

3

Concepção do conector e programa experimental dos ensaios tipo *Push-out*

3.1.

Concepção do conector

Os conectores considerados neste trabalho são os *Perfobond* e uma nova configuração proposta: o *T-Perfobond*, formado por uma seção do perfil I. A diferença entre os dois tipos analisados é a presença da mesa, que confere uma ancoragem adicional ao sistema. O motivo de se avaliar os conectores tipo *Perfobond*, já estudados anteriormente, é dispor de parâmetros para comparação com o novo tipo o *T-Perfobond*, e com isto poder avaliar a contribuição efetiva da nova geometria proposta. Antes de se apresentar a descrição dos ensaios experimentais, é importante porém descrever a concepção e o desenvolvimento do conector *T-Perfobond*, bem como os conectores *Perfobond* já estudados por outros autores.

O T-Perfobond rib, alvo deste trabalho, foi inicialmente projetado por Ferreira (2000) para ligações de extremidade viga-coluna, Figura 3.1. Sua principal função foi transmitir a resultante das barras de armadura de flexão nas regiões de momento negativo para o banzo das colunas de extremidade.

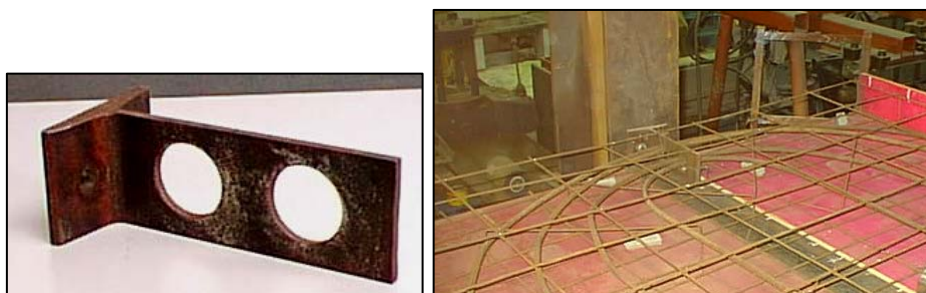


Figura 3.1 – Conector T-Perfobond rib proposto por Ferreira (2000)

Neste trabalho são apresentadas novas geometrias do conector T-Perfobond para utilização em vigas mistas sob momentos positivos. O conector *T-Perfobond* foi projetado com o objetivo de melhorar algumas características da conexão mista, como aumentar a capacidade de carga e de deslizamento do

conector. O *T-Perfobond* é a combinação do conector *Perfobond* com o conector *T-connector* do EUROCODE 4 (2001), Figura 3.2.

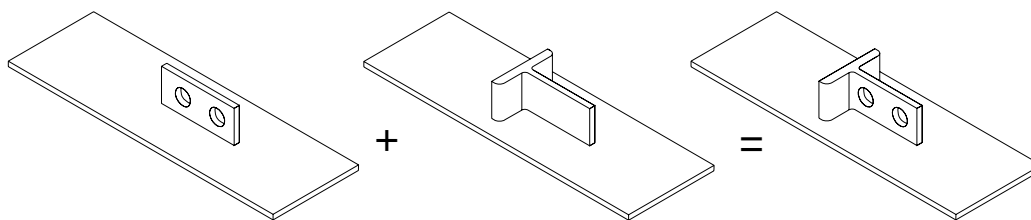


Figura 3.2 – Concepção do conector T-Perfobond

3.2.

Programa experimental dos ensaios tipo *Push-out*

Os ensaios experimentais do tipo *push-out* realizados neste trabalho foram divididos em duas etapas. A primeira etapa foi realizada em Portugal e a segunda no Brasil.

Durante a fase de planejamento da primeira etapa do programa experimental, houve um intercâmbio de informações com pesquisadores da Universidade de Coimbra, em Portugal, com a qual a PUC-Rio e a UERJ mantêm um convênio para cooperação interinstitucional, CAPES-GRICES. Um grupo de pesquisa, liderado pelo Prof. Luís Filipe da Costa Neves, tem estudado estruturas mistas. Numa visita do próprio Prof. Neves à PUC-Rio, no âmbito do protocolo de cooperação bilateral CAPES-GRICES, houve então um convite, para que esta autora participasse de um programa de intercâmbio, *sandwich*, para que pudesse realizar a parte experimental da tese em Portugal. Esse intercâmbio ocorreu no período de Novembro de 2006 à Outubro de 2007, concluindo então a primeira etapa de ensaios.

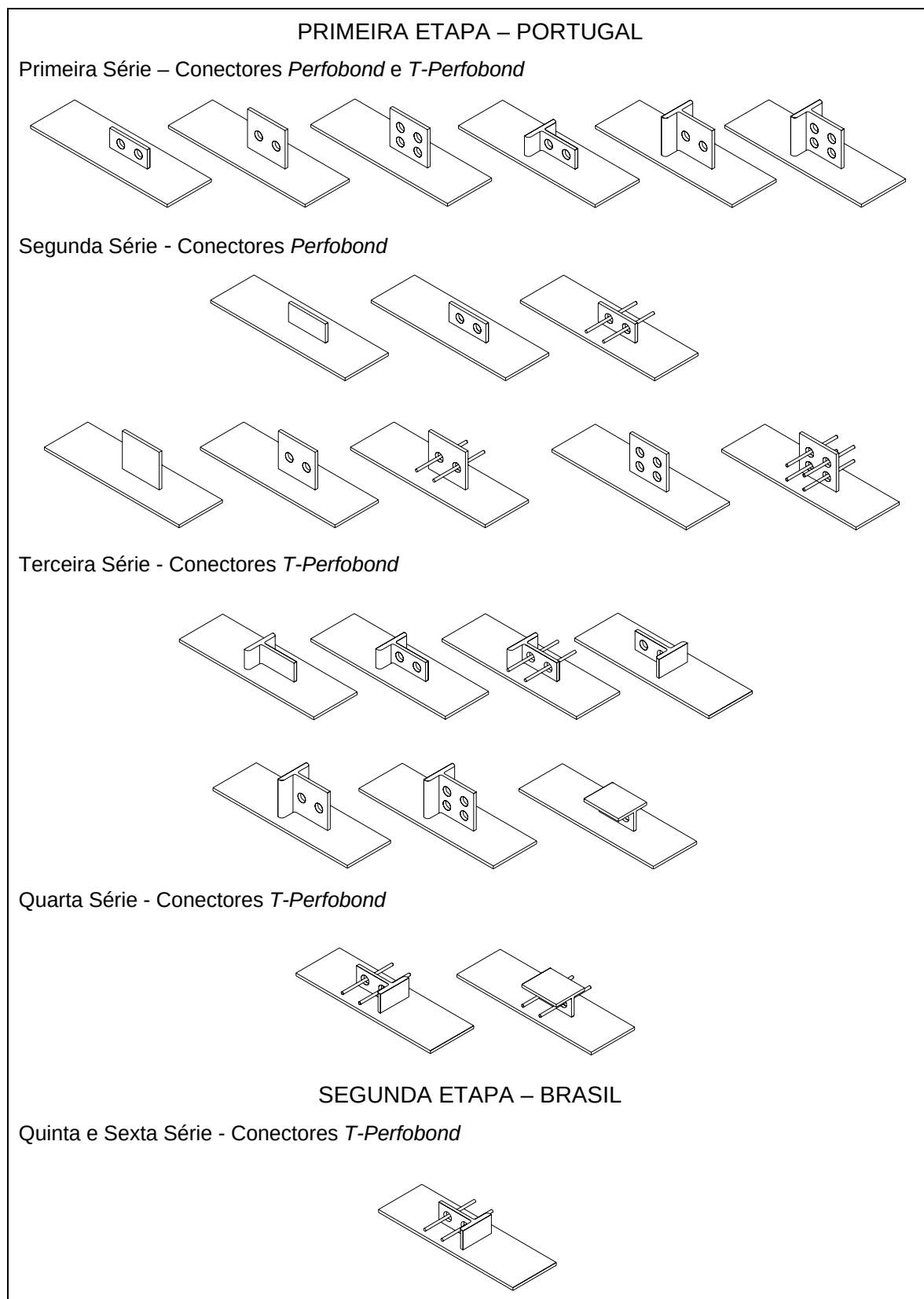
A participação no programa *sandwich* em Portugal foi de extrema importância, permitindo realizar uma considerável série de 46 ensaios de *push-out*, pois os equipamentos existentes no laboratório do DEC bem como suas instalações facilitaram a execução dos mesmos.

Os ensaios do tipo *push-out* foram divididos em quatro séries na primeira etapa. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (DEC), em Portugal.

Em virtude dos resultados obtidos na primeira etapa, optou-se em realizar uma segunda etapa, em duas séries de ensaios, que foram realizadas no

Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (LEM), Brasil. O Quadro 3.1 apresenta resumidamente os conectores estudados neste trabalho.

Quadro 3.1 – Conectores *Perfobond* e *T-Perfobond* por etapas



3.3. Primeira etapa

3.3.1. Conectores de cisalhamento

A geometria dos conectores *Perfobond* aqui estudados, foi baseada no estudo realizado por Leite (2006), no qual comparou os custos e a resistência entre os conectores tipo Pino e Perfobond visando avaliar sua viabilidade econômica. No seu estudo, uma série de variações da geometria do conector foram propostas, Figura 3.3. e um estudo detalhado de sua instalação numa viga mista foi desenvolvido.

Baseando-se nos custos para cada tipo de conector em função dos vãos estudados, os conectores mais viáveis foram os Tipo 6 e Tipo 8, Figura 3.3. O perfobond tipo 6 apresentou melhor viabilidade econômica quando utilizado com armaduras nos furos. O tipo 6 é um conector com altura de 90 mm, dois furos com diâmetro de 35 mm e um comprimento total de 180 mm. Segundo Leite (2006), os fatores que contribuíram para o menor custo final foi o custo da chapa de aço, apesar de ter sido uma das opções que necessitava do maior número de conectores e mais solda; a quantidade de aço utilizada por conector foi inferior que a maioria dos outros tipos, acarretando uma economia no custo final. Percebeu-se também que um diâmetro menor e um número menor de furos no conector contribuiu para a economia de chapa, já que permitiam um comprimento total menor, mesmo que reduzindo a resistência individual do conector e gerando a necessidade de um maior número destes para resistir à força longitudinal.

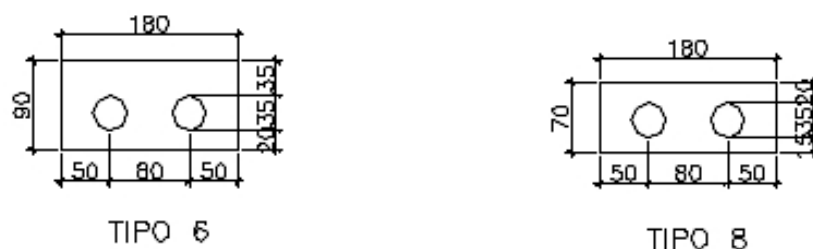


Figura 3.3– Geometria dos conectores, Leite (2006)

Em função desse estudo, optou-se em avaliar neste trabalho um conector de geometria semelhante ao Tipo 8, apresentado por Leite (2006), e um outro com uma altura maior para lajes mais espessas.

As dimensões dos conectores tipo *Perfobond* foram estabelecidas em função da espessura da laje pretendida e do espaçamento entre os furos, obedecendo ao mínimo recomendado de $2,25d$ segundo Oguejiofor & Hosain (1994). Os conectores com altura de 76,2mm foram utilizados para as lajes de 120mm, enquanto que os de 150mm para as lajes de 200mm, e foram fabricados com 12,5mm de espessura com chapas de aço S355 (tensão nominal de escoamento de 355MPa, de acordo com a EN 10025). Resultando desta geometria, o perfil laminado de seção I adotado para fabricar o T-Perfobond foi o IPN 340, cortado no meio da alma, resultando em dois conectores. Essas seções foram compostas pelo aço S275.

Os conectores *Perfobond* e *T-Perfobond* foram fabricados com dois ou quatro furos, respectivamente em uma ou duas linhas na direção da transferência de carga, (Figura 3.4 e Figura 3.5), para lajes de 120mm e 200mm de espessura. A escolha desses valores pode ser justificada pelo critério de projeto habitual: 120mm é um valor de espessura usual para lajes maciças para vãos equivalentes de até 4m, enquanto que 200mm é um valor usual para vãos de até 7m. Estes valores foram encontrados considerando que os vãos dessas lajes são em uma só direção, nenhuma protensão é aplicada, e levando em consideração os estados limites de serviço em relação à flecha máxima à longo prazo. Claro que na prática outros fatores com implicações sobre a espessura da laje devem ser considerados no projeto, tal como isolamento acústico, resistência ao fogo, a magnitude das cargas impostas, controle de vibração, etc. Os valores referidos acima são representativos num projeto prático para lajes maciças em estruturas de edifício residenciais e comerciais, Vianna et al. (2008b). Por outro lado, lajes mais espessas são tipicamente necessárias para atender vãos maiores ou em estruturas de ponte.

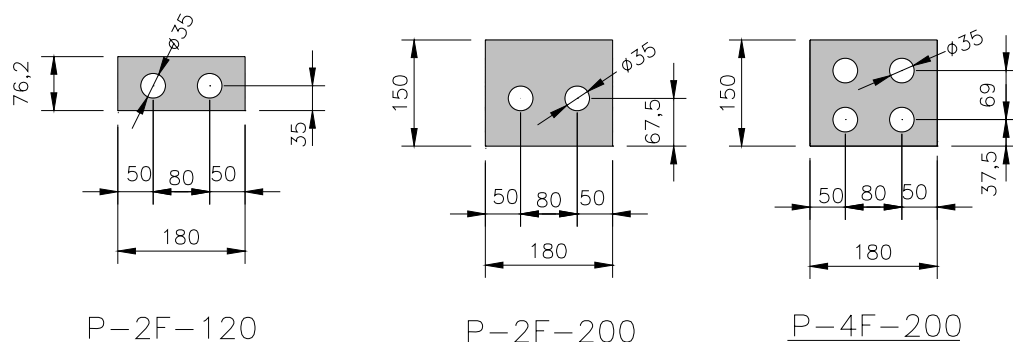


Figura 3.4 – Configurações dos conectores Perfobond, Vianna et al. (2008d)

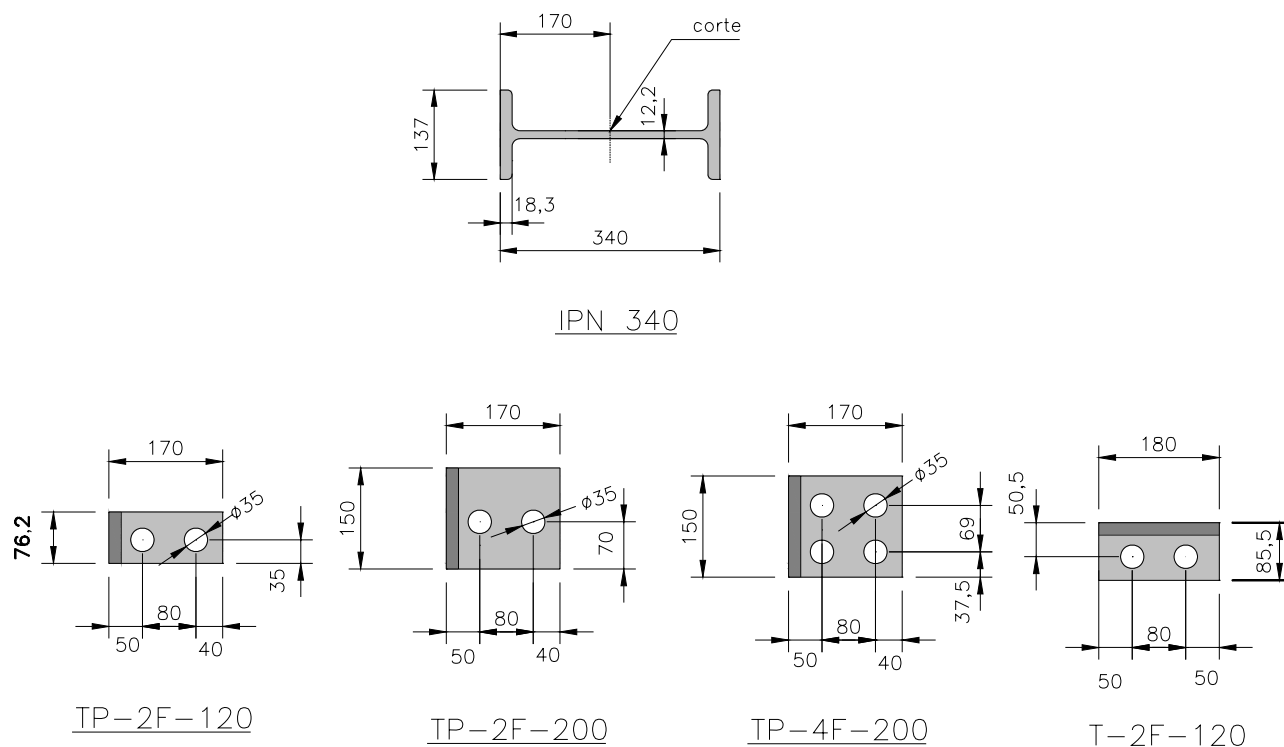


Figura 3.5 - Configurações dos conectores T-Perfobond, Vianna et al. (2008d)

Nesta etapa foi realizado um total de 46 ensaios do tipo push-out divididos em quatro séries, para que fosse possível avaliar separadamente o comportamento de cada série de conectores e variar as resistências à compressão do concreto.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo destes ensaios.

As nomenclaturas adotadas seguiram as características do protótipo, no qual cada termo tem o seguinte significado: P – *Perfobond*, TP – *T-Perfobond*, T – conector T; SF – sem furos, 2F ou 4F - número de furos no conector; AR – quando há presença de armaduras passantes nos furos; 120 ou 200 – espessura da laje em mm; IN – posição do conector invertida; A / B é a identificação do modelo. A coluna f_c representa a resistência à compressão do concreto. Na coluna armaduras, é descrita se há ou não a presença de armaduras nos furos, e o seu respectivo diâmetro (ϕ). A última coluna, apresenta o total de ensaios em cada fase.

Em todas as séries, exceto na quarta, foram ensaiados pares de modelos idênticos, sendo diferenciados pela série A e B.

Os protótipos com laje de 120mm pesaram em torno de 3000N (300kgf), enquanto que os com laje de 200mm pesaram em torno de 4550N (455kgf).

Tabela 3.1 – Ensaio Push-out, primeira etapa

Série	Tipo	Nomenclatura	f _c (MPa)	Armadura nos furos		Total
				presença	φ (mm)	
1	Perfobond	P-2F-120-A / B	28,3	não	—	12
		P-2F-200-A / B		não	—	
		P-4F-200-A / B		não	—	
	T-Perfobond	TP-2F-120-A / B	28,3	não	—	
		TP-2F-200-A / B		não	—	
		TP-4F-200-A / B		não	—	
2	Perfobond	P-SF-120-A / B	51,9	não	—	16
		P-2F-120-A / B		não	—	
		P-2F-AR-120-A / B		sim	10	
		P-SF-200-A / B		não	—	
		P-2F-200-A / B		não	—	
		P-2F-AR-200-A / B		sim	10	
		P-4F-200-A / B		não	—	
		P-4F-AR-200-A / B		sim	10	
3	T-Perfobond	TP-SF-120-A / B	43,9	não	—	14
		TP-2F-120-A / B		não	—	
		TP-2F-AR-120-A / B		sim	10	
		TP-2F-120-IN -A / B		não	—	
		TP-2F-200-A / B		não	—	
		TP-4F-200-A / B		não	—	
		T-2F-120-A / B		não	—	
4	T-Perfobond	TP-2F-AR-120-A-IN-10	33	sim	10	4
		TP-2F-AR-120-B-IN-12		sim	12	
		T-2F-AR-120-A-10		sim	10	
		T-2F-AR-120-B-12		sim	12	
TOTAL						46

3.3.1.1. Primeira série

Na primeira série foram realizados doze ensaios com concreto de 25MPa. Analisou-se seis tipos de conectores, com pares idênticos, sendo três tipos Perfobond e três tipos T-Perfobond, Figura 3.6. Nestes ensaios não foram utilizadas armaduras nos furos.

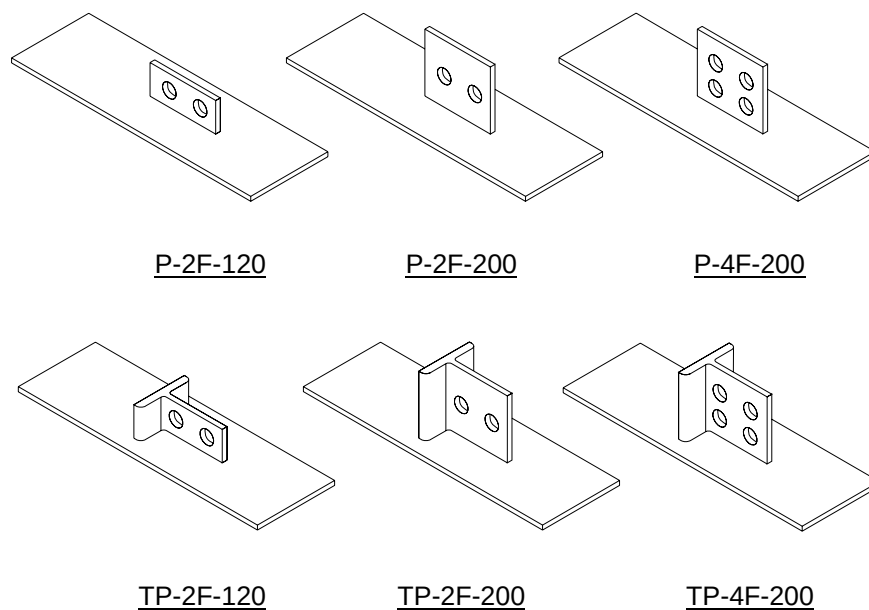


Figura 3.6 – Conectores PerFOBOND e T-PerFOBOND primeira série

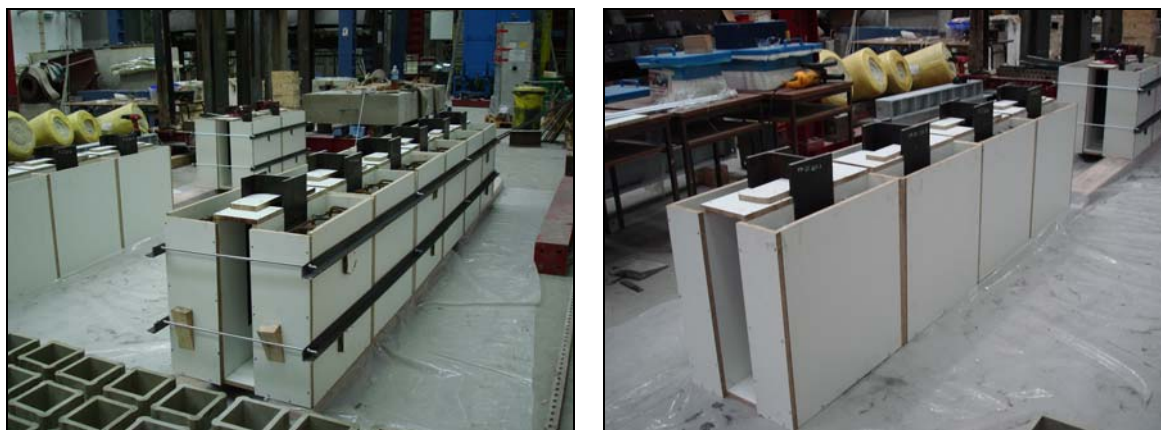


Figura 3.7 – Protótipos dos conectores PerFOBOND e T-PerFOBOND da primeira série

3.3.1.2. Segunda série

A segunda série de ensaios foi composta por um total de dezesseis ensaios de conectores tipo PerFOBOND com concreto classe C50/60. Nesta série, variou-se a presença dos furos e das armaduras passantes. Foram analisados oito tipos de configurações, com pares idênticos, Figura 3.8.

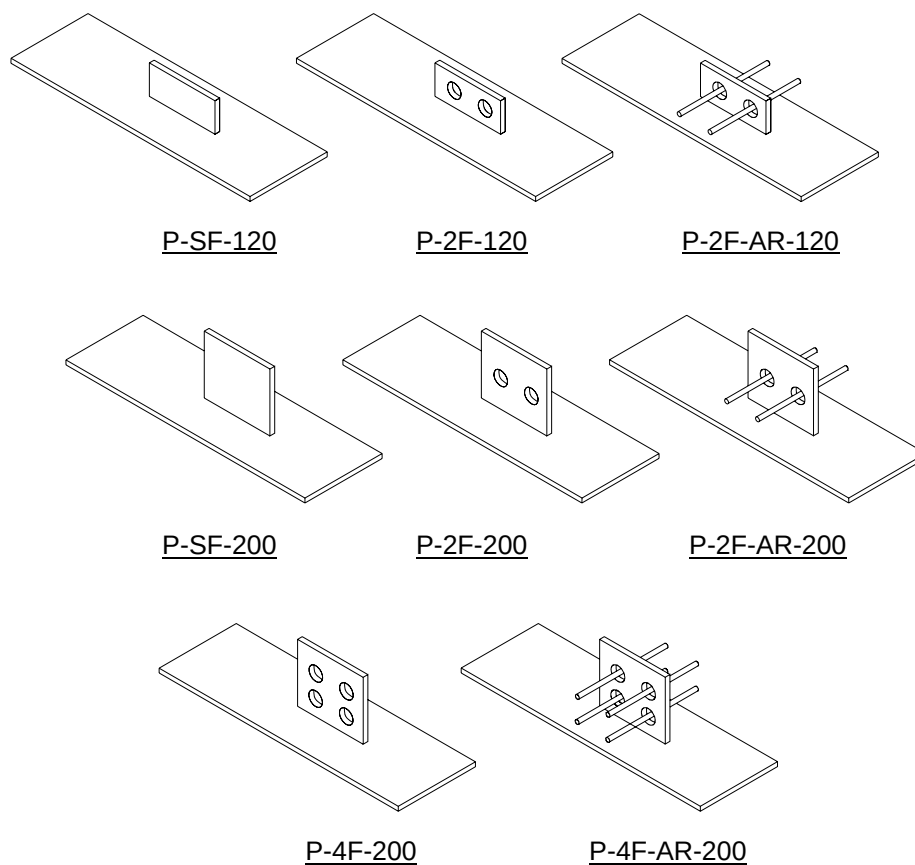


Figura 3.8 – Conectores Perfobond da segunda série

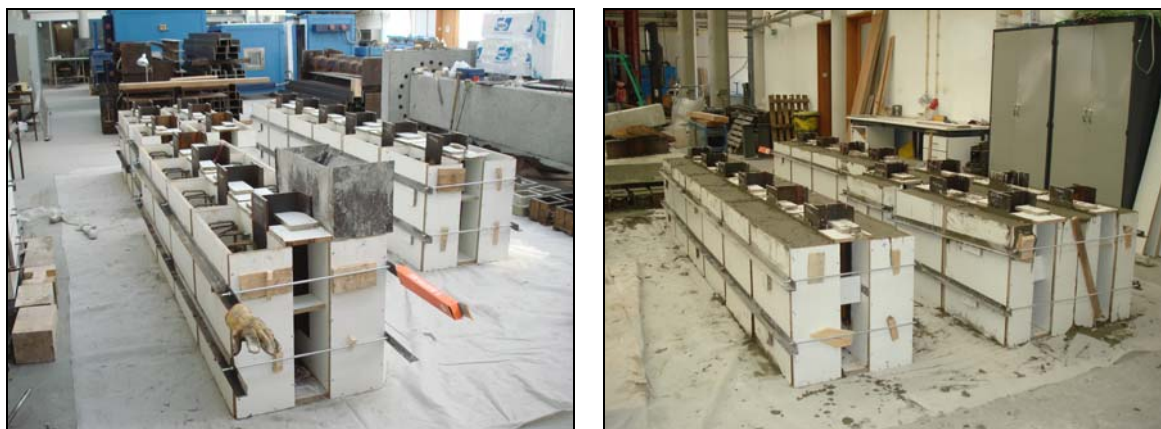


Figura 3.9 – Protótipos dos conectores Perfobond da segunda série

3.3.1.3. Terceira série

Paralelamente à realização da segunda série de ensaios, foram fabricados os quatorze ensaios que compuseram a terceira série: conectores tipo T-

perFOBOND com concreto classe C40/50. Nestes ensaios variou-se também a existência dos furos, as armaduras passantes e a posição do conector em relação à mesa.

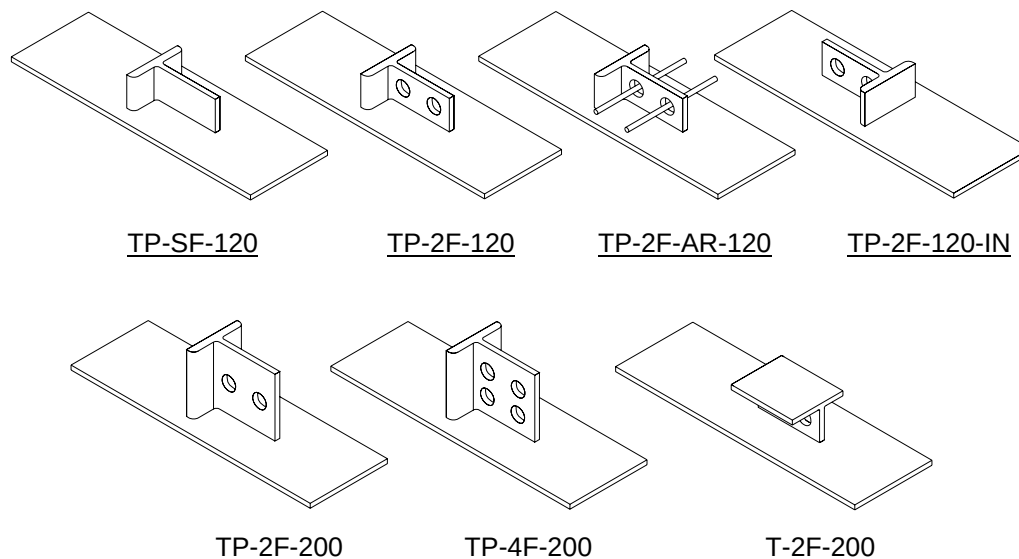


Figura 3.10 – Conectores T-PerFOBOND da terceira série



Figura 3.11 – Protótipos com conectores T-PerFOBOND da terceira série

3.3.1.4. Quarta série

A quarta série foi composta por mais quatro ensaios com conectores tipo T-perFOBOND e conector T com concreto classe C30/37 a fim de se avaliar a presença de armaduras e a variação do seu diâmetro.

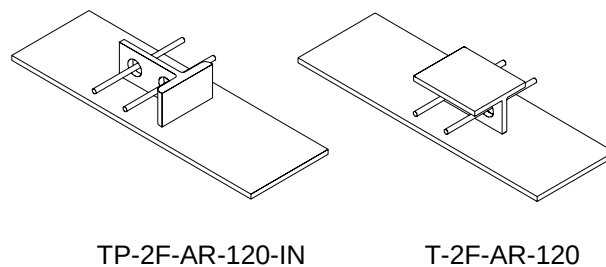


Figura 3.12 – Conectores T-Perfobond da quarta série



Figura 3.13 – Protótipos com conectores T-Perfobond da quarta série

3.3.2. Preparação do Ensaio tipo *Push-out*

Enquanto que todos os trabalhos envolvendo a estrutura metálica foram realizados em metalomecânica, e as armaduras foram fabricadas em um estaleiro de obra, todas as outras atividades foram executadas no laboratório do DEC: medição dos perfis; colagem dos extensômetros; ajuste das armaduras das lajes; montagem das formas e concretagem.

Os protótipos para os ensaios de *push-out* foram construídos segundo a especificação do EUROCODE 4 (2005), porém o perfil “I” vertical foi adaptado como descrito a seguir.

Foram utilizados perfis HEA 200 para os ensaios com conectores Perfobond e HEB 200 para os ensaios com conectores T-Perfobond material S275 para compor perfil “I” do ensaio push-out. Para confecção dos conectores T-Perfobond foram utilizados perfis IPN 340 material S275 ($f_y=275\text{MPa}$; $f_u=430\text{MPa}$). Os conectores tipo Perfobond são chapas de 13mm de espessura com material S355 ($f_y=355\text{MPa}$; $f_u=510\text{MPa}$). A solda especificada foi solda de

filete de 11mm. Os protótipos, composto pelo perfil I e os conectores, foram confeccionados pela Rascão Ltda em Coimbra. As armaduras utilizadas em todos os ensaios foram vergalhões nervurados S500 ($f_y=500\text{MPa}$) com diâmetro de 10mm.

A Figura 3.14 apresenta o modelo do perfil com o conector *T-Perfobond* soldado na posição aqui denominada como invertida. Esta posição está relacionada com a primeira parte do conector a receber a carga, que neste caso é parte da alma, ou seja, composta da parte do *Perfobond*.

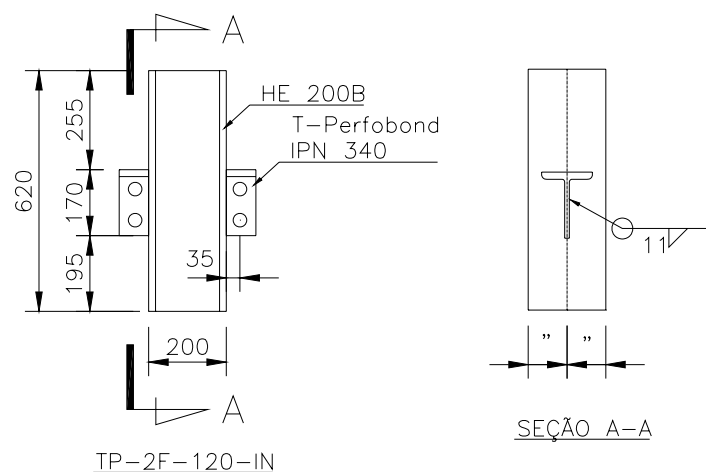


Figura 3.14 – Configuração do perfil com conector T-Perfobond – Portugal

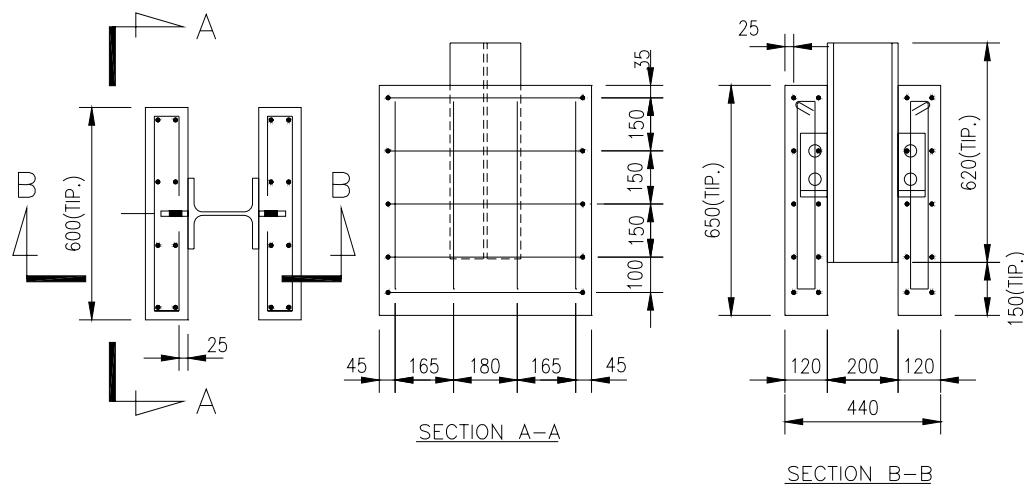


Figura 3.15 – Configuração detalhada do protótipo TP-2F-120.

