



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Agrupamento de Conectores Aço-Betão Perfurados

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

Carlos António Anastácio Neto

Orientador

Professor Doutor Luís Filipe da Costa Neves

Co-Orientador

Professora Doutora Sandra Filomena da Silva Jordão Alves

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2015

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que contribuíram de alguma maneira para a concretização desta Dissertação, gostaria de apresentar algumas palavras de agradecimento:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luís Filipe da Costa Neves, pelo empenho, disponibilidade, paciência e amizade. À minha co-orientadora, Prof. Dra. Sandra Filomena da Silva Jordão Alves, por todo apoio e incentivo. Ao Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco, da Universidade Estadual do Rio de Janeiro, que embora não tenha tido um papel direto de orientador, sempre se demonstrou disponível e interessado a dar valiosos contributos.

À Valter Gomes e à Hievila pelos serviços prestados.

Aos funcionários do LEMEC, em particular ao Eng. Ilídio, Eng. Edmundo e ao Luís Gaspar por todo o apoio prestado.

Aos meus amigos Diogo Carvalho, Marta Alves, Vítor Santos, Filipe Firmo e Diogo Neves, por toda a paciência e companheirismo demonstrado ao longo desta maratona. Em especial ao Bruno Vasconcelos e ao Gonçalo Duarte que para além de estarem presentes desde o início, deram uma ajuda preciosa para a realização desta Dissertação.

Quero ainda e sobretudo dirigir uma palavra à minha família. Ao meu pai Carlos Neto e ao meu irmão Ricardo Neto, pelo encorajamento sempre demonstrado e pela forma como souberam compreender as minhas prolongadas ausências. À minha madrinha e aos meus avós que tanto me apoiaram ao longo deste percurso.

Finalmente, à Nádía, pela paciência, compreensão, pelo incentivo, por estar sempre presente, por tudo e que foi e é para mim. A ela devo-lhe muito e um obrigado por tudo é pouco.

A todos o meu mais sincero obrigado.

RESUMO

As estruturas mistas, nomeadamente as compostas por betão e aço, têm evoluído de forma a tornarem-se uma solução cada vez mais eficiente e económica. A ligação entre os materiais constituintes através de conectores tem sido, ao longo do tempo, um aspeto muito estudado, uma vez que assegura o comportamento misto. Um conector que tem revelado uma excelente resposta estrutural é o conector *Perfobond*. Diversas tipologias e disposições foram já abordadas, no entanto o estudo do agrupamento destes conectores encontra-se longe de estar concluído.

Esta dissertação de Mestrado Integrado apresenta o estudo da resposta estrutural do agrupamento de conectores *Perfobond* colocados lado a lado, com diversas configurações.

O principal objetivo passa por avaliar a resistência da conexão, a ductilidade, modo de rotura e comparação de carga suportada por cada configuração de agrupamento de conectores, de maneira a obter uma formulação analítica para a interação dos conectores.

O trabalho experimental desenvolveu-se nas instalações do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, tendo sido realizados dezasseis ensaios do tipo “*push-out*”, submetidos a carregamento monotónico. Foram estudados cinco agrupamentos diferentes de conectores *Perfobond* e um agrupamento de *Studs*.

O programa experimental cumpriu as especificações preconizadas no Eurocódigo 4 para este tipo de ensaios. São descritas as principais características do trabalho experimental, tais como, a instrumentação, o procedimento de aplicação das cargas, as condicionantes laboratoriais e as geometrias ensaiadas.

Os resultados são apresentados e discutidos, tecendo-se algumas considerações sobre os mesmos. São ainda apresentadas comparações com os modelos analíticos existentes, e proposto um modelo analítico para a resistência de múltiplos conectores.

Finalmente, são apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

ABSTRACT

The composite structures, particularly those composed of concrete and steel, have evolved to become an increasingly efficient and economical solution. The connection between the constituent materials through connectors has been a much studied aspect, as it is responsible for the composite behaviour of the section. A connector which has shown an excellent structural response is the *Perfobond* connector. Several types of connectors have already been covered, however the study of groups of these connectors is far from being complete.

This Dissertation, included in an integrated Master work, presents the study of the structural response of groups of *Perfobond* connectors placed side by side, with different arrangements.

The main objective involves assessing the connection resistance, ductility, failure mode and comparing the load supported by each connector assembly configuration, in order to obtain an expression for the interaction of the connectors.

The experimental work was performed at the Civil Engineering Department, University of Coimbra, where sixteen *push-out* tests were made, submitted to monotonic loading. Five different groups of *Perfobond* connectors and a group of *Studs* were studied.

The experimental program has met the recommended specifications in Eurocode 4 for this type of tests. The main characteristics of the experimental work are described, such as the test layout, tested geometries, instrumentation and the load application process.

