## 6 Discussão dos resultados

### 6.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma discussão dos resultados experimentais dos ensaios de *push-out* e do ensaio em escala real.

Para tal, compara-se os resultados obtidos dos *push-out* com as equações teóricas existentes para os conectores *Perfobond* e *T-Perfobond*.

Uma análise entre o resultado experimental do ensaio em escala real com a resistência obtida do conector *T-Perfobond* através do ensaio de *push-out* é apresentada.

### 6.2. Discussão dos resultados dos ensaios de *push-out* com Perfobond

No Capítulo 2 foram apresentadas as equações teóricas desenvolvidas por diversos autores para o cálculo da capacidade do conector *Perfobond*, que serão aqui relembradas. Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos dos ensaios e as equações existentes.

A Tabela 6.1 apresenta os resultados experimentais obtidos nos ensaios com os conectores *Perfobond*, e os resultados teóricos calculados com as equações propostas por Oguejiofor e Hosain (1997); Medberry e Shahrooz (2002); Ushijima et al. (2001); Al-Darzi et al. (2007) e Veríssimo (2007).

Nos trabalhos apresentados pelos respectivos autores, na consideração das armaduras das lajes, observou-se que foram consideradas as armaduras transversais em toda a laje, inclusive a armadura disposta acima dos conectores.

Na Tabela 6.1 são apresentados os valores experimentais segundo Eurocode 4 (2005): valor obtido para resistência última do ensaio ( $q_{u,test}$ ), a resistência última caracteristica ( $P_{rk}$ ), e a resistência última de cálculo ( $P_{rd}$ ), calculada pela eq. (6.1), e os valores teóricos calculados.

A eq. (6.1) apresenta a formulação para o cálculo da resistência última de cálculo:

$$P_{\rm rd} = \frac{f_u}{f_{ut}} \cdot \frac{P_{\rm rk}}{\gamma_{\rm v}}$$
(6.1)

Onde:

fu é a tensão de escoamento última mínima do aço do conector;

fut é a tensão de escoamento última real do aço do conector;

 $\gamma_v$  é o coefiente de segurança parcial da ligação para ligações a cisalhamento ( $\gamma_{v=}$ 1,25).

A Figura 6.1 e a Figura 6.2 apresentam estes resultados graficamente. Na Figura 6.1 são apresentados os resultados da primeira série de ensaios, e na Figura 6.2 os resultados da segunda série.

Nota-se em ambos os gráficos que as equações propostas por Oguejiofor e Hosain (1997), Medberry e Shahrooz (2002) e Veríssimo (2007), que consideram a contribuição das armaduras da laje, apresentaram valores relativamente superiores comparados com os resultados experimentais e com as outras propostas. Este fato pode estar relacionado com a quantidade de armaduras transversais que são consideradas nestas equações. Nos trabalhos apresentados por estes autores, constatou-se que toda a armadura da laje foi considerada no cálculo da resistência do conector. Desta maneira, nesta primeira análise também considerou-se que toda armadura da laje contribuia para resistência do conector. O número total de armaduras considerada por laje neste caso foi de 10 armaduras transversais.

Série	Protótipo	fck	qu,test	Prk	Prd	Oguejiofor	Medberry	Ushijima	Al-Darzi	Veríssimo
		MPa	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
	P-2F-120		324,10	291,69	233,35	525,08	529,23	141,23	301,91	561,81
1	P-2F-200	28,3	444,03	399,62	319,70	645,97	635,17	141,23	322,38	516,80
	P-4F-200		431,85	388,67	310,93	688,88	652,07	282,47	348,14	550,51
	P-SF-120		319,28	287,35	229,88	588,71	569,77	0,00	294,19	599,41
	P-2F-120		344,85	310,37	248,29	647,13	592,78	261,85	329,26	645,30
	P-2F-AR-120		443,03	398,73	318,98	718,60	663,46	314,27	329,20	729,11
2	P-SF-200	51,9	495,00	445,50	356,40	812,78	713,99	0,00	332,13	637,33
	P-2F-200		501,48	451,33	361,07	871,20	737,00	261,85	367,20	683,23
	P-2F-AR-200		549,70	494,73	395,78	942,67	807,69	314,27	367,14	735,53
	P-4F-200		458,93	413,04	330,43	929,62	760,01	523,71	402,27	729,12
	P-4F-AR-200		559,93	503,94	403,15	1072,57	901,39	628,54	402,15	833,73

Tabela 6.1 – Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond



Figura 6.1 - Experimental versus teórico da primeira série



Figura 6.2 - Experimental versus teórico da segunda série

Entretanto, ao considerar que apenas armaduras dispostas na frente do conector contribuem efetivamente na resistência do conector, os resultados obtidos apresentaram uma melhor correlação.

A Tabela 6.2 apresenta os valores calculados considerando além das armaduras nos conectores, seis armaduras transversais dispostas a frente do

Série	Protótipo	fck	qu,test	Prk	Prd	Oguejiofor	Medberry	Ushijima	Al-Darzi	Veríssimo
		MPa	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
	P-2F-120		324,10	291,69	233,35	382,14	387,86	141,23	302,03	394,18
1	P-2F-200	28,3	444,03	399,62	319,70	503,03	493,79	141,23	322,50	412,18
	P-4F-200		431,85	388,67	310,93	545,94	510,70	282,47	348,26	445,89
	P-SF-120		319,28	287,35	229,88	445,77	428,39	0,00	294,31	431,78
	P-2F-120		344,85	310,37	248,29	504,19	451,41	261,85	329,38	477,67
	P-2F-AR-120		443,03	398,73	318,98	575,66	522,09	314,27	329,32	561,49
2	P-SF-200	51,9	495,00	445,50	356,40	669,84	572,62	0,00	332,25	532,72
	P-2F-200		501,48	451,33	361,07	728,26	595,63	261,85	367,32	578,61
	P-2F-AR-200		549,70	494,73	395,78	799,73	666,32	314,27	367,26	630,92
	P-4F-200		458,93	413,04	330,43	786,68	618,64	523,71	402,39	624,50
	P-4F-AR-200		559,93	503,94	403,15	929,62	760,01	628,54	402,27	729,12

Tabela 6.2 - Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond



Figura 6.3 – Experimental versus teórico da primeira série



Figura 6.4 - Experimental versus teórico da segunda série

As equações propostas por Ushijima et al. (2001) e Veríssimo (2007) foram as que mais se aproximaram dos resultados experimentais. Entretanto, as outras equações serão também aqui discutidas. É importante destacar que nenhuma destas equações propostas leva em consideração as armaduras dos furos separadamente e nem diferencia sua posição.

### 6.2.1. Análise das equações de *Oguejiofor & Hosain*

A equação aqui considerada foi a segunda equação proposta por Oguejiofor e Hosain (1997):

$$q_{\mu} = 4.5.h_{sc}.t_{sc}.f_{c} + 0.91.A_{tr}.f_{\nu} + 3.31.n.d^{2}.\sqrt{f_{c}}$$
(6.2)

Esta equação considera a contribuição da área frontal do conector, as armaduras na laje e os cilindros de concreto. A contribuição destas parcelas é apresentada em termos de percentual na Tabela 6.3. Nesta tabela é apresentada a diferença média entre o valor experimental (*qu,test*) e o previsto pela equação e o respectivo desvio padrão.