A Figura 3.15 apresenta a configuração típica dos modelos testados. Todos os ensaios adotaram a mesma configuração das dimensões, alterando apenas o tipo de conector e o diâmetro da armadura.

3.3.2.1. Forma e Armadura

Com os protótipos metálicos já preparados, foi possível montar as formas e inserir as armaduras no protótipo de forma alternada.

A sequência das atividades ocorreu da seguinte maneira: - corte da chapa de MDF para forma e encaixe do perfil; - posicionamento e fechamento em parte das formas; - posicionamento das armaduras; e finalmente o fechamento frontal da forma, Figura 3.16.



Figura 3.16 – Montagem das armaduras e formas no DEC, Coimbra.

As formas foram construídas com chapas de MDF hidrófugo de 19mm de espessura. Estas foram montadas de forma individual para que fossem desmontáveis e reaproveitáveis nas outras séries.

A armadura foi fornecida já cortada e dobrada pela Pascoal & Pascoal Ltda. A amarração da gaiola foi realizada com arame recozido. Nesta série, utilizou-se armadura em aço S500 ($f_y=500\text{MPa}$).

Em todos os modelos, as lajes possuíam armaduras verticais e transversais de mesmo diâmetro obedecendo o espaçamento da Figura 3.15. Em alguns protótipos foram inseridas armaduras nos furos, chamada de armadura passante.

Para que os resultados não fossem afectados pela aderência química entre o perfil de aço e o concreto, toda a superfície de aço, exceto nos conectores, foi previamente tratada com óleo desmoldante, antes do posicionamento das armaduras.

3.3.2.2. Concreto

Em virtude da dificuldade de produzir no laboratório do DEC o volume de concreto necessário para os protótipos de uma só vez, em apenas uma betonagem, optou-se em comprar o concreto de uma central para todas as séries.

Na primeira série foi utilizado um concreto da classe C25/30. Esta é a especificação do EUROCODE 2 (2005), no qual o primeiro número é o f_c previsto para o corpo de prova cilíndrico de 15x30cm, e o segundo é o previsto para o corpo de prova cúbico 15x15x15cm.

Para as séries seguintes, optou-se em utilizar o concreto com maior capacidade de resistência à compressão a fim de se avaliar a variação deste parâmetro.

A concretagem no DEC, em Portugal, em todas as séries ocorreram de maneira rápida e eficaz. O caminhão-betoneira estacionava dentro do laboratório. Lançava-se o concreto para uma betoneira, e esta era transportada até os protótipos a serem concretados, com auxílio de uma ponte rolante. A Figura 3.17 ilustra a sequência de atividades durante a concretagem dos protótipos.



Figura 3.17 – Concretagem dos protótipos no DEC, UC – Portugal

3.3.2.3. Montagem do Ensaio

Os protótipos tiveram suas fôrmas retiradas e foram mantidos no próprio laboratório, para a cura dos mesmos, até que atingissem as idades onde previsivelmente a sua resistência estava estabilizada, a fim de eliminar a resistência do concreto como variável do problema.

Nesta etapa os ensaios foram realizados numa prensa hidráulica com capacidade de carga de 5000kN no Laboratório de Mecânica Estrutural do DEC, Figura 3.18. O circuito hidráulico foi controlado por um software e um sistema eletrônico integrados. O atuador possuía duas células de pressão internas e dois transdutores de deslocamento externos, possibilitando ensaios com controle de força ou de deslocamento.

Para reduzir o efeito de imperfeições nas bases das lajes de concreto, os protótipos foram apoiados sobre lâminas de neoprene com 5,0mm de espessura, Iwasaki et al. (2005).



Figura 3.18- – Estrutura de reação e instrumentação para o ensaio tipo *push-out*, DEC.

3.3.2.4.

Instrumentação e aplicação do carregamento

Os deslocamentos relativos verticais entre o perfil metálico e as lajes, e a separação horizontal entre os mesmos (*uplift*), foram medidos por meio de transdutores de deslocamento fixados na região próxima aos conectores.

Nesta etapa, foram utilizados cinco LVDT's (*linear variable differential transformer*), dois verticais, dois horizontais, e um externo na posição vertical para controle do deslocamento da prensa, conforme apresentado na Figura 3.18.

A Figura 3.19 apresenta em detalhes as posições dos LVDT's instalados nos protótipos em todos os ensaios dessa etapa.

Para medir as tensões e deformações dos conectores e do perfil metálico, foram instalados extensômetros elétricos em alguns protótipos.

Na primeira série, foram instalados extensômetros em apenas dois protótipos. No protótipo P-4F-200-A foram instaladas rosetas de extensômetros nos conectores e numa das mesas, Figura 3.20. Ressalta-se que os extensômetros instalados nos conectores deixaram de funcionar na fase cíclica do ensaio.

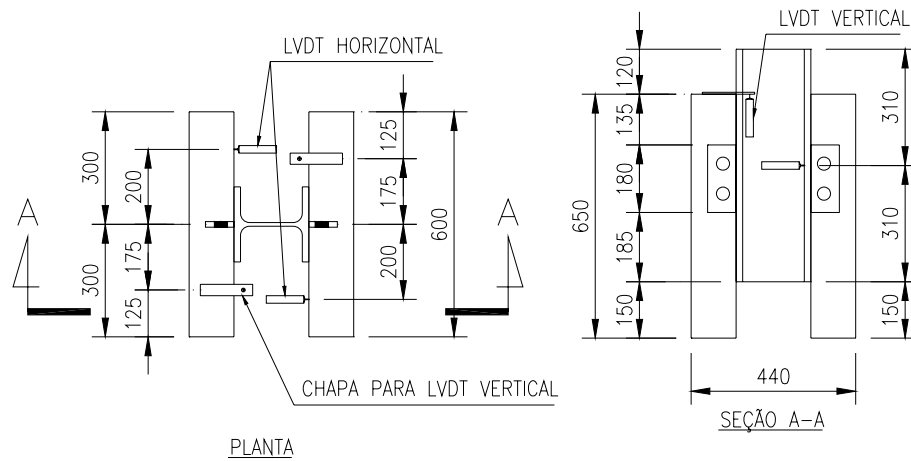


Figura 3.19 – Instrumentação dos protótipos, DEC – Coimbra.

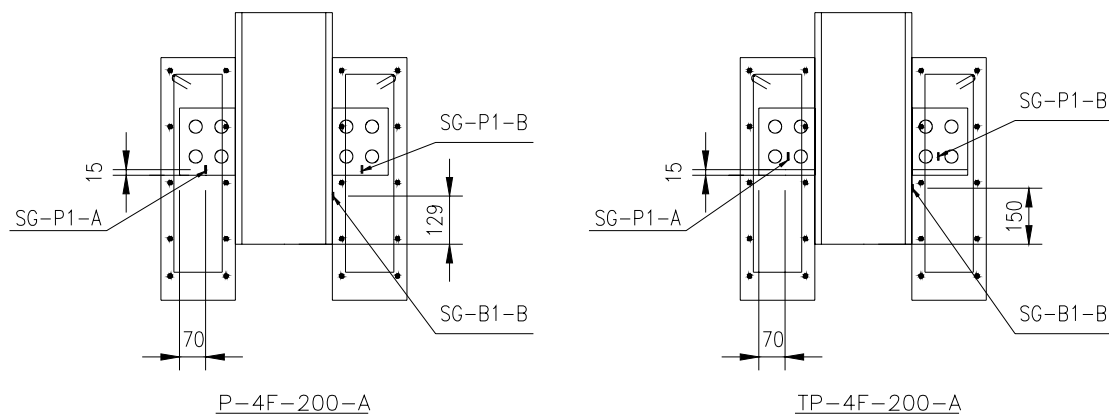


Figura 3.20 – Instrumentação dos extensômetros dos protótipos da primeira série.

Na segunda série, foram instalados extensômetros em três protótipos. Nos protótipos P-2F-120-A e P-2F-200-A foram instalados quatro extensômetros, três no conector, sendo uma roseta, e um na armadura passante, Figura 3.21 e Figura 3.22.

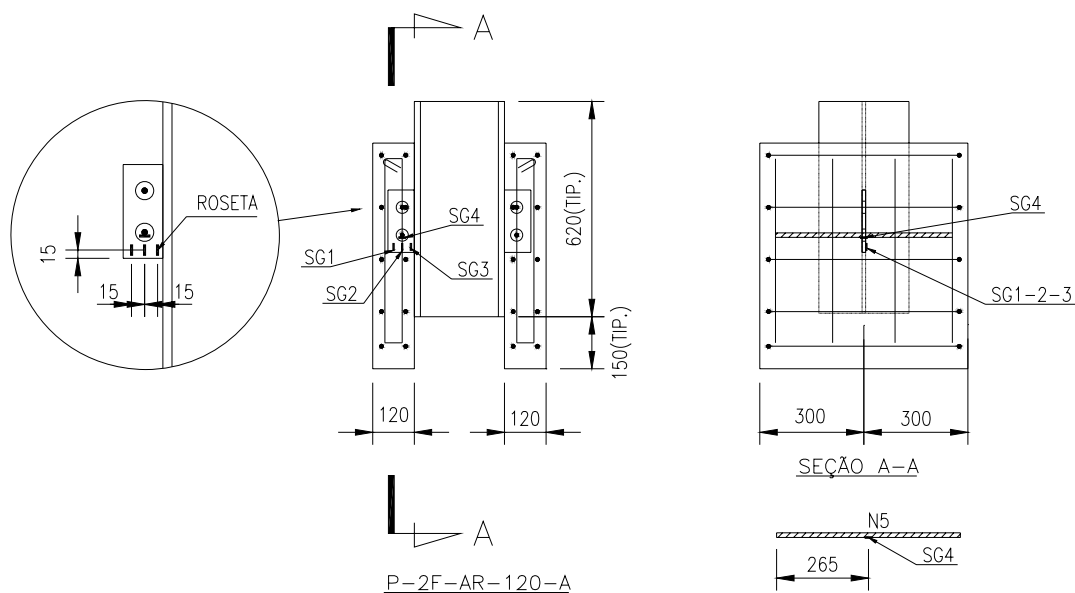


Figura 3.21 – Instrumentação dos extensômetros do protótipo P-2F-AR-120-A, da segunda série.

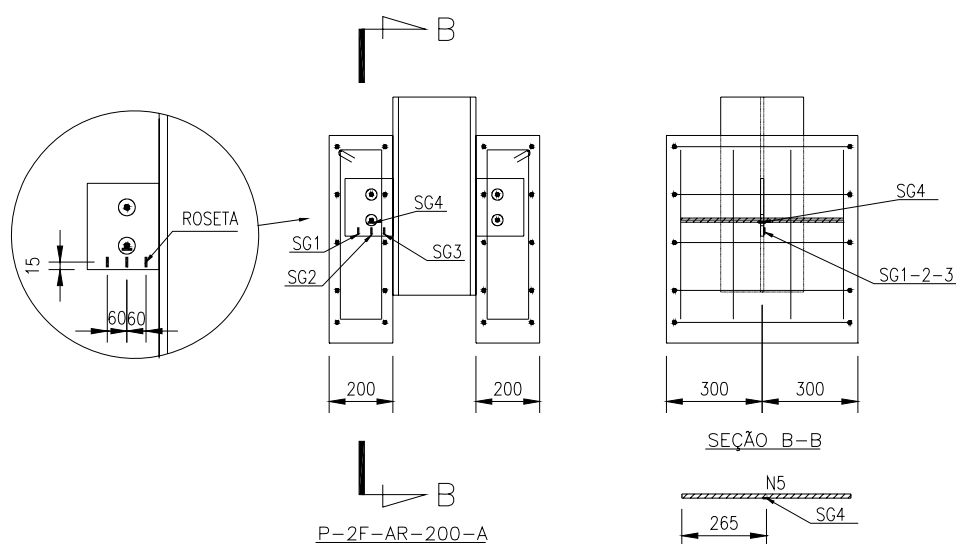


Figura 3.22 – Instrumentação dos extensômetros do protótipo P-2F-AR-200-A, da segunda série.

No protótipo P-4F-AR-200-A, foi instalado um total de sete extensômetros. No conector, foram instalados cinco, sendo um roseta, e dois em cada uma das armaduras passantes nos furos inferiores, Figura 3.23.

Na terceira série, foi instalado uma roseta no protótipo TP-2F-AR-120-A, e um extensômetro unidirecional na armadura passante no furo inferior.

Na quarta série não foram instalados extensômetros em nenhum dos protótipos.

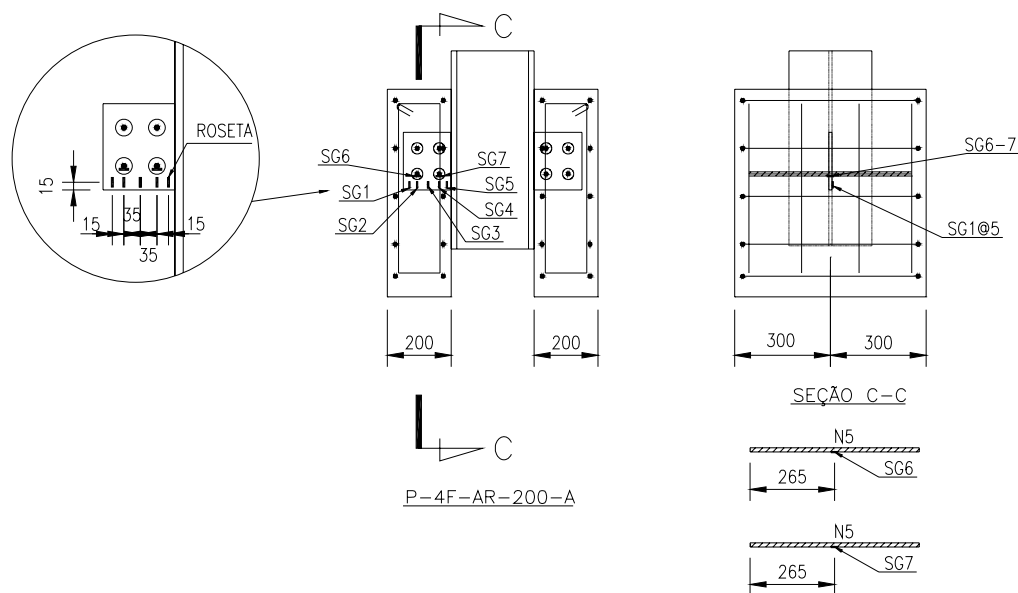


Figura 3.23 – Instrumentação dos extensômetros do protótipo P-4F-AR-200-A, da segunda série.

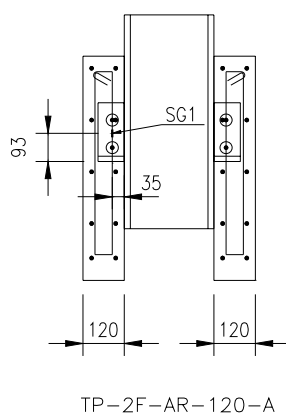


Figura 3.24 – Instrumentação dos extensômetros do protótipo TP-2F-AR-120-A, da terceira série.

Os protótipos foram ensaiados em posição normalizada e dentro das recomendações prescritas pelo EUROCODE 4 (2005). O carregamento foi aplicado por uma prensa hidráulica, marca AMSLER, mediante dois procedimentos. No primeiro procedimento, composto pela fase cíclica, a aplicação de carga foi controlada pela força. Foram aplicados 15 ciclos de carga/descarga entre as cargas correspondentes a 5% e 40% da carga prevista de ruptura. No segundo procedimento, controlado pelo deslizamento relativo, a carga foi aplicada monotonicamente até o colapso. Estes dois procedimentos são apresentados detalhadamente na Figura 3.25.

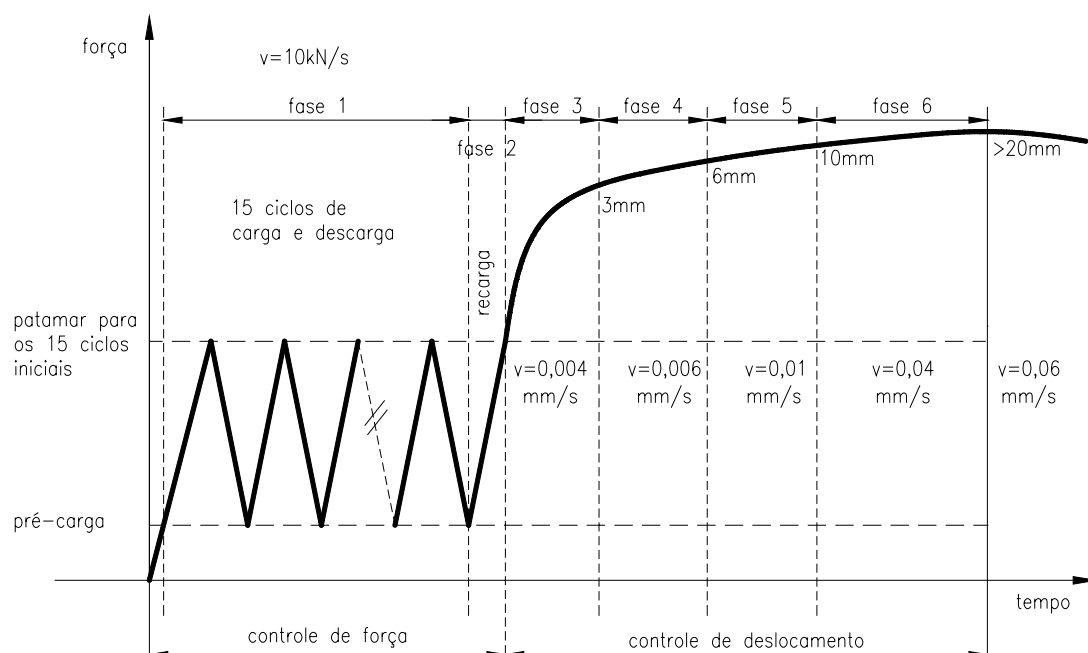


Figura 3.25 – Esquema de carregamento para o controle do ensaio de *push-out*

3.3.3. Resultados

3.3.3.1. Primeira série

3.3.3.1.1. Concreto

Para determinação das propriedades mecânicas do concreto, foram moldados corpos-de-prova cúbicos de dimensões 15x15x15cm, referentes a cada série, para ensaio de resistência à compressão.

Na primeira série foi utilizado um concreto da classe C25/30. Foram moldados vinte e três corpos de prova cúbicos. A Tabela 3.2 apresenta as resistências obtidas para cada protótipo no dia do ensaio dos mesmos. Nesta tabela é detalhado o número de corpos de prova referente a um determinado ensaio, a data do ensaio, a idade em dias, a resistência de cada corpo de prova, a resistência média e o desvio padrão. Vale ressaltar que os corpos de prova foram sempre ensaiados no mesmo dia que foram realizados os ensaios de *push-out*.

Tabela 3.2 – Resistência à compressão média do concreto da primeira série.

	Protótipo	Data	Idade dias	f _{cmcubos} MPa	Média	Desvio
P-2F-120-A	1	13-04-2007	38	34,28	34,00	0,54
	2			34,35		
	3			33,38		
P-2F-120-B	4	17-04-2007	42	36,2	34,09	1,98
P-2F-200-A	5			32,27		
	6			33,8		
P-2F-200-B	7	27-04-2007	52	35,2	35,30	0,44
P-4F-200-B	8			35,79		
TP-2F-120-A	9			34,92		
P-4F-200-A	10	02-05-2007	57	35,54	34,40	1,00
TP-2F-120-B	11			33,67		
	12			33,98		
TP-2F-200-A	13	04-05-2007	59	34,11	34,17	0,11
TP-2F-200-B	14			34,3		
	15			34,1		
TP-4F-200-B	16	07-05-2007	62	34,64	35,25	0,56
	17			35,74		
	18			35,38		
TP-4F-200-A	19	09-05-2007	64	34,66	34,97	0,48
	20			35,8		
	21			34,69		
	22			34,99		
	23			34,7		
				Média	34,60	

O valor da resistência média de 34,6MPa corresponde à média da resistência dos corpos de prova cúbicos. Nos corpos de prova cilíndricos, o valor correspondente foi de 28,3MPa, EUROCODE 2 (2005).

3.3.3.1.2. Ensaio *Push-out*

A primeira série de ensaios, foi realizada para avaliar a resistência e comportamento dos conectores com concreto na classe C25/30, bem como comparar os conectores Perfobond e T-Perfobond. Como descrito anteriormente, nesta série não foram utilizadas armaduras passantes nos furos.

Os extensômetros instalados nos conectores nos protótipos P-4F-200-A e TP-4F-200 deixaram de funcionar na fase cíclica do ensaio.

A Figura 3.26 apresenta as curvas força *versus* deslizamento resultantes dos pares de ensaios com os conectores Perfobond com dois furos para lajes de 120mm e 200mm. As curvas para os ensaios com Perfobond com quatro furos para lajes de 200mm estão apresentadas na Figura 3.27a. Nestas figuras são apresentadas também os valores para as cargas últimas características, P_{rk} , definidas pelo EUROCODE 4 (2005).

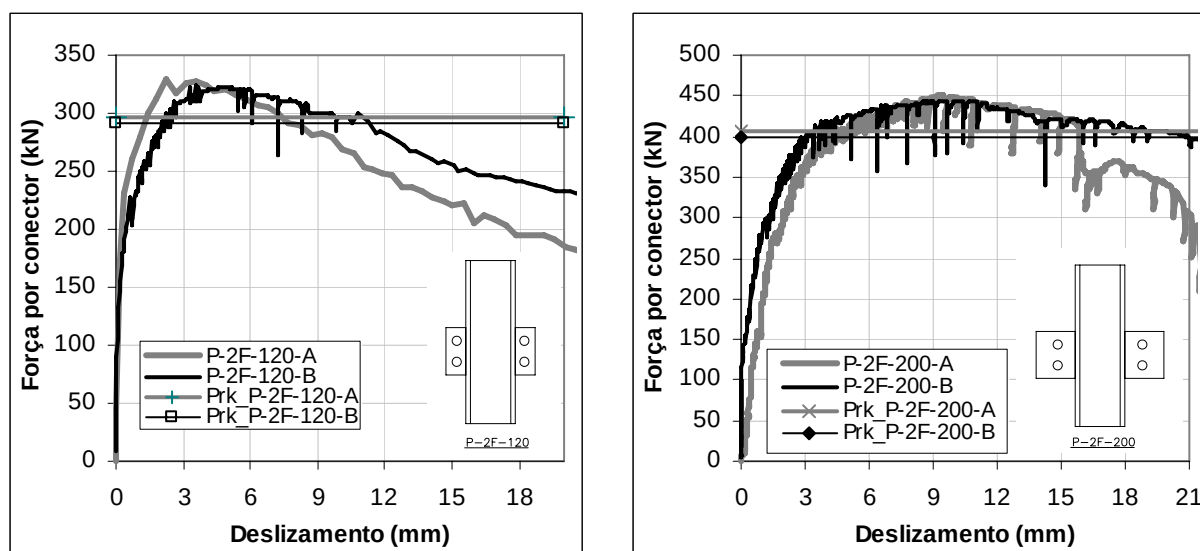
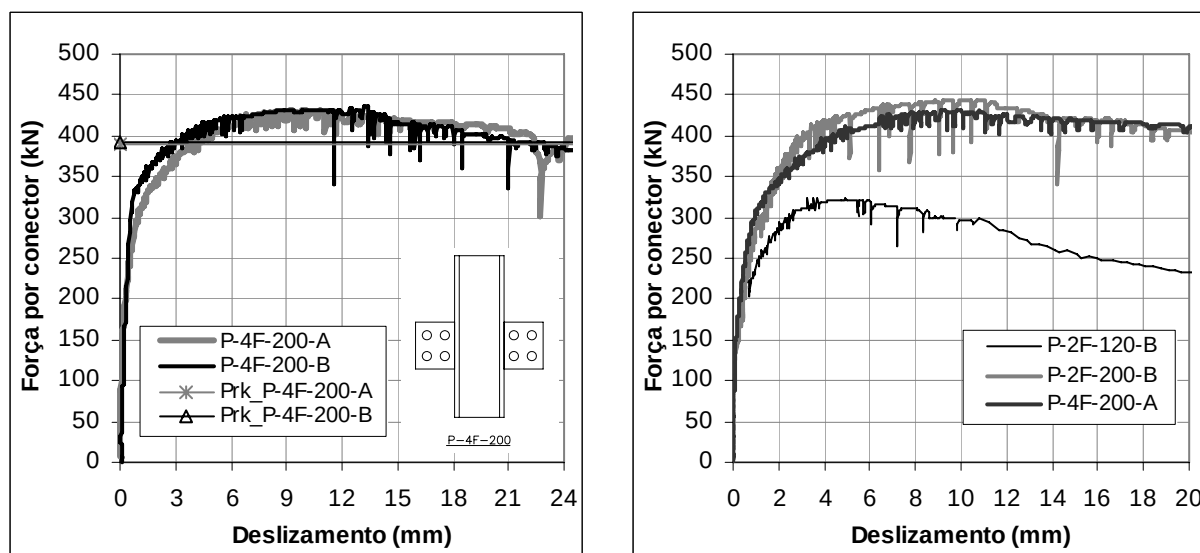


Figura 3.26 – Conectores Perfobond com dois furos com 120 e 200mm de espessura de laje.



(a) Conectores Perfobond com quatro furos

(b) Comparação dos conectores Perfobond

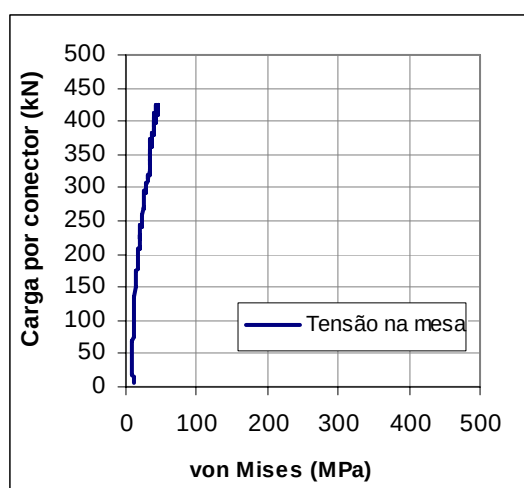
Figura 3.27 – Conectores Perfobond, primeira série

A Figura 3.27b apresentou a curva força *versus* deslizamento dos ensaios com dois e quatro furos nos conectores *Perfobond* para lajes de 120 e 200mm de espessura.

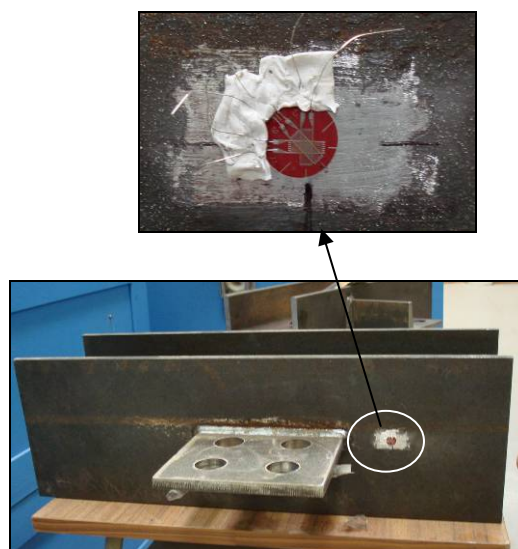
Uma análise destas curvas indica que, o aumento de espessura da laje contribui para um acréscimo em torno de 37% na resistência característica, bem como um aumento na capacidade de deslizamento, que está relacionado com a ductilidade da ligação.

O efeito do acréscimo do número de furos não foi tão significativo, devido ao facto da interferência das áreas de tensão que cada tarugo de concreto gera, criando regiões de alta tensão e assim não aumentando a resistência de forma tão significativa. A distância mínima entre furos de $2,25D$ proposta por Oguejiofor & Hosain (1994) foi respeitada na direção horizontal. Alternativamente, a distância vertical entre as duas filas de furos foi inferior a este valor, pois estava limitada pela altura máxima do conector como função da espessura da laje e do cobrimento mínimo de concreto.

Observa-se o comportamento dúctil dos três tipos de ligação, pois a capacidade de deslize é maior do que a mínima exigida pelo EUROCODE 4 (2005), para comprovar a ductilidade (6mm). Os extensômetros localizados na mesa do perfil (Figura 3.28b) mostraram que estes elementos se mantiveram no regime elástico, Figura 3.28a.



(a) Curva força *versus* tensão von Mises



(b) Localização do extensômetro

Figura 3.28 – Histórico da tensão no conector *Perfobond*, Vianna et al. (2008b).

Os resultados obtidos para os conectores *T-Perfobond* estão apresentados nas figuras a seguir. A Figura 3.29 apresenta as curvas força *versus*

deslizamento resultantes dos pares de ensaios com os conectores T-Perfobond com dois furos para lajes de 120mm e 200mm. As curvas para os ensaios com T-Perfobond com quatro furos para lajes de 200mm estão apresentadas na Figura 3.30a. O resumo de todas as curvas para cada tipo de conector T-Perfobond investigado está presente na Figura 3.30b.

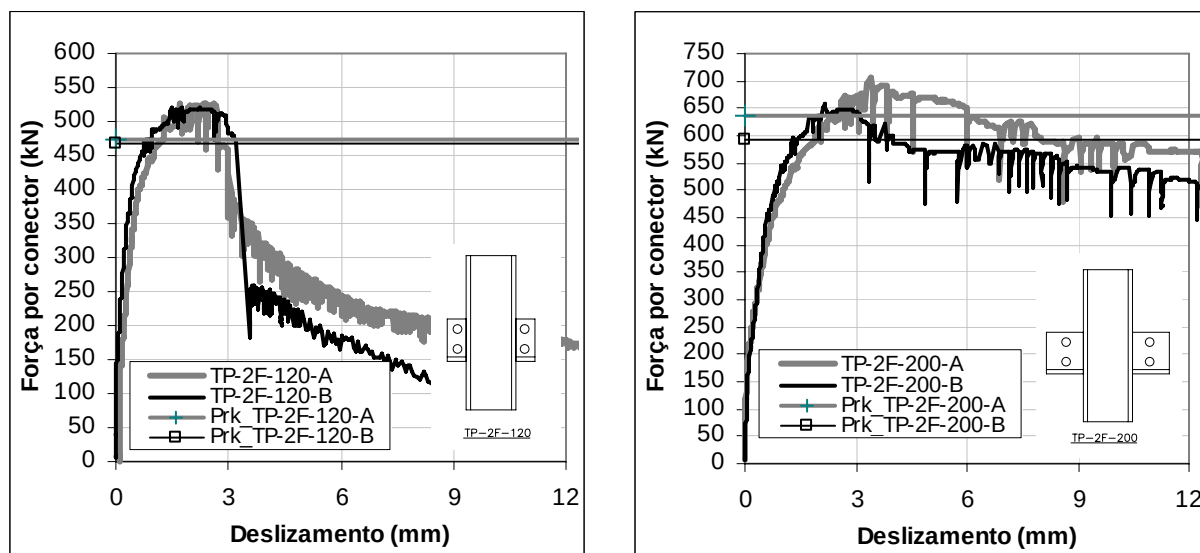
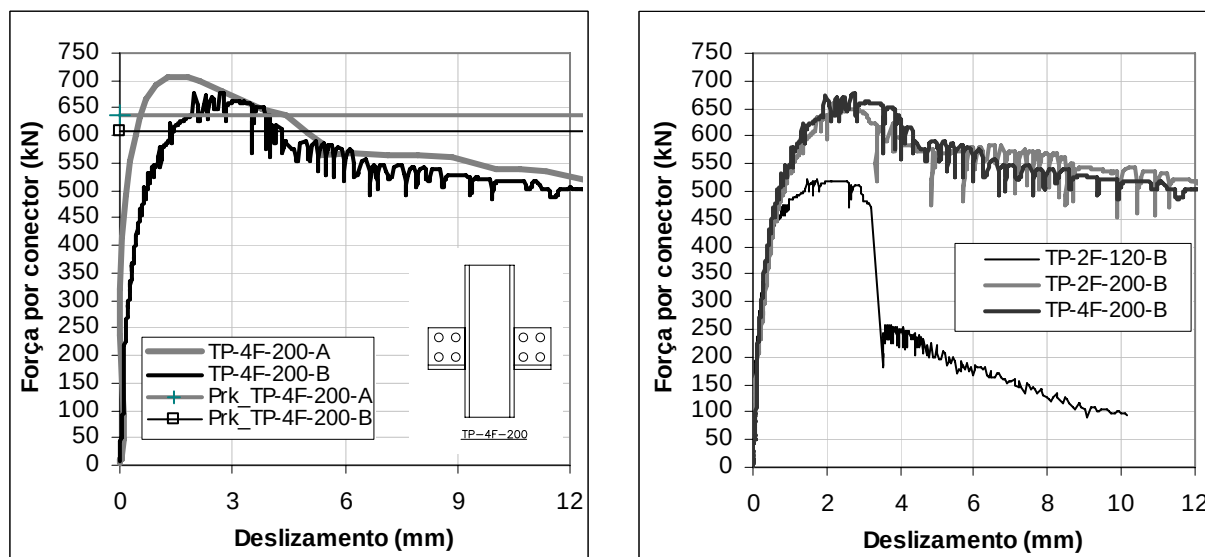


Figura 3.29 – Conectores T-Perfobond com dois furos com 120 e 200mm de espessura de laje.



