658,73	20,07	32,83
64	1214	2090	1091	586,14	732,67	19,30	37,97
65	1313	2292	1176	639,93	799,92	18,43	43,41
66	1421	2491	1268	689,62	862,03	17,49	49,28
67	1538	2692	1364	742,02	927,52	16,69	55,57

Fonte: o autor.

APÊNDICE D - Estudo de variação de parâmetros da *Crestbeam*: planilha eletrônica de cálculo ajustada

Nas tabelas ilustradas neste apêndice encontram-se as definições e os cálculos de todos os 67 modelos do estudo de variação de parâmetros apresentado ao longo do Capítulo 3, considerando a equação de resistência ao *pry-out* ajustada no Item 3.5.4, conforme equação abaixo:

$$P_{po,k} = \frac{71,5}{\eta} \chi_x h_{po}^{1.5} f_{ctm} (1 + \rho_{d,i})$$

Tabela D.1 - Propriedades dos materiais.

#	Designação	f_y (MPa)	E (MPa)	$f_{y,s}$ (MPa)	E_s (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	α_E	E_{cm} (MPa)
1	V4-AC-fc20	544	200000	500	210000	20,0	1,6	1	27085
2	V4-AC-fc25	544	200000	500	210000	25,0	2,0	1	28960
3	V4-AC-fc30	544	200000	500	210000	30,0	2,4	1	30589
4	V4-AC-fc35	544	200000	500	210000	35,0	2,7	1	32036
5	V4-AC-fc40	544	200000	500	210000	40,0	3,0	1	33346
6	V4-AC-fc45	544	200000	500	210000	45,0	3,3	1	34545
7	V4-AC-fc50	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
8	V4-AC-fy250	250	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
9	V4-AC-fy300	300	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
10	V4-AC-fy350	350	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
11	V4-AC-fy400	400	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
12	V4-AC-fy450	450	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
13	V4-AC-fc25-Ab8	544	200000	500	210000	25,0	2,0	1	28960
14	V4-AC-fc25-Ab10	544	200000	500	210000	25,0	2,0	1	28960
15	V4-AC-fc25-Ab12,5	544	200000	500	210000	25,0	2,0	1	28960
16	V4-AC-fc25-Ab16	544	200000	500	210000	25,0	2,0	1	28960
17	V4-AC-fc25-Ab20	544	200000	500	210000	25,0	2,0	1	28960
18	V4-AC-fc38-Ab8	544	200000	500	210000	38,0	2,9	1	32837
19	V4-AC-fc38-Ab10	544	200000	500	210000	38,0	2,9	1	32837
20	V4-AC-fc38-Ab12,5	544	200000	500	210000	38,0	2,9	1	32837
21	V4-AC-fc38-Ab16	544	200000	500	210000	38,0	2,9	1	32837
22	V4-AC-fc38-Ab20	544	200000	500	210000	38,0	2,9	1	32837
23	V4-AC-fc50-Ab8	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
24	V4-AC-fc50-Ab10	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
25	V4-AC-fc50-Ab12,5	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
26	V4-AC-fc50-Ab16	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
27	V4-AC-fc50-Ab20	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
28	V4-AC-fc25-tw8	544	200000	500	210000	25,0	2,0	1	28960
29	V4-AC-fc25-tw9,5	544	200000	500	210000	25,0	2,0	1	28960
30	V4-AC-fc25-tw12,5	544	200000	500	210000	25,0	2,0	1	28960
31	V4-AC-fc25-tw16	544	200000	500	210000	25,0	2,0	1	28960
32	V4-AC-fc25-tw19	544	200000	500	210000	25,0	2,0	1	28960
33	V4-AC-fc38-tw8	544	200000	500	210000	38,0	2,9	1	32837
34	V4-AC-fc38-tw9,5	544	200000	500	210000	38,0	2,9	1	32837
35	V4-AC-fc38-tw12,5	544	200000	500	210000	38,0	2,9	1	32837
36	V4-AC-fc38-tw16	544	200000	500	210000	38,0	2,9	1	32837
37	V4-AC-fc38-tw19	544	200000	500	210000	38,0	2,9	1	32837
38	V4-AC-fc50-tw8	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
39	V4-AC-fc50-tw9,5	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
40	V4-AC-fc50-tw12,5	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
41	V4-AC-fc50-tw16	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
42	V4-AC-fc50-tw19	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
43	V4-AC-tw8-faco	250	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
44	V4-AC-tw9,5-faco	250	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
45	V4-AC-tw12,5-faco	250	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
46	V4-AC-tw16-faco	250	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
47	V4-AC-tw19-faco	250	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
48	V4-AC-fc20-c20	544	200000	500	210000	20,0	1,6	1	27085
49	V4-AC-fc20-c30	544	200000	500	210000	20,0	1,6	1	27085
50	V4-AC-fc20-c40	544	200000	500	210000	20,0	1,6	1	27085
51	V4-AC-fc20-c50	544	200000	500	210000	20,0	1,6	1	27085
52	V4-AC-fc20-c60	544	200000	500	210000	20,0	1,6	1	27085
53	V4-AC-fc30-c20	544	200000	500	210000	30,0	2,4	1	30589
54	V4-AC-fc30-c30	544	200000	500	210000	30,0	2,4	1	30589
55	V4-AC-fc30-c40	544	200000	500	210000	30,0	2,4	1	30589
56	V4-AC-fc30-c50	544	200000	500	210000	30,0	2,4	1	30589
57	V4-AC-fc30-c60	544	200000	500	210000	30,0	2,4	1	30589
58	V4-AC-fc40-c20	544	200000	500	210000	40,0	3,0	1	33346
59	V4-AC-fc40-c30	544	200000	500	210000	40,0	3,0	1	33346
60	V4-AC-fc40-c40	544	200000	500	210000	40,0	3,0	1	33346
61	V4-AC-fc40-c50	544	200000	500	210000	40,0	3,0	1	33346
62	V4-AC-fc40-c60	544	200000	500	210000	40,0	3,0	1	33346
63	V4m-AC-c25-fc50	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
64	V4m-AC-c30-fc50	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
65	V4m-AC-c35-fc50	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
66	V4m-AC-c40-fc50	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654
67	V4m-AC-c45-fc50	544	200000	500	210000	50,0	3,6	1	35654

Fonte: o autor.

Tabela D.2 – Geometria do perfil de aço T invertido.

#	Vão (m)	d _A (mm)	b _r (mm)	t _r (mm)	t _w (mm)	R (mm)	A _{circ} (mm ²)	h _A (mm)	A _{A1} (cm ²)	h/t _w	h/t _w ≤ 3.76*raiz(E/f _y)
1	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
2	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
3	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
4	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
5	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
6	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
7	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
8	4	400	170	16,0	10,0	0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
9	4	400	170	16,0	10,0	0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
10	4	400	170	16,0	10,0	0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
11	4	400	170	16,0	10,0	0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
12	4	400	170	16,0	10,0	0	0	384,0	65,60	38,40	Viga Compacta
13	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
14	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
15	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
16	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
17	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
18	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
19	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
20	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
21	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
22	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
23	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
24	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
25	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
26	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
27	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
28	4	240	170	19,0	8,0	0	0	221,0	49,98	27,63	Viga Compacta
29	4	240	170	19,0	9,5	0	0	221,0	53,30	23,26	Viga Compacta
30	4	240	170	19,0	12,5	0	0	221,0	59,93	17,68	Viga Compacta
31	4	240	170	19,0	16,0	0	0	221,0	67,66	13,81	Viga Compacta
32	4	240	170	19,0	19,0	0	0	221,0	74,29	11,63	Viga Compacta
33	4	240	170	19,0	8,0	0	0	221,0	49,98	27,63	Viga Compacta
34	4	240	170	19,0	9,5	0	0	221,0	53,30	23,26	Viga Compacta
35	4	240	170	19,0	12,5	0	0	221,0	59,93	17,68	Viga Compacta
36	4	240	170	19,0	16,0	0	0	221,0	67,66	13,81	Viga Compacta
37	4	240	170	19,0	19,0	0	0	221,0	74,29	11,63	Viga Compacta
38	4	240	170	19,0	8,0	0	0	221,0	49,98	27,63	Viga Compacta
39	4	240	170	19,0	9,5	0	0	221,0	53,30	23,26	Viga Compacta
40	4	240	170	19,0	12,5	0	0	221,0	59,93	17,68	Viga Compacta
41	4	240	170	19,0	16,0	0	0	221,0	67,66	13,81	Viga Compacta
42	4	240	170	19,0	19,0	0	0	221,0	74,29	11,63	Viga Compacta
43	4	400	170	19,0	8,0	0	0	381,0	62,78	47,63	Viga Compacta
44	4	400	170	19,0	9,5	0	0	381,0	68,50	40,11	Viga Compacta
45	4	400	170	19,0	12,5	0	0	381,0	79,93	30,48	Viga Compacta
46	4	400	170	19,0	16,0	0	0	381,0	93,26	23,81	Viga Compacta
47	4	400	170	19,0	19,0	0	0	381,0	104,69	20,05	Viga Compacta
48	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
49	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
50	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
51	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
52	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
53	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
54	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
55	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
56	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
57	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
58	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
59	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
60	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
61	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
62	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
63	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
64	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
65	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
66	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta
67	4	240	170	16,0	16,0	0	0	224,0	63,04	14,00	Viga Compacta

Fonte: o autor.