The results are presented and discussed, performing some considerations about them. Comparisons with existing analytical models are also presented and an innovative analytical model to cope with the interaction of multiple *Perfobond* connectors was proposed.

Finally, are presented some proposals for future work.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Breve Referência Histórica	1
1.3	Conceito de Estrutura Mista	3
1.4	Objetivos	5
1.5	Organização do Documento	5
2.	ESTADO DO CONHECIMENTO	7
2.1	Considerações Iniciais	7
2.2	Classificação de Conectores	7
2.3	Grau de Conexão	8
2.3.1	<i>Uplift</i>	9
2.4	Ligação ao Corte	10
2.5	Tipos de Conectores	11
2.5.1	Conector tipo bloco ou rígido	11
2.5.2	Conector tipo “ <i>Stud</i> ”	12
2.5.3	Conector tipo “ <i>Channel connectors</i> ”	15
2.5.4	Conector tipo “ <i>Hat</i> ”	16
2.5.5	Conector tipo “ <i>Hilti</i> ”	16
2.5.6	Conector tipo “ <i>CR</i> ” ou “ <i>Crestbond</i> ”	17
2.5.7	Conector tipo “ <i>Perfobond</i> ”	18
2.5.8	Conector tipo “ <i>T-Perfobond</i> ”	19
2.5.9	Conector tipo “ <i>I-Perfobond</i> ”	20
2.5.10	Conector tipo “ <i>2T-Perfobond</i> ”	21
2.5.11	Conector tipo “ <i>Y-type Perfobond</i> ”	21
3.	O CONECTOR <i>PERFOBOND</i>	23
3.1	Estudos Previamente Realizados e Modelos Analíticos Existentes	23
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	35
4.1	Objetivos	35
4.2	Propriedades e Características Geométricas dos Provetes de Ensaio	36
4.3	Procedimento dos Ensaios	40
4.4	Esquema geral dos Ensaios	41
4.5	Instrumentação dos Modelos	42
4.6	Avaliação da Resistência Última e da Capacidade de Deslizamento	44
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	46
5.1	Resultados Gerais	46

5.2	Comportamento do agrupamento de conectores tipo Stud	49
5.3	Comportamento do conector Perfobond isolado	50
5.4	Influência do número de conectores Perfobond e seu espaçamento	53
5.5	Influência da armadura	65
5.6	Influência da resistência do betão.....	73
5.7	Análise do Modo de Rotura	74
5.8	Comparação com os Conectores Stud	77
6.	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM MODELOS TEÓRICOS	79
7.	PROPOSTA DE UM MODELO ANALÍTICO PARA A INTERAÇÃO DE CONECTORES <i>PERFOBOND</i>	85
7.1	Modelo analítico proposto com base nos resultados obtidos	85
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
8.1	Conclusões	93
8.2	Recomendações Para Trabalhos Futuros	95
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
	ANEXOS.....	100
A.1	Curvas carga/"uplift" dos ensaios realizados	100

SIMBOLOGIA

- \emptyset_{sc} – fator de resistência dos conectores *Stud*
 A_c, A_{cc} – área de betão ao corte por conector;
 A_{f1} – área da superfície frontal para conectores tipo bloco ou rígidos;
 A_{f2} – área da superfície frontal aumentada para conectores tipo bloco ou rígidos;
 A_{sc} – área da secção do fuste do conector *Stud*
 A_{tr} – área total de armadura transversal na laje
 b, t_c – espessura da laje de betão
 b_f – largura do banzo do perfil metálico;
 d – diâmetro do fuste do conector e diâmetro dos furos do conector;
 d_{st} – diâmetro da armadura passante nos furos
 E_c – módulo de elasticidade do betão;
 E_{cm} – módulo de elasticidade secante do betão
 F_1 – fator que tem em conta o efeito do comprimento do conector;
 F_2 – fator que tem em conta o efeito da altura do conector;
 f_{ck}, f'_c – valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade;
 f_u – valor da tensão última do aço
 F_u – resistência mínima especificada de tração do aço do conector
 f_y – tensão nominal das armaduras da laje
 H, h_{sc}, h – altura do conector;
 L – comprimento do conector;
 L_c – comprimento de contacto entre o betão e o banzo do perfil metálico;
 n – número de furos;
 P_{Rd}, Q_n, q_{rs} – valor de cálculo da força resistente ao corte
 q_u, R_n – carga última por conector
 t, t_f – espessura do banzo do conector
 t_{sc} – espessura do conector;
 t_w, w – espessura da alma do conector
 δ_{uk} – valor característico capacidade de deformação do conector;
 η – fator que considera a densidade do betão envolvente;
 γ_c – fator de segurança para o betão;
 $Q_{u,mult}$ – capacidade de carga do agrupamento de conectores;
 α – relação do espaçamento dos conectores *Perfobond*, entre faces, no agrupamento.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As estruturas mistas constituídas por aço e betão, têm sido ao longo das últimas décadas, cada vez mais utilizadas na indústria da construção. Quando comparadas com os edifícios correntes em betão armado, as estruturas mistas apresentam-se como uma solução mais competitiva para estruturas de vãos médios e longos. A sua rápida execução e redução do peso global da estrutura tornam esta solução mais económica. Aliando o betão ao aço, obtém-se uma secção mista com as vantagens inerentes às qualidades de cada material, tanto estruturais como construtivas.

