

MAILA APARECIDA PEREIRA DA SILVA

**MODELOS SEMIEMPÍRICOS PARA A ESTIMATIVA DA CAPACIDADE
RESISTENTE DE CONECTORES DE CISALHAMENTO
CRESTBOND E PERFOBOND**

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 Scientiæ*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

MAILA APARECIDA PEREIRA DA SILVA

Modelos semiempíricos para a estimativa da capacidade resistente de conectores de cisalhamento Crestbond e Perfobond

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 Scientiæ*.

Aprovada: 06 de maio de 2011

Prof. José Luiz Rangel Paes
(Coorientador)

Prof.^a Rita de Cássia S. S. Alvarenga
(Coorientadora)

Prof. José Carlos Lopes Ribeiro

Prof. Francisco Carlos Rodrigues

Prof. Gustavo de Souza Veríssimo
(Orientador)

*À minha filha Victória, um
presente de Deus, e aos meus pais,
Nelson e Mariza.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me encorajar a seguir em frente apesar das circunstâncias e por me prover de professores e amigos que abençoaram a minha caminhada.

Aos meus pais, que à sua maneira me incentivaram e me deram condições físicas e espirituais para concluir essa etapa de minha vida.

Ao Prof. Gustavo Veríssimo, por sua orientação que excedeu os limites acadêmicos. Sua amizade e dedicação foram fundamentais tanto para meu crescimento pessoal quanto para o desenvolvimento e conclusão desse trabalho.

Ao Prof. José Luiz Rangel, pela oportunidade de trabalhar no programa REUNI, que contribuiu para meu crescimento profissional. Pela sua amizade e incentivo que foram importantes para a conclusão deste trabalho.

Aos professores Enivaldo Minette, Reginaldo C. Silva, por suas contribuições junto aos projetos do programa REUNI.

De maneira geral, a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa que contribuíram de alguma forma, quer seja no âmbito desse trabalho ou durante o desenvolvimento dos projetos do programa REUNI.

Aos amigos Tiago Albretch, Juliano Corrêa, Maria Cláudia, Gustavo Irala.

Ao grupo de trabalho do REUNI, Gabriela Pontes, Ygaro Chaves, Débora Gomide e Mariana Santos, com quem foi prazeroso trabalhar.

Aos amigos, Eliane, Luiza, Giuliana, Carlos Augusto (Cantim), Washington e Halley com quem convivi e aprendi muito tanto profissionalmente como pessoalmente.

À Lea, Toninho, Amanda, Débora, Lívia e Lucas, amigos fiéis que sempre demonstraram sua preocupação, sempre intercedendo por mim em suas orações.

À minha família, por seu apoio.

A Layana, minha prima, pelo suporte junto à Victória.

E finalmente agradeço a minha princesa, Victória, minha alegria constante, que muitas vezes foi minha companheira nas madrugadas fazendo trabalhos, que mesmo sendo tão pequena foi compreensiva e entendia minhas ausências e que, em outros momentos, clamou a Deus pela conclusão desse trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Símbolos	viii
Resumo	x
Abstract.....	xi
1 Introdução.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivos	6
1.3 Estrutura do documento	6
2 Revisão de literatura	7
2.1 Generalidades sobre conectores de cisalhamento	7
2.2 Caracterização de conectores de cisalhamento	10
2.3 Sobre o comportamento de conectores de cisalhamento em chapa plana de aço perfurada	13
2.3.1 O efeito de pino em conectores em chapa plana perfurada	13
2.3.2 Influência da resistência do concreto na capacidade da conexão	16
2.3.3 Influência do tamanho das aberturas dos conectores na capacidade da conexão	18
2.3.4 Influência da armadura transversal.....	19
2.3.5 Influência do espaçamento entre os furos.....	24
2.3.6 Influência da espessura da chapa do conector	26
2.3.7 Influência da excentricidade do conector	27
2.4 Modelos empíricos, mecânicos e semiempíricos	28
2.5 Modelos semiempíricos pré-existentes para conectores em chapa perfurada.....	33
2.6 Predição da resistência de conectores em chapa perfurada por meio de Redes Neurais Artificiais.....	41
3 Metodologia.....	44
4 Avaliação de modelos semiempíricos pré-existentes a partir de resultados experimentais	47
4.1 Análise da contribuição do efeito de pino na resistência última dos conectores Crestbond e Perfobond.....	47
4.1.1 Efeito de pino para o Crestbond	48
4.1.2 Efeito de pino para o Perfobond	50
4.2 Relação entre o efeito de pino e a armadura transversal	53

4.3	Espaçamento entre os furos do conector	54
5	Desenvolvimento e avaliação de novos modelos semiempíricos	56
5.1	Considerações iniciais	56
5.2	Modelos para conectores Perfobond	57
5.2.1	Verificação da hipótese de Kraus e Wurzer	57
5.2.2	Estudo da influência do espaçamento entre os furos do conector	60
5.2.3	Estudo da influência da densidade do concreto na resistência da conexão ...	64
5.2.4	Estudo da influência da armadura na capacidade da conexão	68
5.2.5	Estudo da influência da excentricidade do conector na capacidade da conexão	69
5.2.6	Resumo dos modelos estudados para Perfobond	70
5.3	Modelos para conectores Crestbond	72
5.3.1	Considerações iniciais	72
5.3.2	Sobre o espaçamento entre os furos do conector	76
5.3.3	Estudo da primeira hipótese de Oguejiofor	76
5.3.4	Estudo da segunda hipótese de Oguejiofor	76
5.3.5	Influência da armadura na capacidade da conexão com Crestbond	77
5.3.6	Estudo da influência da excentricidade do conector na capacidade da conexão	78
5.3.7	Verificação da hipótese de Kraus e Wurzer	79
5.3.8	Resumo dos modelos estudados para Crestbond	80
6	Discussão	83
6.1	Considerações preliminares	83
6.2	Sobre a hipótese de Kraus e Wurzer	84
6.3	Espaçamento entre os furos do conector	84
6.4	Sobre a resistência ao cisalhamento da laje	87
6.5	A influência da densidade do concreto no comportamento da conexão	87
6.6	Considerações sobre o efeito da armadura transversal	88
6.7	Sobre a influência da excentricidade do conector	89
6.8	Modelos propostos	91
7	Conclusões	92
7.1	Conclusões gerais	92
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	94
	Referências Bibliográficas	96

Apêndices	99
A Resultados das análises dos modelos semiempíricos para conectores Perfobond	102
A.1 Verificação da hipótese de Kraus e Wurzer	102
A.1.1 Cisalhamento duplo dos pinos de concreto	102
A.1.2 Compressão direta da laje contra as paredes dos furos	104
A.2 Estudo da influência do espaçamento entre os furos do conector.....	106
A.3 Estudo da influência da densidade do concreto na capacidade da conexão.....	108
A.3.1 Cisalhamento da laje de concreto	108
A.3.2 Compressão frontal.....	110
A.3.3 Compressão frontal associada ao módulo de elasticidade ao quadrado	112
A.4 Estudo da influência da armadura na capacidade da conexão	114
A.4.1 Taxa geométrica	114
A.4.2 Taxa mecânica	116
A.5 Estudo da influência da excentricidade do conector na capacidade da conexão	
.....	118
B Resultados das análises dos modelos semiempíricos para conectores Crestbond	120
B.1 Modelo obtido utilizando apenas dados de Oguejiofor com E_{cs}	120
B.2 Estudo da primeira hipótese de Oguejiofor.....	122
B.3 Estudo da segunda hipótese de Oguejiofor	124
B.4 Influência da armadura na capacidade da conexão	126
B.4.1 Taxa geométrica da armadura limitada a 1%	126
B.4.2 Taxa geométrica da armadura limitada a 1,3%	128
B.5 Estudo da influência da excentricidade do conector na capacidade da conexão	
.....	130
B.6 Verificação da hipótese de Kraus e Wurzer	132
B.6.1 Hipótese de Leonhardt <i>et al.</i>	132
B.6.2 Hipótese de Kraus e Wurzer	134
C Modelos propostos.....	136
C.1 Perfobond	136
C.2 Crestbond	138

LISTA DE SÍMBOLOS

MINÚSCULAS ROMANAS

f_c	resistência à compressão do concreto
f_{yr}	resistência ao escoamento do aço da armadura
$f_{y_{sc}}$	resistência ao escoamento do aço do conector
h_{sc}	altura do conector
n	número de furos do conector
q	resistência de um conector
q_u	resistência última de um conector
s	espaçamento entre os furos do conector
t_c	espessura da laje
t_{PL}	espessura da pré-laje
t_{sc}	espessura da chapa do conector

MAIÚSCULAS ROMANAS

A	área
A_{cc}	área de concreto ao cisalhamento
A_{cd}	área ao cisalhamento dos pinos virtuais de concreto
A_{tr}	área de armadura transversal
D	diâmetro do furo do conector Perfobond ou diâmetro de referência da abertura trapezoidal no conector Crestbond
E_c	módulo de elasticidade do concreto
E_{cs}	módulo de elasticidade secante do concreto
EP	efeito de pino
F_f	resistência frontal do conector
F_P	força decorrente da resistência ao cisalhamento dos pinos de concreto
L_{sc}	comprimento do conector
L_c	comprimento da laje
P_{max}	carga máxima obtida em ensaio
P_{norm}	carga máxima obtida em ensaio normalizada em relação à resistência média do concreto para o grupo de modelos em estudo

MINÚSCULAS GREGAS

α	fator que considera a influência do espaçamento entre os furos do conector no efeito de pino
β_i	coeficientes de regressão
ε	erro aleatório
δ_u	capacidade de deslizamento do conector
δ_{uk}	capacidade de deslizamento característico do conector
γ_c	massa específica do concreto
ρ	taxa geométrica de armadura transversal = A_{tr}/A_{cc}
ω	taxa mecânica de armadura transversal = $(A_{tr} f_{yr}) / (A_{cc} f_c)$

RESUMO

SILVA, Maila Aparecida Pereira da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2011. **Modelos semiempíricos para estimativa da capacidade resistente de conectores de cisalhamento Crestbond e Perfobond**, Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo. Coorientadores: José Luiz Rangel Paes e Rita de Cássia Sant'Anna Alvarenga.

Nos anos recentes, diversas investigações sobre conectores de cisalhamento em chapa plana de aço com perfurações vêm sendo conduzidas, com vistas à aplicação em estruturas mistas de aço e concreto. Embora vários programas experimentais tenham sido executados em diversos países, o comportamento dessas conexões ainda permanece como objeto de estudo. Neste trabalho, faz-se uma investigação sobre a contribuição das aberturas na resistência global de dois tipos de conectores em chapa perfurada: o Perfobond, criado pela empresa alemã Leonhardt, Andrã und Partners (LAP) e o Crestbond, criado no Brasil por pesquisadores da UFV e da UFMG. A partir dos resultados experimentais obtidos por outros autores, diversos modelos semiempíricos foram estudados, com base em algumas hipóteses razoáveis sobre os mecanismos resistentes que determinam o comportamento da conexão, tendo em vista o efeito de pino do concreto nas aberturas dos conectores. Esses novos modelos são comparados com outros anteriormente propostos por alguns autores. Para isso foram utilizados resultados experimentais de ensaios realizados no Brasil, em Portugal e no Canadá. As análises realizadas possibilitaram a obtenção de equações de resistência mais adequadas que as já existentes, capazes de estimar a resistência dos conectores Perfobond e Crestbond em concreto normal e em concreto leve, bem como um melhor entendimento do comportamento estrutural desses conectores.

ABSTRACT

SILVA, Maila Aparecida Pereira da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2011. **Semiempirical models for estimation of the strength of Crestbond and Perfobond shear connectors**, Adviser: Gustavo de Souza Veríssimo. Co- advisers: José Luiz Rangel Paes and Rita de Cássia Sant'Anna Alvarenga.

In recent years, several investigations on shear connectors in flat steel plate with holes have been conducted, in order to application in composite structures of steel and concrete. Although several experimental programs have been implemented in several countries, the behavior of these connections remains an object of study. In this work, we make a research on the contribution of openings in global strength of two types of connectors in perforated steel plate: the Perfobond, designed by German company Leonhardt, Andra und Partners (LAP) and Crestbond, designed by a group of brazilian researchers from UFV and UFMG. From the experimental results obtained by other authors, several semiempirical models were studied, based on some reasonable assumptions about the mechanisms that determine the resistant behavior of the connection, considering the effect of concrete dowels in the connector's openings. These new models are compared with previously proposed by some authors. For this we used experimental results of tests conducted in Brazil, Portugal and Canada. The analysis carried out allowed to obtain equations of resistance better than the existing ones, capable of estimating the resistance of Crestbond and Perfobond connectors with light weight concrete and normal concrete, as well as a better understanding of the structural behavior of those connectors.

1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Nas últimas décadas, o desenvolvimento de diversas tecnologias na área de construção civil tem conduzido a um processo de industrialização das construções de modo geral. Uma das características desse fenômeno é o crescimento do uso do aço estrutural na construção, principalmente em países do primeiro mundo (Owens e Wood, 1998). Um levantamento feito no Reino Unido e na França, nas duas últimas décadas do século XX, demonstrou um crescimento considerável da utilização de estruturas de aço para os edifícios de múltiplos andares, como pode ser observado na Figura 1-1.

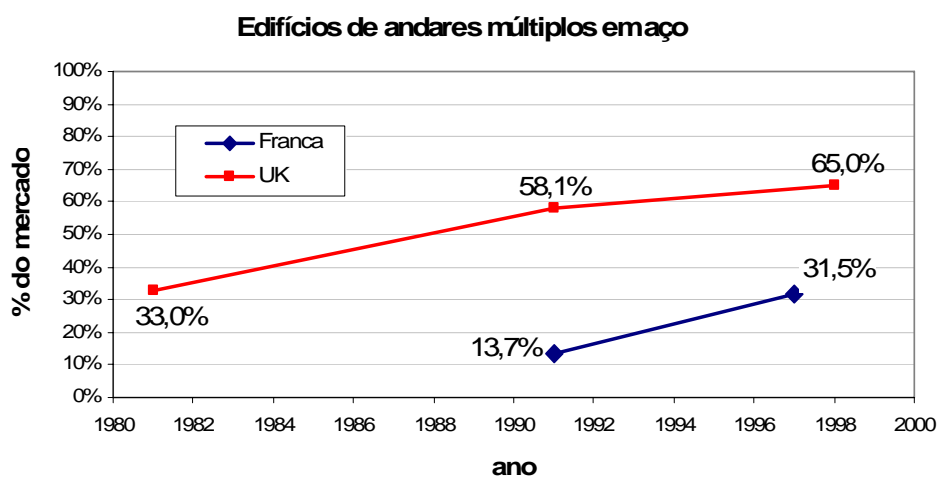


Figura 1-1 – Evolução do percentual de edifícios de andares múltiplos estruturados em aço no Reino Unido e na França, no período de 1981 a 1998 (adaptado de Owens, 2000).

Na França, por exemplo, a parcela de mercado relativa ao setor de edifícios de andares múltiplos em aço apresentou um crescimento uniforme de 13,7% para 31,5%, entre 1991 e 1997. No Reino Unido, esse percentual cresceu de 33% em 1981 para 58,1% em 1991, atingindo a marca de 65% em 1998. Segundo Owens (2000), os principais fatores responsáveis por esse crescimento são a velocidade e a competitividade obtidas a partir do uso de sistemas de piso mistos (Figura 1-2).

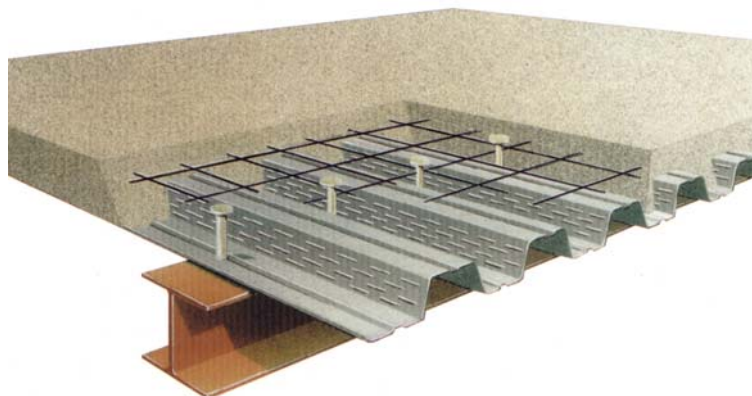


Figura 1-2 – Sistema de piso misto típico utilizado em edifícios - a laje de concreto é conectada ao vigamento metálico por meio de conectores de cisalhamento mecânicos. (Fonte: Metform).

As estruturas mistas de aço e concreto vêm sendo empregadas já há várias décadas na construção de pontes e edifícios; e têm sido cada vez mais empregadas na engenharia da construção civil, em virtude das diversas vantagens econômicas e construtivas que oferecem.

Sabe-se que o aço apresenta boa resistência à tração, mas pode apresentar problemas de instabilidade quando submetido à compressão. Por outro lado, o concreto apresenta bom desempenho quando comprimido, mas sua resistência à tração é baixa. Nos elementos estruturais mistos de aço e concreto procura-se fazer com que cada material fique submetido ao esforço sob o qual ele apresenta seu melhor desempenho, qual seja, o aço fica submetido apenas à tração e o concreto somente à compressão. Além disso, a conexão das seções de aço e concreto implica num aumento da inércia da seção que resulta em maior rigidez e maior capacidade resistente à flexão. Esses ganhos propiciam um melhor desempenho do elemento estrutural, possibilitando a economia de uma série de recursos, mas principalmente do aço do vigamento.

O comportamento misto nos elementos estruturais de aço e concreto é propiciado por conectores de cisalhamento mecânicos, instalados no perfil de aço. Esses conectores asseguram que os dois materiais que constituem a seção mista trabalhem como se fossem praticamente uma peça única.

Vários conectores de cisalhamento têm sido propostos e diversos tipos são usados em estruturas mistas atualmente. No entanto, muitos deles apresentam restrições importantes no que se refere à produção industrial, à instalação e ao próprio comportamento estrutural. Diversos aspectos econômicos e técnicos continuam a motivar o desenvolvimento e o estudo de novos conectores.

O conector de cisalhamento mais difundido mundialmente é o *stud bolt*, um pino de aço com cabeça que é soldado ao perfil metálico por um processo sofisticado de eletrofusão (Figura 1-3). Embora bastante difundido, o *stud* apresenta fraco desempenho sob condições de fadiga (ZELLNER, 1987).

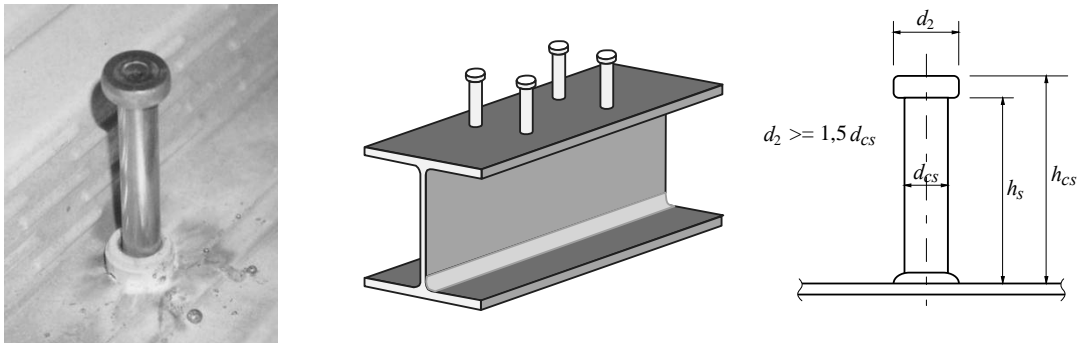


Figura 1-3 – Conector de cisalhamento tipo pino com cabeça (*stud bolt*).

Em fins da década de 80, buscando uma alternativa ao baixo desempenho dos *studs* quando sujeitos a carregamentos cíclicos, Leonhardt *et al.* (1987) desenvolveram um conector denominado Perfobond, para aplicação em pontes mistas. O Perfobond consiste basicamente de uma chapa de aço plana com furos circulares, que é soldada ao perfil metálico e depois concretada (Figura 1-4). É um conector rígido e sofre apenas deformações elásticas de pequena magnitude em estado de serviço. Seu comportamento mecânico depende, em grande parte, do cisalhamento duplo do concreto confinado dentro dos furos do conector, caracterizando o chamado “efeito de pino”.

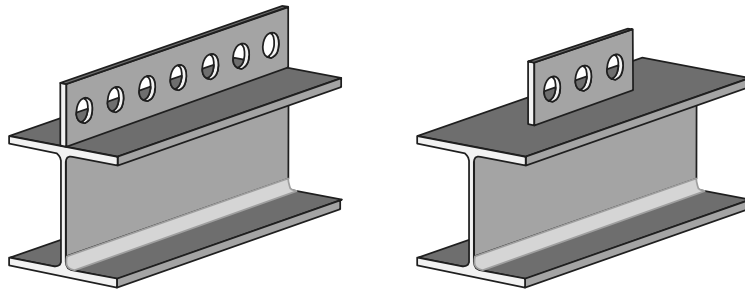


Figura 1-4 – Conector Perfobond: contínuo e descontínuo.

Nas últimas décadas, diversas variações do Perfobond foram desenvolvidas, bem como outros tipos de conectores cujo mecanismo resistente envolve o efeito de pino. Um deles é o Crestbond, desenvolvido no Brasil, por um grupo de pesquisadores da UFV e da UFMG (VERÍSSIMO, 2007). O Crestbond consiste de uma chapa de aço endentada com saliências e reentrâncias trapezoidais que proporcionam resistência ao cisalhamento longitudinal e previnem a separação transversal entre o perfil metálico e a laje de concreto (Figura 1-5), efeito denominado *uplift*.

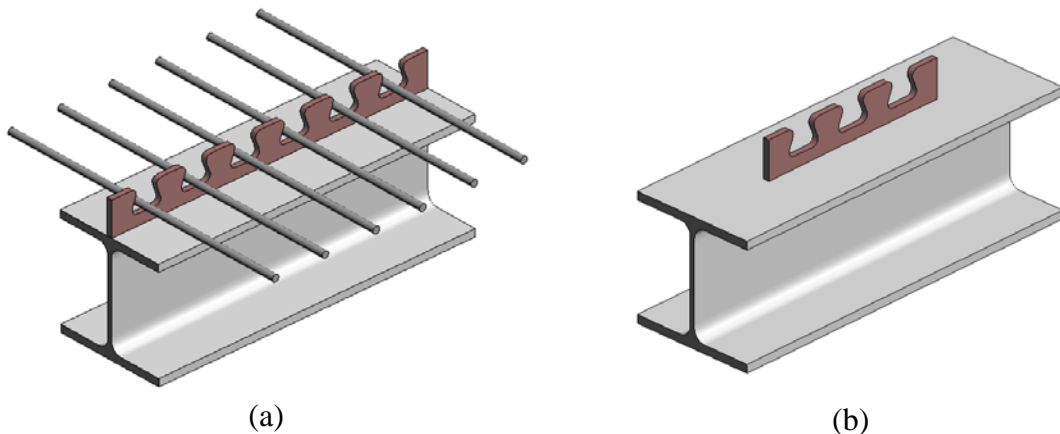


Figura 1-5 – Conector Crestbond: (a) contínuo e (b) descontínuo.

Inicialmente, admitiu-se que o mecanismo resistente desses conectores em chapa plana perfurada estava relacionado ao cisalhamento dos pinos virtuais formados pelo concreto que preenche as aberturas no conector e à resistência à compressão do concreto. Entretanto, uma análise de resultados experimentais recentes leva a questionar se esta é de fato a melhor hipótese para explicar o mecanismo resistente dos conectores em chapa perfurada.

O mecanismo resistente do *stud bolt*, por exemplo, é relativamente simples, podendo ser facilmente reproduzido por meio de um modelo semiempírico simples. Por outro lado, o comportamento dos conectores em chapa plana perfurada é mais complexo e sua resistência última decorre da contribuição de diversos mecanismos resistentes que atuam conjuntamente. Em função dessa complexidade, ainda persiste a busca por uma melhor compreensão dos mecanismos resistentes e por modelos capazes de reproduzir mais realisticamente a capacidade desses tipos de conexão.

O presente trabalho trata de uma reavaliação da contribuição do efeito de pino nos conectores em chapa perfurada tipos Crestbond e Perfobond, utilizando-se dados experimentais disponíveis em Veldanda (1991), Oguejiofor (1994), Valente (2007) e Veríssimo (2007). Procurou-se comparar os resultados estimados com modelos semiempíricos propostos por Oguejiofor (1997) e Veríssimo (2007), especificamente para a parcela relativa ao efeito de pino, com o efeito de pino medido experimentalmente.

Kraus e Wurzer (1997) propuseram uma outra hipótese para explicar a resistência do Perfobond. Segundo essa abordagem, o efeito das aberturas dos conectores na resistência última da conexão estaria relacionado à altura da abertura, que determina a área de influência para a formação de bielas de compressão no concreto. Se isto é verdade, então a carga máxima resistida pela conexão dependerá da altura dos furos, e não de sua área, e o cisalhamento dos pinos ocorreria num momento posterior, sendo responsável pela grande ductilidade observada nos ensaios, na fase posterior ao pico de carga.

Neste trabalho, essas duas hipóteses são confrontadas e alguns fatores que influenciam na capacidade da conexão são analisados. Diversos modelos semiempíricos foram estudados, com ambas as hipóteses, dando origem a algumas equações de resistência melhores que as já existentes. Constatou-se, ainda, que considerar a capacidade da conexão relacionada ao módulo de elasticidade do concreto, ao invés de à sua resistência à compressão, conduz a modelos mais efetivos, capazes de estimar a resistência do conector com concreto normal ou concreto leve. O estudo desses modelos propiciou um melhor entendimento do comportamento dos conectores Perfobond e Crestbond. Os resultados das análises

indicam a possibilidade de se obter um modelo semiempírico único, capaz de estimar a resistência dos dois tipos de conectores, utilizando-se um fator de forma.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é investigar modelos semiempíricos para a predição da resistência dos conectores Crestbond e Perfobond.

Os objetivos específicos consistiram em:

- verificar se a parcela de resistência, relacionada ao efeito de pino, computada pelos modelos semiempíricos propostos na literatura correspondem às medições experimentais;
- analisar a influência da armadura da laje de concreto no desempenho da conexão;
- verificar a possibilidade de se introduzir a influência do espaçamento entre furos na equação de resistência do Perfobond;
- verificar o efeito da excentricidade do conector na resistência da conexão;
- elaborar novos modelos semiempíricos para estimativa da capacidade resistente do Crestbond e do Perfobond para, a partir de uma avaliação comparativa com base em análises estatísticas, identificar os que apresentam as melhores correlações com os resultados experimentais.

1.3 Estrutura do documento

Este documento encontra-se organizado da seguinte forma: no segundo capítulo apresenta-se uma revisão de literatura sobre o tema proposto; no terceiro capítulo descreve-se a metodologia adotada para atingir os objetivos propostos; no quarto capítulo é apresentada uma análise de resultados experimentais obtidos por diversos autores; no quinto capítulo apresenta-se um estudo e uma avaliação de diversos modelos semiempíricos propostos. Uma discussão dos resultados é apresentada no capítulo 6 e, por fim, apresentam-se no capítulo 7 as considerações finais e sugestões para estudos futuros.

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Generalidades sobre conectores de cisalhamento

Os primeiros conectores de cisalhamento para estruturas mistas de aço e concreto foram introduzidos em meados do século XX. Sua função é transmitir as forças longitudinais que se desenvolvem na interface entre a seção de aço e a seção de concreto, em função da tendência de deslizamento entre essas duas, quando submetidas à flexão. Também devem resistir a forças transversais que podem surgir, tendendo a separar a seção de concreto da seção de aço.

Um dos primeiros conectores de cisalhamento utilizados consistia de pedaços de perfil U laminado soldados às mesas superiores de vigas de aço (Figura 2-1a). Atualmente, o conector de cisalhamento de uso mais difundido para sistemas de piso de edifícios é o *stud bolt*, um conector tipo pino com cabeça, desenvolvido nos EUA na década de 40 (Figura 2-1b).

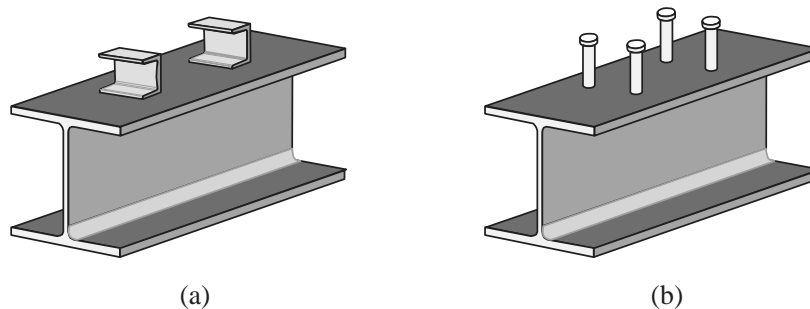


Figura 2-1 – Conectores de cisalhamento: (a) perfil U laminado; (b) stud bolt.

No entanto, existem limitações para o uso dessas soluções. O conector em perfil U tem baixa produtividade e seu emprego é indicado para lajes maciças, não sendo compatível com sistemas de lajes com fôrma de aço incorporada. Seu emprego é impedido em sistemas de piso com pré-laje de concreto pré-moldado, devido à pouca largura das mesas dos perfis típicos para vigas (ver Figura 2-2). O *stud*, embora possibilite grande produtividade, e seja compatível com as soluções de lajes mencionadas, também apresenta desvantagens. Várias questões têm sido levantadas ao longo do tempo sobre o desempenho dos *studs* e dificuldades inerentes à sua instalação (CHIEN e RITCHIE, 1984; GHAVAMI, 1998). Duas deficiências do *stud* são o seu baixo desempenho à fadiga, quando submetido a carregamentos cíclicos (ZELLNER, 1987), e o alto custo de instalação.

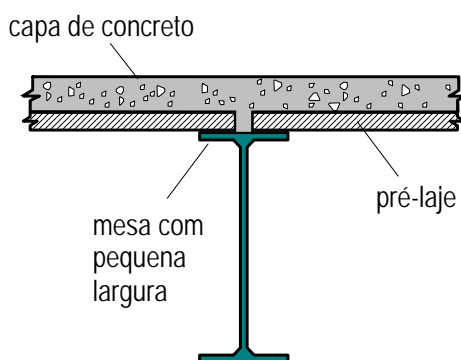


Figura 2-2 – Sistema de piso misto com pré-laje de concreto.

Em fins da década de 80, buscando uma alternativa ao baixo desempenho dos *studs* à fadiga, a empresa alemã LAP (Leonhardt, Andrä and Partners) desenvolveu um conector denominado Perfobond, para aplicação em pontes mistas. O Perfobond consiste basicamente de uma chapa de aço plana com furos circulares, que é soldada ao perfil metálico antes da concretagem (Figura 2-3). É um conector rígido e sofre apenas deformações elásticas de pequena magnitude em estado de serviço.

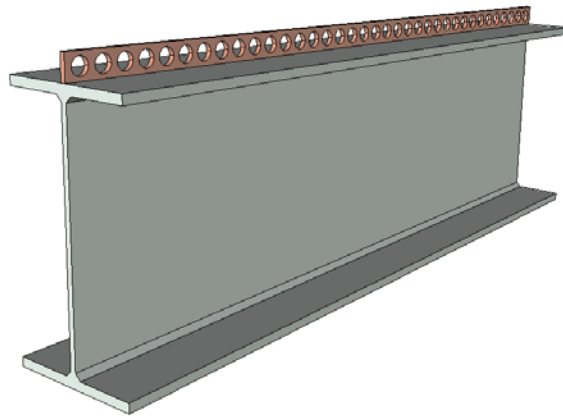


Figura 2-3 – O conector Perfobond originalmente criado por Leonhardt et al. (1987).

Embora o Perfobond tenha sido originalmente desenvolvido para aplicação em pontes, diversos estudos foram conduzidos posteriormente para avaliar sua aplicabilidade em estruturas de edifícios (OGUEJIOFOR, 1990; VELDANDA, 1991; OGUEJIOFOR, 1994; QUDDUSI, 1994; STUDNICKA, 2000). Esses estudos demonstraram que o Perfobond é um conector rígido, de acordo com a classificação do Eurocódigo 4 (EN 1994-1-1:2004). Embora essa característica não impeça sua aplicação em estruturas de edifícios, implica numa exigência adicional de projeto, que é a distribuição dos conectores segundo a variação do fluxo de cisalhamento ao longo do elemento estrutural. Quando o conector é flexível, como é o caso do *stud*, na medida em que a peça é solicitada os conectores se deformam, mobilizando os conectores próximos, de forma que há uma ação conjunta dos conectores, razão pela qual é razoável dispô-los equidistantes ao longo da peça.

Vários conectores de cisalhamento alternativos têm sido estudados nas últimas décadas, visando o desenvolvimento de soluções com melhor relação custo-benefício e melhor adequação a necessidades estruturais específicas, como, por exemplo, no caso de estruturas sujeitas à fadiga (LEONHARDT *et al.*, 1987; ZELLNER, 1987; CRISINEL, 1987; STUDNICKA, 2000; HEGGER e SEDLACEK, 2001; POOT, 2001; GALJAARD e WALRAVEN, 2001; SCHLEICH, 2001; SCHMID, 2001).

O conector Crestbond foi desenvolvido na busca de uma alternativa para conexão mista que conciliasse algumas vantagens adicionais em relação a outros mecanismos de conexão usuais, tais como simplicidade de instalação, baixo custo de fabricação,

ductilidade superior à do *Perfobond* e furos abertos para facilitar a disposição da armadura da laje. Seu comportamento mecânico é similar ao do *Perfobond* e sua resistência última também está associada com o efeito de pino do concreto nas aberturas do conector.

2.2 Caracterização de conectores de cisalhamento

A descrição analítica do comportamento de conectores de cisalhamento é complexa. Por essa razão é mais fácil caracterizar seu comportamento a partir de ensaios em laboratório.

Ao avaliar o desempenho de um conector de cisalhamento, duas características são especialmente observadas: a capacidade resistente e a ductilidade. Ambas podem ser conhecidas a partir da relação força×deslizamento, ou seja, a relação entre a força longitudinal transmitida e o deslizamento relativo entre as superfícies de contato dos elementos componentes de um sistema misto. Essa relação é expressa por uma curva, que pode ser obtida por meio de ensaios em vigas de tamanho real ou, o que é mais comum, a partir de ensaios de cisalhamento direto em modelos de tamanho reduzido, também conhecidos como ensaios *push-out*. Na Figura 2-4 pode-se observar uma curva força-deslizamento típica.

A partir da curva força-deslizamento é possível determinar a resistência característica dos conectores ensaiados, bem como classificar seu comportamento quanto à ductilidade. Para os conectores usualmente empregados, essas características já foram determinadas experimentalmente e são padronizadas pelas normas vigentes.

O Eurocódigo 4, uma das normas que regulamenta as estruturas mistas na Europa (EN 1994-1-1:2004), estabeleceu uma especificação para o ensaio tipo *push-out*, com o objetivo de promover uma padronização para esses ensaios, que eram realizados de múltiplas formas em diversos lugares do mundo. Atualmente essa especificação é comumente aceita e seguida.

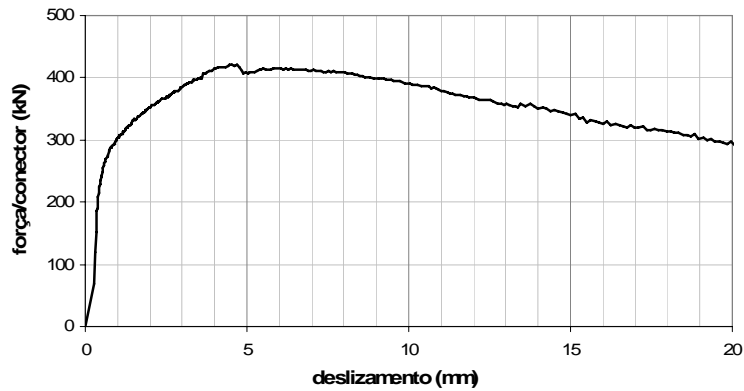


Figura 2-4 – Curva força-deslizamento obtida em ensaio *push-out* (adaptada de Veríssimo, 2007).

Na Figura 2-5 é apresentado o esquema de um ensaio *push-out* típico, segundo a EN 1994-1-1:2004, com conectores *stud*.

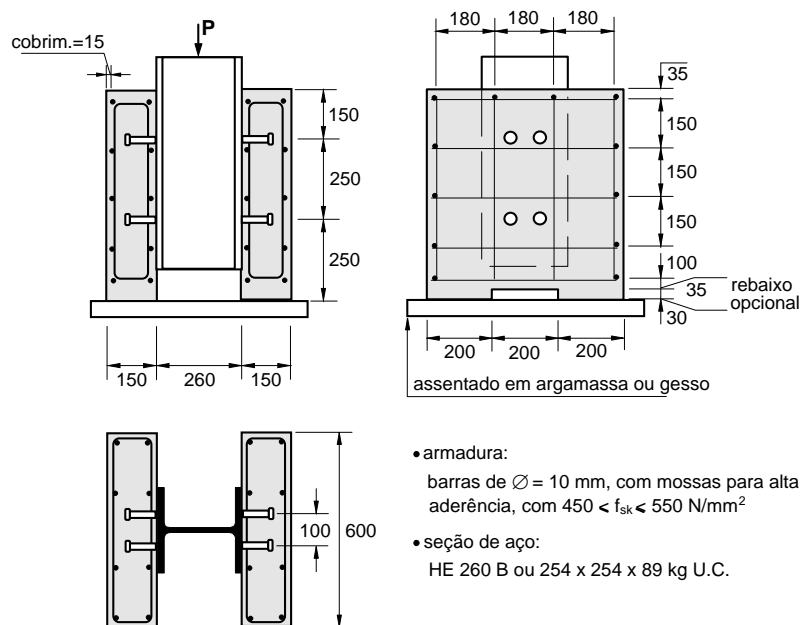


Figura 2-5 – Características de um ensaio *push-out* típico com conector *stud*, segundo a EN 1994-1-1:2004.

O ensaio *push-out* consiste de duas pequenas lajes de concreto de 60×65×15 cm conectadas a um perfil metálico por meio dos conectores de cisalhamento em estudo. Como indicado na Figura 2-5, um carregamento é aplicado ao perfil, que desliza relativamente às lajes de concreto até ao colapso da conexão. Ao longo do processo de carregamento, registram-se os deslizamentos relativos entre o aço e o concreto,

bem como a força atuante, em intervalos de tempo pré-fixados. Ao final do ensaio tem-se um conjunto de pontos para o traçado da curva força-deslizamento.

Na preparação dos modelos, a aderência na interface entre as mesas do perfil de aço e o concreto deve ser eliminada, lubrificando-se a mesa do perfil ou usando outro meio qualquer apropriado. Dessa forma assegura-se que a resistência medida no experimento está associada principalmente ao desempenho do conector (VERÍSSIMO, 2007).

A capacidade de deslizamento de um corpo-de-prova (δ_u) corresponde ao deslizamento medido para o nível de carga característico, como mostrado na Figura 2-6. Ou seja, corresponde ao deslizamento máximo no qual o conector ainda suporta 90% de sua resistência máxima ao cisalhamento. A capacidade de deslizamento característico δ_{uk} deve ser tomada como o mínimo valor de δ_u medido nos ensaios, reduzido de 10% (VERÍSSIMO, 2007).

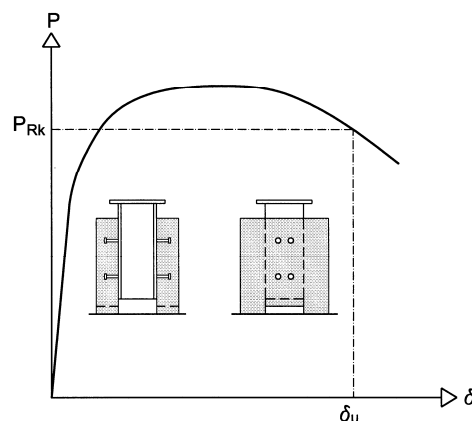


Figura 2-6 – Características de um ensaio push-out típico com conector stud, segundo a EN 1994-1-1:2004.

A resistência do conector ao *uplift* é verificada da seguinte maneira: a separação transversal entre a seção de aço e as lajes, medida quando os conectores estão sujeitos a 80% da sua carga última, deve ser inferior a 50% do deslizamento longitudinal correspondente. Caso contrário, a capacidade de conexão não é satisfatória (VERÍSSIMO, 2007).

2.3 Sobre o comportamento de conectores de cisalhamento em chapa plana de aço perfurada

O comportamento mecânico dos conectores em chapa perfurada, como o Perfobond e o Crestbond, é influenciado pelos seguintes fatores: (a) a resistência ao cisalhamento da laje de concreto; (b) a taxa de armadura transversal na laje; (c) a resistência da própria chapa do conector e (d) o efeito dos pinos virtuais de concreto que se formam dentro das aberturas do conector.

2.3.1 O efeito de pino em conectores em chapa plana perfurada

Após os primeiros ensaios realizados com conectores Perfobond por Leonhardt *et al.* (1987), verificou-se que a ruptura da conexão acontecia ou no conector ou no concreto da região das aberturas. Neste caso, o esmagamento do concreto junto à superfície de contato com o conector era acompanhado pelo cisalhamento em dois planos de corte coincidentes com as superfícies laterais do conector (Figura 2-7). Tendo em vista essa observação, os autores propuseram que a resistência da conexão estava relacionada ao efeito de pino, qual seja, o concreto que flui através das aberturas do conector forma pinos virtuais dentro da peça, que proporcionam resistência ao cisalhamento na direção longitudinal e evitam a separação entre as seções de aço e concreto (ver Figura 2-7).

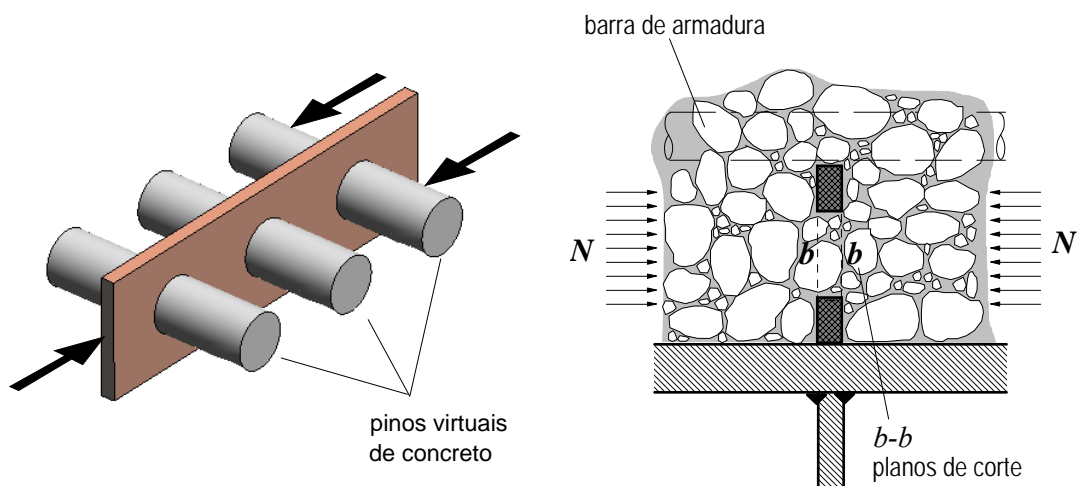


Figura 2-7 – Cisalhamento dos pinos virtuais de concreto (adaptado de Veríssimo, 2007)

Outros autores também observaram esse modo de falha em ensaios de cisalhamento direto com conectores em chapa longitudinal perfurada. Em ensaios tipo *push-out*

realizados com Perfobond na Universidade de Saskatchewan, no Canadá, por Veldanda (1991) e depois por Oguejiofor (1994), esse modo de ruptura foi observado (Figura 2-8a). O cisalhamento dos pinos de concreto também ficou evidente em ensaios *push-out* realizados por Veríssimo (2007) em modelos com conectores Crestbond (Figura 2-8b). Em todos esses casos, verificou-se que, se o conector resiste intacto ao processo de carregamento, ocorre falha por esmagamento do concreto no interior das aberturas do conector, seguida por cisalhamento dos pinos de concreto em dois planos de corte.