Tabela D.3 – Propriedades geométricas do *Crestbond* e da laje de concreto armado.

#	e_x	h_{sc}/h_D (mm)	b (mm)	B (mm)	R_{cr} (mm)	A_D (cm ²)	c_u/c_b (mm)	t_c (mm)	c_o/c_t (mm)	b_c (mm)	b_{ef} (mm)	Verif.
1	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
2	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
3	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
4	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
5	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
6	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
7	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
8	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
9	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
10	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
11	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
12	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
13	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
14	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
15	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
16	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
17	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
18	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
19	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
20	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
21	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
22	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
23	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
24	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
25	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
26	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
27	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
28	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
29	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
30	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
31	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
32	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
33	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
34	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
35	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
36	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
37	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
38	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
39	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
40	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
41	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
42	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	25	120	25	600	1000	OK!
43	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
44	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
45	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
46	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
47	200	93,2	64,0	136,0	21,0	93,20	50	193	50	600	1000	OK!
48	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
49	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
50	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
51	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
52	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!
53	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
54	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
55	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
56	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
57	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!
58	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
59	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
60	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
61	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
62	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!
63	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	20	110	20	600	1000	OK!
64	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	30	130	30	600	1000	OK!
65	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	40	150	40	600	1000	OK!
66	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	50	170	50	600	1000	OK!
67	150	69,9	48,0	102,0	15,8	52,43	60	190	60	600	1000	OK!

Fonte: o autor.

Tabela D.4 – Armadura passante (A_b) e armadura superior (A_t).

#	n_b	\varnothing_b (mm)	A_b (cm ²)	n_t	\varnothing_t (mm)	A_t (cm ²)	A_{sf} (cm ²)	Arm. Conf.
1	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
2	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
3	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
4	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
5	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
6	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
7	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
8	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
9	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
10	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
11	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
12	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
13	2	8,0	1,01	1	8,0	0,50	1,51	Sim
14	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
15	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
16	2	16,0	4,02	1	8,0	0,50	4,52	Sim
17	2	20,0	6,28	1	8,0	0,50	6,79	Sim
18	2	8,0	1,01	1	8,0	0,50	1,51	Sim
19	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
20	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
21	2	16,0	4,02	1	8,0	0,50	4,52	Sim
22	2	20,0	6,28	1	8,0	0,50	6,79	Sim
23	2	8,0	1,01	1	8,0	0,50	1,51	Sim
24	2	10,0	1,57	1	8,0	0,50	2,07	Sim
25	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
26	2	16,0	4,02	1	8,0	0,50	4,52	Sim
27	2	20,0	6,28	1	8,0	0,50	6,79	Sim
28	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
29	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
30	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
31	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
32	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
33	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
34	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
35	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
36	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
37	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
38	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
39	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
40	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
41	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
42	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
43	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
44	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
45	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
46	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
47	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
48	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
49	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
50	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
51	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
52	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
53	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
54	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
55	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
56	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
57	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
58	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
59	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
60	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
61	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
62	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
63	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
64	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
65	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
66	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim
67	2	12,5	2,45	1	8,0	0,50	2,96	Sim

Fonte: o autor.

Tabela D.5 – Resistência do *Crestbond*.

#	η_D	ρ_D	P_{sh} (kN/ex)	h_{po} (mm)	χ_x	$\rho_{D,i}$	P_{po} (kN/ex)	P_{pl} (kN/ex)	Falha	N_{sc}	$N_{sc,ef}$	Q (kN)
1	2,132	0,232	264,4	35,6	0,94	0,089	64,1	304,2	PO	28,0	28,0	897,4
2	2,132	0,217	292,0	35,6	0,94	0,084	81,5	304,2	PO	28,0	28,0	1141,0
3	2,132	0,206	316,8	35,6	0,94	0,079	97,7	304,2	PO	28,0	28,0	1367,6
4	2,132	0,196	339,5	35,6	0,94	0,076	113,1	304,2	PO	28,0	28,0	1583,9
5	2,132	0,189	360,6	35,6	0,94	0,073	128,1	304,2	PO	28,0	28,0	1793,5
6	2,132	0,182	380,4	35,6	0,94	0,070	142,8	304,2	PO	28,0	28,0	1998,9
7	2,132	0,176	399,1	35,6	0,94	0,068	157,3	304,2	PO	28,0	28,0	2201,7
8	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	274,7	116,5	Aço	21,0	21,0	1223,3
9	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	274,7	139,8	Aço	21,0	21,0	1467,9
10	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	274,7	163,1	Aço	21,0	21,0	1712,6
11	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	274,7	186,4	Aço	21,0	21,0	1957,2
12	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	274,7	209,7	Aço	21,0	21,0	2201,9
13	2,132	0,139	273,2	35,6	0,94	0,061	79,8	304,2	PO	28,0	28,0	1117,0
14	2,132	0,217	292,0	35,6	0,94	0,084	81,5	304,2	PO	28,0	28,0	1141,0
15	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	84,2	304,2	PO	28,0	28,0	1178,4
16	2,132	0,556	373,3	35,6	0,94	0,182	88,9	304,2	PO	28,0	28,0	1244,9
17	2,132	0,869	448,3	35,6	0,94	0,273	95,8	304,2	PO	28,0	28,0	1340,9
18	2,132	0,123	332,0	35,6	0,94	0,054	119,9	304,2	PO	28,0	28,0	1678,3
19	2,132	0,192	352,4	35,6	0,94	0,074	122,2	304,2	PO	28,0	28,0	1710,3
20	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	125,7	304,2	PO	28,0	28,0	1760,3
21	2,132	0,491	440,8	35,6	0,94	0,161	132,1	304,2	PO	28,0	28,0	1849,0
22	2,132	0,766	522,4	35,6	0,94	0,241	141,2	304,2	PO	28,0	28,0	1977,0
23	2,132	0,113	377,5	35,6	0,94	0,049	154,5	304,2	PO	28,0	28,0	2163,6
24	2,132	0,176	399,1	35,6	0,94	0,068	157,3	304,2	PO	28,0	28,0	2201,7
25	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	161,5	304,2	PO	28,0	28,0	2261,4
26	2,132	0,452	492,4	35,6	0,94	0,148	169,1	304,2	PO	28,0	28,0	2367,1
27	2,132	0,706	578,6	35,6	0,94	0,222	180,0	304,2	PO	28,0	28,0	2519,7
28	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	84,2	152,1	PO	28,0	28,0	1178,4
29	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	84,2	180,6	PO	28,0	28,0	1178,4
30	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	84,2	237,7	PO	28,0	28,0	1178,4
31	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	84,2	304,2	PO	28,0	28,0	1178,4
32	2,132	0,339	321,3	35,6	0,94	0,119	84,2	361,2	PO	28,0	28,0	1178,4
33	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	125,7	152,1	PO	28,0	28,0	1760,3
34	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	125,7	180,6	PO	28,0	28,0	1760,3
35	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	125,7	237,7	PO	28,0	28,0	1760,3
36	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	125,7	304,2	PO	28,0	28,0	1760,3
37	2,132	0,299	384,2	35,6	0,94	0,105	125,7	361,2	PO	28,0	28,0	1760,3
38	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	161,5	152,1	Aço	28,0	28,0	2129,4
39	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	161,5	180,6	PO	28,0	28,0	2261,4
40	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	161,5	237,7	PO	28,0	28,0	2261,4
41	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	161,5	304,2	PO	28,0	28,0	2261,4
42	2,132	0,276	432,7	35,6	0,94	0,097	161,5	361,2	PO	28,0	28,0	2261,4
43	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	274,7	93,2	Aço	21,0	21,0	978,6
44	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	274,7	110,7	Aço	21,0	21,0	1162,1
45	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	274,7	145,6	Aço	21,0	21,0	1529,1
46	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	274,7	186,4	Aço	21,0	21,0	1957,2
47	2,007	0,155	655,7	63,8	0,70	0,045	274,7	221,4	Aço	21,0	21,0	2324,2
48	2,132	0,363	292,4	30,6	1,00	0,139	57,0	304,2	PO	28,0	28,0	798,6
49	2,132	0,363	292,4	40,6	0,82	0,118	70,2	304,2	PO	28,0	28,0	983,2
50	2,132	0,363	292,4	50,6	0,66	0,102	77,3	304,2	PO	28,0	28,0	1082,2
51	2,132	0,363	292,4	60,6	0,55	0,090	83,7	304,2	PO	28,0	28,0	1171,5
52	2,132	0,363	292,4	70,6	0,47	0,080	89,5	304,2	PO	28,0	28,0	1253,5
53	2,132	0,321	347,2	30,6	1,00	0,123	86,5	304,2	PO	28,0	28,0	1211,4
54	2,132	0,321	347,2	40,6	0,82	0,104	106,7	304,2	PO	28,0	28,0	1494,4
55	2,132	0,321	347,2	50,6	0,66	0,090	117,7	304,2	PO	28,0	28,0	1647,3
56	2,132	0,321	347,2	60,6	0,55	0,080	127,5	304,2	PO	28,0	28,0	1785,2
57	2,132	0,321	347,2	70,6	0,47	0,071	136,6	304,2	PO	28,0	28,0	1911,9
58	2,132	0,295	392,8	30,6	1,00	0,113	113,1	304,2	PO	28,0	28,0	1583,8
59	2,132	0,295	392,8	40,6	0,82	0,095	139,7	304,2	PO	28,0	28,0	1956,3
60	2,132	0,295	392,8	50,6	0,66	0,083	154,2	304,2	PO	28,0	28,0	2158,6
61	2,132	0,295	392,8	60,6	0,55	0,073	167,2	304,2	PO	28,0	28,0	2341,1
62	2,132	0,295	392,8	70,6	0,47	0,065	179,2	304,2	PO	28,0	28,0	2508,7
63	2,132	0,276	432,7	30,6	1,00	0,106	138,6	304,2	PO	28,0	28,0	1940,1
64	2,132	0,276	432,7	40,6	0,82	0,089	171,3	304,2	PO	28,0	28,0	2398,6
65	2,132	0,276	432,7	50,6	0,66	0,077	189,2	304,2	PO	28,0	28,0	2648,4
66	2,132	0,276	432,7	60,6	0,55	0,068	205,3	304,2	PO	28,0	28,0	2873,8
67	2,132	0,276	432,7	70,6	0,47	0,061	220,1	304,2	PO	28,0	28,0	3081,0