No entanto, o comportamento misto apenas se desenvolve quando os dois elementos estruturais são ligados de tal forma que os elementos constituintes se comportam como se fossem um único. Para que isto ocorra, é necessário que na interface entre o aço e o betão exista uma ligação capaz de transmitir as forças longitudinais de corte entre os dois materiais. Por este motivo, o tipo da ligação tem sido alvo de aperfeiçoamento, com o objetivo de encontrar o conector (elemento de ligação) tão próximo do perfeito quanto possível.

1.2 Breve Referência Histórica

A utilização de estruturas mistas provém das civilizações antigas. Crê-se que o primeiro elemento estrutural misto teve origem pelas mãos dos Assírios, com a criação de tijolos de barro reforçados com palha. Tempos mais tarde, os Gregos e os Romanos, de maneira a melhorar o comportamento das paredes, construíram-nas com um material diferente no interior (Calado e Santos, 2010).

As estruturas mistas tal como são concebidas atualmente, surgiram durante o século XIX (Viest, I.M., 1960 *apud* Calado e Santos, 2010). Howe registou uma patente em 1840, para a construção de treliças compostas por ferro forjado e madeira, tendo sido essa treliça modificada anos mais tarde por Thomas e Pratt, alterando o posicionamento dos elementos de ferro forjado. Howe utilizava-os nos elementos verticais, enquanto que Thomas e Pratt aplicaram esses varões nos elementos diagonais (Figura 1.1). Posteriormente, com o aparecimento do betão, começou-se a envolver os elementos de ferro forjado por este material de maneira a criar uma protecção para o fogo, podendo estes elementos ser considerados como os primeiros elementos mistos semelhantes aos dos dias de hoje.



Figura 1.1- Ponte treliçada tipo Howe (Regent Road Bridge) à esquerda e tipo Thomas e Pratt (Bieneman Farm Bridge) à direita (Historicbridges@, 2015)

A empresa inglesa *Redpath Brow and Company* lançou os primeiros estudos nesta área, com base em ensaios para pisos, antes da Primeira Grande Guerra (1914-1918). No entanto, o acelerar do desenvolvimento das vigas mistas ocorreu na década de 20 do século XX, uma vez que iam surgindo estudos sobre as mesmas por todo o mundo, devido à necessidade de aplicação em pontes e edifícios.

Pela primeira vez, em 1929, foi referida a necessidade da existência de conectores para ligar os dois materiais, num artigo sobre o dimensionamento de vigas constituídas por perfis em aço e lajes de betão publicado por Caughey e Scott. Anos mais tarde, durante a década de 30, na Suíça, iniciou-se a utilização de vigas mistas com conectores constituídos por varões dobrados em espiral, para ligar os dois materiais (Calado e Santos, 2010).

Apesar dos vários estudos realizados e artigos publicados, alguns contendo instruções de dimensionamento e métodos construtivos, a regulamentação dos sistemas mistos surgiu apenas em 1944, através das normas da atual *American Association of Highway Transportation Officials* (AASHTO), denominada na altura por AASHO (Calado e Santos, 2010).

Embora durante a década de 50 e 60 tenham sido realizados diversos estudos de maneira a aferir o comportamento das secções mistas, muitas questões ficaram por resolver, verificando-se um decréscimo de interesse nestas estruturas até meados da década de 80.

Um tipo diferente de conector, o *Perfobond*, foi desenvolvido em 1987 pela empresa alemã *Leonhardt, Andra and Partners*. Este sistema de conexão foi criado como alternativa aos conectores do tipo *Stud*, que apresentam baixo desempenho à fadiga, para a realização da 3ª ponte sobre o rio Caroni (Figura 1.2) situado na Venezuela (Zellner, 1987). Este tipo de ligação não é mais do que uma chapa de aço soldada sobre o banzo superior da viga de aço, com aberturas circulares.



Figura 1.2 - 3ª Ponte sobre o rio Caroni (LAP@, 2015)

Afirmando-se como uma solução de elevada fiabilidade para pontes, a construção mista tem vindo a ser extensivamente aplicada nos mais variados tipos de estruturas durante as últimas décadas. Por este motivo, a Comunidade Europeia, numa primeira fase através da Convenção Europeia da Construção Metálica (CEM/ECCS) e mais tarde através do Comité Europeu de Normalização (CEN), dotou os projetistas de regulamentação adequada com vista ao dimensionamento e verificação das estruturas mistas através do Eurocódigo 4 – Projeto de Estruturas Mistas Aço-Betão (Calado e Santos, 2010).