(a) (b)
Figura 2-8 – Detalhe do conector após o colapso e o efeito de pino no concreto: a) no Perfobond (Oguejiofor e Hosain, 1994); b) no Crestbond (Veríssimo, 2007).

Kraus e Wurzer (1997) investigaram o comportamento do conector *Perfobond* e observaram, nos modelos ensaiados, cunhas de concreto completamente compactadas próximas à superfície de contato com a parede dos furos do conector. De acordo com os autores, o esforço atuante na conexão é transmitido da chapa de aço para a laje de concreto por meio de uma força de compressão extremamente intensa, que age na superfície de contato dos furos, devido ao confinamento do concreto nessa região proporcionado pela laje ao redor. Segundo os autores, a área onde a força se distribui no pino de concreto pode ser dividida em duas partes principais, chamadas zona A e zona B (Figura 2-9).

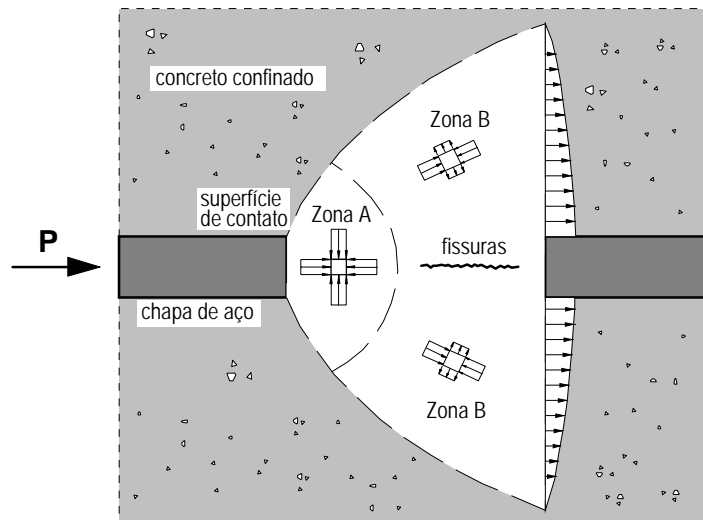


Figura 2-9 – Tensões no concreto numa abertura do conector Perfobond (adaptado de Kraus e Wurzer, 1997).

Na zona A o concreto é confinado, ficando submetido à compressão triaxial. A capacidade do concreto de suportar esforço e deformação depende da estrutura porosa da pasta de cimento. Assim, acima de uma certa carga o concreto na zona A sofre poro-colapso, na medida em que ocorre esmagamento das paredes dos poros da pasta de cimento, decorrente da compressão triaxial, formando uma massa compacta.

Na zona B atuam tensões de compressão na direção longitudinal e tensões de tração na direção transversal. Fissuras paralelas à força cisalhante ocorrem quando a tensão transversal excede a resistência à tração do concreto.

Um estado limite é alcançado quando os poros na zona A ficam completamente preenchidos com o material resultante do esmagamento do concreto e a redução de volume não é mais possível. O material pulverizado compactado no interior do furo do conector produz um estado de pressão quase-hidrostática no concreto confinado que pode conduzir à divisão da laje em duas metades e, finalmente, ao escorregamento de cunhas do concreto nas regiões próximas aos pinos.

2.3.2 Influência da resistência do concreto na capacidade da conexão

A Figura 2-10 mostra a influência da resistência à compressão do concreto na capacidade da conexão para modelos com *Perfobond* e *stud*.

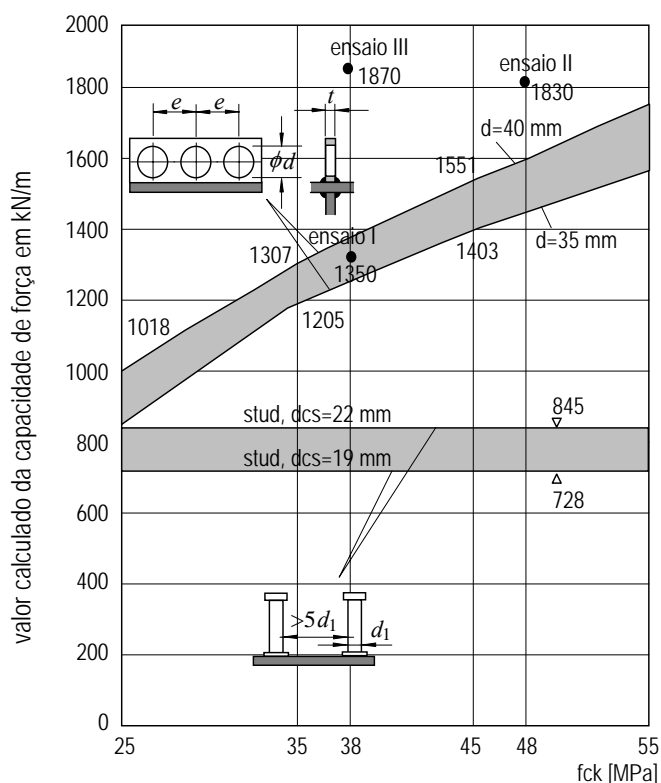


Figura 2-10 – Influência da resistência do concreto na resistência dos conectores Perfobond e stud (adaptado de Leonhardt, 1987).

No caso do *stud* quem governa o colapso geralmente é a resistência ao corte do conector. O aumento na resistência do concreto não implica em aumento na capacidade da conexão. Por outro lado, nos conectores em chapa contínua perfurada é possível variar a resistência da conexão em função da resistência do concreto sem alterar a geometria do conector.

Na Figura 2-11 são mostradas curvas força/deslizamento obtidas por Oguejiofor (1994) em ensaios tipo *push-out* com Perfobond. Pode-se observar a influência da resistência do concreto na capacidade da conexão. O mesmo comportamento é observado nos ensaios de cisalhamento direto com Crestbond (Figura 2-12).

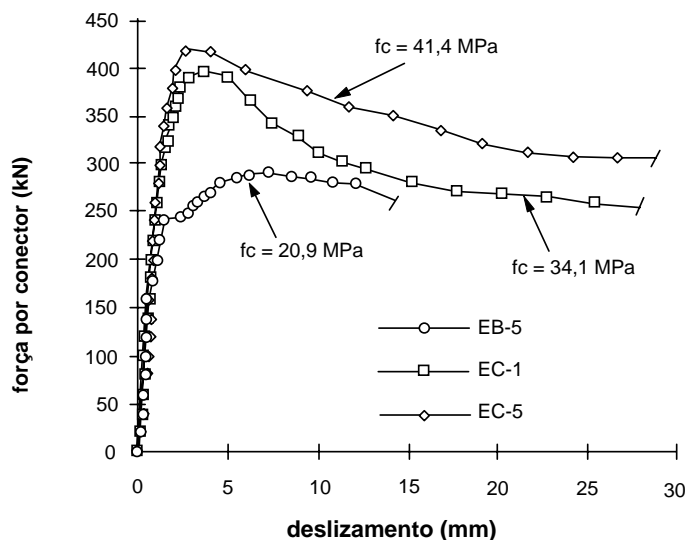


Figura 2-11 - Efeito da resistência do concreto na conexão com Perfobond (adaptado de Oguejiofor, 1994).

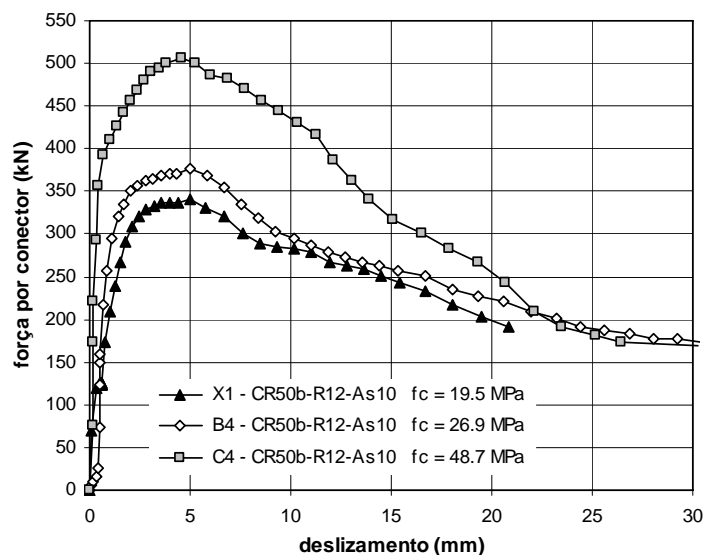


Figura 2-12 – Efeito da resistência do concreto na conexão com Crestbond (Veríssimo *et al.*, 2006)

Os resultados experimentais de Oguejiofor (1994) e de Veríssimo (2007) indicam que existe uma relação praticamente linear entre a resistência do concreto e a capacidade dos conectores em chapa plana perfurada (Figura 2-13). Os resultados de ensaios realizados por Kraus e Wurzer (1997) e por Cândido-Martins *et al.* (2010) também confirmam essa observação.

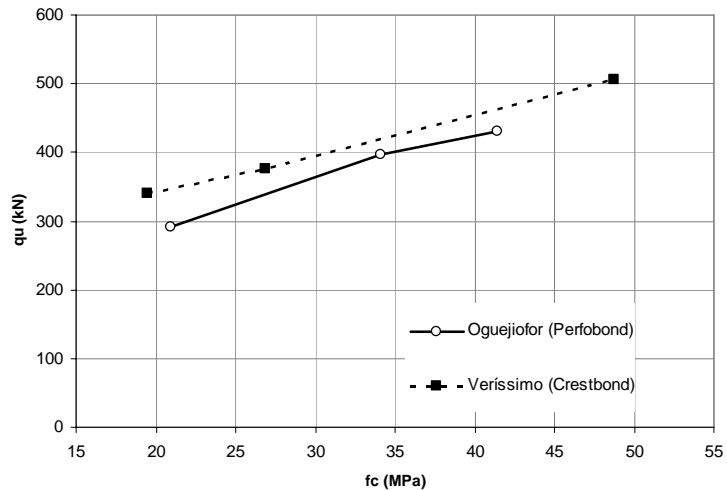


Figura 2-13 – Relação entre a resistência do concreto e a capacidade da conexão para conectores Perfobond e Crestbond.

2.3.3 Influência do tamanho das aberturas dos conectores na capacidade da conexão

Embora o Perfobond possua furos circulares e as aberturas do Crestbond sejam trapezoidais, o comportamento de ambos os conectores é muito similar quando se considera a área das aberturas. Veríssimo (2007) ensaiou modelos com conectores Crestbond com furos trapezoidais cuja área se relaciona com um círculo inscrito de 40, 50 e 60 mm de diâmetro (Figura 2-14). Os resultados obtidos demonstram que existe uma relação linear entre a capacidade da conexão e o tamanho dos furos (Figura 2-15).

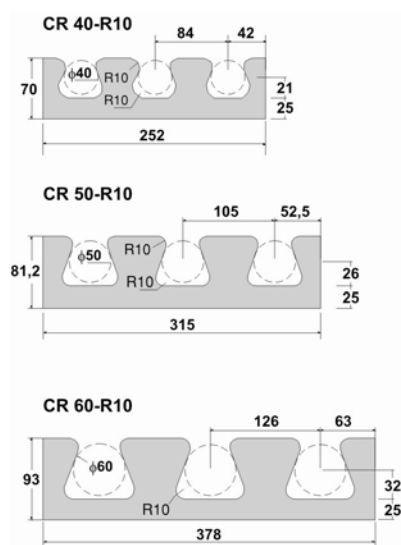


Figura 2-14 – Conectores CR40, CR 50 e CR60 ensaiados por Veríssimo (2007).

Kraus e Wurzer ensaiaram modelos com Perfobond com aberturas de diversos tamanhos. Os resultados demonstram que o tamanho dos furos tem influência na ductilidade da conexão, como pode ser visto na Figura 2-16.

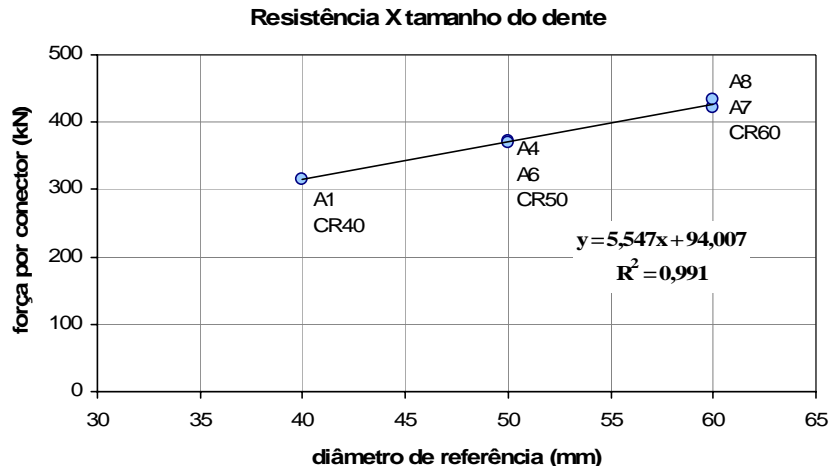


Figura 2-15 – Relações entre a resistência do conector e o tamanho das aberturas no conector (Veríssimo, 2007).

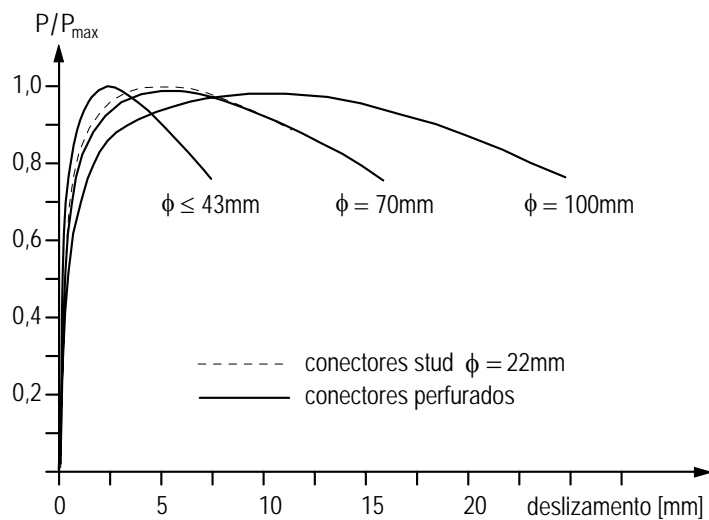


Figura 2-16 – Relações força-deslizamento para conectores Perfobond com furos de vários tamanhos (Kraus e Wurzer, 1997).

2.3.4 Influência da armadura transversal

Em diversos estudos realizados (DAVIES, 1969; VELDANDA, 1991; OGUEJIOFOR, 1994; KRAUS e WURZER, 1997; VERÍSSIMO, 2007) nota-se que a capacidade da conexão mista tem relação com a armadura transversal na laje. Tanto Oguejiofor (1994) como Veríssimo (2007) realizaram ensaios *push-out* com pares de

modelos contendo Perfobond e Crestbond, respectivamente, para os quais se variava a quantidade de armadura na laje de concreto. A resistência da conexão medida nesses ensaios demonstra claramente a influência da armadura.

Na Figura 2-17 e na Figura 2-18 podem-se observar os resultados obtidos por Oguejiofor para pares de modelos com diferentes quantidades de armadura.

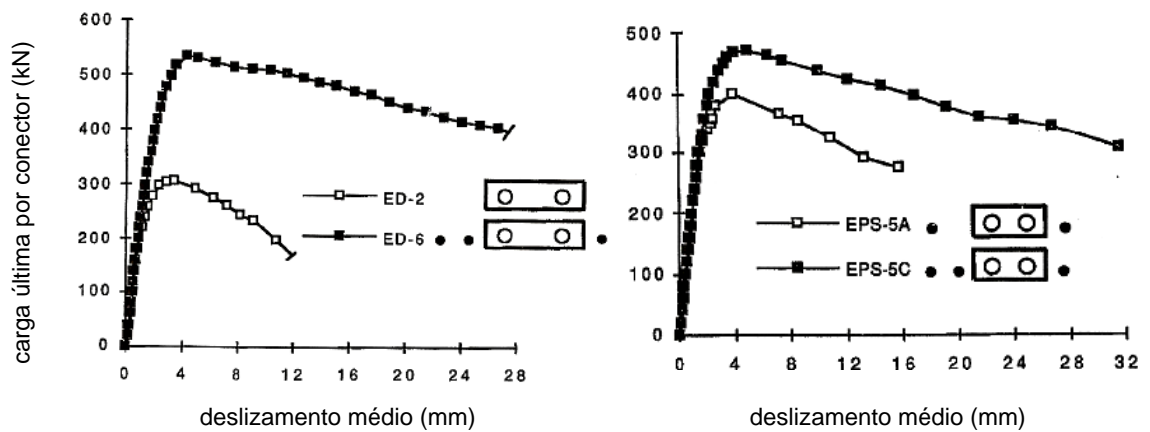


Figura 2-17 – Curvas carga-deslizamento em conectores Perfobond de dois furos, mostrando o efeito da armadura transversal (adaptado de Oguejiofor, 1994).

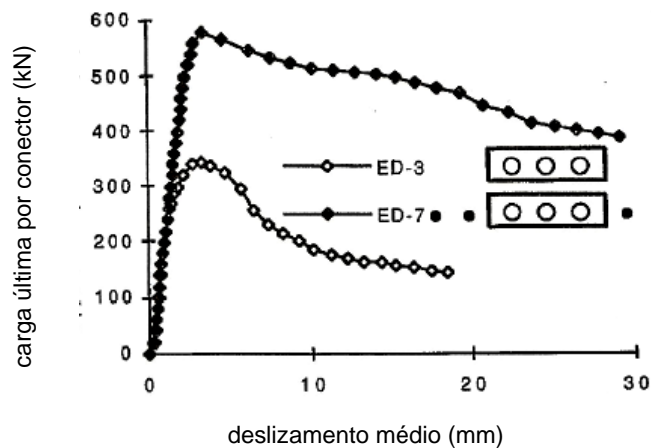


Figura 2-18 – Curvas carga-deslizamento em conectores Perfobond de três furos, mostrando o efeito da armadura transversal (adaptado de Oguejiofor, 1994).

Nos experimentos que deram origem aos resultados mostrados na Figura 2-17 e na Figura 2-18, variou-se a taxa de armadura somente no entorno do conector. Não

havia, portanto, a chamada armadura passante, constituída de barras passando por dentro das aberturas do conector (Figura 2-19 b).

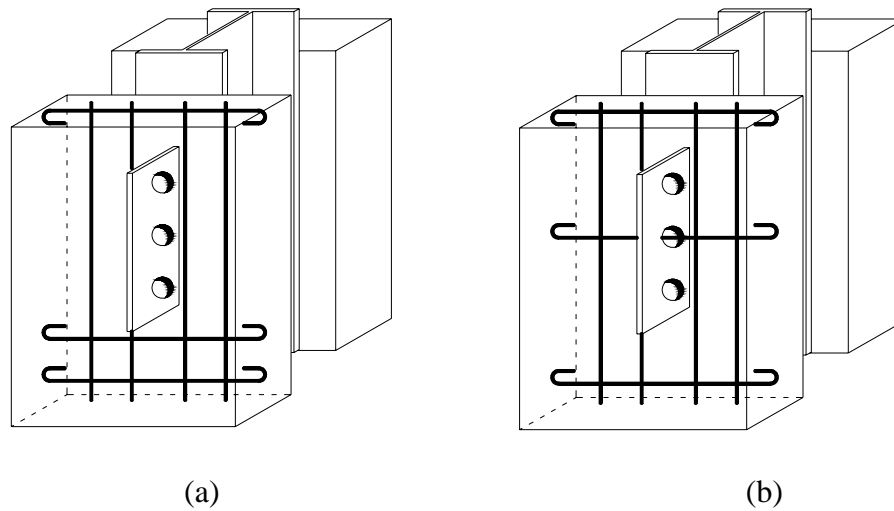


Figura 2-19 – Posicionamento da armadura transversal (Oguejiofor, 1994)

Em um de seus experimentos, Oguejiofor (1994) adicionou uma tela soldada na laje, aumentando assim a taxa de armadura. Na Figura 2-20 está apresentado as curvas força/deslizamento do modelo ED-7 com tela soldada e do modelo EC-7 sem a presença da tela.

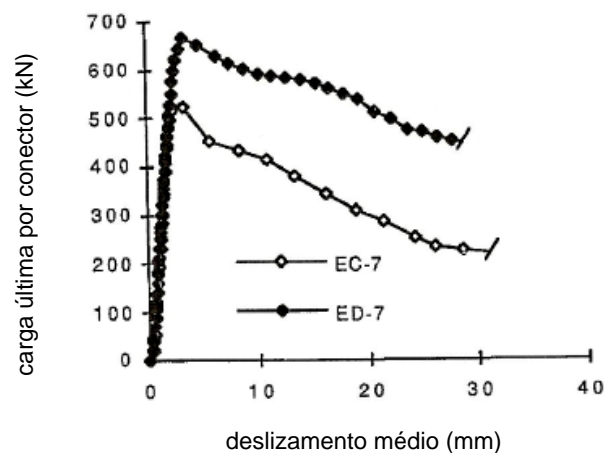


Figura 2-20 – Curvas carga-deslizamento em conectores Perfobond, mostrando o efeito da malha de armadura soldada adicional no modelo ED-7 (Oguejiofor, 1994)

Nos experimentos realizados por Veríssimo (2007), com conector Crestbond, também ficou evidente a influência da armadura transversal da laje, como pode ser visto na Figura 2-21.

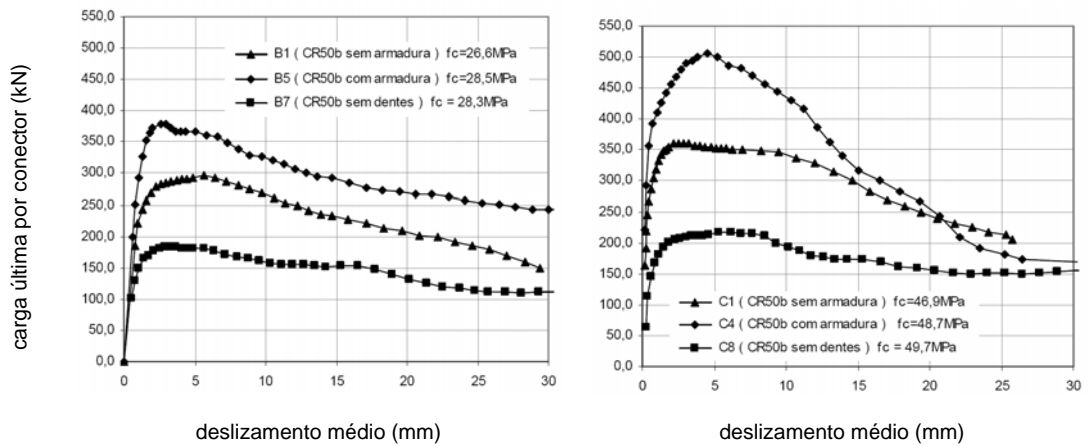


Figura 2-21 – Curvas carga-deslizamento em conectores Crestbond, mostrando o efeito da armadura transversal (Veríssimo et al, 2006)

Na Figura 2-22 é apresentado um gráfico demonstrando a variação da resistência da conexão com Perfobond em função da taxa de armadura transversal na laje ($\rho = A_{tr}/A_{cc}$).

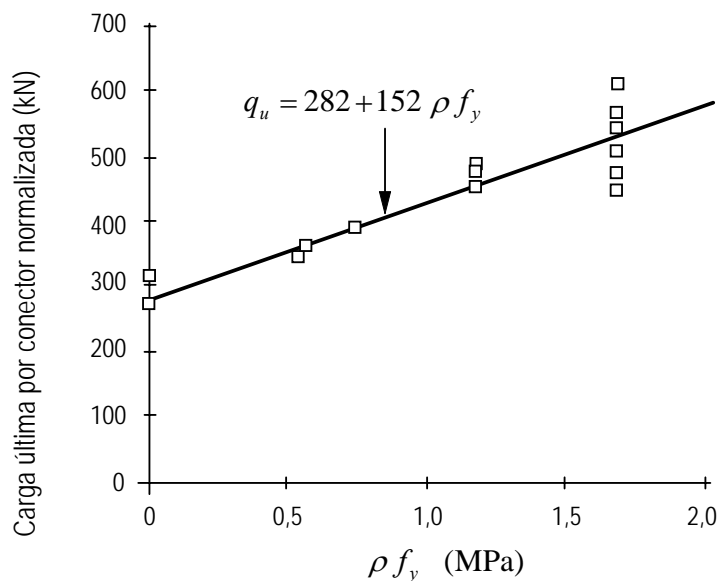


Figura 2-22 – Efeito da taxa de armadura transversal em conectores Perfobond com três furos (adaptado de Oguejiofor & Hosain, 1994).

De acordo com o comportamento observado na Figura 2-22, parece que a capacidade da conexão cresce linearmente com o aumento da taxa de armadura. No entanto, ao se levar em conta que a resistência usual de um aço para concreto armado se situa na

faixa de 500 MPa conclui-se que, a faixa para a taxa de armadura contemplada na Figura 2-22 vai de zero até próximo de 0,5%.

Davies (1969) realizou uma série de ensaios em modelos de vigas mistas com conectores *stud*, com vistas ao estudo da influência do espaçamento dos conectores e da taxa de armadura transversal da laje no comportamento das vigas. Nesses ensaios, a taxa de armadura variava de 0,12% a 0,94%. Davies observou que para taxas de armadura menores que 0,5%, o desempenho da viga mista é ruim, não sendo aconselhável a utilização de taxas menores que esta. Os resultados obtidos por Davies (1969) também indicam que taxas de armadura superiores a 1,0% já não proporcionam um acréscimo de resistência considerável. Esse fenômeno pode ser explicado se considerado o modelo de bielas e tirantes, usualmente usado para descrever o comportamento de vigas mistas. Segundo essa abordagem, o mecanismo resistente da laje consiste de uma treliça virtual composta por tirantes de aço tracionados e bielas de concreto comprimidas. Se a capacidade do tirante for sendo aumentada, chega-se a um ponto em que a capacidade da biela comprimida de concreto se esgota, e a ruptura então se dá preferencialmente na biela, independente de qualquer acréscimo na armadura. Na Figura 2-23 mostra-se um gráfico que apresenta a evolução da resistência ao momento fletor para as vigas mistas ensaiadas por Davies (1969), onde:

e_c^M = momento de fissuração experimental.

e_r^M = momento último experimental.

t_r^M = momento último teórico.

Pode-se notar, através da Figura 2-23, que a taxa de variação do momento fletor tende a zero para taxas de armadura acima de 1%.

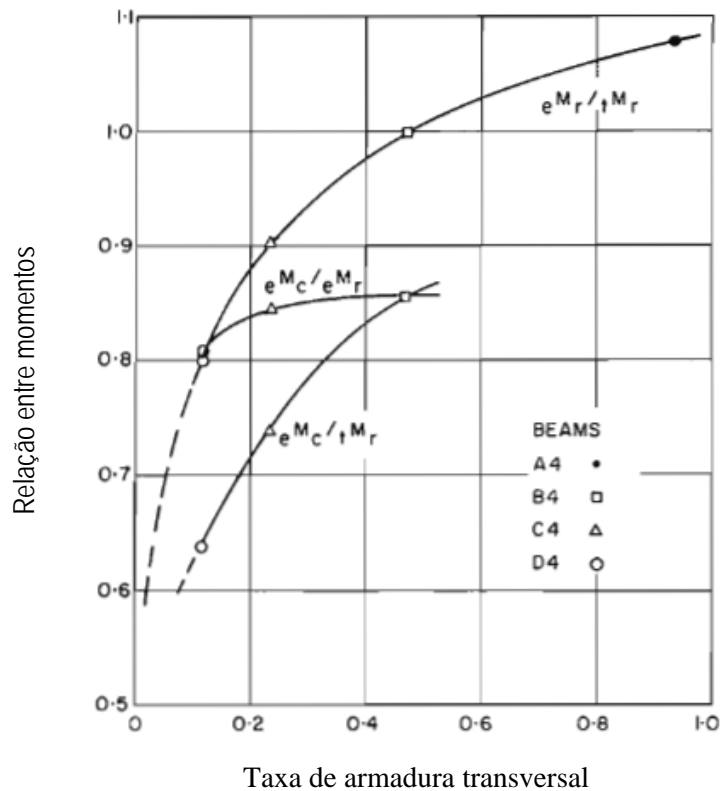


Figura 2-23 – Resultados dos experimentos de Davies, mostrando a variação do Momento Fletor Resistente em função da taxa de armadura transversal em vigas mistas (DAVIES, 1969).

2.3.5 Influência do espaçamento entre os furos

Resultados de ensaios com Perfobond, realizados por diversos autores, demonstram que a capacidade da conexão cresce proporcionalmente ao número de aberturas no conector. Entretanto, alguns estudos indicam que se os furos são muito próximos, a resistência se reduz, possivelmente devido à sobreposição de campos de tensões no concreto. Nishido *et al.* (2000) comentam que se as perfurações são muito próximas, a fissuração no entorno de um furo influencia no efeito de pino dos furos adjacentes.

Oguejiofor (1994) realizou ensaios *push-out* com conectores Perfobond variando o número de furos no conector e o espaçamento entre os furos (ver Figura 2-24). O resultado revelou que se os furos ficam muito próximos, a resistência da conexão fica prejudicada. A Figura 2-25 apresenta o efeito do número de pinos na capacidade do conector associado à resistência do concreto. Nota-se que para os modelos com quatro pinos há uma redução na resistência última, e essa redução se deve ao menor espaçamento entre os furos nos conectores com quatro aberturas, como se pode ver

na Figura 2-24 (OGUEJIOFOR, 1994). A descrição das séries ensaiadas por Oguejiofor (1994) pode ser vista na TABELA 4-4. Tabela 5-1

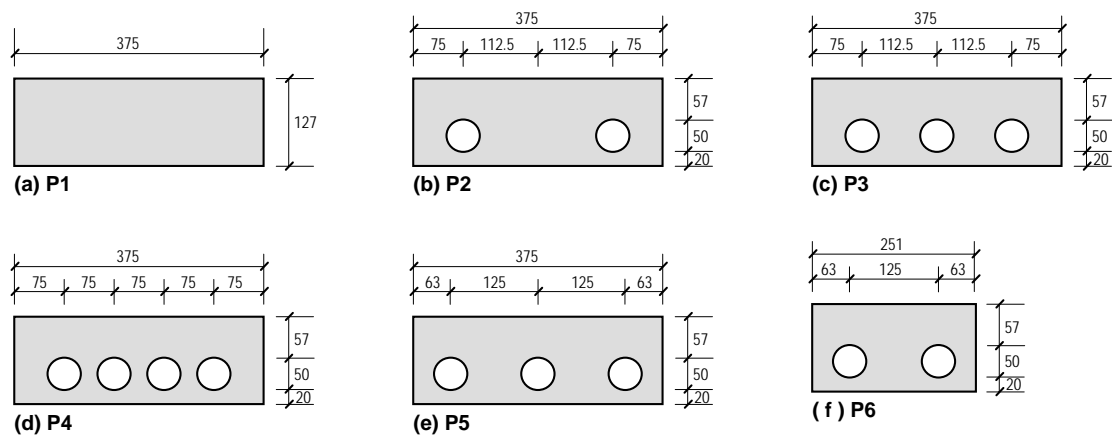


Figura 2-24 – Variações do Perfobond ensaiadas por Oguejiofor (1994) para estudar o efeito do número de furos e do espaçamento entre os furos na resistência do conector.

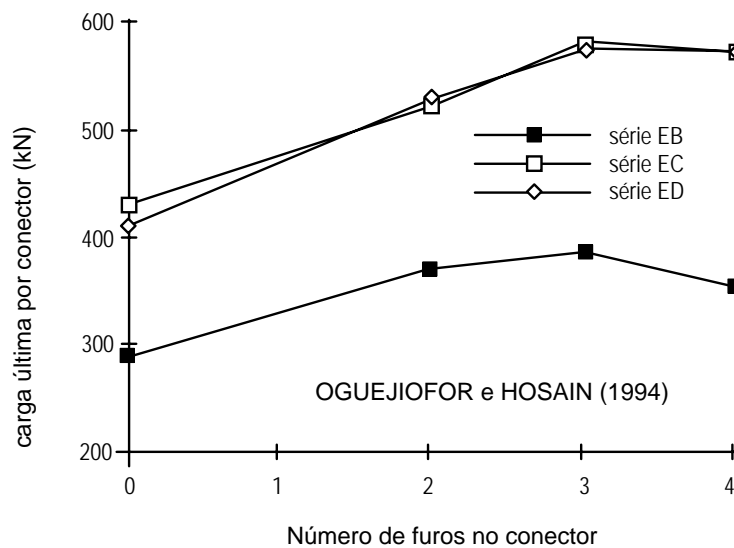


Figura 2-25 – Efeito do número de furos e do espaçamento entre os furos na resistência do conector (adaptado de Oguejiofor & Hosain, 1994)

Segundo Oguejiofor (1994), a resistência ao cisalhamento do conector Perfobond cresce com o aumento do número de furos no conector, desde que o espaçamento entre furos seja de pelo menos 2,25 vezes o diâmetro dos furos.

Quando o Crestbond foi concebido, essa informação já era disponível, e as relações geométricas foram definidas de tal forma que o espaçamento mínimo de $2,25D$ entre furos fica sempre assegurado (VERÍSSIMO, 2007).

2.3.6 Influência da espessura da chapa do conector

Ushijima *et al.* (2001) testaram conectores Perfobond com espessuras de 8 mm até 22 mm, em corpos de prova sem armadura passante, para avaliar especificamente a influência da espessura da chapa. Nos modelos com chapa de 8 mm o concreto no interior dos furos do conector foi pulverizado na região de contato com a chapa. Já nos modelos com chapas mais espessas, observou-se que o concreto rompe por cisalhamento em dois planos de corte, em ambos os lados da chapa. As diferenças no fenômeno da ruptura do concreto relacionadas com a espessura da chapa do conector estão mostradas na Figura 2-26. Os autores ressaltam que nos ensaios com conectores com espessura abaixo de 10 mm o efeito de pino não ocorre, ao passo que, para conectores com espessuras maiores, ele é evidente.

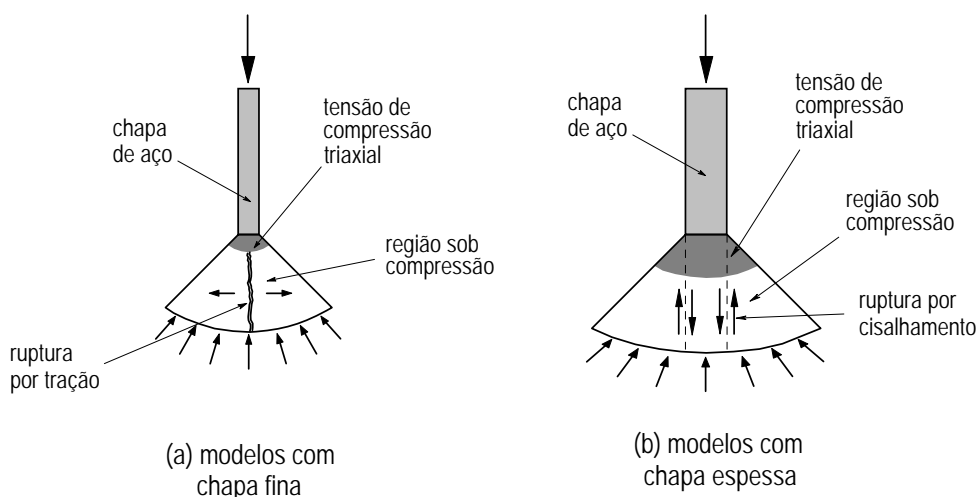


Figura 2-26 – Condições de ruptura do concreto dependendo da espessura da chapa do conector (adaptado de Ushijima *et al.*, 2001)

Quando a espessura da chapa é menor, a área à compressão é muito pequena, de forma que a força se concentra numa porção menor do concreto. Por outro lado, em conectores com chapas mais espessas, as tensões de compressão se distribuem melhor no concreto. Assim, o concreto atinge seu limite de resistência ao cisalhamento nos dois planos de corte coincidentes com as faces laterais da chapa.

2.3.7 Influência da excentricidade do conector

Veríssimo (2007) relata que, quando iniciou os primeiros ensaios *push-out* com o conector Crestbond, havia uma expectativa de que os resultados se aproximassem daqueles obtidos por Oguejiofor (1994) para um Perfobond de dimensões similares. No entanto isso não ocorreu. Os resultados para o Crestbond foram inferiores aos que Oguejiofor (1994) obteve em ensaios similares.

As primeiras séries de ensaios de Oguejiofor (1994), com o Perfobond, e as de Veríssimo (2007) com o Crestbond, tinham em comum alguns modelos com um conector sem aberturas, usado para avaliação do efeito de pino no concreto. Esses modelos apresentavam poucas e pequenas diferenças em sua geometria. Suas lajes possuíam a mesma espessura, bem como os conectores. Todavia, o conector de Oguejiofor possuía 127 mm de altura contra apenas 81,2 mm do de Veríssimo. Por essa razão a contribuição da resistência frontal era maior nos Perfobond. Porém, mesmo normalizando os resultados do Crestbond em relação à área frontal do conector e à resistência do concreto, as diferenças entre as resistências ainda eram significativas. Após realizar novos ensaios com conectores mais altos, Veríssimo concluiu que a resistência é afetada pela excentricidade da resultante de forças no conector em relação ao plano médio da laje (ver Figura 2-27).

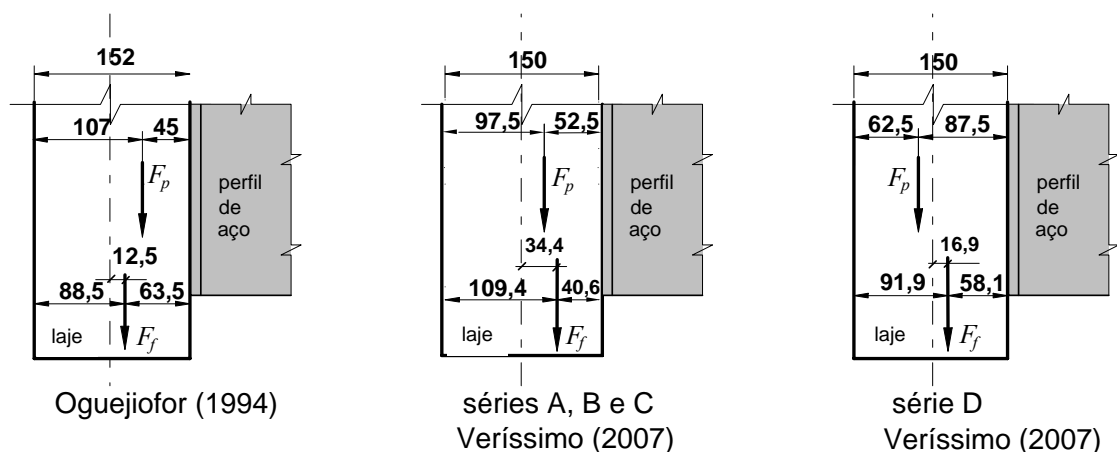


Figura 2-27 – Variação da excentricidade da força frontal no conector em relação ao plano médio da laje (Veríssimo, 2007)

Essa descoberta motivou a introdução de um fator na equação de resistência do conector, que permite a consideração do efeito da excentricidade da força frontal. Isto é discutido no Capítulo 6.

Na Figura 2-28 podem-se observar curvas força/deslizamento para conectores Crestbond similares, que diferem apenas pela altura, e a visível relação da excentricidade com a resistência da conexão.

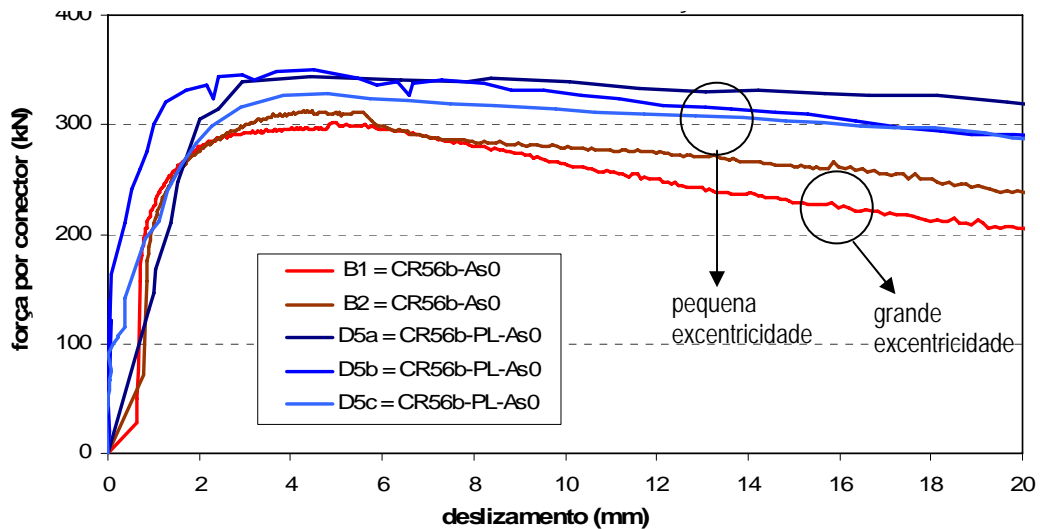


Figura 2-28 – Efeito da excentricidade na resistência última do conector (Veríssimo, 2007).

2.4 Modelos empíricos, mecanísticos e semiempíricos

Em função do desenvolvimento da mecânica, muitos fenômenos físicos atualmente são explicados com base num mecanismo conhecido. Por exemplo, sabe-se que a tensão que surge na seção de uma barra estrutural sujeita a uma força de tração axial pode ser precisamente estimada dividindo-se a força atuante pela seção da barra. Portanto, um modelo para explicar este fenômeno pode ser escrito na forma

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-1)$$

Esse tipo de modelo é chamado de **modelo mecanístico**, porque é construído a partir do conhecimento do mecanismo físico básico que relaciona as variáveis do problema.