Fonte: o autor.

Tabela D.6 – Verificações Z-26.4-56:2023.

#	t_w/h_D	$e_x \geq 2,5h_{po}$	$S_{m\acute{a}x}$ da $A_{s,confin}$	Verif do S_{max}	$A_{b,min}$ (cm^2)	Verif do $A_{b,min}$
1	OK!	OK!	160,2	OK!	0,64	OK!
2	OK!	OK!	160,2	OK!	0,81	OK!
3	OK!	OK!	160,2	OK!	0,98	OK!
4	OK!	OK!	160,2	OK!	1,13	OK!
5	OK!	OK!	160,2	OK!	1,28	OK!
6	OK!	OK!	160,2	OK!	1,43	OK!
7	OK!	OK!	160,2	OK!	1,57	Não OK!
8	OK!	OK!	287,1	OK!	1,17	OK!
9	OK!	OK!	287,1	OK!	1,40	OK!
10	OK!	OK!	287,1	OK!	1,63	OK!
11	OK!	OK!	287,1	OK!	1,86	OK!
12	OK!	OK!	287,1	OK!	2,10	OK!
13	OK!	OK!	160,2	OK!	0,80	OK!
14	OK!	OK!	160,2	OK!	0,81	OK!
15	OK!	OK!	160,2	OK!	0,84	OK!
16	OK!	OK!	160,2	OK!	0,89	OK!
17	OK!	OK!	160,2	OK!	0,96	OK!
18	OK!	OK!	160,2	OK!	1,20	Não OK!
19	OK!	OK!	160,2	OK!	1,22	OK!
20	OK!	OK!	160,2	OK!	1,26	OK!
21	OK!	OK!	160,2	OK!	1,32	OK!
22	OK!	OK!	160,2	OK!	1,41	OK!
23	OK!	OK!	160,2	OK!	1,55	Não OK!
24	OK!	OK!	160,2	OK!	1,57	Não OK!
25	OK!	OK!	160,2	OK!	1,62	OK!
26	OK!	OK!	160,2	OK!	1,69	OK!
27	OK!	OK!	160,2	OK!	1,80	OK!
28	OK!	OK!	160,2	OK!	0,84	OK!
29	OK!	OK!	160,2	OK!	0,84	OK!
30	OK!	OK!	160,2	OK!	0,84	OK!
31	OK!	OK!	160,2	OK!	0,84	OK!
32	OK!	OK!	160,2	OK!	0,84	OK!
33	OK!	OK!	160,2	OK!	1,26	OK!
34	OK!	OK!	160,2	OK!	1,26	OK!
35	OK!	OK!	160,2	OK!	1,26	OK!
36	OK!	OK!	160,2	OK!	1,26	OK!
37	OK!	OK!	160,2	OK!	1,26	OK!
38	OK!	OK!	160,2	OK!	1,52	OK!
39	OK!	OK!	160,2	OK!	1,62	OK!
40	OK!	OK!	160,2	OK!	1,62	OK!
41	OK!	OK!	160,2	OK!	1,62	OK!
42	OK!	OK!	160,2	OK!	1,62	OK!
43	OK!	OK!	287,1	OK!	0,93	OK!
44	OK!	OK!	287,1	OK!	1,11	OK!
45	OK!	OK!	287,1	OK!	1,46	OK!
46	OK!	OK!	287,1	OK!	1,86	OK!
47	OK!	OK!	287,1	OK!	2,21	OK!
48	OK!	OK!	137,7	Não OK!	0,57	OK!
49	OK!	OK!	182,7	OK!	0,70	OK!
50	OK!	OK!	227,7	OK!	0,77	OK!
51	OK!	Não OK!	272,7	OK!	0,84	OK!
52	OK!	Não OK!	300,0	OK!	0,90	OK!
53	OK!	OK!	137,7	Não OK!	0,87	OK!
54	OK!	OK!	182,7	OK!	1,07	OK!
55	OK!	OK!	227,7	OK!	1,18	OK!
56	OK!	Não OK!	272,7	OK!	1,28	OK!
57	OK!	Não OK!	300,0	OK!	1,37	OK!
58	OK!	OK!	137,7	Não OK!	1,13	OK!
59	OK!	OK!	182,7	OK!	1,40	OK!
60	OK!	OK!	227,7	OK!	1,54	OK!
61	OK!	Não OK!	272,7	OK!	1,67	OK!
62	OK!	Não OK!	300,0	OK!	1,79	OK!
63	OK!	OK!	137,7	Não OK!	1,39	OK!
64	OK!	OK!	182,7	OK!	1,71	OK!
65	OK!	OK!	227,7	OK!	1,89	OK!
66	OK!	Não OK!	272,7	OK!	2,05	OK!
67	OK!	Não OK!	300,0	OK!	2,20	OK!

Fonte: o autor.

Tabela D.7 – Propriedades da seção de aço - considerando a altura total do perfil igual a $d = d_A + c_u$.

#	d (mm)	h (mm)	y _a (mm)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	y _c (mm)	z _{EL} (mm)	A _A (cm ²)	P _{lin,ap} (kg/m)	P _{lin,real} (kg/m)	A _c (cm ²)
1	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
2	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
3	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
4	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
5	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
6	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
7	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
8	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
9	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
10	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
11	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
12	450,0	434,0	146,31	15283	658,7	496,81	350,5	70,6	55,4	59,1	1153,0
13	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
14	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
15	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
16	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
17	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
18	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
19	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
20	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
21	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
22	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
23	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
24	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
25	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
26	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
27	265,0	249,0	86,74	4902	663,6	300,27	213,5	67,0	52,6	57,0	716,0
28	265,0	246,0	59,67	3149	778,9	300,13	240,5	52,0	40,8	43,0	718,0
29	265,0	246,0	65,12	3569	779,6	300,16	235,0	55,7	43,7	46,3	717,6
30	265,0	246,0	74,12	4326	781,9	300,21	226,1	63,1	49,5	52,9	716,9
31	265,0	246,0	82,28	5109	786,3	300,27	218,0	71,7	56,3	60,6	716,0
32	265,0	246,0	87,85	5720	792,0	300,32	212,5	79,0	62,0	67,3	715,3
33	265,0	246,0	59,67	3149	778,9	300,13	240,5	52,0	40,8	43,0	718,0
34	265,0	246,0	65,12	3569	779,6	300,16	235,0	55,7	43,7	46,3	717,6
35	265,0	246,0	74,12	4326	781,9	300,21	226,1	63,1	49,5	52,9	716,9
36	265,0	246,0	82,28	5109	786,3	300,27	218,0	71,7	56,3	60,6	716,0
37	265,0	246,0	87,85	5720	792,0	300,32	212,5	79,0	62,0	67,3	715,3
38	265,0	246,0	59,67	3149	778,9	300,13	240,5	52,0	40,8	43,0	718,0
39	265,0	246,0	65,12	3569	779,6	300,16	235,0	55,7	43,7	46,3	717,6
40	265,0	246,0	74,12	4326	781,9	300,21	226,1	63,1	49,5	52,9	716,9
41	265,0	246,0	82,28	5109	786,3	300,27	218,0	71,7	56,3	60,6	716,0
42	265,0	246,0	87,85	5720	792,0	300,32	212,5	79,0	62,0	67,3	715,3
43	450,0	431,0	125,67	13790	779,7	496,75	371,1	66,8	52,4	55,3	1154,0
44	450,0	431,0	135,28	15489	781,0	496,79	361,5	73,2	57,5	61,0	1153,3
45	450,0	431,0	150,17	18572	784,9	496,89	346,7	86,2	67,6	72,2	1151,8
46	450,0	431,0	162,73	21821	792,6	497,00	334,3	101,3	79,5	85,3	1150,0
47	450,0	431,0	170,86	24413	802,5	497,09	326,2	114,2	89,6	96,6	1148,5
48	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
49	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
50	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
51	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
52	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4
53	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
54	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
55	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
56	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
57	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4
58	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
59	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
60	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
61	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
62	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4
63	260,0	244,0	84,62	4652	663,4	295,22	210,6	66,2	52,0	56,4	656,8
64	270,0	254,0	88,87	5160	663,7	305,31	216,4	67,8	53,3	57,6	775,2
65	280,0	264,0	93,16	5702	664,1	315,39	222,2	69,4	54,5	58,9	893,6
66	290,0	274,0	97,48	6278	664,4	325,47	228,0	71,0	55,8	60,2	1012,0
67	300,0	284,0	101,83	6888	664,8	335,55	233,7	72,6	57,0	61,4	1130,4