Os avanços registados na área da construção mista estão relacionados não só com o tipo de ligação mista, mas também com o tipo de análise a ser realizada para as estruturas e elementos. Além disso, a evolução observada estará constantemente em mudança com vista ao aperfeiçoamento, destacando-se o pormenor da ligação entre os diferentes materiais como o principal alvo de aperfeiçoamento.

1.3 Conceito de Estrutura Mista

Uma estrutura mista (Figura 1.3) é definida como aquela onde estão presentes elementos estruturais com secção mista, ou seja, são secções resistentes nas quais dois ou mais materiais estão unidos entre si, trabalhando de maneira solidária entre eles. Desta forma, obtêm-se elementos estruturais com comportamento distinto do observado caso estes funcionassem individualmente. O principal objetivo destas estruturas passa pela combinação das vantagens estruturais dos elementos que as compõem. No presente documento, referir-se-á a estruturas mistas como secções compostas por aço e betão. Se por um lado o aço dispõe de um bom comportamento à tração, devido às elevadas tensões de cedência, por outro lado, em compressão, apesar da mesma tensão de cedência, sofre por vezes instabilidade. Já o betão apresenta um bom comportamento à compressão, oferecendo maior estabilidade (devido à menor esbelteza das peças), e ainda melhor comportamento quando sujeito a situações de fogo.



Figura 1.3- Exemplos de estruturas Mistas: Torre São Gabriel, Parque das Nações (MOTA@, 2015); Aeroporto Francisco Sá Carneiro, Porto (Maiahoje@, 2015); Dolce Vita Coimbra (DolceVita@, 2015)

De maneira simplificada, o objetivo de uma secção mista, passa por o perfil metálico suportar as tensões de tração, enquanto o betão suporta as tensões de compressão, obtendo-se assim um total aproveitamento de cada material. O aspeto anteriormente referido explica o motivo pelo qual a construção mista tem vindo a ter uma tendência crescente no ramo da engenharia civil, destacando-se a sua aplicabilidade em obras como pontes, edifícios de habitação, comércio e serviços, entre outros casos, optando-se nestas situações pela aplicação de lajes mistas, vigas mistas, pilares mistos, etc (Figura 1.4).

As lajes mistas são lajes nas quais as chapas perfiladas de aço têm função de molde (cofragem) ao mesmo tempo que função estrutural, uma vez que, após o endurecimento do betão funcionam como armaduras de tração. Os pilares mistos são elementos mistos solicitados principalmente à compressão ou à flexão composta, têm como principal vantagem o aumento da capacidade resistente devido à diminuição da esbelteza além da elevada resistência ao fogo e protecção contra a corrosão do aço (Calado e Santos, 2010). As vigas mistas são elementos estruturais solicitados principalmente à flexão. São constituídas por um perfil metálico conectado a um pavimento em betão armado, podendo este ser ou não uma laje mista. No caso das vigas mistas, é a ligação mecânica entre os dois materiais, através de conectores soldados ao perfil metálico envolvidos em betão, que confere a mobilização do esforço de corte longitudinal.

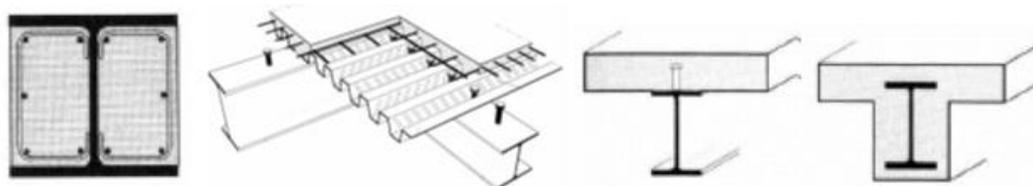


Figura 1.4- Secções Mistas. Da esquerda para a direita: Pilar Misto, Laje mista com chapa colaborante, Viga Mista com conectores, Viga mista totalmente embebida (Simões, 2014)

São várias as vantagens na consideração de vigas mistas em lajes de betão armado ou em lajes mistas, de entre as quais se destaca a diminuição da altura dos perfis metálicos, levando a uma redução do peso global da estrutura. Possibilitam também vencer vãos de maiores dimensões, devido à maior inércia que uma secção mista oferece, verificando-se uma redução das flechas, além de, num aspecto global da obra, levarem a uma redução de custos.