Observando a contribuição de cada termo, notou-se que para os conectores com furos na primeira série, a contribuição da área frontal do

conector e das armaduras são em magnitudes semelhantes, enquanto é pequena a contribuição dos cilindros de concreto. Já na segunda série de ensaio, esta proporção não se mantém. A parcela que apresenta maior contribuição é a área frontal do conector Perfobond.

Série	Protótipo	fck	qu,test	Prk	Prd	Oguejiofor	Perfobond	Armad	Cilindros	Dif.	Desvio
		MPa	kN	kN	kN	kN	%	%	%	Média	
	P-2F-120		324,10	291,69	233,35	382,14	33%	56%	11%		
1	P-2F-200	28,3	444,03	399,62	319,70	503,03	49%	43%	9%	16%	5%
	P-4F-200		431,85	388,67	310,93	545,94	45%	39%	16%		
	P-SF-120		319,28	287,35	229,88	445,77	52%	48%	0%		
	P-2F-120		344,85	310,37	248,29	504,19	46%	43%	12%		
	P-2F-AR-120		443,03	398,73	318,98	575,66	40%	50%	10%		
2	P-SF-200	51,9	495,00	445,50	356,40	669,84	68%	32%	0%	32%	6%
	P-2F-200		501,48	451,33	361,07	728,26	63%	29%	8%		
	P-2F-AR-200		549,70	494,73	395,78	799,73	57%	36%	7%		
	P-4F-200		458,93	413,04	330,43	786,68	58%	27%	15%		
	P-4F-AR-200		559,93	503,94	403,15	929,62	49%	38%	13%		

Tabela 6.3 – Resultados experimentais versus teóricos do conector *Perfobond* – Oguejiofor & Hosain

Os resultados obtidos na primeira série apresentaram uma diferença média de 16% entre os resultados experimentais e teóricos, e desvio padrão de 5%. Na segunda série, esta diferença duplicou. Uma das possibilidades desta ocorrência, está relacionada com a resistência a compressão do concreto da segunda série ser superior a 40MPa, que seria o limite para se adotar esta equação.

### 6.2.2. Análise da equação de Medberry & Shahrooz

A equação proposta por Medberry e Shahrooz (2002) considera a contribuição da laje de concreto, a ligação química entre a seção de aço e o concreto, a armadura transversal e a contribuição dos cilindros de concreto:

$$q_{u} = 0.747.b.h.\sqrt{f_{c}} + 0.413.b_{f}.L_{c} + 0.9.A_{tr}.f_{y} + 1.66.n.\pi \left(\frac{d}{2}\right)^{2}.\sqrt{f_{c}}$$
(6.3)

A contribuição de cada parcela é apresentada em percentual na Tabela 6.4. Como descrito no Capítulo 3, a aderência química foi eliminada, visto que a

superfície de contato entre o aço e concreto recebeu tratamento com óleo desmoldante.

Esta equação apresentou uma diferença de 14% e 20% em relação aos valores experimentais com desvio padrão de 3% e 5%, na primeira e segunda série respectivamente. Portanto mostrou-se mais adequada do que a equação analisada anteriormente, já que abrange ensaios com concreto acima de 40MPa.

Tabela 6.4 – Resultados experimentais versus teóricos do conector *Perfobond* – Medberry e Shahrooz

								Lig				
Série	Protótipo	fck	qu,test	Prk	Prd	Medberry	Laje	Quim	Armad	Cilindros	Dif.	Desvio
		MPa	kN	kN	kN	kN	%	%	%	%	Média	
	P-2F-120		324,10	291,69	233,35	387,86	41%	0%	55%	4%		
1	P-2F-200	28,3	444,03	399,62	319,70	493,79	54%	0%	43%	3%	14%	3%
	P-4F-200		431,85	388,67	310,93	510,70	52%	0%	42%	7%		
	P-SF-120		319,28	287,35	229,88	428,39	50%	0%	50%	0%		
	P-2F-120		344,85	310,37	248,29	451,41	48%	0%	47%	5%		
	P-2F-AR-120		443,03	398,73	318,98	522,09	41%	0%	54%	4%		
2	P-SF-200	51,9	495,00	445,50	356,40	572,62	63%	0%	37%	0%	20%	5%
	P-2F-200		501,48	451,33	361,07	595,63	61%	0%	36%	4%		
	P-2F-AR-200		549,70	494,73	395,78	666,32	54%	0%	42%	3%		
	P-4F-200		458,93	413,04	330,43	618,64	58%	0%	34%	7%		
	P-4F-AR-200		559,93	503,94	403,15	760,01	47%	0%	47%	6%		

A parcela que tem maior contribuição é a primeira, que considera a contribuição da laje de concreto, seguida da contribuição das armaduras e dos cilindros de concreto.

### 6.2.3. Análise da equação de Ushijima et al.

Ushijima e al. (2001) propuseram equações que levam em consideração os furos dos conectores *Perfobond* e a presença de armaduras passantes ou não. A eq.(6.4) é para os conectores *Perfobond* sem armaduras nos furos:

$$q_{u} = 3.38.d^{2} \sqrt{\frac{t_{sc}}{d}} f_{c} - 39$$
(6.4)

A segunda equação, eq.(6.5), considera a presença das armaduras nos furos.

$$q_{u} = 1,45 \left[ \left( d^{2} - d_{st}^{2} \right) f_{c}' + d_{st}^{2} f_{y} \right] - 26,1$$
(6.5)

Conforme observado na Figura 6.4 e na Tabela 6.5, nos ensaios com *Perfobond* com dois furos, a equação se mostrou segura, apresentando valores teóricos inferiores aos experimentais. Na primeira série ao valores experimentais foram 132% maior que o teórico e na segunda série, para os conectores com dois furos, a diferença foi de 60%. Já nos ensaios com quatro furos, da segunda série os valores teóricos foram superiores aos experimentais, apresentando uma diferença de 12%. Esta diferença, como descrita no capítulo 3, justifica-se pela influência dos furos no conector, no qual a interferência da zona de tensão de um sobre o outro, não permite que todos os quatro furos colaborem efetivamente para a resistência do conector.