Fonte: o autor.

Tabela D.8 – Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão total (FSC) - parte 1.

#	C _I (kN)	T _I (kN)	C _{II} (kN)	T _{II} (kN)	C _{II,c} (kN)	a (mm)	x (mm)	y _{LNP} (mm)	Situação LNP
1	1140,0	3647,0	1649,6	3429,4	1432,0	303,9	102,2	137,8	II
2	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
3	1710,0	3647,0	2365,6	3429,4	2148,0	202,6	61,1	178,9	II
4	1995,0	3647,0	2723,6	3429,4	2506,0	173,7	40,5	199,5	II
5	2280,0	3647,0	3081,6	3429,4	2864,0	152,0	20,0	220,0	II
6	2565,0	3647,0	3439,6	3429,4	3222,0	135,1	-0,6	240,2	III
7	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
8	4290,0	1765,0	5890,0	1640,0	5765,0	58,8	-850,0	534,2	I
9	4290,0	2118,0	5915,0	1968,0	5765,0	70,6	-657,8	522,4	I
10	4290,0	2471,0	5940,0	2296,0	5765,0	82,4	-520,6	510,6	I
11	4290,0	2824,0	5965,0	2624,0	5765,0	94,1	-417,6	498,9	I
12	4290,0	3177,0	5990,0	2952,0	5765,0	105,9	-337,6	487,1	I
13	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
14	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
15	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
16	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
17	1425,0	3647,0	2007,6	3429,4	1790,0	243,1	81,7	158,3	II
18	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
19	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
20	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
21	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
22	2166,0	3647,0	2938,4	3429,4	2720,8	160,0	28,2	211,8	II
23	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
24	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
25	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
26	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
27	2850,0	3647,0	3797,6	3429,4	3580,0	121,6	-21,2	247,9	III
28	1425,0	2827,7	1903,8	2718,9	1795,0	188,5	93,6	146,4	II
29	1425,0	3028,4	1923,3	2899,2	1794,1	201,9	94,4	145,6	II
30	1425,0	3429,9	1962,2	3259,9	1792,2	228,7	95,4	144,6	II
31	1425,0	3898,3	2007,6	3680,7	1790,0	259,9	96,1	143,9	II
32	1425,0	4299,8	2046,5	4041,4	1788,1	286,7	96,5	143,5	II
33	2166,0	2827,7	2837,2	2718,9	2728,4	124,0	-13,6	243,8	III
34	2166,0	3028,4	2856,2	2899,2	2727,0	132,8	4,2	235,8	II
35	2166,0	3429,9	2894,1	3259,9	2724,1	150,4	26,9	213,1	II
36	2166,0	3898,3	2938,4	3680,7	2720,8	171,0	42,6	197,4	II
37	2166,0	4299,8	2976,4	4041,4	2718,0	188,6	51,5	188,5	II
38	2850,0	2827,7	3698,8	2718,9	3590,0	94,3	-112,6	265,7	I
39	2850,0	3028,4	3717,3	2899,2	3588,1	100,9	-79,1	260,5	III
40	2850,0	3429,9	3754,4	3259,9	3584,4	114,3	-36,4	251,5	III
41	2850,0	3898,3	3797,6	3680,7	3580,0	129,9	-6,7	242,5	III
42	2850,0	4299,8	3834,7	4041,4	3576,3	143,3	10,0	230,0	II
43	4290,0	1669,5	5870,0	1569,5	5770,0	55,7	-1075,1	537,4	I
44	4290,0	1831,1	5885,0	1712,4	5766,3	61,0	-878,4	532,0	I
45	4290,0	2154,4	5915,0	1998,1	5758,8	71,8	-626,7	521,2	I
46	4290,0	2531,5	5950,0	2331,5	5750,0	84,4	-452,3	508,6	I
47	4290,0	2854,8	5980,0	2617,3	5742,5	95,2	-354,0	497,8	I
48	1080,0	3603,5	1487,7	3429,4	1313,6	300,3	111,5	128,5	II
49	1200,0	3690,5	1811,5	3429,4	1550,4	307,5	92,9	147,1	II
50	1320,0	3777,5	2135,4	3429,4	1787,2	314,8	74,3	165,7	II
51	1440,0	3864,6	2459,2	3429,4	2024,0	322,0	55,7	184,3	II
52	1560,0	3951,6	2783,0	3429,4	2260,8	329,3	37,1	202,9	II
53	1620,0	3603,5	2144,5	3429,4	1970,4	200,2	73,8	166,2	II
54	1800,0	3690,5	2586,7	3429,4	2325,6	205,0	48,4	191,6	II
55	1980,0	3777,5	3029,0	3429,4	2680,8	209,9	23,0	217,0	II
56	2160,0	3864,6	3471,2	3429,4	3036,0	214,7	-2,4	241,2	III
57	2340,0	3951,6	3913,4	3429,4	3391,2	219,5	-27,8	253,9	III
58	2160,0	3603,5	2801,3	3429,4	2627,2	150,1	36,1	203,9	II
59	2400,0	3690,5	3361,9	3429,4	3100,8	153,8	3,9	236,1	II
60	2640,0	3777,5	3922,6	3429,4	3574,4	157,4	-28,3	252,1	III
61	2880,0	3864,6	4483,2	3429,4	4048,0	161,0	-60,5	265,8	III
62	3120,0	3951,6	5043,8	3429,4	4521,6	164,7	-92,7	279,6	III
63	2700,0	3603,5	3458,1	3429,4	3284,0	120,1	-1,6	240,6	III
64	3000,0	3690,5	4137,1	3429,4	3876,0	123,0	-40,7	255,2	III
65	3300,0	3777,5	4816,2	3429,4	4468,0	125,9	-79,7	269,8	III
66	3600,0	3864,6	5495,2	3429,4	5060,0	128,8	-118,7	284,3	III
67	3900,0	3951,6	6174,2	3429,4	5652,0	131,7	-157,7	298,9	III

Fonte: o autor.

Tabela D.9 – Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão total (FSC) - parte 2.