Atualmente, os conectores mais usados são os conectores tipo *Stud*, existindo além destes outros tipos de conectores como os conectores de bloco rígido, *Perfobond*, *T-Perfobond*, *2T-Perfobond*, *I-Perfobond*, *CR* ou *Crestbond*, *Hilti*, *Hat*, *Channel Connectors* entre outros, (Figura 1.5).



Figura 1.5- Exemplos de conectores de corte (Simões, 2014)

1.4 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo determinar a interação de conectores próximos em vigas mistas aço-betão, através de ensaios *push-out*. Incide-se em particular na caracterização estrutural de agrupamentos de conectores do tipo *Perfobond*, com várias configurações, submetidos a carregamento monotónico.

Existem diversos estudos anteriores em que os conectores são sujeitos a variados carregamentos. No entanto, são poucos os estudos realizados com agrupamentos de conectores do tipo *Perfobond*. Assim, até à data, não tem sido possível aferir acerca do comportamento de tais agrupamentos em relação à resistência ao corte nem acerca da sua ductilidade.

1.5 Organização do Documento

Após este primeiro capítulo introdutório, no segundo capítulo do presente documento, Estado do Conhecimento, é feita a apresentação do tema de maneira mais aprofundada. São apresentados os conceitos mais importantes, entre os quais: a classificação dos conectores, o grau de conexão e *uplift*, bem como a enumeração dos conectores existentes.

O conector estudado neste documento, o *Perfobond*, será abordado no terceiro capítulo, onde são abordados e analisados estudos realizados até à data. São ainda enunciados os vários modelos analíticos disponíveis, que servirão de base de comparação com os resultados obtidos.

O quarto capítulo, Programa Experimental, é dedicado ao trabalho experimental realizado no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, descrevendo a realização de 16 ensaios *push-out*, submetidos a carregamento monotónico. São descritas as diferentes geometrias dos conectores ensaiados, bem como as suas características mecânicas, métodos de ensaio e instrumentação.

Os resultados obtidos são analisados e criticados no quinto capítulo: *Análise dos Resultados Experimentais*.

No sexto capítulo, *Comparação dos Resultados Experimentais com Modelos Teóricos*, é efetuada uma comparação entre os resultados obtidos e os expectáveis pelos modelos teóricos disponíveis.

Com base nos resultados obtidos, o sétimo capítulo apresenta uma proposta de modelo para a interação de conectores, de maneira a que, com base nas características do agrupamento dos conectores, seja possível prever a sua resistência.

O oitavo capítulo, *Considerações Finais*, tece as principais conclusões a reter acerca do trabalho realizado, e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 Considerações Iniciais

Na construção mista, os conectores assumem um papel primordial, uma vez que permitem que toda a peça funcione em conjunto, contribuindo para o aumento da resistência à flexão em torno do eixo perpendicular ao plano médio da alma da secção mista.

Os conectores são os responsáveis pela transmissão das forças de corte entre o betão e aço e, além disso, impedem ou limitam o deslocamento relativo entre o elemento de betão e o elemento metálico. Este deslocamento é fundamental para a classificação dos conectores, sendo um critério a ter em conta na fase de projeto. Além da classificação, também o grau de conexão e interação são critérios importantes a ser considerados na fase de dimensionamento, bem como a capacidade de carga, que se pretende que seja tão grande quanto possível.

Tendo em conta a evolução verificada ao longo dos últimos anos nesta matéria, os conceitos abordados em cima serão alvo de explicação aprofundada seguidamente. Serão também apresentados os tipos de conectores já estudados e a resposta dos mesmos a estas características.

2.2 Classificação de Conectores

Os conectores podem ser classificados como dúcteis ou como frágeis ou ainda como flexíveis ou rígidos.

A distinção entre conector rígido e flexível é definida com base na relação entre a força de corte no conector e o deslocamento entre as superfícies de contacto diretamente relacionado com a deformação do conector. Esta relação tem origem na resposta do fluxo de corte longitudinal gerado pela transmissão de forças entre a laje e o perfil metálico (Figura 2.1).

Os conectores dúcteis têm capacidade suficiente de deformação para que se possa admitir um comportamento plástico da conexão, sendo a sua rotura caracterizada como dúctil. Neste caso, verifica-se um aumento da deformação após o conector entrar em cedência, sem que este colapse, explorando desta forma a capacidade potencial da peça, uma vez que os conectores da vizinhança são expostos à sua resistência máxima. Ou seja: pode haver uma redistribuição de esforços entre conectores.

Por outro lado, os conectores frágeis têm uma capacidade de deformação limitada, exigindo a que a conexão tenha um comportamento elástico. Neste caso verifica-se uma diminuição da rigidez da peça até atingir a rotura, sem que a sua capacidade de deformação permita a redistribuição de esforços entre conectores.