(a) Conectores T-Perfobond com quatro furos

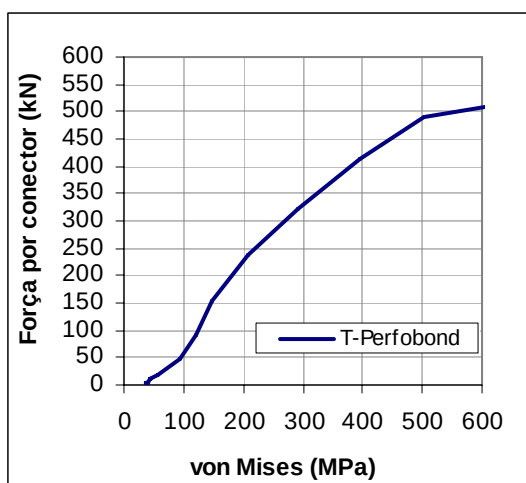
(b) Comparação dos conectores T-Perfobond

Figura 3.30 – Conectores T-Perfobond, primeira série

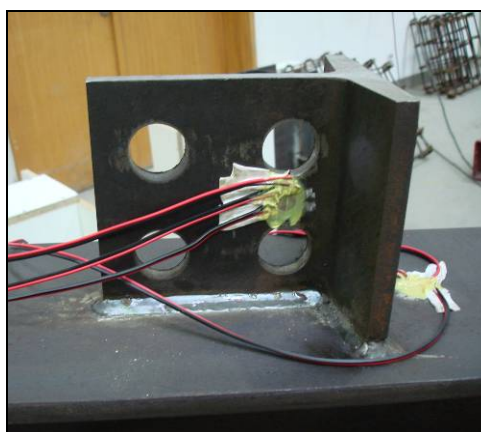
Este tipo de conector apresentou resultados bastante satisfatórios em termos da capacidade última ao cisalhamento. Porém, ele não satisfaz os

critérios de ductilidade impostos pelo EUROCODE 4 (2005) para permitir uma distribuição plástica da força de cisalhamento entre diferentes conectores ao longo do comprimento da viga. Na realidade, a resistência do conector cai abaixo de 90% da carga máxima para um deslizamento menor que 6mm (entre 3 e 4mm). Esta queda da resistência foi mais intensa e súbita para conectores com 2 furos (TP-2F) do que para os conectores com 4 furos (TP-4F).

O aumento das espessuras da laje de 120mm a 200mm conduziram a um aumento de 26% na resistência característica, e o aumento de 2 para 4 furos no conector não conduziram, como nos conectores Perfobond, a qualquer mudança significativa no comportamento do conector, pelo mesmo motivo provável que nos conectores Perfobond. A curva força *versus* tensão de Von Mises apresentada na Figura 3.31a correspondente a roseta da Figura 3.31b mostra o escoamento do conector a um nível de carga de 420kN, contribuindo para a ductilidade global da conexão.



(a) Curva força *versus* tensão von Mises



(b) Localização da roseta

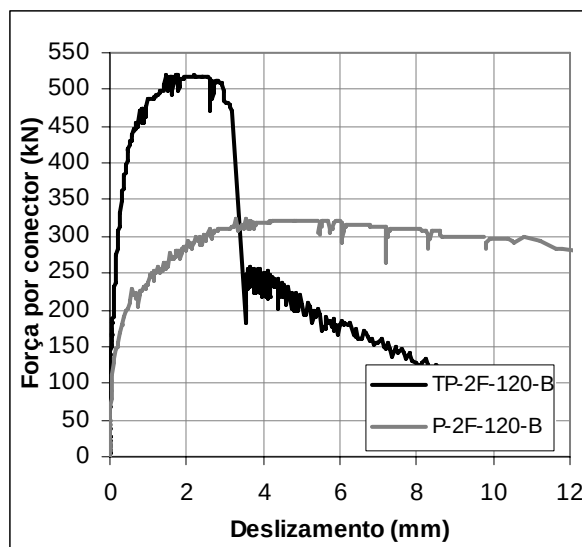
Figura 3.31 – Histórico da tensão no conector T-Perfobond, Vianna et al. (2008b).

A Tabela 3.3 apresenta os resultados obtidos dos ensaios. Segundo o EUROCODE 4 (2005), quando o desvio padrão for menor que 10%, a resistência característica (P_{rk}) do conector deve ser o menor valor reduzido de 10%. O valor da capacidade de deslizamento δ_u deve ser tomado como o maior valor medido no nível de carga característico P_{rk} , e o valor característico δ_{uk} deve ser reduzido em 10%. O desvio padrão de todos os ensaios repetidos com os conectores Perfobond foi calculado e variou entre 1 e 3%, enquanto que para os T-Perfobond a variação foi de 1 a 5%.

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios da primeira série.

Protótipo	Idade dias	fck MPa	qu,test kN	Prk kN	δ_u mm	δ_{uk} mm
P_2F_120_A	38	26,00	329,55	296,60	7,77	6,99
P_2F_120_B	42	26,09	324,10	291,69	11,22	10,10
P_2F_200_A	43	26,09	450,20	405,18	16,48	14,83
P_2F_200_B	49	27,30	444,03	399,62	22,00	19,80
P_4F_200_A	55	26,40	431,85	388,67	22,88	20,59
P_4F_200_B	52	27,30	435,70	392,13	21,29	19,16
TP_2F_120_A	52	27,34	527,48	474,73	2,80	2,52
TP_2F_120_B	57	26,40	520,60	468,54	3,10	2,79
TP_2F_200_A	58	26,17	706,28	635,65	6,50	5,85
TP_2F_200_B	58	26,17	659,33	593,39	4,44	4,00
TP_4F_200_A	64	26,97	705,98	635,38	4,62	4,16
TP_4F_200_B	62	27,25	676,30	608,67	4,00	3,60

Para que se pudesse avaliar a contribuição efetiva do conector *T-Perfobond*, uma comparação entre este conector e o conector *Perfobond* foi realizada.

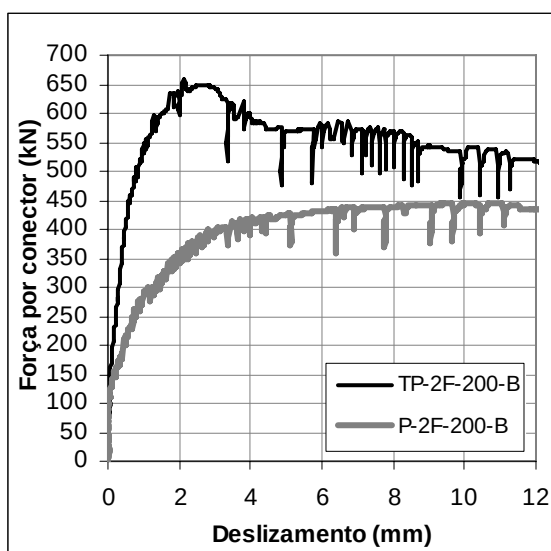
(a) Curva força *versus* deslizamento

(b) T-Perfobond e Perfobond (2F-120)

Figura 3.32 – Comparação do Perfobond com T-Perfobond com dois furos e laje de 120mm.

A Figura 3.32 e a Figura 3.33 apresentam a comparação em termos de força *versus* deslizamento entre os conectores *Perfobond* e *T-Perfobond* com dois furos para laje de 120mm e 200mm, respectivamente. O *T-Perfobond* apresentou uma resistência aproximadamente 60% maior do que o *Perfobond* em se tratando da laje de 120mm. Este aumento de resistência foi em torno de

50% para os protótipos com laje de 200mm de espessura. Na Figura 3.34 uma comparação similar foi realizada com a laje de 200mm para os conectores com quatro furos. O ganho da resistência foi da mesma magnitude do caso anterior, ou seja em torno de 56%. Nas comparações desta etapa entre o Perfobond e T-Perfobond, a carga nos conectores T-Perfobond foi maior mas em termos de ductilidade não atenderam ao EUROCODE 4 (2005).

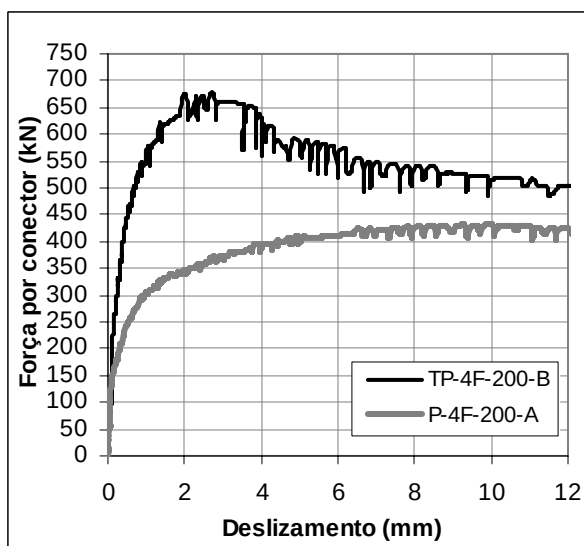


(a) Curva força *versus* deslizamento



(b) T-Perfobond e Perfobond (2F-200)

Figura 3.33 – Comparação do Perfobond com T-Perfobond com dois furos e laje de 200mm.



(a) Curva força *versus* deslizamento



(b) T-Perfobond e Perfobond (4F-200)

Figura 3.34 – Comparação do Perfobond com T-Perfobond com quatro furos e laje de 200mm.

3.3.3.1.3. Mecanismos de colapso

O desmonte dos protótipos foi realizado com auxílio de um martetele elétrico e dois macacos hidráulicos, nos ensaios que não utilizaram armaduras nos furos, para permitir a observação do estado dos conectores e seu entorno.



(a) Utilização do martetele elétrico



(b) Utilização do macaco hidráulico

Figura 3.35– Demolição dos protótipos.

Em todos os ensaios da primeira série a ruína dos protótipos iniciou-se com o surgimento de uma fissura longitudinal na laje na parte frontal do conector, estendendo-se gradualmente na laje, seguida do esmagamento do concreto. A Figura 3.36a e a Figura 3.37a mostram o aspecto da laje após o ensaio dos conectores *Perfobond* e *T-Perfobond*.

O modo de ruína observado está associado ao concreto e a plastificação do próprio conector em fases avançadas de alguns ensaios, como mostram a Figura 3.36b e a Figura 3.37b, respectivamente.

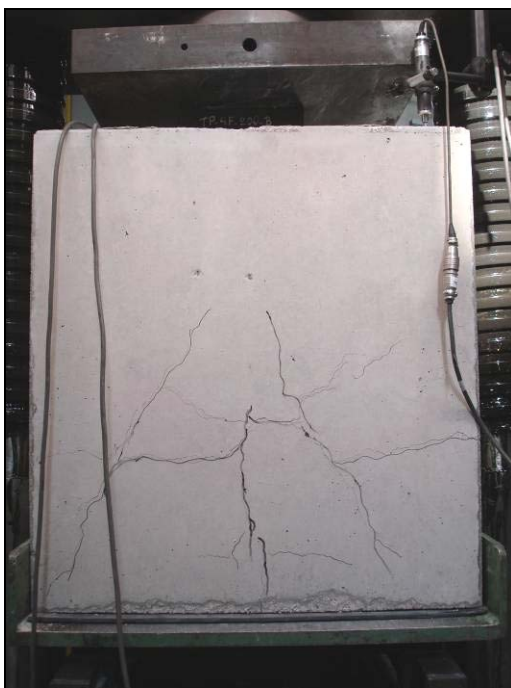


(a) Fissuração da laje



(b) Plastificação do conector

Figura 3.36– Modos de ruína dos Perfobond, Vianna et al.(2007)



(a) Fissuração da laje



(b) Plastificação do conector

Figura 3.37– Modos de ruína dos T-Perfobond.

A Figura 3.38 apresenta a configuração do protótipo com conector Perfobond, P-2F-120, e do protótipo com conector T-Perfobond, TP-2F-120, após o ensaio. Neste caso a deformação do conector foi menos acentuada.



(a) P-2F-120



(b) TP-2F-120

Figura 3.38– Plastificação dos conectores, primeira série.

3.3.3.1.4. Conclusões

Os resultados do conjunto de ensaios experimentais da primeira série realizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, em Portugal foram usados para avaliar o comportamento dos *Perfobond* e *T-Perfobond* conectores, incidindo sobre a sua capacidade de resistência e deslizamento.

Os modos de ruína dos conectores também foram analisados em detalhe. O surgimento de uma fissura está relacionado a um deslizamento na interface, seguido pela formação de fissuras maiores e que se propagam com o aumento do carregamento. Por fim, ocorre o esmagamento do concreto na face frontal do conector. Esta ruptura foi associada ao escoamento do conector, no qual em alguns casos e em fases avançadas do carregamento, também foi seguido por uma falha da solda do conector.

Os conectores *T-Perfobond* apresentaram maior resistência e maior rigidez do que o conector *Perfobond* com geometria similar. A vantagem de utilizar este tipo de conector está associado ao fato de ser produzido a partir de um perfil laminado de seções I ou H, economizando material e fabricação.

Em todos os ensaios com conectores *Perfobond* a capacidade mínima exigida de deslizamento de 6mm de acordo com o EUROCODE 4 (2005) foi

alcançada. No entanto, o deslizamento observado nos ensaios dos T-Perfobond foi menor do que esse valor, não atendendo as exigências do EUROCODE 4 (2005) para uma distribuição plástica da força de cisalhamento nos conectores ao longo do elemento estrutural. Deve ser observado que este fato pode ser não significativo se uma distribuição elástica for assumida no seu dimensionamento estrutural.

3.3.3.2. Segunda série

3.3.3.2.1. Concreto

A partir da segunda série, pretendia-se utilizar um concreto com resistência acima de 35MPa. Encomendou-se concreto da classe C35/45, porém após os ensaios dos corpos de prova, constatou-se que o concreto pertencia a classes diferentes, identificadas a posteriori.

Na segunda série, foi moldado um total de doze corpos de prova, Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resistência à compressão média do concreto da segunda série.

	Protótipo	Data	Idade dias	f _{cmcubos} MPa	Média	Desvio
P-SF-120-A	1	06-07-2007	31	64,16	59,71	6,11
P-SF-120-B	2			52,74		
P-2F-120-A	3			62,23		
P-2F-120-B	4	10-07-2007	35	63,98	62,95	1,40
P-2F-AR-120-A	5			63,52		
P-2F-AR-120-B	6			61,36		
P-SF-200-A		12-07-2007	37		63,64	2,08
P-SF-200-B						
P-2F-200-A						
P-2F-200-B	7			65,93		
P-2F-AR-200-A	8			63,12		
P-2F-AR-200-B	9	61,87				
P-4F-200-A		13-07-2007	38		63,41	1,09
P-4F-200-B						
P-4F-AR-200-A	10			62,27		
P-4F-AR-200-B	11			64,45		
	12			63,52		
				Média	62,43	

Pelo EUROCODE 2 (2005), a resistência à compressão do concreto do corpo de prova cilíndrico correspondente ao valor de 62,43MPa equivale a 51,9MPa.

3.3.3.2.2. Ensaio *Push-out*

Essa série de dezesseis ensaios foi realizada para verificar a influência da presença dos furos e das armaduras passantes nos conectores Perfobond para lajes de 120 e 200mm de espessura. A Figura 3.39 e a Figura 3.40 apresentam alguns dos protótipos analisados nesta série.



(a) P-SF-120



(b) P-2F-120



(c) P-2F-AR-120

Figura 3.39 – Conectores Perfobond para laje com 120mm, segunda série



(a) P-SF-200



(b) P-2F-AR-200



(c) P-4F-AR-200

Figura 3.40 – Conectores Perfobond para laje com 200mm, segunda série

A Figura 3.41 mostra em detalhe as armaduras passantes nos furos dos conectores. Vale ressaltar novamente que o diâmetro das armaduras passantes e dos estribos foi igual a 10mm.



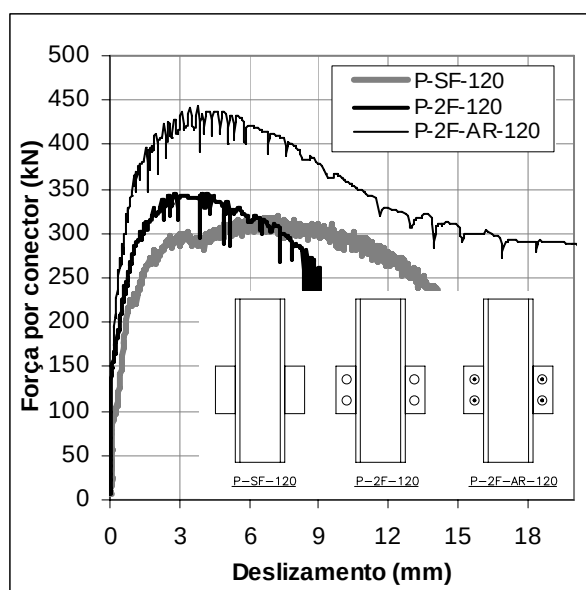
(a) P-2F-AR-200



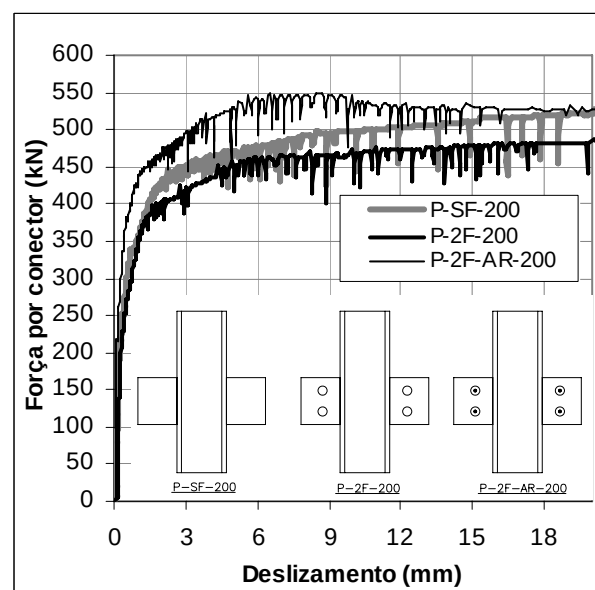
(c) P-4F-AR-200

Figura 3.41 – Detalhe das armaduras nos furos

Os resultados obtidos nos ensaios estão apresentados resumidamente nas figuras a seguir.



(a) Curva força *versus* deslocamento, laje 120mm



(b) Curva força *versus* deslocamento, laje 200mm

Figura 3.42 – Conectores Perfobond para laje com 120mm e 200mm, segunda série

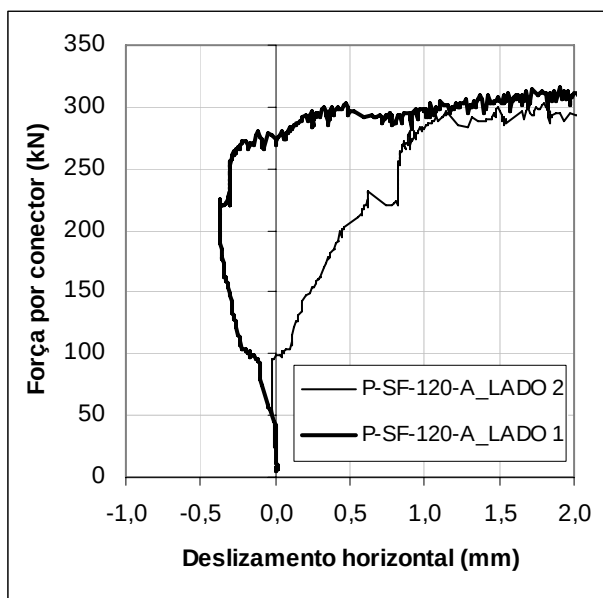
Na Figura 3.42 apresentam-se as curvas força *versus* deslocamento dos ensaios com conectores *Perfobond* para lajes de 120 e 200mm. Na Figura 3.42a apresenta-se a série dos conectores *Perfobond* com 76,2mm de altura: sem furo,

com dois furos, e com armaduras passantes para laje de 120mm. Na Figura 3.42b apresenta-se esta mesma sequência para os conectores com 150mm de altura empregados na laje de 200mm de espessura.

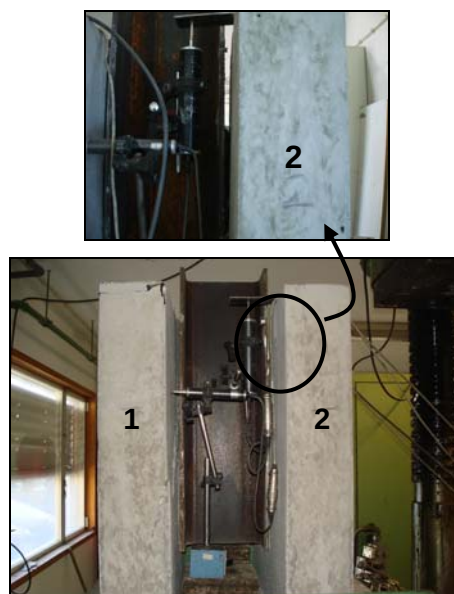
Ao analisar as curvas anteriores, constatou-se que a presença dos furos contribuiu para um acréscimo em torno de 8% na resistência característica no caso dos conectores para laje de 120mm, enquanto que para laje de 200mm, houve uma perda de 4%. Ao acrescentar as armaduras nos furos, o ganho foi de 28% para laje de 120mm e 9% para laje de 200mm.

Em termos de capacidade de deslizamento, houve um ganho de 17% ao se utilizar armaduras passantes no conector Perfobond para laje 120mm em relação ao conector sem armaduras. Apesar dos conectores sem furos apresentarem uma boa capacidade de deslizamento, seus valores aqui não são de suma importância, visto que nesses ensaios, a separação horizontal dos conectores ocorreu de forma bastante significativa, pois não havia furos nem armaduras que contribuíssem para impedimento desta separação, Figura 3.43.

Verificou-se que nas lajes de 120mm, com conectores menores, o ganho da carga característica em função da presença dos furos e das armaduras, foi mais significativo do que os conectores maiores, de 150mm para laje de 200mm.



(a) Separação horizontal



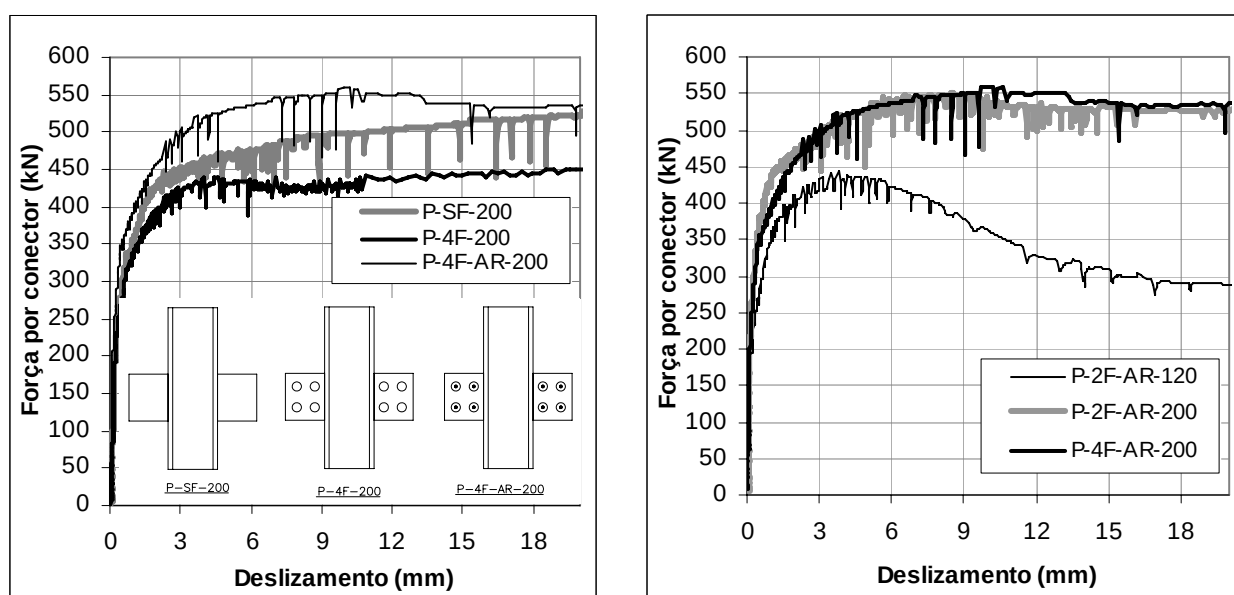
(b) Após ensaio

Figura 3.43 – Separação horizontal do conector Perfobond sem furos, P-SF-120-A.

Na Figura 3.44a apresentam-se as curvas força *versus* deslizamento dos ensaios com conectores Perfobond para lajes de 200mm para análise dos quatro

furos. Na Figura 3.44b apresenta-se as curvas dos conectores Perfobond com armaduras passantes nos furos, para laje de 120 e 200mm.

Nota-se que neste caso também houve perda de capacidade de carga na utilização de quatro furos na chapa do conector Perfobond na ordem de 13%, Figura 3.44a. Já o acréscimo de armaduras passantes nos furos representou um ganho de 22%. Na Figura 3.44b percebe-se que o ganho gerado entre os conectores com armaduras para laje de 200mm, com dois furos para quatro furos, foi relativamente pequeno, em torno de 2%. Enquanto que entre o conector para laje de 120mm e 200mm com dois furos, o ganho representa 24%.



(a) Curva força versus deslizamento, laje 200mm (b) Conectores com armaduras nos furos
 Figura 3.44 – Conectores Perfobond para laje com 200mm e presença das armaduras.

Os conectores com 150mm de altura, empregados na laje de 200mm, apresentaram sempre uma boa ductilidade, atendendo a exigência mínima de 6mm do EUROCODE 4 (2005).

A Tabela 3.5 apresenta os resultados obtidos dos ensaios.

A seguir relata-se os resultados obtidos dos extensômetros dos ensaios dos protótipos P-2F-AR-120-A, P-2F-AR-200-A e P-4F-AR-120-A.

Os resultados obtidos dos extensômetros instalados no protótipo P-2F-AR-120-A são apresentados nos gráficos da Figura 3.45.

Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios da segunda série.

Protótipo	Idade dias	qu,test kN	Prk kN	δ_u mm	δ_{uk} mm
P-SF-120-A*	30	319,28	287,35	11,00	9,90
P-SF-120-B	31	319,25	287,33	10,40	9,36
P-2F-120-A*	31	344,85	310,37	6,57	5,91
P-2F-120-B	34	394,20	354,78	7,80	7,02
P-2F-AR-120-A*	35	443,03	398,73	7,67	6,90
P-2F-AR-120-B	34	465,68	419,11	7,85	7,07
P-SF-200-A*	35	526,78	474,10	31,67	28,50
P-SF-200-B	36	495,00	445,50	26,61	23,95
P-2F-200-A*	36	503,43	453,09	35,00	31,50
P-2F-200-B	36	501,48	451,33	35,00	31,50
P-2F-AR-200-A*	37	549,70	494,73	35,00	31,50
P-2F-AR-200-B	37	554,25	498,83	35,00	31,50
P-4F-200-A*	37	458,93	413,04	35,00	31,50
P-4F-200-B	37	460,98	414,88	35,00	31,50
P-4F-AR-200-A	38	562,23	506,01	35,00	31,50
P-4F-AR-200-B*	38	559,93	503,94	35,00	31,50

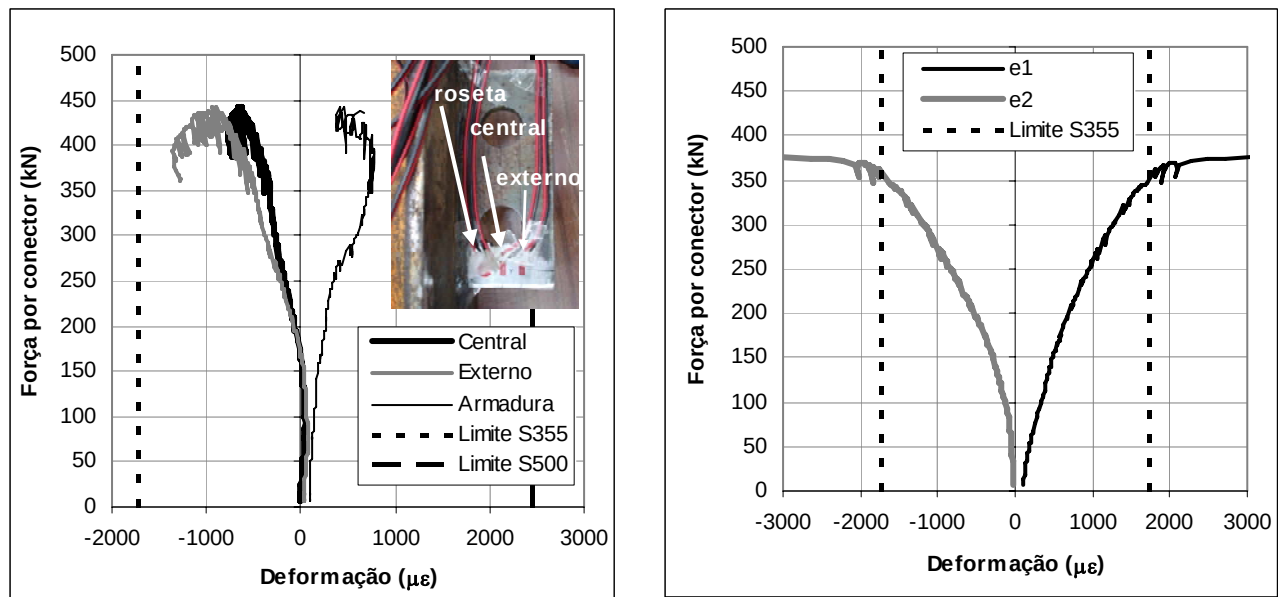
* Protótipos considerados representativos para análise de resultados

No gráfico da Figura 3.45a apresentam-se as deformações dos extensômetros instalados na parte inferior do conector posicionados na região central e externa em relação ao furo. Apresenta-se também a deformação obtida na barra que passava pelo furo do conector, Figura 3.46. Neste mesmo gráfico é apresentado o limite de deformação para o conector, que foi de $1732\mu\epsilon$ para o aço S355 utilizado nos conectores, e de $2429\mu\epsilon$ para a barra composta pelo aço S500.

O gráfico da Figura 3.45b apresenta a capacidade de deformação do conector próxima a região da solda nas duas direções principais obtida pela roseta, bem como seu limite de deformação.

No gráfico da Figura 3.45a, observa-se que os extensômetros deixaram de funcionar antes mesmo de atingirem seus limites de deformação. Porém, nota-se que ao comparar o extensômetro central com o externo, a região externa sofreu uma maior deformação.

No gráfico da Figura 3.45b, as deformações obtidas nas direções 1 e 2 foram praticamente simétricas. Esta região do conector junto à solda escoou antes de atingir a carga máxima do ensaio, que foi de 443kN.



(a) Deformações em uma direção

(b) Deformações principais da roseta

Figura 3.45 – Deformações no ensaio do conector P-2F-AR-120-A.



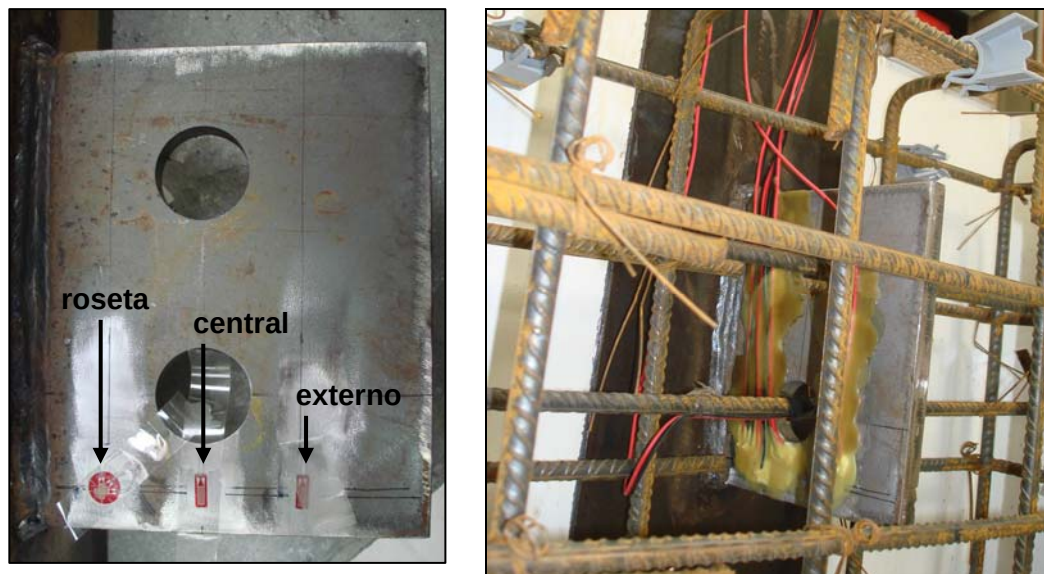
(a) Extensômetros



(b) Extensômetro na barra

Figura 3.46 – Extensômetros no conector e na barra no protótipo P-2F-AR-120-A.

A Figura 3.47 apresenta os extensômetros instalados no conector Perfobond no protótipo P-2F-AR-200-A com sua respectiva identificação.

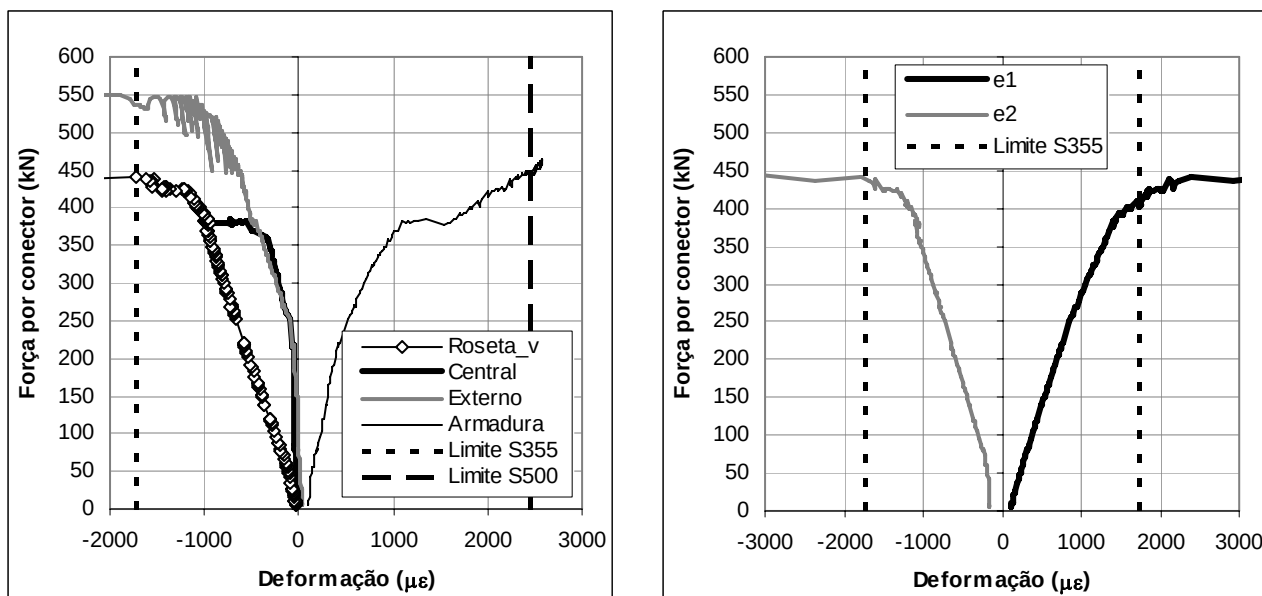


(a) Extensômetros no conector

(b) Extensômetros no protótipo

Figura 3.47 – Extensômetros no conector e na barra no protótipo P-2F-AR-200-A.