Uma das maneiras com que os engenheiros frequentemente coletam dados é a partir de um **estudo observacional**. Nessa situação, o processo ou o sistema que está sendo estudado pode ser observado somente pelo engenheiro, e os dados são obtidos à medida que se tornam disponíveis. Eventualmente, o fenômeno em estudo é de tal complexidade que não há um modelo mecânico simples ou bem entendido que o explique. Este é o caso da resistência dos conectores em chapa plana perfurada. Percebe-se que a resistência da conexão é claramente influenciada por diversas variáveis como, por exemplo, a resistência do concreto (f_c), a taxa de armadura (ρ), a altura do conector (h_{sc}), o diâmetro das aberturas (D), etc. Assim, pode-se inferir que a resistência última do conector (q_u) é uma função dessas variáveis, podendo ser escrita na forma

$$q_u = f(f_c, \rho, h_{sc}, D) \quad (2-2)$$

mas a forma da função f é desconhecida. Numa situação desse tipo, pode-se tentar desenvolver um modelo a partir de uma expansão em série de Taylor, por exemplo, considerando apenas o termo de primeira ordem, produzindo assim um modelo da forma

$$q_u = \beta_0 + \beta_1 f_c + \beta_2 \rho + \beta_3 h_{sc} + \beta_4 D \quad (2-3)$$

sendo β_i os parâmetros desconhecidos. Diferentemente da Eq. (2-1), esse modelo muito possivelmente não descreverá exatamente o fenômeno; assim, é razoável considerar outras fontes de variabilidade que possam afetar a resistência da conexão, adicionando-se outro termo ao modelo, que leva a

$$q_u = \beta_0 + \beta_1 f_c + \beta_2 \rho + \beta_3 h_{sc} + \beta_4 D + \varepsilon \quad (2-4)$$

O termo ε na Eq. (2-4) leva em conta outras influências não consideradas pelos demais termos. Esse tipo de modelo é chamado de **modelo empírico**, porque ele surge do conhecimento científico do fenômeno, porém não é desenvolvido diretamente a partir do conhecimento teórico ou dos primeiros princípios do mecanismo básico. Um modelo empírico pode ser manipulado e analisado da mesma forma que um modelo mecânico (MONTGOMERY *et al.*, 2004).

O tipo de modelo expresso pela Eq. (2-4) também é chamado de **modelo de regressão**. Observe-se, por exemplo, a Figura 2-13, ela representa um diagrama de dispersão, no qual cada par (x_i, y_i) é representado como um ponto plotado em um sistema bidimensional de coordenadas. Não há um modelo mecânico óbvio que relacione a resistência última do conector à resistência à compressão do concreto. No entanto, uma simples observação do gráfico indica que, embora nenhuma curva simples passe exatamente por todos os pontos, há uma forte evidência de que os pontos repousam aleatoriamente dispersos em torno de uma linha reta. Por conseguinte, é razoável considerar que a média da variável aleatória Y esteja relacionada a x pela seguinte equação linear

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2-5)$$

em que os coeficientes angular e linear da reta são parâmetros desconhecidos. A variável dependente Y representa o valor esperado da variável de resposta para um valor particular do regressor x . Embora a média de Y seja uma função linear de x , o valor real observado, y , não cai exatamente sobre a linha reta. A maneira apropriada de generalizar isso para um **modelo linear probabilístico** é considerar que o valor esperado de Y seja uma função linear de x , mas que, para um valor fixo de x , o valor real de Y seja determinado pela função do valor médio (o modelo linear) mais um termo de erro aleatório ε . Assim, constitui-se um Modelo de Regressão Linear Simples, no qual a variável dependente, ou de resposta, está relacionada a uma variável independente, ou regressor, como

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (2-6)$$

sendo ε o termo de erro aleatório. Os parâmetros β_0 e β_1 são chamados de **coeficientes de regressão** e, geralmente, são obtidos de modo que o termo de erro ε seja o mínimo possível.

Há situações de construção de modelos empíricos em que existe mais de um regressor (variável independente). Também é possível construir um modelo de regressão para descrever a relação entre as variáveis e, neste caso, o modelo é dito de **regressão múltipla**. A Eq. (2-4) se encaixa nessa definição, pois ela é da forma

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2-7)$$

Entretanto, não é difícil perceber que a resistência última de conectores como o Perfobond ou o Crestbond não depende simplesmente de variáveis isoladas, como sugere a Eq. (2-4). Analisando os modos de colapso observados nos ensaios *push-out* percebe-se que há a contribuição de alguns mecanismos conhecidos como, por exemplo, o cisalhamento dos pinos de concreto. Nesses mecanismos, há interação entre algumas variáveis do problema.

Modelos que incluem efeitos de interação também podem ser analisados pelos métodos de regressão linear múltipla. Uma interação entre duas ou mais variáveis pode ser representada por um termo cruzado no modelo, tal como

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (2-8)$$

Fazendo $x_3 = x_1 x_2$ e $\beta_3 = \beta_{12}$, então a Eq. (2-8) pode ser escrita com

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (2-9)$$

Seja, por exemplo, a hipótese de que a resistência do Crestbond descontínuo decorra da contribuição da força de compressão na face frontal do conector, tal como mostrado na Figura 2-29, e do cisalhamento dos pinos de concreto em dois planos de corte. Neste caso, o modelo poderia ser escrito na forma:

$$q_u = \beta_1 (t_{sc} h_{sc} f_c) + \beta_2 \left(n 2 \pi \frac{D^2}{4} \sqrt{f_c} \right) \quad (2-10)$$

onde:

q_u = resistência última de um conector

t_{sc} = espessura do conector

h_{sc} = altura do conector

f_c = resistência a compressão do concreto

n = número de aberturas do conector (pinos de concreto)

D = diâmetro de referência dos furos no conector

β_1, β_2 = coeficientes de regressão

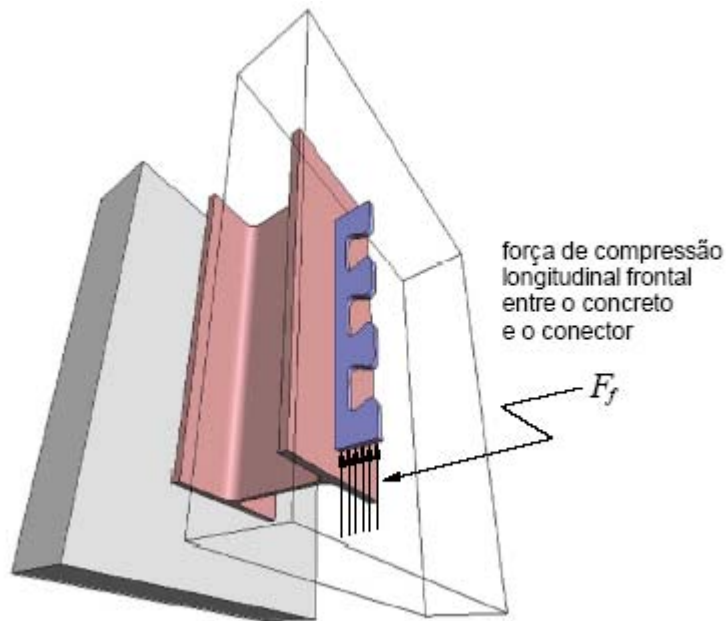


Figura 2-29 – Força de compressão na face frontal do conector (Veríssimo, 2007)

O primeiro termo na Eq. (2-10) representa a força de compressão frontal, dada pelo produto entre a área frontal do conector e a resistência à compressão do concreto, um mecanismo conhecido. O segundo termo representa o cisalhamento duplo dos pinos de concreto, ou seja, duas vezes o produto entre a área de um pino ($\pi D^2/4$) e a resistência ao cisalhamento do concreto (que é bem representada por raiz quadrada de f_c), multiplicado pelo número n de pinos. Esses dois mecanismos podem ser computados à parte, figurando no modelo como uma variável independente, da forma

$$q_u = \beta_1 F_f + \beta_2 F_p \quad (2-11)$$

onde:

$$F_f = t_{sc} h_{sc} f_c \quad (\text{força de compressão frontal no conector, em kN})$$

$$F_p = n 2 \pi \frac{D^2}{4} \sqrt{f_c} \quad (\text{força decorrente da resistência ao cisalhamento dos pinos de concreto, em kN})$$

$$\beta_1, \beta_2 \quad \text{coeficientes de regressão}$$

O modelo descrito nas equações (2-10) e (2-11) é dito **semiempírico**, pois possui características de um modelo empírico e envolve mecanismos implícitos que explicam a relação entre algumas variáveis do problema.

2.5 Modelos semiempíricos pré-existentes para conectores em chapa perfurada

O primeiro modelo semiempírico para estimativa da resistência do Perfobond foi proposto por seus próprios autores. Andrä (1990), um dos desenvolvedores do Perfobond, apresenta uma expressão simples, que considera apenas o efeito de pino nas aberturas do conector, ajustada em função dos resultados experimentais disponíveis à época. Segundo o autor, trata-se de uma abordagem conservadora. A expressão é dada por

$$q_u = 1,26 D^2 f_c \quad (2-12)$$

Em 1994, Oguejiofor propôs uma equação para a resistência do Perfobond inspirado nas proposições de Davies (1969). A partir da observação do modo de colapso de vigas mistas ensaiadas, Davies propôs um modelo semiempírico para estimar a resistência da conexão mista com *studs*, constituído de dois termos: um que considera a resistência da laje ao cisalhamento longitudinal e outro que considera a influência da armadura transversal na laje. Segundo Davies, *apud* Oguejiofor e Hosain (1994), a tendência da laje se separar em duas metades é resistida pela resistência à tração do concreto, juntamente com a armadura transversal, e a expressão proposta por ele tem a seguinte forma:

$$q_u = 8,5 A_{cc} \sqrt{u_w} + 2,4 A_{tr} f_{yr} \quad (2-13)$$

onde:

q_u = capacidade do conector em lbf

A_{cc} = área da laje ao cisalhamento no entorno de um conector (in²)

u_w = resistência à compressão do concreto, em psi, tirada em corpo-de-prova cúbico

A_{tr} = área de armadura transversal (in²) distribuída na área A_{cc}

f_{yr} = tensão de escoamento do aço da armadura transversal (psi)

Considerando que o modo de colapso observado nos ensaios *push-out* com Perfobond é similar ao que ocorreu nos ensaios de Davies, Oguejiofor (1994) propôs um modelo semiempírico para estimar a resistência do Perfobond utilizando a mesma abordagem, porém acrescentando um termo referente ao cisalhamento dos pinos de concreto. A expressão, em sua forma geral, é dada por:

$$q_u = \beta_1 A_{cc} \sqrt{f_c} + \beta_2 A_{tr} f_y + \beta_3 A_{cd} \sqrt{f_c} \quad (2-14)$$

onde:

q_u = capacidade por conector em kN

A_{cc} = área da laje ao cisalhamento no entorno de um conector (mm^2)

f_c = resistência à compressão do concreto (MPa)

A_{tr} = área total de armadura transversal (mm^2)

f_{yr} = Tensão de escoamento do aço da armadura transversal (MPa)

A_{cd} = área dos pinos de concreto ao cisalhamento (mm^2)

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = coeficientes de regressão a serem determinados a partir da análise de regressão múltipla dos resultados experimentais

Expandindo os termos A_{cc} e A_{cd} na Eq. (2-14), resulta em

$$q_u = \beta_1 (L_c t_c - L_{sc} h_{sc}) \sqrt{f_c} + \beta_2 A_{tr} f_y + \beta_3 2n \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{f_c} \quad (2-15)$$

onde (ver Figura 2-30):

L_c = comprimento da laje (mm)

t_c = espessura da laje (mm)

L_{sc} = comprimento do conector (mm)

h_{sc} = altura do conector (mm)

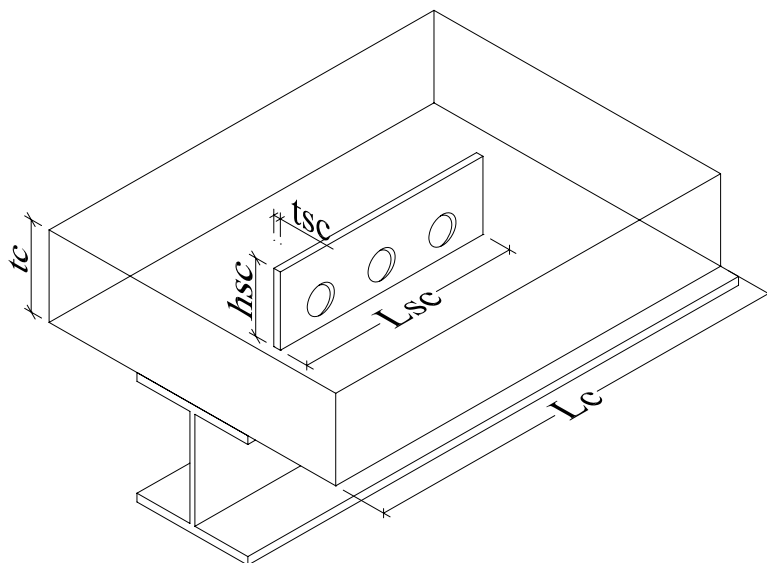


Figura 2-30 – Esquema do *push-out*, mostrando as dimensões, com o conector Perfobond.

O primeiro termo das equações (2-14) e (2-15) refere-se ao cisalhamento da laje de concreto. O segundo termo leva em conta a contribuição da armadura transversal e o terceiro, a contribuição dos pinos de concreto.

O modo de falha observado sugere que os pinos de concreto cisalham em dois planos de corte paralelos, assim, a área de cisalhamento dos pinos pode ser escrita como $2n\pi D^2/4$, onde D é o diâmetro dos furos e n o número de furos do conector. Nessa expressão, o número dado pelo produto $2\times\pi/4$ pode ser admitido estar implícito no coeficiente de regressão β_3 , de modo que a Eq. (2-15) pode ser escrita na forma

$$q_u = \beta_1 A_{cc} \sqrt{f_c} + \beta_2 A_{tr} f_y + \beta_3 n D^2 \sqrt{f_c} \quad (2-16)$$

A partir de uma análise de regressão múltipla dos seus resultados experimentais, Oguejiofor (1994) obteve os seguintes coeficientes de regressão:

$$q_u = 0,59 A_{cc} \sqrt{f_c} + 1,233 A_{tr} f_{yr} + 2,871 n D^2 \sqrt{f_c} \quad (2-17)$$

Na Eq. (2-17), a raiz quadrada de f_c que aparece no primeiro e no terceiro termos está relacionada com o cisalhamento do concreto. Na realidade, a raiz quadrada da resistência à compressão do concreto dá uma estimativa razoável de sua resistência à tração. E o cisalhamento é uma combinação de compressão e tração onde, no caso do concreto, a tração sempre governa.

É interessante notar alguns aspectos na evolução desses modelos semiempíricos. O modelo proposto pelos criadores do Perfobond não considera a resistência da laje ao cisalhamento nem tampouco a influência da armadura transversal da laje. A equação proposta por Davies (1969) considera que a resistência última é resultado da soma das influências de duas forças transversais. Note-se que todos os termos da Eq. (2-13) representam uma força, dada pelo produto entre uma área e uma tensão resistente. A resistência da laje de concreto e o efeito da armadura são computados ponderando-se a influência de duas forças transversais, quais sejam, a força de tração transversal na laje, decorrente da compressão longitudinal, e a força na armadura transversal.

Após a obtenção de novos resultados mediante análise numérica, Oguejiofor e Hosain (1997) propuseram um novo modelo para estimar a resistência do Perfobond. Neste novo modelo os autores incluíram um quarto termo que leva em conta a contribuição da resistência frontal do conector. Neste caso, trata-se de uma força longitudinal, propriamente. Apesar disso, Oguejiofor e Hosain (1997) mantiveram na equação o termo referente à resistência ao cisalhamento da laje. A contribuição da resistência frontal do conector só faz sentido quando ele é descontínuo, caso em que acontece o contato frontal da laje com a chapa do conector. A nova expressão obtida foi a seguinte:

$$q_u = 4,47 h_{sc} t_{sc} f_c + \left(3,30 n D^2 + 0,01 A_{cc} \right) \sqrt{f_c} + 0,90 A_{tr} f_{yr} \quad (2-18)$$

onde:

$$h_{sc} = \text{altura do conector (mm)}$$

Analisando a equação (2-18), nota-se que o coeficiente de regressão relacionado ao termo correspondente ao cisalhamento da laje é próximo de zero, sugerindo que a contribuição dessa parcela é praticamente insignificante. Uma análise dos dados experimentais de Oguejiofor (1994) revela que esse coeficiente de variação tão baixo surgiu devido ao fato de a área ao cisalhamento das lajes ter o mesmo valor em todos os seus experimentos. A pequena variação que se observa para esse termo se deve à resistência do concreto que era ligeiramente diferente para os vários modelos ensaiados, uma vez que os ensaios foram realizados em datas diferentes. Desta forma o termo $A_{cc} \sqrt{f_c}$ é praticamente constante, apresentando variação quase nula em relação aos outros termos da equação, razão pela qual a análise de regressão múltipla resulta num coeficiente muito pequeno, correspondente a uma taxa de variação quase nula. Oguejiofor e Hosain (1997) chegaram a propor a retirada desse termo da equação.

A partir dos resultados observados em um conjunto de ensaios *push-out*, Kraus e Wurzer (1997) propuseram que a resistência do Perfobond seria função da pressão de contato entre o concreto e a parede dos furos do conector (ver Figura 2-31).

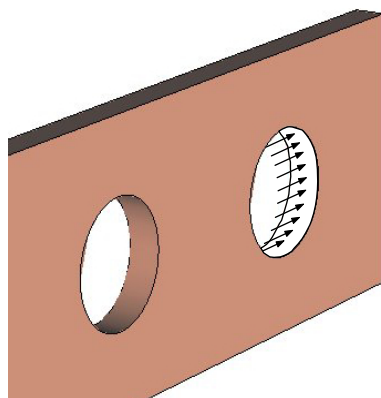


Figura 2-31 – Compressão exercida pelo concreto contra a parede dos furos.

Kraus e Wurzer (1997) propuseram que uma equação para a resistência de um dos pinos no Perfobond teria a seguinte forma:

$$q_u = \beta f_c D t_{sc} \quad (2-19)$$

onde:

q_u = capacidade resistente de um pino de concreto

f_c = resistência à compressão do concreto

D = altura dos furos do conector (igual ao diâmetro dos furos)

t_{sc} = espessura do conector

β = coeficiente obtido da análise estatística

Nota-se que na abordagem proposta por Kraus e Wurzer (1997) a resistência do Perfobond é relacionada à força de compressão que o concreto da laje exerce contra a parede dos furos do conector, assemelhando-se ao clássico modelo de bielas e tirantes (Figura 2-32), ao invés de considerar o cisalhamento duplo dos pinos de concreto, diferindo portanto da abordagem adotada por Leonhardt *et al.* (1987) e Oguejiofor (1994).

As forças de cisalhamento longitudinal, transferidas pelos conectores na interface aço-concreto, provocam tensões de tração no concreto da laje que devem ser resistidas por armaduras colocadas transversalmente à viga. A Figura 2-32 representa o modelo de treliça de Mörsch utilizado para o cálculo dessas armaduras. Assim, a

força de cisalhamento é resistida pelas diagonais de concreto comprimidas e pela força de tração na armadura.

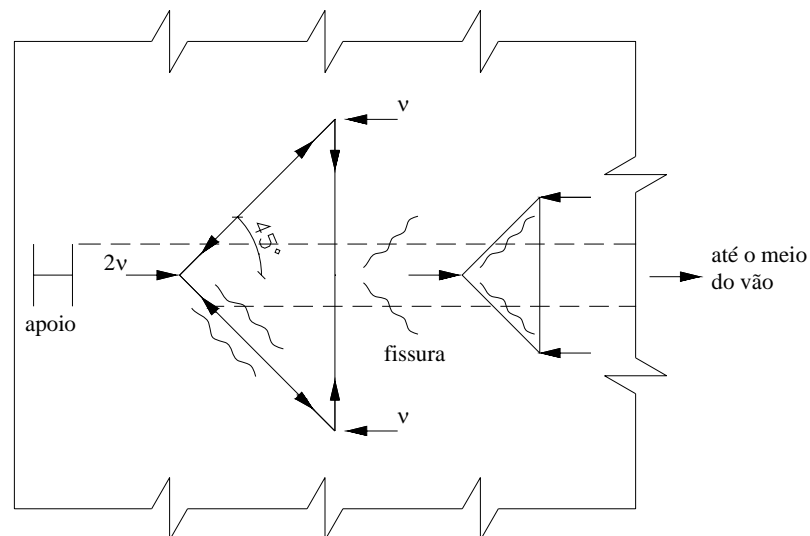


Figura 2-32 – Modelo de treliça para armadura transversal (adaptado de Johnson, 1994).

Medberry e Sharooz (2002) apresentaram resultados de um programa experimental com Perfobond, em que 30 ensaios *push-out* foram realizados na Universidade de Cincinnati (EUA). Esse estudo visou a avaliação do comportamento do Perfobond para pontes, além da avaliação da equação semiempírica proposta por Oguejiofor e Hosain (1994) para a resistência do conector. Os ensaios deram resultados abaixo dos valores calculados com a equação de Oguejiofor. Medberry e Sharooz (2002) propuseram, então, uma outra equação que, segundo eles, apresenta melhor correlação com o conjunto dos resultados dos ensaios feitos em Cincinnati e em Saskatchewan. Curiosamente, Medberry e Sharooz (2002) admitiram no seu estudo pelo menos dois elementos questionáveis: utilizaram modelos com dimensões bem diferentes das usadas por Oguejiofor (1994) para comparar resultados; introduziram na equação uma parcela de resistência relativa à adesão química entre o concreto e o aço¹. Em função desses aspectos, julga-se desnecessário apresentar e discutir aqui o modelo proposto por Medberry e Sharooz (2002).

¹ Geralmente não se admite essa parcela de resistência nas conexões mistas, por ser de natureza muito variável; sua estimativa é temerária.

Durante o desenvolvimento do conector Crestbond, Veríssimo (2007) observou dois aspectos que motivaram a reconsideração dos mecanismos que contribuem para a resistência tanto do Perfobond como do Crestbond, dando origem a novos modelos semiempíricos cujos resultados apresentam uma correlação um pouco melhor com as resistências medidas nos ensaios. Veríssimo observou que considerar o efeito da taxa de armadura transversal, ao invés da força na armadura, resultava em melhor correlação com os dados experimentais. Observou ainda que a excentricidade do conector em relação ao plano médio da laje tem influência na resistência última da conexão. Tendo em vista os aspectos mencionados, Veríssimo propôs um novo modelo semiempírico para a estimativa da resistência do Crestbond [Eq. (2-20)] e outro para o Perfobond [Eq. (2-21)].

$$q = 1,94 \sqrt{\frac{h_{sc} - t_{PL}}{t_c - t_{PL}}} (h_{sc} - t_{PL}) t_{sc} f_c + 2,72 n D^2 \sqrt{f_c} + 0,07 A_{cc} \sqrt{f_c} + 1,79 \times 10^7 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (2-20)$$

onde t_{PL} é a espessura da pré-laje em mm

A_{cc} é a área de cisalhamento do concreto por conector (área longitudinal da laje menos a área do conector em mm^2): $A_{cc} = L_c t_c - L_{sc} h_{sc}$
havendo pré-laje, $A_{cc} = L_c (t_c - t_{PL}) - L_{sc} (h_{sc} - t_{PL})$

$$q = 3,68 \sqrt{\frac{h_{sc}}{t_c}} h_{sc} t_{sc} f_c + 2,60 n D^2 \sqrt{f_c} + 0,13 A_{cc} \sqrt{f_c} + 34,3 \times 10^6 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (2-21)$$

onde D é o diâmetro em mm dos furos circulares no Perfobond ou o diâmetro de referência no Crestbond (*corresponde ao diâmetro de um círculo inscrito na abertura trapezoidal*)

Nas expressões (2-20) e (2-21), o primeiro termo corresponde à resistência frontal do conector, o segundo está associado à resistência dos pinos de concreto, o terceiro, à resistência ao cisalhamento da laje, e o quarto, ao efeito da taxa de armadura.

Al-Darzi *et al.* (2007) propuseram uma equação para a estimativa da capacidade resistente do Perfobond [Eq. (2-22)]. Eles também se basearam na equação proposta por Oguejiofor e Hosain (1997), sem a parcela correspondente à contribuição do cisalhamento da laje.

$$q = 255,31 + 7,62 \times 10^{-4} h_{sc} t_{sc} f_c - 7,59 \times 10^{-7} A_{tr} f_{yr} + 2,53 \times 10^{-3} A_{cd} \sqrt{f_c} \quad (2-22)$$

Nota-se que essa equação apresenta um termo independente (coeficiente linear), o que parece estranho, pois isso equivaleria a uma resistência residual do conector que existiria independente da resistência a compressão do concreto e da armadura.

Admite-se que para ajustar uma equação de resistência para Perfobond a partir de regressão múltipla, deve-se considerar que o modelo passa pelo zero, ou seja, o termo independente é nulo.

Na Figura 2-33 apresenta-se um esquema que resume a evolução dos modelos semiempíricos para o Perfobond ao longo do tempo e apresenta o modelo proposto por Veríssimo para o Crestbond.

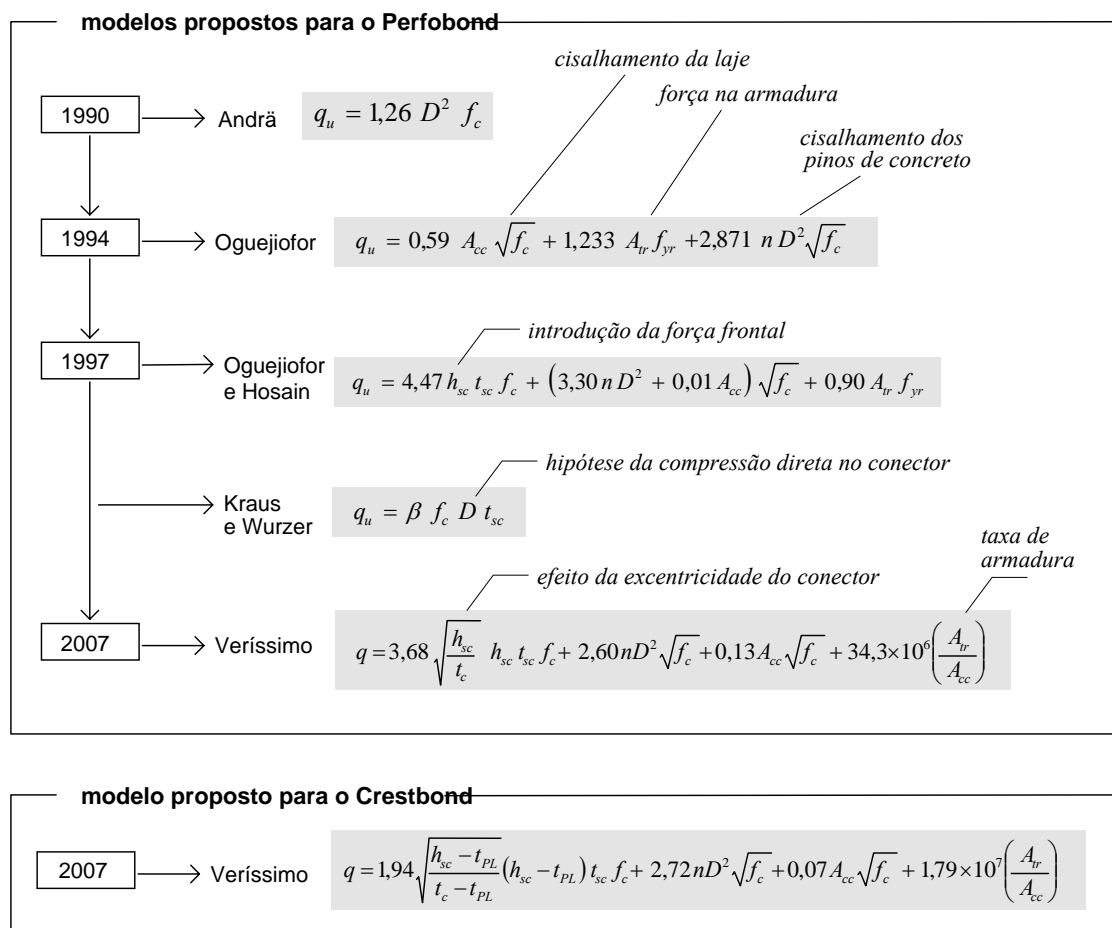


Figura 2-33 – Evolução das expressões para resistência do Perfobond e do Crestbond ao longo do tempo.

2.6 Predição da resistência de conectores em chapa perfurada por meio de Redes Neurais Artificiais

Veríssimo (2007) utilizou Redes Neurais Artificiais (RNA) treinadas com dados experimentais para estimar a resistência do conector Crestbond. O resultado disso foi muito bom. As respostas da RNA apresentam melhor correlação com os dados experimentais do que aquela que se obtém com os modelos de regressão.

Na Figura 2-34 é mostrado um gráfico no qual resultados de 60 experimentos com Crestbond são contrastados com as predições feitas por uma rede neural do tipo Perceptron Multicamada com arquitetura 7:5:1² (VERÍSSIMO, 2007). A concordância entre os resultados é notável e o erro sempre é menor do que o obtido com o modelo de regressão. Este fato indica que as inferências que deram origem aos modelos semiempíricos possivelmente ainda desprezam alguma influência. As RNAs conseguem mapear as relações entre as variáveis, “aprendendo” a função implícita que descreve o fenômeno em causa e, portanto, consideram de fato todas as particularidades envolvidas disponíveis nos dados coletados. As simulações com RNA servem, entre outras coisas, para verificar se a abordagem adotada na concepção de um modelo semiempírico é mais ou menos coerente com o fenômeno em estudo.

² Rede neural com 7 neurônios na camada de entrada, 5 na camada oculta e 1 na camada de saída.

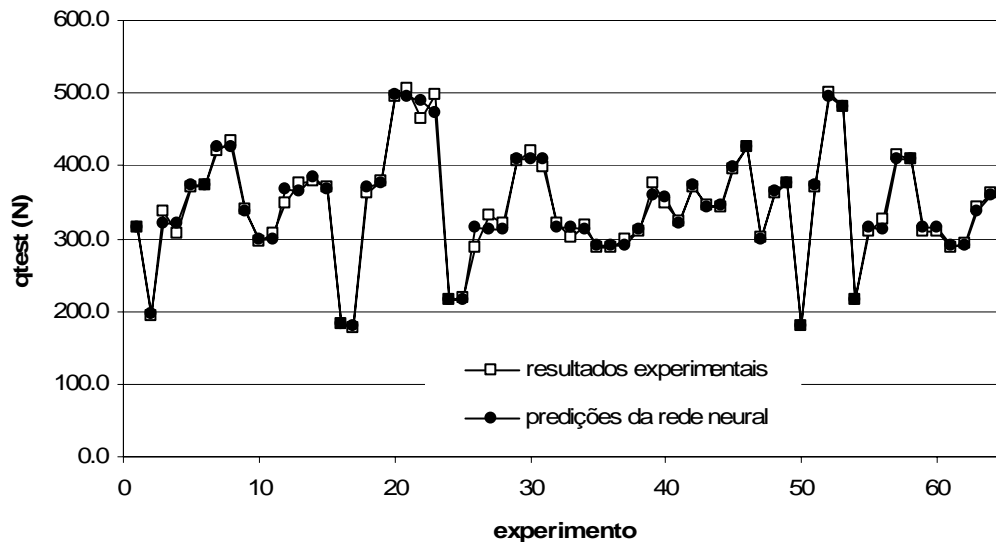


Figura 2-34 – Correlação dos resultados obtidos com uma Rede Neural (VERÍSSIMO, 2007)

Ao formular um modelo estatístico, o conhecimento do pesquisador é introduzido no modelo através de relações matemáticas e, eventualmente, da formulação de mecanismos simples. No caso da equação de resistência de conectores em chapa perfurada, buscou-se ajustar as contribuições de diversos mecanismos simples capazes de representar os fatores que influenciam na capacidade da conexão, a saber, a força frontal, o efeito de pino, o cisalhamento da laje e a taxa de armadura transversal.

Em uma rede neural, os dados experimentais são fornecidos de forma bruta, sem nenhuma informação sobre a relação entre esses dados. A rede é capaz de “perceber” e aprender as correlações entre os dados que determinam a capacidade resistente da conexão (VERÍSSIMO, 2007).

Na TABELA 2-1 e na TABELA 2-2 estão apresentados os limites percentuais para o erro correspondentes a cada série de ensaios realizados por Veríssimo (2007), considerando-se os dados obtidos pela Eq. (2-20) e os resultados estimados pela rede neural, respectivamente. Como se pode ver, o erro da estimativa feita pela RNA é menor do que o erro resultante do modelo de regressão. Essa diferença é um indicativo de que talvez seja possível ajustar um modelo de regressão melhor.

**TABELA 2-1 – Erro por série para resultados obtidos pela equação (2-20)
(Veríssimo, 2007)**

	A	B	C	D	Amplitude
erro por	6,8%	1,8%	8,6%	8,3%	8,3%
série	-2,0%	-5,9%	-5,8%	-11,4%	-11,4%

**TABELA 2-2 – Erro por série para resultados obtidos com uma RNA
do tipo MLP 7:5:1 (Veríssimo, 2007)**

	A	B	C	D	Amplitude
erro por	5,0%	3,0%	5,0%	5,0%	5,0%
série	-4,0%	-5,0%	-5,0%	-9,0%	-9,0%

3

METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, diversos modelos semiempíricos foram elaborados, a partir de diferentes interpretações quanto à atuação dos mecanismos que influenciam na capacidade das conexões com Crestbond e Perfobond, e ajustados por meio de Análise de Regressão Linear Múltipla.

A análise de regressão múltipla é um algoritmo estatístico, baseado no método dos mínimos quadrados, aplicável a problemas em que uma variável dependente está relacionada a um conjunto de variáveis independentes, conforme descrito no item 2.4.

Historicamente, modelos semiempíricos para predição da resistência de conectores de cisalhamento geralmente são ajustados por meio de análise de regressão linear múltipla, pois a resistência total do conector consiste de um somatório de influências relacionadas a fatores específicos. A forma como cada um desses fatores opera é vislumbrada pelo pesquisador e descrita em termos matemáticos. A intensidade com que cada fator influencia é determinada por um processo numérico de análise de regressão, por meio do qual os coeficientes de ajuste (parâmetros incógnitas) são determinados de modo que o modelo produza resultados que apresentem a melhor correlação possível com os valores originais utilizados na regressão.

Numa primeira etapa, visando à avaliação do efeito de pino nos conectores Perfobond e Crestbond, foram comparados os valores relacionados com o cisalhamento dos pinos de concreto, obtidos experimentalmente por Oguejiofor (1994) e Veríssimo (2007), respectivamente, com os valores correspondentes estimados com os modelos semiempíricos propostos pelos mesmos autores. A partir disso, numa segunda etapa, vários modelos semiempíricos foram ajustados e comparados, admitindo algumas hipóteses para o mecanismo resistente.

As análises de regressão linear múltiplas foram realizadas com o software STATISTICA versão 7, admitindo-se sempre que a função passa pelo zero, já que não faz sentido considerar uma resistência residual dissociada da resistência do concreto ou do aço da armadura.

Na constituição dos modelos, procurou-se considerar de diversas formas algumas influências observadas nos estudos experimentais, tais como a taxa de armadura, o espaçamento entre os furos, a excentricidade dos furos e a massa específica do concreto.

A avaliação da qualidade dos modelos estudados foi feita com base no **coeficiente ajustado de determinação múltipla** (R^2 ajustado) e no *RMSE* (*Root Mean Square Error*).

O coeficiente de correlação múltipla (R^2 ajustado) é uma medida da qualidade do modelo e indica o quanto a variável resposta (variável dependente) pode ser explicada pelas variáveis independentes (regressores).

O *RMSE* é a raiz da média quadrática residual (*MSE*).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_1^n (y_i - \hat{y})^2 \quad (3-1)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (3-2)$$

Define-se como resíduo (e_i) a diferença entre o valor observado (y_i) e o valor estimado (\hat{y}_i) a partir da equação de regressão múltipla ($e_i = y_i - \hat{y}_i$).

De acordo com Montgomery *et al.* (2004), quando se comparam modelos de regressão, a média quadrática residual (MSE) é uma medida útil, visto que o modelo com menor MSE é o que melhor explica o fenômeno. O $RMSE$ é particularmente interessante porque dá uma noção do resíduo médio, na mesma unidade da resposta investigada.

O **coeficiente de determinação múltipla** (R^2) é uma medida da fração da variabilidade nas observações Y , obtida pela equação de regressão usando as variáveis x_1, x_2, \dots, x_k . Entretanto, um valor grande de R^2 não implica necessariamente que o modelo de regressão seja bom. A adição de uma variável ao modelo sempre aumenta R^2 , independente da variável adicional ser ou não estatisticamente significativa (Montgomery *et al.*, 2004). Como R^2 sempre aumenta quando um regressor é adicionado a um modelo de regressão, ele nem sempre é um bom indicador da adequação do modelo. Uma forma melhor para verificar a qualidade do modelo é utilizar o R^2 ajustado, que é o **coeficiente ajustado de determinação múltipla**. Uma descrição formal do R^2 ajustado pode ser encontrada em Montgomery *et al.*, 2004. O R^2 ajustado nem sempre aumenta quando uma variável é acrescentada ao modelo. Ele somente aumenta se a adição da variável produzir uma redução na soma quadrática residual, que seja grande o suficiente para compensar a perda de um grau de liberdade no resíduo.

AVALIAÇÃO DE MODELOS SEMIEMPÍRICOS PRÉ-EXISTENTES A PARTIR DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Análise da contribuição do efeito de pino na resistência última dos conectores Crestbond e Perfobond

Nos grupos de modelos ensaiados *push-out* por Oguejiofor (1994), com Perfobond, e por Veríssimo (2007), com Crestbond, os conectores eram sempre descontínuos e havia alguns modelos montados com um conector sem aberturas, ou seja, com uma chapa plana sem furos. Esse conector sem furos foi utilizado como referência, de forma que o efeito de pino pudesse ser efetivamente medido, subtraindo-se da resistência total obtida para os conectores com aberturas a resistência dos conectores sem aberturas. Na Figura 4-1 pode-se observar a tipologia dos modelos *push-out* com Crestbond, com e sem aberturas, ensaiados por Veríssimo (2007).

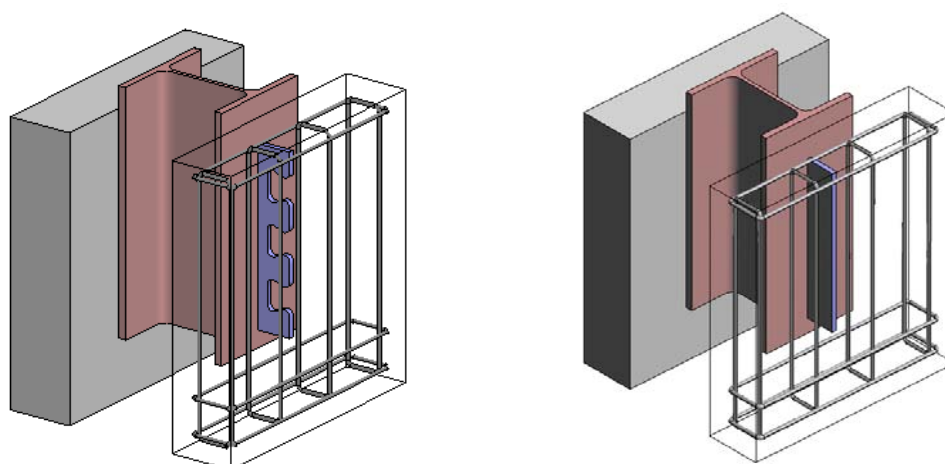


Figura 4-1 – Modelos com conector Crestbond com e sem aberturas (Veríssimo, 2007)

Para que fosse possível fazer uma comparação consistente entre os resultados de ensaios de modelos similares porém com diferentes idades do concreto, os resultados experimentais foram normalizados em relação ao valor médio da resistência do concreto (f_c), multiplicando-se a resistência dos modelos individuais pelo seguinte fator:

$$k = \sqrt{\frac{f_{cm}}{f_{ci}}} \quad (4-1)$$

onde:

f_{cm} = resistência à compressão média para o grupo

f_{ci} = resistência à compressão do modelo i

Esse procedimento de normalização é usual e é encontrado em diversos trabalhos (VIEST, 1956; SLUTTER e DRISCOLL, 1962; DAVIES, 1967; OLLGARD *et al.*, 1971 *apud* VERÍSSIMO, 2007). A normalização dos resultados dos ensaios dessa forma minimiza o efeito das diferenças nas resistências dos concretos (VERÍSSIMO, 2007), uma vez que pelo fato de os ensaios serem realizados em datas diferentes, a resistência do concreto costuma variar.

A seguir, são apresentadas análises dos valores relacionados ao efeito de pino obtidos de medições experimentais, bem como as correspondentes estimativas obtidas com as equações de resistências propostas por Veríssimo (2007) para os conectores Crestbond e Perfobond.

4.1.1 Efeito de pino para o Crestbond

Na TABELA 4-1 estão apresentados os valores do efeito de pino para o conector Crestbond, obtidos subtraindo-se a resistência dos conectores sem aberturas da resistência dos conectores com aberturas. Na TABELA 4-2 e na Figura 4-2 são apresentadas as características dos modelos citados na TABELA 4-1.

TABELA 4-1 – Efeito de pino no conector Crestbond – experimental e calculado.

Ensaio	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	P_{max} (kN)	P_{norm} (kN)	Efeito de pino (kN)	Efeito de pino por conector (experimental) (kN)	Efeito de pino por conector (calculado) ³ (kN)	Resíduo (kN)
A2	33,0		387,0	387,0	-	0,00	0,00	0,0
A3	33,1	33,0	676,7	675,7	288,7	144,34	117,51	26,83
A5	32,9		613,3	614,2	227,2	113,62	116,62	-3,00
B1	26,6		592,4	592,1	230,3	115,13	132,14	-17,01
B2	26,6	26,6	612,9	612,6	250,8	125,38	132,14	-6,76
B7	28,3		367,4	356,0	-	0,00	0,00	0,0
B8	24,8		355,2	367,7	-	0,00	0,00	0,0
C1	46,9		722,6	735,0	306,5	153,23	175,46	-22,23
C2	48,1	48,5	755,0	758,3	329,8	164,89	177,69	-12,80
C7	49,4		430,9	427,1	-	0,00	0,00	0,0
C8	49,7		435,2	430,0	-	0,00	0,00	0,0

TABELA 4-2 – Características dos modelos com Crestbond.