Série	Protótipo	fck	qu,test	Prk	Prd	Ushijima	Dif.	Desvio
		MPa	kN	kN	kN	kN	Média	
	P-2F-120		324,10	291,69	233,35	141,23		
1	P-2F-200	28,3	444,03	399,62	319,70	141,23	132%	81%
	P-4F-200		431,85	388,67	310,93	282,47		
	P-SF-120		319,28	287,35	229,88	0,00		
	P-2F-120		344,85	310,37	248,29	261,85		
	P-2F-AR-120		443,03	398,73	318,98	314,27		
2	P-SF-200	51,9	495,00	445,50	356,40	0,00		
	P-2F-200		501,48	451,33	361,07	261,85		
	P-2F-AR-200		549,70	494,73	395,78	314,27	60%	28%
	P-4F-200		458,93	413,04	330,43	523,71		
	P-4F-AR-200		559,93	503,94	403,15	628,54	12%	1%

Tabela 6.5 - Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond - Ushijima

### 6.2.4. Análise da equação de Al-Darzi

Al-Darzi et al. (2007) propuseram a seguinte equação para o cálculo da resistência do conector Perfobond:

$$q_{u} = 255,31 + 7,62 \times 10^{-4} h_{sc} t_{sc} f_{ck} - 7,59 \times 10^{-7} A_{tr} f_{y} + 2,53 \times 10^{-3} A_{sc} \sqrt{f_{ck}}$$
(6.6)

O primeiro termo é uma constante, fixada a partir dos resultados obtidos dos ensaios destes autores, o segundo termo considera a contribuição da área frontal do conector, o terceiro a contribuição das armaduras (transversais e nos furos) e o quarto termo a contribuição dos cilindros de concreto. Nota-se que nesta equação, a parcela de contribuição das armaduras não é somada, e sim

subtraída. A contribuição de cada parcela da equação é apresentada em percentual na Tabela 6.6.

						Al-						
Série	Protótipo	fck	qu,test	Prk	Prd	Darzi	Const.	Perfobond	Armad	Cilindros	Dif.	Desvio
		MPa	kN	kN	kN	kN	255,31kN	%	%	%	Média	
	P-2F-120		324,10	291,69	233,35	302,03	85%	7%	0%	9%		
1	P-2F-200	28,3	444,03	399,62	319,70	322,50	79%	13%	0%	8%	23%	15%
	P-4F-200		431,85	388,67	310,93	348,26	73%	12%	0%	15%		
	P-SF-120		319,28	287,35	229,88	294,31	87%	13%	0%	0%		
	P-2F-120		344,85	310,37	248,29	329,38	78%	12%	0%	11%		
	P-2F-AR-120		443,03	398,73	318,98	329,32	78%	12%	0%	11%		
2	P-SF-200	51,9	495,00	445,50	356,40	332,25	77%	23%	0%	0%	30%	18%
	P-2F-200		501,48	451,33	361,07	367,32	70%	21%	0%	10%		
	P-2F-AR-200		549,70	494,73	395,78	367,26	70%	21%	0%	10%		
	P-4F-200		458,93	413,04	330,43	402,39	63%	19%	0%	17%		
	P-4F-AR-200		559,93	503,94	403,15	402,27	63%	19%	0%	17%		

Tabela 6.6 - Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond - Al-Darzi

O termo que apresenta maior contribuição para a resistência refere-se a parte da constante da equação. As armaduras não apresentaram contribuição efetiva. A contribuição da área frontal do conector e dos cilindros de concreto apresentaram praticamente a mesma proporção no caso da primeira série de ensaios. Na segunda série de ensaios, os conectores Perfobond com 200mm de espessura de laje apresentaram o dobro de contribuição do Perfobond em relação aos cilindros de concreto.

### 6.2.5. Análise da equação de Veríssimo

Veríssimo (2007) propôs uma equação que considera a influência da taxa de armadura e da excentricidade do conector.

$$q_{u} = 3,68.\sqrt{\frac{h_{sc}}{t_{c}}}h_{sc}t_{sc}f_{c}' + 2,6.n.d^{2}\sqrt{f_{c}'} + 0,13.A_{cc}\sqrt{f_{c}'} + 34,3\times10^{6}\left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}}\right)$$
(6.7)

O primeiro termo considera a contribuição do conector levando em consideração sua excentricidade, o segundo considera os cilindros de concreto, o terceiro o cisalhamento do concreto e o quarto termo a taxa de armadura. A Tabela 6.7 apresenta a contribuição de cada parcela desta equação.

Série	Protótipo	fck	quitest	Prk	Prd	Veríssimo	Perfobond	Cilindros	Laie	Armad.	Dif.	Desvio
	e.e.pe	MPa	kN	kN	kN	kN	%	%	%	%	Média	200110
	P-2F-120		324,10	291,69	233,35	394,18	16%	9%	11%	64%		
1	P-2F-200	28,3	444,03	399,62	319,70	412,18	37%	8%	17%	38%	4%	13%
	P-4F-200		431,85	388,67	310,93	445,89	34%	15%	16%	35%		
	P-SF-120		319,28	287,35	229,88	431,78	28%	0%	14%	58%		
	P-2F-120		344,85	310,37	248,29	477,67	25%	10%	13%	53%		
	P-2F-AR-120		443,03	398,73	318,98	561,49	21%	8%	11%	60%		
2	P-SF-200	51,9	495,00	445,50	356,40	532,72	52%	0%	18%	29%	20%	8%
	P-2F-200		501,48	451,33	361,07	578,61	48%	8%	17%	27%		
	P-2F-AR-200		549,70	494,73	395,78	630,92	44%	7%	15%	33%		
	P-4F-200		458,93	413,04	330,43	624,50	45%	15%	15%	25%		
	P-4F-AR-200		559,93	503,94	403,15	729,12	38%	13%	13%	36%		

Tabela 6.7 – Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond –

Analisando esta equação, constatou-se que para lajes de 120mm, a maior contribuição para resistência da ligação provém das armaduras, seguida da área frontal do conector, da laje e dos cilindros. Já para lajes de 200mm, a contribuição frontal do conector tem mais influência na resistência, seguida das armaduras, da laje e dos cilindros de concreto respectivamente. Esta equação apresentou uma diferença média de 4%, na primeira série, e 20%, na segunda, entre o valor teórico e o valor experimental.

### 6.2.6. Considerações iniciais

Veríssimo

Conforme observado na Figura 6.3 e na Figura 6.4, as equações que mais se aproximaram dos resultados experimentais foram as equações propostas por Medberry e Shahrooz (2002), Al-Darzi et al. (2007) e Veríssimo (2007).

A Figura 6.5 e Figura 6.6 reapresentam os resultados experimentais e os teóricos propostos por estes autores. Analisando estas equações com os ensaios deste trabalho, a formulação apresentada por Al-Darzi et al. (2007) é a que melhor representa os valores de cálculo (Prd).

Por outro lado, os modelos propostos por Medberry & Shahrooz (2002) e Veríssimo (2007) reproduzem melhor os valores obtidos experimentalmente (Prk).



Figura 6.5 - Experimental versus teórico da segunda série



Figura 6.6 - Experimental versus teórico da segunda série

Perante os resultados, verifica-se que a formulação de Al-Darzi et al. (2007) é aquela que, aparentemente, reproduz melhor o comportamento dos conectores aqui estudados, no que diz respeito aos valores de projeto.

Vale ressaltar que as formulações apresentadas por todos os autores aqui discutidos, não consideram separadamente as armaduras dos furos, e nem os dois planos de cisalhamento dos cilindros de concreto.

Portanto, num projeto de viga mista, ao considerar um conector *Perfobond*, recomenda-se adotar a formulação mais segura, neste caso a formulação de Al-Darzi et al. (2007).