Os resultados obtidos dos extensômetros instalados no protótipo P-2F-AR-200-A são apresentados nos gráficos da Figura 3.48.



(a) Deformações em uma direção

(b) Deformações principais da roseta

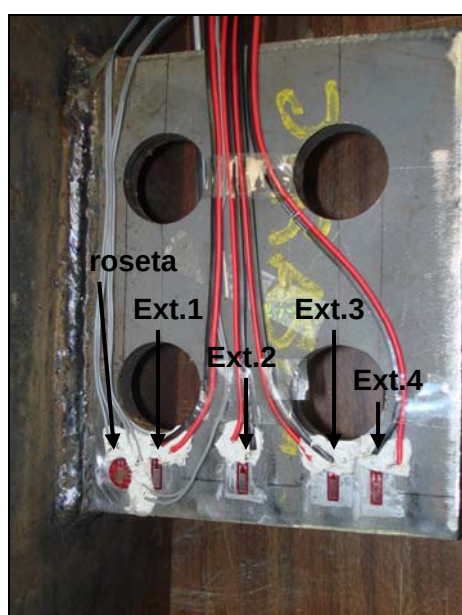
Figura 3.48 – Deformações no ensaio do conector P-2F-AR-200-A.

Observa-se no gráfico da Figura 3.48a que o extensômetro central, localizado abaixo do furo do conector, descolou antes de atingir a capacidade máxima de deformação e a carga máxima do ensaio (549kN). Já o extensômetro externo, trabalhou até que a carga máxima do ensaio fosse alcançada, e atingiu

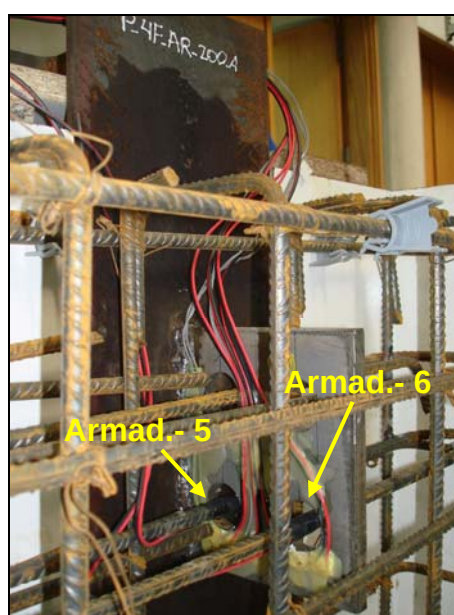
a sua capacidade de deformação máxima. O extensômetro da armadura atingiu sua capacidade de deformação máxima antes de atingir a carga máxima do ensaio.

No gráfico da Figura 3.48b, as deformações obtidas nas direções 1 e 2 apresentaram um comportamento quase que simétrico, porém a direção 1, apresentou maior deformação. Nesse gráfico fica claro que ao atingir a capacidade máxima de deformação antes de atingir a carga máxima, o material do conector entra em escoamento, contribuindo assim para a ductilidade global da conexão.

A Figura 3.49 apresenta os extensômetros instalados no conector Perfobond no protótipo P-4F-AR-200-A com sua respectiva identificação. Neste protótipo foram utilizados seis extensômetros unidirecionais, sendo quatro no conector, e dois em cada uma das armaduras passantes nos furos inferiores, Figura 3.49b. Uma roseta foi instalada no conector próxima a região da solda, porém uma das direções da roseta apresentou problema no início do ensaio devido a problemas na aquisição de dados.



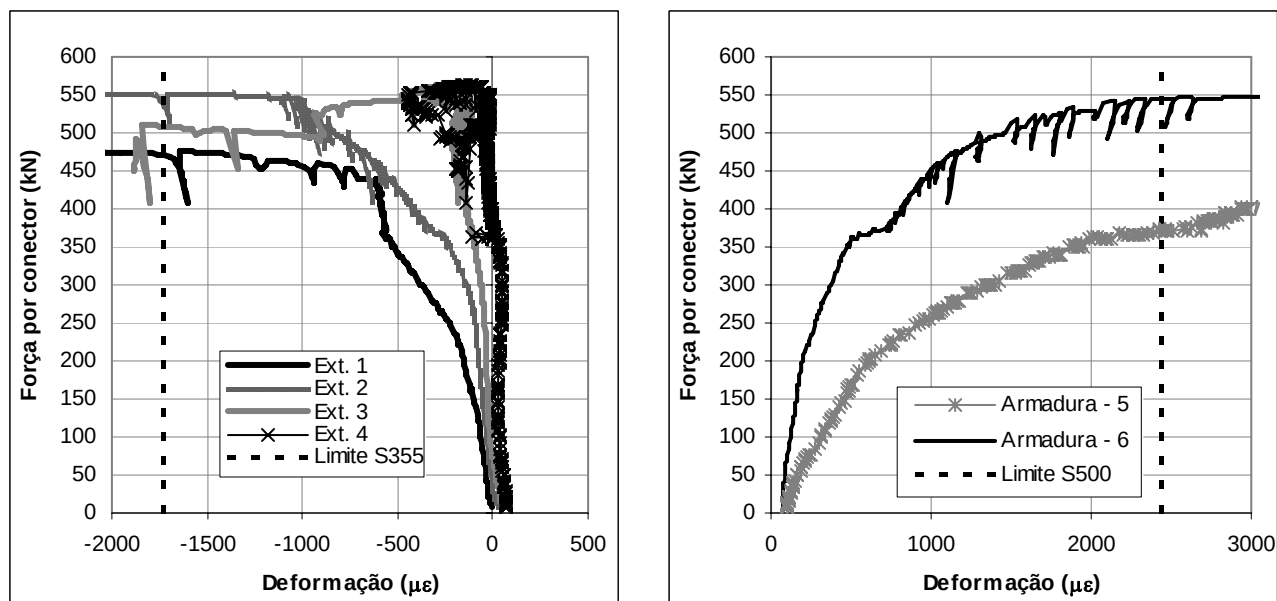
(a) Extensômetros no conector



(b) Extensômetros nas armaduras

Figura 3.49 – Extensômetros no conector e na barra no protótipo P-4F-AR-200-A.

Os resultados obtidos dos extensômetros unidirecionais instalados no conector e nas armaduras no protótipo P-4F-AR-200-A são apresentados nos gráficos da Figura 3.50.



(a) Deformação do conector

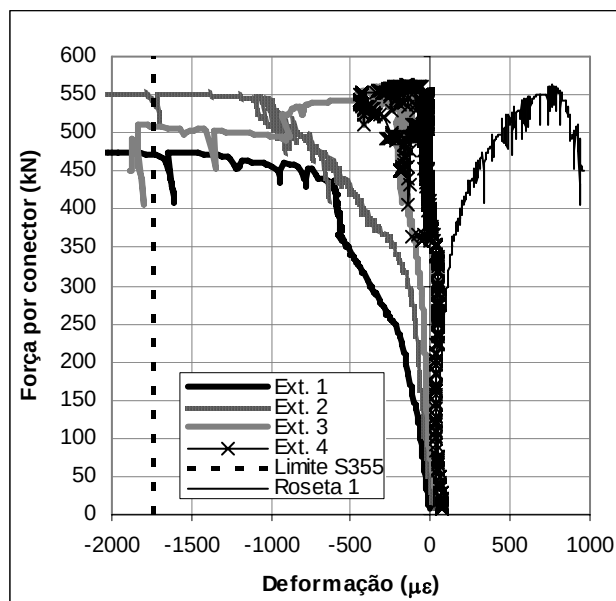
(b) Deformação das armaduras

Figura 3.50 – Deformações no ensaio do conector P-4F-AR-200-A.

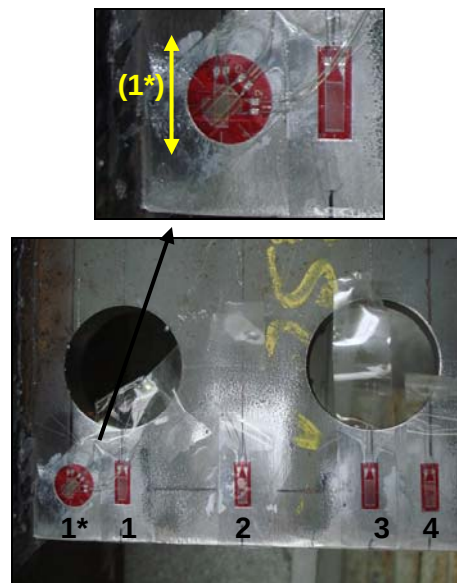
Da Figura 3.50a percebe-se que a deformação do conector ocorreu de uma forma direcional, da parte externa para a parte interna. O primeiro extensômetro apresentou maior deformação, seguido do segundo, terceiro e quarto extensômetro sucessivamente. A região interna, próxima à solda, sofreu maior deformação durante o ensaio, sendo esta a mais solicitada. Isto se confirmou pelas deformações apresentadas nas armaduras posicionadas nos furos inferiores. A armadura posicionada no furo interno (Armadura 5) apresentou maior deformação, Figura 3.50b, entrando em escoamento antes de atingir a carga máxima do ensaio, 562kN.

A Figura 3.51a apresenta os resultados obtidos dos extensômetros unidirecionais instalados no conector e inclusive de um dos extensômetros da roseta no protótipo P-4F-AR-200-A. A Figura 3.51b apresenta em detalhes os extensômetros unidirecionais e o extensômetro na direção 1 da roseta, paralelo aos outros extensômetros, que forneceu a deformação mais próxima a região da solda. Neste gráfico, nota-se que essa região se deformou sob tração, ao contrário do restante do conector. Isto se deve ao fato de ser a região de ancoragem do sistema.

A configuração da deformação do sistema é apresentada na Figura 3.52. Na Figura 3.52a apresenta-se o gráfico das deformações obtidas em cada extensômetro na direção da parte interna a externa do conector, começando com a deformação da roseta (1*), quando a carga no conector atingiu 350kN.

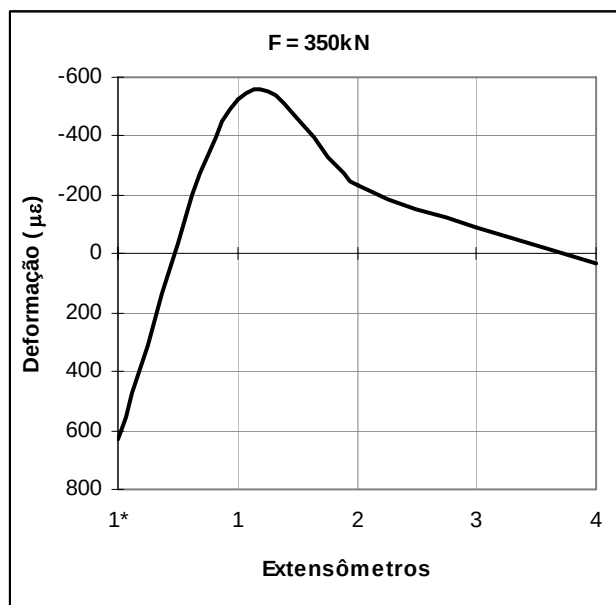


(a) Deformação do conector



(b) Extensômetros

Figura 3.51 – Deformações no conector P-4F-AR-200-A.



(a) Linha de deformação



(b) Deformação do conector

Figura 3.52 – Deformações no conector P-4F-AR-200-A, para carga de 350kN.

3.3.3.2.3. Mecanismos de colapso

Como nos ensaios da primeira série, na segunda série a ruína dos protótipos iniciou-se com o surgimento de uma fissura longitudinal na laje na

parte frontal do conector, estendendo-se gradualmente na laje, seguida do esmagamento do concreto. As figuras a seguir apresentam as configurações de alguns protótipos desta série após o ensaio. Em alguns casos, nota-se a plastificação do conector.



(a) Fissuração da laje



(b) Plastificação do conector

Figura 3.53– Protótipo P-SF-120-A após ensaio, segunda série.



(a) Fissuração da laje



(b) Plastificação do conector

Figura 3.54– Protótipo P-2F-120-A após ensaio, segunda série.

Nos protótipos que possuíram furos, é possível observar que o concreto esmagado dentro dos furos permanece compactado nestes, mesmo durante e após o desmonte do protótipo.

Nos ensaios com armaduras nos furos, verificou-se a plastificação das mesmas. A Figura 3.55b mostra a plastificação ocorrida nas armaduras passantes nos furos do protótipo P-2F-AR-120-A.

Ao se separar as lajes de concreto, nota-se claramente o cisalhamento do concreto ao longo dos dois planos de corte coincidentes com as faces laterais dos conectores Figura 3.56a.



(a) P-2F-AR-120-A após ensaio



(b) Plastificação das armaduras

Figura 3.55– Modos de ruína dos conectores Perfobond, P-2F-AR-120-A, segunda série.



(a) Cisalhamento do concreto



(b) Plastificação do conector

Figura 3.56– Protótipo P-2F-AR-120-A após ensaio, segunda série.



(a) Fissuração da laje



(b) Plastificação do conector

Figura 3.57– Protótipo P-SF-200-A após ensaio, segunda série.



(a) Fissuração da laje



(b) Plastificação do conector

Figura 3.58– Protótipo P-2F-200-A após ensaio, segunda série.



(a) Fissuração da laje



(b) Plastificação do conector

Figura 3.59– Protótipo P-4F-200-A após ensaio, segunda série.

3.3.3.2.4. Conclusões

Na segunda série de ensaios, percebeu-se que os conectores para lajes de 120mm apresentaram maior ganho tanto na capacidade de carga, quanto na capacidade de deslizamento, quando se variou a presença de furos e armaduras, do que os conectores para laje de 200mm.

Nas lajes de 200mm, ao variar a presença de furos e armaduras, não apresentaram mudanças significativas. O aumento do número de furos está relacionado com a interferência das áreas de tensão que cada cilindro de concreto gera, criando regiões de alta tensão e assim não aumentando a resistência de forma significativa. Conforme descrito anteriormente, não foi possível atender a distância mínima proposta por Oguejiofor & Hosain (1994) na direção vertical, devido a espessura da laje e o limite de cobrimento.

Quanto as deformações, percebeu-se que houve plastificação dos conectores, confirmando assim a ductilidade global da conexão.

3.3.3.3. Terceira série

3.3.3.3.1. Concreto

Na terceira série, foram moldados nove corpos de prova. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Resistência à compressão média do concreto da terceira série.

Protótipo	Data	Idade dias	f _{cm} cubos MPa	Média	Desvio
1	03-08-2007	38	49,18	53,91	3,20
2			56,76		
3			57,33		
4			55,36		
5			56,23		
6			56,78		
7			52,19		
8			50,30		
9			51,08		

A resistência à compressão do concreto do corpo de prova cilíndrico correspondente ao valor de 53,91MPa equivale a 43,9MPa, EUROCODE 2 (2005).

3.3.3.3.2. Ensaio *Push-out*

A terceira série composta de quatorze ensaios foi realizada para verificar a influência dos furos e das armaduras passantes nos conectores *T-Perfobond* para lajes de 120 e 200mm de espessura. A Figura 3.60 apresenta os conectores T-Perfobond sem furos, o T-conector com dois furos e o protótipo TP-2F-120-IN.



(a) TP-SF-120



(b) T-2F-120



(c) TP-2F-120-IN

Figura 3.60 – Conectores para laje de 120mm, terceira série

Na Figura 3.61 e Figura 3.62 são apresentadas alguns dos protótipos analisados nesta série com as armaduras dos estribos, prontos para serem fechadas as formas e posteriormente concretados.



(a) TP-SF-120



(b) TP-2F-120



(c) TP-2F-AR-120

Figura 3.61 – Conectores Perfobond para laje com 120mm, segunda série



(a) TP-2F-200



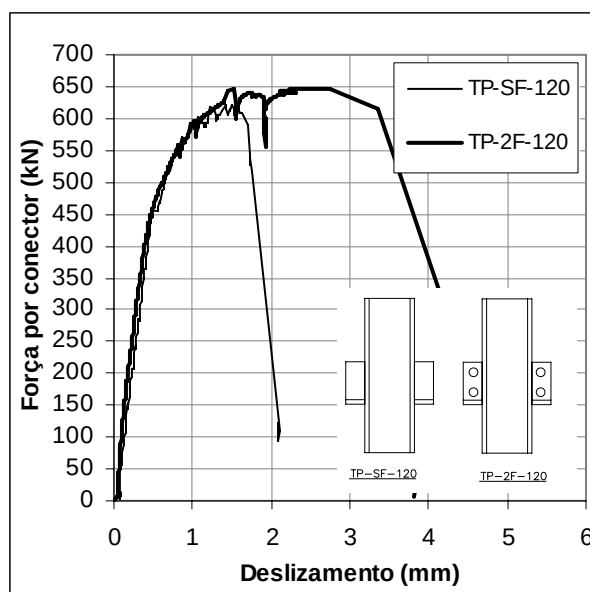
(b) TP-4F-200



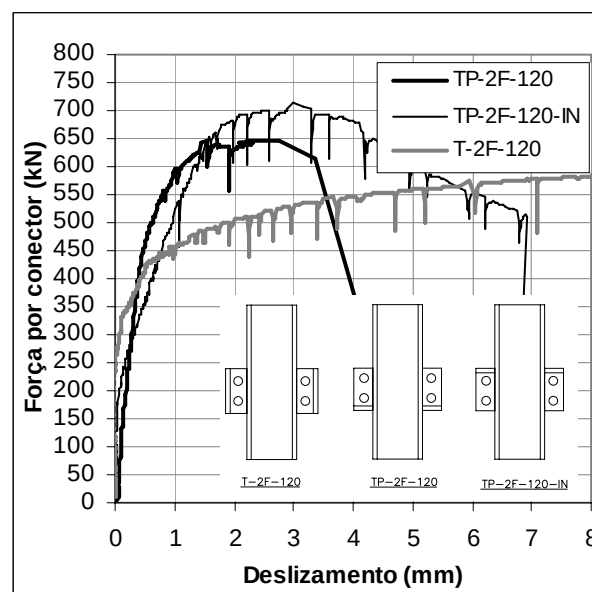
(c) T-2F-120

Figura 3.62 – Conectores Perfobond para laje com 120mm, segunda série

A Figura 3.63 e Figura 3.64 apresentam as curvas força *versus* deslizamento desta série com resistência à compressão do concreto de 43,9MPa (classe nominal C35/45 de acordo com EUROCODE 2, 2005).

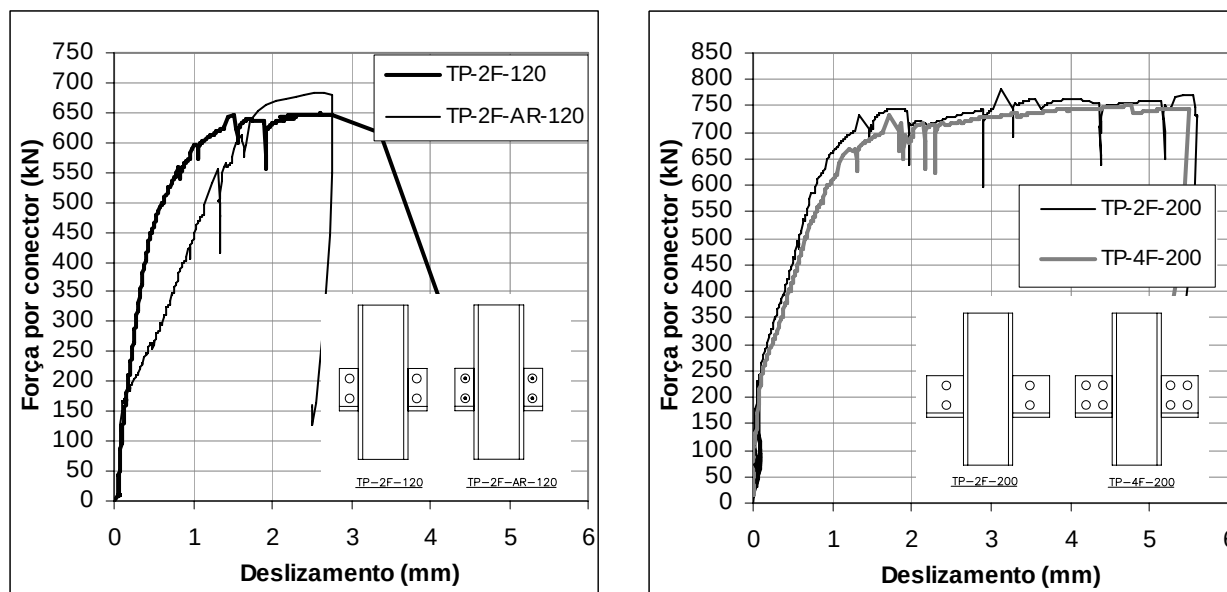


(a) Influência dos furos



(b) Influência da posição do conector

Figura 3.63 – Conectores T-Perfobond para laje com 120mm, terceira série



(a) Influência das armaduras, laje 120mm

(b) Influência dos furos, laje 200mm

Figura 3.64 – Conectores T-Perfobond para laje com 120mm e 200mm, terceira série

A partir das curvas apresentadas na Figura 3.63a, comparando os ensaios de 120mm, do conector T-Perfobond sem furo e com dois furos, conclui-se que a presença dos furos proporciona um ganho de aproximadamente 4% na resistência característica, P_{rk} , e um aumento na capacidade de deslizamento de 1,5mm, mostrando claramente que, neste caso, a resistência do bloco é mais significativa do que a resistência relacionada com os cilindros de concreto formados nos furos dos conectores. No entanto, estes cilindros/furos, além de contribuírem para uma maior ductilidade, fornecem ao conector a resistência ao *uplift* (separação vertical do conector com a viga metálica).

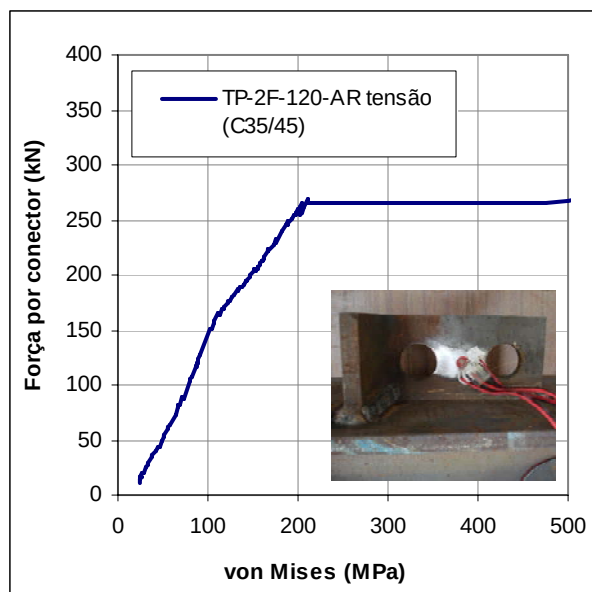
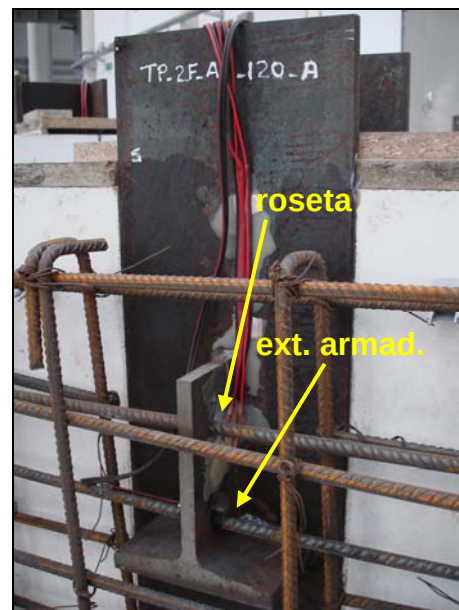
No conjunto de curvas da Figura 3.63b apresentou-se a diferença do comportamento das ligações quando se muda a posição do conector em 180 graus: no ensaio TP-2F-120 (curva representada por uma linha mais espessa), a mesa do conector está na parte inferior e, portanto, atua quase inteiramente no esmagamento do concreto, sem uma contribuição dos cilindros/furos do concreto. Por outro lado, no ensaio TP-2F-120-IN, o esmagamento do concreto é devido principalmente a alma do conector, onde os furos são certamente mobilizados. Esta mudança resultou num aumento de 10% da resistência característica (P_{rk}) e um aumento de 24% na capacidade de deslizamento (δ_u). O ensaio do protótipo T-2F-120, no qual a alma do conector foi soldada à mesa do perfil metálico, apresentou a menor carga de colapso, apesar de ter alcançado uma maior capacidade de deslizamento quando comparado aos outros protótipos. A capacidade de carga deste conector em particular, associa-se à

resistência ao cisalhamento da alma do conector e a resistência a compressão do concreto na frente do conector.

A Figura 3.64a apresentou a influência das armaduras passantes nos furos do conector *T-Perfobond* nas lajes de 120mm. Estas armaduras conduziram a um pequeno aumento em torno de 5% na resistência característica. Esperava-se que essas armaduras pudessem melhorar a ductilidade da ligação. No entanto, isso não ocorreu, muito provavelmente devido a posição do conector, onde a mesa absorveu mais a força no esmagamento, não mobilizando os furos e nem as armaduras passantes. No entanto, estas armaduras foram amplamente solicitadas durante o ensaio, ao se verificar sua plastificação após os ensaios.

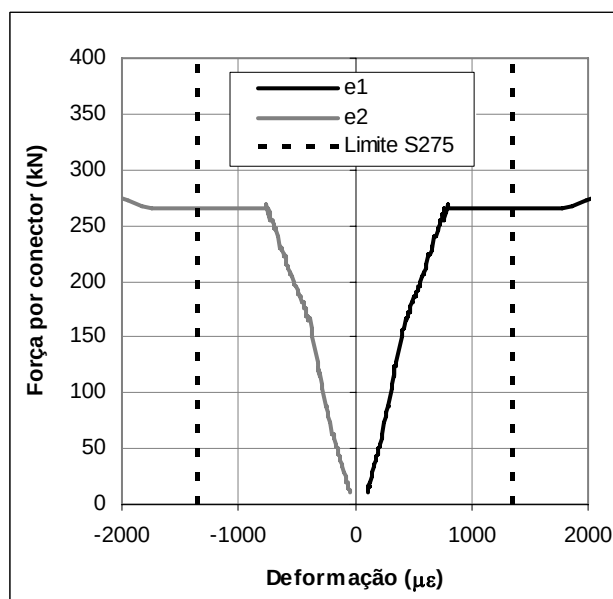
A Figura 3.64b apresentou as curvas força *versus* deslizamento dos protótipos com T-Perfobond com dois e quatro furos utilizados na laje de 200mm de espessura. O aumento do número de furos não contribuiu para uma mudança significativa no comportamento da ligação. Isto se deve ao mesmo fato já mencionado anteriormente, relacionado com a interferência das áreas de tensão que cada cilindro de concreto gera, criando regiões de alta tensão e assim não aumentando a resistência de forma tão significativa. Novamente, a distância mínima entre furos de 2.25D propostos por Oguejiofor & Hosain (1994) foi respeitada na direção horizontal. Alternativamente, a distância vertical entre as duas filas de furos foi inferior a este valor, pois também estava limitada pela altura máxima do conector como função da espessura da laje e do cobrimento mínimo de concreto.

A Figura 3.65a apresenta o histórico da tensão obtido pela roseta instalada na alma do conector T-Perfobond no protótipo TP-2F-AR-120-A. A Figura 3.65b apresenta a localização dos extensômetros: a roseta e o extensômetro da armadura no furo inferior.

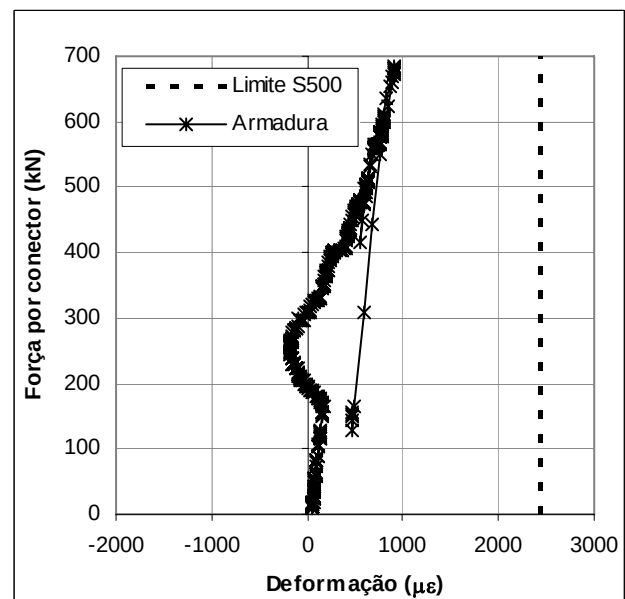
(a) Curva força *versus* tensão von Mises

(b) Localização do extensômetro

Figura 3.65 – Histórico da tensão no conector T-Perfobond, terceira série.



(a) Deformação do conector



(b) Deformação das armaduras

Figura 3.66 – Deformações no ensaio do conector TP-2F-AR-120-A

Conforme se observou na Figura 3.65a e Figura 3.66, os valores obtidos pelos extensômetros a partir de 200kN não foram confiáveis, inibindo quaisquer tipo de análise ou conclusão. No entanto, vale ressaltar que após o desmonte do ensaio, verificou-se que a propagação do escoamento não foi suficiente para limitar a capacidade do conector.

A Tabela 3.7 apresenta os resultados obtidos dos ensaios da terceira série.

Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios da terceira série.

Protótipo	Idade dias	qu,test kN	Prk kN	δ_u mm	δ_{uk} mm
TP_SF_120_A	33	621,95	559,76	1,70	1,53
TP_SF_120_B	33	660,55	594,50	2,25	2,03
TP_2F_120_A*	33	563,20	506,88	2,18	1,96
TP_2F_120_B	34	647,90	583,11	3,40	3,06
TP_2F_AR_120_A	34	683,38	615,04	2,76	2,48
TP_2F_AR_120_B*	34				
TP_2F_120_IN_A*	34				
TP_2F_120_IN_B	34	714,68	643,21	4,20	3,78
TP_2F_200_A	34	780,35	702,32	5,18	4,66
TP_2F_200_B	34	804,05	723,65	2,81	2,53
TP_4F_200_A	35	750,28	675,25	5,38	4,84
TP_4F_200_B	35	790,25	711,23	5,42	4,88
T_2F_120_A*	33				
T_2F_120_B	33	596,43	536,78	11,63	10,47

* Os resultados desses ensaios foram descartados devido a problemas com a prensa ou com a geometria do ensaio.

3.3.3.3. Mecanismos de colapso

As figuras a seguir apresentam os modos de colapso dos protótipos T-Perfobond da terceira série de ensaio.

Na Figura 3.67 apresenta-se os conectores T-perfobond com dois furos para lajes de 120mm plastificados após o ensaio.



(a) Plastificação do conector



(b) Detalhe da plastificação do conector

Figura 3.67– Protótipo TP-2F-120-B após ensaio, terceira série.

Na Figura 3.68 apresenta-se a sequência do desmonte do protótipo TP-2F-120-B-IN, na qual o conector *T-Perfobond* possuía a alma do conector a frente ao esmagamento do concreto. Observou-se que ao separar a laje, o concreto confinado na região em torno ao conector, permaneceu ligado a este, em forma de cone. Após a retirada deste concreto, percebeu-se também a permanência do concreto nos furos. Neste ensaio também foi observada a plastificação do conector.



Figura 3.68– Protótipo TP-2F-120-B-IN após ensaio, terceira série.

Na Figura 3.69 apresenta-se o desmonte do protótipo T-2F-120-A, que possuía o conector tipo T, sem armaduras nos furos. Neste ensaio foi mais perceptível o plano de cisalhamento entre a laje de concreto e o conector de aço. Notou-se também a permanência do concreto confinado junto ao conector após a separação das lajes, e a plastificação do conector.



Figura 3.69– Protótipo T-2F-120-A após ensaio, terceira série.

Na Figura 3.70 apresenta-se a configuração das fissuras da laje do protótipo TP-2F-200-A, a extração das lajes com auxílio de macacos hidráulicos, o concreto confinado no conector e nos furos, e a plastificação do conector.



Figura 3.70– Protótipo TP-2F-200-A após ensaio, terceira série.



Figura 3.71– Protótipo TP-4F-200-B após ensaio, terceira série.

Na Figura 3.71 observou-se após a retirada das lajes a propagação das fissuras internas e desacoplamento do concreto que permaneceu no conector. Observou-se também a plastificação do conector.

3.3.3.3.4. Conclusões

Os resultados da terceira série de ensaios, foram utilizados para avaliar o comportamento dos conectores T-Perfobond, incidindo sobre a sua capacidade de resistência e deslizamento.

Estes conectores têm demonstrado que suportam altas cargas de cisalhamento, resultando em um menor número de conectores na viga. Além disso, eles têm a vantagem adicional de serem produzidos com laminados seções I ou H, e podem ser facilmente soldados com equipamento disponível. Estes fatores contribuem para uma economia substancial de material e mão-de-obra, conduzindo a um modelo mais econômico de vigas mistas.

O aparecimento de uma falha está relacionado ao deslizamento na interface conector-concreto, seguido pela formação de fissuras no concreto que se abrem e se propagam com aumento da carga, seguido pelo esmagamento do concreto na face frontal do conector. Esta falha do concreto ocorre em fases avançadas de carregamento acompanhada do escoamento do conector.

O deslizamento observado nos ensaios foi menor do que o mínimo de 6mm exigido pelo EUROCODE 4 (2005).

3.3.3.4. Quarta série

3.3.3.4.1. Concreto

Na quarta série, foram moldados também nove corpos de prova. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.8

A resistência à compressão do concreto do corpo de prova cilíndrico correspondente ao valor de 41,78MPa equivale a 33MPa, EUROCODE 2 (2005).