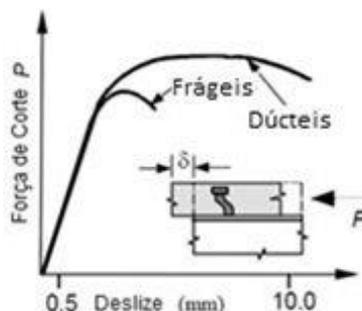


Figura 2.1-Relação força-deslocamento (Figueiredo, 2012)

Segundo a cláusula 6.6.1 do Eurocódigo 4 (2004), um conector tem um comportamento dúctil quando o valor característico da sua capacidade de deformação (δ_{uk}) for igual ou superior a 6mm. É de notar que tanto os conectores flexíveis como os rígidos podem ser considerados dúcteis, ou seja, podem ter capacidade de deslizamento mesmo após ser atingida a sua capacidade máxima de carga.

2.3 Grau de Conexão

O grau de conexão entre o aço e o betão está diretamente relacionado com a resistência de uma peça mista. A conexão pode ser definida como a maneira ou meio de garantir que os dois materiais trabalham solidariamente, de forma que possam ser projetados como partes de um mesmo elemento estrutural (Calado e Santos, 2010).

Muitas vezes o conceito de conexão é confundido com o conceito de interação. A conexão está diretamente relacionada com a resistência da secção devido às forças desenvolvidas na interface entre os dois materiais. A interação está relacionada com a rigidez do meio da conexão, ou seja, com o escorregamento verificado entre os dois materiais na interface.

Tanto o grau de conexão como o grau de interação podem ser definidos como nulo, parcial ou total (Figura 2.2). No caso de existir grau de conexão total, o aumento na quantidade de conectores não leva a um aumento de resistência da peça. Por sua vez, quando estamos perante interação total podemos desprezar os deslocamentos relativos entre os dois materiais, uma vez que estes são bastante pequenos, não sendo no entanto nulos (situação que só ocorreria caso a

conexão entre os mesmos fosse infinitamente rígida). Assim, uma conexão total não implica uma interação total. É possível reduzir os deslocamentos relativos apesar de não se aumentar a resistência de uma secção mista, caso contrário a interação deve ser considerada como parcial. Quando existe conexão e interação parcial, normalmente verifica-se uma semelhança nos valores destes graus. Em situações em que não existe meio de conexão (conexão nula), há obrigatoriamente uma resistência nula da interface verificando-se assim um escorregamento máximo (interação nula). Neste caso, a resistência da secção corresponde apenas à soma das resistências individuais da secção de aço e da secção de betão (Johnson, 1994).

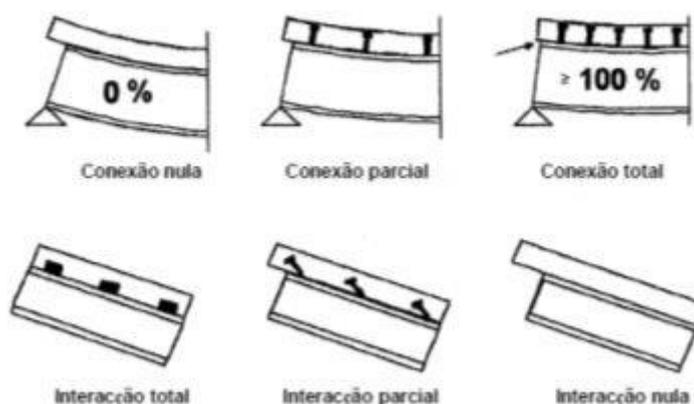


Figura 2.2- Conceitos de conexão e interação (Simões, 2014)

O tipo de conexão adotado para uma secção é definido pelo projetista, tendo como principal fator condicionante os aspetos construtivos, além do fator económico que deve ser sempre considerado. A título de exemplo, no dimensionamento de uma ponte, o grau de conexão parcial é mais apelativo do ponto de vista económico. No entanto, devido às ações dinâmicas a que este tipo de estrutura está sujeito (como o caso da circulação dos veículos), implica a consideração do fenómeno de fadiga, sendo assim mais vantajosa a adoção de um grau de conexão total.

2.3.1 Uplift

Quando surgem algumas forças, como por exemplo, cargas suspensas numa viga mista, quando a viga é de secção variável ou quando está sujeita a flexão-torção, além das forças de corte longitudinal, os conectores estão também sujeitos a forças transversais ao plano da peça. Estas forças tendem a separar o betão do perfil de aço, sendo denominadas por isso de forças de levantamento ou descolamento. Uma das funções dos conectores é controlar este fenómeno denominado de *uplift*. O *uplift* pode ocorrer quando na interface aço-betão, as tensões verificadas são de tração.

Regra geral, os conectores utilizados possuem uma geometria adequada que impede o deslocamento provocado pelas forças de descolamento. É importante referir que na grande maioria dos casos o valor das forças de descolamento é muito inferior ao valor das forças de corte longitudinal, não sendo assim necessário calcular a resistência dos conectores para as forças de descolamento.