### 6.2.7.

### Modelo ajustado com análise de regressão múltipla

A fim de se propor uma equação que se adequasse aos conectores Perfobond estudados neste trabalho, realizou-se uma regressão múltipla com os dados apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Dados considerados na análise de regressão e resultados

Série	Protótipo	fck	(A)	(B)	(C)	(D)		Exp /
		MPa	Perfobond	Armad	Cilindros	Prd Exp	Prd prev	Prd prev
	P-2F-120		27736,8	235619,4	10182,04	233,352	233,352	1,00
1	P-2F-200	28,3	54600	235619,4	10182,04	319,698	319,698	1,00
	P-4F-200		54600	235619,4	20364,09	310,932	310,932	1,00
	P-SF-120		51412,14	235619,4	0	229,8816	257,3241	0,89
	P-2F-120		51412,14	235619,4	13862,44	248,292	249,0115	1,00
	P-2F-AR-120		51412,14	314159,3	13862,44	318,9816	290,8195	1,10
2	P-SF-200	51,9	101205	235619,4	0	356,4	354,2561	1,01
	P-2F-200		101205	235619,4	13862,44	361,0656	345,9435	1,04
	P-2F-AR-200		101205	314159,3	13862,44	395,784	387,7515	1,02
	P-4F-200		101205	235619,4	27724,88	330,4296	337,6309	0,98
	P-4F-AR-200		101205	392699,1	27724,88	403,1496	421,2469	0,96

Onde:  $A = (h_{sc} \cdot t_{sc} \cdot f_{ck})$ ;  $B = (A_{tr} \cdot f_y)$ ;  $C = (A_{sc} \cdot \sqrt{f_{ck}})$ ; *Prd Exp* é o valor de projeto experimental; *Prd prev* é o valor obtido com as equações propostas,  $h_{sc}$  é a altura do conector;  $t_{sc}$  é a espessura do conector;  $f_{ck}$  é a resistência a compressão do concreto;  $A_{tr}$  é a área de armadura transversal considerada abaixo do conector (em cada lado da laje considerou-se 6 armaduras);  $f_y$  é a resistência nominal à tração do aço;  $A_{sc}$  é a área do concreto nos furos do conector.

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, Oguejiofor & Hosain (1994). Diversos autores utilizaram este tipo de análise com

sucesso para simulação do comportamento de conectores de cisalhamento (Oguejiofor & Hosain (1994, 1997); Medberry e Shahrooz (2002), Al-Darzi et al. (2007) e Veríssimo (2007).

Levando em consideração que a equação proposta por Al-Darzi et al. (2007) apresentou melhores resultados, a análise de regressão foi baseada na sua equação:

$$q_u = \beta 1 + \beta 2 \times (h_{sc} \cdot f_{ck}) + \beta 3 \times (A_{tr} \cdot f_y) + \beta 4 \times (A_{sc} \cdot \sqrt{f_{ck}})$$
(6.8)

Foram avaliados dois modelos, visto que a resistência a compressão entre as séries foi bastante significativa. Os coeficientes de regressão para cada série estão apresentados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Coeficientes de regressão

fck	Constante	Perfobond	Armad	Cilindros
MPa	β1	β2	β3	β4
28,3	152,964	0,00321429	0	-0,00086
51,9	31,81592645	0,0019467	0,000532	-0,0006

Os resultados obtidos com os novos modelos propostos estão apresentados na Tabela 6.8 (Prd prev) e graficamente na Figura 6.7. Ressalta-se que estes modelos são aplicáveis a conectores tipo Perfobond que se enquadram nas características aqui estudadas, nas quais destacam-se, espessura de laje de 120 e 200mm, conectores com dois ou quatro furos, espessura dos conectores iguais a 13mm, alturas dos conectores de 76 e 150mm, armaduras nos estribos de 10mm de diâmetro. A equação resultante para a resistência do conector Perfobond com resistência a compressão inferior a 30MPa é apresentada na equação (6.9), enquanto que para resistência a compressão superior a 30MPa é apresentada na equação (6.10):

$$q_{u} = 152.9 + 3.21 \times 10^{-3} \times (h_{sc} t_{sc} f_{ck}) - 0.86 \times 10^{-3} \times (A_{sc} \sqrt{f_{ck}})$$
(6.9)

$$q_{u} = 31.8 + 1.9 \times 10^{-3} \times (h_{sc} t_{sc} f_{ck}) + 0.53 \times 10^{-3} \times (A_{tr} f_{y}) - 0.6 \times 10^{-6} \times (A_{sc} \sqrt{f_{ck}})$$
(6.10)





a) Primeira série – fck = 28MPa Figura 6.7 – Experimental versus modelo proposto



A equação (6.9) apresentou uma correlação perfeita entre o valor previsto e experimental.

O erro médio da relação entre o valor experimental e o valor previsto pela equação (6.10), Figura 6.7b, foi de 1,00, e o desvio padrão foi de 6%. O coeficiente de determinação, que compara os valores previstos e reais da regressão múltipla, foi de 0,92, significando que houve uma correlação quase perfeita.

# 6.3. Discussão dos resultados dos ensaios de *push-out* com *T-Perfobond*

O conector *T-Perfobond* é uma nova geometria de conector proposto neste trabalho. Não existe portanto uma equação para dimensionamento de tal conector. Neste trabalho, adotou-se a equação proposta pelo Eurocode 4 (2001), numa versão anterior, que apresentava uma formulação para cálculo de conectores rígidos tipo bloco, para prever a capacidade de carga do conector proposto.

Relembrando a equação apresentada no Capítulo 2, a resistência de projeto do conector-T (conector bloco) é dada pela seguinte equação segundo o Eurocode 4 (2001):

$$q_u = \eta A_{f1} f_{ck} / \gamma c \tag{6.11}$$

Seguindo esta formulação, apresenta-se aqui uma comparação entre os valores experimentais obtidos dos ensaios de *push-out* com os valores teóricos calculados, Tabela 6.10.

Série	Protótipo	fck	qu,test	Prk	Prd	EC4	qu,test /	Dif.	Desvio
		MPa	kN	kN	kN	kN	EC4	Média	
	TP-2F-120		520,60	468,54	374,83	519,70	1,00		
1	TP-2F-200	28,3	659,33	593,39	474,71	941,34	0,70	19%	17%
	TP-4F-200		676,30	608,67	486,94	941,34	0,72		
	TP-SF-120		621,95	559,76	447,80	798,11	0,78		
	TP-2F-120		647,90	583,11	466,49	798,11	0,81		
3	TP-2F-AR-120		683,38	615,04	492,03	798,11	0,86	27%	16%
	TP-2F-120-IN	43,9	714,68	643,21	514,57	798,11	0,90		
	TP-2F-200		780,35	702,32	561,85	1445,63	0,54		
	TP-4F-200		750,28	675,25	540,20	1445,63	0,52		
4	TP-2F-AR-120-A-IN-10		585,30	526,77	421,42	612,50	0,96	-4%	
	TP-2F-AR-120-B-IN-12	33	649,10	584,19	467,35	612,50	1,06	6%	
5	TP-2F-AR-IN-10-12	25,7	388,20	349,38	279,50	477,01	0,81	-19%	
	TP-2F-AR-IN-10-16	29	540,50	486,45	389,16	538,26	1,00	0%	
	TP-2F-AR-IN-12-16	26	584,38	525,94	420,75	482,58	1,21	21%	
6	TP-2F-AR-IN-10-12-C	35,3	594,62	535,16	428,13	655,19	0,91	-9%	

Tabela 6.10 – Resultados experimentais versus teóricos do conector T-Perfobond

Os conectores *T-Perfobond* foram avaliados na posição descrita pelo Eurocode 4 (2001) e numa posição invertida em relação à direção da compressão, Figura 6.9.