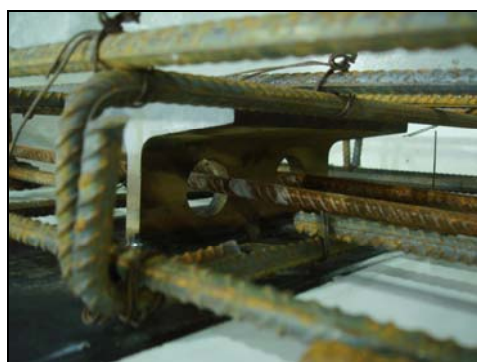
Tabela 3.8 – Resistência à compressão média do concreto da quarta série.

	Protótipo	Data	Idade dias	f_{cmcubos} MPa	Média	Desvio
TP-2F-AR-120-A-IN-10	1	03-10-2007	19	37,12	38,61	1,46
TP-2F-AR-120-B-IN-12	2			38,67		
	3			40,04		
T-2F-AR-120-A-10	4	15-10-2007	31	44,64	44,95	1,83
T-2F-AR-120-B-12	5			47,35		
	6			42,67		
	7			43,26		
	8			46,62		
	9			45,17		
				Média	41,78	

3.3.3.4.2.

Ensaio *Push-out*

Em função dos resultados obtidos da terceira série de ensaio, com os conectores T-Perfobond, no qual verificou-se que o conector T e o conector T-perfobond invertido, Figura 3.72, apresentaram um melhor comportamento quanto a ductilidade, programou-se mais quatro ensaios a fim de se investigar com mais detalhes essas ligações.



(a) T-2F-120

(b) TP-2F-120

Figura 3.72 – Conectores T e T-Perfobond, quarta série.

A quarta série composta de quatro ensaios foi realizada para verificar a influência das armaduras passantes e das armaduras dos estribos. Os ensaios dos protótipos TP-2F-AR-120-A-IN-10 e T-2F-AR-120-A-10 utilizaram armaduras de 10mm de diâmetro nos furos e nos estribos, Figura 3.73. Os ensaios dos protótipos TP-2F-AR-120-B-IN-12 e T-2F-AR-120-B-12 utilizaram armaduras de 12,5mm de diâmetro nos furos e nos estribos, Figura 3.74. Os protótipos foram fabricados com lajes de 120mm de espessura e a resistência à compressão do concreto foi de 33MPa (classe nominal C30/37 de acordo com EUROCODE 2, 2005).



(a) TP-2F-AR-120-A-IN-10



(b) T-2F-AR-120-A-10

Figura 3.73 – Protótipos com armaduras de 10mm, quarta série.

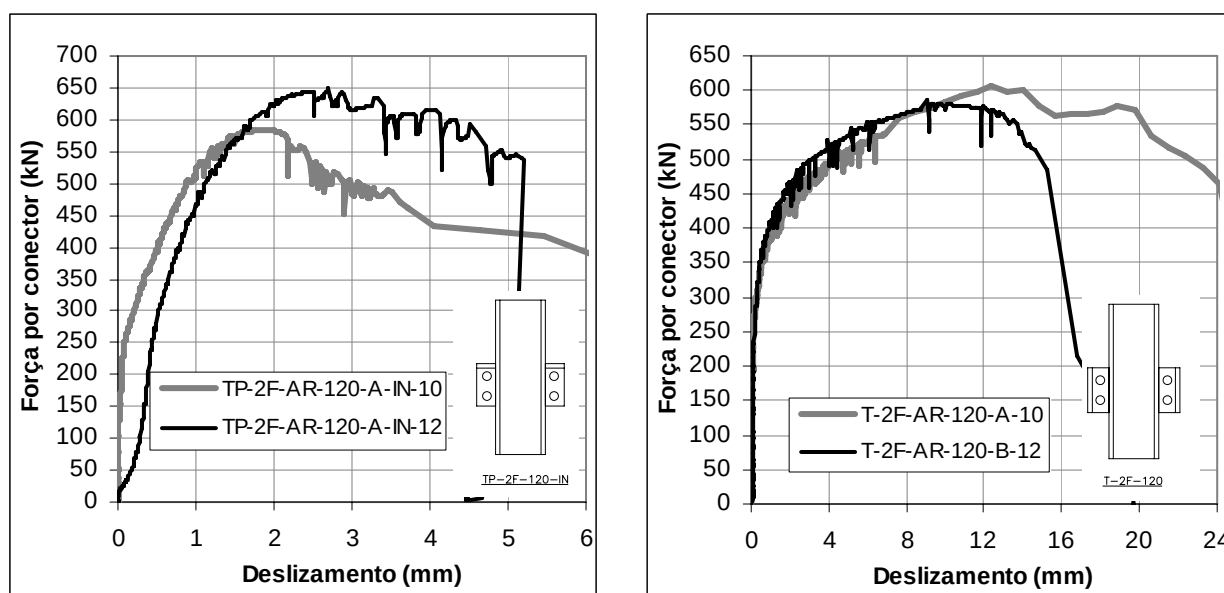


(a) TP-2F-AR-120-B-IN-12



(b) T-2F-AR-120-B-12

Figura 3.74 – Protótipos com armaduras de 12,5mm, quarta série.



(a) Conector T-Perfobond

(b) Conector T.

Figura 3.75 – Influência das armaduras nos conectores da quarta série.

Nos resultados obtidos dos ensaios com os conectores T-Perfobond na posição invertida, Figura 3.75a, observou-se um ganho de 11% na resistência característica do conector, P_{rk} , e um aumento em torno de 65% na capacidade de deslizamento, δ_u , ao substituir as armaduras de 10mm pela de 12,5mm de diâmetro.

Nos conectores tipo T, a substituição das armaduras de 10 por 12,5mm não representaram um ganho nem na carga característica e nem na capacidade de deslizamento, Figura 3.75b. Na carga característica houve uma pequena perda de 3%, enquanto que na capacidade de deslizamento foi de 30%.

Os valores obtidos desses ensaios são apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Resultados da quarta série

Protótipo	Idade dias	$q_{u, test}$ kN	P_{rk} kN	δ_u mm	δ_{uk} mm
TP-2F-AR-120-A-IN-10	19	585,30	526,77	2,54	2,29
TP-2F-AR-120-B-IN-12	19	649,10	584,19	4,19	3,77
T-2F-AR-120-A-10	31	606,28	545,65	20,00	18,00
T-2F-AR-120-B-12	31	585,13	526,61	14,00	12,60

3.3.3.4.3. Mecanismos de colapso

Na quarta série de ensaio, os modos de ruínas ocorreram da mesma forma nas séries anteriores. A Figura 3.76 apresenta a configuração dos protótipos após os ensaios.



(a) TP-2F-AR-120-B-IN-12

(b) T-2F-AR-120-A-10

Figura 3.76 – Configuração dos protótipos após ensaios, quarta série.

3.3.3.4.4. Conclusões

Na quarta série de ensaio, variando as armaduras dos protótipos com conectores T-Perfobond, instalados com a alma do conector a frente do esmagamento do concreto, de 10 para 12,5mm, observou-se um ganho tanto na capacidade de carga quanto na capacidade de deslizamento da ligação. Já o mesmo não ocorreu nos protótipos com conector T, onde houve pequenas diferenças, porém não tão significativas. Destes resultados conclui-se que nos protótipos dos conectores T-perfobond invertido, a influência do diâmetros das armaduras ocorreu de forma mais significativas, enquanto que nos conectores T, não houve grandes mudanças.

3.3.3.5. Comparação entre as séries iniciais

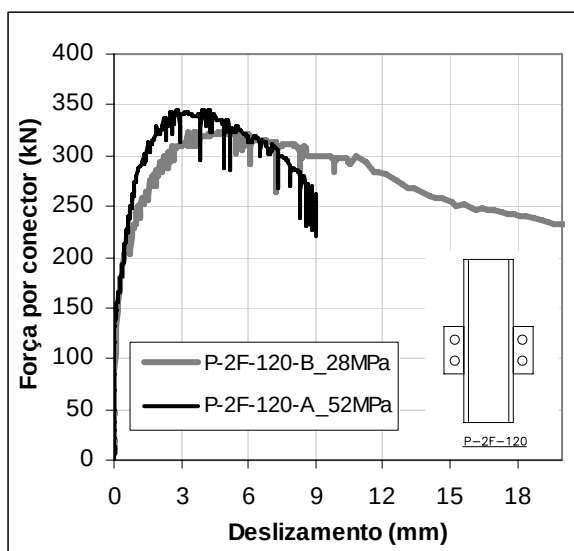
3.3.3.5.1. Influência do concreto

A fim de se verificar a influência da resistência do concreto nos conectores Perfobond, comparou-se os resultados entre a primeira e segunda série. Na

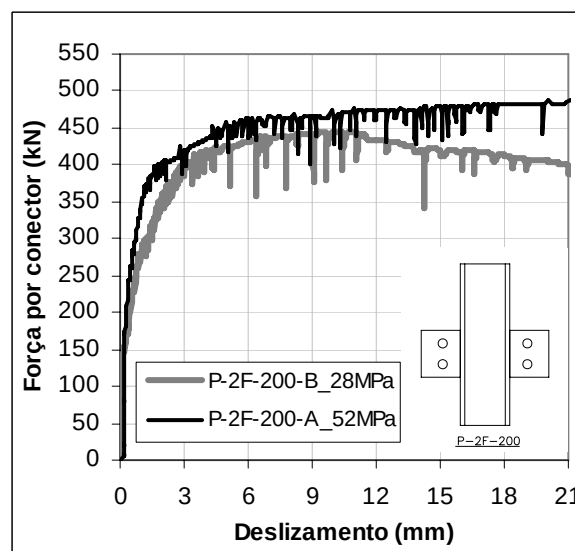
primeira série, a resistência média do concreto foi de 28MPa, e na segunda série foi de 52MPa, o que significa um aumento de 86%.

A Figura 3.77 apresenta os resultados dos ensaios com dois furos para laje de 120 e 200mm. O ganho obtido para laje de 120mm em termos de resistência característica, foi de 6%, enquanto que na laje de 200mm foi de 13%.

A Figura 3.78 apresenta os resultados dos Perfobond com quatro furos para laje de 200mm. O aumento da resistência do concreto, proporcionou um ganho de 6% na capacidade característica e uma melhora na ductilidade da ligação.



(a) Laje 120mm



(b) Laje de 200mm

Figura 3.77 – Influência do concreto nos Perfobond com dois furos

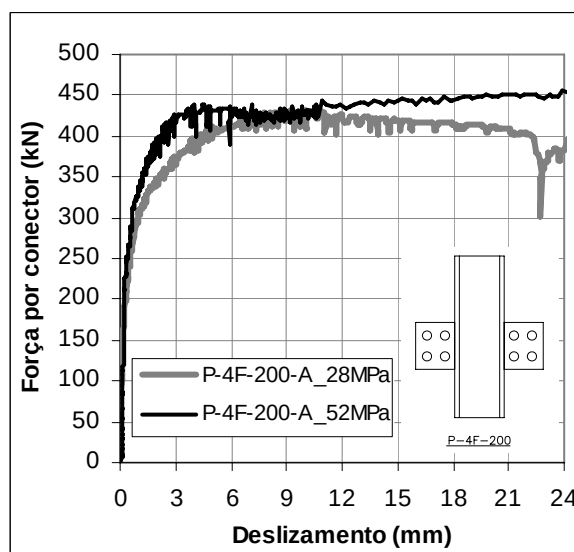


Figura 3.78 – Influência do concreto nos Perfobond com quatro furos

A Tabela 3.10 apresenta o resumo da comparação destes resultados.

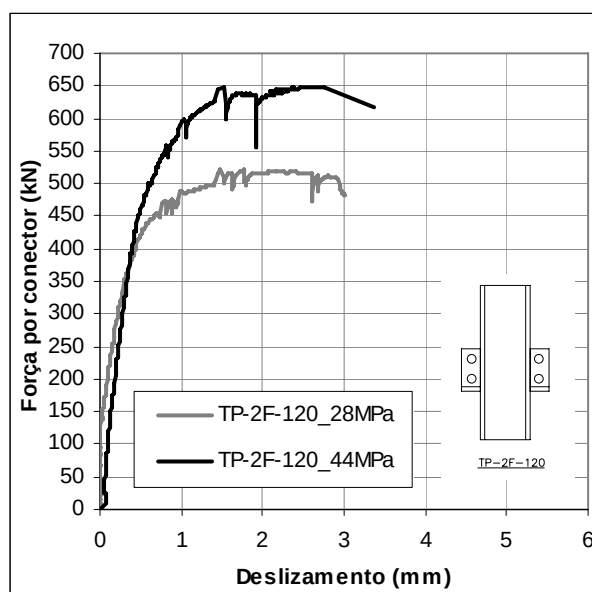
Tabela 3.10 – Influência do concreto nos conectores Perfobond

Protótipo	fck MPa	qu,test kN	Prk kN	δ_u mm	δ_{uk} mm
P_2F_120_B	28	324,10	291,69	11,22	10,10
P_2F_200_B		444,03	399,62	22,00	19,80
P_4F_200_A		431,85	388,67	22,88	20,59
P-2F-120-A	52	344,85	310,37	6,57	5,91
P-2F-200-A		503,43	453,09	35,00	31,50
P-4F-200-A		458,93	413,04	35,00	31,50

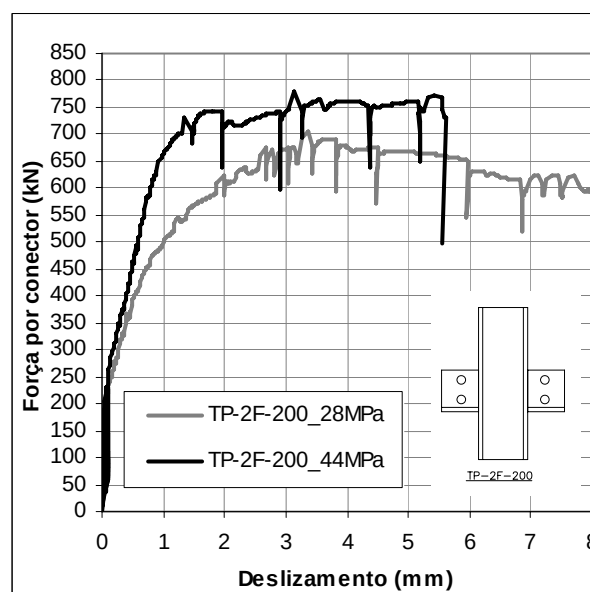
Para verificar a influência da resistência do concreto nos conectores *T-Perfobond*, comparou-se os resultados entre a primeira e terceira série, com resistência média do concreto de 28MPa e 44MPa, respectivamente, representando um aumento de 57%.

A Figura 3.79 apresenta os resultados dos ensaios com dois furos para laje de 120 e 200mm. O ganho obtido para laje de 120mm em termos de resistência característica, foi de 14%, enquanto que na laje de 200mm foi de 10%.

A Figura 3.80 apresenta os resultados dos Perfobond com quatro furos para laje de 200mm. O aumento da resistência do concreto, proporcionou um ganho de 6% na capacidade característica e uma melhora na ductilidade da ligação.



(a) Laje 120mm



(b) Laje de 200mm

Figura 3.79 – Influência do concreto nos T-Perfobond com dois furos

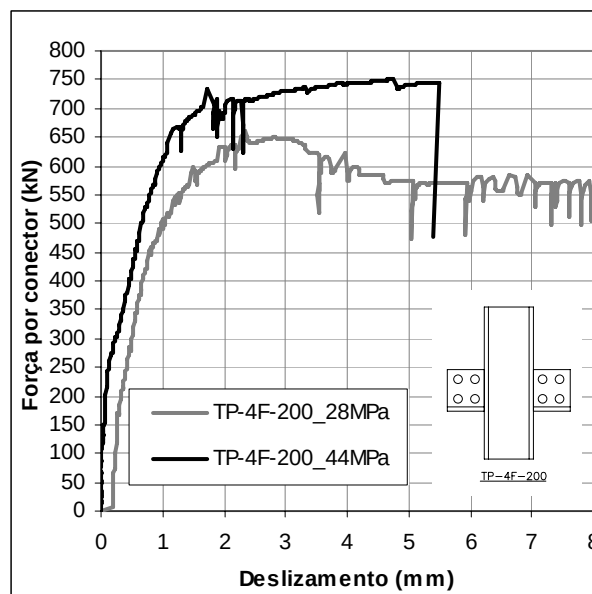


Figura 3.80 – Influência do concreto nos T-Perfobond com quatro furos

Observou-se que a resistência do concreto teve mais influência nos conectores T-Perfobond, apresentando ganhos maiores em termos de capacidade de carga e ductilidade.

3.3.3.5.2.

Influência do tipo de conector: Perfobond versus T-Perfobond

Das geometrias avaliadas, comparou-se os resultados entre os conectores *Perfobond* (segunda série) e *T-Perfobond* (terceira série) que possuíam as mesmas características nos ensaios, sendo diferente apenas a resistência do concreto à compressão. Essa diferença foi minorada pela normalização proposta por Oguejiofor & Hosain (1994), equação (3.1), possibilitando assim aferir a contribuição efetiva dos tipos de conectores.

$$P_{rkNormaliz} = P_{rk} \cdot \sqrt{\frac{f_{ckmedio}}{f_{ck}}} \quad (3.1)$$

onde:

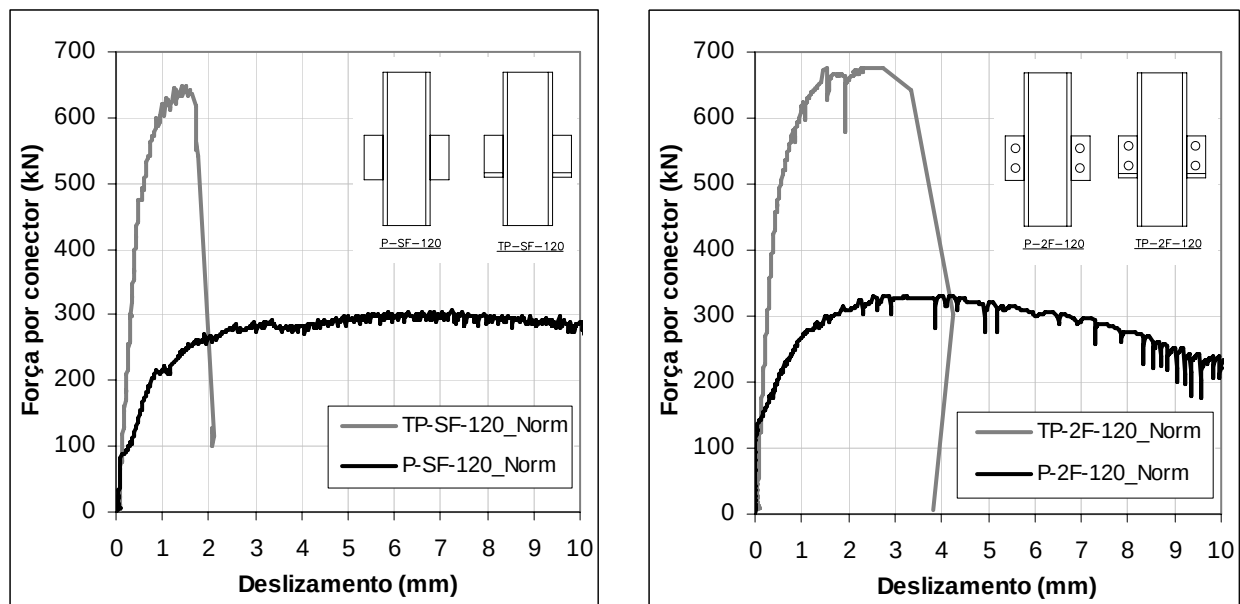
$P_{rkNormaliz}$ é a resistência característica ao cisalhamento normalizada do conector (kN);

$f_{ckmedio}$ é o valor médio da resistência característica do concreto à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa);

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa);

O $f_{ckmedio}$ calculado entre a segunda e terceira série foi de 47,9MPa.

Os gráficos a seguir apresentam as curvas força normalizada *versus* deslizamento dos ensaios dos conectores Perfobond e T-Perfobond.



(a) Conectores sem furos

(b) Conectores com dois furos

Figura 3.81 – Perfobond *versus* T-Perfobond – laje de 120mm

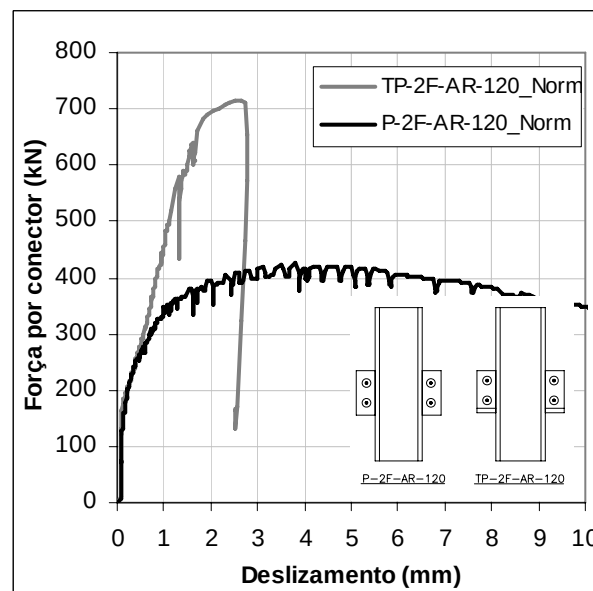
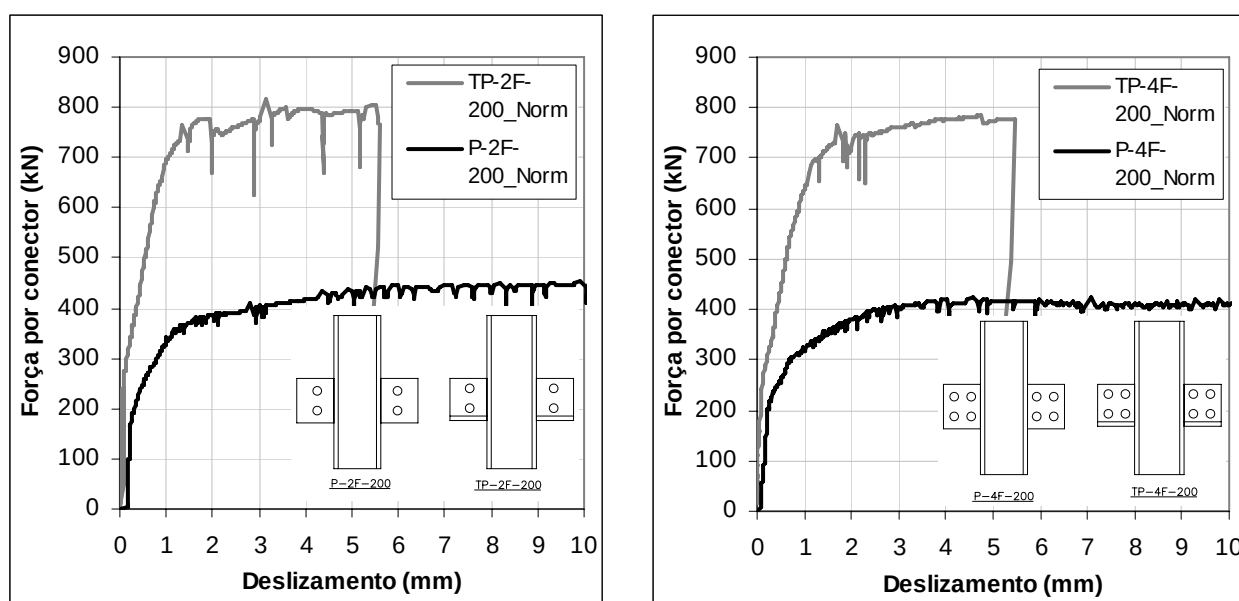


Figura 3.82 – Perfobond *versus* T-Perfobond- Conectores com armadura nos dois furos

Conforme observou-se no gráfico da Figura 3.81, ao se comparar o conector Perfobond com o T-Perfobond nos casos: sem furos e com dois furos, o

ganho na resistência característica foi de 112% e 104% respectivamente. Ao se acrescentar as armaduras nestes conectores, Figura 3.82, o ganho passou a ser de 68%.

A Figura 3.83 apresenta a comparação dos conectores para laje de 200mm, com dois e quatro furos. O aumento na resistência característica nestes casos foi de 69% e 78% respectivamente.



(a) Conectores com dois furos

(b) Conectores com quatro furos

Figura 3.83 – Perfbond *versus* T-Perfbond – laje de 200mm

A Tabela 3.11 apresenta os resultados dos ensaios comparados e as respectivas resistências normalizadas.

Tabela 3.11 – Perfbond *versus* T-Perfbond

Protótipo	fck MPa	qu,test kN	Prk kN	PrkNorm kN	δ_u mm	δ_{uk} mm
P-SF-120-A		319,28	287,35	276,06	11,00	9,90
P-2F-120-A		344,85	310,37	298,17	6,57	5,91
P-2F-AR-120-A	51,9	443,03	398,73	383,05	7,67	6,90
P-2F-200-A		503,43	453,09	435,28	35,00	31,50
P-4F-200-A		458,93	413,04	396,80	35,00	31,50
TP_SF_120_A		621,95	559,76	584,70	1,70	1,53
TP_2F_120_B		647,90	583,11	609,10	3,40	3,06
TP_2F_AR_120_A	43,9	683,38	615,04	642,45	2,76	2,48
TP_2F_200_A		780,35	702,32	733,61	5,18	4,66
TP_4F_200_A		750,28	675,25	705,34	5,38	4,84

Verificou-se que, em termos de resistência, os conectores *T-Perfobond* foram significativamente superiores aos conectores *Perfobond*, apresentando resultados satisfatórios. No entanto, estes não satisfizeram o critério de ductilidade exigido pelo EUROCODE 4 (2005) correspondente a um deslizamento característico mínimo de 6 mm obtido em ensaios de *push-out*, para se proceder a uma distribuição plástica do esforço de cisalhamento entre conectores.

3.3.3.5.3.

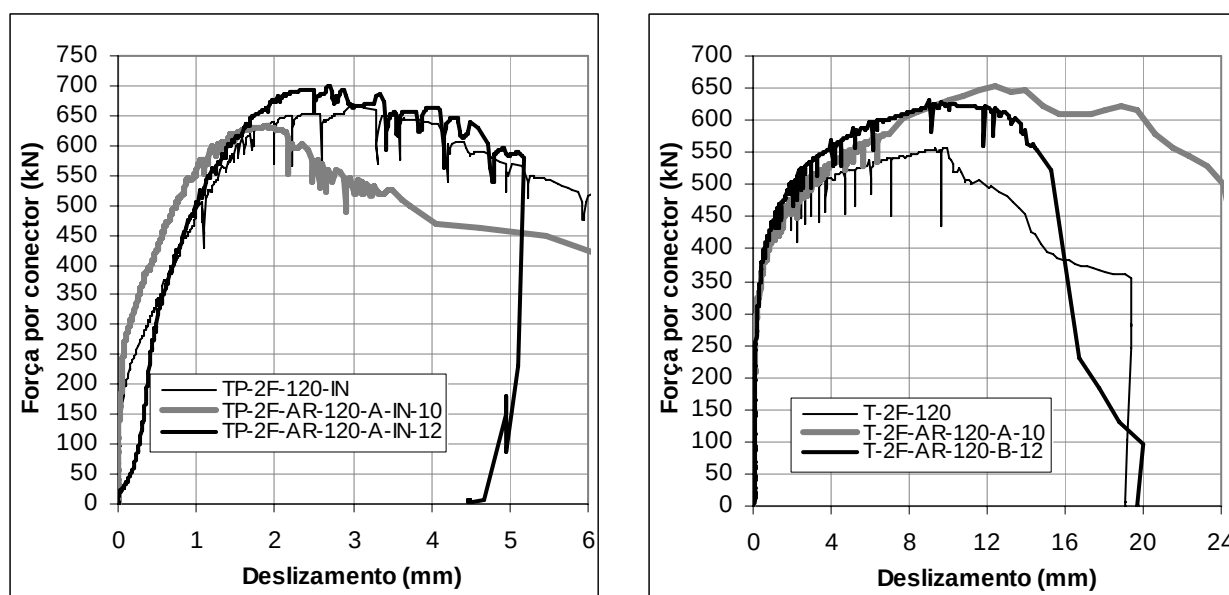
Influência das armaduras no conector T-Perfobond

Das geometrias avaliadas do conector T-Perfobond, constatou-se que os conectores que apresentaram melhor comportamento quanto a ductilidade, foram os conectores T-Perfobond invertidos, e o conector T, reavaliados na quarta série com presença de armaduras nos furos. A fim de se constatar a influência das armaduras nesses conectores, comparou-se os resultados dos ensaios com o TP-2F-120-IN e do T-2F-120, da terceira série de ensaios, com a quarta série, Figura 3.84.

Na terceira série a resistência do concreto à compressão foi de 43,9MPa, enquanto que na quarta série foi de 33MPa. Portanto, para que os resultados fossem melhor avaliados e comparados, e a fim de se eliminarem as possíveis diferenças geradas pelas diferentes resistências do concreto à compressão, as cargas características obtidas dos ensaios foram também normalizadas através da equação (3.1), Oguejiofor & Hosain (1994).

O $f_{ckmedio}$ calculado entre a terceira e quarta série foi de 38,4MPa.

Da Figura 3.84a, concluiu-se que ao se utilizar armaduras de 12mm de diâmetro, o ganho na resistência característica foi de 5%, enquanto que ao se utilizar a armadura de 10mm, houve uma perda de 6%. Já no caso do conector T, Figura 3.84b, ao se utilizar armaduras de 10 e 12mm, o ganho na resistência característica foi de 17 e 13% respectivamente.



(a) Conector T-Perfobond

(b) Conector T

Figura 3.84 – Influência das armaduras nos conectores T-Perfobond e T.

A Tabela 3.12 apresenta os resultados dos ensaios comparados e as respectivas resistências normalizadas. Notou-se um ganho na capacidade de deslizamento nos conectores T ao se utilizar armaduras nos furos.

Tabela 3.12 – Influência das armaduras nos conectores T e T-Perfobond

Protótipo	fck MPa	qu,test kN	Prk kN	PrkNorm kN	δ_u mm	δ_{uk} mm
TP-2F-120-IN-B	43,9	714,68	643,21	601,96	4,20	3,78
T-2F-120-B		596,43	536,78	502,36	11,63	10,47
TP-2F-AR-120-A-IN-10		585,30	526,77	568,61	2,54	2,29
TP-2F-AR-120-B-IN-12	33	649,10	584,19	630,59	4,19	3,77
T-2F-AR-120-A-10		606,28	545,65	588,98	20,00	18,00
T-2F-AR-120-B-12		585,13	526,61	568,44	14,00	12,60

3.3.4.

Conclusões Gerais - Primeira Etapa

Na primeira etapa, os ensaios do tipo *push-out* foram realizados para avaliar o comportamento dos conectores *Perfobond* e *T-Perfobond* avaliando os seguintes parâmetros: número dos furos e do espaçamento entre eles; altura do conector; armaduras; resistência à compressão do concreto; ductilidade da ligação; modo de ruína.

A escolha da geometria do conector foi feita em função de estudos realizados por outros autores, que mostraram que conectores com comprimentos menores, além de atenderem uma destacável capacidade de carga e de

deslizamento, mostraram-se econômicos. A espessura adotada do conector, de 12mm, foi igual a utilizada por diversos autores.

3.3.4.1.

Influência da espessura da chapa do conector

Diversos autores testaram o conector *Perfobond* com espessuras variadas.

Ushijima et al. (2001), a fim de avaliar especificamente a influência da espessura da chapa, variaram a espessura de 8 a 22mm, em corpos de prova sem armadura passante. Primeiro, o concreto nos furos do conector com 8mm de espessura, foi pulverizado na região de contato com a chapa. Entretanto, nos modelos com espessuras maiores, observou-se que o concreto rompeu por cisalhamento em dois planos de corte, em ambos os lados da chapa.

As diferenças no modo de ruptura do concreto relacionado com a espessura da chapa do conector são apresentadas na Figura 3.85.

Chapas na faixa de 8 mm, espessura menor, fazem com que a área à compressão seja muito pequena, de forma que a força se concentra numa porção menor do concreto, surgindo tensões transversais de tração de magnitude considerável. Ushijima et al. (2001) sugere que esta concentração de força é que origina a fissura de separação no plano do furo que resulta na ruptura do concreto por tração. Por outro lado, quando a espessura é maior, a região sob compressão também é maior, permitindo que as forças se distribuam melhor no concreto confinado. Assim, o concreto atinge seu limite de resistência ao cisalhamento nos dois planos de corte coincidentes com as faces laterais da chapa, conforme representado na Figura 3.85b, levando à ruptura por cisalhamento.

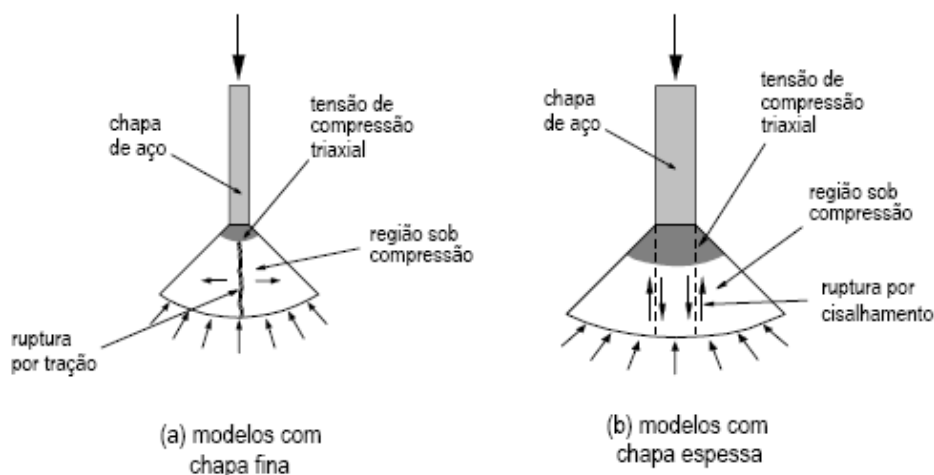


Figura 3.85 – Condições de ruptura do concreto em função da espessura, Veríssimo (2007).

3.3.4.2.**Influência do número de furos e do espaçamento entre eles**

Em função dos resultados obtidos neste trabalho sobre a influência da quantidade de furos, constatou-se que nem sempre aumentando o número deste, há um ganho na resistência do conector. Como diversos autores já haviam verificado, o número de furos no conector só influi positivamente na resistência última somente se o espaçamento entre furos adjacentes não for muito pequeno. Conforme observado por Oguejiofor & Housain (1994), quando as perfurações são muito próximas, a fissuração no entorno de um furo influencia no efeito de pino dos furos adjacentes. Portanto, a resistência ao cisalhamento do conector cresce com o aumento do número de furos, desde que o espaçamento entre furos seja pelo menos 2,25 vezes o diâmetro dos furos.