#	T _a (kN)	C _a (kN)	C _c (kN)	Verific.	y _T (mm)	y _{Ca} (mm)	y _{Cc} (mm)	M _{PL,FSC} (kN.m)	P _{ult,FSC} (kN) ou Q _{ult,FSC} (kN/m)	Q _{min,FSC} (kN)	η
1	2539,5	1107,5	1432,0	OK	25,6	201,4	300,3	588,0	735,0	1432,0	0,63
2	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,64
3	2897,5	749,5	2148,0	OK	41,1	221,9	300,3	692,1	865,2	2148,0	0,64
4	3076,5	570,5	2506,0	OK	50,4	232,2	300,3	729,9	912,3	2506,0	0,63
5	3255,5	391,5	2864,0	OK	60,7	242,5	300,3	757,3	946,6	2864,0	0,63
6	3431,4	215,6	3215,8	OK	71,8	252,6	300,4	774,0	967,5	3215,8	0,62
7	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,66
8	1765,0	0,0	1765,0	OK	146,3	0,0	563,6	736,5	920,6	1765,0	0,69
9	2118,0	0,0	2118,0	OK	146,3	0,0	557,7	871,3	1089,1	2118,0	0,69
10	2471,0	0,0	2471,0	OK	146,3	0,0	551,8	1002,0	1252,5	2471,0	0,69
11	2824,0	0,0	2824,0	OK	146,3	0,0	545,9	1128,5	1410,7	2824,0	0,69
12	3177,0	0,0	3177,0	OK	146,3	0,0	540,1	1250,9	1563,6	3177,0	0,69
13	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,62
14	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,64
15	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,66
16	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,70
17	2718,5	928,5	1790,0	OK	32,9	211,7	300,3	644,7	805,9	1790,0	0,75
18	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,62
19	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,63
20	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,65
21	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,68
22	3183,9	463,1	2720,8	OK	56,5	238,4	300,3	747,6	934,5	2720,8	0,73
23	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,65
24	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,66
25	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,68
26	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,71
27	3498,1	148,8	3349,3	OK	76,3	256,5	304,1	790,0	987,5	3349,3	0,75
28	2311,4	516,4	1795,0	OK	22,1	205,7	300,1	593,8	742,3	1795,0	0,66
29	2411,3	617,2	1794,1	OK	23,3	205,3	300,2	609,1	761,3	1794,1	0,66
30	2611,1	818,9	1792,2	OK	25,2	204,8	300,2	639,8	799,8	1792,2	0,66
31	2844,2	1054,2	1790,0	OK	27,0	204,4	300,3	676,2	845,3	1790,0	0,66
32	3044,0	1255,8	1788,1	OK	28,2	204,2	300,3	707,7	884,6	1788,1	0,66
33	2735,4	92,3	2643,1	OK	51,4	254,4	302,0	681,2	851,5	2643,1	0,67
34	2877,7	150,7	2727,0	OK	52,7	250,4	300,2	704,7	880,9	2727,0	0,65
35	3077,0	352,9	2724,1	OK	49,5	239,1	300,2	749,8	937,2	2724,1	0,65
36	3309,6	588,8	2720,8	OK	47,4	231,2	300,3	796,3	995,4	2720,8	0,65
37	3508,9	790,9	2718,0	OK	46,1	226,7	300,3	833,7	1042,1	2718,0	0,65
38	2827,7	0,0	2827,7	OK	59,7	0,0	312,9	716,0	895,0	2827,7	0,75
39	3005,3	23,1	2982,2	OK	63,1	262,8	310,3	741,8	927,2	2982,2	0,76
40	3338,2	91,8	3246,4	OK	67,2	258,3	305,9	792,3	990,4	3246,4	0,70
41	3702,5	195,8	3506,8	OK	69,5	253,8	301,5	849,5	1061,9	3506,8	0,64
42	3938,0	361,8	3576,3	OK	67,0	247,5	300,3	899,6	1124,5	3576,3	0,63
43	1669,5	0,0	1669,5	OK	125,7	0,0	565,2	733,7	917,2	1669,5	0,59
44	1831,1	0,0	1831,1	OK	135,3	0,0	562,5	782,3	977,8	1831,1	0,63
45	2154,4	0,0	2154,4	OK	150,2	0,0	557,1	876,7	1095,8	2154,4	0,71
46	2531,5	0,0	2531,5	OK	162,7	0,0	550,8	982,4	1228,0	2531,5	0,77
47	2854,8	0,0	2854,8	OK	170,9	0,0	545,4	1069,3	1336,6	2854,8	0,81
48	2458,5	1144,9	1313,6	OK	22,9	194,2	295,2	553,9	692,3	1313,6	0,61
49	2620,4	1070,0	1550,4	OK	28,4	208,5	305,3	622,0	777,6	1550,4	0,63
50	2782,4	995,2	1787,2	OK	34,5	222,8	315,4	689,6	861,9	1787,2	0,61
51	2944,3	920,3	2024,0	OK	41,0	237,1	325,5	756,2	945,3	2024,0	0,58
52	3106,2	845,4	2260,8	OK	48,0	251,4	335,6	822,0	1027,4	2260,8	0,55
53	2786,9	816,5	1970,4	OK	36,3	213,1	295,2	654,4	818,1	1970,4	0,61
54	3008,0	682,4	2325,6	OK	46,2	230,8	305,3	728,6	910,7	2325,6	0,64
55	3229,2	548,4	2680,8	OK	57,1	248,5	315,4	797,4	996,8	2680,8	0,61
56	3439,8	424,8	3015,0	OK	68,3	265,6	326,1	861,0	1076,3	3015,0	0,59
57	3550,0	401,6	3148,4	OK	73,7	276,9	342,4	927,6	1159,5	3148,4	0,61
58	3115,3	488,1	2627,2	OK	53,2	232,0	295,2	723,1	903,9	2627,2	0,60
59	3395,6	294,8	3100,8	OK	68,7	253,1	305,3	788,2	985,2	3100,8	0,63
60	3534,7	242,9	3291,8	OK	76,1	266,0	321,3	853,6	1067,0	3291,8	0,66
61	3654,4	210,2	3444,2	OK	82,4	277,9	338,2	922,2	1152,8	3444,2	0,68
62	3774,1	177,6	3596,5	OK	88,8	289,8	355,0	993,2	1241,5	3596,5	0,70
63	3434,7	168,7	3266,0	OK	72,9	250,3	295,5	757,0	946,3	3266,0	0,59
64	3561,5	128,9	3432,6	OK	79,7	262,6	312,8	823,6	1029,5	3432,6	0,70
65	3688,4	89,2	3599,2	OK	86,7	274,9	330,0	892,6	1115,7	3599,2	0,74
66	3815,2	49,4	3765,8	OK	93,8	287,2	347,2	963,9	1204,9	3765,8	0,76
67	3942,0	9,6	3932,3	OK	101,1	299,4	364,5	1037,5	1296,9	3932,3	0,78

Fonte: o autor.

Tabela D.10 – Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão parcial (PSC) - parte 1.

#	C _{c,PSC}	Y _{LNP,PSC,c}	Situação	C _{a,PSC}	T _{a,PSC}	Y _{LNP,PSC,A}	Situação
	(kN)	(mm)	Y _{LNP,PSC,C}	(kN)	(kN)	(mm)	Y _{LNP,PSC,A}
1	897,4	285,2	I	1374,8	2272,2	107,1	II
2	1141,0	283,9	I	1253,0	2394,0	121,0	II
3	1367,6	284,0	I	1139,7	2507,3	134,1	II
4	1583,9	284,6	I	1031,5	2615,4	146,5	II
5	1793,5	285,3	I	926,7	2720,2	158,5	II
6	1998,9	286,0	I	824,0	2822,9	170,3	II
7	2201,7	286,6	I	722,6	2924,4	182,0	II
8	1223,3	552,2	I	270,9	1494,1	341,7	II
9	1467,9	544,1	I	325,1	1793,0	341,7	II
10	1712,6	535,9	I	379,2	2091,8	341,7	II
11	1957,2	527,8	I	433,4	2390,6	341,7	II
12	2201,9	519,6	I	487,6	2689,4	341,7	II
13	1117,0	285,5	I	1265,0	2382,0	119,7	II
14	1141,0	283,9	I	1253,0	2394,0	121,0	II
15	1178,4	281,4	I	1234,3	2412,7	123,2	II
16	1244,9	277,0	I	1201,0	2445,9	127,0	II
17	1340,9	270,6	I	1153,1	2493,9	132,5	II
18	1678,3	286,4	I	984,3	2662,6	151,9	II
19	1710,3	285,0	I	968,3	2678,6	153,7	II
20	1760,3	282,8	I	943,3	2703,6	156,6	II
21	1849,0	278,9	I	899,0	2748,0	161,7	II
22	1977,0	273,3	I	835,0	2812,0	169,1	II
23	2163,6	287,9	I	741,7	2905,3	179,8	II
24	2201,7	286,6	I	722,6	2924,4	182,0	II
25	2261,4	284,6	I	692,8	2954,2	185,4	II
26	2367,1	281,1	I	640,0	3007,0	191,5	II
27	2519,7	276,0	I	563,7	3083,3	200,2	II
28	1178,4	281,4	I	824,6	2003,1	75,5	II
29	1178,4	281,4	I	925,0	2103,4	86,0	II
30	1178,4	281,4	I	1125,7	2304,2	99,4	II
31	1178,4	281,4	I	1359,9	2538,4	108,8	II
32	1178,4	281,4	I	1560,7	2739,1	114,0	II
33	1760,3	282,8	I	533,7	2294,0	142,4	II
34	1760,3	282,8	I	634,1	2394,4	142,3	II
35	1760,3	282,8	I	834,8	2595,1	142,2	II
36	1760,3	282,8	I	1069,0	2829,3	142,2	II
37	1760,3	282,8	I	1269,7	3030,0	142,2	II
38	2129,4	289,0	I	349,1	2478,6	184,8	II
39	2261,4	284,6	I	383,5	2644,9	190,8	II
40	2261,4	284,6	I	584,3	2845,6	179,1	II
41	2261,4	284,6	I	818,5	3079,8	171,0	II
42	2261,4	284,6	I	1019,2	3280,6	166,4	II
43	978,6	560,4	I	345,5	1324,1	277,3	II
44	1162,1	554,3	I	334,5	1496,6	309,2	II
45	1529,1	542,0	I	312,7	1841,7	350,0	II
46	1957,2	527,8	I	287,2	2244,4	378,2	II
47	2324,2	515,5	I	265,3	2589,5	394,2	II
48	798,6	283,5	I	1402,4	2201,0	98,9	II
49	983,2	288,1	I	1353,6	2336,8	114,5	II
50	1082,2	299,8	I	1347,7	2429,9	125,2	II
51	1171,5	312,4	I	1346,6	2518,0	135,3	II
52	1253,5	325,5	I	1349,1	2602,5	145,0	II
53	1211,4	282,7	I	1196,0	2407,4	122,6	II
54	1494,4	287,0	I	1098,1	2592,4	143,8	II
55	1647,3	298,5	I	1065,1	2712,4	157,6	II
56	1785,2	310,8	I	1039,7	2824,9	170,6	II
57	1911,9	323,8	I	1019,9	2931,8	182,8	II
58	1583,8	284,0	I	1009,8	2593,6	144,0	II
59	1956,3	288,5	I	867,1	2823,4	170,4	II
60	2158,6	300,1	I	809,5	2968,1	187,0	II
61	2341,1	312,5	I	761,8	3102,8	202,5	II
62	2508,7	325,5	I	721,4	3230,2	217,1	II
63	1940,1	285,3	I	831,7	2771,8	164,4	II
64	2398,6	290,0	I	646,0	3044,5	195,8	II
65	2648,4	301,7	I	564,6	3213,0	215,1	II
66	2873,8	314,2	I	495,4	3369,2	233,1	II
67	3081,0	327,3	I	435,3	3516,3	250,0	III