(a) Posição Eurocode 4

(b) Posição invertida

Figura 6.8 – Conectores T-Perfobond

A Figura 6.9 apresenta os resultados experimentais e teóricos para os conectores *T-Perfobond* posicionados de acordo com a Figura 6.8a), onde a mesa do conector mobiliza a laje de concreto, sendo esta portanto comprimida.

A Figura 6.10 apresenta os resultados experimentais e teóricos para os conectores *T-Perfobond* na posição invertida, Figura 6.8b).



Figura 6.9 - Experimental versus teórico - conector T-Perfobond



Figura 6.10 - Experimental versus teórico - conector T-Perfobond invertido

Observando os resultados apresentados no gráfico da Figura 6.9, verificouse que para os conectores *T-Perfobond* com laje de 120mm, a diferença entre os valores experimentais e teóricos variou de 14% a 30% aproximadamente, enquanto que para os conectores com laje de 200mm, essa diferença aumentou para 48%. Em todos os casos a equação existente mostrou-se nem um pouco conservadora, sendo contra a segurança. Seus valores previstos foram superiores aos valores experimentais.

Analisando os resultados com os conectores na posição invertida, a diferença cai para uma média de 10%. Entretanto, não sugere-se esta equação para o dimensionamento do conector *T-Perfobond*, visto que esta equação considera apenas a contribuição do bloco.

A formulação para o conector *T-Perfobond*, deve considerar a contribuição dos cilindros de concreto, das armaduras e da parte do conector composta pelo Perfobond. A seguir apresenta-se um modelo aproximado para o dimensionamento do conector T-Perfobond.

### 6.3.1. Modelo ajustado com análise de regressão múltipla

A partir dos resultados obtidos dos ensaios experimentais com os conectores T-Perfobond, e considerando a equação de Al-Darzi et al. (2007) para o dimensionamento do Perfobond, foi possível realizar uma análise de regressão múltipla e apresentar um modelo aproximado para o dimensionamento de um conector T-Perfobond. A Tabela 6.11 apresenta os dados utilizados na análise de regressão múltipla.

Eq.	Série	Protótipo	fck	(A)	(B)	(C)	(D)			Exp /
·		·		( )				Prd	Prd	Prd
			MPa	Bloco	Perfobond	Armad	Cilindros	Exp	prev	prev
		TP-2F-120		519,70	26029,92	235619,45	10182,04	374,83	397,93	0,94
	1	TP-2F-200	28,3	941,34	51240,00	235619,45	10182,04	474,71	469,97	1,01
		TP-4F-200		941,34	51240,00	235619,45	20364,09	486,94	468,58	1,04
		TP-SF-120		798,11	39974,52	235619,45	0,00	447,80	450,48	0,99
(1)		TP-2F-120		798,11	39974,52	235619,45	12617,99	466,49	448,77	1,04
	3	TP-2F-AR-120	43,9	798,11	39974,52	314159,27	12617,99	492,03	492,03	1,00
		TP-2F-200		1445,63	78690,00	235619,45	12617,99	561,85	559,40	1,00
		TP-4F-200		1445,63	78690,00	235619,45	25235,98	540,20	557,69	0,97
(3)	4	TP-2F-AR-120-A-IN-10		612,50	30678,12	314159,27	11053,83	421,42	421,42	1,00
		TP-2F-AR-120-B-IN-12	33	612,50	30678,12	490873,85	11053,83	467,35	467,35	1,00
	5	TP-2F-AR-IN-10-12	25,7	477,01	23891,75	314159,27	9754,89	279,50	279,50	1,00
(2)		TP-2F-AR-IN-10-16	29	538,26	26959,56	314159,27	10362,27	389,16	389,16	1,00
		TP-2F-AR-IN-12-16	26	482,58	24170,64	314159,27	9811,66	420,75	420,75	1,00
(3)	6	TP-2F-AR-IN-10-12-C	35,3	655,19	32816,29	314159,27	11432,56	428,13	428,13	1,00
	3	TP-2F-120-IN	43,9	798,11	39974,52	235619,45	12617,99	514,57	430,18	1,20

Tabela 6.11 –	Dados	considerados i	na análise	de regressão	e resultados	obtidos

Onde: 
$$A = \sqrt{\frac{A_{f2}}{A_{f1}}} A_{f1} f_{ck}; \quad B = (h_{sc} t_{sc} f_{ck}); \quad C = (A_{tr} f_{y}); \quad D = (A_{sc} \sqrt{f_{ck}});$$

 $A_{f1}$  é a área da superfície frontal do conector ( $h_{sc}xbf$ ); bf é a largura da mesa do conector;  $A_{f2}$  é a área da superfície dianteira do conector ampliado em uma inclinação de 1:5, ver capítulo 2.

A equação proposta para o dimensionamento do conector T-perfobond é a combinação da equação do conector bloco, proposta no EUROCODE 4 (2001), numa versão anterior, com a equação proposta por Al-Darzi et al. (2007) para o cálculo da contribuição do Perfobond.

$$q_{u} = \beta 1 + \beta 2 \times \left(\sqrt{\frac{A_{f2}}{A_{f1}}} A_{f1} f_{ck}\right) + \beta 3 \times (h_{sc} f_{sc} f_{ck}) + \beta 4 \times (A_{tr} f_{y}) + \beta 5 \times (A_{sc} \sqrt{f_{ck}})$$
(6.12)

Os modelos foram avaliados separadamente. Foram considerados os conectores T-perfobond instalados de acordo com a Figura 6.8a, de acordo com o EUROCODE 4, os conectores na posição invertida com resistência a compressão inferior a 30MPa e resistência superior a 30MPa. Portanto, são propostas três equações. Os coeficientes de regressão para cada equação estão apresentados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Coeficientes	de	regressão
----------------------------	----	-----------

	fck	Constante	Bloco	Perfobond	Armad	Cilindros
	MPa	β1	β2	β3	β4	β5
T-Perfobond (1)	28,3 e 43,9	174,008086	0,25057432	-0,00133322	0,000550824	-0,000136
T-Perfobond-IN (2)	menor que 30	-425113,49	0	-16,69199454	0	84,490305
T-Perfobond-IN (3)	maior que 30	243,472348	0	0,003138382	0,000259945	0

As equações para cada grupo analisado são apresentadas a seguir.