3.3.4.3.**Importância da altura do conector**

Neste trabalho, foram estudados conectores com 76,2mm e 150mm de altura. Os conectores com 76,2mm foram utilizados nas lajes de 120mm, enquanto que os de 150mm nas lajes de 200mm. As alturas dos conectores foram estabelecidas em função das lajes a serem estudadas, como já foi explicitado anteriormente.

Porém vale ressaltar a importância da altura do conector, conforme observado nos ensaios realizados por Veldanda & Housain (1992) e Oguejiofor & Housain (1994). Constatou-se que quando um Perfobond com pouca altura é utilizado numa laje com mísula sobre o perfil metálico, ou ainda dentro da nervura de uma forma metálica, pode ocorrer o colapso por cisalhamento num plano horizontal acima do conector. Devido à natureza deste tipo de colapso, os pinos de concreto tornam-se inefetivos. Os ensaios demonstraram que nesta situação as barras de armadura colocadas por dentro dos furos do conector não proporcionam aumento de resistência.

3.3.4.4.**Influência das armaduras**

O comportamento carga-deformação do concreto, tanto sob compressão quanto sob tração, está intimamente relacionado à formação e à propagação de fissuras. Normalmente, as fissuras no concreto são induzidas por tensões de tração que se desenvolvem devido a cargas aplicadas ou como resultado de

uma restrição à variação de volume. Sob este aspecto, a armadura tem um papel fundamental, na medida em que ela atua no sentido de evitar ou controlar a formação e a propagação de fissuras.

Na prática comum de projeto, assume-se que a resistência de um conector de cisalhamento não é afetada pela presença de fissuras longitudinais no concreto, contanto que haja armadura transversal suficiente para transmitir as forças de cisalhamento através das fissuras. Estudos demonstram que o concreto fissurado é capaz de resistir a esforços e que a magnitude desta resistência é inversamente proporcional à largura das fissuras. A resistência ao cisalhamento pós-fissuração do concreto é atribuída a pontos de ligação entre as superfícies fissuradas, formados por agregados e cristais fibrosos. Depreende-se daí que, quanto melhor a eficácia da armadura, no sentido de controlar a abertura de fissuras, melhor será o desempenho do concreto.

Assim, como em todos os ensaios *push-out* com *Perfobond* realizados neste trabalho e realizados por Oguejiofor & Housain (1994), o colapso ocorreu na laje de concreto e se iniciou pela ruptura longitudinal da laje. Os resultados destes ensaios evidenciaram uma importante influência da armadura transversal das lajes no desempenho da conexão, tanto no tocante à resistência quanto à ductilidade. Os modelos com laje armada suportam forças muito superiores a seus similares sem armadura, além de, na fase pós-pico, apresentar significativa capacidade de retenção de carga e boa ductilidade. Invariavelmente, os resultados de ensaios apresentados por diversos autores sempre confirmam a influência positiva da armadura na conexão com *Perfobond*.

A quantidade de barras transversais e a taxa de armadura também têm influência na capacidade da conexão.

Oguejiofor & Housain (1994) relatam que, nos ensaios com *Perfobond*, quando não há armadura transversal a ruptura da laje é súbita. Ocorre uma fissura longitudinal instantânea na laje, ao longo de todo o comprimento do bloco de concreto, e imediatamente o corpo de prova perde a capacidade de suportar qualquer força levando a laje se partir em dois pedaços.

3.3.4.5.

Influência da resistência à compressão do concreto

Os resultados de ensaios com os conectores *Perfobond*, obtidos por Oguejiofor & Housain (1994), evidenciaram a influência da resistência à compressão do concreto na capacidade da ligação.

Os resultados obtidos nesta etapa comprovaram o que os outros autores já haviam concluído. No entanto, nas séries com conectores *Perfobond* e *T-Perfobond*, a resistência à compressão do concreto foi mais significativa nos conectores tipo *T-Perfobond*.

3.3.4.6. Ductilidade da ligação

Observou-se que os ensaios com os conectores *Perfobond* apresentaram um comportamento dúctil, enquanto que nos ensaios com os *T-Perfobond*, a ductilidade da ligação não foi alcançada.

Em geral, a conexão com *Perfobond* apresenta um comportamento bastante rígido, apresentando muito pouco deslizamento durante uma boa parcela do carregamento máximo. Após a carga máxima, o processo de fissuração do concreto faz com que o deslizamento aumente rapidamente, caracterizando um comportamento muito dúctil no seu estado limite último. Não obstante, a conexão continua a resistir uma parcela considerável de carga mesmo para deslizamentos acentuados. No caso de conectores em chapa, como o *Perfobond* e o *Crestbond* (Veríssimo, 2007), é interessante observar que a ductilidade da conexão está associada ao sistema conector, armadura e concreto, e não apenas ao conector isolado. A geometria do conector tem influência direta no efeito de pino e na fissuração do concreto no entorno dos furos que conduz à mobilização da armadura. Ao mesmo tempo, o efeito de pino e a própria fissuração da laje dependem da resistência do concreto. Além disso, a taxa de armadura e a presença de barras transversais dentro e no entorno do conector influenciam na capacidade última e na ductilidade da conexão.

3.3.4.7. Modo de ruptura

As ligações com conectores *Perfobond* ou *T-Perfobond* podem sofrer colapso de duas formas distintas: ou a ruptura se dá pelo concreto, deixando o conector relativamente intacto, ou rompe o próprio conector. No primeiro caso, a resistência ao cisalhamento da conexão irá depender das propriedades do concreto, da geometria da laje e de como a força de compressão transmitida pelo conector irá se distribuir pela laje. No segundo caso, a resistência dependerá das propriedades do material do conector, sua geometria, tamanho e forma. Em ambos os casos o mecanismo de falha é influenciado pela resistência

e pela rigidez relativas entre o concreto e o conector, associadas ao grau de confinamento do concreto na vizinhança do contato frontal entre a laje e o conector (Oguejiofor & Housain, 1994). O ideal é que a capacidade do conector e a do concreto sejam esgotadas mais ou menos ao mesmo tempo (Oehlers & Park, 1992).

Houve uma similaridade muito grande entre os modos de falha observados nos ensaios *push-out* com conector *Perfobond* realizados por diversos autores com os resultados obtidos neste trabalho, quando o colapso ocorreu pelo concreto. À medida em que o carregamento foi aplicado, iniciou-se a formação de uma fissura longitudinal na laje, ao longo da linha do conector, seguida do esmagamento do concreto à frente do conector. Este mesmo mecanismo de colapso ocorreu para os conectores *T-Perfobond*.

Diversos estudos revelaram que as tensões de tração que se desenvolvem no concreto na borda carregada do conector tendem a separar a laje em duas partes (Oguejiofor & Housain, 1994; Medberry & Shahrooz, 2002). Devido à existência destas tensões de tração a armadura transversal ao conector exerce um papel fundamental, contendo o processo de fissuração do concreto e proporcionando a redistribuição dos esforços. Se não há armadura transversal, a ruptura ocorre abruptamente, de forma frágil, a partir desta fissura na laje de concreto no alinhamento do conector.

A ruptura da laje teve início em função da força concentrada de compressão longitudinal que o conector exerce sobre o concreto, na superfície de contato frontal do conector. Esta força produz tensões muito severas imediatamente à frente do conector, como mostrado na Figura 3.86. O concreto circunjacente promove o confinamento da região nas proximidades do conector, impedindo-a de se expandir por efeito de Poisson, fazendo com que se desenvolvam tensões de compressão também na direção transversal. De acordo com Oehlers (1989), desenvolvem-se trajetórias de tensão de compressão na zona à frente do conector, para distribuir a carga concentrada numa área maior da laje. À medida que a força de compressão longitudinal se espraia pelo concreto da laje, as tensões de compressão transversais mencionadas anteriormente diminuem gradualmente, até que invertem de sinal e tornam-se em tensões transversais de tração (σ_t), pouco à frente da zona de contato, Figura 3.86b. Estas tensões de tração transversais crescem com o carregamento, até que a laje fissura na direção longitudinal, no alinhamento do conector. Embora a fissuração da laje alivie as tensões de tração, o atrito interno devido a ação do agregado e da armadura transversal continuam a proporcionar

resistência ao cisalhamento entre a viga de aço e a laje de concreto (Oguejiofor & Housain, 1994).

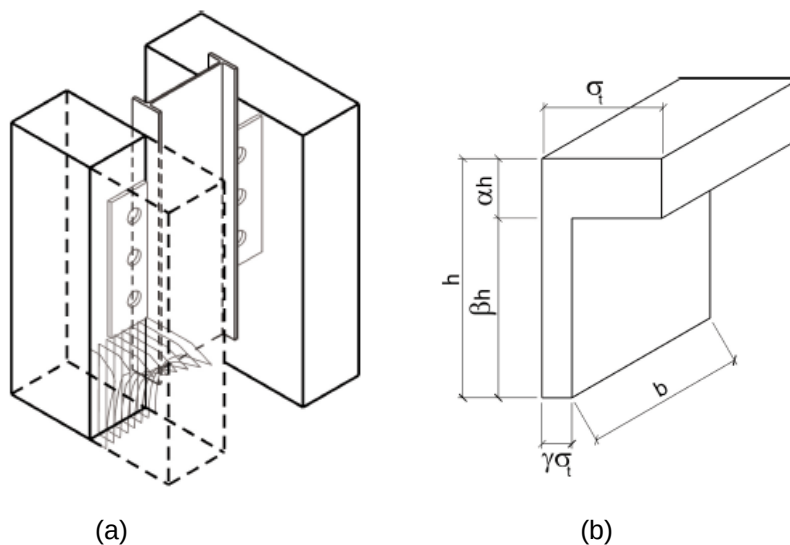


Figura 3.86– (a) Distribuição da tensão de tração abaixo do conector. (b) Bloco de tensão idealizado, Medberry & Shahrooz (2002)

Todo processo descrito anteriormente, foi observado nos ensaios. Os modelos continuaram a suportar acréscimo de carga até que a fissura longitudinal se desenvolvesse por todo o comprimento da laje. Eventualmente, ocorreu o esmagamento do concreto na zona à frente do conector e o modelo começou a descarregar.

O colapso relacionado ao concreto é visto, portanto, como um fenômeno progressivo, que tem início com a ruptura da laje e culmina com um eventual esmagamento do concreto na vizinhança do conector. A resistência última da conexão é influenciada pelo grau de confinamento do concreto na região de contato entre o conector e a laje, pela ação de alguma armadura que atravessasse o plano de cisalhamento transversalmente, pela resistência ao deslizamento decorrente da ação do agregado ao longo da superfície de falha da laje e, ainda, pela resistência ao cisalhamento dos pinos de concreto no interior dos furos do conector.

Nos conectores com furos, observou-se também a falha por esmagamento do concreto no interior destes, acompanhada de cisalhamento em dois planos de corte coincidentes com as superfícies laterais do conector. O concreto no interior dos furos simulou a existência de um pino sujeito tanto ao cisalhamento como à intensa compressão local. Um estudo desse fenômeno foi apresentado por Kraus & Wurzer (1997).

Em modelos desmontados e analisados após a ruptura, foram observadas cunhas de concreto completamente esmagadas próximas à superfície de contato com a parede dos furos do conector. O esforço atuante na ligação foi transferido da chapa de aço para o concreto por meio de uma força de compressão extremamente intensa, numa área restrita, que atuou na superfície de contato dos furos. A área onde a força se distribuiu no pino de concreto pode ser separada em duas partes principais, chamadas zona A e zona B, Figura 3.87.

Segundo Kraus & Wurzer (1997), na zona A o concreto é confinado, ficando submetido à compressão triaxial. Nesta região, a capacidade do concreto de suportar esforço e deformação depende principalmente da estrutura porosa da argamassa de cimento. Acima da carga crítica, o concreto sofre poro-colapso, na medida em que ocorre o esmagamento das paredes dos poros na 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, responsáveis pela formação de fissuras no concreto, paralelas à força de cisalhamento Figura 3.87.

Um estado limite último é atingido quando os poros na zona A são completamente preenchidos com o material resultante do esmagamento do concreto, impossibilitando qualquer redução de volume a partir de um determinado ponto. O material pulverizado causa um estado de pressão quase-hidrostático no concreto confinado, que pode conduzir à separação da laje em duas metades e finalmente ao escorregamento de cunhas do concreto nas regiões próximas aos pinos.

Resultados de ensaios obtidos por esses autores demonstraram que existe uma relação praticamente linear entre a resistência à compressão do concreto e a resistência ao cisalhamento dos pinos (Kraus & Wurzer, 1997). Observaram-se também que a armadura transversal, o diâmetro dos furos e a espessura da chapa do conector influenciaram na resistência última da conexão. Quanto maiores os furos, a ruptura do concreto por compressão na região de contato com a parede de furo ocorreu sob tensões um pouco menores, embora a capacidade última aumentasse. À medida que a dimensão dos furos aumentou, sua forma deixou de ter influência relevante no comportamento.

Também foi observado que quanto maior o diâmetro dos pinos, maior foi a ductilidade das conexões com conectores perfurados, (Kraus & Wurzer, 1997).

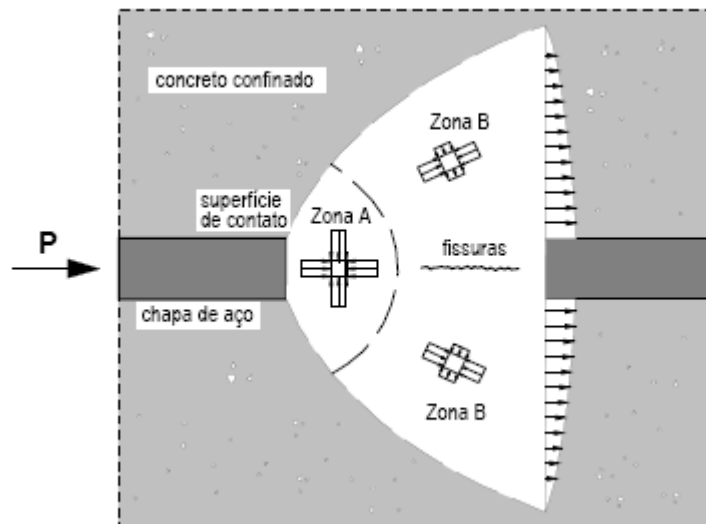


Figura 3.87 – Carregamento num pino de concreto, Kraus & Wurzer (1997)

3.4. Segunda etapa

3.4.1. Conectores de cisalhamento

Os conectores *T-Perfobond*, avaliados nesta etapa, foram produzidos a partir de um perfil HP200x53, equivalente ao perfil americano HP8x36 (pol.xlb/ft), e ao perfil soldado CS200x51 ou CS200x61, Metálica (2009). Esta nova proposta para a geometria do conector, surgiu da ideia de se avaliar um conector com alma e mesa com espessuras iguais, já que o perfil IPN 340 possuía uma mesa mais espessa que a alma, e se apresentou um comportamento rígido nos ensaios. Afim de se buscar um conector com características mais dúcteis, partiu-se para o estudo desta nova geometria. Em função dos resultados obtidos na primeira etapa, na qual os conectores *T-Perfobond* na posição invertida terem apresentado resultados mais satisfatórios, esta posição foi mantida. Vale mencionar novamente que a posição invertida está relacionada com a primeira parte do conector a receber a carga, sendo esta composta pela parte da alma.

A Figura 3.88 apresenta o conector *T-Perfobond* adotado nesta etapa.

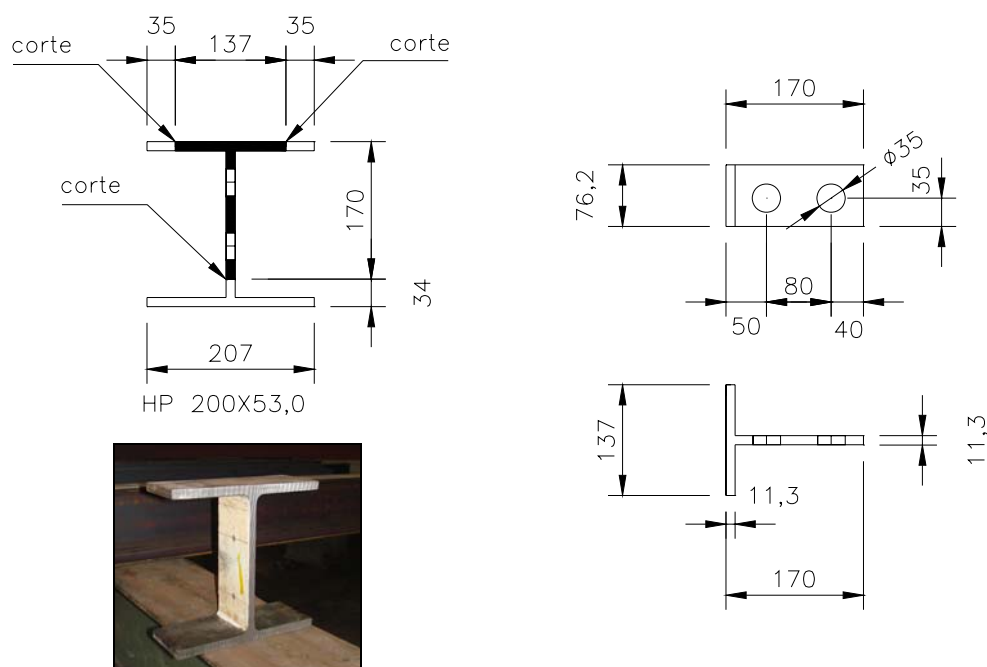


Figura 3.88 - Configurações dos conectores T-Perfobond, segunda etapa

A segunda etapa, foi composta por oito ensaios de conectores tipo *T-Perfobond* na posição invertida, variando o diâmetro das armaduras externas e internas ao furo do conector. Na nomenclatura dos conectores, o primeiro número indica o diâmetro da armadura externa, e o segundo, o diâmetro das armaduras passantes nos furos.

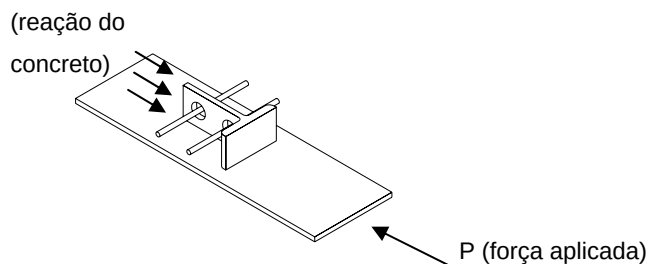


Figura 3.89 – T-Perfobond invertido, segunda etapa

A Tabela 3.13 apresenta os ensaios realizados nesta etapa que foram divididos em duas séries.

Tabela 3.13 – Ensaios Push-out, segunda etapa

Série	Tipo	Nomenclatura	f_c (MPa)	Armadura nos furos		Total
				presença	ϕ (mm)	
5	T-Perfobond Invertido	TP-2F-AR-IN-10-12-A/B	25,7	sim	12	6
		TP-2F-AR-IN-10-16-A/B	29	sim	16	
		TP-2F-AR-IN-12-16-A/B	26	sim	16	
6	T-Perfobond Invertido	TP-2F-AR-IN-10-12-C/D	35,3	sim	12	2
TOTAL						8

3.4.1.1.

Quinta série

A quinta série foi composta por seis ensaios. Nesta série, nos três primeiros protótipos (TP-2F-AR-IN-10-12-A, TP-2F-AR-IN-10-12-B e TP-2F-AR-IN-10-16-A) foram utilizados neoprene de 15mm de espessura nas bases dos *push-out*.

3.4.1.2.

Sexta série

A sexta série foi composta por mais dois ensaios com conector *T-Perfobond*, repetindo os primeiros da quinta série, porém com resistência à

compressão do concreto diferente, e sem a presença do neoprene nas bases, para que se pudesse comparar e avaliar a variação do diâmetro das armaduras.

3.4.2.

Preparação do Ensaio tipo *Push-out*

Na quinta e sexta série, o perfil adotado tanto para compor o “I” vertical como para formar os conectores, foi o HP 200x53 da Açominas, ASTM A 572 Grau 50. A fabricação dos protótipos foi realizada na Metalfenas Ltda, no Rio de Janeiro.

A Figura 3.90 apresenta o modelo do perfil com o conector *T-Perfobond* soldado na posição aqui denominada como invertida. A figura ilustra o perfil adotado nos ensaios na segunda etapa, e o filete de solda especificado.

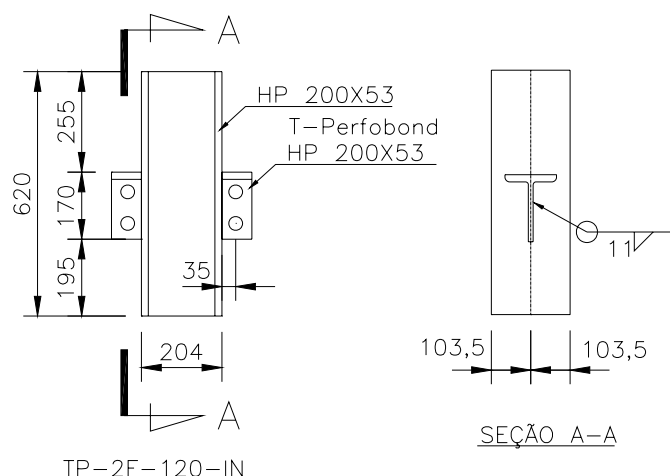


Figura 3.90 – Configuração do perfil com conector *T-Perfobond* - Brasil

A Figura 3.91 apresenta a configuração de dois modelos testados na quinta série e o detalhamento das armaduras. Os outros ensaios desta etapa adotaram a mesma configuração das dimensões, alterando apenas o diâmetro da armadura.

Todas as etapas para a montagem dos ensaios foram realizadas no LEM, PUC-Rio, exceto a fabricação dos perfis com os conectores e o corte e dobra das armaduras, que foram fornecidos pela Feraço Ltda.

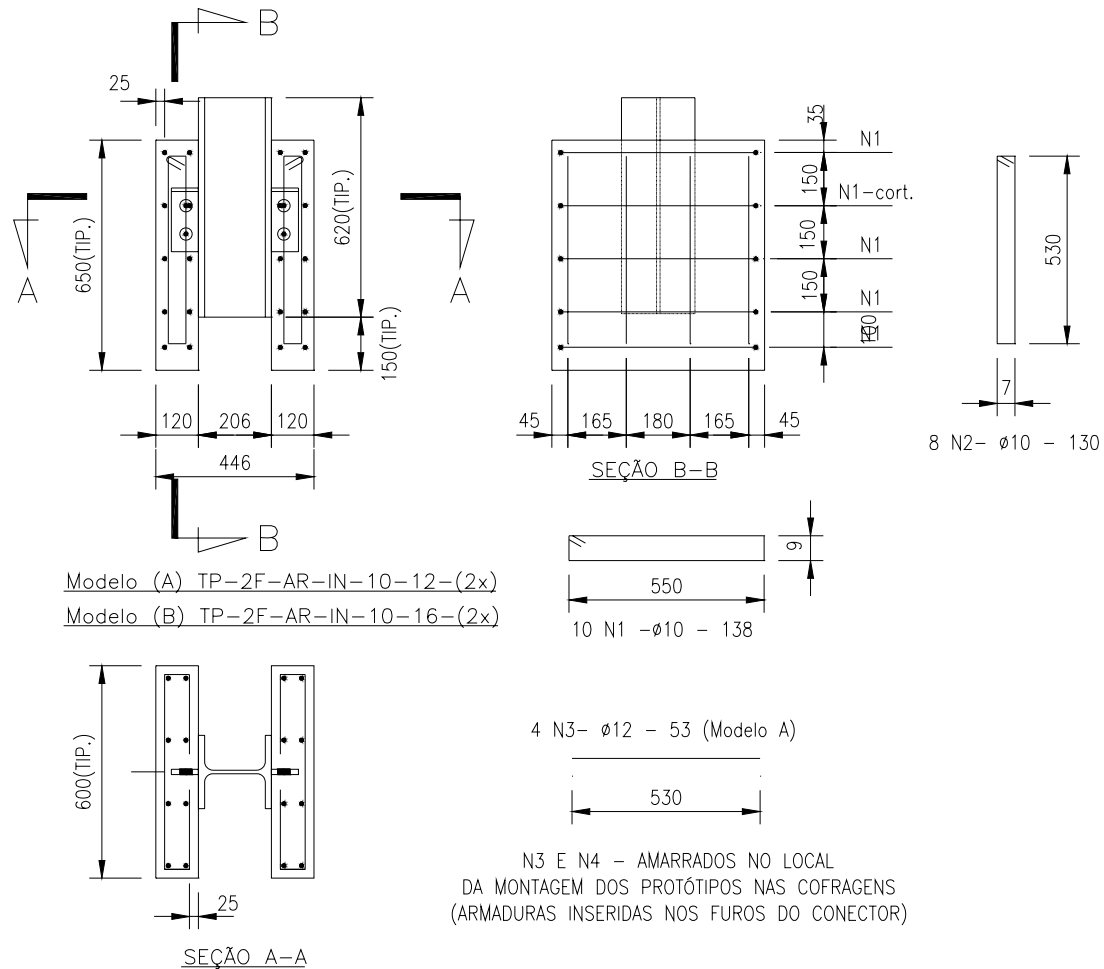


Figura 3.91 – Detalhamento da armadura e configuração do *push-out*, segunda etapa.

3.4.2.1. Forma e Armadura

Com os protótipos metálicos já preparados, foi possível montar as formas e inserir as armaduras no protótipo de forma alternada.

A sequência das atividades ocorreu da mesma maneira da primeira etapa:

- corte da chapa de compensado para forma e encaixe do perfil;
- posicionamento e fechamento em parte das formas;
- posicionamento das armaduras;
- e finalmente o fechamento frontal da forma, Figura 3.92.

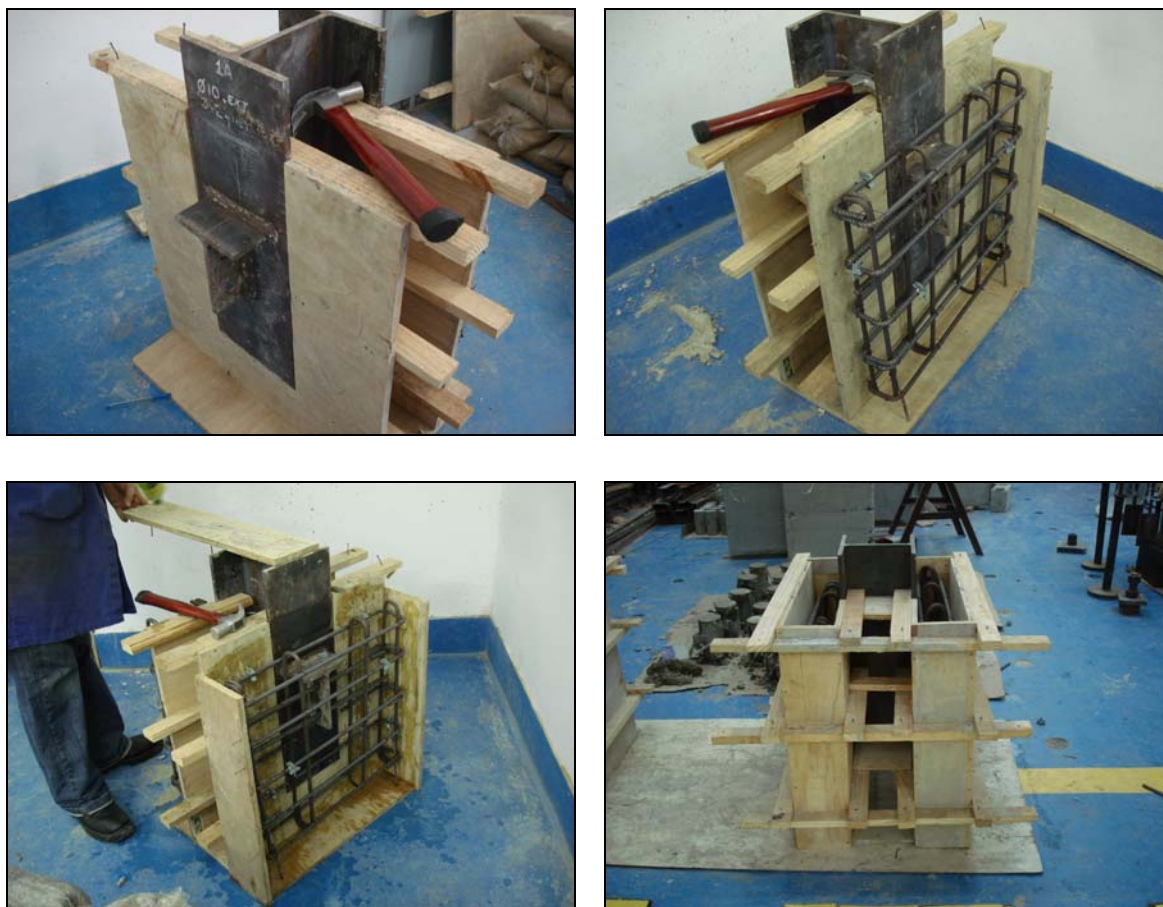


Figura 3.92 – Montagem das formas e armaduras no LEM, PUC-Rio.

As formas foram construídas com chapas de compensado virola de 15mm de espessura. Estas foram montadas de forma individual para que fossem desmontáveis e reaproveitáveis na outra série.

Nesta etapa, a armadura foi fornecida também já cortada e dobrada. A amarração da gaiola foi realizada com arame recozido. Utilizou-se armadura em aço CA-50 da Gerdau. Em todos os modelos, as lajes possuíam armaduras verticais e transversais variando-se o diâmetro obedecendo o espaçamento apresentado na Figura 3.91.

Novamente, para que os resultados não fossem afetados pela aderência química entre o perfil de aço e o concreto, toda a superfície de aço, exceto nos conectores, foi previamente tratada com óleo desmoldante, antes do posicionamento das armaduras.

3.4.2.2. Concreto

Nas quinta e sexta séries, como o volume de concreto era pequeno, optou-se em produzir o concreto no próprio laboratório LEM da PUC-Rio.

O traço adotado para a quinta série foi de 1:2,75:2,93 com fator água / cimento de 0,51. Na quinta série, composta por seis protótipos, foram realizadas três betonagens separadamente para concretar dois protótipos de modelos idênticos. Na sexta série foi realizada apenas uma betonagem, que foi suficiente para os dois protótipos.

A Figura 3.93 apresenta a sequência e o mecanismo utilizado no LEM da PUC-Rio para a fabricação dos protótipos da quinta e sexta fase.

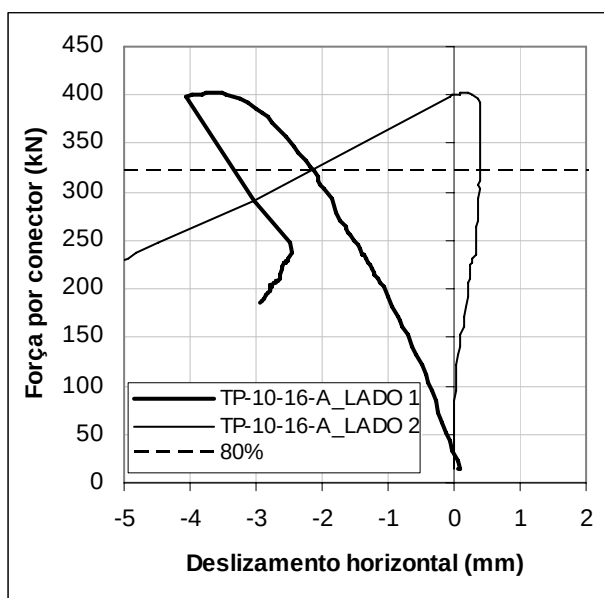


Figura 3.93 – Concretagem dos protótipos no LEM, PUC-Rio.

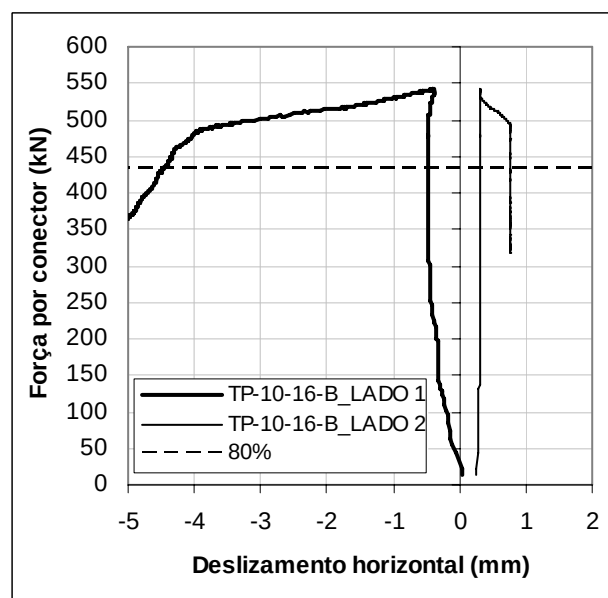
3.4.2.3. Montagem do Ensaio

Os protótipos tiveram suas fôrmas retiradas e foram mantidos no próprio laboratório, LEM, até que atingissem as idades onde previsivelmente a sua resistência estava estabilizada, a fim de eliminar a resistência do concreto como variável do problema.

Na quinta série nos três primeiros ensaios (TP-2F-AR-IN-10-12-A, TP-2F-AR-IN-10-12-B e TP-2F-AR-IN-10-16-A) foram utilizados neoprene nas bases dos *push-out* com espessura de 15mm. Obtidas as curvas força *versus* deslizamento horizontal, notou-se uma separação horizontal superior a esperada. No ensaio TP-2F-AR-IN-10-16-B, o neoprene foi retirado, e comparando as curvas obtidas deste ensaio, com o ensaio TP-2F-AR-IN-10-16-A, comprovou-se a alteração do comportamento do ensaio com o neoprene de 15mm, sendo este então retirado nos ensaios seguintes. A Figura 3.94 apresenta a diferença do comportamento dos ensaios com e sem o neoprene. No ensaio TP-2F-AR-IN-10-16-A, ao atingir 80% da carga máxima, a primeira laje (lado 1) apresentou uma separação horizontal de 2mm, enquanto que na segunda laje (lado 2) foi de 0,3mm, havendo um escorregamento/tombamento do protótipo, Figura 3.94a. No ensaio TP-2F-AR-IN-10-16-B, sem neoprene, a separação não passou 0,5mm nas duas lajes, Figura 3.94b. A Figura 3.95 apresenta a configuração dos ensaios TP-2F-AR-IN-10-16-A e TP-2F-AR-IN-10-16-B.