2.4 Ligação ao Corte

Tal como referido anteriormente, a existência de interação entre os dois materiais num elemento misto torna-se estruturalmente vantajosa. De maneira a que se possa desenvolver tal interação, é necessário que existam mecanismos de transferência de esforço de escorregamento ou esforço longitudinal de corte. Esses mecanismos são os responsáveis pela conexão de corte entre o betão e o perfil de aço, que pode ser concretizada de diversas formas, tais como: por aderência, por atrito, através de conectores de corte e através da interligação em chapas perfiladas.

Em vigas mistas, quando sujeitas a cargas correntes, o método de ligação mais eficaz é por meio de conectores. Os conectores de corte, como dispositivos mecânicos que podem ser soldados ou cravados no perfil de aço, antes da betonagem, têm como função resistir às forças que se desenvolvem na interface entre os dois materiais. No dimensionamento de um conector de corte, a propriedade mais importante é a relação entre a força de corte aplicada e o deslizamento na interface com o betão devido a essa força (Martins, 2008).

A relação carga/deslizamento de um conector está ilustrada na Figura 2.3, fornecendo as suas características mais importantes, como a carga máxima que suporta, a sua ductilidade, o seu comportamento perante cargas de serviço, entre outros. Gráficos deste género são obtidos a partir de ensaios à escala real ou de ensaios *push-out*, estes últimos especificados no anexo B do Eurocódigo 4 e descritos no capítulo 4 da presente dissertação.

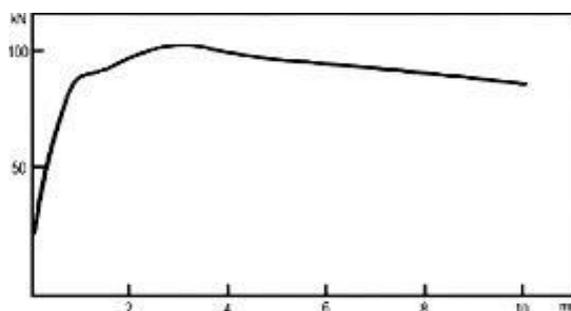


Figura 2.3- Curva carga/deslizamento típica de conectores *Stud* com 19mm de diâmetro numa viga mista (Johnson, 1994)

2.5 Tipos de Conectores

Desde o início da construção com recurso a estruturas mistas que novos tipos de conectores têm sido desenvolvidos, sendo que atualmente existe uma ampla gama destes dispositivos. Apesar de diferirem uns dos outros pela geometria, conceção, material, entre outros fatores, têm todos a mesma função, a de atuar como tarugos de aço, soldados ou cravados ao perfil de aço e envolvidos no betão, de maneira a resistir ao esforço longitudinal de corte.

Tendo em conta a aplicabilidade prática das várias soluções, os conectores que apresentavam mais fácil aplicação e dos quais se obtinha uma resposta mais satisfatória, eram os conectores tipo *Stud*. Estes são inclusive os únicos para os quais o Eurocódigo 4, atualmente, fornece expressões de cálculo bem como disposições construtivas. No entanto, outros tipos de conectores podem ser utilizados, desde que se proceda a ensaios à escala real ou *push-out* de maneira a aferir acerca da sua utilização, tal como o exposto no ponto 12 da cláusula 6.6.1.1. do Eurocódigo 4: “No caso de se recorrer a métodos de interligação diferentes dos conectores abrangidos neste capítulo (conectores de corte) para realizar a transferência de forças longitudinais entre um elemento metálico e um elemento de betão, o comportamento assumido no dimensionamento deve ser baseado em testes e suportado por um modelo teórico. O cálculo de um elemento misto deve estar de acordo com o cálculo de um elemento semelhante empregando os conectores de corte incluídos neste capítulo, no caso *studs*, desde que possível”.

2.5.1 Conector tipo bloco ou rígido

Na edição de 1994 do Eurocódigo 4, eram fornecidas expressões de cálculo para outros métodos de interligação entre o elemento metálico e as lajes maciças de betão, para além dos *studs*. Os conectores representados na Figura 2.4 podiam ser dimensionados como conectores de bloco, desde que cumprissem as disposições construtivas da cláusula 6.4.4.



Figura 2.4-Exemplos de conectores de corte tipo bloco ou rígidos (Eurocódigo 4, CEN 1994)

Para este tipo de conectores, o Eurocódigo 4 na versão de 1994 fornecia a seguinte fórmula para avaliar o valor de cálculo da força resistente ao corte, P_{Rd} :

$$P_{Rd} = \frac{\eta A_{f1} f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

A_{f1} corresponde à área da superfície frontal, A_{f2} é a área da superfície frontal aumentada, como exemplificado na Figura 2.5, η é um fator que considera a densidade do betão envolvente, igual a $\sqrt{A_{f2}/A_{f1}}$, sempre inferior ou igual a 2,5 para betão de densidade normal e 2 para betão leve, f_{ck} é o valor característico da tensão de rotura do betão à compressão e γ_c corresponde ao fator de segurança para o betão.