Ensaio	tipo	f_c (MPa)	t_c (mm)	L_{sc} (mm)	h_{sc} (mm)	t_{sc} (mm)	D (mm)	n_p	n_1	n_2	ϕ (mm)	A_{tr} (mm ²)
A2	CR50-SF	33,0	150	315	81,2	12,7	0	0	6	0	10	471,24
A3	CR50-R10-As0	33,1	150	315	81,2	12,7	50	3	6	0	10	471,24
A5	CR50-R12-As0	32,6	150	315	81,2	12,7	50	3	6	0	10	471,24
B1	CR50-R12-As0	26,6	150	413,36	81,2	12,0	56	3	6	0	10	471,24
B2	CR50-R12-As0	26,6	150	413,36	81,2	12,0	56	3	6	0	10	471,24
B7	CR50-SF	28,3	150	413,36	81,2	12,0	0	0	6	0	10	471,24
B8	CR50-SF	24,8	150	413,36	81,2	12,0	0	0	6	0	10	471,24
C1	CR50-R12-As0	46,9	150	413,36	81,2	12,0	56	3	6	0	10	471,24
C2	CR50-R12-As0	48,1	150	413,36	81,2	12,0	56	3	6	0	10	471,24
C7	CR50-SF	49,4	150	413,36	81,2	12,0	0	0	6	0	10	471,24
C8	CR50-SF	49,7	150	413,36	81,2	12,0	0	0	6	0	10	471,24

f_c = resistência à compressão do concreto à época do ensaio

t_c = espessura da laje

L_{sc} = comprimento longitudinal do conector

h_{sc} = altura do conector

t_{sc} = espessura da chapa do conector

D = diâmetro de referência (do círculo inscrito no dente trapezoidal)

n_p = número de aberturas no conector

n_1 = número de barras de armadura transversal passando por fora do conector

n_2 = número de barras de armadura transversal passando por dentro do conector

ϕ = diâmetro das barras da armadura transversal

A_{tr} = área total da armadura transversal = $(n_1 + n_2) \pi \phi^2 / 4$

L_c = comprimento da laje (sempre constante, igual a 650 mm)

f_{ysc} = resistência ao escoamento do aço do conector (359 MPa)

f_{yr} = resistência ao escoamento do aço da armadura (500 MPa)

³ Efeito de pino calculado com a equação (2-20), proposta por Veríssimo

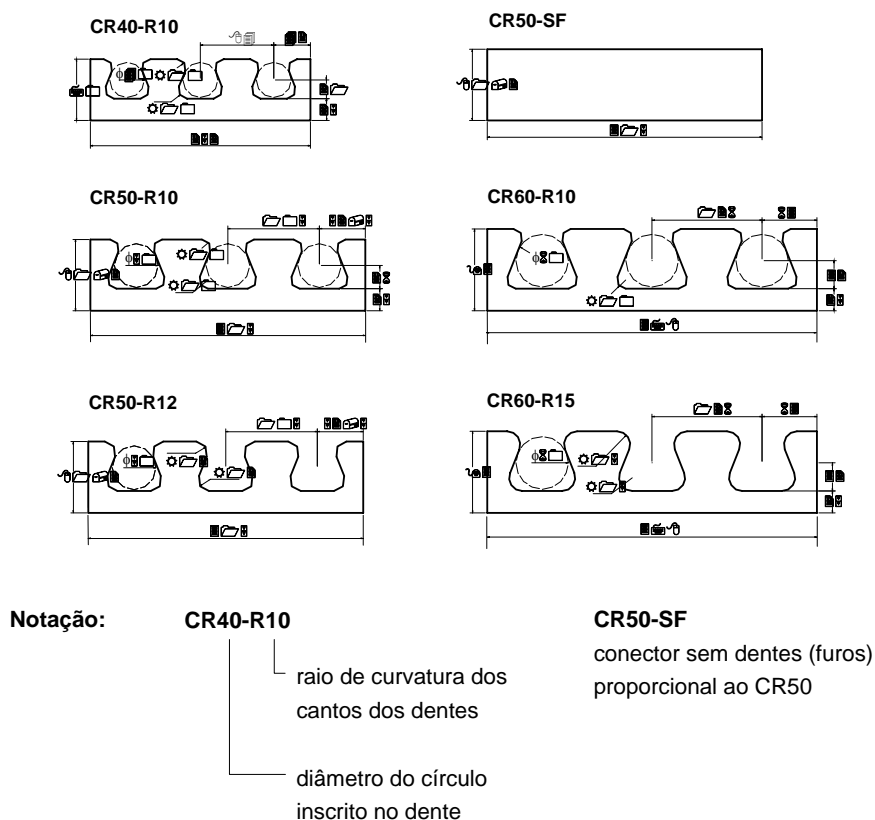


Figura 4-2 – Conectores ensaiados por Veríssimo (2007)

4.1.2 Efeito de pino para o Perfobond

Na TABELA 4-3 estão apresentados os valores do efeito de pino para o *Perfobond*, obtidos subtraindo-se a resistência dos conectores sem aberturas da resistência dos conectores com aberturas. Na TABELA 4-4 são apresentadas as características dos modelos citados na TABELA 4-3.

TABELA 4-3 – Efeito de pino no conector Perfobond – experimental e calculado.

Ensaio	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	P_{max} (kN)	P_{norm} (kN)	Efeito de pino (kN)	Efeito de pino por conector (experimental) (kN)	Efeito de pino por conector (calculado) ⁴ (kN)	Resíduo (kN)
EB-1	20,91		179,4	179,4	-	0,00	0,00	0,00
EB-2	20,91	20,91	249,1	249,1	139,4	69,70	59,33	10,37
EB-3	20,91		274,0	274,0	189,2	94,60	89,00	5,60
EB-4	20,91		276,5	276,5	194,2	97,10	118,66	-21,56
EB-5	20,91		292,0	292,0	-	0,00	0,00	0,00
EB-6	20,91	20,91	375,2	375,2	166,4	83,20	59,33	23,87
EB-7	20,91		393,6	393,6	203,2	101,60	89,00	12,60
EB-8	20,91		363,7	363,7	143,4	71,70	118,66	-46,96
EC-1	34,05			396,1	417,0	-	0,00	0,00
EC-2	41,43	37,74	563,0	537,3	240,7	120,33	83,52	36,81
EC-3	41,43		597,9	570,7	307,3	153,55	125,27	28,28
EC-4	41,43		595,9	568,7	303,5	151,73	167,03	-15,30
EC-5	41,43		431,0	431,0	-	0,00	0,00	0,00
EC-6	41,43	41,43	528,1	528,1	194,2	97,10	83,52	13,58
EC-7	41,43		584,9	584,9	307,8	153,90	125,27	28,63
EC-8	41,43		577,9	577,9	293,8	146,90	167,03	-20,13
ED-1	24,82			240,7	240,7	-	0,00	0,00
ED-2	24,82	24,82	304,9	304,9	128,4	64,20	64,64	-0,44
ED-3	24,82		343,8	343,8	206,2	103,10	96,96	6,14
ED-4	24,82		364,7	364,7	248,0	124,00	129,28	-5,28
ED-5	24,82		413,5	413,5	-	0,00	0,00	0,00
ED-6	24,82	24,82	533,1	533,1	239,2	119,60	64,64	54,96
ED-7	24,82		580,9	580,9	334,8	167,40	96,96	70,44
ED-8	24,82		577,9	577,9	328,8	164,40	129,28	35,12

⁴ Efeito de pino calculado com a equação (2-21) proposta por Veríssimo (2007)

TABELA 4-4 – Características dos modelos com *Perfobond* ensaiados por Oguejiofor (1994).

Ensaio	tipo	f_c (MPa)	t_c (mm)	L_{sc} (mm)	h_{sc} (mm)	t_{sc} (mm)	D (mm)	n_p	n	malha	A_{tr} (mm ²)
EB-1	SF	20,91	152	375	127	13	0	0	0	-	0,00
EB-2	PB50-P2-As0	20,91	152	375	127	13	50	2	0	-	0,00
EB-3	PB50-P3-As0	20,91	152	375	127	13	50	3	0	-	0,00
EB-4	PB50-P4-As0	20,91	152	375	127	13	50	4	0	-	0,00
EB-5	SF	20,91	152	375	127	13	0	0	3	-	300,00
EB-6	PB50-P2-As10	20,91	152	375	127	13	50	2	3	-	300,00
EB-7	PB50-P3-As10	20,91	152	375	127	13	50	3	3	-	300,00
EB-8	PB50-P4-As10	20,91	152	375	127	13	50	4	3	-	300,00
EC-1	SF	34,05	152	375	127	13	0	0	3	-	300,00
EC-2	PB50-P2-As10	41,43	152	375	127	13	50	2	3	-	300,00
EC-3	PB50-P3-As10	41,43	152	375	127	13	50	3	3	-	300,00
EC-4	PB50-P4-As10	41,43	152	375	127	13	50	4	3	-	300,00
EC-5	SF	41,43	152	375	127	13	0	0	3	-	300,00
EC-6	PB50-P2-As10	41,43	152	375	127	13	50	2	3	-	300,00
EC-7	PB50-P3-As10	41,43	152	375	127	13	50	3	3	-	300,00
EC-8	PB50-P4-As10	41,43	152	375	127	13	50	4	3	-	300,00
ED-1	SF	24,82	152	375	127	13	0	0	0	sim	93,50
ED-2	PB50-P2-As0	24,82	152	375	127	13	50	2	0	sim	93,50
ED-3	PB50-P3-As0	24,82	152	375	127	13	50	3	0	sim	93,50
ED-4	PB50-P4-As0	24,82	152	375	127	13	50	4	0	sim	93,50
ED-5	SF	24,82	152	375	127	13	0	0	3	sim	393,50
ED-6	PB50-P2-As10	24,82	152	375	127	13	50	2	3	sim	393,50
ED-7	PB50-P3-As10	24,82	152	375	127	13	50	3	3	sim	393,50
ED-8	PB50-P4-As10	24,82	152	375	127	13	50	4	3	sim	393,50

- f_c = resistência à compressão do modelo à época do ensaio
 t_c = espessura da laje
 L_{sc} = comprimento longitudinal do conector
 h_{sc} = altura do conector
 t_{sc} = espessura da chapa do conector
 D = diâmetro do furo
 n_p = número de abertura no conector
 n = número de barras de armadura transversal (ver Figura 4-3)
malha = presença de malha de armadura eletro-soldada tipo
 A_{tr} = área total da armadura transversal = $n \pi \phi^2/4 + A_{malha}$
 L_c = Comprimento da laje (sempre constante, igual a 712 mm)

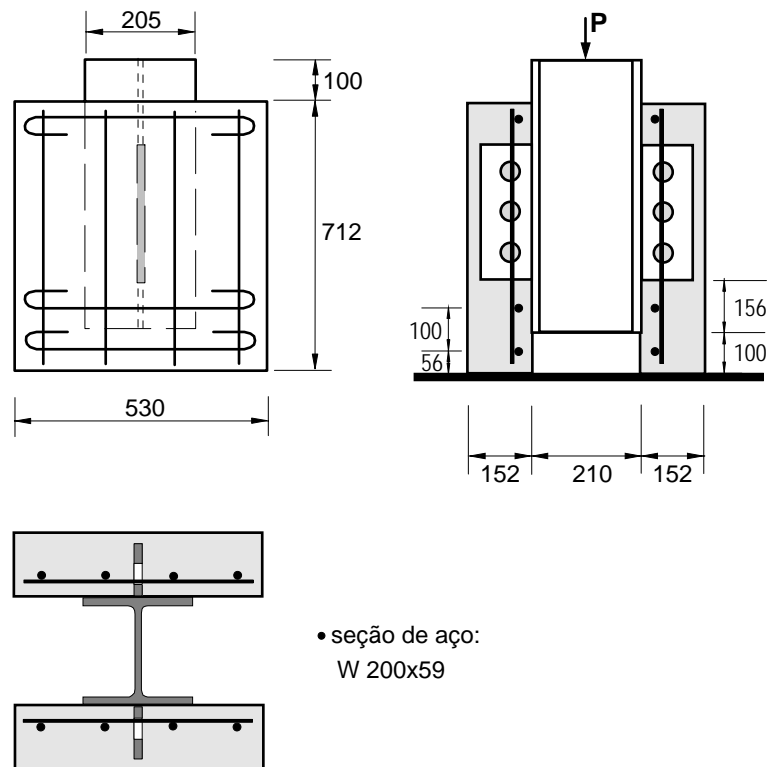


Figura 4-3 – Configuração dos modelos ensaiados por Oguejiofor (1994)

Como se pode observar nos resultados apresentados na TABELA 4-1 e na TABELA 4-3, há uma diferença entre o efeito de pino experimental e o calculado. No entanto, há que se observar que alguma diferença era de se esperar, pois a influência da armadura, no modelo semiempírico, é computada à parte. E, presumivelmente, a taxa de armadura influencia no desempenho do concreto, que, por sua vez, tem influência no efeito de pino.

4.2 Relação entre o efeito de pino e a armadura transversal

Na TABELA 4-5 estão listados resultados para o efeito de pino experimental e a sua relação com a armadura transversal nos respectivos modelos, obtidos a partir de ensaios realizados com *Perfobond* (OGUEJIOFOR, 1994) e os valores estimados pela equação (2-21), proposta por Veríssimo (2007). Nota-se que para modelos com taxas de armadura maiores, a equação subestima o efeito de pino. A partir desta constatação, pode-se inferir que de alguma forma a taxa de armadura condiciona o desempenho dos pinos, mas a equação não contabiliza essa relação porque considera que essa parcela de contribuição na resistência da conexão é influenciada apenas pelo número e diâmetro dos pinos e pela resistência do concreto.

TABELA 4-5 – Contribuição da armadura transversal na magnitude do efeito de pino

Modelo	f_c (MPa)	A_{tr} (mm ²)	Furos	Efeito de pino por conector (kN)	Acréscimo devido à armadura	Efeito de pino por conector ⁵ (kN)
EB-2	20,91	0,0	2	69,7	19%	59,33
EB-6	20,91	300,0	2	83,2		59,33
EB-3	20,91	0,0	3	94,6	7%	89,00
EB-7	20,91	300,0	3	101,6		89,00
ED-2	24,82	93,5	2	64,2	86%	64,64
ED-6	24,82	393,5	2	119,6		64,64
ED-3	24,82	93,5	3	103,1	62%	96,96
ED-7	24,82	393,5	3	167,4		96,96
ED-4	24,82	93,5	4	124,0	33%	129,28
ED-8	24,82	393,5	4	164,4		129,28

A mesma verificação não foi feita para os experimentos com *Crestbond* porque, ao contrário de Oguejiofor (1994), Veríssimo (2007) não ensaiou modelos *push-out* sem armadura transversal.

4.3 Espaçamento entre os furos do conector

As três primeiras séries de ensaios *push-out* realizadas por Oguejiofor (1994) continham quatro tipos de conectores *Perfobond* que se diferenciavam apenas pelo número de aberturas do conector, como mostra a Figura 2-24.

Como o comprimento era o mesmo para os quatro tipos de *Perfobond*, houve uma variação no espaçamento entre as aberturas do conector. Oguejiofor e Hosain (1994) constataram que cada pino de concreto contribui com cerca de 10% da resistência global em todos os experimentos, exceto naqueles com o *Perfobond* tipo P4, onde o acréscimo foi ligeiramente menor. A Figura 4-4 ilustra esse fenômeno, para a série EB dos experimentos de Oguejiofor (1994) e para os valores estimados pela equação (2-21) de Veríssimo (2007). Nota-se que a equação superestima o valor do efeito de pino para o conector com 4 furos, quando o espaçamento entre as aberturas é inferior a $2,25D$.

⁵ Calculado pela equação (2-21), proposta por Veríssimo (2007)

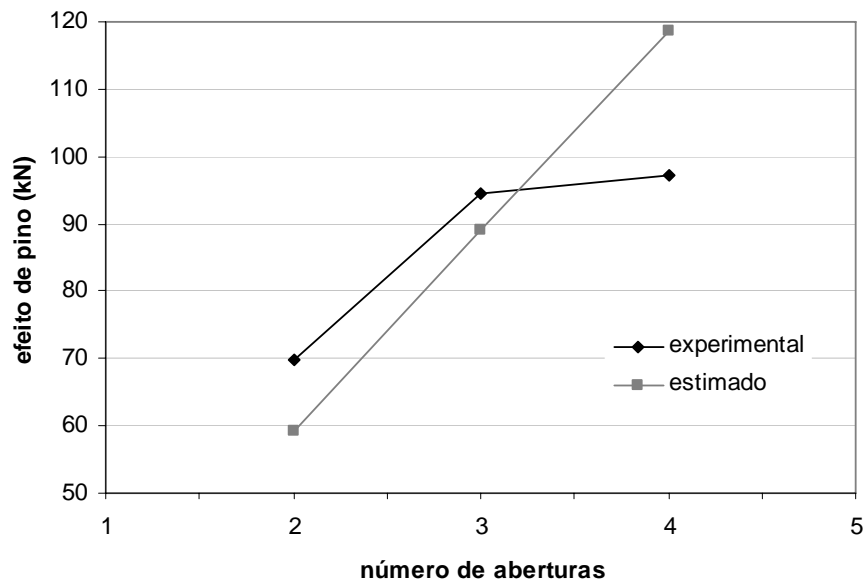


Figura 4-4 – Relação entre o efeito de pino e o número de aberturas do conector da série EB de Oguejiofor (1994)

As equações de resistência para Perfobond propostas por Oguejiofor (1994, 1997) e por Veríssimo (2007) não são capazes de computar o efeito do espaçamento na resistência do conector.

5

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE NOVOS MODELOS SEMIEMPÍRICOS

5.1 Considerações iniciais

Inicialmente, comparou-se os modelos pré-existentes com novos modelos baseados na hipótese de Kraus e Wurzer (1997). Constatou-se que as respostas são similares às obtidas dos modelos baseados na hipótese do cisalhamento duplo dos pinos de concreto.

Também estudou-se uma função capaz de simular o efeito do espaçamento entre os furos, que pudesse ser incorporada às equações de resistência.

Verificou-se, ainda, em que resultava substituir a resistência do concreto nas equações pelo seu módulo de elasticidade, calculado em função de f_c e da massa específica do concreto (γ_c). Para isso foram utilizados os resultados experimentais de Valente (2007), que realizou ensaios *push-out* com conectores Perfobond, compatíveis com os de Oguejiofor (1994), em concreto leve. Os resultados foram promissores, como é mostrado a seguir.

Por fim, foram avaliadas duas possibilidades quanto à forma de considerar a influência da armadura: a) adotando a taxa geométrica $\rho = A_{tr}/A_{cc}$; b) adotando a taxa mecânica $\omega = (A_{tr} f_{yr})/(A_{cc} f_c)$.

Embora Oguejiofor e Hosain (1997), Valente (2007) e Veríssimo (2007) tenham proposto equações de resistência para o Perfobond com quatro termos, neste trabalho optou-se por ajustar modelos semiempíricos com apenas três termos. Duas foram as razões para este procedimento: em primeiro lugar as equações com apenas três termos são mais simples e fornecem uma boa correlação com os resultados experimentais de que se dispõe; em segundo lugar, sempre que se inserem mais termos num modelo de regressão o R^2 sempre aumenta, independente da variável adicional ser ou não estatisticamente significativa. Assim, o modelo com menor número de termos e que dá uma resposta satisfatória é o melhor.

5.2 Modelos para conectores Perfobond

Nesta seção são apresentados alguns dos melhores modelos estudados para o conector Perfobond. Na Tabela 5-1 são apresentadas as características dos experimentos de Oguejiofor (1994) utilizadas nas análises de regressão dos modelos semiempíricos para estimativa de resistência de conectores Perfobond.

5.2.1 Verificação da hipótese de Kraus e Wurzer

Para esta verificação, foram construídos dois modelos com apenas três termos, um considerando o cisalhamento duplo dos pinos de concreto (hipótese de Leonhardt *et al.*) e outro relacionado à compressão direta da laje contra as paredes dos furos (hipótese de Kraus e Wurzer). As expressões na sua forma original são apresentadas a seguir. Em ambos os casos, para a consideração da influência da armadura, admitiu-se a taxa geométrica $\rho = A_{tr}/A_{cc}$.

Modelo que considera o cisalhamento duplo dos pinos de concreto:

$$q = \beta_1 h_{sc} t_{sc} f_c + \beta_2 n D^2 \sqrt{f_c} + \beta_3 \rho \quad (5-1)$$

Modelo que considera a compressão direta da laje contra as paredes dos furos:

$$q = \beta_1 h_{sc} t_{sc} f_c + \beta_2 n D t_{sc} f_c + \beta_3 \rho \quad (5-2)$$

Tabela 5-1 – Características dos experimentos de Oguejiofor (1994) utilizados nas análises de regressão dos modelos semiempíricos para estimativa de resistência de conectores Perfobond.

Ensaio	$P_{máx}$	f_c	L_{sc}	n	A_{tr}	f_{yr}	A_{cc}
	(kN)	(MPa)	(mm)		(mm ²)	(MPa)	(mm ²)
EB-1	358,8	20,91	375	-	0,0	-	60599
EB-2	498,2	20,91	375	2	0,0	-	60599
EB-3	548,0	20,91	375	3	0,0	-	60599
EB-4	553,0	20,91	375	4	0,0	-	60599
EB-5	584,0	20,91	375	-	300,0	426,6	60599
EB-6	750,4	20,91	375	2	300,0	426,6	60599
EB-7	787,2	20,91	375	3	300,0	426,6	60599
EB-8	727,4	20,91	375	4	300,0	426,6	60599
EC-1	792,2	34,05	375	-	300,0	426,6	60599
EC-2	1126,0	41,43	375	2	300,0	426,6	60599
EC-3	1195,6	41,43	375	3	300,0	426,6	60599
EC-4	1191,8	41,43	375	4	300,0	426,6	60599
EC-5	862,0	41,43	375	-	300,0	426,6	60599
EC-6	1056,2	41,43	375	2	300,0	426,6	60599
EC-7	1169,8	41,43	375	3	300,0	426,6	60599
EC-8	1155,8	41,43	375	4	300,0	426,6	60599
ED-1	481,4	24,82	375	-	151,9	-	60599
ED-2	609,8	24,82	375	2	151,9	-	60599
ED-3	687,6	24,82	375	3	151,9	-	60599
ED-4	729,4	24,82	375	4	151,9	-	60599
ED-5	827,0	24,82	375	-	451,9	406,4	60599
ED-6	1066,2	24,82	375	2	451,9	406,4	60599
ED-7	1161,8	24,82	375	3	451,9	406,4	60599
ED-8	1155,8	24,82	375	4	451,9	406,4	60599
EPS-1A	1086,4	27,49	376	3	448,1	406,4	60472
EPS-1B	1108,4	27,49	376	3	448,1	406,4	60472
EPS-2A	699,6	27,79	376	3	148,1	-	60472
EPS-2B	691,8	27,79	376	3	148,1	-	60472
EPS-3A	928,8	25,97	376	3	448,1	406,4	60472
EPS-3B	871,0	25,97	376	3	448,1	406,4	60472
EPS-4A	1088,2	26,85	376	3	448,1	406,4	60472
EPS-4B	1004,4	26,85	376	3	448,1	406,4	60472
EPS-5A	797,2	27,52	251	2	348,1	406,4	76347
EPS-5B	865,0	27,52	375	2	348,1	406,4	60599
EPS-5C	943,6	27,52	251	2	448,1	406,4	76347
EPS-5D	986,4	27,52	375	2	448,1	406,4	60599
EPS-6A	971,6	26,28	251	2	448,1	406,4	76347
EPS-6B	954,6	26,28	251	2	448,1	406,4	76347
EPS-6C	1104,0	26,28	375	3	448,1	406,4	60599
EPS-6D	1066,2	26,28	375	3	448,1	406,4	60599

$P_{máx}$ = carga máxima atingida no ensaio *push-out* (para dois conectores)

f_c = resistência à compressão do concreto

L_{sc} = comprimento longitudinal do conector

n = número de furos do conector

A_{tr} = área de armadura transversal

f_{yr} = tensão de escoamento do aço da armadura transversal

$A_{cc} = L_c t_c - L_{sc} h_{sc}$

L_c = comprimento da laje, constante e igual a 712 mm

t_c = espessura da laje, constante e igual a 152 mm

h_{sc} = altura do conector, constante e igual a 127 mm

t_{sc} = espessura da chapa do conector, constante e igual a 13 mm

D = diâmetro do furo do conector, constante e igual a 50 mm

Nas Eqs. (5-1) e (5-2), o primeiro termo corresponde à compressão que o concreto exerce na face frontal do conector, o segundo corresponde ao efeito de pino e o terceiro à influência da armadura.

Fazendo-se uma análise de regressão múltipla com os dados experimentais de Oguejiofor, obtém-se os seguintes resultados:

$$q = 4,3 \times 10^{-3} h_{sc} t_{sc} f_c + 2,4 \times 10^{-3} n D^2 \sqrt{f_c} + 3,3 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-3)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9947 \quad RMSE = 31,8 \text{ kN}$$

$$q = 4,2 \times 10^{-3} h_{sc} t_{sc} f_c + 2,1 \times 10^{-2} n D t_{sc} f_c + 3,4 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-4)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9939 \quad RMSE = 34,2 \text{ kN}$$

Como fica evidente, observando-se os parâmetros estatísticos que medem a qualidade dos modelos, as duas hipóteses são equivalentes e dão resultados praticamente iguais. Isto pode ser visto na Figura 5-1 e na Figura 5-2.

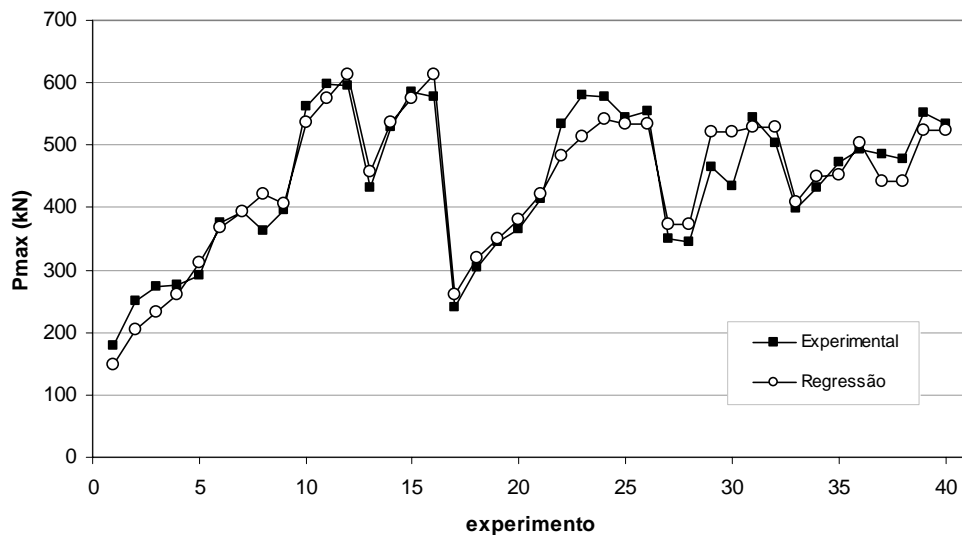


Figura 5-1 – Resultados para o modelo de regressão da Eq. (5-3).

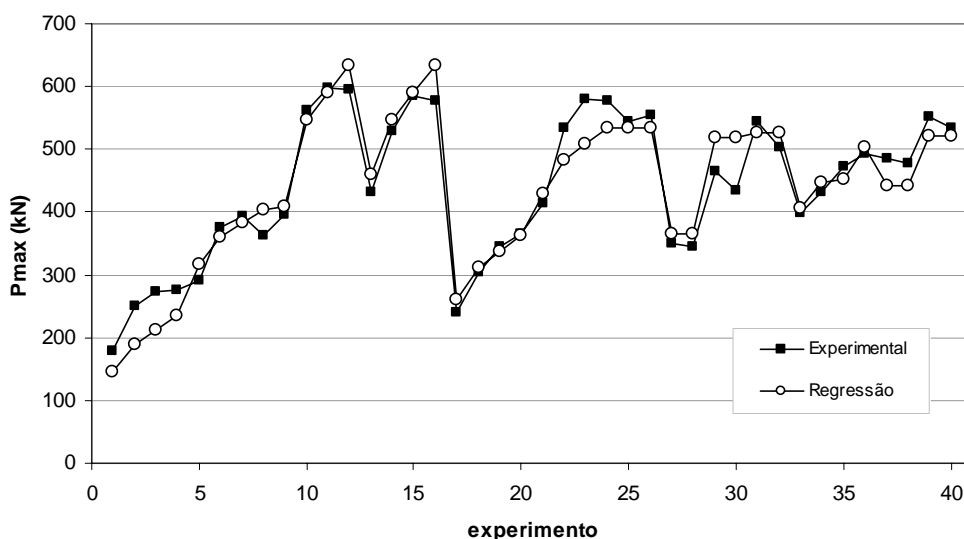


Figura 5-2 – Resultados para o modelo de regressão da Eq. (5-4).

5.2.2 Estudo da influência do espaçamento entre os furos do conector

Como mostrado no item 4.3, a equação de resistência para o Perfobond proposta por Veríssimo (2007), assim como as anteriores propostas por outros autores, não capta a influência do espaçamento entre os furos na resistência global do conector.

As séries EB, EC e ED de modelos *push-out* com Perfobond ensaiados por Oguejiofor (1994) continham quatro tipos diferentes de conectores, a saber, P1, P2, P3 e P4, mostrados na Figura 2-24. Os modelos com conector P4, com quatro furos (quatro pinos de concreto) apresentaram uma resistência inferior aos modelos com conector P3, com três furos. Essa redução de resistência, como já comentado, se deve à proximidade dos furos no conector P4.

Extraíndo-se o efeito de pino experimental para esses conectores, verifica-se que essa contribuição não é linearmente dependente do número de furos, como foi considerado por diversos autores.

A Figura 5-3, a Figura 5-4 e a Figura 5-5 relacionam o efeito de pino com o número de furos do conector nas séries EB, EC e ED de Oguejiofor, respectivamente. A Tabela 5-2, a Tabela 5-3 e a Tabela 5-4 mostram as características dos modelos dessas séries.

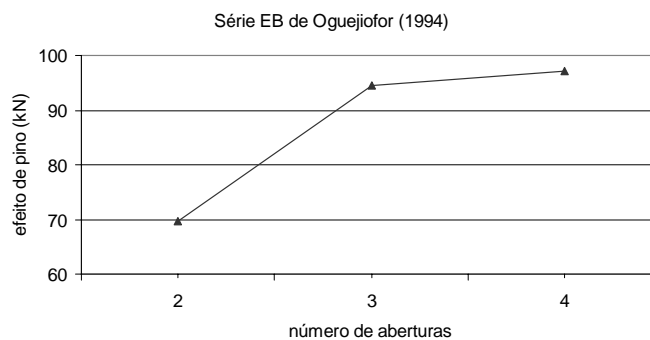


Figura 5-3 – Relação entre o efeito de pino e o número de furos do conector para os modelos da série EB de Oguejiofor (1994)

Tabela 5-2 – Efeito de pino para a série EB de Oguejiofor (1994)

Modelo	número de furos	espaçamento (mm)	f_c (MPa)	A_{tr} (cm ²)	Efeito de Pino (kN)
EB-2	2	225,0	20,91	0,00	69,7
EB-3	3	112,5	20,91	0,00	94,6
EB-4	4	75,0	20,91	0,00	97,1

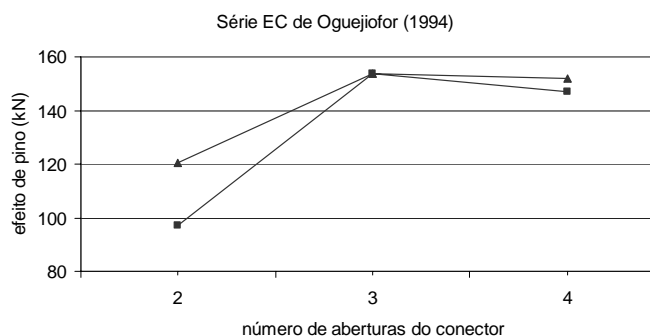


Figura 5-4 – Relação entre o efeito de pino e o número de furos do conector para os modelos da série EC de Oguejiofor (1994)

Tabela 5-3 – Efeito de pino para a série EC de Oguejiofor (1994)

Modelo	número de furos	espaçamento (mm)	f_c (MPa)	A_{tr} (cm ²)	Efeito de Pino (kN)
EC-2	2	225,0	41,43	3,00	120,3
EC-3	3	112,5	41,43	3,00	153,5
EC-4	4	75,0	41,43	3,00	151,7
EC-6	2	225,0	41,43	3,00	97,1
EC-7	3	112,5	41,43	3,00	153,9
EC-8	4	75,0	41,43	3,00	146,9

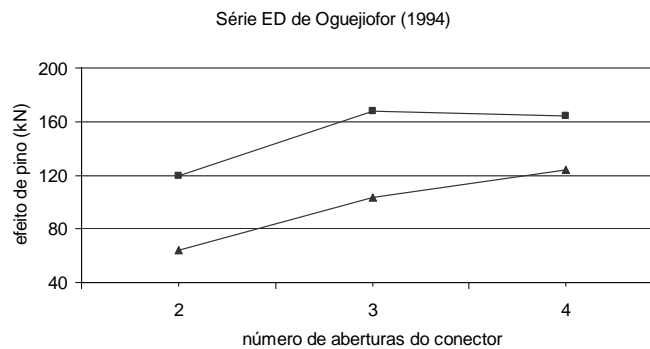


Figura 5-5 – Relação entre o efeito de pino e o número de furos do conector para os modelos da série ED de Oguejiofor (1994)

Tabela 5-4 – Efeito de pino para a série ED de Oguejiofor (1994)

Denominação	número de furos	espaçamento (mm)	f_c (MPa)	A_{tr} (cm ²)	Efeito de Pino (kN)
ED-2	2	225,0	24,82	152	64,2
ED-3	3	112,5	24,82	152	103,1
ED-4	4	75,0	24,82	152	124,0
ED-6	2	225,0	24,82	452	119,6
ED-7	3	112,5	24,82	452	167,4
ED-8	4	75,0	24,82	452	164,4

De acordo com o que se observa nas tabelas e gráficos apresentados, a contribuição efetiva dos pinos de concreto é afetada pelo espaçamento entre as aberturas do conector. Fica evidente que a resistência proporcionada pelos pinos de concreto decresce à medida que o espaçamento diminui.

Visando representar a influência do espaçamento entre os furos do conector na resistência global da conexão, foi estudada uma função que reproduz esse efeito. A Eq. (5-5) mostra a função ajustada para estimar a influência do espaçamento entre as aberturas no efeito de pino, que reproduz aproximadamente o comportamento observado nos gráficos da Figura 5-3, da Figura 5-4 e da Figura 5-5. Essa função foi inspirada na observação de Oguejiofor (1994) de que existe uma proporcionalidade entre o efeito de pino e o número de furos desde que o espaçamento entre os centros das aberturas não seja inferior a 2,25 vezes o diâmetro dos furos do conector.

$$\alpha \leq \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \sqrt[3]{\left(\frac{s}{2,25 D}\right)^2} \end{array} \right. \quad (5-5)$$

onde:

s = distância entre centros de furos adjacentes

D = diâmetro do furo

Introduzindo a função α na Eq. (5-3) e fazendo uma análise de regressão múltipla com os dados experimentais de Oguejiofor (1994), obtém-se a seguinte expressão:

$$q = 4,3 \times 10^{-3} h_{sc} t_{sc} f_c + 2,8 \times 10^{-3} \alpha n D^2 \sqrt{f_c} + 3,2 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-6)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9949 \quad RMSE = 31,2 \text{ kN}$$

Embora seja um ajuste sutil e seu efeito seja pequeno, observa-se que a parcela referente ao efeito de pino estimada dessa forma é mais realista, se comparada aos dados experimentais. Isso pode ser verificado na Figura 5-6, que mostra os resultados do efeito de pino experimental em comparação com os valores calculados com as equações de Oguejiofor (1994), de Veríssimo (2007) e com a Eq. (5-6) que considera a influência do espaçamento dos furos no efeito de pino no Perfobond.

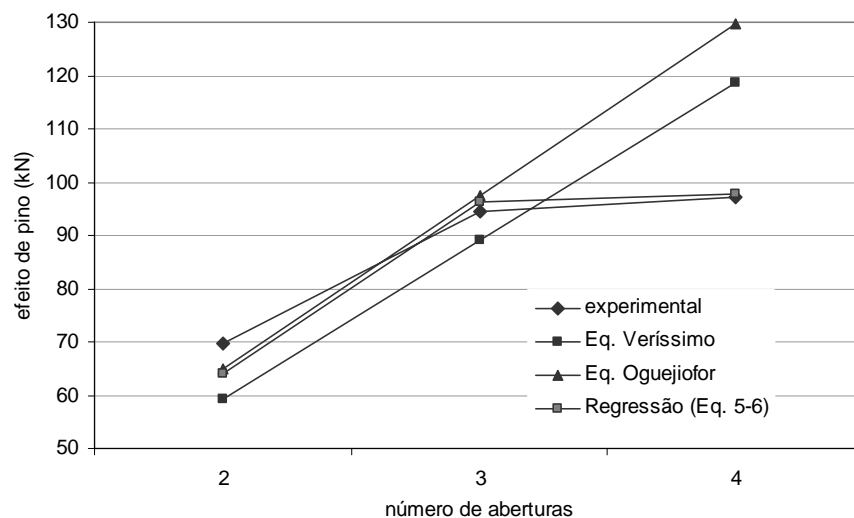


Figura 5-6 – Efeito de pino medido dos modelos EB2, EB3 e EB4, dos experimentos de Oguejiofor (1994)

Nos modelos semiempíricos criados para conector Crestbond, não foi considerado um fator de redução da resistência dos pinos em função do espaçamento entre os furos porque o Crestbond já foi concebido de antemão admitindo-se uma relação s/D de no mínimo 2,25.

5.2.3 Estudo da influência da densidade do concreto na resistência da conexão

Valente (2007) realizou nove ensaios *push-out* com conectores Perfobond muito similares aos de Oguejiofor, porém com concreto leve. Ao aplicar a Eq. (2-17), proposta por Oguejiofor, aos dados de Valente, percebe-se que o modelo não fornece boas respostas para a resistência do Perfobond em concreto leve, como se pode observar na Figura 5-7.

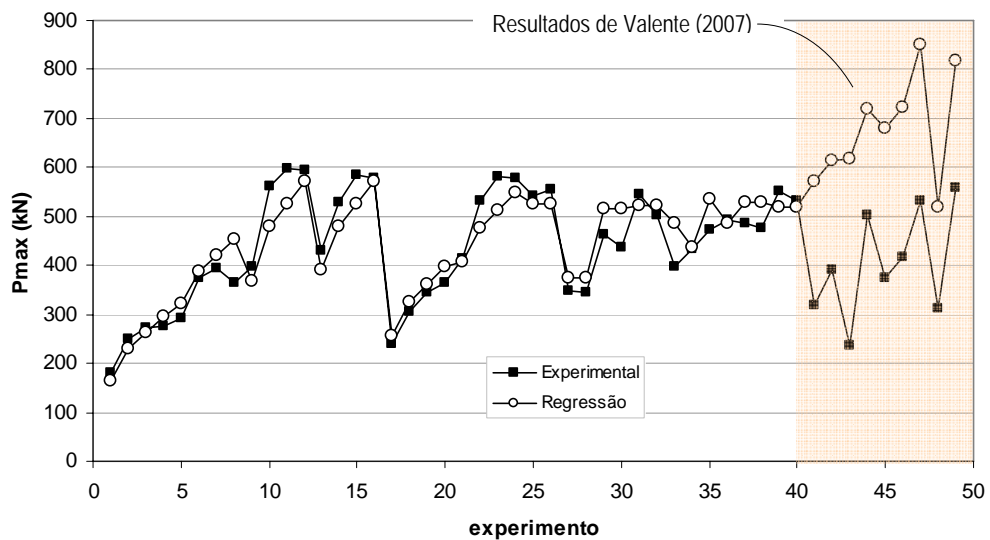


Figura 5-7 – Resultados da Eq. (2-17) comparados com os dados experimentais de Oguejiofor (1994) e Valente (2007).

Os 40 primeiros pontos na Figura 5-7 representam os ensaios de Oguejiofor (1994) e os 9 últimos, os de Valente (2007). A divergência das respostas da Eq. (2-17) para os dados de Valente é considerável. Valente já tinha observado essa diferença, tanto que realiza outra análise de regressão com seus dados somente, ajustando outra expressão para estimar a resistência do Perfobond em concreto leve. A particularidade relacionada às equações de resistência do Perfobond propostas por Oguejiofor (1994) e Valente (2007) é que ambas consideram a resistência da conexão como função da

resistência do concreto à compressão (f_c). É possível elaborar uma única equação de resistência que fornece boa correlação com os resultados experimentais, tanto para concreto normal como para concreto leve, relacionando a capacidade da conexão ao módulo de elasticidade do concreto calculado em função de sua resistência à compressão (f_c) e de sua massa específica (γ_c), como se verá a seguir.

A equação proposta pela norma brasileira para estruturas de concreto, ABNT NBR 6118:2004, para o cálculo do módulo de elasticidade secante do concreto, é

$$E_{cs} = 4760 \sqrt{f_c} \quad (5-7)$$

Nota-se que a Eq. (5-7) não considera a influência da massa específica do concreto no módulo de deformação. Por outro lado, a equação para o cálculo do módulo de elasticidade secante do concreto proposta pela norma brasileira para estruturas de aço, ABNT NBR 8800:2008, é dada por

$$E_{cs} = 40,5 \left(\frac{\gamma_c}{100} \right)^{1,5} \sqrt{f_c} \quad (5-8)$$

A Eq. (5-8) leva em conta que o módulo de elasticidade é função tanto da resistência do concreto à compressão como de sua massa específica. Dessarte, essa expressão é aplicável tanto a concretos de densidade normal quanto à concretos leve.

Cogitou-se, então, de substituir f_c pelo módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs}) nas equações de resistência, utilizando para isso uma expressão do E_{cs} que levasse em conta a massa específica do concreto (γ_c), no caso, a expressão recomendada pela ABNT NBR 8800:2008. O novo modelo ficou com a seguinte configuração:

$$q_u = \beta_1 A_{cc} E_{cs} + \beta_2 n D^2 E_{cs} + \beta_3 A_{tr} f_{yr} \quad (5-9)$$

A partir disso, efetuou-se uma análise de regressão múltipla juntando os resultados experimentais de Oguejiofor (1994) e de Valente (2007), totalizando 49 casos. O modelo obtido foi o seguinte:

$$q_u = 1,4 \times 10^{-7} A_{cc} E_{cs} + 5,1 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 8,8 \times 10^{-4} A_{tr} f_{yr} \quad (5-10)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9795 \quad RMSE = 62,6 \text{ kN}$$

Observando os resultados plotados num gráfico (ver Figura 5-8), observa-se que a correlação dos resultados para os modelos com concreto leve melhoram.

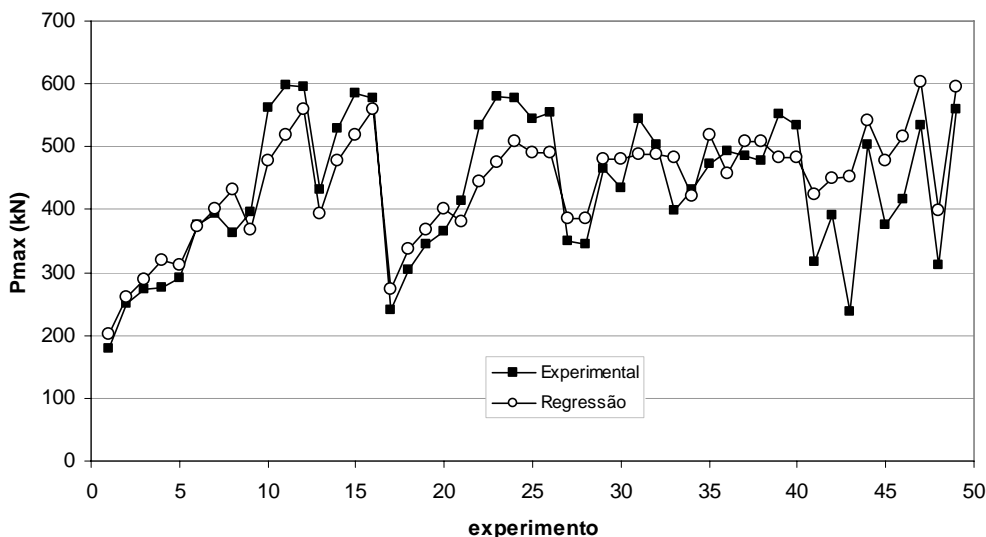


Figura 5-8 – Resultados da Eq. (5-10) comparados com os dados experimentais de Oguejiofor (1994) e Valente (2007).

Na Tabela 5-5 são listados os dados dos experimentos de Valente (2007) considerados na análise de regressão que deu origem à Eq. (5-10).

As respostas obtidas com a Eq. (5-10) indicaram que considerar a influência do concreto, na resistência global da conexão com Perfobond, em função do seu módulo de elasticidade secante, ao invés de sua resistência à compressão somente, conduz a um modelo genérico capaz de estimar a capacidade do conector para concretos com qualquer densidade.

A partir dessa constatação, foram testadas outras abordagens na intenção de alcançar uma melhor correlação entre os modelos semiempíricos e os resultados experimentais para Perfobond com concreto normal e com concreto leve.