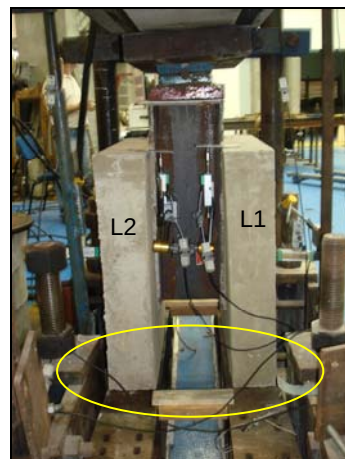
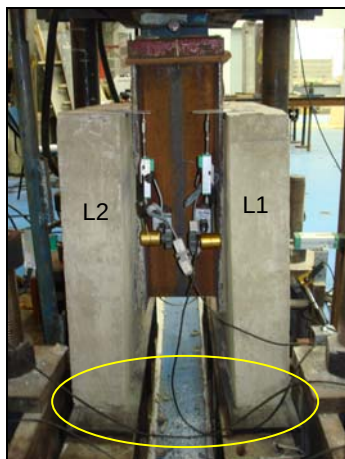


(a) TP-2F-AR-IN-10-16-A – com neoprene



(b) TP-2F-AR-IN-10-16-B – sem neoprene

Figura 3.94 – Separação horizontal



(a) TP-2F-AR-IN-10-16-A – com neoprene (b) TP-2F-AR-IN-10-16-B – sem neoprene

Figura 3.95 – Configuração dos ensaios com e sem neoprene.

Nos ensaios realizados no LEM da PUC-Rio, o sistema do ensaio foi adaptado ao pórtico existente. Este pórtico possuía dois atuadores hidráulicos com capacidade de 1000kN cada um. Foi necessário utilizar uma viga de transição de carga, para que o carregamento do ensaio atuasse centrado em um só ponto, atendendo assim a especificação dos ensaios de *push-out* segundo EUROCODE 4 (2005), Figura 3.96. Para garantir que o carregamento fosse pontual, utilizou-se uma rótula entre a viga de transição e o perfil “I” do *push-out*, Figura 3.97.

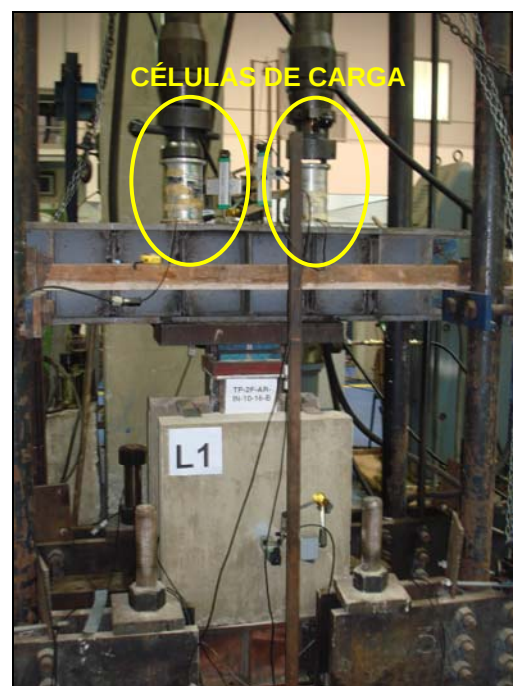


Figura 3.96- – Estrutura de reação e instrumentação para o ensaio tipo *push-out*, LEM.

Nestes ensaios foram utilizados duas células de carga com capacidade 1000kN para controlar a carga aplicada por cada atuador durante o ensaio.



Figura 3.97- – Rótula para o ensaio tipo *push-out*, LEM.

3.4.2.4. Instrumentação e aplicação do carregamento

Os deslocamentos relativos verticais entre o perfil metálico e as lajes, e a separação horizontal entre os mesmos (*uplift*), foram medidos por meio de transdutores de deslocamento fixados na região próxima aos conectores.

Nos ensaios realizados no LEM, PUC-Rio, foram utilizados um total de oito RDL's (régua de deslocamento linear). Para medir os deslocamentos verticais relativos entre o perfil e as lajes, foram utilizados quatro RDL's. Para medir o efeito *uplift*, foram utilizados dois RDL's horizontais. Para controlar o deslocamento da viga de transição, foram instalados dois RDL's na parte superior da viga.

A Figura 3.98 detalha a posição dos RDL's nos protótipos da quinta e sexta série.

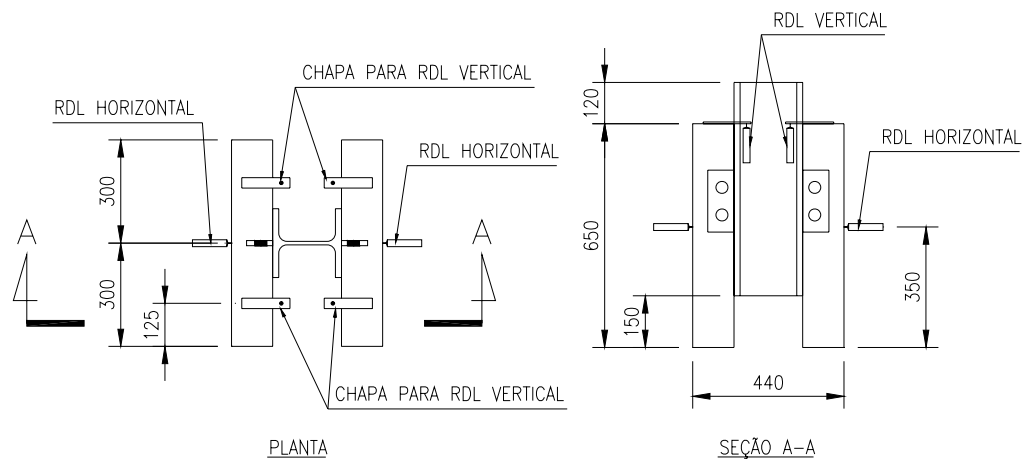


Figura 3.98 – Instrumentação dos protótipos, LEM – PUC-Rio.

A Figura 3.99 mostra a configuração global da instalação dos RDL's que foi adotada nos ensaios da quinta e sexta série. As instalações dos RDL's para medir os deslocamentos relativos entre o perfil metálico e a laje, e os RDL's instalados na viga de transição de aplicação de carga são mostrados na Figura 3.100.



Figura 3.99 - Instrumentação global dos protótipos, LEM – PUC-Rio.

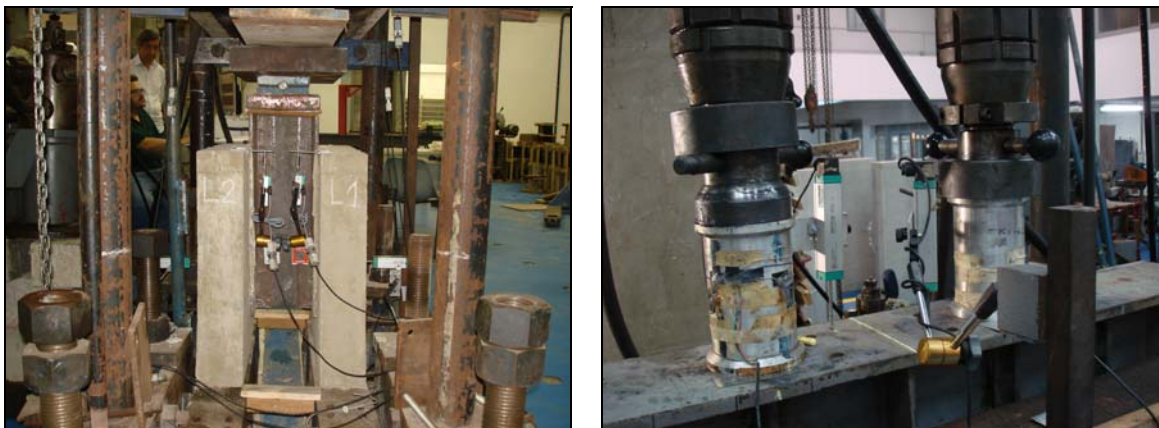


Figura 3.100 – RDL's verticais no perfil / laje e RDL's na viga de transição, LEM.

Para medir deformações ocorridas no ensaio de *push-out*, foram instalados extensômetros elétricos nos conectores e nas armaduras do protótipo TP-2F-AR-IN-10-12-C, na sexta série de ensaio.

Foram instaladas quatro rosetas em cada extremidade da mesa dos conectores, conforme apresenta a Figura 3.101. As rosetas R1 e R2 pertencem ao mesmo conector posicionados na primeira laje, enquanto que as R3 e R4 foram posicionadas no lado oposto, segunda laje.

Na Figura 3.101 é apresentada a identificação das barras e os extensômetros da roseta nos conectores.

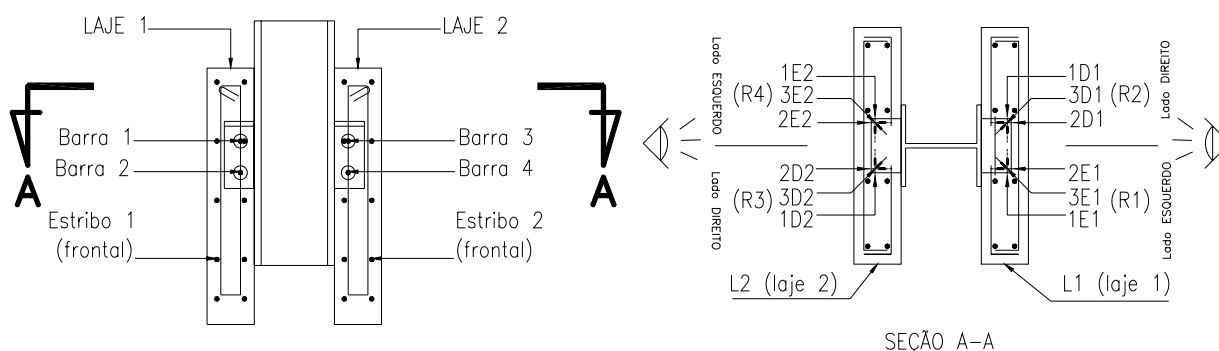


Figura 3.101 – Extensômetros no protótipo TP-2F-AR-IN-10-12-C.

Nas armaduras passantes nos furos, foram instalados quatro extensômetros por barra. Dois na parte frontal e dois na parte posterior. A distância linear entre os extensômetros foi de 80mm, sendo a distância de cada um até o eixo central de 40mm, conforme Figura 3.102. Nos estribos, foram instalados dois extensômetros no meio da barra, na posição frontal e posterior, apenas no penúltimo estribo, identificados também na Figura 3.102.

Nas Figura 3.103 a Figura 3.106 apresentam-se em detalhes as posições dos extensômetros.

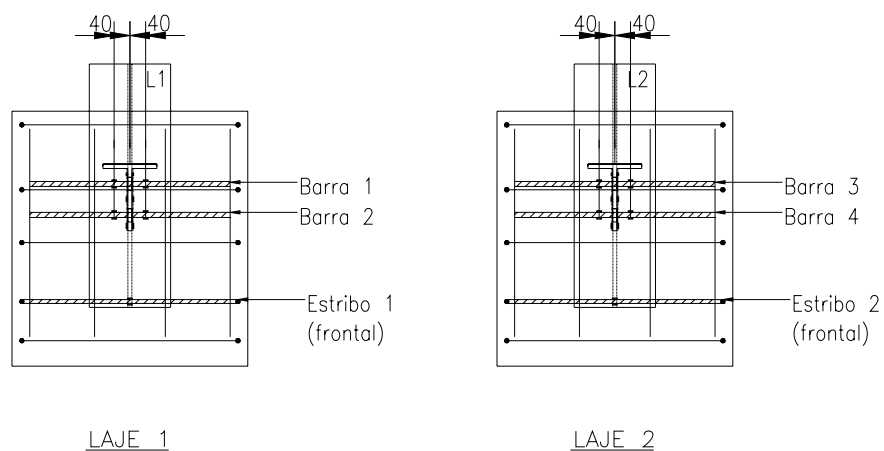


Figura 3.102 – Identificação das barras instrumentadas com extensômetros.

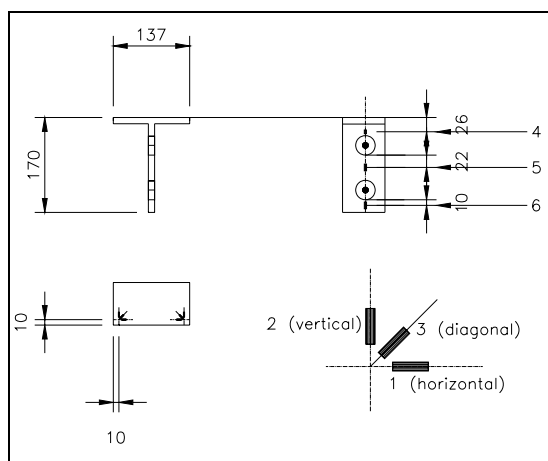


Figura 3.103 –Extensômetros rosetas no conector.

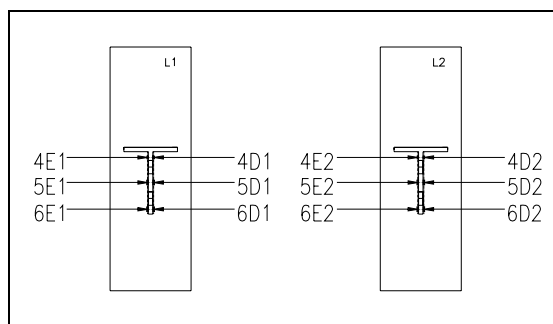


Figura 3.104 –Extensômetros lineares da alma do conector.

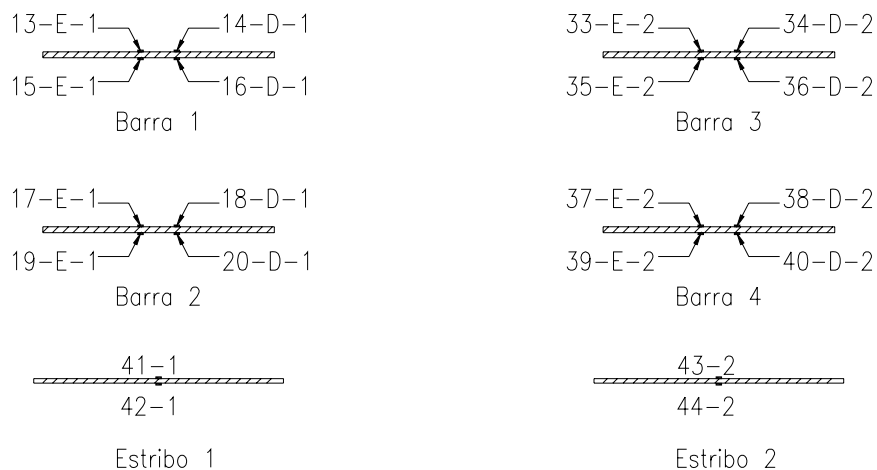


Figura 3.105 – Identificação dos extensômetros lineares nas barras.



Figura 3.106 – Extensômetros lineares nas barras passantes nos furos e no estribo.



Figura 3.107 – Extensômetros no protótipo TP-2F-AR-IN-10-12-C protegidos

Na Figura 3.107 apresentou-se uma visão global da instalação dos extensômetros no protótipo TP-2F-AR-IN-10-12-C antes da concretagem.

Para proteger e não danificar os extensômetros durante a fase de concretagem, foi utilizada cera de abelha sobre os mesmos e sobre os fios.

Os procedimentos adotados para o carregamento foram os mesmos utilizados na primeira etapa, com carregamento cíclico e monotônico. Porém, na fase de carregamento monotônico, o carregamento foi aplicado também por controle de força, já que o sistema adotado nesta etapa, não permitia ser controlado por deslocamento. A aplicação de carga, neste sistema, foi controlada manualmente. Em todas as fases, um software controlador, conectado ao sistema de aquisição de dados, fornecia em tempo real, os gráficos de força *versus* deslizamento, sendo possível assim controlar a velocidade de aplicação de carga, Figura 3.108.

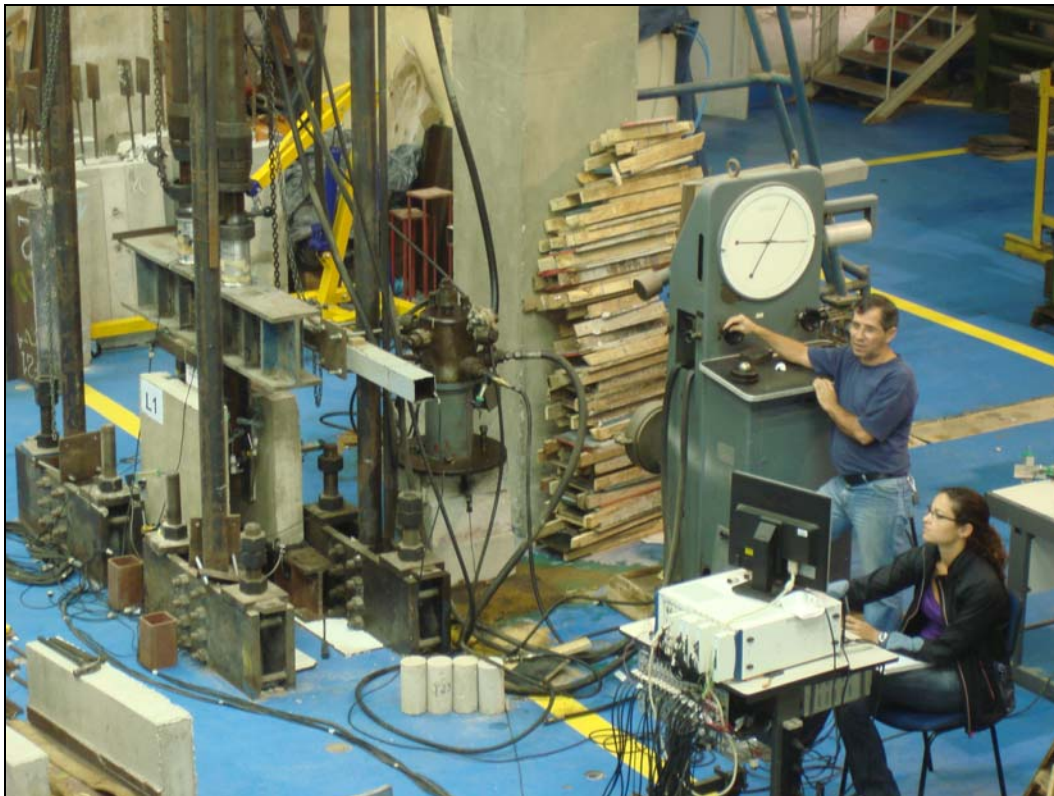


Figura 3.108 – Sistema de aplicação e controle de carga, segunda etapa

3.4.3. Resultados

3.4.3.1. Concreto

Para cada betonagem nesta etapa, foram concretados corpos de prova cilíndricos, de acordo com a NBR 5738:1994, para verificar a resistência à

compressão do concreto. Os valores obtidos para resistência do concreto para cada betonagem destas duas últimas séries, estão apresentadas na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Resistência à compressão dos cp's da quinta e sexta série, segunda etapa.

Fase	Protótipo	Data	fc (Mpa)			Média	Desvio	Média fc (Mpa)
			1	2	3			
5	TP-2F-AR-IN-10-12-A	28-08-2008						
	TP-2F-AR-IN-10-12-B	29-08-2008	26,68	25,83	24,60	25,70	1,05	25,70
	TP-2F-AR-IN-10-16-A	04-09-2008	30,43	27,55		28,99	2,04	
	TP-2F-AR-IN-10-16-B	05-09-2008	25,43*	29,55		27,49	2,91	29,18
	TP-2F-AR-IN-12-16-A	10-09-2008	25,55	25,58		25,57	0,02	
	TP-2F-AR-IN-12-16-B	11-09-2008	26,94	28,32*		27,63	0,98	26,02
6	TP-2F-AR-IN-10-12-C	18-02-2009	38,18	30,55	25,82*	34,365	5,40	
	TP-2F-AR-IN-10-12-D	19-02-2009	35,77	35,13	36,88	35,93	0,89	35,30

* Valores descartados para o cálculo da resistência média a compressão

3.4.3.2. Quinta série

Nesta série de ensaios, os parâmetros avaliados foram o diâmetro das armaduras passantes nos furos e as armaduras dos estribos.

Conforme apresentado na Tabela 3.14, observou-se uma variação da resistência do concreto à compressão nesta série. Para que os resultados fossem melhor avaliados e comparados, e a fim de se eliminarem as possíveis diferenças geradas pelas diversas resistências do concreto à compressão, as cargas características obtidas dos ensaios foram normalizadas através da seguinte equação (Oguejiofor & Hosain, 1994) já apresentada anteriormente:

$$P_{rkNormaliz} = P_{rk} \cdot \sqrt{\frac{f_{ckmedio}}{f_{ck}}} \quad (3.1)$$

onde:

$P_{rkNormaliz}$ é a resistência característica ao cisalhamento normalizada do conector (kN);

$f_{ckmedio}$ é o valor médio da resistência característica do concreto à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa);

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa);

O $f_{ckmedio}$ calculado para a quinta série foi de 26,97MPa.

O gráfico da Figura 3.109 apresenta as curvas força *versus* deslizamento dos ensaios realizados nesta série. A força apresentada no gráfico corresponde a força normalizada por conector.

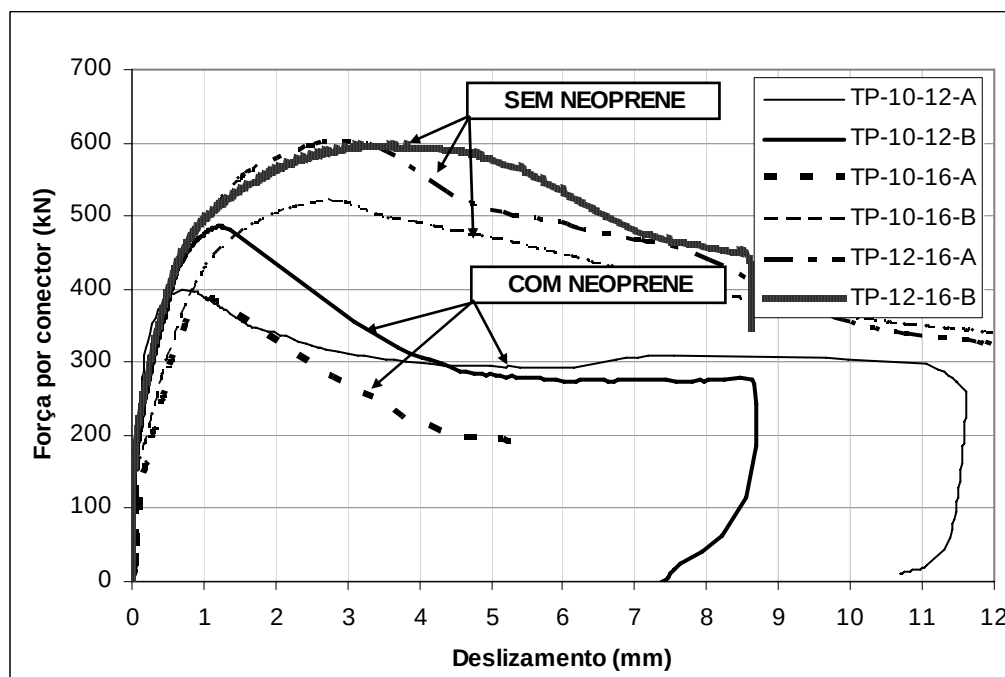


Figura 3.109 – Conectores T-Perfobond da quinta série.

Pelo gráfico, percebeu-se que, nos ensaios com neoprene, ao atingir a carga máxima, houve perda de carga rápida, não apresentando comportamento dúctil, como era esperado. Nos ensaios sem o neoprene, o comportamento ocorreu de maneira esperada. Apresentaram maior capacidade de manter a carga após atingir a carga máxima, e mais ductilidade. Conforme explicitado anteriormente, a utilização do neoprene de 15mm, influenciou nos resultados dos ensaios, fazendo com que houvesse uma separação horizontal maior, ou seja, um escorregamento das lajes de concreto, antes mesmo que atingissem sua máxima capacidade de carga do ensaio.

A Tabela 3.15 apresenta os resultados obtidos dos ensaios. Segundo o EUROCODE 4 (2005), quando o desvio padrão for menor que 10%, a resistência característica (P_{rk}) do conector deve ser o menor valor reduzido de 10%. O valor da capacidade de deslizamento δ_u deve ser tomado como o maior valor medido no nível de carga característico P_{rk} , e o valor característico δ_{uk} deve ser reduzido de 10%.

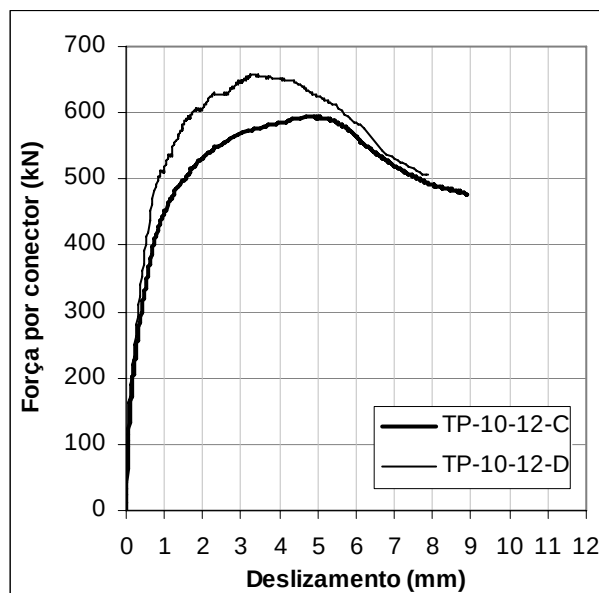
Tabela 3.15 – Resultados dos ensaios da quinta série

Protótipo	$q_{u, test}$ (kN)	P_{rk} kN	$q_{u, test}$ norm. (kN)	$P_{rk norm}$ kN	δ_u mm	δ_{uk} mm
TP-2F-AR-IN-10-12-A	389,67	350,71	399,14	359,23	1,54	1,39
TP-2F-AR-IN-10-12-B	474,60	427,14	486,13	437,52	1,99	1,79
TP-2F-AR-IN-10-16-A	402,58	362,32	387,04	348,33	1,72	1,55
TP-2F-AR-IN-10-16-B	541,97	487,77	521,05	468,95	5,15	4,64
TP-2F-AR-IN-12-16-A	592,39	533,15	603,04	542,74	4,36	3,92
TP-2F-AR-IN-12-16-B	585,86	527,27	596,39	536,75	6,03	5,427

Nas conclusões dos resultados, os ensaios com neoprene não serão discutidos. Serão analisados apenas os ensaios TP-2F-AR-IN-10-16-B e TP-2F-AR-IN-12-16-B.

3.4.3.3. Sexta série

Os resultados obtidos desta série estão ilustrados na Figura 3.110, que apresenta a força por conector *versus* deslizamento. Conforme explicitado anteriormente, para análises futuras, o ensaio a ser considerado será o protótipo TP-2F-AR-IN-10-12-C, que apresentou menor capacidade de carga comparada com seu par idêntico.

Figura 3.110 – Conectores *T-Perfobond* da sexta série.

Os resultados obtidos dos extensômetros instalados no protótipo TP-2F-AR-IN-10-12-C são apresentados nos gráficos a seguir.

O gráfico da Figura 3.111 apresenta a capacidade de deformação da mesa do conector na duas direções principais obtidas pela roseta.

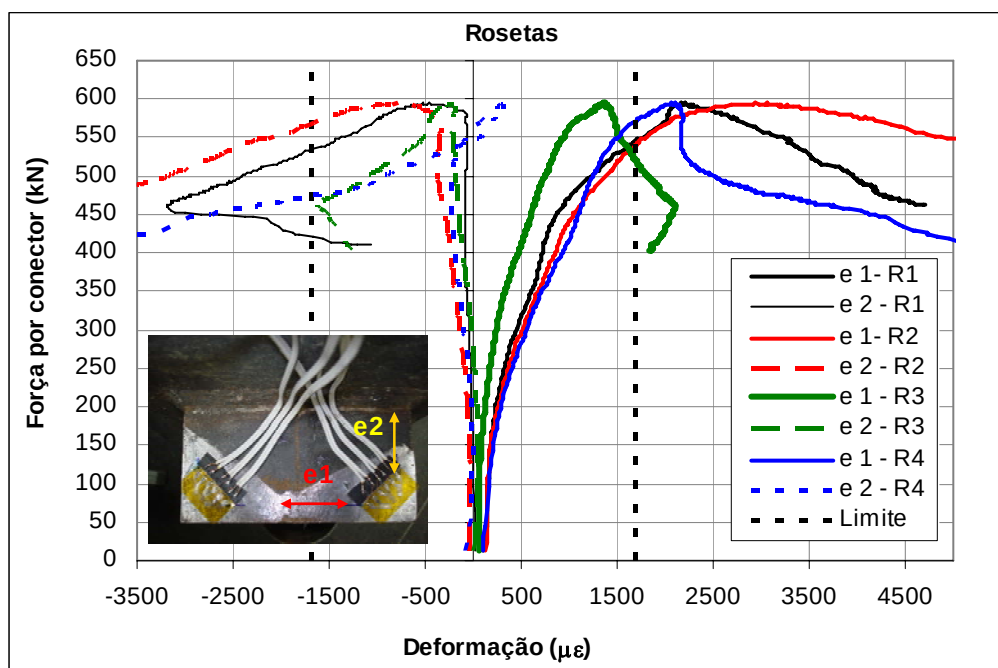


Figura 3.111 – Deformação nas mesas dos conectores.

Analisando o gráfico, é possível notar maior deformação na direção principal e1 (horizontal) nas quatro rosetas. Nesta direção, quase todas atingiram o limite de deformação máxima antes mesmo de atingir a carga máxima do conector, em contra partida, na direção perpendicular a esta, e2, a deformação ocorreu de forma significativamente inferior.

Para comparar e analisar os resultados, verificou-se o valor de deformação tanto dos conectores quanto das barras, a um nível de carregamento de 400kN.

Analisando a mesa do conector, no gráfico das rosetas, Figura 3.111, verifica-se que a deformação média para esta carga é de $880\mu\epsilon$ na direção horizontal (e1), tracionada, e de $-203\mu\epsilon$ na direção perpendicular a e1, sendo esta região comprimida.

Os gráficos da Figura 3.112 e Figura 3.113, apresentam as deformações médias na alma do conector T-Perfobond dos extensômetros posicionados em cada um dos lados da alma (lado direito e esquerdo – Figura 3.104) nas lajes 1 e 2.

Analisando a alma no nível de carga de 400kN, na laje 1, a deformação na região acima do segundo furo foi de $-874\mu\epsilon$ (4), entre os furos $112\mu\epsilon$ (5) e na extremidade, ou seja a frente do primeiro furo (6), $-210\mu\epsilon$. Na laje 2, as

deformações foram respectivamente: $-112\mu\epsilon$ (4), $38\mu\epsilon$ (5) e $40\mu\epsilon$ (6), notavelmente inferior a laje 1. Isso se deve ao fato da acomodação das lajes durante o ensaio e a pequenas excentricidades que acabam surgindo durante o mesmo, fazendo com que um lado absorva mais que o outro.

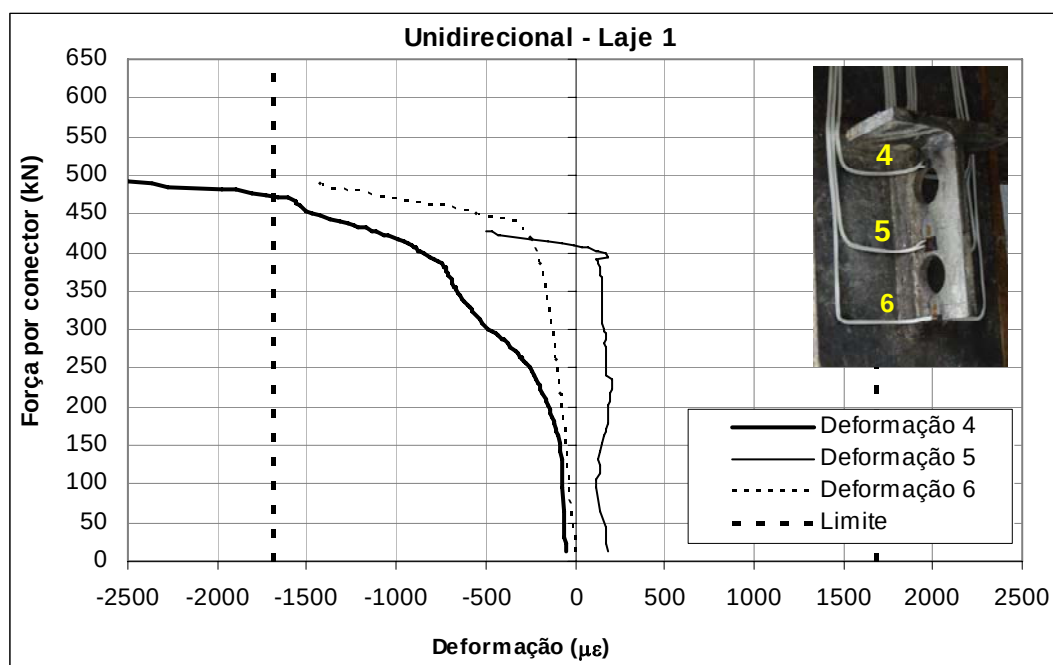


Figura 3.112 – Deformação na alma do conector da Laje 1

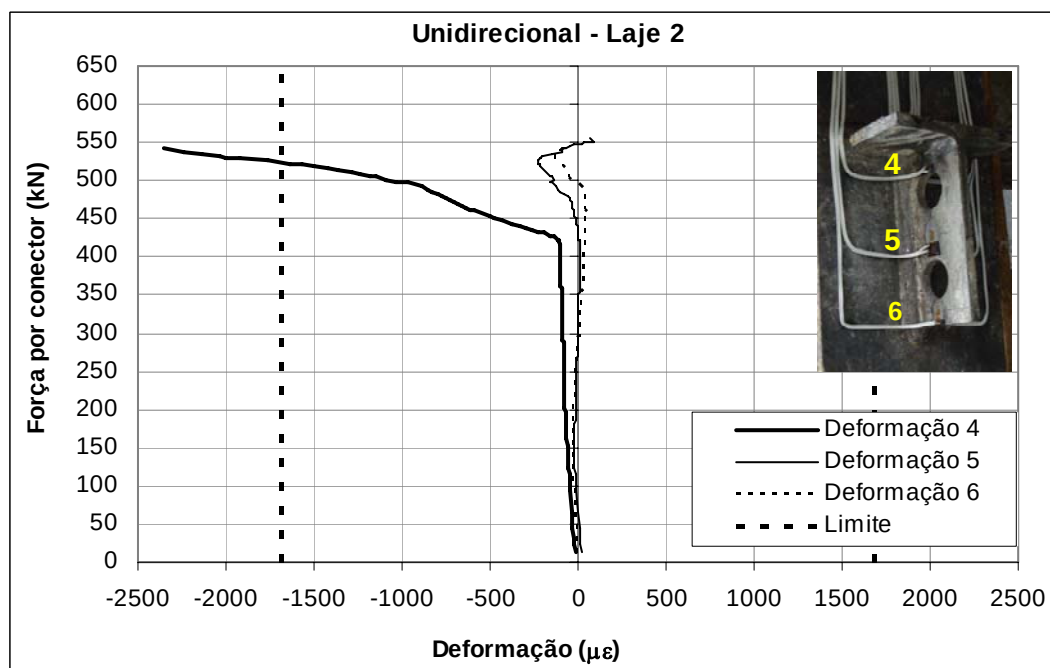


Figura 3.113 – Deformação na alma do conector da Laje 2

Nota-se que a região da alma mais solicitada é a região próxima à mesa do conector (4), vindo posteriormente a região entre furos (5) e a região da extremidade (6).