- Conectores T-Perfobond, equação (6.13):

$$q_{u} = 174 + 0.25 \times \left(\sqrt{\frac{A_{f2}}{A_{f1}}} \cdot A_{f1} \cdot f_{ck}\right) - 1.3 \times 10^{-3} \times (h_{sc} \cdot t_{sc} \cdot f_{ck}) + 0.55 \times 10^{-3} \times (A_{tr} \cdot f_{y}) - 0.14 \times 10^{-3} \times (A_{sc} \cdot \sqrt{f_{ck}})$$

$$(6.13)$$

- Conectores T-Perfobond Invertido com resistência a compressão do concreto inferior a 30MPa, equação (6.14):

$$q_{u} = -0.43 \times 10^{6} - 16.7 \times (h_{sc} t_{sc} f_{ck}) + 84.5 \times (A_{sc} \sqrt{f_{ck}})$$
(6.14)

- Conectores T-Perfobond Invertido com resistência a compressão do concreto superior a 30MPa, equação (6.15):

$$q_{u} = 243.5 + 3.14 \times 10^{-3} \times (h_{sc} t_{sc} f_{ck}) + 0.25 \times 10^{-3} \times (A_{tr} f_{y})$$
(6.15)

Nota-se que para os conectores T-perfobond na posição invertida, não há contribuição do bloco, apenas a parte do conector Perfobond contribue para a resistência do conector ( $\beta$ 2=0). Já nos conectores T-perfobond, há uma contribuição do bloco em torno de 25%.

Os resultados obtidos com os modelos propostos estão apresentados na Tabela 6.11 e graficamente na Figura 6.11 e Figura 6.12. Estes modelos são aplicáveis a conectores tipo T-Perfobond que se enquadram nas características aqui estudadas, nas quais destacam-se, espessura de laje de 120 e 200mm, conectores com dois ou quatro furos, espessura dos conectores iguais a 13mm alma e 18 ou 13 na mesa, alturas dos conectores de 76 e 150mm, armaduras nos estribos de 10mm de diâmetro. A diferença média obtida para os conectores T-Perfobond, Figura 6.11 e Figura 6.12, foi de 1,00, o que significa que o modelo aproximado é capaz de estimar a resistência do conector T-perfobond com uma precisão de quase 100%. Na Figura 6.12 apenas o conector T-perfobond com dois furos e laje de 120mm (TP-2F-120-IN), apresentou uma diferença superior. Isso deve-se ao fato de que dentro deste grupo analizado, este conector não possuía armaduras nos furos.

As equações propostas mostraram-se seguras para o cálculo da resistência do conector T-perfobond.



Figura 6.11 - Experimental versus modelo proposto conector T-Perfobond.





A equação (6.13) apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,93, apresentando portanto uma boa correlação entre o valor previsto e experimental. A diferença média entre o valor experimental e o previsto foi praticamente 1,00 e o desvio padrão de 3%. As equações (6.14) e (6.15) apresentaram uma excelente correlação entre o valor previsto e experimental, com coeficiente de determinação igual a 1,00.

### 6.4. Comparação do ensaio em escala real com ensaio *push-out*

### 6.4.1.

# Força de cisalhamento por conector e deslizamento entre a seção de aço e concreto

Foram utilizados três modelos aproximados para a obtenção da força de compressão atuante na laje de concreto, força esta resistida pelos conectores de cisalhamento.

Nos dois primeiros modelos, adotou-se a análise elástica e análise plástica considerando uma interação total, cujo diagrama de tensões estão apresentados na Figura 6.13.

Na análise elástica, a força de compressão atuante na laje para cada momento atuante, foi calculada a partir da tensão máxima elástica.

A tensão máxima no concreto é calculada pela seguinte equação em função do momento atuante:

$$\sigma_c = \frac{1}{n} \times \frac{M \times a}{I} \tag{6.16}$$

Onde: n=E/Ec (n=7,8); M é o momento atuante na viga mista; a é a espessura da laje comprimida (a=106mm); I é o momento de inércia da seção mista transformada.

Com o valor da tensão no concreto calculado, é possível calcular a força de compressão na laje, que corresponde a resultante que passa pelo baricentro do volume que representa a distribuição de tensões:

$$F = \frac{1}{2} \times b \times a \times \sigma_c \tag{6.17}$$

A análise plástica seguiu os procedimentos, cujas variáveis estão apresentadas na Figura 6.13:

- Arbitrou-se primeiramente a espessura da laje de concreto sob compressão (a1) e posteriormente calculou-se o braço de alavanca (e):

$$e = \frac{d}{2} + (t_c - a_1) \tag{6.18}$$

Onde: d é a altura do perfil metálico;  $t_c$  é a espessura da laje;  $a_1$  é um valor arbitrário, adotado igual a 40mm.

- O binário da força é calculado em função do momento atuante:

$$F = \frac{M}{e} \tag{6.19}$$

- Verificou-se a espessura da laje comprimida:

$$a = \frac{F}{0.85 \times \phi_c \times b \times f_{ck}} \tag{6.20}$$

Onde:  $\phi c$  é o fator de resistência do concreto, adotado igual a 1 por ser um ensaio experimental; b é a largura efetiva da laje de concreto (b=2300mm); f<sub>ck</sub> é a resistência do concreto a compressão (f<sub>ck</sub>=22MPa).

 Recalculou-se o valor efetivo do braço de alavanca (e), equação (6.18), substituindo a₁ pelo valor de a da equação (6.20).

 E aplicando o valor e efetivo na (6.19), obteve-se a força de cisalhamento na viga no meio do vão.



Figura 6.13 – Seção transversal da viga mista

No terceiro modelo de aproximação, considerando a interação parcial, calculou-se a força de compressão na laje, analisando as tensões elásticas na viga de aço. As tensões foram obtidas através das deformações médias entre os extensômetros posicionados na seção BB, no meio da viga, utilizando a lei de Hooke. A Figura 6.14 apresenta o modelo esquemático para o cálculo das forças



Figura 6.14 – Modelo esquemático para o cálculo da força de compressão

$$R1 = \frac{1}{2} \times (\sigma m_{\text{inf}} \times bf \times tf)$$
(6.21)

$$R2 = \frac{1}{2} \times (\sigma m_{\text{inf}} \times tw \times h) \tag{6.22}$$

$$R3 = \frac{1}{2} \times (\sigma m_{\text{sup}} \times bf \times tf)$$
(6.23)

Onde:

σm<sub>inf</sub> é a tensão média na mesa inferior calculada em função da deformação média entre os extensômetros 34 e 38;

 $\sigma m_{sup}$  é a tensão média na mesa superior calculada em função da deformação média entre os extensômetros 37 e 39;

bf é a largura da mesa e tf é a espessura da mesa;

h é a altura da viga (d-2tf) e tw é a espessura da alma.

Neste modelo aproximado, a força R3 foi desprezada, pois o valor de tensão não foi significativo.

O gráfico da Figura 6.15 apresenta as curvas força versus deslizamento dos conectores no ensaio de *push-out* e no ensaio em escala real. Neste gráfico é possível observar a evolução do deslizamento entre a seção de aço e do concreto, em função do carregamento atuante nos dois tipos de ensaios utilizados para análise do conector *T-Perfobond*.



Figura 6.15 - Força por conector versus deslizamento

Verificou-se que todos os modelos aproximados adotados para o cálculo da força de compressão na laje, através dos resultados do ensaio em escala real, apresentaram capacidade de carga superior a do ensaio de *push-out*. Vale ressaltar que a força obtida no ensaio em escala real corresponde a força de compressão total, que seria distribuída nos três conectores (até o meio do vão). Não seria correto dividir essa força por três conectores, visto que esta não seria igualmente distribuída nos três conectores. Este fato foi comprovado pelos resultados obtidos do ensaio em escala real, Capítulo 4, onde os conectores instalados nas extremidades apresentaram maiores deformações, estando portanto sujeitos a um carregamento maior.