Tabela 5-5 – Características dos experimentos de Valente (2007) utilizados nas análises de regressão dos modelos semiempíricos para estimativa de resistência de conectores Perfibond.

Ensaio	$P_{máx}$ (kN)	f_c (MPa)	L_{sc} (mm)	n	A_{tr} (mm ²)	f_{yr} (MPa)	A_{cc} (mm ²)	γ_c (kg/m ³)
CP1.1	317,7	60,30	375	3	235,6	450	60000	1934
CP2.1	390,6	59,31	375	3	314,2	450	60000	1919
CP3.1	237,7	60,46	375	3	314,2	450	60000	1918
CP4.1	502,1	64,24	375	3	471,2	450	60000	1986
CP1.2	375,1	56,58	375	3	353,4	576	60000	1845
CP2.2	416,8	53,75	375	3	432,0	576	60000	1869
CP4.2	533,6	57,87	375	3	589,0	576	60000	1857
CP5.2	311,0	56,65	375	0	353,4	576	60000	1921
CP6.2	559,4	59,53	375	3	589,0	523	60000	1916

P_{max} = carga máxima atingida no ensaio *push-out* (para dois conectores)

f_c = resistência à compressão do concreto

L_{sc} = comprimento longitudinal do conector

n = número de furos do conector

A_{tr} = área de armadura transversal

f_{yr} = tensão de escoamento do aço da armadura transversal

$A_{cc} = L_c t_c - L_{sc} h_{sc}$

L_c = comprimento da laje, constante e igual a 650 mm

t_c = espessura da laje, constante e igual a 150 mm

h_{sc} = altura do conector, constante e igual a 100 mm

γ_c = massa específica do concreto

t_{sc} = espessura da chapa do conector, constante e igual a 13 mm

D = diâmetro do furo do conector, constante e igual a 50 mm

Modificando o primeiro termo da Eq. (5-10) de modo a considerar o efeito da força frontal no conector, ao invés do cisalhamento da laje, obteve-se a seguinte expressão:

$$q_u = \beta_1 h_{sc} t_{sc} E_{cs} + \beta_2 n D^2 E_{cs} + \beta_3 A_{tr} f_{yr} \quad (5-11)$$

Fazendo uma análise de regressão múltipla com os dados experimentais de Oguejiofor (1994) e de Valente (2007), obtém-se a seguinte expressão:

$$q_u = 5,5 \times 10^{-6} h_{sc} t_{sc} E_{cs} + 4,7 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 9,4 \times 10^{-4} A_{tr} f_{yr} \quad (5-12)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,990 \quad RMSE = 43,4 \text{ kN}$$

Percebe-se que a modificação proposta resultou num aumento da correlação e consequente redução do *RMSE*.

Note-se, na Eq. (5-11), que ao multiplicar a área frontal do conector ($h_{sc} t_{sc}$) por E_{cs} atenua-se a influência da resistência à compressão do concreto, pois ela entra implicitamente na equação como uma raiz quadrada. Considerando que a força que a

laje exerce sobre a área frontal do conector é uma força de compressão direta, visando eliminar a atenuação da função $(f_c)^{0,5}$, verificou-se a correlação de um modelo similar, no qual E_{cs} foi substituído por E_{cs}^2 . O resultado melhora, como se pode ver a seguir:

$$q_u = 1,9 \times 10^{-10} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,7 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 1,0 \times 10^{-3} A_{tr} f_{yr} \quad (5-13)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9921 \quad RMSE = 38,6 \text{ kN}$$

5.2.4 Estudo da influência da armadura na capacidade da conexão

Nas equações (5-10) e (5-13), a influência da armadura é computada a partir da força na armadura. Substituindo nessas expressões o termo $(A_{tr} f_{yr})$ por (A_{tr}/A_{cc}) , obtém-se a seguinte expressão:

$$q_u = \beta_1 h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + \beta_2 n D^2 E_{cs} + \beta_3 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-14)$$

Fazendo uma análise de regressão múltipla com os dados dos experimentos de Oguejiofor (1994) e de Valente (2007), obtém-se a seguinte expressão:

$$q_u = 1,8 \times 10^{-10} h_{cc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,4 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 3,1 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-15)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9948 \quad RMSE = 31,36 \text{ kN}$$

Percebe-se que a modificação proposta resultou num aumento da correlação e consequente redução do *RMSE*.

Na Eq. (5-14) considerou-se a taxa geométrica de armadura transversal. Substituindo-se a taxa geométrica pela taxa mecânica de armadura, fica

$$q_u = \beta_1 h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + \beta_2 n D^2 E_{cs} + \beta_3 \left(\frac{A_{tr} f_{yr}}{A_{cc} E_{cs}^2} \right) \quad (5-16)$$

Por uma questão de coerência com a abordagem, no cálculo da taxa mecânica de armadura considerou-se $(A_{cc} E_{cs}^2)$ ao invés de $(A_{cc} f_c)$. Fazendo uma análise de

regressão múltipla com os dados de Oguejiofor (1994) e de Valente (2007), obtém-se a seguinte expressão:

$$q_u = 2,1 \times 10^{-10} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,5 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 1,5 \times 10^6 \left(\frac{A_{tr} f_{yr}}{A_{cc} E_{cs}^2} \right) \quad (5-17)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9907 \quad RMSE = 41,3 \text{ kN}$$

Percebe-se que considerar a taxa mecânica de armadura não é melhor do que considerar a taxa geométrica.

5.2.5 Estudo da influência da excentricidade do conector na capacidade da conexão

Em seus experimentos com Crestbond, Veríssimo (2007) verificou que é possível melhorar a correlação da equação de resistência introduzindo um termo que contabiliza a influência da excentricidade do conector. Como os conectores Perfobond utilizados por Valente (2007) possuíam altura distinta da dos conectores de Oguejiofor (1994) e as lajes dos modelos de ambos tinham a mesma espessura, tem-se conectores com diferentes excentricidades. Assim, tendo em vista o fato de estar utilizando os conjuntos de dados dos dois autores, construiu-se mais um modelo semiempírico, no qual foi introduzido um fator para levar em conta a excentricidade do conector, com o objetivo de verificar se a correlação do modelo melhorava. A expressão ficou com a seguinte forma:

$$q_u = \beta_1 \sqrt{\frac{h_{sc}}{t_c}} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + \beta_2 n D^2 E_{cs} + \beta_3 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-18)$$

Na Eq.(5-18), a raiz quadrada de (h_{sc}/t_c) no primeiro termo foi introduzida simplesmente porque melhora a correlação com os resultados experimentais.

Fazendo uma análise de regressão múltipla com os dados dos experimentos de Oguejiofor (1994) e de Valente (2007), obtém-se a seguinte expressão:

$$q_u = 1,9 \times 10^{-10} \sqrt{\frac{h_{sc}}{t_c}} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,5 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 3,2 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-19)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9952 \quad RMSE = 30,1 \text{ kN}$$

Percebe-se que a modificação proposta resulta num aumento da correlação e consequente redução do *RMSE*. Na Figura 5-9 pode-se observar a concordância dos valores estimados com a Eq. (5-19) com os resultados experimentais.

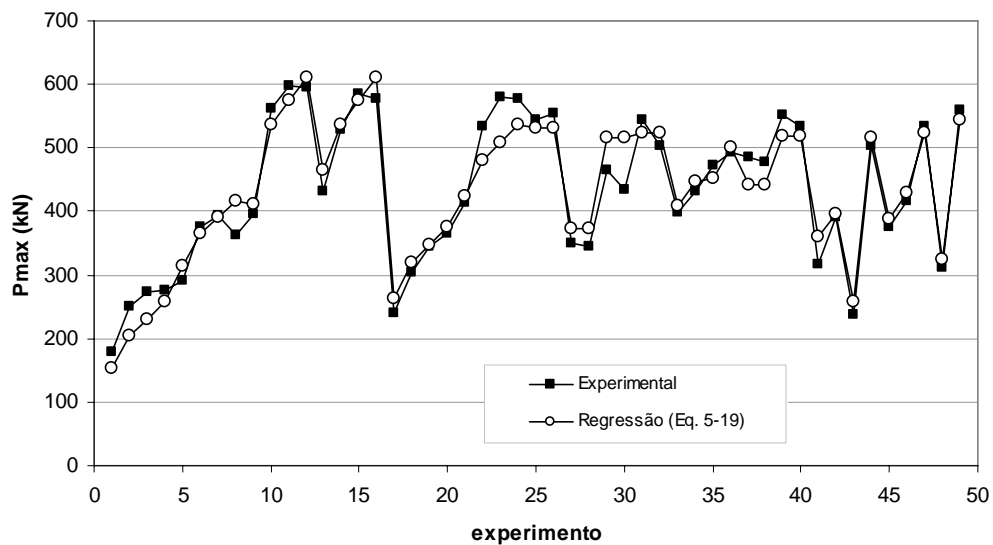


Figura 5-9 – Resultados da Eq. (5-19) comparados com os dados experimentais de Oguejiofor (1994) e Valente (2007).

5.2.6 Resumo dos modelos estudados para Perfobond

Na Tabela 5-6 apresenta-se um resumo dos modelos estudados para o conector Perfobond. Observa-se que os coeficientes de regressão resultantes da análise estatística possuem ordens de grandeza bem diferentes. Isso se deve às diferenças entre as ordens de grandeza dos parâmetros envolvidos nas expressões como, por exemplo, $E_{cs} = 23149 \text{ MPa}$ e $A_{tr}/A_{cc} = 0,0049$ na equação (5-15).

Tabela 5-6 – Equações de resistência para o Perfobond.

Descrição do modelo	Equação	R ² ajust.	RMSE (kN)
Cisalhamento da laje + cisalhamento dos pinos + força na armadura (com E_{cs}) – Eq. (5-10)	$q_u = 1,4 \times 10^{-7} A_{cc} E_{cs} + 5,1 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 8,8 \times 10^{-4} A_{tr} f_{yr}$	0,9795	62,6
Força frontal + cisalhamento dos pinos + força na armadura (com E_{cs}) – Eq. (5-12)	$q_u = 5,5 \times 10^{-6} h_{sc} t_{sc} E_{cs} + 4,7 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 9,4 \times 10^{-4} A_{tr} f_{yr}$	0,9900	43,4
Força frontal + cisalhamento dos pinos + força na armadura (com E_{cs}^2) – Eq. (5-13)	$q_u = 1,9 \times 10^{-10} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,7 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 1,0 \times 10^{-3} A_{tr} f_{yr}$	0,9921	38,6
Força frontal + cisalhamento dos pinos + taxa geom. de armadura (com E_{cs}^2) Eq. (5-15)	$q_u = 1,8 \times 10^{-10} h_{cc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,4 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 3,1 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right)$	0,9948	31,4
Força frontal + cisalhamento dos pinos + taxa mec. de armadura (com E_{cs}^2) Eq. (5-17)	$q_u = 2,1 \times 10^{-10} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,5 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 1,5 \times 10^6 \left(\frac{A_{tr} f_{yr}}{A_{cc} E_{cs}^2} \right)$	0,9907	41,3
Força frontal + excêntrica do conector + cisalhamento dos pinos + taxa geom. de armadura (com E_{cs}^2) Eq. (5-19)	$q_u = 1,9 \times 10^{-10} \sqrt{\frac{h_{sc}}{t_c}} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,5 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 3,2 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right)$	0,9952	30,1

Na Figura 5-10, apresenta-se num gráfico a evolução da correlação dos modelos, à medida que os fatores influentes vão sendo modificados. Na Figura 5-11, apresenta-se um gráfico similar demonstrando o decaimento do RMSE à medida que os modelos foram depurados.

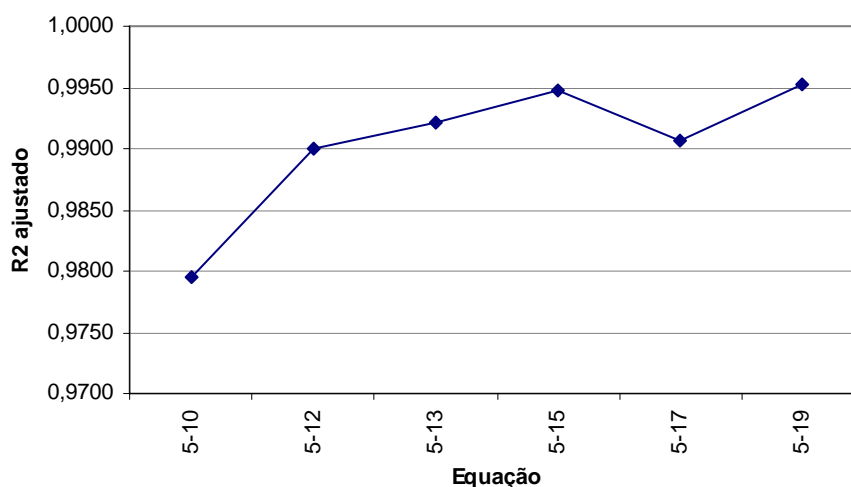


Figura 5-10 – Evolução da correlação para os modelos estudados para conector Perfobond.

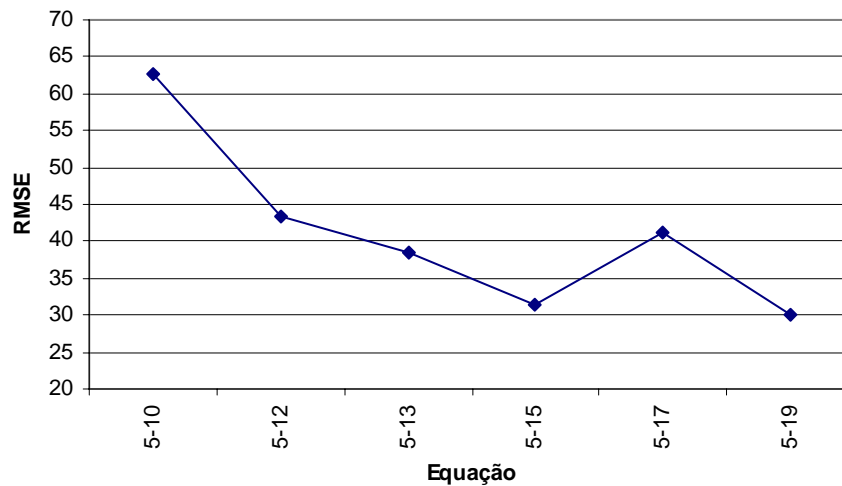


Figura 5-11 – Evolução do RMSE para os modelos estudados para conector Perfobond.

Como fica evidente na Figura 5-10 e na Figura 5-11, a consideração da taxa mecânica de armadura não conduz à melhor correlação com os resultados experimentais. As equações (5-15) e (5-19), que consideram a taxa geométrica de armadura, foram as que apresentaram melhor correlação com os resultados experimentais de Oguejiofor (1994) e Valente (2007). Percebe-se que a consideração da excentricidade do conector na equação (5-19) aumenta ligeiramente o coeficiente de correlação ajustado.

5.3 Modelos para conectores Crestbond

5.3.1 Considerações iniciais

Veríssimo (2007) propôs uma expressão para estimativa da capacidade da conexão com Crestbond. Essa expressão está mostrada na Eq. (2-20) e associa a resistência global da conexão a f_c , dentre outros fatores. Tendo em vista os bons resultados obtidos no item 5.2 para o conector Perfobond substituindo-se f_c por E_{cs} nas equações de resistência, foram estudados modelos semiempíricos para o Crestbond também relacionados com E_{cs} , ao invés de f_c .

A correlação obtida com uma equação única para o Perfobond, função de E_{cs} , capaz de estimar satisfatoriamente sua resistência tanto para concreto normal como para concreto leve, parecia indicar que essa abordagem era mais consistente do que aquela proposta anteriormente por outros autores que considerava apenas a influência de f_c na capacidade da conexão. Como forma de verificar essa hipótese, foi feita uma análise de regressão múltipla para o modelo expresso pela Eq. (5-19), porém considerando apenas os dados experimentais de Oguejiofor (1994). Note-se que, neste caso, todas as amostras consideradas na análise de regressão são para concreto normal; o γ_c não varia, sendo constante e igual a 2500 kg/m^3 . O resultado disso foi um modelo tão bom quanto aquele obtido com os dados de Oguejiofor (1994) e Valente (2007) misturados, como se pode ver a seguir.

$$q_u = 1,8 \times 10^{-10} \sqrt{\frac{h_{sc}}{t_c}} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,8 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 3,3 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-20)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9947 \quad RMSE = 28,7 \text{ kN}$$

Na Figura 5-12 pode-se observar a concordância dos valores estimados com a Eq. (5-20) com os resultados experimentais de Valente (2007) para concreto leve, tendo em vista que apenas os dados de Oguejiofor (1994), para concreto normal, foram considerados na regressão.

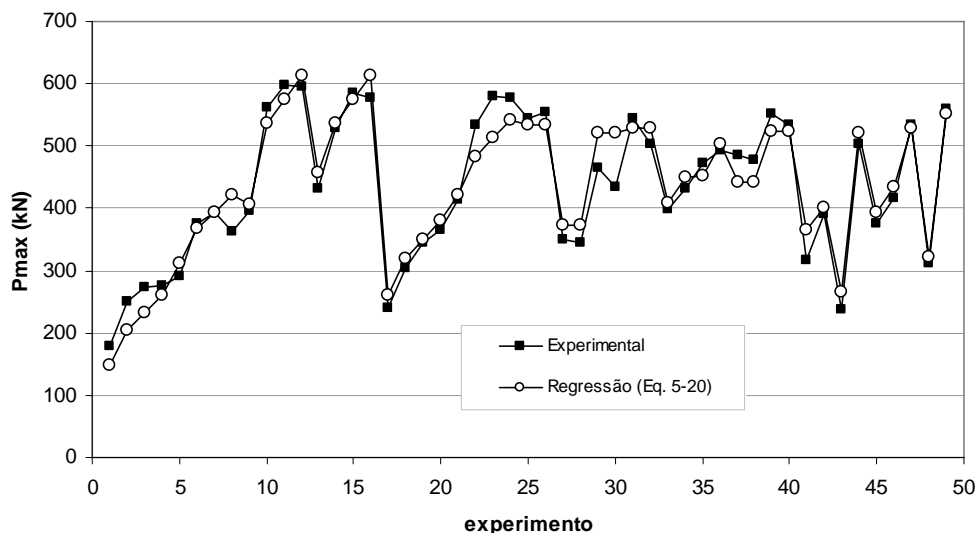


Figura 5-12 – Resultados da Eq. (5-20) comparados com os dados experimentais de Oguejiofor (1994) e Valente (2007).

A partir desta verificação, considerou-se razoável estudar modelos semiempíricos para o Crestbond também considerando a massa específica do concreto (γ_c), por meio de seu módulo de deformação secante (E_{cs}), ao invés de considerar apenas f_c como parâmetro influente.

Nesta seção são apresentados os estudos para a elaboração de modelos semiempíricos para o conector Crestbond. Procurou-se seguir a mesma abordagem adotada no desenvolvimento dos modelos para o Perfobond.

Na Tabela 5-7 são apresentadas as características dos experimentos de Veríssimo (2007), utilizadas nas análises de regressão dos modelos semiempíricos para estimativa de resistência de conectores Crestbond.

Tabela 5-7 – Características dos modelos com Crestbond.

Ensaio	$P_{máx}$	f_c	L_{sc}	h_{sc}	t_{sc}	D	n	A_{tr}	f_{yr}	A_{cc}
	(kN)	(MPa)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm ²)	(MPa)	(mm ²)
A1	632,5	31,90	252	70,0	12,5	40	3	942,5	500	79860
A2	387,0	33,00	315	81,2	12,5	0	0	471,2	500	71922
A3	676,7	33,10	315	81,2	12,5	50	3	471,2	500	71922
A5	613,3	32,90	315	81,2	12,5	50	3	471,2	500	71922
A6	739,4	32,60	315	81,2	12,5	50	3	942,5	500	71922
A4	744,5	32,50	315	81,2	12,5	50	3	942,5	500	71922
A7	842,0	33,00	378	93,0	12,5	60	3	942,5	500	62346
A8	866,0	32,90	378	93,0	12,5	60	3	942,5	500	62346
X1	679,7	18,0	413,4	81,2	12,0	56	3	942,5	500	63935
B1	592,4	26,6	413,4	81,2	12,0	56	3	471,2	500	63935
B2	612,9	26,6	413,4	81,2	12,0	56	3	471,2	500	63935
B3	697,5	27,2	413,4	81,2	12,0	56	3	942,5	500	63935
B4	751,7	26,9	413,4	81,2	12,0	56	3	942,5	500	63935
B5	756,3	28,5	413,4	81,2	12,0	56	3	1357,2	500	63935
B6	743,5	24,8	413,4	81,2	12,0	56	3	1357,2	500	63935
B7	367,4	28,3	413,4	81,2	12,0	56	0	471,2	500	63935
B8	355,2	24,8	413,4	81,2	12,0	56	0	471,2	500	63935
C1	722,6	46,9	413,4	81,2	12,0	56	3	471,2	500	63935
C2	755,0	48,1	413,4	81,2	12,0	56	3	471,2	500	63935
C3	987,3	49,1	413,4	81,2	12,0	56	3	942,5	500	63935
C4	1013,3	48,7	413,4	81,2	12,0	56	3	942,5	500	63935
C5	929,9	48,7	413,4	81,2	12,0	56	3	1357,2	500	63935
C6	993,7	45,9	413,4	81,2	12,0	56	3	1357,2	500	63935
C7	430,9	49,4	413,4	81,2	12,0	56	0	471,2	500	63935
C8	435,2	49,7	413,4	81,2	12,0	56	0	471,2	500	63935
D1.a	574,3	31,6	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468
D1.b	661,7	31,3	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468
D1.c	640,7	31,3	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468
D2.a	814,8	31,4	413,4	116,2	12,5	56	3	603,2	500	49468
D2.b	838,8	31,4	413,4	116,2	12,5	56	3	603,2	500	49468
D2.c	796,2	31,3	413,4	116,2	12,5	56	3	603,2	500	49468
D3.a	639,1	31,6	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468
D3.b	603,2	32,4	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468
D3.c	636,2	31,1	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468
D4.a	574,7	32,6	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468
D4.b	574,7	32,2	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468
D4.c	598,7	32,2	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468
D5.a	616,7	22,2	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468
D5.b	751,8	32,1	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468
D5.c	697,7	31,3	413,4	116,2	12,5	56	3	301,6	500	49468

$P_{máx}$ = carga máxima atingida no ensaio *push-out* (para dois conectores)

f_c = resistência à compressão do concreto

L_{sc} = comprimento longitudinal do conector

n = número de furos do conector

A_{tr} = área de armadura transversal

f_{yr} = tensão de escoamento do aço da armadura transversal

$A_{cc} = L_c t_c - L_{sc} h_{sc}$

L_c = comprimento da laje, constante e igual a 650 mm

t_c = espessura da laje, constante e igual a 150 mm

D = diâmetro de referência de um círculo inscrito na abertura trapezoidal do conector

5.3.2 Sobre o espaçamento entre os furos do conector

Quando o conector Crestbond foi projetado, já se conhecia, dos estudos anteriores com Perfobond, que a contribuição dos pinos de concreto somente é efetiva quando o espaçamento entre centros de furos não é inferior a $2,25 D$. Assim, o Crestbond já foi concebido de modo que suas relações geométricas garantem um espaçamento mínimo entre centros de furos de $2,25 D$.

5.3.3 Estudo da primeira hipótese de Oguejiofor

A primeira equação de resistência para o Perfobond, proposta por Oguejiofor, considerava que a capacidade global da conexão era resultado da contribuição de três influências: a resistência ao cisalhamento da laje, o cisalhamento dos pinos de concreto e a força na armadura, como expresso pela Eq. (2-17). Verificou-se a correlação de um modelo para Crestbond, seguindo essa mesma abordagem aplicada aos dados experimentais de Veríssimo (2007). O modelo em sua forma preliminar e, depois, com os coeficientes ajustados com a análise de regressão estão mostrados nas equações (5-21) e (5-22), respectivamente.

$$q_u = \beta_1 A_{cc} E_{cs} + \beta_2 n D^2 E_{cs} + \beta_3 A_{tr} f_{yr} \quad (5-21)$$

$$q_u = 7,1 \times 10^{-8} A_{cc} E_{cs} + 7,1 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 1,6 \times 10^{-4} A_{tr} f_{yr} \quad (5-22)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9900 \quad RMSE = 33,1 \text{ kN}$$

Como se pode observar, pelos valores do R^2 ajustado e do $RMSE$, a correlação do modelo com os dados experimentais é muito boa.

5.3.4 Estudo da segunda hipótese de Oguejiofor

A segunda equação de resistência para o Perfobond, proposta por Oguejiofor e Hosain (1997), considerava que a capacidade global da conexão era resultado da contribuição de quatro influências: a força de compressão da laje contra a face frontal do conector, o cisalhamento dos pinos de concreto, a resistência ao cisalhamento da laje e a força na armadura, como expresso pela Eq. (2-18).

Tendo em vista os motivos, já comentados no item 2.5, pelos quais a consideração da resistência ao cisalhamento da laje é questionável, elaborou-se um modelo com apenas três termos, no qual admite-se que a capacidade global da conexão é resultado da contribuição de três influências: a força de compressão da laje contra a face frontal do conector, o cisalhamento dos pinos de concreto e a força na armadura, como expresso pela Eq. (5-23). O modelo em sua forma final, após a regressão, é mostrado na Eq. (5-24).

$$q_u = \beta_1 h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + \beta_2 n D^2 E_{cs} + \beta_3 A_{tr} f_{yr} \quad (5-23)$$

$$q_u = 1,3 \times 10^{-10} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 5,0 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 3,1 \times 10^{-4} A_{tr} f_{yr} \quad (5-24)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9922 \quad RMSE = 29,7 \text{ kN}$$

Como se pode observar, a correlação do modelo com os dados experimentais melhora em relação à abordagem proposta no item 5.3.3.

5.3.5 Influência da armadura na capacidade da conexão com Crestbond

Com base nas proposições de Davies (1969), Veríssimo admitiu 1% como o limite superior para a taxa de armadura transversal, pois, como mencionado no item 2.3.4, Davies observou que para taxas superiores a 1% a contribuição da armadura para o aumento da capacidade da laje é inefetiva. Em função disso, ajustou-se um modelo com base nessa premissa, de modo que para todos os experimentos de Veríssimo que possuíam taxa de armadura superior a 1%, admitiu-se na análise de regressão o valor de 1%. O resultado está mostrado na Eq. (5-26).

$$q_u = \beta_1 h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + \beta_2 n D^2 E_{cs} + \beta_3 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-25)$$

$$q_u = 4,0 \times 10^{-11} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 5,3 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 2,2 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-26)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9947 \quad RMSE = 24,5 \text{ kN}$$

O resultado confirma a mesma tendência observada nos modelos estudados para o Perfobond, qual seja, considerar a influência da taxa de armadura transversal conduz a uma melhor correlação com os dados experimentais do que considerar a força na armadura.

Uma análise mais cuidadosa dos dados de Veríssimo, por meio de análises de regressão com outros limites superiores para a taxa de armadura transversal, permitiu constatar que, na realidade, a armadura ainda exerce alguma influência sobre a capacidade total da conexão para taxas de até 1,3%. Uma análise de regressão considerando esse limite superior de 1,3% para a taxa de armadura resultou no modelo da Eq. (5-27):

$$q_u = 8,4 \times 10^{-11} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,8 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 1,6 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-27)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9953 \quad RMSE = 23,2 \text{ kN}$$

Como se pode observar, a correlação para o modelo que considera a taxa de armadura até 1,3% [Eq. (5-27)] é melhor do que para o modelo que considera a taxa de armadura até 1,0% [Eq. (5-26)].

5.3.6 Estudo da influência da excentricidade do conector na capacidade da conexão

Do mesmo modo como se fez para o conector Perfobond, investigou-se em que resultaria inserir a influência da excentricidade do conector na equação de resistência do Crestbond. O resultado obtido foi:

$$q_u = 1,3 \times 10^{-10} \sqrt{\frac{h_{sc} - t_{PL}}{t_c - t_{PL}}} (h_{sc} - t_{PL}) t_{sc} E_{cs}^2 + 4,8 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 1,5 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-28)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9973 \quad RMSE = 17,5 \text{ kN}$$

Assim como se observou para o Perfobond, a introdução de um fator para representar a influência da excentricidade do conector na capacidade global da conexão resultou em melhoria da correlação do modelo com os dados experimentais.

5.3.7 Verificação da hipótese de Kraus e Wurzer

Dois modelos com apenas três termos, um considerando o cisalhamento duplo dos pinos de concreto (hipótese de Leonhardt *et al.*) e outro relacionado à compressão direta da laje contra as paredes dos furos (hipótese de Kraus e Wurzer), foram utilizados para esta verificação. As expressões na sua forma original são apresentadas a seguir. Em ambos os casos, para a consideração da influência da armadura, admitiu-se a taxa geométrica $\rho = A_{tr}/A_{cc}$ com limite superior igual a 1,3%.

Fazendo uma análise de regressão múltipla utilizando os dados experimentais de Veríssimo (2007), obtém-se os seguintes resultados:

$$q_u = 4,0 \times 10^{-11} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 5,3 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 2,2 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-29)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9947 \quad RMSE = 24,5 \text{ kN}$$

$$q_u = 3,9 \times 10^{-11} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 2,4 \times 10^{-6} n D t_{sc} E_{cs} + 2,2 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (5-30)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9942 \quad RMSE = 25,7 \text{ kN}$$

Os parâmetros estatísticos revelam que as duas hipóteses são equivalentes, e que fornecem resultados semelhantes, como pode ser visto na Figura 5-13 e na Figura 5-14.

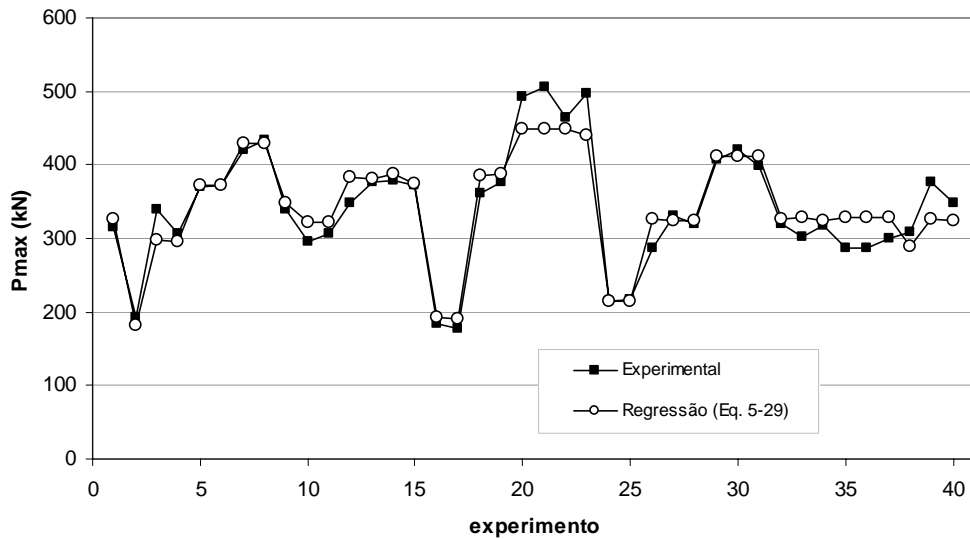


Figura 5-13 – Resultados para o modelo de regressão da Eq. (5-29)

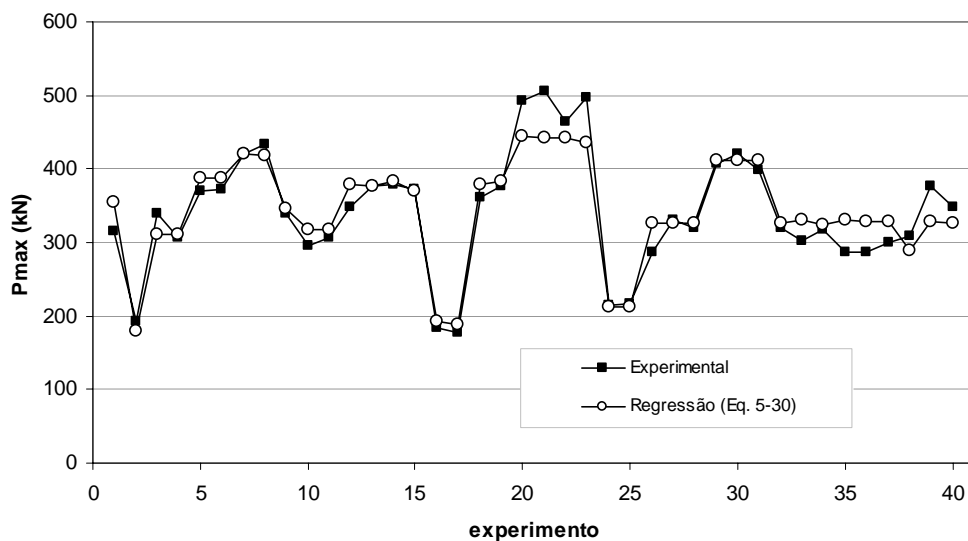


Figura 5-14 – Resultados para o modelo de regressão da Eq. (5-30)

5.3.8 Resumo dos modelos estudados para Crestbond

Na Tabela 5-8 apresenta-se um resumo dos modelos estudados para o conector Crestbond. As diferenças nas magnitudes dos coeficientes de regressão se devem às diferenças nas magnitudes dos parâmetros utilizados nas equações.

Tabela 5-8 – Equações de resistência para o Crestbond.

Descrição do modelo	Equação	R ² ajust.	RMSE (kN)
Cisalhamento da laje + cisalhamento dos pinos + força na armadura (com E_{cs}) – Eq. (5-22)	$q_u = 7,1 \times 10^{-8} A_{cc} E_{cs} + 7,1 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 1,6 \times 10^{-4} A_{tr} f_{yr}$	0,9900	32,1
Força frontal + cisalhamento dos pinos + força na armadura (com E_{cs}) – Eq. (5-24)	$q_u = 1,3 \times 10^{-10} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 5,0 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 3,1 \times 10^{-4} A_{tr} f_{yr}$	0,9922	29,7
Força frontal + cisalhamento dos pinos + $\rho \leq 1,0\%$ (com E_{cs}^2) Eq. (5-26)	$q_u = 4,0 \times 10^{-11} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 5,3 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 2,2 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right)$	0,9947	24,5
Força frontal + cisalhamento dos pinos + $\rho \leq 1,3\%$ (com E_{cs}^2) Eq. (5-27)	$q_u = 8,4 \times 10^{-11} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,8 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 1,6 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right)$	0,9953	23,2
Força frontal + excentric. do conector + cisalhamento dos pinos + taxa geom. de armadura (com E_{cs}^2) Eq. (5-28)	$q_u = 1,3 \times 10^{-10} \sqrt{\frac{h_{sc} - t_{PL}}{t_c - t_{PL}}} (h_{sc} - t_{PL}) t_{sc} E_{cs}^2 + 4,8 \times 10^{-7} n D^2 E_{cs} + 1,5 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right)$	0,9973	17,5

Na Figura 5-15, apresenta-se num gráfico a evolução da correlação dos modelos para Crestbond, à medida que os fatores influentes vão sendo modificados. Na Figura 5-16, apresenta-se um gráfico similar demonstrando o decaimento do RMSE à medida que os modelos foram depurados.

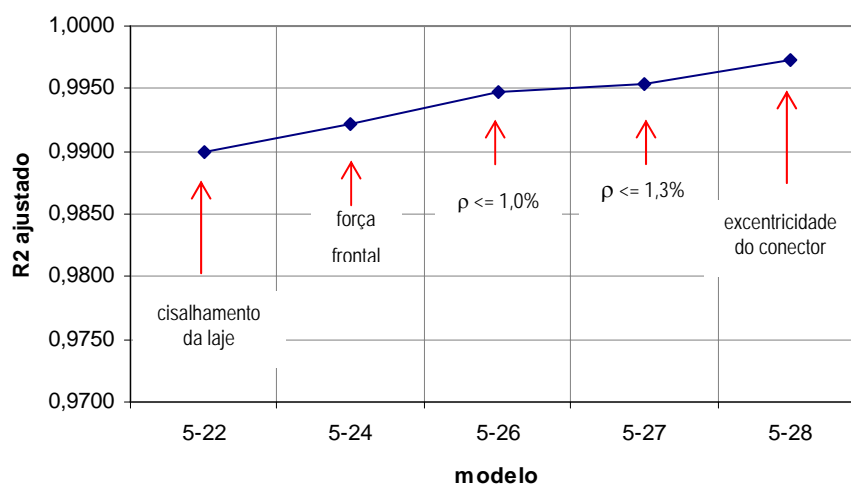


Figura 5-15 – Evolução da correlação para os modelos estudados para conector Crestbond.

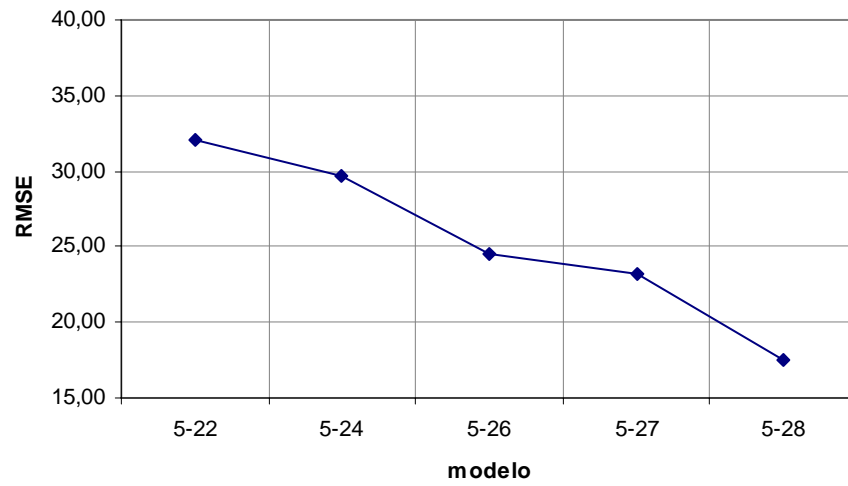


Figura 5-16 – Evolução do RMSE para os modelos estudados para conector Crestbond.

6

DISCUSSÃO

6.1 Considerações preliminares

Os modelos documentados neste trabalho constituem um subconjunto de um grupo muito maior. Muitos modelos foram avaliados em busca de uma representação consistente do comportamento da conexão com Perfobond e com Crestbond, mas foram apresentados apenas aqueles que demonstram maior correlação com o comportamento observado experimentalmente.

Ao longo do desenvolvimento dos estudos, procurou-se considerar as proposições feitas anteriormente por outros autores, até porque esses autores vivenciaram seus programas experimentais, observando de perto os modos de colapso ocorridos e fazendo suas interpretações. Assim, partiu-se dos primeiros modelos propostos por Oguejiofor (1994) e por Oguejiofor e Hosain (1997), introduzindo novos parâmetros e novas abordagens principalmente em função de estudos experimentais mais recentes como o de Valente (2007) e de Veríssimo (2007).

Procurou-se dar uma contribuição no sentido de testar alguns fatores que ainda não tinham sido testados até então, como, por exemplo, a influência do espaçamento entre os furos do Perfobond, e confrontar hipóteses como a do cisalhamento dos pinos de concreto contra a proposição de Kraus e Wurzer de que a capacidade da conexão poderia ser influenciada por uma força longitudinal de compressão direta contra o conector.

A disponibilidade de resultados de experimentos com Perfobond em concreto leve motivou uma investigação que culminou com a descoberta de uma equação de resistência genérica, capaz de estimar satisfatoriamente a capacidade da conexão com Perfobond em concretos com qualquer densidade.

Neste capítulo, discutem-se algumas questões que revelaram maior relevância durante a elaboração e ajuste das equações de resistência.

6.2 Sobre a hipótese de Kraus e Wurzer

Kraus e Wurzer fizeram uma proposição em seu trabalho em 1997, mas não chegaram a ajustar um modelo objetivamente a partir de seus resultados experimentais. Desde que Veríssimo (2007) obteve predições da resistência do Crestbond com RNA melhores do que com um modelo de regressão, pairava a dúvida se seria possível ajustar um modelo semiempírico com correlação ainda melhor do que aqueles propostos até então.

Utilizando uma abordagem já conhecida, dois modelos foram comparados para verificar a correlação obtida a partir de cada uma das duas hipóteses, a saber, a do cisalhamento dos pinos de concreto e a da compressão direta nas paredes dos furos. Os resultados obtidos, tanto para o Perfobond como para o Crestbond demonstraram que as duas hipóteses são equivalentes e conduzem a modelos com correlações muito similares. Não obstante, tendo em vista que o cisalhamento dos pinos é um fato observado em praticamente todos os ensaios de cisalhamento direto com Perfobond e com Crestbond, como mostrado na Figura 2-8, optou-se por insistir com a modelagem baseada nesse fenômeno.

6.3 Espaçamento entre os furos do conector

Como foi visto no item 5.2.2, é possível desenvolver uma função que simula com precisão satisfatória o efeito do espaçamento entre os furos do Perfobond. Embora fossem poucos os resultados experimentais de Oguejiofor (1994) em que o espaçamento entre os furos era muito pequeno e, conseqüentemente, causava redução

da resistência do conector, ficou evidente que a função proposta simula bem o efeito do espaçamento e melhora a correlação do modelo semiempírico.

O estudo apresentado no item 5.2.2 foi feito antes que se introduzisse nos modelos a influência da densidade do concreto. Introduzindo a influência da densidade do concreto na Eq. (5-3), obtém-se:

$$q = 1,8 \times 10^{-10} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,4 \times 10^{-7} n D t_{sc} E_c + 3,1 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (6-1)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9948 \quad RMSE = 31,4 \text{ kN}$$

Na Figura 6-1 apresenta-se um gráfico de controle mostrando a correlação entre os resultados experimentais e os valores estimados pela Eq. (6-1). Nesse gráfico, os primeiros 40 casos correspondem aos ensaios feitos por Oguejiofor (1994) com Perfobond em concreto normal e os 9 últimos correspondem aos ensaios feitos por Valente (2007) com Perfobond em concreto leve.

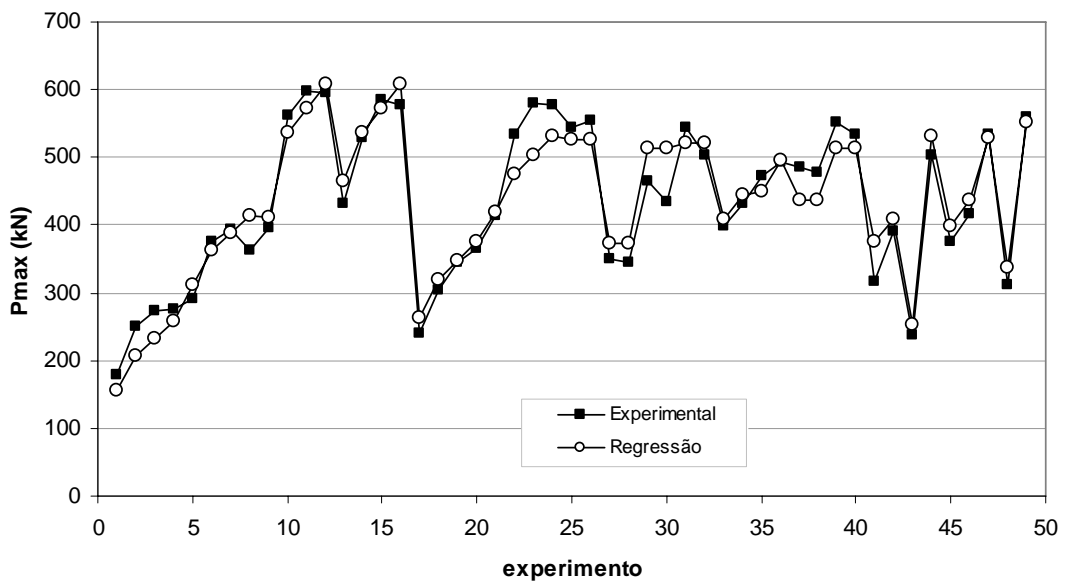


Figura 6-1 – Resultados para o modelo de regressão da Eq. (6-1), sem a influência do espaçamento entre os furos do Perfobond.