Fonte: o autor.

Tabela D.11 – Propriedades mecânicas da seção mista em situação de conexão parcial (PSC) - parte 2.

#	y _{T,PSC} (mm)	y _{Ca,PSC} (mm)	y _{Cc,PSC} (mm)	M _{PL,PSC} (kN.m)	P _{ult,PSC} (kN) ou q _{ult,PSC} (kN/m)	P _{PSC} /P _{FSC} (%)
1	26,7	186,0	322,6	484,7	605,8	82,4%
2	31,1	193,0	322,0	534,7	668,4	82,9%
3	35,5	199,5	322,0	578,8	723,6	83,6%
4	39,8	205,7	322,3	618,6	773,2	84,8%
5	44,1	211,8	322,6	654,8	818,5	86,5%
6	48,5	217,7	323,0	688,0	860,0	88,9%
7	53,0	223,5	323,3	718,5	898,1	90,9%
8	101,1	395,8	572,6	656,6	820,8	89,2%
9	101,1	395,8	568,5	782,0	977,5	89,7%
10	101,1	395,8	564,5	905,3	1131,7	90,4%
11	101,1	395,8	560,4	1026,7	1283,4	91,0%
12	101,1	395,8	556,3	1146,0	1432,6	91,6%
13	30,7	192,3	322,8	530,8	663,5	82,3%
14	31,1	193,0	322,0	534,7	668,4	82,9%
15	31,8	194,1	320,7	540,7	675,9	83,9%
16	33,1	196,0	318,5	551,0	688,7	85,5%
17	34,9	198,8	315,3	564,8	706,0	87,6%
18	41,7	208,5	323,2	636,5	795,6	85,1%
19	42,4	209,4	322,5	640,7	800,9	85,7%
20	43,5	210,8	321,4	647,1	808,9	86,6%
21	45,3	213,4	319,5	657,9	822,4	88,0%
22	48,1	217,0	316,6	672,1	840,1	89,9%
23	52,1	222,4	323,9	714,4	893,0	90,4%
24	53,0	223,5	323,3	718,5	898,1	90,9%
25	54,3	225,2	322,3	724,6	905,7	91,7%
26	56,6	228,2	320,5	734,5	918,2	93,0%
27	60,1	232,6	318,0	747,2	934,0	94,6%
28	14,1	170,3	320,7	490,0	612,5	82,5%
29	16,6	175,5	320,7	505,4	631,8	83,0%
30	21,3	182,2	320,7	534,0	667,5	83,5%
31	26,2	186,9	320,7	565,5	706,9	83,6%
32	29,9	189,5	320,7	591,7	739,6	83,6%
33	26,2	203,7	321,4	614,5	768,1	90,2%
34	28,4	203,7	321,4	626,8	783,5	88,9%
35	32,5	203,6	321,4	651,5	814,4	86,9%
36	36,4	203,6	321,4	680,3	850,4	85,4%
37	39,4	203,6	321,4	705,0	881,2	84,6%
38	36,4	224,9	324,5	679,3	849,2	94,9%
39	41,5	227,9	322,3	706,5	883,1	95,2%
40	43,8	222,0	322,3	734,1	917,6	92,7%
41	46,2	218,0	322,3	764,9	956,2	90,0%
42	48,1	215,7	322,3	790,8	988,5	87,9%
43	63,6	363,6	576,7	605,8	757,2	82,6%
44	80,7	379,6	573,6	672,8	841,1	86,0%
45	107,8	400,0	567,5	794,4	993,0	90,6%
46	130,6	414,1	560,4	922,6	1153,3	93,9%
47	145,1	422,1	554,3	1024,4	1280,5	95,8%
48	24,2	179,4	316,7	451,3	564,1	81,5%
49	29,0	192,2	329,0	516,0	645,0	82,9%
50	32,5	202,6	344,9	567,4	709,2	82,3%
51	35,9	212,6	361,2	619,1	773,8	81,9%
52	39,3	222,5	377,8	671,5	839,3	81,7%
53	31,6	191,3	316,4	535,9	669,9	81,9%
54	38,9	206,9	328,5	617,3	771,7	84,7%
55	43,8	218,8	344,2	681,3	851,6	85,4%
56	48,6	230,3	360,4	745,5	931,9	86,6%
57	53,3	241,4	376,9	810,6	1013,2	87,4%
58	38,9	202,0	317,0	605,1	756,4	83,7%
59	48,5	220,2	329,2	698,0	872,5	88,6%
60	54,9	233,5	345,0	770,9	963,6	90,3%
61	61,0	246,2	361,2	844,1	1055,1	91,5%
62	66,8	258,6	377,7	918,3	1147,9	92,5%
63	46,3	212,2	317,7	664,4	830,5	87,8%
64	58,3	232,9	330,0	764,5	955,6	92,8%
65	66,0	247,6	345,9	843,6	1054,5	94,5%
66	73,4	261,5	362,1	923,0	1153,8	95,8%
67	80,4	275,0	378,6	1003,6	1254,5	96,7%

Fonte: o autor.

Tabela D.12 – Propriedades da seção de aço isolada e grau mínimo de interação parcial.