O modelo que melhor representa o ensaio em escala real foi apresentado na curva Aprox. Elástica – Inter. Parcial. Considerando este modelo até a fase elástica do ensaio, o valor da força de compressão na laje equivale a 98% acima do valor do ensaio de *push-out*.

### 6.4.2. Conclusões

Em relação ao comportamento do ensaio, ambos apresentaram semelhança em termos de capacidade de deslizamento.

Em relação aos resultados da força obtida no ensaio em escala real, as cargas que atuam nos conectores são superiores as dos ensaios de *push-out*. Seguindo esta análise uma possível conclusão é que o ensaio de *push-out* pode ser conservativo para o projeto de uma viga mista.

De acordo com Lee et al. (2005) e Valente (2007), conclusões semelhantes foram obtidas quando compararam os resultados dos ensaios de *push-out* com os ensaios em escala real. Em relação ao conector estudado neste trabalho, deve-se considerar também a contribuição das armaduras em torno do conector no ensaio em escala real, contribuindo assim para um ganho na sua resistência.

Em relação ao ensaio de *push-out*, o ideal é que haja um ajuste no critério de falha, considerando a capacidade de deformação, e não somente a capacidade de carga última.

### 6.5. Estudo econômico

Um estudo econômico foi desenvolvido em 2008 para analisar a viabilidade do uso dos conectores *T-Perfobond*, Vianna et al. (2008d). Para avaliar a utilização dos diversos tipos de conectores sob o ponto de vista econômico, foram dimensionadas vigas mistas com laje de 120 mm para vãos distintos (6, 9 e 12 m) com base no Eurocode 4 (2005). Foram considerados os conectores de utilização mais corrente – os studs – e os conectores *Perfobond*, *T-Perfobond* e tipo *T*, para cada uma dessas vigas. Calculou-se a quantidade de conectores necessária para resistir às forças longitudinais de cisalhamento na interface aço-concreto considerando interação total, sendo usada uma distribuição plástica de forças pelos conectores, exceto no caso do conector tipo *T-Perfobond*, que por não ser dútil, foi dimensionado elasticamente, e do lado da segurança, disposto com iguais espaçamentos ao longo da viga.

Para o dimensionamento das vigas mistas, considerou-se um espaçamento entre vigas paralelas de 4,00 m e resistência à compressão do concreto de 47 MPa, o mesmo valor médio encontrado nos ensaios de *push-out* dos conectores. As ações consideradas foram baseadas em valores correntes

em estruturas deste tipo, tendo sido adotada uma ação permanente total de cerca de 4 kN/m<sup>2</sup> e uma sobrecarga de 2 kN/m<sup>2</sup>.

Considerando apenas o número de conectores necessário, a Tabela 6.13 apresenta a quantidade de conectores de cada tipo e os respectivos espaçamentos (S) para cada vão considerado.

Conector	Vão (m)	6	Vão (m)	9	Vão (m)	12
	Nº Conec.	S (cm)	Nº Conec.	S (cm)	Nº Conec.	S (cm)
P-2F-120-A / B	5	150	8	129	11	120
P-2F-AR-120-A / B	4	200	7	150	9	150
TP-2F-120-A / B	3	300	5	225	6	240
TP-2F-AR-120-A / B	3	300	4	300	6	240
TP-2F-120-A/B-IN	3	300	4	300	6	240
T-2F-120-A / B	3	300	5	225	7	200
Studs 19mm	14	46	25	38	34	36

Tabela 6.13 - Quantidade de conectores para os vãos analisados

Os valores são representados graficamente para melhor compreensão na Figura 6.16, onde no primeiro gráfico se observa que o número de conectores tipo *stud* é sempre muito superior à quantidade dos restantes tipos de conectores propostos. No segundo gráfico da Figura 6.16 são representados apenas os conectores *Perfobond*, *T-Perfobond* e *T* para melhor análise dos resultados. Os conectores que requerem menores quantidades são os *T-Perfobond* com dois furos e na posição invertida, e o conector com dois furos e armaduras através dos furos, Figura 6.17.

Para cada viga avaliaram-se os custos associados a cada uma das seguintes componentes do preço final: custo do perfil metálico, custo dos conectores no caso dos *studs*, ou do seu fabrico no caso dos *Perfobond*, *T-Perfobond* ou conector *T*, e montagem dos conectores. Todos os custos foram avaliados separando os custos do material e da mão-de-obra. Os custos aqui apresentados, referentes ao Brasil, são comparados com os custos praticados na EUROPA, especificamente em Portugal.

A Figura 6.18 apresenta o peso relativo, expresso em termos de custos, das seguintes parcelas que compõem o custo de fabricação de uma viga mista: (i) material e de fabricação das vigas, (ii) material para os conectores, (iii) mão de obra de fabricação e instalação dos conectores. As quantidades expressas são valores médios globais, relativos a cada tipo de conector. Assim, num mesmo diagrama, são agrupadas vigas com 6, 9 e 12 m de vão, e ainda conectores sem e com armadura de reforço.



Figura 6.16 - Número de conectores por vão



Figura 6.17 - Conectores T-Perfobond mais econômicos

Como se verifica, tanto no Brasil como em Portugal, o preço do conjunto de conectores de uma viga (material + mão-de-obra) não é fundamental na composição do preço, pois não ultrapassa, nas geometrias estudadas, 6 % do valor total de fabricação da estrutura para os conectores tipo *T*, 5 % para os *Studs* e para os *T-Perfobond*, e apenas 3% para os *Perfobond*. Estes valores excluem tratamentos de superfície e montagem da viga, que seriam comuns a todos os casos. No Brasil, considerou-se um custo de R\$4,00 para cada conector tipo *Stud* já instalado.

Verifica-se que o menor custo relativo do material para conectores no Brasil se obtém com o conector *T-Perfobond* (2%), seguido do *Perfobond* (2%),

conector *Stud* e tipo *T* (4%). Quanto à mão-de-obra, de fabricação e instalação de conectores, os menores custos relativos estão associados aos *Perfobond*, *T*-*Perfobond* e conector *T* (1%). Em Portugal, o menor custo relativo do material para conectores se obtém com o conector *Perfobond* (1%), seguido do conector *Stud* e *T-Perfobond* (2%), e os maiores custos são referentes também aos conectores tipo *T* (4%), como no Brasil. Já quanto à mão-de-obra, de fabricação e instalação de conectores, os menores custos relativos estão associados ao *T-Perfobond* (1%), seguido do conector *T* e do conector *Perfobond* (2%), e finalmente, o mais caro, o tipo *Stud* (3%). Obviamente que estes resultados são consequência do muito menor número de conectores alternativos quando comparado com o número de *Studs* necessário, isto apesar do custo unitário por *Stud* ser muito menor (quase seis vezes mais barato do que o tipo *T* mais caro).









(d) Conector tipo T

Portugal

94%

Figura 6.18 - Peso relativo (expresso em termos de custos) do material para as vigas, do material para os conectores, e da mão de obra de fabricação e instalação dos conectores.