Introduzindo a influência do espaçamento entre os furos na Eq. (6-1), por meio do fator α dado pela expressão (5-5), e efetuando uma análise de regressão múltipla com os 40 casos de Oguejiofor (1994) mais os 9 casos de Valente (2007), obtém-se:

$$q = 1,8 \times 10^{-10} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 + 4,9 \times 10^{-7} \alpha n D^2 E_{cs} + 3,0 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (6-2)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9947 \quad RMSE = 31,6 \text{ kN}$$

Na Figura 6-2 apresenta-se um gráfico de controle mostrando a correlação entre os resultados experimentais e os valores estimados pela Eq. (6-2), novamente sendo os primeiros 40 casos referentes aos experimentos de Oguejiofor (1994) com Perfobond em concreto normal e os 9 últimos aos ensaios de Valente (2007) com Perfobond em concreto leve.

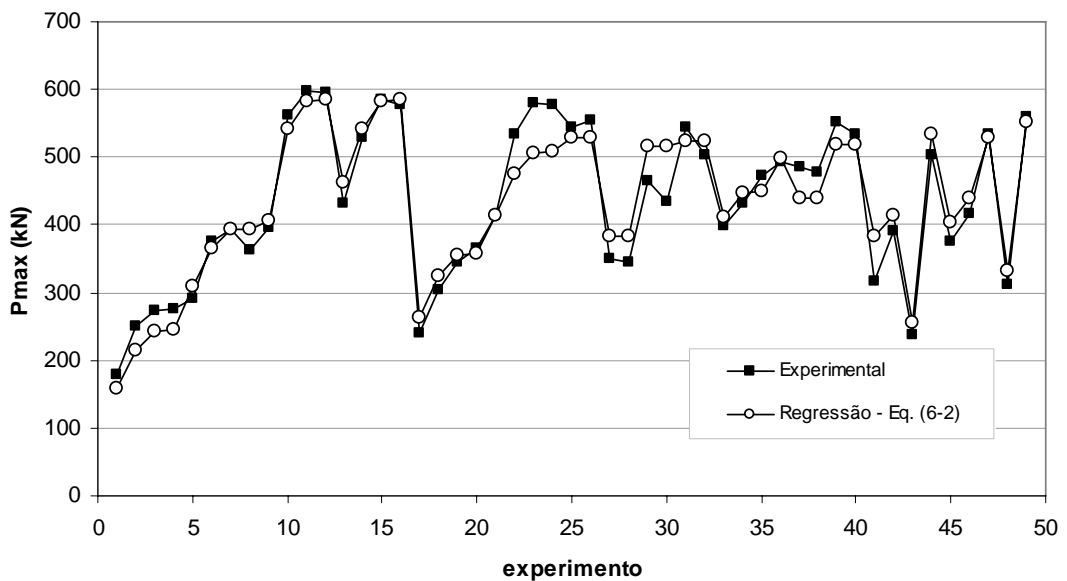


Figura 6-2 – Resultados para o modelo de regressão da Eq. (6-2), com a influência do espaçamento entre os furos do Perfobond.

A função α , dada pela Eq. (5-5), é útil para representar a influência do espaçamento entre os furos no Perfobond. Para efeito prático, se o conector em uso possui espaçamento entre furos maior ou igual a $2,25D$, seu uso pode ser dispensado, pois implica em cálculos adicionais desnecessários.

6.4 Sobre a resistência ao cisalhamento da laje

Tendo em vista as análises realizadas, propõe-se que, no tocante à contribuição da resistência da laje, deve-se considerar ou o cisalhamento da laje ou a força de compressão frontal que a laje exerce sobre o conector. Entende-se que, na realidade, essas duas abordagens estão relacionadas ao mesmo fenômeno. A separação da laje em duas metades, por uma fissura longitudinal coincidente com o eixo do conector, evidencia a existência de uma força de tração transversal ao conector. Essa força está relacionada à força longitudinal que surge entre a laje e o conector, de modo análogo à relação que existe entre a deformação longitudinal e a deformação transversal, expressa pelo efeito de Poisson.

Nas análises realizadas ficou evidente que considerar a força de compressão frontal no conector conduz a uma melhor correlação com os resultados experimentais. Sob certo aspecto, isto é compreensível, pois o comportamento do concreto à compressão axial é mais estável do que à tração, e a abordagem baseada na hipótese do cisalhamento da laje associa a influência da contribuição da laje à sua resistência à tração.

6.5 A influência da densidade do concreto no comportamento da conexão

As análises apresentadas no capítulo 5 também demonstram que a densidade do concreto exerce uma influência sobre a capacidade da conexão que não deve ser desprezada, de tal modo que a partir do momento em que ela foi introduzida no modelo, descobriu-se que a equação resultante era capaz de estimar com precisão a resistência dos conectores para todos os concretos ensaiados.

Embora, no capítulo 5, as equações considerando a influência da densidade do concreto tenham sido escritas em função do E_{cs} dado pela Eq. (5-8), posteriormente concluiu-se que seria mais apropriado explicitar as variáveis f_c e γ_c nas equações de resistência, de modo a evitar erros de aplicação pelo usuário final e, de outra forma, permitir a consideração de valores de f_c e γ_c medidos experimentalmente, quando as equações forem usadas num contexto de pesquisa. Assim, por exemplo, a Eq. (6-2)

poderia ser escrita na forma abaixo de modo que as constantes que multiplicam a raiz quadrada de f_c , presentes nas equações (5-7) e (5-8), seriam “absorvidas” pelos coeficientes de regressão.

$$q = 2,9 \times 10^{-13} h_{sc} t_{sc} \gamma_c^3 f_c + 2,0 \times 10^{-8} \alpha n D^2 \gamma_c^{1,5} \sqrt{f_c} + 3,0 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (6-3)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9947 \quad RMSE = 31,6 \text{ kN}$$

Note-se que a correlação da Eq. (6-3) com os resultados experimentais é praticamente a mesma da Eq. (6-2).

6.6 Considerações sobre o efeito da armadura transversal

Com relação à forma de tratar a influência da armadura na capacidade da conexão, foram testadas três abordagens distintas, descritas a seguir.

- Força máxima na armadura ($A_{tr} f_{yr}$) – considera a contribuição da armadura como uma força que é função da seção transversal e da tensão de escoamento do aço da armadura, no entanto não considera a distribuição da armadura em relação à seção de concreto. Essa abordagem foi utilizada por Davies (1969) e por Oguejiofor (1994).
- Taxa geométrica de armadura (A_{tr}/A_{cc}) – considera a quantidade de armadura em relação à área de concreto sem computar a influência de sua resistência. Essa abordagem foi utilizada por Veríssimo (2007).
- Taxa mecânica de armadura ($A_{tr} f_y)/(A_{cc} f_c)$, que é uma taxa de forças: força na armadura pela força no concreto.

Embora tanto a força na armadura como a taxa mecânica sejam representações razoáveis do efeito da armadura no comportamento do concreto e, conseqüentemente, na capacidade da conexão, as análises de regressão demonstraram que considerar a influência da armadura por meio da taxa geométrica (A_{tr}/A_{cc}) resulta em melhor correlação com os dados experimentais.

Com relação à primeira hipótese, que considera a força máxima na armadura ($A_{tr}f_{yr}$), para os dados experimentais de que se dispunha a resistência do aço da armadura f_{yr} praticamente não variava. Assim, multiplicar A_{tr} por f_{yr} basicamente equivale a multiplicar A_{tr} por uma constante, e o fato de não se considerar a área de concreto associada implica em desprezar uma grandeza (A_{cc}) que evidentemente exerce influência sobre o fenômeno considerado, no caso, a capacidade da conexão.

Quando se considera a taxa mecânica de armadura, multiplica-se a relação entre as áreas de aço e de concreto (A_{tr}/A_{cc}) pela relação entre a resistência do aço da armadura e a resistência à compressão do concreto (f_{yr}/f_c). Para os dados experimentais, como o aço utilizado na armadura tende a ser sempre o mesmo, f_{yr} praticamente não varia. Por outro lado, f_c sempre varia, pois não se consegue realizar os ensaios na mesma data. Assim, para modelos ensaiados em diferentes datas, mesmo que tenham sido preparados com concreto da mesma amassadura, sempre se tem alguma variação do f_c . Portanto, a relação (f_{yr}/f_c) que multiplica a taxa geométrica de armadura (A_{tr}/A_{cc}) sofre alguma flutuação em função da variação de f_c , ao passo que essa flutuação não aparece quando se considera apenas a taxa geométrica (A_{tr}/A_{cc}). O fato é que as análises de regressão revelam que os modelos em que figura a taxa geométrica, apenas, apresentam melhor correlação com os resultados experimentais do que aqueles nos quais se empregou a taxa mecânica. Este fato parece indicar que a influência da armadura está relacionada a um controle de fissuração do concreto e não propriamente ao mecanismo de bielas e tirantes.

6.7 Sobre a influência da excentricidade do conector

Veríssimo (2007) realizou ensaios *push-out* com conectores Crestbond bem semelhantes aos modelos ensaiados por Oguejiofor (1994), visando comparar a resistência do Crestbond com a do Perfobond. Entretanto isso não ocorreu, o que levou a uma investigação adicional. Veríssimo observou que o modo de ruptura dos modelos *push-out* com Crestbond foi diferente do observado por Oguejiofor (1994) para os modelos *push-out* com Perfobond.

Veríssimo verificou que a maior diferença entre seus modelos e os de Oguejiofor estava na altura do conector, 81,2 mm do Crestbond contra 127 mm do Perfobond.

Na sequência de seus experimentos, Veríssimo (2007) realizou outros ensaios com um conector mais alto, que possuía altura de 116,2 mm. Esses modelos apresentaram não só capacidades resistentes próximas às do Perfobond de Oguejiofor como também modo de ruptura similar.

Embora Veríssimo (2007) tenha normalizado os seus resultados em relação à altura do conector, ainda assim as capacidades de carga dos modelos foram bem inferiores aos de Oguejiofor (1994). Essa constatação levou a concluir que o aumento da excentricidade da força frontal do conector reduz a capacidade da conexão, e, por esse motivo, Veríssimo propôs a introdução de um termo na parcela da resistência frontal que representa aproximadamente o efeito da excentricidade do conector na resistência última da conexão. Esse termo corresponde à raiz quadrada de (h_{sc}/t_c) na Eq. (5-19).

Veríssimo (2007) apresenta uma discussão sobre as implicações da excentricidade do conector. De fato, a excentricidade do conector tem influência tanto na parcela da resistência tocante à força frontal como na parcela relacionada ao cisalhamento dos pinos de concreto. Entretanto, representar a excentricidade dos pinos de concreto é mais complicado, pois em alguns casos a resultante estará abaixo do plano médio da laje enquanto em outros estará acima, como se pode observar na Figura 6-3.

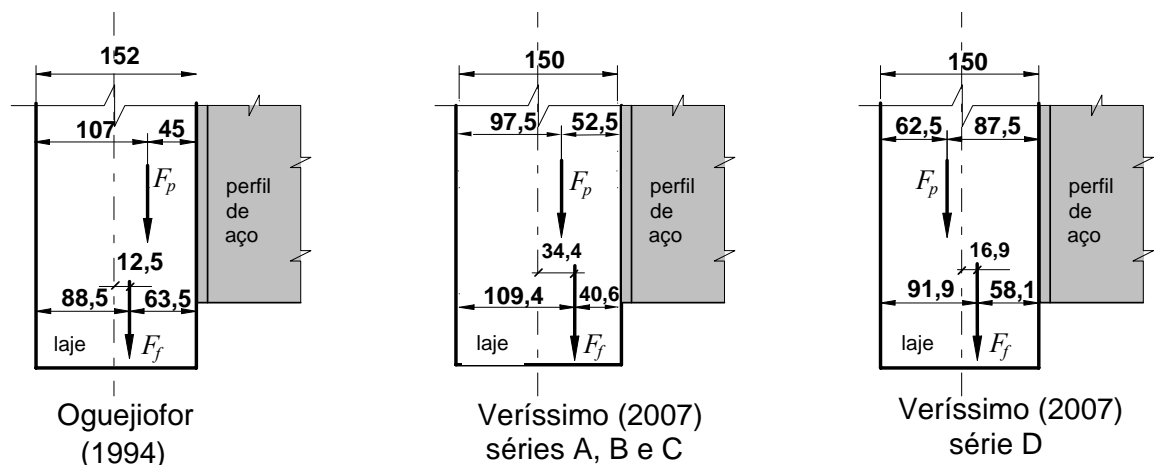


Figura 6-3 – Variação da excentricidade da força frontal no conector em relação ao plano médio da laje (Veríssimo, 2007).

Em virtude da dificuldade de representar a excentricidade dos pinos de concreto, Veríssimo incluiu na equação de resistência do Crestbond um termo que contabiliza apenas o efeito da excentricidade da força frontal. Por essa razão, a consideração da excentricidade do conector é feita de forma parcial.

Nas análises de regressão apresentadas no capítulo 5, ficou evidente que a consideração da excentricidade da força frontal no Perfobond e Crestbond melhorou ligeiramente a correlação com os dados experimentais (ver Tabela 5-6 e Tabela 5-8).

6.8 Modelos propostos

Dentre todos os modelos avaliados, tendo em vista os aspectos discutidos, propõem-se as seguintes equações de resistência, escritas em função das variáveis γ_c e f_c :

- para o Perfobond:

$$q_u = 3,1 \times 10^{-13} \sqrt{\frac{h_{sc}}{t_c}} h_{sc} t_{sc} \gamma_c^3 f_c + 1,8 \times 10^{-8} n D^2 \gamma_c^{1,5} \sqrt{f_c} + 3,2 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (6-4)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9952 \quad RMSE = 30,0 \text{ kN}$$

- para o Crestbond:

$$q_u = 2,2 \times 10^{-13} \sqrt{\frac{h_{sc} - t_{PL}}{t_c - t_{PL}}} (h_{sc} - t_{PL}) t_{sc} \gamma_c^3 f_c + 1,9 \times 10^{-8} n D^2 \gamma_c^{1,5} \sqrt{f_c} + 1,5 \times 10^4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (6-5)$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,9973 \quad RMSE = 17,5 \text{ kN}$$

As equações acima foram as que apresentaram melhor correlação com os dados experimentais e menor resíduo médio.

7

CONCLUSÕES

7.1 Conclusões gerais

Neste trabalho apresenta-se uma avaliação de diversos modelos semiempíricos desenvolvidos para estimar a capacidade resistente de conectores de cisalhamento Crestbond e Perfobond. Na composição desses modelos, investigaram-se diversas abordagens, a fim de se obter aquela que resultasse em melhor correlação entre os dados experimentais e os valores estimados pelo modelo.

Os primeiros modelos apresentados tiveram por objetivo verificar em quê resultaria admitir a hipótese de compressão direta do concreto na parede das aberturas do conector, proposta por Kraus e Wurzer (1997), ou a hipótese de cisalhamento dos pinos de concreto, proposta por Leonhardt *et al.* (1990). Os resultados das análises de regressão múltipla indicaram que as duas abordagens são equivalentes e fornecem resultados similares tanto para o Perfobond como para o Crestbond.

Verificou-se que é possível representar de forma satisfatória a influência do espaçamento entre as aberturas do conector na resistência última da conexão, introduzindo-se na equação de resistência uma função que simula essa influência.

Concluiu-se que as abordagens relacionadas à contribuição da resistência da laje na capacidade da conexão, quais sejam, o cisalhamento da laje e a força de compressão frontal que a laje exerce sobre o conector, estão relacionadas ao mesmo fenômeno, a

separação da laje em duas metades por uma fissura longitudinal coincidente com o eixo do conector. Essa fissura evidencia uma força de tração transversal ao conector, que surge devido à força longitudinal entre a laje e o conector. A partir das análises, ficou evidente que considerar a contribuição da resistência da laje a partir da força de compressão frontal conduz a uma melhor correlação com os dados experimentais. Isso é justificado pelo fato do comportamento do concreto à compressão ser mais estável que seu comportamento à tração, abordagem considerada na hipótese de cisalhamento da laje.

Constatou-se que considerar a influência da densidade do concreto na capacidade da conexão, além da sua resistência à compressão, conduz a modelos com melhor correlação com os resultados experimentais disponíveis, capazes de estimar a resistência da conexão para concretos de qualquer densidade. Essa constatação indica que essa abordagem deva ser utilizada sempre que se estiver buscando um modelo para representar a resistência de um conector de cisalhamento embutido no concreto.

Investigou-se, também, a influência da armadura transversal no desempenho da conexão através de três abordagens distintas: (a) força na armadura; (b) taxa geométrica de armadura e (c) taxa mecânica da armadura. Observou-se que a melhor abordagem é aquela que considera a taxa geométrica da armadura. A primeira abordagem desconsidera uma grandeza importante na capacidade da conexão, que é a área de concreto ao cisalhamento (A_{cc}). Além disso, para os dados experimentais que se dispunha, a resistência do aço da armadura (f_{yr}) praticamente não variava. Assim multiplicar A_{tr} por f_{yr} basicamente equivale a multiplicar A_{tr} por uma constante. Quando se considera a taxa mecânica de armadura, multiplica-se a relação entre as áreas de aço e de concreto (A_{tr}/A_{cc}) pela relação entre a resistência do aço da armadura e a resistência à compressão do concreto (f_{yr}/f_c). Neste caso, para os dados experimentais de que se dispunha, a única variação ocorre em f_c , e essa variação não conduz à melhor correlação. O fato dos modelos com taxa geométrica de armadura apresentarem melhor correlação com os dados experimentais parece indicar que a influência da armadura está relacionada a um controle de fissuração do concreto, e não propriamente ao mecanismo de bielas e tirantes.

Constatou-se que a armadura exerce influência sobre a capacidade da conexão com Crestbond ou com Perfobond para taxas geométricas de até 1,3%. Veríssimo (2007) havia admitido em suas análises, conforme o trabalho de Davies (1969), que a influência da armadura não era relevante para taxas acima de 1,0%.

Analisou-se a influência da excentricidade do conector na capacidade da conexão, da forma como foi proposta por Veríssimo (2007). Concluiu-se que a excentricidade tem influência na correlação com os dados experimentais, mesmo sendo contabilizada de forma parcial. De fato, a excentricidade do conector tem influência tanto na parcela da resistência frontal como na parcela relacionada ao cisalhamento dos pinos de concreto. No entanto, representar a excentricidade dos pinos de concreto é complexo, como discutido no capítulo 6. Devido a essa dificuldade, de contabilizar a excentricidade dos pinos de concreto, as equações para o cálculo das resistências dos conectores Crestbond e Perfobond, simplificadamente, incluem apenas o efeito da excentricidade da força frontal.

Finalmente, após as diversas análises realizadas, chegou-se a modelos semiempíricos mais simples do que os propostos anteriormente por outros autores, que apresentam melhor correlação com as medições experimentais disponíveis, tanto para o Crestbond como para o Perfobond.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Nas equações de resistência propostas por Veríssimo (2007), embora o termo que estima a influência da excentricidade da força frontal na resistência última do conector apresente bons resultados, nenhum dos programas experimentais realizados até o momento visava especificamente a avaliação desse parâmetro. Um estudo experimental com esse objetivo, no qual se varie a altura do conector mantendo as lajes com espessura constante, ou se varie a espessura da laje mantendo constante a altura do conector, poderia gerar resultados úteis para um melhor entendimento do efeito da excentricidade do conector sobre a capacidade global da conexão com conectores em chapa plana perfurada.

Embora não tenha sido tratado neste trabalho, observou-se que nos ensaios *push-out* realizados por Cândido-Martins (2010) com Perfobond com furos de apenas 30 mm a contribuição do cisalhamento dos pinos de concreto é inefetiva. Isso possivelmente se deve à dimensão reduzida dos furos, que não deve proporcionar confinamento suficiente para o concreto na região das aberturas, de modo a propiciar uma resistência ao cisalhamento relevante. Como, historicamente, os trabalhos de investigação sobre o Perfobond tem admitido furos com diâmetro maior ou igual a 50 mm, entende-se que também seria útil realizar um estudo experimental no qual se avaliaria o desempenho dos pinos de concreto para diversos diâmetros, partindo-se de 30 mm. Embora haja resultados que indiquem uma relação linear entre a capacidade da conexão, tanto do Crestbond como do Perfobond, e o tamanho das aberturas, parece que se o tamanho fica muito reduzido essa relação sofre um decaimento não linear.

Tendo em vista os resultados obtidos, parece interessante investigar a possibilidade de se obter um modelo semiempírico único, capaz de estimar a resistência dos dois tipos de conectores, Crestbond e Perfobond, utilizando-se um fator de forma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR 6118:2004; Projeto de estruturas de concreto - procedimento, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, 2004.

ANDRÄ, H. P.; Economical shear connectors with high fatigue strength, IABSE Symposium, Brussels, Vol.1, p.167-172, 1990.

CÂNDIDO-MARTINS, J. P. S.; COSTA-NEVES, L. F.; VELLASCO, P. C. G. DA S.; *Experimental evaluation of the structural response of Perfobond*. Journal Engineering Structures, Vol. 32, 1976-1985, 2010.

CEN, EN 1994-1-1:2004: *Design of composite steel and concrete structures*. European Committee for Standardization (CEN), 2004.

CHIEN, E.Y.L. and RITCHIE, J.K. Design and construction of composite floor systems. Canadian Institute of Steel Construction, Toronto, Ontario, 1984.

CRISINEL, M. *New system of connection with non-welded shear connectors*. Proceedings of the ASCE/IABSE Engineering Foundation Conference on Composite Construction, Henniker, New Hampshire, pp. 636-645, 1987.

DAVIES, C.; Small-scale push-out tests on welded stud shear connectors, *Concrete*, London, 1967.

DAVIES, C.; Tests on half-scale steel-concrete composite beams with welded stud connectors, *Structural Engineer*, Vol. 47(1), 29-40, 1969.

GALJAARD, H.; WALRAVEN, J.C. *Static tests on various types of shear connectors for composite structures*, In: International Symposium on Connections Between Steel and Concrete, University of Stuttgart, Vol.2, pp. 1313-1322, 2001.

GHAVAMI, K. Ultimate load behaviour of flexible and rigid connectors in composite beams. *Journal Construction Steel Research*, v.46, p.208-210, 1998.

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, Vol.2, pp. 1024-1045, 2001.

KRAUS, D.; WURZER, O. Bearing capacity of concrete dowels, *IABSE*, Innsbruck, pp. 133-138, 1997

LEONHARDT, F.; ANDRÄ, W.; ANDRÄ, H.P.; HARRE, W. Neues vorteilhaftes verbundmittel für stahlverbund-tragwerk mit höher dauerfestigkeit (New Improved Shear Connector With High Fatigue Strength for Composite Structures). *Beton und Stahlbetonbau*, Berlim, No. 12, pp. 325-331, 1987.

MEDBERRY, S. B.; SHAHROOZ, B. M. Perfobond Shear Connector for Composite Construction, *AISC Engineering Journal*, Chicago, 2002-1, pp.2-12, 2002.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. Estatística aplicada à engenharia, 2a. edição, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2004.

NISHIDO, T.; FUJII, K.; ARIYOSHI, T. *Slip behavior of Perfobond rib shear connectors and its treatment in FEM*. In: Conference Composite Construction in Steel and Concrete IV, Proceedings of the Conference Composite Construction in Steel and Concrete IV, Banff, Alberta, Canada, 2000, pp. 379-390.

NP EN 206-1:2005 Betão Parte 1 – Especificação, desempenho, produção e conformidade. Versão portuguesa da norma europeia EN 206-1:2000 + A1:2004, Instituto Português de Qualidade, 2005.

OGUEJIOFOR, E. C. *Behaviour of Perfobond rib shear connectors in composite beams: full-size tests*. M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1990.

OGUEJIOFOR, E. C. *Perfobond rib shear connectors for composite beams*. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1994.

OGUEJIOFOR, E. C.; HOSAIN, M. U. Numerical analysis of push-out specimens with Perfobond rib connectors, *Computer and Structures*, Vol. 62, No. 4, p.617-624, 1997.

OLLGAARD, J. G.; SLUTTER, R. C.; FISHER, J. W.; Shear strength of stud connectors in lightweight and normal weight concrete, *American Institute of Steel Construction Engineering Journal*, 8(2), pp.55-64, 1971.

OWENS, G., WOOD, A. Worldwide use of steel in construction: strategies for growth, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 46, p.1-3, 1998.

OWENS, G. State of the art report: basic problems, design concepts and codification of steel and composite structures. *Journal of Constructional Steel Research*, v.55, p.7-27, 2000.

POOT, S. *Perfobond connection and tests*, In: International Symposium on Connections Between Steel and Concrete, University of Stuttgart, Vol.2, pp. 1095-1104, 2001.

QUDDUSI, F. *Behaviour of slotted and flexible Perfobond rib shear connectors*. M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1994.

SLUTTER, R. G., DRISCOLL, G. C. Test results and design recommendations for composite beams. Lehigh University Fritz Engineering Laboratory, Report No. 279.10, 1962.

SCHLEICH, J. *Development and application of saw-tooth connections for composite structures*, In: International Symposium on Connections Between Steel and Concrete, University of Stuttgart, Vol.2, pp. 1105-1118, 2001.

SCHMID, V. *Geometry, behaviour and design of high capacity saw-tooth connections*, In: International Symposium on Connections Between Steel and Concrete, University of Stuttgart, Vol.2, pp. 1119-1128, 2001.

STUDNICKA, J.; MACHACEK, J.; KRATA, A.; SVITAKOVA, M.; (2000) “*Perforated shear connector for composite steel and concrete beams*”, Proceedings of the Conference Composite Construction in Steel and Concrete IV, Banff, Alberta, Canada, pp. 367-378.

VALENTE, M.I.B. Estudo Experimental de Sistemas de Conexão para Pontes Mistas de Aço e Betão Leve, Tese de Doutorado, Depto. de Eng. Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2007.

VELDANDA, M. R. *Behavior of Perfobond rib connectors: push-out tests*, Master Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1991.

VERÍSSIMO, G. S.; VALENTE, M. I. B.; PAES, J. L. R.; CRUZ, P. J. S.; FAKURY, R. H.; “Design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures”, IABMAS'06 Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto, 2006.

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 de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

VIEST, I.M. Investigation of stud shear connectors for composite concrete and steel T-beams. *Journal of the American Concrete Institute*, 27(8), 875-891, 1956.

ZELLNER, W. Recent designs of composite bridges and a new type of shear connectors. *Proceedings of the IABSE/ASCE Engineering Foundation Conference on Composite Construction*, Henniker, N.H., pp.240-252, 1987.

Apêndices

A Resultados das análises dos modelos semiempíricos para conectores Perfobond

A.1 Verificação da hipótese de Kraus e Wurzer

A.1.1 Cisalhamento duplo dos pinos de concreto

TABELA A. 1 – Resultados dos ensaios de Oguejiofor para a equação (5-1), em N.

Designação	q_{test}	$h_{sc} t_{sc} f_c$	$nD^2 \sqrt{f_c}$	$\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \times 10^7$
EB-1	179400,00	34522,41	0,00	0,00
EB-2	249100,00	34522,41	22863,73	0,00
EB-3	274000,00	34522,41	34295,59	0,00
EB-4	276500,00	34522,41	34896,58	0,00
EB-5	292000,00	34522,41	0,00	49505,77
EB-6	375200,00	34522,41	22863,73	49505,77
EB-7	393600,00	34522,41	34295,59	49505,77
EB-8	363700,00	34522,41	34896,58	49505,77
EC-1	396100,00	56216,55	0,00	49505,77
EC-2	563000,00	68400,93	32183,07	49505,77
EC-3	597800,00	68400,93	48274,61	49505,77
EC-4	595900,00	68400,93	49120,56	49505,77
EC-5	431000,00	68400,93	0,00	49505,77
EC-6	528100,00	68400,93	32183,07	49505,77
EC-7	584900,00	68400,93	48274,61	49505,77
EC-8	577900,00	68400,93	49120,56	49505,77
ED-1	240700,00	40977,82	0,00	25065,79
ED-2	304900,00	40977,82	24909,84	25065,79
ED-3	343800,00	40977,82	37364,76	25065,79
ED-4	364700,00	40977,82	38019,53	25065,79
ED-5	413500,00	40977,82	0,00	74571,55
ED-6	533100,00	40977,82	24909,84	74571,55
ED-7	580900,00	40977,82	37364,76	74571,55
ED-8	577900,00	40977,82	38019,53	74571,55
EPS-1A	543200,00	45385,99	39323,18	74103,45
EPS-1B	554200,00	45385,99	39323,18	74103,45
EPS-2A	349800,00	45881,29	39537,17	24493,71
EPS-2B	345900,00	45881,29	39537,17	24493,71
EPS-3A	464400,00	42876,47	38220,58	74103,45
EPS-3B	435500,00	42876,47	38220,58	74103,45
EPS-4A	544100,00	44329,35	38862,74	74103,45
EPS-4B	502200,00	44329,35	38862,74	74103,45
EPS-5A	398600,00	45435,52	26229,75	45596,86
EPS-5B	432500,00	45435,52	26229,75	57446,22
EPS-5C	471800,00	45435,52	26229,75	58694,95
EPS-5D	493200,00	45435,52	26229,75	73948,14
EPS-6A	485800,00	43388,28	25632,01	58694,95
EPS-6B	477300,00	43388,28	25632,01	58694,95
EPS-6C	552000,00	43388,28	38448,02	73948,14
EPS-6D	533100,00	43388,28	38448,02	73948,14

TABELA A. 2 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	q_{test} (kN)	q_{calc} (kN)	$q_{\text{test}}/q_{\text{calc}}$	resíduo (kN)
EB-1	179,4	149,3	1,20	30,1
EB-2	249,1	204,3	1,22	44,8
EB-3	274,0	231,9	1,18	42,1
EB-4	276,5	259,4	1,07	17,1
EB-5	292,0	312,0	0,94	-20,0
EB-6	375,2	367,1	1,02	8,1
EB-7	393,6	394,6	1,00	-1,0
EB-8	363,7	422,1	0,86	-58,4
EC-1	396,1	405,9	0,98	-9,8
EC-2	563,0	536,0	1,05	27,0
EC-3	597,8	574,8	1,04	23,0
EC-4	595,9	613,5	0,97	-17,6
EC-5	431,0	458,5	0,94	-27,5
EC-6	528,1	536,0	0,99	-7,9
EC-7	584,9	574,8	1,02	10,1
EC-8	577,9	613,5	0,94	-35,6
ED-1	240,7	259,6	0,93	-18,9
ED-2	304,9	319,6	0,95	-14,7
ED-3	343,8	349,6	0,98	-5,8
ED-4	364,7	379,5	0,96	-14,8
ED-5	413,5	422,4	0,98	-8,9
ED-6	533,1	482,3	1,11	50,8
ED-7	580,9	512,3	1,13	68,6
ED-8	577,9	542,3	1,07	35,6
EPS-1A	543,2	534,5	1,02	8,7
EPS-1B	554,2	534,5	1,04	19,7
EPS-2A	349,8	374,1	0,93	-24,3
EPS-2B	345,9	374,1	0,92	-28,2
EPS-3A	464,4	521,0	0,89	-56,6
EPS-3B	435,5	521,0	0,84	-85,5
EPS-4A	544,1	528,9	1,03	15,2
EPS-4B	502,2	528,9	0,95	-26,7
EPS-5A	398,6	409,5	0,97	-10,9
EPS-5B	432,5	448,5	0,96	-16,0
EPS-5C	471,8	452,6	1,04	19,2
EPS-5D	493,2	502,7	0,98	-9,5
EPS-6A	485,8	442,3	1,10	43,5
EPS-6B	477,3	442,3	1,08	35,0
EPS-6C	552,0	523,3	1,05	28,7
EPS-6D	533,1	523,3	1,02	9,8

R^2 ajustado = 0,9947
RMSE = 31,8 kN

A.1.2 Compressão direta da laje contra as paredes dos furos

TABELA A. 3 – Resultados dos ensaios de Oguejiofor para a equação (5-2), em N.

Designação	q_{test}	$h_{sc} t_{sc} f_c$	$n D f_c$	$\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \times 10^7$
EB-1	179400,00	34522,41	0,00	0,00
EB-2	249100,00	34522,41	2091,00	0,00
EB-3	274000,00	34522,41	3136,50	0,00
EB-4	276500,00	34522,41	4182,00	0,00
EB-5	292000,00	34522,41	0,00	49505,77
EB-6	375200,00	34522,41	2091,00	49505,77
EB-7	393600,00	34522,41	3136,50	49505,77
EB-8	363700,00	34522,41	4182,00	49505,77
EC-1	396100,00	56216,55	0,00	49505,77
EC-2	563000,00	68400,93	4143,00	49505,77
EC-3	597800,00	68400,93	6214,50	49505,77
EC-4	595900,00	68400,93	8286,00	49505,77
EC-5	431000,00	68400,93	0,00	49505,77
EC-6	528100,00	68400,93	4143,00	49505,77
EC-7	584900,00	68400,93	6214,50	49505,77
EC-8	577900,00	68400,93	8286,00	49505,77
ED-1	240700,00	40977,82	0,00	25065,79
ED-2	304900,00	40977,82	2482,00	25065,79
ED-3	343800,00	40977,82	3723,00	25065,79
ED-4	364700,00	40977,82	4964,00	25065,79
ED-5	413500,00	40977,82	0,00	74571,55
ED-6	533100,00	40977,82	2482,00	74571,55
ED-7	580900,00	40977,82	3723,00	74571,55
ED-8	577900,00	40977,82	4964,00	74571,55
EPS-1A	543200,00	45385,99	4123,50	74103,45
EPS-1B	554200,00	45385,99	4123,50	74103,45
EPS-2A	349800,00	45881,29	4168,50	24493,71
EPS-2B	345900,00	45881,29	4168,50	24493,71
EPS-3A	464400,00	42876,47	3895,50	74103,45
EPS-3B	435500,00	42876,47	3895,50	74103,45
EPS-4A	544100,00	44329,35	4027,50	74103,45
EPS-4B	502200,00	44329,35	4027,50	74103,45
EPS-5A	398600,00	45435,52	2752,00	45596,86
EPS-5B	432500,00	45435,52	2752,00	57446,22
EPS-5C	471800,00	45435,52	2752,00	58694,95
EPS-5D	493200,00	45435,52	2752,00	73948,14
EPS-6A	485800,00	43388,28	2628,00	58694,95
EPS-6B	477300,00	43388,28	2628,00	58694,95
EPS-6C	552000,00	43388,28	3942,00	73948,14
EPS-6D	533100,00	43388,28	3942,00	73948,14

TABELA A. 4 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	q_{test} (kN)	q_{calc} (kN)	$q_{\text{test}}/q_{\text{calc}}$	resíduo (kN)
EB-1	179,4	146,4	1,23	33,0
EB-2	249,1	190,2	1,31	58,9
EB-3	274,0	212,1	1,29	61,9
EB-4	276,5	234,1	1,18	42,4
EB-5	292,0	316,5	0,92	-24,5
EB-6	375,2	360,3	1,04	14,9
EB-7	393,6	382,2	1,03	11,4
EB-8	363,7	404,1	0,90	-40,4
EC-1	396,1	408,4	0,97	-12,3
EC-2	563,0	547,0	1,03	16,0
EC-3	597,8	590,4	1,01	7,4
EC-4	595,9	633,8	0,94	-37,9
EC-5	431,0	460,1	0,94	-29,1
EC-6	528,1	547,0	0,97	-18,9
EC-7	584,9	590,4	0,99	-5,5
EC-8	577,9	633,8	0,91	-55,9
ED-1	240,7	259,9	0,93	-19,2
ED-2	304,9	311,9	0,98	-7,0
ED-3	343,8	337,9	1,02	5,9
ED-4	364,7	363,9	1,00	0,8
ED-5	413,5	429,9	0,96	-16,4
ED-6	533,1	482,0	1,11	51,1
ED-7	580,9	508,0	1,14	72,9
ED-8	577,9	534,0	1,08	43,9
EPS-1A	543,2	533,4	1,02	9,8
EPS-1B	554,2	533,4	1,04	20,8
EPS-2A	349,8	366,1	0,96	-16,3
EPS-2B	345,9	366,1	0,94	-20,2
EPS-3A	464,4	518,0	0,90	-53,6
EPS-3B	435,5	518,0	0,84	-82,5
EPS-4A	544,1	527,0	1,03	17,1
EPS-4B	502,2	527,0	0,95	-24,8
EPS-5A	398,6	407,0	0,98	-8,4
EPS-5B	432,5	447,7	0,97	-15,2
EPS-5C	471,8	452,0	1,04	19,8
EPS-5D	493,2	504,4	0,98	-11,2
EPS-6A	485,8	440,7	1,10	45,1
EPS-6B	477,3	440,7	1,08	36,6
EPS-6C	552,0	520,6	1,06	31,4
EPS-6D	533,1	520,6	1,02	12,5

R^2 ajustado = 0,9939
RMSE = 34,2 kN

A.2 Estudo da influência do espaçamento entre os furos do conector

TABELA A. 5 – Resultados dos ensaios de Oguejiofor para a equação (5-6), em N.

Designação	q_{teste}	$h_{sc} t_{sc} f_c$	$\alpha n D^2 \sqrt{f_c}$	$\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \times 10^7$
EB-1	179400,00	34522,41	0,00	0,00
EB-2	249100,00	34522,41	22863,73	0,00
EB-3	274000,00	34522,41	34295,59	0,00
EB-4	276500,00	34522,41	34896,58	0,00
EB-5	292000,00	34522,41	0,00	49505,77
EB-6	375200,00	34522,41	22863,73	49505,77
EB-7	393600,00	34522,41	34295,59	49505,77
EB-8	363700,00	34522,41	34896,58	49505,77
EC-1	396100,00	56216,55	0,00	49505,77
EC-2	563000,00	68400,93	32183,07	49505,77
EC-3	597800,00	68400,93	48274,61	49505,77
EC-4	595900,00	68400,93	49120,56	49505,77
EC-5	431000,00	68400,93	0,00	49505,77
EC-6	528100,00	68400,93	32183,07	49505,77
EC-7	584900,00	68400,93	48274,61	49505,77
EC-8	577900,00	68400,93	49120,56	49505,77
ED-1	240700,00	40977,82	0,00	25065,79
ED-2	304900,00	40977,82	24909,84	25065,79
ED-3	343800,00	40977,82	37364,76	25065,79
ED-4	364700,00	40977,82	38019,53	25065,79
ED-5	413500,00	40977,82	0,00	74571,55
ED-6	533100,00	40977,82	24909,84	74571,55
ED-7	580900,00	40977,82	37364,76	74571,55
ED-8	577900,00	40977,82	38019,53	74571,55
EPS-1A	543200,00	45385,99	39323,18	74103,45
EPS-1B	554200,00	45385,99	39323,18	74103,45
EPS-2A	349800,00	45881,29	39537,17	24493,71
EPS-2B	345900,00	45881,29	39537,17	24493,71
EPS-3A	464400,00	42876,47	38220,58	74103,45
EPS-3B	435500,00	42876,47	38220,58	74103,45
EPS-4A	544100,00	44329,35	38862,74	74103,45
EPS-4B	502200,00	44329,35	38862,74	74103,45
EPS-5A	398600,00	45435,52	26229,75	45596,86
EPS-5B	432500,00	45435,52	26229,75	57446,22
EPS-5C	471800,00	45435,52	26229,75	58694,95
EPS-5D	493200,00	45435,52	26229,75	73948,14
EPS-6A	485800,00	43388,28	25632,01	58694,95
EPS-6B	477300,00	43388,28	25632,01	58694,95
EPS-6C	552000,00	43388,28	38448,02	73948,14
EPS-6D	533100,00	43388,28	38448,02	73948,14

TABELA A. 6 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	q_{test} (kN)	q_{calc} (kN)	$q_{\text{test}}/q_{\text{calc}}$	resíduo (kN)
EB-1	179,4	148,6	1,21	30,8
EB-2	249,1	212,7	1,17	36,4
EB-3	274,0	244,8	1,12	29,2
EB-4	276,5	246,5	1,12	30,0
EB-5	292,0	305,3	0,96	-13,3
EB-6	375,2	369,4	1,02	5,8
EB-7	393,6	401,4	0,98	-7,8
EB-8	363,7	403,1	0,90	-39,4
EC-1	396,1	398,7	0,99	-2,6
EC-2	563,0	541,4	1,04	21,6
EC-3	597,8	586,5	1,02	11,3
EC-4	595,9	588,9	1,01	7,0
EC-5	431,0	451,2	0,96	-20,2
EC-6	528,1	541,4	0,98	-13,3
EC-7	584,9	586,5	1,00	-1,6
EC-8	577,9	588,9	0,98	-11,0
ED-1	240,7	255,8	0,94	-15,1
ED-2	304,9	325,6	0,94	-20,7
ED-3	343,8	360,5	0,95	-16,7
ED-4	364,7	362,3	1,01	2,4
ED-5	413,5	412,4	1,00	1,1
ED-6	533,1	482,3	1,11	50,8
ED-7	580,9	517,2	1,12	63,7
ED-8	577,9	519,0	1,11	58,9
EPS-1A	543,2	540,2	1,01	3,0
EPS-1B	554,2	540,2	1,03	14,0
EPS-2A	349,8	385,9	0,91	-36,1
EPS-2B	345,9	385,9	0,90	-40,0
EPS-3A	464,4	526,3	0,88	-61,9
EPS-3B	435,5	526,3	0,83	-90,8
EPS-4A	544,1	534,3	1,02	9,8
EPS-4B	502,2	534,3	0,94	-32,1
EPS-5A	398,6	413,4	0,96	-14,8
EPS-5B	432,5	450,9	0,96	-18,4
EPS-5C	471,8	454,9	1,04	16,9
EPS-5D	493,2	503,2	0,98	-10,0
EPS-6A	485,8	444,4	1,09	41,4
EPS-6B	477,3	444,4	1,07	32,9
EPS-6C	552,0	528,6	1,04	23,4
EPS-6D	533,1	528,6	1,01	4,5

R^2 ajustado = 0,9949
RMSE = 31,2 kN

A.3 Estudo da influência da densidade do concreto na capacidade da conexão

A.3.1 Cisalhamento da laje de concreto

TABELA A. 7 – Resultados dos ensaios de Oguejiofor para a equação (5-10), em N

Designação	q_{teste}	$A_{cc}E_{cs}$	nD^2E_{cs}	$A_{tr}f_{yr}$
EB-1	179400,00	1402837963,33	0,00	0,00
EB-2	249100,00	1402837963,33	115747616,57	0,00
EB-3	274000,00	1402837963,33	173621424,86	0,00
EB-4	276500,00	1402837963,33	231495233,14	0,00
EB-5	292000,00	1402837963,33	0,00	127980,00
EB-6	375200,00	1402837963,33	115747616,57	127980,00
EB-7	393600,00	1402837963,33	173621424,86	127980,00
EB-8	363700,00	1402837963,33	231495233,14	127980,00
EC-1	396100,00	1790148470,88	0,00	127980,00
EC-2	563000,00	1974640137,29	162926792,30	127980,00
EC-3	597800,00	1974640137,29	244390188,45	127980,00
EC-4	595900,00	1974640137,29	325853584,60	127980,00
EC-5	431000,00	1974640137,29	0,00	127980,00
EC-6	528100,00	1974640137,29	162926792,30	127980,00
EC-7	584900,00	1974640137,29	244390188,45	127980,00
EC-8	577900,00	1974640137,29	325853584,60	127980,00
ED-1	240700,00	1528380127,93	0,00	61730,60
ED-2	304900,00	1528380127,93	126106051,91	61730,60
ED-3	343800,00	1528380127,93	189159077,86	61730,60
ED-4	364700,00	1528380127,93	252212103,82	61730,60
ED-5	413500,00	1528380127,93	0,00	183650,60
ED-6	533100,00	1528380127,93	126106051,91	183650,60
ED-7	580900,00	1528380127,93	189159077,86	183650,60
ED-8	577900,00	1528380127,93	252212103,82	183650,60
EPS-1A	543200,00	1605117162,77	199073599,70	182115,30
EPS-1B	554200,00	1605117162,77	199073599,70	182115,30
EPS-2A	349800,00	1613851766,51	200156903,18	60195,30
EPS-2B	345900,00	1613851766,51	200156903,18	60195,30
EPS-3A	464400,00	1560110441,01	193491670,65	182115,30
EPS-3B	435500,00	1560110441,01	193491670,65	182115,30
EPS-4A	544100,00	1586322607,29	196742617,32	182115,30
EPS-4B	502200,00	1586322607,29	196742617,32	182115,30
EPS-5A	398600,00	2027595074,01	132788130,12	141475,30
EPS-5B	432500,00	1609365579,39	132788130,12	141475,30
EPS-5C	471800,00	2027595074,01	132788130,12	182115,30
EPS-5D	493200,00	1609365579,39	132788130,12	182115,30
EPS-6A	485800,00	1981388751,35	129762056,88	182115,30
EPS-6B	477300,00	1981388751,35	129762056,88	182115,30
EPS-6C	552000,00	1572690177,00	194643085,32	182115,30
EPS-6D	533100,00	1572690177,00	194643085,32	182115,30
CP1.1	317683,30	1604906124,20	200613265,52	106028,75
CP2.1	390570,94	1573237375,05	196654671,88	141371,67
CP3.1	237677,15	1587194834,33	198399354,29	141371,67
CP4.1	502099,58	1723791343,24	215473917,91	212057,50
CP1.2	375122,00	1448557285,37	181069660,67	203569,60
CP2.2	416788,50	1439512199,04	179939024,88	248808,54
CP4.2	533613,50	1479283594,27	184910449,28	339286,41
CP5.2	310972,00	1539849087,09	0,00	203569,60
CP6.2	559438,50	1572429565,01	196553695,63	308067,34

TABELA A. 8 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{test} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{test} /Q _{calc}	resíduo (kN)
EB-1	179,4	200,6	0,89	-21,2
EB-2	249,1	259,5	0,96	-10,4
EB-3	274	289,0	0,95	-15,0
EB-4	276,5	318,4	0,87	-41,9
EB-5	292	312,9	0,93	-20,9
EB-6	375,2	371,8	1,01	3,4
EB-7	393,6	401,3	0,98	-7,7
EB-8	363,7	430,8	0,84	-67,1
EC-1	396,1	368,3	1,08	27,8
EC-2	563	477,6	1,18	85,4
EC-3	597,8	519,1	1,15	78,7
EC-4	595,9	560,6	1,06	35,3
EC-5	431	394,7	1,09	36,3
EC-6	528,1	477,6	1,11	50,5
EC-7	584,9	519,1	1,13	65,8
EC-8	577,9	560,6	1,03	17,3
ED-1	240,7	272,7	0,88	-32,0
ED-2	304,9	336,9	0,90	-32,0
ED-3	343,8	369,0	0,93	-25,2
ED-4	364,7	401,1	0,91	-36,4
ED-5	413,5	379,7	1,09	33,8
ED-6	533,1	443,9	1,20	89,2
ED-7	580,9	476,0	1,22	104,9
ED-8	577,9	508,1	1,14	69,8
EPS-1A	543,2	490,7	1,11	52,5
EPS-1B	554,2	490,7	1,13	63,5
EPS-2A	349,8	385,5	0,91	-35,7
EPS-2B	345,9	385,5	0,90	-39,6
EPS-3A	464,4	481,4	0,96	-17,0
EPS-3B	435,5	481,4	0,90	-45,9
EPS-4A	544,1	486,8	1,12	57,3
EPS-4B	502,2	486,8	1,03	15,4
EPS-5A	398,6	481,7	0,83	-83,1
EPS-5B	432,5	421,9	1,03	10,6
EPS-5C	471,8	517,4	0,91	-45,6
EPS-5D	493,2	457,6	1,08	35,6
EPS-6A	485,8	509,2	0,95	-23,4
EPS-6B	477,3	509,2	0,94	-31,9
EPS-6C	552	483,8	1,14	68,2
EPS-6D	533,1	483,8	1,10	49,3
CP1.1	317,7	424,7	0,75	-107,0
CP2.1	390,6	449,1	0,87	-58,6
CP3.1	237,7	452,0	0,53	-214,4
CP4.1	502,1	542,3	0,93	-40,2
CP1.2	375,1	478,0	0,78	-102,9
CP2.2	416,8	515,8	0,81	-99,0
CP4.2	533,6	603,4	0,88	-69,8
CP5.2	311,0	398,9	0,78	-87,9
CP6.2	559,4	595,3	0,94	-35,8

R^2 ajustado = 0,9795
RMSE = 62,6 kN

A.3.2 Compressão frontal

TABELA A. 9 – Resultados dos ensaios de Oguejiofor para a equação (5-12), em N.