#	$Y_{LNP,a}$ (mm)	Y_{at} (mm)	Y_{ac} (mm)	Z_a (mm)	$M_{PL,a,R}$ (kN.m)	$M_{PL,a,R}/M_{PL,FSC}$ (%)	$M_{PL,a,R}/M_{PL,PSC}$ (%)	δ_u (mm)	$\eta_{Mín}$
1	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,47	56,8%	5,00	0,556
2	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,43	51,5%	5,00	0,556
3	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,40	47,6%	5,00	0,556
4	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,38	44,5%	5,00	0,556
5	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,36	42,1%	5,00	0,556
6	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,36	40,0%	5,00	0,556
7	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,35	38,3%	5,00	0,556
8	97,0	19,1	277,5	258,4	228,0	0,31	34,7%	5,00	0,556
9	97,0	19,1	277,5	258,4	273,6	0,31	35,0%	5,00	0,556
10	97,0	19,1	277,5	258,4	319,2	0,32	35,3%	5,00	0,556
11	97,0	19,1	277,5	258,4	364,8	0,32	35,5%	5,00	0,556
12	97,0	19,1	277,5	258,4	410,4	0,33	35,8%	5,00	0,556
13	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,43	51,9%	5,00	0,556
14	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,43	51,5%	5,00	0,556
15	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,43	50,9%	5,00	0,556
16	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,43	50,0%	5,00	0,556
17	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,43	48,8%	5,00	0,556
18	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,37	43,3%	5,00	0,556
19	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,37	43,0%	5,00	0,556
20	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,37	42,6%	5,00	0,556
21	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,37	41,9%	5,00	0,556
22	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,37	41,0%	5,00	0,556
23	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,35	38,5%	5,00	0,556
24	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,35	38,3%	5,00	0,556
25	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,35	38,0%	5,00	0,556
26	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,35	37,5%	5,00	0,556
27	55,5	13,2	164,3	151,0	275,4	0,35	36,9%	5,00	0,556
28	15,3	9,4	182,5	173,0	188,1	0,32	38,4%	5,00	0,556
29	16,4	9,4	167,6	158,2	203,3	0,33	40,2%	5,00	0,556
30	18,5	9,5	149,4	139,9	234,5	0,37	43,9%	5,00	0,556
31	41,1	11,5	157,8	146,3	285,1	0,42	50,4%	5,00	0,556
32	57,0	14,7	165,8	151,0	324,7	0,46	54,9%	5,00	0,556
33	15,3	9,4	182,5	173,0	188,1	0,28	30,6%	5,00	0,556
34	16,4	9,4	167,6	158,2	203,3	0,29	32,4%	5,00	0,556
35	18,5	9,5	149,4	139,9	234,5	0,31	36,0%	5,00	0,556
36	41,1	11,5	157,8	146,3	285,1	0,36	41,9%	5,00	0,556
37	57,0	14,7	165,8	151,0	324,7	0,39	46,1%	5,00	0,556
38	15,3	9,4	182,5	173,0	188,1	0,26	27,7%	5,00	0,556
39	16,4	9,4	167,6	158,2	203,3	0,27	28,8%	5,00	0,556
40	18,5	9,5	149,4	139,9	234,5	0,30	31,9%	5,00	0,556
41	41,1	11,5	157,8	146,3	285,1	0,34	37,3%	5,00	0,556
42	57,0	14,7	165,8	151,0	324,7	0,36	41,1%	5,00	0,556
43	32,6	10,0	246,1	236,0	197,0	0,27	32,5%	5,00	0,556
44	64,5	13,3	262,0	248,7	227,7	0,29	33,8%	5,00	0,556
45	105,3	22,7	282,4	259,7	279,8	0,32	35,2%	5,00	0,556
46	133,6	33,7	296,5	262,9	332,7	0,34	36,1%	5,00	0,556
47	149,5	42,0	304,5	262,5	374,7	0,35	36,6%	5,00	0,556
48	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	0,48	59,0%	5,00	0,556
49	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	0,46	55,2%	5,00	0,556
50	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	0,44	53,5%	5,00	0,556
51	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	0,43	52,1%	5,00	0,556
52	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	0,42	51,0%	5,00	0,556
53	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	0,41	49,7%	5,00	0,556
54	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	0,39	46,1%	5,00	0,556
55	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	0,38	44,5%	5,00	0,556
56	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	0,37	43,3%	5,00	0,556
57	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	0,37	42,3%	5,00	0,556
58	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	0,37	44,0%	5,00	0,556
59	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	0,36	40,8%	5,00	0,556
60	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	0,36	39,4%	5,00	0,556
61	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	0,35	38,2%	5,00	0,556
62	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	0,34	37,3%	5,00	0,556
63	53,0	12,7	160,5	147,8	266,2	0,35	40,1%	5,00	0,556
64	58,0	13,7	168,0	154,3	284,6	0,35	37,2%	5,00	0,556
65	63,0	14,8	175,5	160,7	303,5	0,34	36,0%	5,00	0,556
66	68,0	16,0	183,0	167,0	322,8	0,33	35,0%	5,00	0,556
67	73,0	17,2	190,5	173,3	342,5	0,33	34,1%	5,00	0,556

Fonte: o autor.

Tabela D.13 – Propriedades elásticas da seção transversal - parte 1.

#	d_{mista} (mm)	K	$b_{ef,1}$ (mm)	$b_{ef,2}$ (mm)	$y_{mista,E L}$ (mm)	$I_{x,mista}$ (cm ⁴)	$I_{x,ef}$ (cm ⁴)	EI_{mista} (kN.m ²)
1	360,0	7,38	79,1	81,3	213,0	24131	20124	40248
2	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	20710	41420
3	360,0	6,54	89,3	91,8	219,2	25168	21073	42146
4	360,0	6,24	93,5	96,1	221,5	25561	21326	42652
5	360,0	6,00	97,4	100,0	223,5	25900	21519	43038
6	360,0	5,79	100,9	103,6	225,2	26199	21693	43386
7	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22386	44771
8	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74321	148643
9	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74321	148643
10	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74321	148643
11	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74321	148643
12	593,0	5,61	105,2	107,0	407,2	86200	74321	148643
13	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	20543	41086
14	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	20710	41420
15	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	20968	41935
16	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	21414	42829
17	360,0	6,91	84,6	86,9	216,4	24702	22039	44078
18	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	21292	42583
19	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	21447	42894
20	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	21687	43375
21	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	22105	44210
22	360,0	6,09	95,9	98,5	222,7	25770	22690	45381
23	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22233	44467
24	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22386	44771
25	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	22621	45241
26	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	23030	46060
27	360,0	5,61	104,1	107,0	226,7	26466	23605	47211
28	360,0	6,91	85,7	86,9	220,0	24432	20394	40787
29	360,0	6,91	85,5	86,9	218,2	24837	20806	41611
30	360,0	6,91	85,1	86,9	214,8	25616	21590	43180
31	360,0	6,91	84,6	86,9	211,2	26482	22451	44902
32	360,0	6,91	84,1	86,9	208,4	27191	23150	46301
33	360,0	6,09	97,2	98,5	226,5	25419	21323	42647
34	360,0	6,09	96,9	98,5	224,7	25863	21481	42962
35	360,0	6,09	96,5	98,5	221,3	26719	22326	44653
36	360,0	6,09	95,9	98,5	217,7	27668	23255	46509
37	360,0	6,09	95,4	98,5	214,8	28446	24009	48018
38	360,0	5,61	105,5	107,0	230,7	26057	23029	46057
39	360,0	5,61	105,3	107,0	228,9	26527	23561	47122
40	360,0	5,61	104,7	107,0	225,5	27434	23612	47225
41	360,0	5,61	104,1	107,0	221,9	28442	23846	47692
42	360,0	5,61	103,6	107,0	219,0	29266	24444	48888
43	593,0	5,61	105,5	107,0	405,8	89580	71816	143632
44	593,0	5,61	105,3	107,0	401,8	92433	76786	153571
45	593,0	5,61	104,7	107,0	394,4	97892	85396	170792
46	593,0	5,61	104,1	107,0	386,5	103888	93981	187962
47	593,0	5,61	103,6	107,0	380,3	108749	100510	201019
48	350,0	7,38	79,1	81,3	205,3	22383	18477	36954
49	370,0	7,38	79,1	81,3	220,3	25936	21705	43410
50	390,0	7,38	79,1	81,3	234,4	29751	24416	48832
51	410,0	7,38	79,1	81,3	247,6	33883	27280	54559
52	430,0	7,38	79,1	81,3	260,3	38384	30340	60680
53	350,0	6,54	89,3	91,8	211,5	23364	19324	38648
54	370,0	6,54	89,3	91,8	226,5	27035	22695	45390
55	390,0	6,54	89,3	91,8	240,5	30992	25527	51054
56	410,0	6,54	89,3	91,8	253,8	35298	28608	57216
57	430,0	6,54	89,3	91,8	266,4	40007	32697	65393
58	350,0	6,00	97,4	100,0	215,8	24057	19718	39437
59	370,0	6,00	97,4	100,0	230,8	27812	23152	46305
60	390,0	6,00	97,4	100,0	244,7	31874	26896	53791
61	410,0	6,00	97,4	100,0	257,9	36308	31036	62073
62	430,0	6,00	97,4	100,0	270,5	41174	35524	71047
63	350,0	5,61	104,1	107,0	219,1	24591	20019	40038
64	370,0	5,61	104,1	107,0	234,0	28412	24597	49194
65	390,0	5,61	104,1	107,0	247,9	32558	28739	57479
66	410,0	5,61	104,1	107,0	261,1	37097	33201	66401
67	430,0	5,61	104,1	107,0	273,6	42090	38048	76095

Fonte: o autor.

Tabela D.14 – Propriedades elásticas da seção transversal - parte 2.