Os resultados das deformações nas barras que passaram nos furos dos conectores estão apresentados nos gráficos seguintes, Figura 3.114 e Figura 3.116. A Figura 3.115 e Figura 3.117 apresentam a configuração das deformações das barras em função dos resultados obtidos da deformação.

Nas armaduras da laje 1, a barra 1, inserida no segundo furo (próximo a mesa do conector), apresentou os seguintes valores de deformação a 400kN: no extensômetro 13-E-1, deformação praticamente nula; 15-E-1, deformou $410\mu\epsilon$ (à tração); 14-D-1 deformou $567\mu\epsilon$ (à tração); e 16-D-1 apresentou $-304\mu\epsilon$ (à compressão). Na barra 2 as deformações variaram para este nível de carga de $168\mu\epsilon$ a $509\mu\epsilon$ à tração: 17-E-1, $509\mu\epsilon$; 19-E-1, $169\mu\epsilon$; 18-D-1 e 20-D-1, $332\mu\epsilon$. Comparando os extensômetros 14 e 18, verifica-se que a barra 1 ($567\mu\epsilon$) deformou mais que a barra 2 posicionada no primeiro furo ($332\mu\epsilon$).

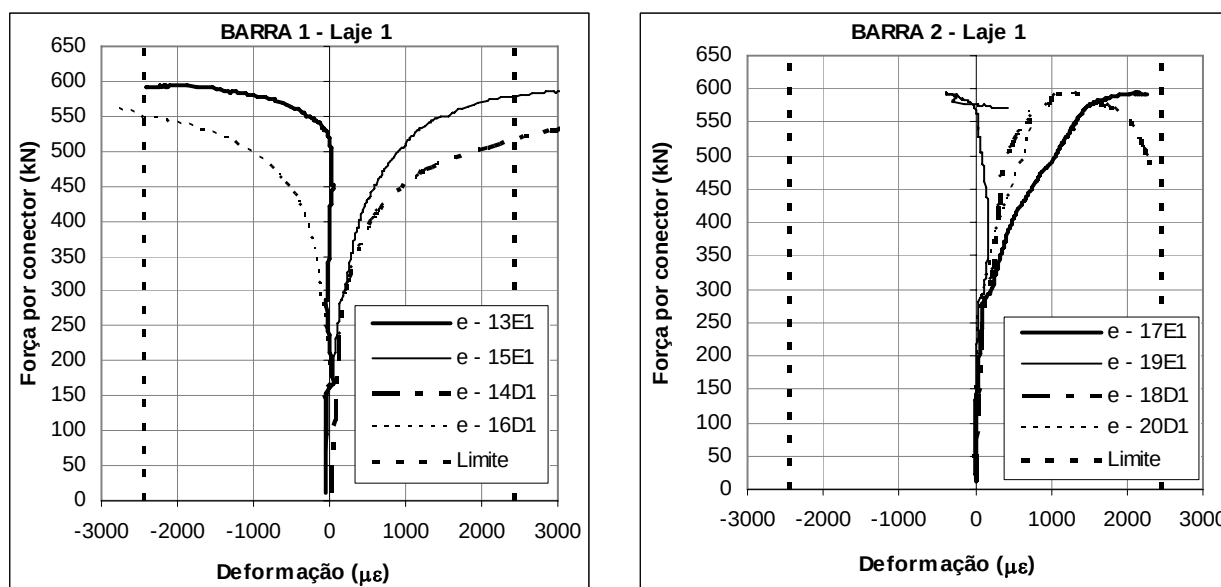


Figura 3.114 – Deformação das barras passantes nos furos dos conectores da laje 1

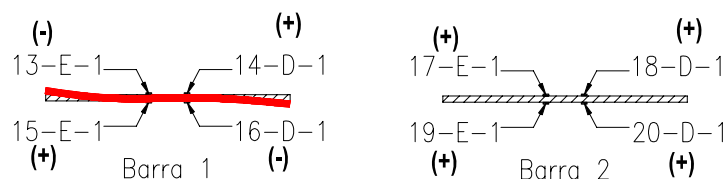


Figura 3.115 – Deformação das barras da laje 1.

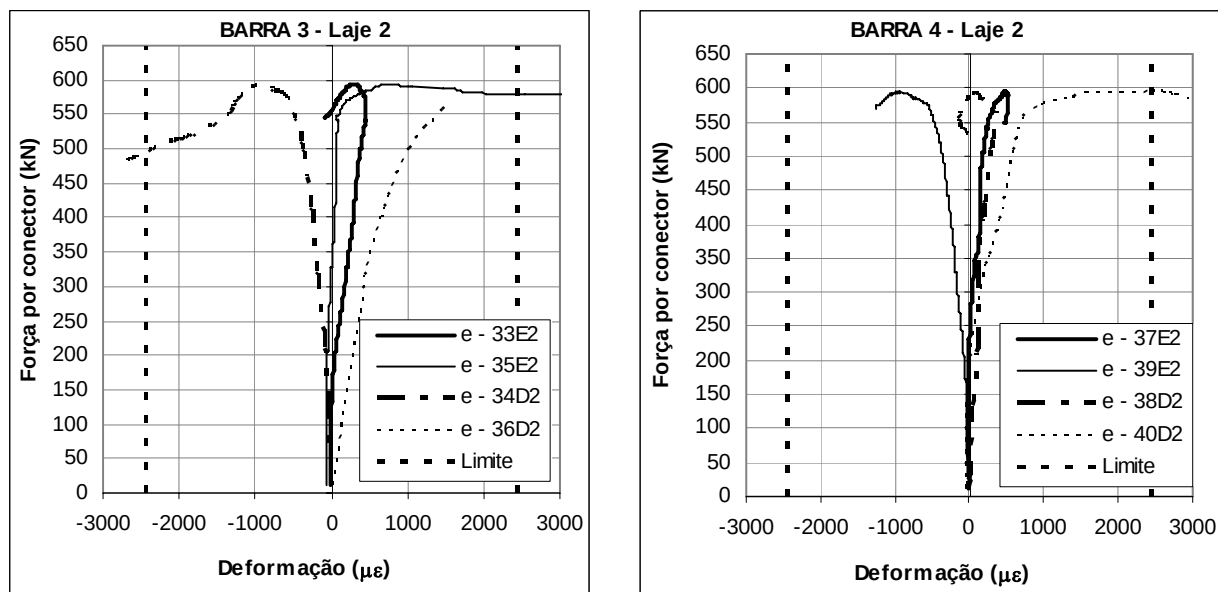


Figura 3.116 – Deformação das barras passantes nos furos dos conectores da laje 2.

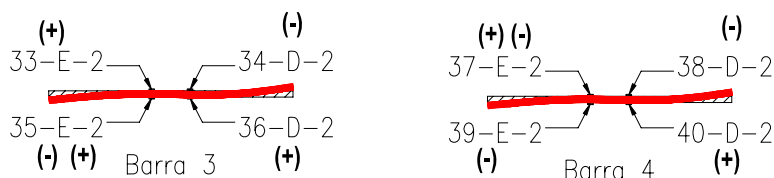


Figura 3.117 – Deformação das barras da laje 2.

Nas armaduras da laje 2, a barra 3, inserida no segundo furo, apresentou os seguintes valores de deformação (400kN): no extensômetro 33-E-2, $290\mu\epsilon$ (à tração); 35-E-2, deformou $49\mu\epsilon$ (à tração); 34-D-2 deformou $-250\mu\epsilon$ (à compressão); e 36-D-2 apresentou $667\mu\epsilon$ (à tração). Na barra 4 as deformações foram: 37-E-2, $166\mu\epsilon$ (tração); 39-E-2, $250\mu\epsilon$ (compressão); 38-D-2, $184\mu\epsilon$ (tração) e 40-D-2, $418\mu\epsilon$ (tração). Comparando os extensômetros 36 e 40, verifica-se que a barra 3 ($667\mu\epsilon$) deformou mais que a barra 4 posicionada no primeiro furo ($418\mu\epsilon$).

O gráfico da Figura 3.118 apresenta os resultados dos extensômetros do estribo 1 e estribo 2. O estribo 2 se deformou a tração enquanto que o estribo 1 iniciou em tração e mudando para compressão.

Nos estribos, o extensômetro 41-1, posicionado na laje 1, apresentou problemas, sendo seus resultados descartados para análise.

Nos estribos, na laje 1, o extensômetro 42-1 deformou-se na ordem de $1200\mu\epsilon$ (tração) quando a carga atingiu 400kN. O estribo 2 da laje 2 apresentou

os respectivos valores de deformações: no extensômetro 43-2, $166\mu\epsilon$ e no 44-2, $590\mu\epsilon$, ambos a tração.

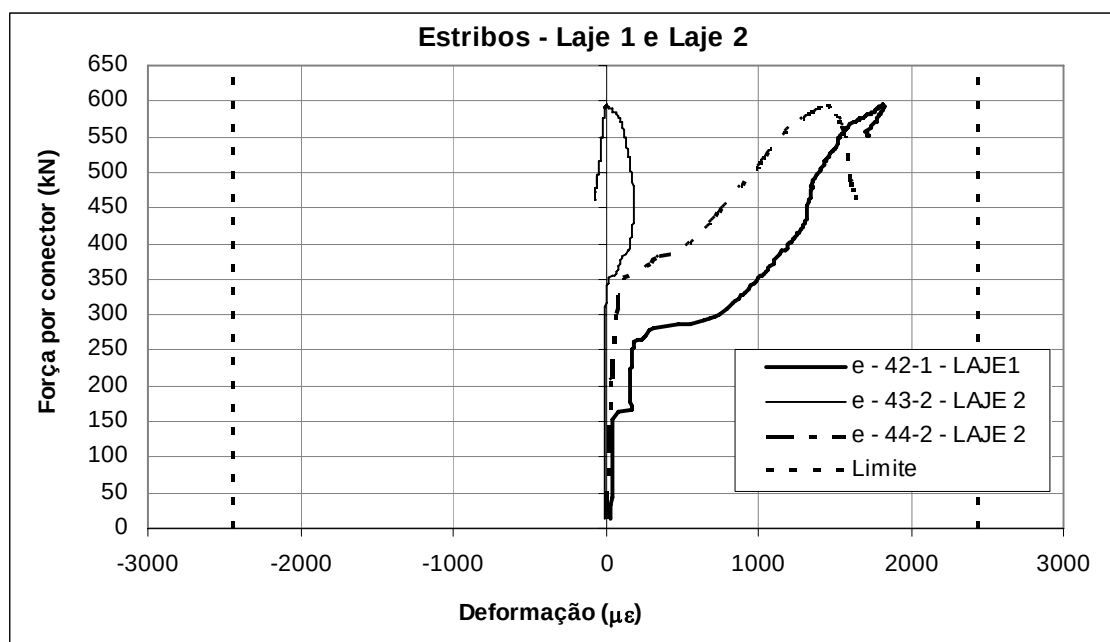


Figura 3.118 – Deformação dos estribos.

3.4.3.4.

Comparação entre as séries da segunda etapa

Para avaliar a contribuição das armaduras dos estribos e das armaduras passantes nos furos, comparou-se os resultados obtidos na segunda etapa dos ensaios sem a utilização do neoprene, apresentados no gráfico da Figura 3.119.

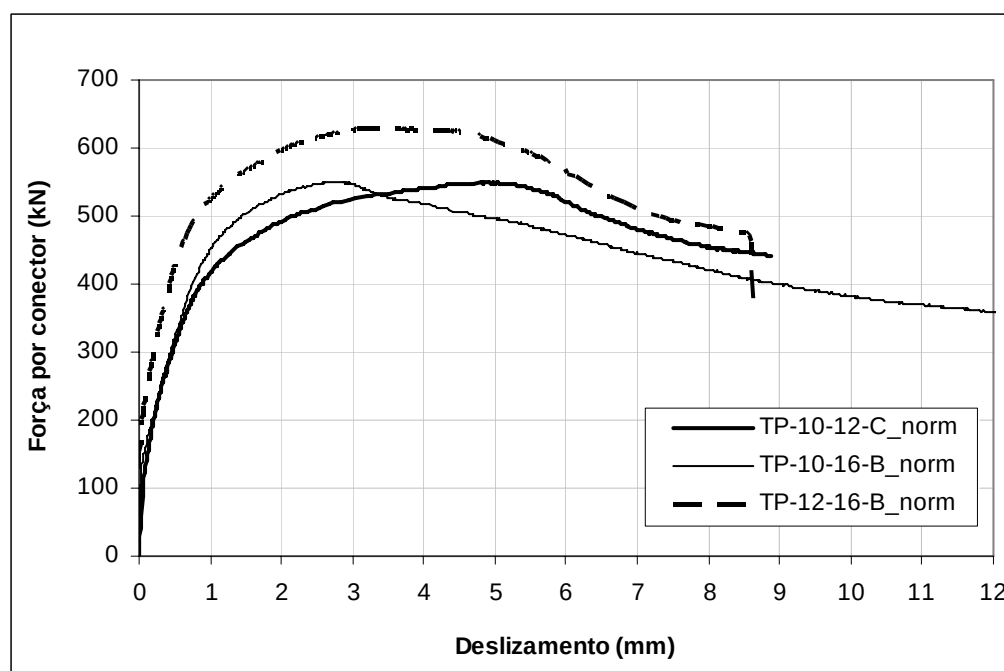


Figura 3.119 – Conectores T-Perfobond da quinta série e sexta série.

Para que os resultados fossem comparados, adotou-se novamente a normalização da carga dos ensaios através da equação (3.1). O valor médio da resistência à compressão ($f_{ck\text{medio}}$) calculado entre os f_{ck} dos respectivos pares de ensaios, apresentados na Tabela 3.14, foi de 30,17MPa.

Os valores da carga última, da carga característica, da carga característica normalizada e do deslizamento são apresentados na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Resultados dos ensaios da segunda etapa

Protótipo	$q_{u, \text{test}}$ (kN)	P_{rk} kN	$q_{u, \text{test}} \text{ norm.}$ (kN)	$P_{rk\text{norm}}$ (kN)	δ_u mm	δ_{uk} mm
TP-2F-AR-IN-10-12-C	594,62	535,16	549,68	494,71	6,75	6,08
TP-2F-AR-IN-10-16-B	541,97	487,77	551,10	495,99	5,15	4,64
TP-2F-AR-IN-12-16-B	585,86	527,27	630,78	567,70	6,03	5,43

Na Figura 3.120 são apresentados os ensaios comparados e a identificação das armaduras passantes nos furos.

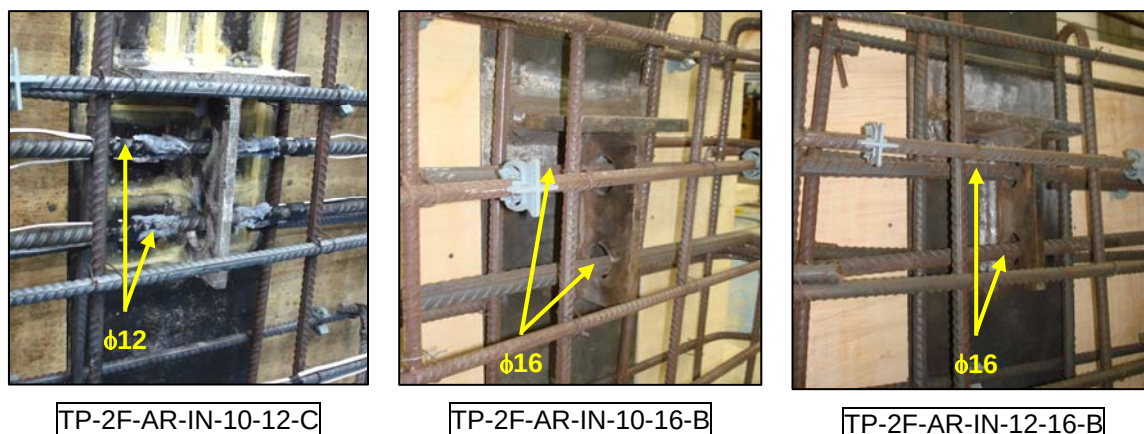


Figura 3.120 – Conectores T-Perfobond, segunda etapa de ensaios

No gráfico da Figura 3.119, observa-se que o ensaio que utilizou maior diâmetro de armaduras, tanto nos furos, como nos estribos, atingiram maior capacidade de carga. Avaliando a ductilidade do ensaio, notou-se neste trabalho que não houve uma diferença significativa ao aumentar o diâmetro da armadura passante, contrariando o que se esperava. O ensaio que atendeu ao EUROCODE 4 (2005) em termos de ductilidade mínima de 6mm, foi o ensaio que utilizou armaduras passantes de 12mm e estribo de 10mm de diâmetro. Este fato pode estar relacionado com o controle de carga, que nesta etapa ocorreu de forma manual, não sendo possível garantir a mesma velocidade de aplicação de carga nos diferentes ensaios.

3.4.3.5. Mecanismo de colapso

Em todos os ensaios desta etapa, não houve surgimento de fissuras longitudinais na laje, conforme ocorreu nos ensaios da primeira etapa.

Conforme se aumentava a aplicação da carga, surgia a separação horizontal entre o perfil metálico e a laje de concreto.

Em seguida, as fissuras surgiram na parte interna da laje, estendendo-se gradualmente, seguida do esmagamento do concreto.

A Figura 3.121 apresenta o mecanismo de colapso do ensaio TP-2F-AR-IN-10-16-B, representando todos os ensaios desta etapa.



Figura 3.121 – Modos de ruína, segunda etapa de ensaios

Na Figura 3.122 observa-se nitidamente a falta de fissuras na parte frontal da laje e o esmagamento do concreto na parte interna próxima ao conector.



Figura 3.122 – Modos de ruína, TP-2F-AR-IN-10-16-B.

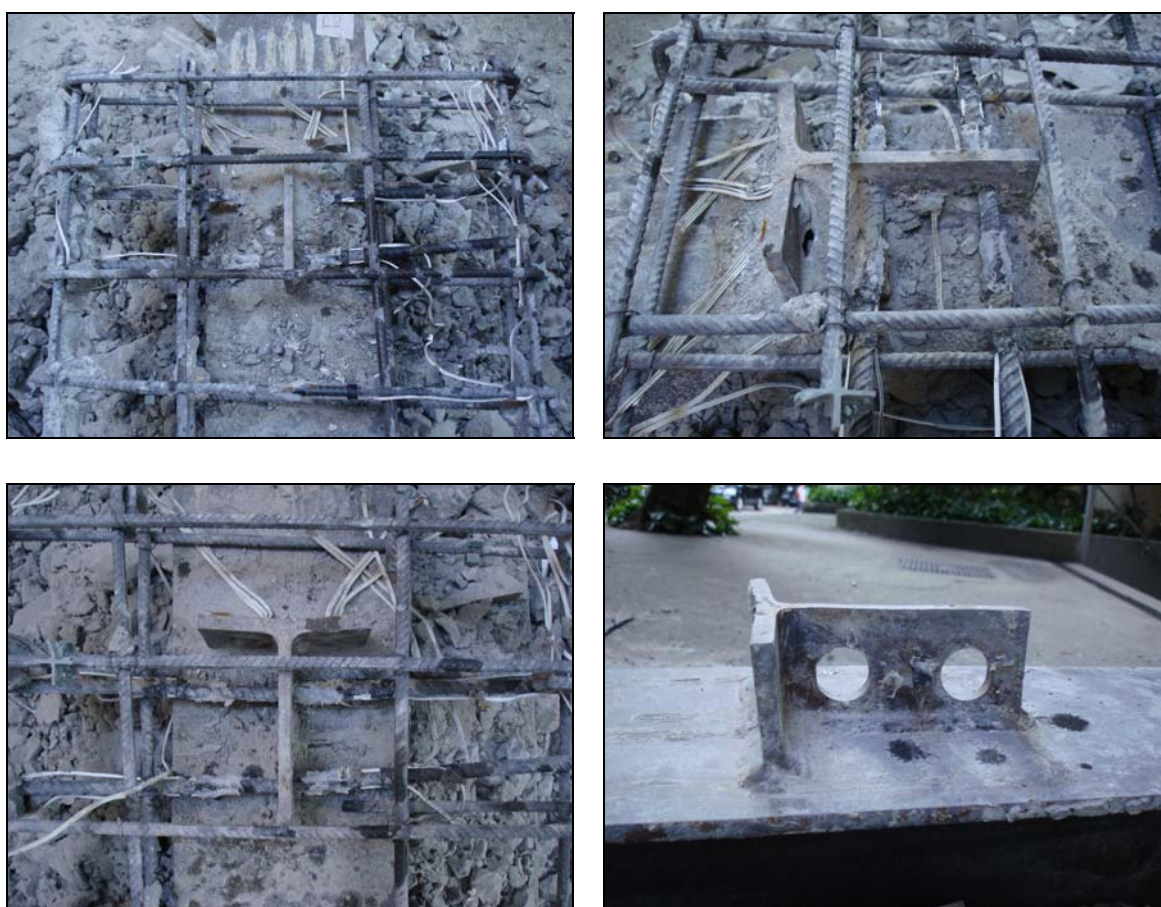


Figura 3.123 – Modos de ruína, TP-2F-AR-IN-10-12-C.

Na Figura 3.123 apresenta-se a configuração do protótipo TP-2F-AR-IN10-12-C após retirada do concreto. Utilizou-se uma marreta pequena e um martelo elétrico para remoção do concreto a fim de não mascarar a configuração das armaduras e do concreto em torno do conector. Observou-se que o concreto confinado na região em torno ao conector, permaneceu ligado a este, quase em forma de cone, como ocorreu na primeira etapa. Após a retirada deste concreto,

percebeu-se também a permanência do concreto nos furos juntamente com a armadura passante, e a deformação das mesmas. As armaduras dos estribos permaneceram intactas, não apresentando deformações. Neste ensaio foi observado a plastificação do conector tanto na alma como na mesa.

3.4.3.6. Conclusões

Na quinta série de ensaio, provou-se que ao se utilizar um neoprene com espessuras relativamente altas, altera-se o comportamento do ensaio de *push-out*. Ocorreu uma separação horizontal consideravelmente alta, logo após o início da aplicação de carga monotônica. Com isso, conclui-se que para os ensaios de *push-out*, caso se utilize o neoprene, a espessura máxima que deve ser empregado deve ser de 5mm, como foi adotado na primeira etapa, ao invés de 15mm adotado na segunda etapa.

As principais conclusões obtidas da sexta série de ensaio estão relacionadas com as deformações obtidas no ensaio do protótipo TP-2F-AR-IN-10-12-C. Verificou-se que a região mais solicitada em torno do conector é a parte da alma acima do segundo furo (extensômetro 4), e a mesa do conector, bem como as armaduras inseridas no segundo furo.

Apesar do comportamento das armaduras terem ocorrido de maneira distintas, ora à tração e ora à compressão, os valores em módulos das deformações apresentaram-se semelhantes.

Assim como já mencionado anteriormente, analisando as deformações dos estribos, verificou-se que a primeira laje apresentou níveis de deformações iniciais superiores a segunda laje, devido à acomodação do conjunto e uma possível excentricidade ocorrida no ensaio devido ao fato da própria fabricação do protótipo.

Na comparação da quinta e sexta série, observou-se que ao aumentar as armaduras passantes dos furos, não houve ganho significativo na capacidade de carga do conector e nem na ductilidade do ensaio, ao contrário do que se esperava. O ensaio que utilizou a armadura passante de 12mm, apresentou uma capacidade de deslizamento em torno de 31% acima do ensaio que utilizou a armadura com 16mm de diâmetro. A falta de um controle eficaz na aplicação da carga de forma manual, pode ter influenciado nos resultados.

Ao aumentar apenas o diâmetro das armaduras dos estribos, de 10mm para 12mm, houve um ganho de 14,5% na capacidade de carga do conector e de aproximadamente de 17% na capacidade de deslizamento.

Aumentando os diâmetros das armaduras dos estribos (10mm para 12mm) e dos furos (12mm para 16mm) simultaneamente, houve um ganho de 14,8% na capacidade de carga e uma perda de 10,7% na capacidade de deslizamento, devido ao fato mencionado anteriormente sobre controle de aplicação da carga.

A partir dos resultados dos ensaios da quinta e sexta série, conclui-se que o aumento das armaduras dos estribos tem maior contribuição para o ganho da capacidade de carga e de deslizamento, do que o aumento das armaduras dos furos.

3.5.

Comparação entre a primeira e a segunda etapa

Para avaliar a contribuição do conector projetado na segunda etapa de ensaio, na qual adotou-se um conector mais flexível, onde as espessuras da mesa e da alma foram iguais, comparou-se no gráfico da Figura 3.124, os resultados obtidos na quarta série de ensaio da primeira etapa.

Como os resultados de cada série possuíam diferentes resistências à compressão do concreto, o valor da força por conector foi normalizado pela equação (3.1), Oguejiofor & Hosain, (1994).

A Figura 3.125 apresenta os conectores adotados na primeira e segunda etapa respectivamente. Como apresentado anteriormente, na primeira etapa os conectores T-Perfobond foram fabricados a partir de um perfil IPN 340 e na segunda etapa a partir do perfil HP 200x53.

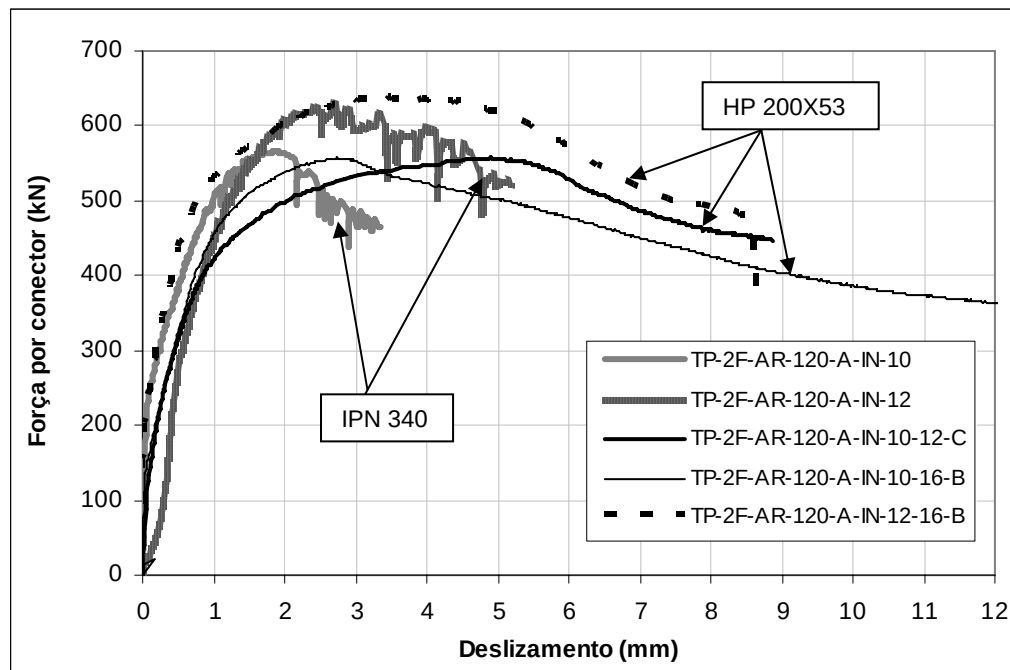
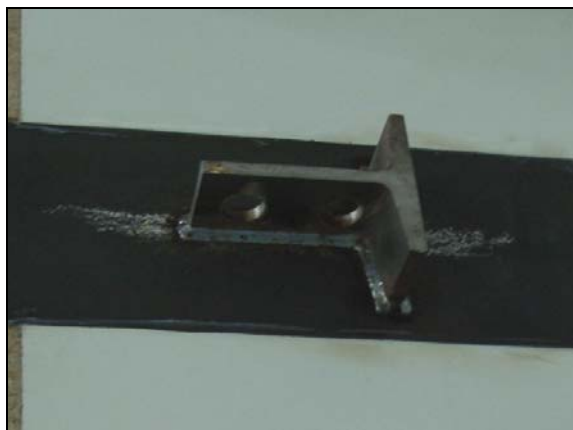
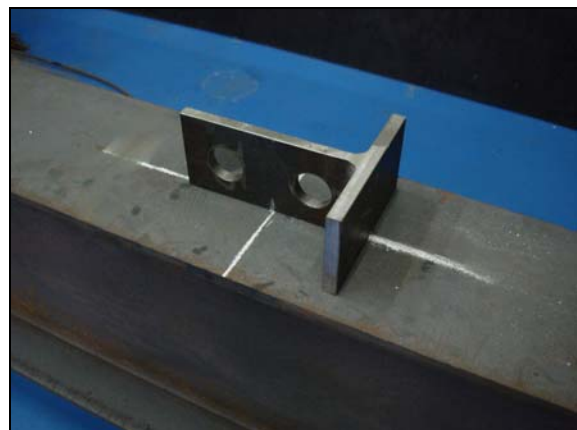


Figura 3.124 – Comparação do T-Perfobond IPN 340 versus HP 200x53.



(a) IPN 340 – primeira etapa



(b) HP 200x53 – segunda etapa

Figura 3.125 – Conectores T-Perfobond: IPN 340 e HP 200x53.

A partir das curvas do gráfico da Figura 3.124, conclui-se que os conectores T-Perfobond fabricados a partir do perfil HP 200x53, com espessura de mesa e alma iguais, apresentaram uma melhor capacidade de deslizamento, sendo portanto, conectores mais dúcteis. O conector que apresentou a melhor capacidade de carga foi o conector fabricado a partir do HP 200x53, que utilizou armaduras de 12mm nos estribos e de 16mm nos furos, TP-2F-AR-120-A-IN-12-16. Em relação ao conector TP-2F-AR-120-A-IN-10, estudado na primeira etapa, apresentou um ganho de 13% na resistência característica e 137% na capacidade de deslizamento. Os conectores fabricados a partir do IPN 340

apresentaram maior capacidade de carga, quando comparado aos outros dois ensaios da segunda etapa, porém estes apresentaram pouca ductilidade.

A Tabela 3.17 apresenta os resultados obtidos após a normalização dos dados.

Tabela 3.17 – Comparação entre a primeira e segunda etapa

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

3.6.

Propriedades dos materiais

3.6.1.

Concreto

A Tabela 3.18 apresenta um resumo de todas as séries da primeira etapa e segunda etapa dos valores da resistência à compressão do concreto obtido nos ensaios, bem como a classe do concreto.

Pelos valores das resistências dos corpos de prova cúbicos, foram calculados os valores correspondentes aos corpos de prova cilíndricos. Estes valores estão apresentados nesta tabela.

Tabela 3.18 – Resistência à compressão média do concreto

	Fases	Classe	f_c cub.(MPa)	f_c (MPa)
Primeira etapa	1	C25/30	34,6	28,3
	2	C50/60	62,7	51,9
	3	C40/50	53,9	43,9
	4	C30/37	41,8	33
Segunda etapa	5	-	-	27,5
	6	-	-	35,3

3.7. Conclusões gerais

Neste trabalho, foram avaliados os conectores *Perfobond* e *T-Perfobond*. Uma campanha experimental foi realizada, totalizando em 52 ensaios do tipo *push-out*. A campanha experimental foi desenvolvida em duas etapas. A primeira etapa foi realizada na Universidade de Coimbra, Portugal, e foi composta por 46 ensaios. Avaliou-se os conectores *Perfobond*, *T-Perfobond* e *T*. A segunda etapa, composta de 8 ensaios, foi realizada na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil. Esta etapa foi programada em função dos resultados obtidos da primeira, na qual se projetou um novo conector *T-Perfobond*, sendo este mais flexível.

As vantagens estruturais e construtivas de utilizar os tipos de conectores alternativos apresentados nesse trabalho estão relacionadas com a alta resistência que oferecem, sendo necessários menos conectores por viga, quer se considere interação total, quer parcial. Este fato pode ainda possibilitar interação total onde com outro tipo de conectores fosse conseguida apenas interação parcial. A sua colocação, porque é muito mais espaçada do que a dos *Studs*, pode ser discreta, sendo especialmente adequados em intervenções de reforço de estruturas existentes, como relatado por Neves e Lima (2005), onde os conectores foram colocados a posteriori em orifícios pontuais abertos na laje, o que não seria possível com *Studs*. Por outro lado, a solda corrente evita equipamentos especiais de solda com elevada potência elétrica, necessários para instalar os *Studs*.

Outra vantagem dos conectores tipo *Perfobond* ou *T-Perfobond* tem que ver com o seu comportamento à fadiga, já que o detalhe é muito mais favorável do que o correspondente aos *Studs*, trazendo vantagens não apenas em estruturas submetidas à ação de tráfego, mas também no caso de ações sísmicas.

Os resultados das campanhas experimentais realizadas serviram para avaliar as diferenças do comportamento estrutural entre os conectores *Perfobond*, *T-Perfobond* e *T* em termos de suas capacidades de carga e deformação, bem como quanto ao modo de ruína. Os conectores tipo *T-Perfobond* possuem maior capacidade de carga e maior rigidez do que os conectores *Perfobond*. A vantagem de se utilizar este tipo de conector é este ser produzido a partir de perfis laminados, não sendo necessário produzir um novo elemento de ligação específico. Porém, e ao contrário dos restantes tipos de

conectores, o conector *T-Perfobond* fabricado com o perfil IPN 340 não apresentou um comportamento dúctil, sendo por isso necessário proceder a um dimensionamento elástico, logo menos econômico.

O modo de ruína dos conectores *Perfobond* e *T-Perfobond* inicia-se com um deslizamento na interface, seguido do esmagamento do concreto na frente do conector. Embora esta ruína esteja ligada à ruptura do concreto, em fases avançadas dos ensaios observou-se também plastificação do conector.