Designação	q_{teste}	$h_{sc} t_{sc} E_{cs}$	$nD^2 E_{cs}$	$A_{tr} f_{yr}$
EB-1	179400,00	38219862,99	0,00	0,00
EB-2	249100,00	38219862,99	115747616,57	0,00
EB-3	274000,00	38219862,99	173621424,86	0,00
EB-4	276500,00	38219862,99	231495233,14	0,00
EB-5	292000,00	38219862,99	0,00	127980,00
EB-6	375200,00	38219862,99	115747616,57	127980,00
EB-7	393600,00	38219862,99	173621424,86	127980,00
EB-8	363700,00	38219862,99	231495233,14	127980,00
EC-1	396100,00	48772011,51	0,00	127980,00
EC-2	563000,00	53798426,82	162926792,30	127980,00
EC-3	597800,00	53798426,82	244390188,45	127980,00
EC-4	595900,00	53798426,82	325853584,60	127980,00
EC-5	431000,00	53798426,82	0,00	127980,00
EC-6	528100,00	53798426,82	162926792,30	127980,00
EC-7	584900,00	53798426,82	244390188,45	127980,00
EC-8	577900,00	53798426,82	325853584,60	127980,00
ED-1	240700,00	41640218,34	0,00	61730,60
ED-2	304900,00	41640218,34	126106051,91	61730,60
ED-3	343800,00	41640218,34	189159077,86	61730,60
ED-4	364700,00	41640218,34	252212103,82	61730,60
ED-5	413500,00	41640218,34	0,00	183650,60
ED-6	533100,00	41640218,34	126106051,91	183650,60
ED-7	580900,00	41640218,34	189159077,86	183650,60
ED-8	577900,00	41640218,34	252212103,82	183650,60
EPS-1A	543200,00	43822735,08	199073599,70	182115,30
EPS-1B	554200,00	43822735,08	199073599,70	182115,30
EPS-2A	349800,00	44061206,29	200156903,18	60195,30
EPS-2B	345900,00	44061206,29	200156903,18	60195,30
EPS-3A	464400,00	42593966,43	193491670,65	182115,30
EPS-3B	435500,00	42593966,43	193491670,65	182115,30
EPS-4A	544100,00	43309608,16	196742617,32	182115,30
EPS-4B	502200,00	43309608,16	196742617,32	182115,30
EPS-5A	398600,00	43846640,56	132788130,12	141475,30
EPS-5B	432500,00	43846640,56	132788130,12	141475,30
EPS-5C	471800,00	43846640,56	132788130,12	182115,30
EPS-5D	493200,00	43846640,56	132788130,12	182115,30
EPS-6A	485800,00	42847431,18	129762056,88	182115,30
EPS-6B	477300,00	42847431,18	129762056,88	182115,30
EPS-6C	552000,00	42847431,18	194643085,32	182115,30
EPS-6D	533100,00	42847431,18	194643085,32	182115,30
CP1.1	317683,30	34772966,02	200613265,52	106028,75
CP2.1	390570,94	34086809,79	196654671,88	141371,67
CP3.1	237677,15	0,00	198399354,29	141371,67
CP4.1	502099,58	37348812,44	215473917,91	212057,50
CP1.2	375122,00	31385407,85	181069660,67	203569,60
CP2.2	416788,50	31189430,98	179939024,88	248808,54
CP4.2	533613,50	32051144,54	184910449,28	339286,41
CP5.2	310972,00	33363396,89	0,00	203569,60
CP6.2	559438,50	34069307,24	196553695,63	308067,34

TABELA A. 10 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{test} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{test} /Q _{calc}	resíduo (kN)
EB-1	179,4	209,4	0,86	-30,0
EB-2	249,1	263,8	0,94	-14,7
EB-3	274	291,0	0,94	-17,0
EB-4	276,5	318,2	0,87	-41,7
EB-5	292	329,8	0,89	-37,8
EB-6	375,2	384,2	0,98	-9,0
EB-7	393,6	411,4	0,96	-17,8
EB-8	363,7	438,6	0,83	-74,9
EC-1	396,1	387,6	1,02	8,5
EC-2	563	491,7	1,14	71,3
EC-3	597,8	530,0	1,13	67,8
EC-4	595,9	568,3	1,05	27,6
EC-5	431	415,1	1,04	15,9
EC-6	528,1	491,7	1,07	36,4
EC-7	584,9	530,0	1,10	54,9
EC-8	577,9	568,3	1,02	9,6
ED-1	240,7	286,2	0,84	-45,5
ED-2	304,9	345,5	0,88	-40,6
ED-3	343,8	375,1	0,92	-31,3
ED-4	364,7	404,8	0,90	-40,1
ED-5	413,5	400,9	1,03	12,6
ED-6	533,1	460,2	1,16	72,9
ED-7	580,9	489,8	1,19	91,1
ED-8	577,9	519,4	1,11	58,5
EPS-1A	543,2	505,0	1,08	38,2
EPS-1B	554,2	505,0	1,10	49,2
EPS-2A	349,8	392,1	0,89	-42,3
EPS-2B	345,9	392,1	0,88	-46,2
EPS-3A	464,4	495,6	0,94	-31,2
EPS-3B	435,5	495,6	0,88	-60,1
EPS-4A	544,1	501,1	1,09	43,0
EPS-4B	502,2	501,1	1,00	1,1
EPS-5A	398,6	435,7	0,91	-37,1
EPS-5B	432,5	435,7	0,99	-3,2
EPS-5C	471,8	474,0	1,00	-2,2
EPS-5D	493,2	474,0	1,04	19,2
EPS-6A	485,8	467,1	1,04	18,7
EPS-6B	477,3	467,1	1,02	10,2
EPS-6C	552	497,5	1,11	54,5
EPS-6D	533,1	497,5	1,07	35,6
CP1.1	317,7	384,5	0,83	-66,9
CP2.1	390,6	412,2	0,95	-21,6
CP3.1	237,7	226,2	1,05	11,4
CP4.1	502,1	505,4	0,99	-3,3
CP1.2	375,1	448,6	0,84	-73,4
CP2.2	416,8	489,5	0,85	-72,7
CP4.2	533,6	581,7	0,92	-48,1
CP5.2	311,0	374,3	0,83	-63,3
CP6.2	559,4	568,8	0,98	-9,4

R^2 ajustado = 0,990
RMSE = 43,3 kN

A.3.3 Compressão frontal associada ao módulo de elasticidade ao quadrado

TABELA A. 11 – Resultados dos ensaios de Oguejiofor para a equação (5-13), em N.

Designação	q_{teste}	$h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 / 10^6$	$nD^2 E_{cs}$	$A_{tr} f_{yr}$
EB-1	179400,00	884771,61	0,00	0,00
EB-2	249100,00	884771,61	115747,62	0,00
EB-3	274000,00	884771,61	173621,42	0,00
EB-4	276500,00	884771,61	231495,23	0,00
EB-5	292000,00	884771,61	0,00	127980,00
EB-6	375200,00	884771,61	115747,62	127980,00
EB-7	393600,00	884771,61	173621,42	127980,00
EB-8	363700,00	884771,61	231495,23	127980,00
EC-1	396100,00	1440768,69	0,00	127980,00
EC-2	563000,00	1753041,02	162926,79	127980,00
EC-3	597800,00	1753041,02	244390,19	127980,00
EC-4	595900,00	1753041,02	325853,58	127980,00
EC-5	431000,00	1753041,02	0,00	127980,00
EC-6	528100,00	1753041,02	162926,79	127980,00
EC-7	584900,00	1753041,02	244390,19	127980,00
EC-8	577900,00	1753041,02	325853,58	127980,00
ED-1	240700,00	1050216,71	0,00	61730,60
ED-2	304900,00	1050216,71	126106,05	61730,60
ED-3	343800,00	1050216,71	189159,08	61730,60
ED-4	364700,00	1050216,71	252212,10	61730,60
ED-5	413500,00	1050216,71	0,00	183650,60
ED-6	533100,00	1050216,71	126106,05	183650,60
ED-7	580900,00	1050216,71	189159,08	183650,60
ED-8	577900,00	1050216,71	252212,10	183650,60
EPS-1A	543200,00	1163193,28	199073,60	182115,30
EPS-1B	554200,00	1163193,28	199073,60	182115,30
EPS-2A	349800,00	1175887,28	200156,90	60195,30
EPS-2B	345900,00	1175887,28	200156,90	60195,30
EPS-3A	464400,00	1098877,03	193491,67	182115,30
EPS-3B	435500,00	1098877,03	193491,67	182115,30
EPS-4A	544100,00	1136112,76	196742,62	182115,30
EPS-4B	502200,00	1136112,76	196742,62	182115,30
EPS-5A	398600,00	1164462,68	132788,13	141475,30
EPS-5B	432500,00	1164462,68	132788,13	141475,30
EPS-5C	471800,00	1164462,68	132788,13	182115,30
EPS-5D	493200,00	1164462,68	132788,13	182115,30
EPS-6A	485800,00	1111994,16	129762,06	182115,30
EPS-6B	477300,00	1111994,16	129762,06	182115,30
EPS-6C	552000,00	1111994,16	194643,09	182115,30
EPS-6D	533100,00	1111994,16	194643,09	182115,30
CP1.1	317683,30	930122,44	200613,27	106028,75
CP2.1	390570,94	893777,39	196654,67	141371,67
CP3.1	237677,15	0,00	198399,35	141371,67
CP4.1	502099,58	1073025,99	215473,92	212057,50
CP1.2	375122,00	757726,02	181069,66	203569,60
CP2.2	416788,50	748292,77	179939,02	248808,54
CP4.2	533613,50	790212,20	184910,45	339286,41
CP5.2	310972,00	856243,27	0,00	203569,60
CP6.2	559438,50	892859,77	196553,70	308067,34

TABELA A. 12 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{test} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{test} /Q _{calc}	resíduo (kN)
EB-1	179,4	170,7	1,05	8,7
EB-2	249,1	224,9	1,11	24,2
EB-3	274	251,9	1,09	22,1
EB-4	276,5	279,0	0,99	-2,5
EB-5	292	299,7	0,97	-7,7
EB-6	375,2	353,9	1,06	21,3
EB-7	393,6	380,9	1,03	12,7
EB-8	363,7	408,0	0,89	-44,3
EC-1	396,1	407,0	0,97	-10,9
EC-2	563	543,5	1,04	19,5
EC-3	597,8	581,6	1,03	16,2
EC-4	595,9	619,7	0,96	-23,8
EC-5	431	467,3	0,92	-36,3
EC-6	528,1	543,5	0,97	-15,4
EC-7	584,9	581,6	1,01	3,3
EC-8	577,9	619,7	0,93	-41,8
ED-1	240,7	264,9	0,91	-24,2
ED-2	304,9	323,9	0,94	-19,0
ED-3	343,8	353,4	0,97	-9,6
ED-4	364,7	382,9	0,95	-18,2
ED-5	413,5	387,8	1,07	25,7
ED-6	533,1	446,8	1,19	86,3
ED-7	580,9	476,3	1,22	104,6
ED-8	577,9	505,7	1,14	72,2
EPS-1A	543,2	501,1	1,08	42,1
EPS-1B	554,2	501,1	1,11	53,1
EPS-2A	349,8	381,2	0,92	-31,4
EPS-2B	345,9	381,2	0,91	-35,3
EPS-3A	464,4	486,1	0,96	-21,7
EPS-3B	435,5	486,1	0,90	-50,6
EPS-4A	544,1	494,8	1,10	49,3
EPS-4B	502,2	494,8	1,01	7,4
EPS-5A	398,6	429,4	0,93	-30,8
EPS-5B	432,5	429,4	1,01	3,1
EPS-5C	471,8	470,4	1,00	1,4
EPS-5D	493,2	470,4	1,05	22,8
EPS-6A	485,8	458,8	1,06	27,0
EPS-6B	477,3	458,8	1,04	18,5
EPS-6C	552	489,2	1,13	62,8
EPS-6D	533,1	489,2	1,09	43,9
CP1.1	317,7	380,2	0,84	-62,5
CP2.1	390,6	407,0	0,96	-16,4
CP3.1	237,7	235,3	1,01	2,4
CP4.1	502,1	521,6	0,96	-19,5
CP1.2	375,1	436,1	0,86	-61,0
CP2.2	416,8	479,4	0,87	-62,6
CP4.2	533,6	581,0	0,92	-47,4
CP5.2	311,0	370,4	0,84	-59,4
CP6.2	559,4	574,8	0,97	-15,3

R^2 ajustado = 0,9921
RMSE = 38,6 kN

A.4 Estudo da influência da armadura na capacidade da conexão

A.4.1 Taxa geométrica

TABELA A. 13 – Resultados dos ensaios de Oguejiofor para a equação (5-15), em N.

Designação	q_{teste}	$h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 / 10^6$	$nD^2 E_{cs}$	$A_{tr} / A_{cc} \times 10^7$
EB-1	179400,00	884771,61	0,00	0,00
EB-2	249100,00	884771,61	115747,62	0,00
EB-3	274000,00	884771,61	173621,42	0,00
EB-4	276500,00	884771,61	231495,23	0,00
EB-5	292000,00	884771,61	0,00	49505,77
EB-6	375200,00	884771,61	115747,62	49505,77
EB-7	393600,00	884771,61	173621,42	49505,77
EB-8	363700,00	884771,61	231495,23	49505,77
EC-1	396100,00	1440768,69	0,00	49505,77
EC-2	563000,00	1753041,02	162926,79	49505,77
EC-3	597800,00	1753041,02	244390,19	49505,77
EC-4	595900,00	1753041,02	325853,58	49505,77
EC-5	431000,00	1753041,02	0,00	49505,77
EC-6	528100,00	1753041,02	162926,79	49505,77
EC-7	584900,00	1753041,02	244390,19	49505,77
EC-8	577900,00	1753041,02	325853,58	49505,77
ED-1	240700,00	1050216,71	0,00	25065,79
ED-2	304900,00	1050216,71	126106,05	25065,79
ED-3	343800,00	1050216,71	189159,08	25065,79
ED-4	364700,00	1050216,71	252212,10	25065,79
ED-5	413500,00	1050216,71	0,00	74571,55
ED-6	533100,00	1050216,71	126106,05	74571,55
ED-7	580900,00	1050216,71	189159,08	74571,55
ED-8	577900,00	1050216,71	252212,10	74571,55
EPS-1A	543200,00	1163193,28	199073,60	74103,45
EPS-1B	554200,00	1163193,28	199073,60	74103,45
EPS-2A	349800,00	1175887,28	200156,90	24493,71
EPS-2B	345900,00	1175887,28	200156,90	24493,71
EPS-3A	464400,00	1098877,03	193491,67	74103,45
EPS-3B	435500,00	1098877,03	193491,67	74103,45
EPS-4A	544100,00	1136112,76	196742,62	74103,45
EPS-4B	502200,00	1136112,76	196742,62	74103,45
EPS-5A	398600,00	1164462,68	132788,13	45596,86
EPS-5B	432500,00	1164462,68	132788,13	57446,22
EPS-5C	471800,00	1164462,68	132788,13	58694,95
EPS-5D	493200,00	1164462,68	132788,13	73948,14
EPS-6A	485800,00	1111994,16	129762,06	58694,95
EPS-6B	477300,00	1111994,16	129762,06	58694,95
EPS-6C	552000,00	1111994,16	194643,09	73948,14
EPS-6D	533100,00	1111994,16	194643,09	73948,14
CP1.1	317683,30	930122,44	200613,27	39269,91
CP2.1	390570,94	893777,39	196654,67	52359,88
CP3.1	237677,15	0,00	198399,35	52359,88
CP4.1	502099,58	1073025,99	215473,92	78539,82
CP1.2	375122,00	757726,02	181069,66	58903,24
CP2.2	416788,50	748292,77	179939,02	71993,21
CP4.2	533613,50	790212,20	184910,45	98173,15
CP5.2	310972,00	856243,27	0,00	58903,24
CP6.2	559438,50	892859,77	196553,70	98173,15

TABELA A. 14 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{test} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{test} /Q _{calc}	resíduo (kN)
EB-1	179,4	156,2	1,15	23,2
EB-2	249,1	207,2	1,20	41,9
EB-3	274	232,7	1,18	41,3
EB-4	276,5	258,2	1,07	18,3
EB-5	292	311,9	0,94	-19,9
EB-6	375,2	362,9	1,03	12,3
EB-7	393,6	388,4	1,01	5,2
EB-8	363,7	413,9	0,88	-50,2
EC-1	396,1	410,1	0,97	-14,0
EC-2	563	537,0	1,05	26,0
EC-3	597,8	572,9	1,04	24,9
EC-4	595,9	608,8	0,98	-12,9
EC-5	431	465,2	0,93	-34,2
EC-6	528,1	537,0	0,98	-8,9
EC-7	584,9	572,9	1,02	12,0
EC-8	577,9	608,8	0,95	-30,9
ED-1	240,7	264,3	0,91	-23,6
ED-2	304,9	319,8	0,95	-14,9
ED-3	343,8	347,6	0,99	-3,8
ED-4	364,7	375,4	0,97	-10,7
ED-5	413,5	420,0	0,98	-6,5
ED-6	533,1	475,5	1,12	57,6
ED-7	580,9	503,3	1,15	77,6
ED-8	577,9	531,1	1,09	46,8
EPS-1A	543,2	526,2	1,03	17,0
EPS-1B	554,2	526,2	1,05	28,0
EPS-2A	349,8	372,8	0,94	-23,0
EPS-2B	345,9	372,8	0,93	-26,9
EPS-3A	464,4	512,4	0,91	-48,0
EPS-3B	435,5	512,4	0,85	-76,9
EPS-4A	544,1	520,4	1,05	23,7
EPS-4B	502,2	520,4	0,97	-18,2
EPS-5A	398,6	407,5	0,98	-8,9
EPS-5B	432,5	444,8	0,97	-12,3
EPS-5C	471,8	448,7	1,05	23,1
EPS-5D	493,2	496,7	0,99	-3,5
EPS-6A	485,8	438,1	1,11	47,7
EPS-6B	477,3	438,1	1,09	39,2
EPS-6C	552	514,7	1,07	37,3
EPS-6D	533,1	514,7	1,04	18,4
CP1.1	317,7	376,1	0,84	-58,5
CP2.1	390,6	409,1	0,95	-18,6
CP3.1	237,7	252,1	0,94	-14,4
CP4.1	502,1	531,4	0,94	-29,3
CP1.2	375,1	398,8	0,94	-23,7
CP2.2	416,8	437,8	0,95	-21,1
CP4.2	533,6	529,8	1,01	3,8
CP5.2	311,0	336,4	0,92	-25,5
CP6.2	559,4	553,0	1,01	6,4

R^2 ajustado = 0,9948
RMSE = 31,4 kN

A.4.2 Taxa mecânica

TABELA A. 15 – Resultados dos ensaios de Oguejiofor para a equação (5-17), em N.

Designação	q_{teste}	$h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 / 10^6$	$nD^2 E_{cs}$	$(A_{tr} f_{yr} / A_{cc} E_{cs}^2) \times 10^9$
EB-1	179400,00	884771,61	0,00	0,00
EB-2	249100,00	884771,61	115747,62	0,00
EB-3	274000,00	884771,61	173621,42	0,00
EB-4	276500,00	884771,61	231495,23	0,00
EB-5	292000,00	884771,61	0,00	91229,35
EB-6	375200,00	884771,61	115747,62	91229,35
EB-7	393600,00	884771,61	173621,42	91229,35
EB-8	363700,00	884771,61	231495,23	91229,35
EC-1	396100,00	1440768,69	0,00	71491,28
EC-2	563000,00	1753041,02	162926,79	64811,81
EC-3	597800,00	1753041,02	244390,19	64811,81
EC-4	595900,00	1753041,02	325853,58	64811,81
EC-5	431000,00	1753041,02	0,00	64811,81
EC-6	528100,00	1753041,02	162926,79	64811,81
EC-7	584900,00	1753041,02	244390,19	64811,81
EC-8	577900,00	1753041,02	325853,58	64811,81
ED-1	240700,00	1050216,71	0,00	40389,56
ED-2	304900,00	1050216,71	126106,05	40389,56
ED-3	343800,00	1050216,71	189159,08	40389,56
ED-4	364700,00	1050216,71	252212,10	40389,56
ED-5	413500,00	1050216,71	0,00	120160,29
ED-6	533100,00	1050216,71	126106,05	120160,29
ED-7	580900,00	1050216,71	189159,08	120160,29
ED-8	577900,00	1050216,71	252212,10	120160,29
EPS-1A	543200,00	1163193,28	199073,60	113459,19
EPS-1B	554200,00	1163193,28	199073,60	113459,19
EPS-2A	349800,00	1175887,28	200156,90	37299,15
EPS-2B	345900,00	1175887,28	200156,90	37299,15
EPS-3A	464400,00	1098877,03	193491,67	116732,31
EPS-3B	435500,00	1098877,03	193491,67	116732,31
EPS-4A	544100,00	1136112,76	196742,62	114803,44
EPS-4B	502200,00	1136112,76	196742,62	114803,44
EPS-5A	398600,00	1164462,68	132788,13	69774,93
EPS-5B	432500,00	1164462,68	132788,13	87907,50
EPS-5C	471800,00	1164462,68	132788,13	89818,38
EPS-5D	493200,00	1164462,68	132788,13	113159,68
EPS-6A	485800,00	1111994,16	129762,06	91912,96
EPS-6B	477300,00	1111994,16	129762,06	91912,96
EPS-6C	552000,00	1111994,16	194643,09	115798,59
EPS-6D	533100,00	1111994,16	194643,09	115798,59
CP1.1	317683,30	930122,44	200613,27	66065,39
CP2.1	390570,94	893777,39	196654,67	89860,36
CP3.1	237677,15	0,00	198399,35	89070,14
CP4.1	502099,58	1073025,99	215473,92	123018,08
CP1.2	375122,00	757726,02	181069,66	140532,66
CP2.2	416788,50	748292,77	179939,02	172842,26
CP4.2	533613,50	790212,20	184910,45	229358,59
CP5.2	310972,00	856243,27	0,00	132201,01
CP6.2	559438,50	892859,77	196553,70	195918,06

TABELA A. 16 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{test} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{test} /Q _{calc}	resíduo (kN)
EB-1	179,4	186,0	0,96	-6,6
EB-2	249,1	238,3	1,05	10,8
EB-3	274	264,5	1,04	9,5
EB-4	276,5	290,6	0,95	-14,1
EB-5	292	319,4	0,91	-27,4
EB-6	375,2	371,7	1,01	3,5
EB-7	393,6	397,8	0,99	-4,2
EB-8	363,7	424,0	0,86	-60,3
EC-1	396,1	407,5	0,97	-11,4
EC-2	563	537,0	1,05	26,0
EC-3	597,8	573,8	1,04	24,0
EC-4	595,9	610,6	0,98	-14,7
EC-5	431	463,4	0,93	-32,4
EC-6	528,1	537,0	0,98	-8,9
EC-7	584,9	573,8	1,02	11,1
EC-8	577,9	610,6	0,95	-32,7
ED-1	240,7	279,9	0,86	-39,2
ED-2	304,9	336,8	0,91	-31,9
ED-3	343,8	365,3	0,94	-21,5
ED-4	364,7	393,8	0,93	-29,1
ED-5	413,5	396,5	1,04	17,0
ED-6	533,1	453,5	1,18	79,6
ED-7	580,9	481,9	1,21	99,0
ED-8	577,9	510,4	1,13	67,5
EPS-1A	543,2	500,4	1,09	42,8
EPS-1B	554,2	500,4	1,11	53,8
EPS-2A	349,8	392,2	0,89	-42,4
EPS-2B	345,9	392,2	0,88	-46,3
EPS-3A	464,4	489,1	0,95	-24,7
EPS-3B	435,5	489,1	0,89	-53,6
EPS-4A	544,1	495,6	1,10	48,5
EPS-4B	502,2	495,6	1,01	6,6
EPS-5A	398,6	406,8	0,98	-8,2
EPS-5B	432,5	433,4	1,00	-0,9
EPS-5C	471,8	436,1	1,08	35,7
EPS-5D	493,2	470,3	1,05	22,9
EPS-6A	485,8	426,8	1,14	59,0
EPS-6B	477,3	426,8	1,12	50,5
EPS-6C	552	491,0	1,12	61,0
EPS-6D	533,1	491,0	1,09	42,1
CP1.1	317,7	382,8	0,83	-65,1
CP2.1	390,6	408,1	0,96	-17,6
CP3.1	237,7	219,8	1,08	17,8
CP4.1	502,1	502,8	1,00	-0,7
CP1.2	375,1	446,6	0,84	-71,5
CP2.2	416,8	491,3	0,85	-74,5
CP4.2	533,6	585,0	0,91	-51,4
CP5.2	311,0	373,3	0,83	-62,3
CP6.2	559,4	563,0	0,99	-3,5

R^2 ajustado = 0,9907
RMSE = 41,3 kN

A.5 Estudo da influência da excentricidade do conector na capacidade da conexão

TABELA A. 17 – Resultados dos ensaios de Oguejiofor para a equação (5-19), em N.

Designação	q_{teste}	$\sqrt{h_{sc}/t_c} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 / 10^6$	$nD^2 E_{cs}$	$A_w / A_{cc} \times 10^7$
EB-1	179400,00	808744,32	0,00	0,00
EB-2	249100,00	808744,32	115747,62	0,00
EB-3	274000,00	808744,32	173621,42	0,00
EB-4	276500,00	808744,32	231495,23	0,00
EB-5	292000,00	808744,32	0,00	49505,77
EB-6	375200,00	808744,32	115747,62	49505,77
EB-7	393600,00	808744,32	173621,42	49505,77
EB-8	363700,00	808744,32	231495,23	49505,77
EC-1	396100,00	1316965,29	0,00	49505,77
EC-2	563000,00	1602404,46	162926,79	49505,77
EC-3	597800,00	1602404,46	244390,19	49505,77
EC-4	595900,00	1602404,46	325853,58	49505,77
EC-5	431000,00	1602404,46	0,00	49505,77
EC-6	528100,00	1602404,46	162926,79	49505,77
EC-7	584900,00	1602404,46	244390,19	49505,77
EC-8	577900,00	1602404,46	325853,58	49505,77
ED-1	240700,00	959972,94	0,00	25065,79
ED-2	304900,00	959972,94	126106,05	25065,79
ED-3	343800,00	959972,94	189159,08	25065,79
ED-4	364700,00	959972,94	252212,10	25065,79
ED-5	413500,00	959972,94	0,00	74571,55
ED-6	533100,00	959972,94	126106,05	74571,55
ED-7	580900,00	959972,94	189159,08	74571,55
ED-8	577900,00	959972,94	252212,10	74571,55
EPS-1A	543200,00	1063241,58	199073,60	74103,45
EPS-1B	554200,00	1063241,58	199073,60	74103,45
EPS-2A	349800,00	1074844,80	200156,90	24493,71
EPS-2B	345900,00	1074844,80	200156,90	24493,71
EPS-3A	464400,00	1004451,94	193491,67	74103,45
EPS-3B	435500,00	1004451,94	193491,67	74103,45
EPS-4A	544100,00	1038488,05	196742,62	74103,45
EPS-4B	502200,00	1038488,05	196742,62	74103,45
EPS-5A	398600,00	1064401,90	132788,13	45596,86
EPS-5B	432500,00	1064401,90	132788,13	57446,22
EPS-5C	471800,00	1064401,90	132788,13	58694,95
EPS-5D	493200,00	1064401,90	132788,13	73948,14
EPS-6A	485800,00	1016441,93	129762,06	58694,95
EPS-6B	477300,00	1016441,93	129762,06	58694,95
EPS-6C	552000,00	1016441,93	194643,09	73948,14
EPS-6D	533100,00	1016441,93	194643,09	73948,14
CP1.1	317683,30	759441,79	200613,27	39269,91
CP2.1	390570,94	729766,18	196654,67	52359,88
CP3.1	237677,15	0,00	198399,35	52359,88
CP4.1	502099,58	876122,05	215473,92	78539,82
CP1.2	375122,00	618680,70	181069,66	58903,24
CP2.2	416788,50	610978,49	179939,02	71993,21
CP4.2	533613,50	645205,56	184910,45	98173,15
CP5.2	310972,00	699119,70	0,00	58903,24
CP6.2	559438,50	729016,95	196553,70	98173,15

TABELA A. 18 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{test} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{test} /Q _{calc}	resíduo (kN)
EB-1	179,4	153,7	1,17	25,7
EB-2	249,1	205,3	1,21	43,8
EB-3	274	231,2	1,19	42,8
EB-4	276,5	257,0	1,08	19,5
EB-5	292	313,8	0,93	-21,8
EB-6	375,2	365,5	1,03	9,7
EB-7	393,6	391,3	1,01	2,3
EB-8	363,7	417,1	0,87	-53,4
EC-1	396,1	410,4	0,97	-14,3
EC-2	563	537,3	1,05	25,7
EC-3	597,8	573,7	1,04	24,1
EC-4	595,9	610,0	0,98	-14,1
EC-5	431	464,6	0,93	-33,6
EC-6	528,1	537,3	0,98	-9,2
EC-7	584,9	573,7	1,02	11,2
EC-8	577,9	610,0	0,95	-32,1
ED-1	240,7	263,5	0,91	-22,8
ED-2	304,9	319,8	0,95	-14,9
ED-3	343,8	347,9	0,99	-4,1
ED-4	364,7	376,1	0,97	-11,4
ED-5	413,5	423,6	0,98	-10,1
ED-6	533,1	479,9	1,11	53,2
ED-7	580,9	508,1	1,14	72,8
ED-8	577,9	536,2	1,08	41,7
EPS-1A	543,2	530,6	1,02	12,6
EPS-1B	554,2	530,6	1,04	23,6
EPS-2A	349,8	372,8	0,94	-23,0
EPS-2B	345,9	372,8	0,93	-26,9
EPS-3A	464,4	516,9	0,90	-52,5
EPS-3B	435,5	516,9	0,84	-81,4
EPS-4A	544,1	524,8	1,04	19,3
EPS-4B	502,2	524,8	0,96	-22,6
EPS-5A	398,6	409,0	0,97	-10,4
EPS-5B	432,5	447,3	0,97	-14,8
EPS-5C	471,8	451,4	1,05	20,4
EPS-5D	493,2	500,7	0,98	-7,5
EPS-6A	485,8	440,9	1,10	44,9
EPS-6B	477,3	440,9	1,08	36,4
EPS-6C	552	519,2	1,06	32,8
EPS-6D	533,1	519,2	1,03	13,9
CP1.1	317,7	360,9	0,88	-43,2
CP2.1	390,6	395,8	0,99	-5,2
CP3.1	237,7	257,9	0,92	-20,3
CP4.1	502,1	516,7	0,97	-14,6
CP1.2	375,1	388,9	0,96	-13,8
CP2.2	416,8	429,3	0,97	-12,5
CP4.2	533,6	522,7	1,02	10,9
CP5.2	311,0	323,4	0,96	-12,4
CP6.2	559,4	543,8	1,03	15,6

R^2 ajustado = 0,9952
RMSE = 30,1 kN

B Resultados das análises dos modelos semiempíricos para conectores Crestbond

B.1 Modelo obtido utilizando apenas dados de Oguejiofor com E_{cs}

TABELA B. 1 – Resultados dos ensaios de Oguejiofor para a equação (5-20), em N.

Designação	q_{teste}	$\sqrt{h_{sc}/t_c} h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 / 10^6$	$nD^2 E_{cs} / 10^4$	$A_{tr}/A_{cc} \times 10^7$
EB-1	179400	808744,32	0,00	0,00
EB-2	249100	808744,32	115747,62	0,00
EB-3	274000	808744,32	173621,42	0,00
EB-4	276500	808744,32	231495,23	0,00
EB-5	292000	808744,32	0,00	49505,77
EB-6	375200	808744,32	115747,62	49505,77
EB-7	393600	808744,32	173621,42	49505,77
EB-8	363700	808744,32	231495,23	49505,77
EC-1	396100	1316965,29	0,00	49505,77
EC-2	563000	1602404,46	162926,79	49505,77
EC-3	597800	1602404,46	244390,19	49505,77
EC-4	595900	1602404,46	325853,58	49505,77
EC-5	431000	1602404,46	0,00	49505,77
EC-6	528100	1602404,46	162926,79	49505,77
EC-7	584900	1602404,46	244390,19	49505,77
EC-8	577900	1602404,46	325853,58	49505,77
ED-1	240700	959972,94	0,00	25065,79
ED-2	304900	959972,94	126106,05	25065,79
ED-3	343800	959972,94	189159,08	25065,79
ED-4	364700	959972,94	252212,10	25065,79
ED-5	413500	959972,94	0,00	74571,55
ED-6	533100	959972,94	126106,05	74571,55
ED-7	580900	959972,94	189159,08	74571,55
ED-8	577900	959972,94	252212,10	74571,55
EPS-1A	543200	1063241,58	199073,60	74103,45
EPS-1B	554200	1063241,58	199073,60	74103,45
EPS-2A	349800	1074844,80	200156,90	24493,71
EPS-2B	345900	1074844,80	200156,90	24493,71
EPS-3A	464400	1004451,94	193491,67	74103,45
EPS-3B	435500	1004451,94	193491,67	74103,45
EPS-4A	544100	1038488,05	196742,62	74103,45
EPS-4B	502200	1038488,05	196742,62	74103,45
EPS-5A	398600	1064401,90	132788,13	45596,86
EPS-5B	432500	1064401,90	132788,13	57446,22
EPS-5C	471800	1064401,90	132788,13	58694,95
EPS-5D	493200	1064401,90	132788,13	73948,14
EPS-6A	485800	1016441,93	129762,06	58694,95
EPS-6B	477300	1016441,93	129762,06	58694,95
EPS-6C	552000	1016441,93	194643,09	73948,14
EPS-6D	533100	1016441,93	194643,09	73948,14
CP1.1	317683	759441,79	200613,27	39269,91
CP2.1	390571	729766,18	196654,67	52359,88
CP3.1	237677	0,00	198399,35	52359,88
CP4.1	502100	876122,05	215473,92	78539,82
CP1.2	375122	618680,70	181069,66	58903,24
CP2.2	416789	610978,49	179939,02	71993,21
CP4.2	533614	645205,56	184910,45	98173,15
CP5.2	310972	699119,70	0,00	58903,24
CP6.2	559439	729016,95	196553,70	98173,15

TABELA B. 2 – Resultados – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{rest} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{rest} /Q _{calc}	resíduo (kN)
EB-1	179,4	149,3	1,20	30,1
EB-2	249,1	204,3	1,22	44,8
EB-3	274	231,9	1,18	42,1
EB-4	276,5	259,4	1,07	17,1
EB-5	292	312,0	0,94	-20,0
EB-6	375,2	367,1	1,02	8,1
EB-7	393,6	394,6	1,00	-1,0
EB-8	363,7	422,1	0,86	-58,4
EC-1	396,1	405,9	0,98	-9,8
EC-2	563	536,0	1,05	27,0
EC-3	597,8	574,8	1,04	23,0
EC-4	595,9	613,5	0,97	-17,6
EC-5	431	458,5	0,94	-27,5
EC-6	528,1	536,0	0,99	-7,9
EC-7	584,9	574,8	1,02	10,1
EC-8	577,9	613,5	0,94	-35,6
ED-1	240,7	259,6	0,93	-18,9
ED-2	304,9	319,6	0,95	-14,7
ED-3	343,8	349,6	0,98	-5,8
ED-4	364,7	379,5	0,96	-14,8
ED-5	413,5	422,4	0,98	-8,9
ED-6	533,1	482,3	1,11	50,8
ED-7	580,9	512,3	1,13	68,6
ED-8	577,9	542,3	1,07	35,6
EPS-1A	543,2	534,5	1,02	8,7
EPS-1B	554,2	534,5	1,04	19,7
EPS-2A	349,8	374,1	0,93	-24,3
EPS-2B	345,9	374,1	0,92	-28,2
EPS-3A	464,4	521,0	0,89	-56,6
EPS-3B	435,5	521,0	0,84	-85,5
EPS-4A	544,1	528,9	1,03	15,2
EPS-4B	502,2	528,9	0,95	-26,7
EPS-5A	398,6	409,5	0,97	-10,9
EPS-5B	432,5	448,5	0,96	-16,0
EPS-5C	471,8	452,6	1,04	19,2
EPS-5D	493,2	502,7	0,98	-9,5
EPS-6A	485,8	442,3	1,10	43,5
EPS-6B	477,3	442,3	1,08	35,0
EPS-6C	552	523,3	1,05	28,7
EPS-6D	533,1	523,3	1,02	9,8
CP1.1	317,7	364,7	0,87	-47,0
CP2.1	390,6	400,4	0,98	-9,8
CP3.1	237,7	266,5	0,89	-28,8
CP4.1	502,1	522,4	0,96	-20,3
CP1.2	375,1	394,0	0,95	-18,8
CP2.2	416,8	435,0	0,96	-18,2
CP4.2	533,6	529,8	1,01	3,8
CP5.2	311,0	322,7	0,96	-11,7
CP6.2	559,4	550,8	1,02	8,7

R^2 ajustado = 0,9947
RMSE = 28,7 kN

B.2 Estudo da primeira hipótese de Oguejiofor

TABELA B. 3 – Resultados dos ensaios de Veríssimo para a equação (5-22), em N.