#	W _{mista,inf} (cm ³)	W _{mista,sup} (cm ³)	W _{ef} (cm ³)	M _{el} (kN.m)	P _{el} (kN) ou q _{el} (kN/m)	δ _{v,EL} (mm)	Rigidez Elástica (kN/mm)
1	1133	1641	1015	242,40	303,00	9,48	31,98
2	1141	1720	1025	297,03	371,28	11,28	32,91
3	1148	1787	1030	350,58	438,23	13,09	33,48
4	1154	1846	1033	403,25	504,06	14,87	33,89
5	1159	1897	1035	455,15	568,93	16,64	34,19
6	1163	1944	1037	506,38	632,97	18,36	34,47
7	1167	1986	1053	557,01	696,26	19,57	35,57
8	2117	4639	1937	484,32	605,40	5,13	118,10
9	2117	4639	1937	581,18	726,47	6,15	118,10
10	2117	4639	1937	678,04	847,55	7,18	118,10
11	2117	4639	1937	774,91	968,63	8,20	118,10
12	2117	4639	1937	871,77	1089,71	9,23	118,10
13	1141	1720	1020	297,03	371,28	11,37	32,64
14	1141	1720	1025	297,03	371,28	11,28	32,91
15	1141	1720	1033	297,03	371,28	11,14	33,32
16	1141	1720	1046	297,03	371,28	10,91	34,03
17	1141	1720	1064	297,03	371,28	10,60	35,02
18	1157	1877	1030	434,47	543,09	16,05	33,83
19	1157	1877	1034	434,47	543,09	15,94	34,08
20	1157	1877	1041	434,47	543,09	15,76	34,46
21	1157	1877	1053	434,47	543,09	15,46	35,12
22	1157	1877	1070	434,47	543,09	15,06	36,05
23	1167	1986	1049	557,01	696,26	19,71	35,33
24	1167	1986	1053	557,01	696,26	19,57	35,57
25	1167	1986	1060	557,01	696,26	19,37	35,94
26	1167	1986	1071	557,01	696,26	19,03	36,59
27	1167	1986	1087	557,01	696,26	18,56	37,51
28	1111	1745	1000	301,26	376,57	11,62	32,41
29	1138	1751	1027	302,33	377,91	11,43	33,06
30	1193	1764	1078	304,54	380,68	11,10	34,31
31	1254	1779	1135	307,21	384,02	10,76	35,67
32	1305	1793	1182	309,57	386,96	10,52	36,79
33	1122	1905	1013	440,85	551,06	16,26	33,88
34	1151	1912	1032	442,55	553,19	16,21	34,13
35	1207	1927	1085	445,99	557,49	15,71	35,48
36	1271	1944	1144	450,05	562,56	15,22	36,95
37	1324	1960	1193	453,56	566,95	14,86	38,15
38	1130	2015	1050	565,15	706,43	19,31	36,59
39	1159	2023	1080	567,49	709,36	18,95	37,44
40	1217	2040	1112	572,15	715,19	19,06	37,52
41	1282	2059	1152	577,57	721,96	19,05	37,89
42	1336	2076	1196	582,20	727,75	18,74	38,84
43	2207	4786	1947	486,81	608,51	5,33	114,11
44	2300	4835	2065	516,34	645,42	5,29	122,01
45	2482	4929	2286	571,48	714,35	5,26	135,69
46	2688	5030	2525	631,36	789,20	5,28	149,33
47	2860	5113	2720	679,97	849,96	5,32	159,71
48	1090	1547	971	228,49	285,61	9,73	29,36
49	1177	1733	1056	255,95	319,93	9,28	34,49
50	1269	1912	1124	282,31	352,89	9,10	38,80
51	1368	2087	1195	308,20	385,25	8,89	43,35
52	1474	2262	1271	334,11	417,64	8,66	48,21
53	1105	1687	985	330,97	413,72	13,47	30,71
54	1193	1884	1072	369,64	462,05	12,81	36,06
55	1289	2073	1142	406,69	508,37	12,53	40,56
56	1391	2259	1219	443,12	553,90	12,18	45,46
57	1502	2445	1320	479,68	599,60	11,54	51,95
58	1115	1793	988	430,20	537,75	17,16	31,33
59	1205	1998	1077	479,37	599,21	16,29	36,79
60	1302	2194	1171	526,44	658,05	15,40	42,74
61	1408	2388	1274	572,79	715,99	14,52	49,32
62	1522	2582	1383	619,44	774,30	13,72	56,45
63	1122	1879	991	526,99	658,73	20,71	31,81
64	1214	2090	1110	586,14	732,67	18,75	39,08
65	1313	2292	1213	642,75	803,44	17,59	45,67
66	1421	2491	1323	698,58	873,22	16,55	52,76
67	1538	2692	1439	754,93	943,66	15,61	60,46

Fonte: o autor.

APÊNDICE E – Avaliação dos modos de falha do *Crestbond* (equação de *pry-out* ajustada)

Neste Apêndice encontra-se um estudo dos modelos semiempíricos de predição da capacidade resistente do *Crestbond* considerando as três equações de cálculo apresentadas na Tabela E.1. Este estudo é uma repetição daquele apresentado no APÊNDICE A, no entanto, utilizou-se a equação de resistência ao *pry-out* ajustada no Item 3.5.4 deste trabalho, Eq. (3.8), conforme pode ser visualizado na Tabela E.1.

Tabela E.1 - Modelos semiempíricos do *Crestbond*, com destaque para equação ajustada de *pry-out*.

Referências	Modo de falha	Equações
Cardoso <i>et al.</i> [1]	Cisalhamento dos pinos de concreto: (i) alto confinamento, (ii) baixo confinamento e (iii) sem armadura passante.	$P_{sh,k} = \eta_f (h_D + c_u) t_w f_c + \eta_D e_x^2 \sqrt{f_c} (1 + \rho_D)$ $\eta_D = \begin{cases} 2,507 - e_x/400 \rightarrow \text{(i)} \\ 1,176 - e_x/400 \rightarrow \text{(ii)} \\ 0,873 - e_x/400 \rightarrow \text{(iii)} \end{cases}$
Altoé <i>et al.</i> [2] ¹	<i>Pry-out</i>	$P_{po,k} = \frac{71,5}{\eta} \chi_x h_{po}^{1.5} f_{ctm} (1 + \rho_{d,i})$
Almeida <i>et al.</i> [3]	Falha dos pinos de aço	$P_{pl,k} = 0,233 e_x t_w f_y$

¹Altoé *et al.* [2] refere-se ao artigo desenvolvido no CAPÍTULO 3 deste trabalho.

O estudo de variação de parâmetros foi realizado levando-se em conta as prescrições construtivas da aprovação técnica alemã Z-26.4-56 [4]. Foram variados os mesmos parâmetros do estudo original (Tabela A.2) e, a partir da combinação desses parâmetros, são obtidas 21.168 possibilidades de conexões com o *Crestbond*. No entanto, somente em 9.574 modelos paramétricos (45%) os limites construtivos (Tabela 2.6) apontados em Z-26.4-56 [4] são verificados.

Diferentes situações de confinamento do concreto foram estudadas variando o fator de junção das superfícies cisalhantes dos *composite dowels* (η_D). Os resultados estão apresentados na Tabela E.2. Nota-se que em situação de alto confinamento do concreto do conector, o modo de falha por cisalhamento dos pinos de concreto é irrelevante para o *Crestbond*. O mesmo resultado é obtido utilizando-se o fator η_D igual a 2,0, valor prescrito pela diretriz alemã Z-26.4-56 [4] para o conector *Puzzle*. Em situação de baixo confinamento, no entanto, o cisalhamento dos pinos de concreto é um modo de falha relevante e poderia ocorrer em 37% dos casos analisados.

Tabela E.2 – Resultados da avaliação dos modelos semiempíricos do *Crestbond* com ajuste da equação de resistência ao *pry-out* do concreto.

Modos de falha	Alto confinamento ($\eta_D = 2,507$)		Fator <i>Puzzle</i> ($\eta_D = 2,0$)		Baixo confinamento ($\eta_D = 1,176$)	
Cisalhamento do pino de concreto	0	0%	0	0%	3.563	37%
<i>Pry-out</i> do concreto	7.848	82%	7.848	82%	4.462	47%
Falha do pino de aço	1.726	18%	1.726	18%	1.549	16%
TOTAL	9.574	100%	9.574	100%	9.574	100%

Ao comparar os resultados apresentados no APÊNDICE A (Tabela A.3) e neste apêndice (Tabela E.2), nota-se que o ajuste da equação de *pry-out*, proposto no Item 3.5.4, resultou em um aumento da ocorrência de falha por *pry-out* de 75% para 82%, considerando a situação de alto confinamento, e de 27% para 37%, considerando a situação de baixo confinamento. Além disso, nota-se que o ajuste também resultou em uma redução da relevância da falha do *Crestbond* por cisalhamento dos pinos de concreto em situação de baixo confinamento, já que a estimativa de ocorrência deste modo de falha diminuiu de 52% para 37%.

REFERÊNCIAS:

1. Cardoso, H. S.; Caldas, R. B.; Fakury, R. H.; Veríssimo, G. S.; Almeida, R. L. J. Modelo de Cálculo para o Cisalhamento do Concreto nos Conectores *Crestbond*. Revista da Estrutura de Aço 2018; 7(3):280-299. <http://dx.doi.org/10.17648/aco-2238-9377-7-3-3>.
2. Altoé, J.V F.; Spagnol, C. F.; Pereira, C. L.; Parassen, P.R.; Petruski, M. C.; Paes, J. L. R.; Veríssimo, G. S. Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas mistas tipo *Crestbeam* com conexão parcial. Capítulo 3.
3. Almeida, R. L. J.; Veríssimo, G. S.; Ribeiro, J. C. L.; Paes, J. L. R.; Petruski, M. C.; Caldas, R. B. Capacidade resistente do conector *Crestbond* à falha do aço desencadeada por um mecanismo combinado de cisalhamento e flexão. Revista da Estrutura de Aço 2019; 9(1):61-80.
4. German Institute for Building Technology (DIBT). Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, n. Z-26.4-56, Berlin, 2023.