Ponderando o custo total do material necessário para produzir os diferentes tipos de conectores para cada vão (6, 9 e 12 m), o custo da mão-deobra total para a sua produção e para a sua montagem, fica-se em condições de analisar a vantagem efetiva de utilização de cada um dos tipos de conectores





4%

2%

# PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510763/CA

(apenas sob o ponto de vista econômico). A Figura 6.19 mostra este resultado expresso em termos da percentagem de economia alcançada na fabricação e instalação dos conectores, relativamente ao caso padrão dos conectores tipo Stud, no Brasil e em Portugal respectivamente.

No Brasil, conclui-se que os conectores mais econômicos são os *T*-*Perfobond*, com uma economia de até 34 % para maiores vãos. Para vãos de 6m, tanto os conectores *Perfobond* quanto os *T-Perfobond* apresentaram praticamente a mesma economia, sendo o conector *T-Perfobond* ligeiramente mais econômico, em função de se utilizar menos número de conectores. Já em Portugal, os conectores mais econômicos são os *Perfobond*, com uma economia de até 64 % com armaduras passantes nos orifícios, havendo a tendência para uma economia ligeiramente superior para maiores vãos. Esta economia nos conectores traduz-se, em virtude do reduzido peso desta componente do preço global, numa economia de cerca de 5% na estrutura.

Os conectores tipo T são geralmente mais caros do que os *Studs* (não esquecendo que foram objeto de um dimensionamento elástico, logo menos econômico) para vãos menores, com um sobrecusto de até cerca de 23% no Brasil e 9% em Portugal. No entanto, esta tendência altera-se com o aumento do vão da viga, chegando para vãos de 12 m, a ser cerca de 13 % mais baratos dos que os *Studs* em Portugal, e 2% no Brasil. Note-se que os conectores tipo *T*-*Perfobond* são mais econômicos do que os tipos *T* devido ao consumo de material. Um conector tipo *T-Perfobond* pesa em torno de 2,59kg, enquanto que o tipo *T* pesa 5,26kg. Finalmente, repare-se que a inclusão de armaduras de reforço passando nos orifícios do *T-Perfobond* conduziu, no caso estudado, a uma economia substancial para as vigas de 9m.

As diferenças dos resultados da economia entres os conectores propostos e os *Studs* entre Brasil e Portugal, deve-se ao fato de que os conectores *Studs* têm custos mais econômicos em Portugal, apresentando assim economias mais significativas.

Os conectores tipo *T-Perfobond* mostraram-se mais econômicos no Brasil do que em Portugal devido ao custo do material do conector conforme observase mais detalhadamente nos gráficos da Figura 6.20.



### (a) Brasil

(b) Portugal

Figura 6.19 - Economia no custo total de produção e instalação dos conectores, por vão e por tipo (expressa em valores percentuais, em relação ao conector tipo Stud)



### (a) Brasil

(b) Portugal

Figura 6.20 - Custos do material dos conectores no Brasil e Portugal.

### 6.5.1. Conclusões

Relativamente aos aspectos econômicos, conclui-se que o preço do conjunto de conectores numa viga não foi fundamental na composição do preço

total, pois não ultrapassou, nas geometrias estudadas, 2 a 6 % do valor total de fabricação da estrutura.

Foi ainda possível concluir que estes conectores, para além das possíveis vantagens estruturais e tecnológicas, podem conduzir ainda a vantagens econômicas. De fato, a comparação do custo total de incorporação de cada um dos tipos de conectores estudados, relativamente ao caso padrão dos conectores tipo Stud, permitiu concluir que, para as geometrias estudadas, os conectores mais econômicos são os Perfobond e T-Perfobond, com uma economia de até 33 %, e com tendência para uma economia ligeiramente superior para maiores vãos. Os conectores tipo T são geralmente mais caros do que os Studs para vãos menores, com um sobrecusto de até cerca de 23%, mas esta tendência inverte-se com o aumento do vão da viga. As diferenças em termos de economia entre Brasil e Portugal entre os conectores propostos e os Studs, deve-se ao fato de que na Europa, os conectores Studs têm uso mais difundido apresentando assim custos mais baixos do que no Brasil. Conforme apresentado anteriormente, em Portugal ao substituir o conector Stud pelo Perfobond com armaduras passantes acarreta em uma economia de 64% para vigas de 12m de vão, enquanto no Brasil esse valor equivale a 23%.

### 6.6. Conclusões gerais

Uma discussão das equações propostas para a resistência dos conectores *Perfobond* foi apresentada. A que melhor se ajustou aos conectores *Perfobond* estudados neste trabalho foi a equação proposta por Al-Darzi et al. (2007). A partir desta equação e através de uma análise de regressão múltipla, foi apresentada uma equação com coeficientes ajustados no qual apresentou resultados mais exatos do que a equação considerada.

Uma regressão múltipla foi realizada também a fim de se propor uma equação ajustada para a resistência do conector *T-Perfobond* nas duas posições consideradas nos ensaios. Para o conector *T-Perfobond* com a mesa sujeita a compressão, a equação considera a contribuição do bloco do conector e do *Perfobond*, sendo que a maior contribuição é do bloco. Já na equação proposta para os conectores *T-Perfobond* na posição invertida, não há contribuição do bloco. Verificou-se que através da regressão, apenas as parcelas que contribuem para a resistência do *Perfobond* foram efetivas. As equações

propostas apresentaram uma boa aproximação para os conectores aqui estudados. Porém ressalta-se que as equações propostas tanto para o *Perfobond*, como para o *T-Perfobond*, devem ser consideradas para calcular valores de resistências de conectores que se enquadrem nos modelos aqui apresentados.

Para avaliar o ensaio em escala real e o ensaio de *push-out*, foram utilizadas umas aproximações para o cálculo da força de compressão atuante na laje de concreto no ensaio em escala real. Conclui-se que a força de compressão no ensaio em escala real é superior a força equivalente num ensaio de *push-out*.

As conclusões obtidas desses ensaios estão de acordo com as obtidas por Valente (2007). A primeira é que os ensaios de *push-out* são adequados para analisar a capacidade do conector de cisalhamento, já que através destes ensaios é possível prever tanto a capacidade de carga como a capacidade de deformação do conector. A segunda é que a falha ocorre um tempo depois que a carga máxima é atingida, o que mostra que a ligação é dúctil, pois desenvolve deformação mantendo a capacidade de carga. Esta observação confirma juntamente com o que foi previsto no ensaio de *push-out*. A terceira é que, como a ligação tem um comportamento dúctil, a carga máxima é mantida para valores de deslizamentos significativos, permitindo alta deformação vertical da viga.

Para avaliar a utilização dos diversos tipos de conectores sob o ponto de vista econômico, realizou-se um estudo no qual foram dimensionadas vigas mistas com laje de 120 mm para vãos distintos (6, 9 e 12 m). Os conectores avaliados foram os *Perfobond*, *T-Perfobond*, *T* e o de uso mais comum, os *Studs*. Este estudo englobou os custos no Brasil e em Portugal em relação aos custos dos conectores *Studs*. Os conectores *T-Perfobond* e *Perfobond*, além de apresentarem vantagens estruturais, mostraram-se econômicos nos casos analisados.