Designação	q_{teste}	$A_{cc}E_{cs}$	nD^2E_{cs}	$A_{tr}f_{yr}$
A1	316250,00	715366,85	137246606,52	471238,90
A2	193500,00	858440,21	0,00	235619,45
A3	338350,00	861041,55	218444088,55	235619,45
A5	306650,00	855838,88	217783136,70	235619,45
A6	369700,00	848034,88	216787930,56	471238,90
A4	372250,00	845433,54	216455178,36	471238,90
A7	421000,00	983188,92	314083962,70	471238,90
A8	433000,00	980209,56	313607716,84	471238,90
X1	339850,00	449510,51	202068490,65	471238,90
B1	296200,00	664276,65	245642304,61	235619,45
B2	306450,00	664276,65	245642304,61	235619,45
B3	348750,00	679260,33	248397257,72	471238,90
B4	375850,00	671768,49	247023621,80	471238,90
B5	378150,00	711724,98	254263941,49	678584,01
B6	371750,00	619325,59	237185527,22	678584,01
B7	183700,00	706730,42	0,00	235619,45
B8	177600,00	619325,59	0,00	235619,45
C1	361300,00	1171224,61	326173569,45	235619,45
C2	377500,00	1201191,98	330320010,10	235619,45
C3	493650,00	1226164,79	333736026,61	471238,90
C4	506650,00	1216175,66	332373833,06	471238,90
C5	464950,00	1216175,66	332373833,06	678584,01
C6	496850,00	1146251,81	322677503,13	678584,01
C7	215450,00	1233656,63	0,00	235619,45
C8	217600,00	1241148,47	0,00	235619,45
D1.a	287125,00	1176341,17	267735454,76	150796,45
D1.b	330865,00	1164056,59	266333800,01	150796,45
D1.c	320360,00	1164056,59	266333800,01	150796,45
D2.a	407395,00	1167406,93	266716800,00	301592,89
D2.b	419395,00	1167406,93	266716800,00	301592,89
D2.c	398075,00	1165173,37	266461527,84	301592,89
D3.a	319550,00	1176341,17	267735454,76	150796,45
D3.b	301605,00	1205005,18	270977788,85	150796,45
D3.c	318110,00	1156611,40	265480710,69	150796,45
D4.a	287350,00	1212450,37	271813626,09	150796,45
D4.b	287350,00	1198676,76	270265294,78	150796,45
D4.c	299355,00	1198676,76	270265294,78	150796,45
D5.a	308360,00	827905,94	224610335,43	150796,45
D5.b	375880,00	1194954,16	269845301,84	150796,45
D5.c	348870,00	1165173,37	266461527,84	150796,45

TABELA B. 4 – Resultados – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{test} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{test} /Q _{calc}	resíduo (kN)
A1	316,3	335,1	0,94	-18,9
A2	193,5	186,3	1,04	7,2
A3	338,4	341,6	0,99	-3,3
A5	306,7	340,7	0,90	-34,0
A6	369,7	377,1	0,98	-7,4
A4	372,3	376,6	0,99	-4,4
A7	421,0	427,3	0,99	-6,3
A8	433,0	426,8	1,01	6,2
X1	339,9	316,5	1,07	23,3
B1	296,2	330,7	0,90	-34,5
B2	306,5	330,7	0,93	-24,3
B3	348,8	371,8	0,94	-23,0
B4	375,9	370,1	1,02	5,7
B5	378,2	412,0	0,92	-33,9
B6	371,8	391,7	0,95	-19,9
B7	183,7	160,0	1,15	23,7
B8	177,6	152,2	1,17	25,4
C1	361,3	426,7	0,85	-65,4
C2	377,5	431,7	0,87	-54,2
C3	493,7	473,5	1,04	20,1
C4	506,7	471,9	1,07	34,7
C5	465,0	505,2	0,92	-40,2
C6	496,9	493,6	1,01	3,2
C7	215,5	199,3	1,08	16,1
C8	217,6	199,8	1,09	17,8
D1.a	287,1	314,2	0,91	-27,1
D1.b	330,9	312,7	1,06	18,2
D1.c	320,4	312,7	1,02	7,7
D2.a	407,4	337,3	1,21	70,1
D2.b	419,4	337,3	1,24	82,1
D2.c	398,1	337,0	1,18	61,1
D3.a	319,6	314,2	1,02	5,3
D3.b	301,6	317,7	0,95	-16,1
D3.c	318,1	311,8	1,02	6,3
D4.a	287,4	318,6	0,90	-31,3
D4.b	287,4	317,0	0,91	-29,6
D4.c	299,4	317,0	0,94	-17,6
D5.a	308,4	267,5	1,15	40,9
D5.b	375,9	316,5	1,19	59,4
D5.c	348,9	312,8	1,12	36,0

R^2 ajustado = 0,9900
RMSE = 33,1 kN

B.3 Estudo da segunda hipótese de Oguejiofor

TABELA B. 5 – Resultados dos ensaios de Veríssimo para a equação (5-24), em N.

Designação	q_{teste}	$h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 / 10^6$	$nD^2 E_{cs}$	$A_{tr} f_{yr}$
A1	316250	715366,85	137246606,52	471238,90
A2	193500	858440,21	0,00	235619,45
A3	338350	861041,55	218444088,55	235619,45
A5	306650	855838,88	217783136,70	235619,45
A6	369700	848034,88	216787930,56	471238,90
A4	372250	845433,54	216455178,36	471238,90
A7	421000	983188,92	314083962,70	471238,90
A8	433000	980209,56	313607716,84	471238,90
X1	339850	449510,51	202068490,65	471238,90
B1	296200	664276,65	245642304,61	235619,45
B2	306450	664276,65	245642304,61	235619,45
B3	348750	679260,33	248397257,72	471238,90
B4	375850	671768,49	247023621,80	471238,90
B5	378150	711724,98	254263941,49	678584,01
B6	371750	619325,59	237185527,22	678584,01
B7	183700	706730,42	0,00	235619,45
B8	177600	619325,59	0,00	235619,45
C1	361300	1171224,61	326173569,45	235619,45
C2	377500	1201191,98	330320010,10	235619,45
C3	493650	1226164,79	333736026,61	471238,90
C4	506650	1216175,66	332373833,06	471238,90
C5	464950	1216175,66	332373833,06	678584,01
C6	496850	1146251,81	322677503,13	678584,01
C7	215450	1233656,63	0,00	235619,45
C8	217600	1241148,47	0,00	235619,45
D1.a	287125	1176341,17	267735454,76	150796,45
D1.b	330865	1164056,59	266333800,01	150796,45
D1.c	320360	1164056,59	266333800,01	150796,45
D2.a	407395	1167406,93	266716800,00	301592,89
D2.b	419395	1167406,93	266716800,00	301592,89
D2.c	398075	1165173,37	266461527,84	301592,89
D3.a	319550	1176341,17	267735454,76	150796,45
D3.b	301605	1205005,18	270977788,85	150796,45
D3.c	318110	1156611,40	265480710,69	150796,45
D4.a	287350	1212450,37	271813626,09	150796,45
D4.b	287350	1198676,76	270265294,78	150796,45
D4.c	299355	1198676,76	270265294,78	150796,45
D5.a	308360	827905,94	224610335,43	150796,45
D5.b	375880	1194954,16	269845301,84	150796,45
D5.c	348870	1165173,37	266461527,84	150796,45

TABELA B. 6 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{test} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{test} /Q _{calc}	resíduo (kN)
A1	316,25	304,1	1,04	12,1
A2	193,5	181,2	1,07	12,3
A3	338,35	290,8	1,16	47,6
A5	306,65	289,8	1,06	16,9
A6	369,7	360,7	1,02	9,0
A4	372,25	360,2	1,03	12,0
A7	421	426,5	0,99	-5,5
A8	433	425,9	1,02	7,1
X1	339,85	302,8	1,12	37,0
B1	296,2	279,4	1,06	16,8
B2	306,45	279,4	1,10	27,0
B3	348,75	355,1	0,98	-6,4
B4	375,85	353,5	1,06	22,4
B5	378,15	425,9	0,89	-47,8
B6	371,75	405,7	0,92	-33,9
B7	183,7	162,0	1,13	21,7
B8	177,6	150,9	1,18	26,7
C1	361,3	384,0	0,94	-22,7
C2	377,5	389,8	0,97	-12,3
C3	493,65	467,1	1,06	26,5
C4	506,65	465,2	1,09	41,5
C5	464,95	528,9	0,88	-64,0
C6	496,85	515,2	0,96	-18,3
C7	215,45	228,8	0,94	-13,4
C8	217,6	229,8	0,95	-12,2
D1.a	287,125	329,3	0,87	-42,2
D1.b	330,865	327,1	1,01	3,8
D1.c	320,36	327,1	0,98	-6,7
D2.a	407,395	374,0	1,09	33,4
D2.b	419,395	374,0	1,12	45,4
D2.c	398,075	373,6	1,07	24,4
D3.a	319,55	329,3	0,97	-9,8
D3.b	301,605	334,6	0,90	-33,0
D3.c	318,11	325,7	0,98	-7,6
D4.a	287,35	336,0	0,86	-48,6
D4.b	287,35	333,4	0,86	-46,1
D4.c	299,355	333,4	0,90	-34,1
D5.a	308,36	263,6	1,17	44,8
D5.b	375,88	332,7	1,13	43,1
D5.c	348,87	327,3	1,07	21,6

R^2 ajustado = 0,9922
RMSE = 29,7 kN

B.4 Influência da armadura na capacidade da conexão

B.4.1 Taxa geométrica da armadura limitada a 1%

TABELA B. 7 – Resultados dos ensaios de Veríssimo para a equação (5-26), em N.

Designação	q_{teste}	$h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 / 10^6$	$nD^2 E_{cs}$	$A_{tr} / A_{cc} \times 10^7$
A1	316250,00	715366,85	137246606,52	100000,00
A2	193500,00	858440,21	0,00	65520,83
A3	338350,00	861041,55	218444088,55	65520,83
A5	306650,00	855838,88	217783136,70	65520,83
A6	369700,00	848034,88	216787930,56	100000,00
A4	372250,00	845433,54	216455178,36	100000,00
A7	421000,00	983188,92	314083962,70	100000,00
A8	433000,00	980209,56	313607716,84	100000,00
X1	339850,00	449510,51	202068490,65	100000,00
B1	296200,00	664276,65	245642304,61	73705,74
B2	306450,00	664276,65	245642304,61	73705,74
B3	348750,00	679260,33	248397257,72	100000,00
B4	375850,00	671768,49	247023621,80	100000,00
B5	378150,00	711724,98	254263941,49	100000,00
B6	371750,00	619325,59	237185527,22	100000,00
B7	183700,00	706730,42	0,00	73705,74
B8	177600,00	619325,59	0,00	73705,74
C1	361300,00	1171224,61	326173569,45	73705,74
C2	377500,00	1201191,98	330320010,10	73705,74
C3	493650,00	1226164,79	333736026,61	100000,00
C4	506650,00	1216175,66	332373833,06	100000,00
C5	464950,00	1216175,66	332373833,06	100000,00
C6	496850,00	1146251,81	322677503,13	100000,00
C7	215450,00	1233656,63	0,00	73705,74
C8	217600,00	1241148,47	0,00	73705,74
D1.a	287125,00	1176341,17	267735454,76	60967,80
D1.b	330865,00	1164056,59	266333800,01	60967,80
D1.c	320360,00	1164056,59	266333800,01	60967,80
D2.a	407395,00	1167406,93	266716800,00	100000,00
D2.b	419395,00	1167406,93	266716800,00	100000,00
D2.c	398075,00	1165173,37	266461527,84	100000,00
D3.a	319550,00	1176341,17	267735454,76	60967,80
D3.b	301605,00	1205005,18	270977788,85	60967,80
D3.c	318110,00	1156611,40	265480710,69	60967,80
D4.a	287350,00	1212450,37	271813626,09	60967,80
D4.b	287350,00	1198676,76	270265294,78	60967,80
D4.c	299355,00	1198676,76	270265294,78	60967,80
D5.a	308360,00	827905,94	224610335,43	60967,80
D5.b	375880,00	1194954,16	269845301,84	60967,80
D5.c	348870,00	1165173,37	266461527,84	60967,80

TABELA B. 8 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{rest} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{rest} /Q _{calc}	resíduo (kN)
A1	316,3	325,5	0,97	-9,3
A2	193,5	181,2	1,07	12,3
A3	338,4	297,1	1,14	41,3
A5	306,7	296,5	1,03	10,2
A6	369,7	373,0	0,99	-3,3
A4	372,3	372,7	1,00	-0,4
A7	421,0	429,9	0,98	-8,9
A8	433,0	429,6	1,01	3,4
X1	339,9	349,2	0,97	-9,4
B1	296,2	322,0	0,92	-25,8
B2	306,5	322,0	0,95	-15,5
B3	348,8	383,0	0,91	-34,2
B4	375,9	381,9	0,98	-6,1
B5	378,2	387,4	0,98	-9,2
B6	371,8	374,6	0,99	-2,9
B7	183,7	193,5	0,95	-9,8
B8	177,6	190,0	0,93	-12,4
C1	361,3	384,9	0,94	-23,6
C2	377,5	388,3	0,97	-10,8
C3	493,7	450,0	1,10	43,6
C4	506,7	448,9	1,13	57,7
C5	465,0	448,9	1,04	16,0
C6	496,9	441,0	1,13	55,9
C7	215,5	214,5	1,00	0,9
C8	217,6	214,8	1,01	2,8
D1.a	287,1	325,6	0,88	-38,4
D1.b	330,9	324,3	1,02	6,5
D1.c	320,4	324,3	0,99	-4,0
D2.a	407,4	412,2	0,99	-4,8
D2.b	419,4	412,2	1,02	7,2
D2.c	398,1	412,0	0,97	-13,9
D3.a	319,6	325,6	0,98	-6,0
D3.b	301,6	328,4	0,92	-26,8
D3.c	318,1	323,6	0,98	-5,5
D4.a	287,4	329,2	0,87	-41,8
D4.b	287,4	327,8	0,88	-40,4
D4.c	299,4	327,8	0,91	-28,4
D5.a	308,4	288,8	1,07	19,6
D5.b	375,9	327,4	1,15	48,5
D5.c	348,9	324,4	1,08	24,4

R^2 ajustado = 0,9947
RMSE = 24,5 kN

B.4.2 Taxa geométrica da armadura limitada a 1,3%

TABELA B. 9 – Resultados dos ensaios de Veríssimo para a equação (5-27), em N.

Designação	q_{teste}	$h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 / 10^6$	$nD^2 E_{cs}$	$A_{tr} / A_{cc} \times 10^7$
A1	316250,00	715366,85	137246606,52	118016,25
A2	193500,00	858440,21	0,00	65520,83
A3	338350,00	861041,55	218444088,55	65520,83
A5	306650,00	855838,88	217783136,70	65520,83
A6	369700,00	848034,88	216787930,56	130000,00
A4	372250,00	845433,54	216455178,36	130000,00
A7	421000,00	983188,92	314083962,70	130000,00
A8	433000,00	980209,56	313607716,84	130000,00
X1	339850,00	449510,51	202068490,65	130000,00
B1	296200,00	664276,65	245642304,61	73705,74
B2	306450,00	664276,65	245642304,61	73705,74
B3	348750,00	679260,33	248397257,72	130000,00
B4	375850,00	671768,49	247023621,80	130000,00
B5	378150,00	711724,98	254263941,49	130000,00
B6	371750,00	619325,59	237185527,22	130000,00
B7	183700,00	706730,42	0,00	73705,74
B8	177600,00	619325,59	0,00	73705,74
C1	361300,00	1171224,61	326173569,45	73705,74
C2	377500,00	1201191,98	330320010,10	73705,74
C3	493650,00	1226164,79	333736026,61	130000,00
C4	506650,00	1216175,66	332373833,06	130000,00
C5	464950,00	1216175,66	332373833,06	130000,00
C6	496850,00	1146251,81	322677503,13	130000,00
C7	215450,00	1233656,63	0,00	73705,74
C8	217600,00	1241148,47	0,00	73705,74
D1.a	287125,00	1176341,17	267735454,76	60967,80
D1.b	330865,00	1164056,59	266333800,01	60967,80
D1.c	320360,00	1164056,59	266333800,01	60967,80
D2.a	407395,00	1167406,93	266716800,00	121935,61
D2.b	419395,00	1167406,93	266716800,00	121935,61
D2.c	398075,00	1165173,37	266461527,84	121935,61
D3.a	319550,00	1176341,17	267735454,76	60967,80
D3.b	301605,00	1205005,18	270977788,85	60967,80
D3.c	318110,00	1156611,40	265480710,69	60967,80
D4.a	287350,00	1212450,37	271813626,09	60967,80
D4.b	287350,00	1198676,76	270265294,78	60967,80
D4.c	299355,00	1198676,76	270265294,78	60967,80
D5.a	308360,00	827905,94	224610335,43	60967,80
D5.b	375880,00	1194954,16	269845301,84	60967,80
D5.c	348870,00	1165173,37	266461527,84	60967,80

TABELA B. 10 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{test} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{test} /Q _{calc}	resíduo (kN)
A1	316,3	313,9	1,01	2,4
A2	193,5	176,6	1,10	16,9
A3	338,4	281,2	1,20	57,2
A5	306,7	280,4	1,09	26,2
A6	369,7	382,2	0,97	-12,5
A4	372,3	381,8	0,98	-9,5
A7	421,0	440,0	0,96	-19,0
A8	433,0	439,5	0,99	-6,5
X1	339,9	341,7	0,99	-1,8
B1	296,2	290,7	1,02	5,5
B2	306,5	290,7	1,05	15,7
B3	348,8	383,1	0,91	-34,3
B4	375,9	381,8	0,98	-6,0
B5	378,2	388,6	0,97	-10,5
B6	371,8	372,7	1,00	-1,0
B7	183,7	176,9	1,04	6,8
B8	177,6	169,5	1,05	8,1
C1	361,3	371,8	0,97	-10,5
C2	377,5	376,3	1,00	1,2
C3	493,7	469,8	1,05	23,9
C4	506,7	468,3	1,08	38,3
C5	465,0	468,3	0,99	-3,4
C6	496,9	457,8	1,09	39,1
C7	215,5	221,1	0,97	-5,7
C8	217,6	221,7	0,98	-4,1
D1.a	287,1	324,0	0,89	-36,8
D1.b	330,9	322,3	1,03	8,6
D1.c	320,4	322,3	0,99	-1,9
D2.a	407,4	420,0	0,97	-12,6
D2.b	419,4	420,0	1,00	-0,6
D2.c	398,1	419,7	0,95	-21,6
D3.a	319,6	324,0	0,99	-4,4
D3.b	301,6	327,9	0,92	-26,3
D3.c	318,1	321,2	0,99	-3,1
D4.a	287,4	328,9	0,87	-41,6
D4.b	287,4	327,0	0,88	-39,7
D4.c	299,4	327,0	0,92	-27,7
D5.a	308,4	274,1	1,13	34,3
D5.b	375,9	326,5	1,15	49,4
D5.c	348,9	322,4	1,08	26,5

R^2 ajustado = 0,9953
RMSE = 23,2 kN

B.5 Estudo da influência da excentricidade do conector na capacidade da conexão

TABELA B. 11 – Resultados dos ensaios de Veríssimo para a equação (5-28), em N.

Designação	q _{teste}	$\sqrt{\frac{h_{sc} - t_{PL}}{t_c - t_{PL}}} (h_{sc} - t_{PL}) t_{sc} E_{cs}^2 / 10^6$	$nD^2 E_{cs} / 10^3$	$\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \times 10^7$
A1	316250,00	488688,59	137246,61	118016,25
A2	193500,00	631600,46	0,00	65520,83
A3	338350,00	633514,40	218444,09	65520,83
A5	306650,00	629686,52	217783,14	65520,83
A6	369700,00	623944,70	216787,93	130000,00
A4	372250,00	622030,76	216455,18	130000,00
A7	421000,00	774163,73	314083,96	130000,00
A8	433000,00	771817,78	313607,72	130000,00
X1	339850,00	330728,97	202068,49	130000,00
B1	296200,00	488743,92	245642,30	73705,74
B2	306450,00	488743,92	245642,30	73705,74
B3	348750,00	499768,22	248397,26	130000,00
B4	375850,00	494256,07	247023,62	130000,00
B5	378150,00	523654,20	254263,94	130000,00
B6	371750,00	455671,02	237185,53	130000,00
B7	183700,00	519979,44	0,00	73705,74
B8	177600,00	455671,02	0,00	73705,74
C1	361300,00	861732,70	326173,57	73705,74
C2	377500,00	883781,30	330320,01	73705,74
C3	493650,00	902155,13	333736,03	130000,00
C4	506650,00	894805,60	332373,83	130000,00
C5	464950,00	894805,60	332373,83	130000,00
C6	496850,00	843358,87	322677,50	130000,00
C7	215450,00	907667,28	0,00	73705,74
C8	217600,00	913179,43	0,00	73705,74
D1.a	287125,00	739600,92	267735,45	60967,80
D1.b	330865,00	731877,24	266333,80	60967,80
D1.c	320360,00	731877,24	266333,80	60967,80
D2.a	407395,00	733983,70	266716,80	121935,61
D2.b	419395,00	733983,70	266716,80	121935,61
D2.c	398075,00	732579,39	266461,53	121935,61
D3.a	319550,00	739600,92	267735,45	60967,80
D3.b	301605,00	757622,84	270977,79	60967,80
D3.c	318110,00	727196,22	265480,71	60967,80
D4.a	287350,00	611762,97	271813,63	60967,80
D4.b	287350,00	604813,25	270265,29	60967,80
D4.c	299355,00	604813,25	270265,29	60967,80
D5.a	308360,00	728682,65	224610,34	60967,80
D5.b	375880,00	1051740,70	269845,30	60967,80
D5.c	348870,00	1025529,09	266461,53	60967,80

TABELA B. 12 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{rest} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{rest} /Q _{calc}	resíduo (kN)
A1	316,3	306,9	1,03	9,4
A2	193,5	182,2	1,06	11,3
A3	338,4	287,3	1,18	51,0
A5	306,7	286,5	1,07	20,2
A6	369,7	381,1	0,97	-11,4
A4	372,3	380,6	0,98	-8,4
A7	421,0	447,9	0,94	-26,9
A8	433,0	447,4	0,97	-14,4
X1	339,9	334,6	1,02	5,2
B1	296,2	293,1	1,01	3,1
B2	306,5	293,1	1,05	13,4
B3	348,8	379,6	0,92	-30,8
B4	375,9	378,2	0,99	-2,3
B5	378,2	385,6	0,98	-7,4
B6	371,8	368,2	1,01	3,5
B7	183,7	179,4	1,02	4,3
B8	177,6	170,7	1,04	6,9
C1	361,3	381,8	0,95	-20,5
C2	377,5	386,8	0,98	-9,3
C3	493,7	474,6	1,04	19,1
C4	506,7	472,9	1,07	33,7
C5	465,0	472,9	0,98	-8,0
C6	496,9	461,4	1,08	35,5
C7	215,5	231,4	0,93	-16,0
C8	217,6	232,2	0,94	-14,6
D1.a	287,1	318,5	0,90	-31,3
D1.b	330,9	316,7	1,04	14,1
D1.c	320,4	316,7	1,01	3,6
D2.a	407,4	407,8	1,00	-0,4
D2.b	419,4	407,8	1,03	11,6
D2.c	398,1	407,5	0,98	-9,4
D3.a	319,6	318,5	1,00	1,1
D3.b	301,6	322,4	0,94	-20,8
D3.c	318,1	315,7	1,01	2,4
D4.a	287,4	303,2	0,95	-15,9
D4.b	287,4	301,6	0,95	-14,2
D4.c	299,4	301,6	0,99	-2,2
D5.a	308,4	296,3	1,04	12,1
D5.b	375,9	361,4	1,04	14,5
D5.c	348,9	356,2	0,98	-7,4

R^2 ajustado = 0,9973
RMSE = 17,5 kN

B.6 Verificação da hipótese de Kraus e Wurzer

B.6.1 Hipótese de Leonhardt *et al.*

TABELA B. 13 – Resultados dos ensaios de Veríssimo para a equação (5-29), em N.

Designação	q_{teste}	$h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 / 10^6$	$nD^2 E_{cs} / 10^3$	$A_{tr} / A_{cc} \times 10^7$
A1	316250,00	715366,85	137246,61	100000,00
A2	193500,00	858440,21	0,00	65520,83
A3	338350,00	861041,55	218444,09	65520,83
A5	306650,00	855838,88	217783,14	65520,83
A6	369700,00	848034,88	216787,93	100000,00
A4	372250,00	845433,54	216455,18	100000,00
A7	421000,00	983188,92	314083,96	100000,00
A8	433000,00	980209,56	313607,72	100000,00
X1	339850,00	449510,51	202068,49	100000,00
B1	296200,00	664276,65	245642,30	73705,74
B2	306450,00	664276,65	245642,30	73705,74
B3	348750,00	679260,33	248397,26	100000,00
B4	375850,00	671768,49	247023,62	100000,00
B5	378150,00	711724,98	254263,94	100000,00
B6	371750,00	619325,59	237185,53	100000,00
B7	183700,00	706730,42	0,00	73705,74
B8	177600,00	619325,59	0,00	73705,74
C1	361300,00	1171224,61	326173,57	73705,74
C2	377500,00	1201191,98	330320,01	73705,74
C3	493650,00	1226164,79	333736,03	100000,00
C4	506650,00	1216175,66	332373,83	100000,00
C5	464950,00	1216175,66	332373,83	100000,00
C6	496850,00	1146251,81	322677,50	100000,00
C7	215450,00	1233656,63	0,00	73705,74
C8	217600,00	1241148,47	0,00	73705,74
D1.a	287125,00	1176341,17	267735,45	60967,80
D1.b	330865,00	1164056,59	266333,80	60967,80
D1.c	320360,00	1164056,59	266333,80	60967,80
D2.a	407395,00	1167406,93	266716,80	100000,00
D2.b	419395,00	1167406,93	266716,80	100000,00
D2.c	398075,00	1165173,37	266461,53	100000,00
D3.a	319550,00	1176341,17	267735,45	60967,80
D3.b	301605,00	1205005,18	270977,79	60967,80
D3.c	318110,00	1156611,40	265480,71	60967,80
D4.a	287350,00	1212450,37	271813,63	60967,80
D4.b	287350,00	1198676,76	270265,29	60967,80
D4.c	299355,00	1198676,76	270265,29	60967,80
D5.a	308360,00	827905,94	224610,34	60967,80
D5.b	375880,00	1194954,16	269845,30	60967,80
D5.c	348870,00	1165173,37	266461,53	60967,80

TABELA B. 14 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{rest} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{rest} /Q _{calc}	resíduo (kN)
A1	316,3	325,5	0,97	-9,2
A2	193,5	181,2	1,07	12,3
A3	338,4	297,0	1,14	41,4
A5	306,7	296,4	1,03	10,2
A6	369,7	372,9	0,99	-3,2
A4	372,3	372,6	1,00	-0,4
A7	421,0	429,8	0,98	-8,8
A8	433,0	429,5	1,01	3,5
X1	339,9	349,2	0,97	-9,3
B1	296,2	321,9	0,92	-25,7
B2	306,5	321,9	0,95	-15,4
B3	348,8	382,9	0,91	-34,1
B4	375,9	381,9	0,98	-6,0
B5	378,2	387,3	0,98	-9,1
B6	371,8	374,6	0,99	-2,8
B7	183,7	193,5	0,95	-9,8
B8	177,6	190,0	0,93	-12,4
C1	361,3	384,8	0,94	-23,5
C2	377,5	388,2	0,97	-10,7
C3	493,7	449,9	1,10	43,7
C4	506,7	448,8	1,13	57,8
C5	465,0	448,8	1,04	16,1
C6	496,9	440,9	1,13	56,0
C7	215,5	214,5	1,00	0,9
C8	217,6	214,8	1,01	2,8
D1.a	287,1	325,5	0,88	-38,4
D1.b	330,9	324,2	1,02	6,6
D1.c	320,4	324,2	0,99	-3,9
D2.a	407,4	412,1	0,99	-4,7
D2.b	419,4	412,1	1,02	7,3
D2.c	398,1	411,9	0,97	-13,8
D3.a	319,6	325,5	0,98	-5,9
D3.b	301,6	328,3	0,92	-26,7
D3.c	318,1	323,5	0,98	-5,4
D4.a	287,4	329,1	0,87	-41,7
D4.b	287,4	327,7	0,88	-40,4
D4.c	299,4	327,7	0,91	-28,4
D5.a	308,4	288,7	1,07	19,6
D5.b	375,9	327,3	1,15	48,5
D5.c	348,9	324,4	1,08	24,5

R^2 ajustado = 0,9947
RMSE = 24,5 kN

B.6.2 Hipótese de Kraus e Wurzer

TABELA B. 15 – Resultados dos ensaios de Veríssimo para a equação (5-30), em N.

Designação	q_{teste}	$h_{sc} t_{sc} E_{cs}^2 / 10^6$	$nD^2 E_{cs} / 10^3$	$A_{tr} / A_{cc} \times 10^7$
A1	316250,00	715366,85	42889,56	100000,00
A2	193500,00	858440,21	0,00	65520,83
A3	338350,00	861041,55	54611,02	65520,83
A5	306650,00	855838,88	54445,78	65520,83
A6	369700,00	848034,88	54196,98	100000,00
A4	372250,00	845433,54	54113,79	100000,00
A7	421000,00	983188,92	65434,16	100000,00
A8	433000,00	980209,56	65334,94	100000,00
X1	339850,00	449510,51	43300,39	100000,00
B1	296200,00	664276,65	52637,64	73705,74
B2	306450,00	664276,65	52637,64	73705,74
B3	348750,00	679260,33	53227,98	100000,00
B4	375850,00	671768,49	52933,63	100000,00
B5	378150,00	711724,98	54485,13	100000,00
B6	371750,00	619325,59	50825,47	100000,00
B7	183700,00	706730,42	0,00	73705,74
B8	177600,00	619325,59	0,00	73705,74
C1	361300,00	1171224,61	69894,34	73705,74
C2	377500,00	1201191,98	70782,86	73705,74
C3	493650,00	1226164,79	71514,86	100000,00
C4	506650,00	1216175,66	71222,96	100000,00
C5	464950,00	1216175,66	71222,96	100000,00
C6	496850,00	1146251,81	69145,18	100000,00
C7	215450,00	1233656,63	0,00	73705,74
C8	217600,00	1241148,47	0,00	73705,74
D1.a	287125,00	1176341,17	59762,38	60967,80
D1.b	330865,00	1164056,59	59449,51	60967,80
D1.c	320360,00	1164056,59	59449,51	60967,80
D2.a	407395,00	1167406,93	59535,00	100000,00
D2.b	419395,00	1167406,93	59535,00	100000,00
D2.c	398075,00	1165173,37	59478,02	100000,00
D3.a	319550,00	1176341,17	59762,38	60967,80
D3.b	301605,00	1205005,18	60486,11	60967,80
D3.c	318110,00	1156611,40	59259,09	60967,80
D4.a	287350,00	1212450,37	60672,68	60967,80
D4.b	287350,00	1198676,76	60327,07	60967,80
D4.c	299355,00	1198676,76	60327,07	60967,80
D5.a	308360,00	827905,94	50136,24	60967,80
D5.b	375880,00	1194954,16	60233,33	60967,80
D5.c	348870,00	1165173,37	59478,02	60967,80

TABELA B. 16 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{rest} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{rest} /Q _{calc}	resíduo (kN)
A1	316,3	354,5	0,89	-38,2
A2	193,5	179,6	1,08	13,9
A3	338,4	312,0	1,08	26,4
A5	306,7	311,4	0,98	-4,7
A6	369,7	387,1	0,96	-17,4
A4	372,3	386,8	0,96	-14,6
A7	421,0	419,7	1,00	1,3
A8	433,0	419,3	1,03	13,7
X1	339,9	345,0	0,99	-5,1
B1	296,2	317,6	0,93	-21,4
B2	306,5	317,6	0,96	-11,2
B3	348,8	378,1	0,92	-29,3
B4	375,9	377,1	1,00	-1,2
B5	378,2	382,4	0,99	-4,3
B6	371,8	369,9	1,00	1,8
B7	183,7	191,8	0,96	-8,1
B8	177,6	188,3	0,94	-10,7
C1	361,3	379,4	0,95	-18,1
C2	377,5	382,8	0,99	-5,3
C3	493,7	444,0	1,11	49,7
C4	506,7	442,9	1,14	63,8
C5	465,0	442,9	1,05	22,1
C6	496,9	435,1	1,14	61,8
C7	215,5	212,6	1,01	2,9
C8	217,6	212,9	1,02	4,7
D1.a	287,1	326,8	0,88	-39,6
D1.b	330,9	325,5	1,02	5,3
D1.c	320,4	325,5	0,98	-5,2
D2.a	407,4	412,6	0,99	-5,2
D2.b	419,4	412,6	1,02	6,8
D2.c	398,1	412,4	0,97	-14,3
D3.a	319,6	326,8	0,98	-7,2
D3.b	301,6	329,6	0,91	-28,0
D3.c	318,1	324,8	0,98	-6,7
D4.a	287,4	330,4	0,87	-43,0
D4.b	287,4	329,0	0,87	-41,7
D4.c	299,4	329,0	0,91	-29,7
D5.a	308,4	289,7	1,06	18,7
D5.b	375,9	328,6	1,14	47,2
D5.c	348,9	325,6	1,07	23,2

R^2 ajustado = 0,9942
RMSE = 25,7 kN

C Modelos propostos

C.1 Perfobond

TABELA C-1 – Resultados dos ensaios de Oguejiopor para a equação (6-4), em N.

Designação	q_{teste}	$\sqrt{h_{sc}/t_c} h_{sc} t_{sc} \gamma_c^3 f_c / 10^9$	$nD^2 \gamma_c^{1,5} \sqrt{f_c} / 10^4$	$A_{tr}/A_{cc} \times 10^7$
EB-1	179400,00	493061,62	0,00	0,00
EB-2	249100,00	493061,62	285796,58	0,00
EB-3	274000,00	493061,62	428694,88	0,00
EB-4	276500,00	493061,62	571593,17	0,00
EB-5	292000,00	493061,62	0,00	49505,77
EB-6	375200,00	493061,62	285796,58	49505,77
EB-7	393600,00	493061,62	428694,88	49505,77
EB-8	363700,00	493061,62	571593,17	49505,77
EC-1	396100,00	802905,22	0,00	49505,77
EC-2	563000,00	976926,97	402288,38	49505,77
EC-3	597800,00	976926,97	603432,56	49505,77
EC-4	595900,00	976926,97	804576,75	49505,77
EC-5	431000,00	976926,97	0,00	49505,77
EC-6	528100,00	976926,97	402288,38	49505,77
EC-7	584900,00	976926,97	603432,56	49505,77
EC-8	577900,00	976926,97	804576,75	49505,77
ED-1	240700,00	585260,13	0,00	25065,79
ED-2	304900,00	585260,13	311372,97	25065,79
ED-3	343800,00	585260,13	467059,45	25065,79
ED-4	364700,00	585260,13	622745,94	25065,79
ED-5	413500,00	585260,13	0,00	74571,55
ED-6	533100,00	585260,13	311372,97	74571,55
ED-7	580900,00	585260,13	467059,45	74571,55
ED-8	577900,00	585260,13	622745,94	74571,55
EPS-1A	543200,00	648219,22	491539,75	74103,45
EPS-1B	554200,00	648219,22	491539,75	74103,45
EPS-2A	349800,00	655293,28	494214,58	24493,71
EPS-2B	345900,00	655293,28	494214,58	24493,71
EPS-3A	464400,00	612377,34	477757,21	74103,45
EPS-3B	435500,00	612377,34	477757,21	74103,45
EPS-4A	544100,00	633127,91	485784,24	74103,45
EPS-4B	502200,00	633127,91	485784,24	74103,45
EPS-5A	398600,00	648926,63	327871,93	45596,86
EPS-5B	432500,00	648926,63	327871,93	57446,22
EPS-5C	471800,00	648926,63	327871,93	58694,95
EPS-5D	493200,00	648926,63	327871,93	73948,14
EPS-6A	485800,00	619687,20	320400,14	58694,95
EPS-6B	477300,00	619687,20	320400,14	58694,95
EPS-6C	552000,00	619687,20	480600,21	73948,14
EPS-6D	533100,00	619687,20	480600,21	73948,14
CP1.1	317683,30	463003,68	495341,40	39269,91
CP2.1	390570,94	444911,56	485567,09	52359,88
CP3.1	237677,15	0,00	489874,95	52359,88
CP4.1	502099,58	534139,34	532034,37	78539,82
CP1.2	375122,00	377186,83	447085,58	58903,24
CP2.2	416788,50	372491,08	444293,89	71993,21
CP4.2	533613,50	393358,06	456569,01	98173,15
CP5.2	310972,00	426227,53	0,00	58903,24
CP6.2	559438,50	444454,78	485317,77	98173,15

TABELA C-2 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{test} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{test} /Q _{calc}	resíduo (kN)
EB-1	179,4	153,7	1,17	25,7
EB-2	249,1	205,3	1,21	43,8
EB-3	274	231,2	1,19	42,8
EB-4	276,5	257,0	1,08	19,5
EB-5	292	313,8	0,93	-21,8
EB-6	375,2	365,5	1,03	9,7
EB-7	393,6	391,3	1,01	2,3
EB-8	363,7	417,1	0,87	-53,4
EC-1	396,1	410,4	0,97	-14,3
EC-2	563	537,3	1,05	25,7
EC-3	597,8	573,7	1,04	24,1
EC-4	595,9	610,0	0,98	-14,1
EC-5	431	464,6	0,93	-33,6
EC-6	528,1	537,3	0,98	-9,2
EC-7	584,9	573,7	1,02	11,2
EC-8	577,9	610,0	0,95	-32,1
ED-1	240,7	263,5	0,91	-22,8
ED-2	304,9	319,8	0,95	-14,9
ED-3	343,8	347,9	0,99	-4,1
ED-4	364,7	376,1	0,97	-11,4
ED-5	413,5	423,6	0,98	-10,1
ED-6	533,1	479,9	1,11	53,2
ED-7	580,9	508,1	1,14	72,8
ED-8	577,9	536,2	1,08	41,7
EPS-1A	543,2	530,6	1,02	12,6
EPS-1B	554,2	530,6	1,04	23,6
EPS-2A	349,8	372,8	0,94	-23,0
EPS-2B	345,9	372,8	0,93	-26,9
EPS-3A	464,4	516,9	0,90	-52,5
EPS-3B	435,5	516,9	0,84	-81,4
EPS-4A	544,1	524,8	1,04	19,3
EPS-4B	502,2	524,8	0,96	-22,6
EPS-5A	398,6	409,0	0,97	-10,4
EPS-5B	432,5	447,3	0,97	-14,8
EPS-5C	471,8	451,4	1,05	20,4
EPS-5D	493,2	500,7	0,98	-7,5
EPS-6A	485,8	440,9	1,10	44,9
EPS-6B	477,3	440,9	1,08	36,4
EPS-6C	552	519,2	1,06	32,8
EPS-6D	533,1	519,2	1,03	13,9
CP1.1	317,7	360,9	0,88	-43,2
CP2.1	390,6	395,8	0,99	-5,2
CP3.1	237,7	257,9	0,92	-20,3
CP4.1	502,1	516,7	0,97	-14,6
CP1.2	375,1	388,9	0,96	-13,8
CP2.2	416,8	429,3	0,97	-12,5
CP4.2	533,6	522,7	1,02	10,9
CP5.2	311,0	323,4	0,96	-12,4
CP6.2	559,4	543,8	1,03	15,6

R^2 ajustado = 0,9952
RMSE = 30,0 kN

C.2 Crestbond

TABELA C-3 – Resultados dos ensaios de Veríssimo para a equação (6-5), em N.

Designação	Q _{teste}	$\sqrt{\frac{h_{sc} - t_{PL}}{t_c - t_{PL}}} (h_{sc} - t_{PL}) t_{sc} E_{cs}^2 / 10^8$	$nD^2 E_{cs} / 10^4$	$A_r / A_{cc} \times 10^7$
A1	316250,00	2979354,30	338880,51	118016,25
A2	193500,00	3850635,35	0,00	65520,83
A3	338350,00	3862303,94	539368,12	65520,83
A5	306650,00	3838966,76	537736,14	65520,83
A6	369700,00	3803960,98	535278,84	130000,00
A4	372250,00	3792292,39	534457,23	130000,00
A7	421000,00	4719791,05	775515,96	130000,00
A8	433000,00	4705488,65	774340,04	130000,00
X1	339850,00	2016332,69	498934,54	130000,00
B1	296200,00	2979691,64	606524,21	73705,74
B2	306450,00	2979691,64	606524,21	73705,74
B3	348750,00	3046902,73	613326,56	130000,00
B4	375850,00	3013297,19	609934,87	130000,00
B5	378150,00	3192526,76	627812,20	130000,00
B6	371750,00	2778058,37	585643,28	130000,00
B7	183700,00	3170123,06	0,00	73705,74
B8	177600,00	2778058,37	0,00	73705,74
C1	361300,00	5253666,85	805366,84	73705,74
C2	377500,00	5388089,03	815604,96	73705,74
C3	493650,00	5500107,51	824039,57	130000,00
C4	506650,00	5455300,11	820676,13	130000,00
C5	464950,00	5455300,11	820676,13	130000,00
C6	496850,00	5141648,36	796734,58	130000,00
C7	215450,00	5533713,05	0,00	73705,74
C8	217600,00	5567318,60	0,00	73705,74
D1.a	287125,00	4509074,36	661075,20	60967,80
D1.b	330865,00	4461985,92	657614,32	60967,80
D1.c	320360,00	4461985,92	657614,32	60967,80
D2.a	407395,00	4474828,23	658560,00	121935,61
D2.b	419395,00	4474828,23	658560,00	121935,61
D2.c	398075,00	4466266,69	657929,70	121935,61
D3.a	319550,00	4509074,36	661075,20	60967,80
D3.b	301605,00	4618947,37	669080,96	60967,80
D3.c	318110,00	4433447,48	655507,93	60967,80
D4.a	287350,00	3729693,46	671144,76	60967,80
D4.b	287350,00	3687323,59	667321,72	60967,80
D4.c	299355,00	3687323,59	667321,72	60967,80
D5.a	308360,00	4442509,70	554593,42	60967,80
D5.b	375880,00	6412075,60	666284,70	60967,80
D5.c	348870,00	6252273,09	657929,70	60967,80

TABELA C-4 – Comparação entre os resultados experimentais e estimados

Modelo	Q _{rest} (kN)	Q _{calc} (kN)	Q _{rest} /Q _{calc}	resíduo (kN)
A1	316,3	306,9	1,03	9,4
A2	193,5	182,2	1,06	11,3
A3	338,4	287,3	1,18	51,0
A5	306,7	286,5	1,07	20,2
A6	369,7	381,1	0,97	-11,4
A4	372,3	380,6	0,98	-8,4
A7	421,0	447,9	0,94	-26,9
A8	433,0	447,4	0,97	-14,4
X1	339,9	334,6	1,02	5,2
B1	296,2	293,1	1,01	3,1
B2	306,5	293,1	1,05	13,4
B3	348,8	379,6	0,92	-30,8
B4	375,9	378,2	0,99	-2,3
B5	378,2	385,6	0,98	-7,4
B6	371,8	368,2	1,01	3,5
B7	183,7	179,4	1,02	4,3
B8	177,6	170,7	1,04	6,9
C1	361,3	381,8	0,95	-20,5
C2	377,5	386,8	0,98	-9,3
C3	493,7	474,6	1,04	19,1
C4	506,7	472,9	1,07	33,7
C5	465,0	472,9	0,98	-8,0
C6	496,9	461,4	1,08	35,5
C7	215,5	231,4	0,93	-16,0
C8	217,6	232,2	0,94	-14,6
D1.a	287,1	318,5	0,90	-31,3
D1.b	330,9	316,7	1,04	14,1
D1.c	320,4	316,7	1,01	3,6
D2.a	407,4	407,8	1,00	-0,4
D2.b	419,4	407,8	1,03	11,6
D2.c	398,1	407,5	0,98	-9,4
D3.a	319,6	318,5	1,00	1,1
D3.b	301,6	322,4	0,94	-20,8
D3.c	318,1	315,7	1,01	2,4
D4.a	287,4	303,2	0,95	-15,9
D4.b	287,4	301,6	0,95	-14,2
D4.c	299,4	301,6	0,99	-2,2
D5.a	308,4	296,3	1,04	12,1
D5.b	375,9	361,4	1,04	14,5
D5.c	348,9	356,2	0,98	-7,4

R^2 ajustado = 0,9973
RMSE = 17,5 kN