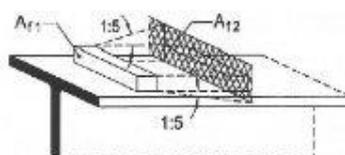


Figura 2.5- Parâmetros para conectores tipo bloco ou rígidos (Eurocódigo 4, CEN 1994)

2.5.2 Conector tipo “Stud”

O conector mais correntemente utilizado, *Stud* ou *Nelson*, é um conector circular tipo perno de cabeça (Figura 2.6).

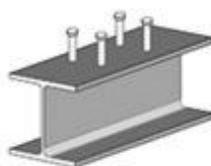


Figura 2.6- Conectores do tipo *Stud* soldados ao banço superior de uma viga metálica (Verissimo *et al*, 2006)

Destaca-se das outras soluções devido à equivalência da resistência em todas as direções normais ao seu eixo e ao seu bom comportamento. Foi desenvolvido na década de 40 do séc. XX pela *Nelson Stud Welding*, daí serem também apelidados por conectores tipo *Nelson*. Foi projetado para funcionar como elétrodo de solda por arco elétrico (Figura 2.7) e uma vez acabada a soldadura, como conector de corte. Devido às dimensões padronizadas da “cabeça”, proporciona boa resistência ao *uplift*.



Figura 2.7- Solda por arco elétrico conector *stud* (NELSONSTUD@, 2015)

Estes conectores usualmente tem dimensões padrão disponíveis em catálogos. No entanto, o Eurocódigo 4, na cláusula 6.6.5.7 define uma gama de possibilidades para a geometria destes conectores. Entre estas, a altura total (L) não deve ser inferior a 3 vezes o diâmetro do fuste (D), o diâmetro da cabeça (HD) não deve ser inferior a 1,5 vezes o diâmetro do fuste e a altura da cabeça (HT) não deve ser inferior a 0,4 vezes o diâmetro do fuste (Figura 2.8).

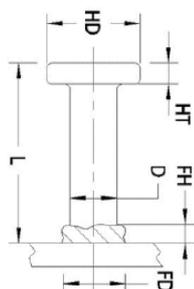


Figura 2.8- Geometria de um conector *stud* (Martins, 2008)

Em relação à ductilidade e à capacidade de redistribuir a força de corte, o Eurocódigo 4, na cláusula 6.6.1.2 (1), refere que os *Studs* com comprimento total de 4 vezes o diâmetro, após soldadura, com diâmetro do fuste superior a 16mm e inferior a 25mm, poderão ser considerados como dúcteis.

O Eurocódigo 4 (cláusula 6.6.3.1) define a resistência ao corte de um conector do tipo *Stud* como o menor dos valores fornecidos pelas seguintes expressões:

$$P_{Rd} = \frac{0,8f_u(\pi d^2/4)}{\gamma_v} \quad (2)$$

ou

$$P_{Rd} = \frac{0,29\alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_v} \quad (3)$$

em que f_u corresponde ao valor da tensão última do aço do *stud* ($\leq 500\text{MPa}$), d representa o diâmetro do fuste do conector, a resistência característica do betão e o seu módulo de elasticidade secante são representados por f_{ck} e E_{cm} , respetivamente, e o parâmetro α é definido na cláusula 6.6.3.1. A resistência ao corte do conector é dada pela equação 2, enquanto que a equação 3 corresponde à resistência do betão envolvente.

O dimensionamento deste tipo de conectores é ainda previsto por outras normas, fornecendo expressões para a determinação da resistência dos conectores, entre as quais as normas americana do *American Institute of Steel Construction* (equação 4) e a canadiana do *Canadian Standards Association* (equação 5):

$$Q_n = 0,5 A_{sc} \sqrt{f'_c E_c} \leq A_{sc} F_u \quad (4)$$

$$q_{rs} = 0,5 \phi_{sc} A_{sc} \sqrt{f'_c E_c} \leq \phi_{sc} A_{sc} F_u \quad (5)$$

onde A_{sc} corresponde à área da secção do fuste do conector *Stud*, f'_c diz respeito à resistência específica à compressão do betão, o módulo de elasticidade do betão é dado por E_c , F_u corresponde à resistência mínima especificada de tração do aço do conector e ϕ_{sc} corresponde ao fator de resistência, devendo ser considerado como 0,8.

A Figura 2.9 compara as três especificações referidas (Easterling *et al*, 1993):

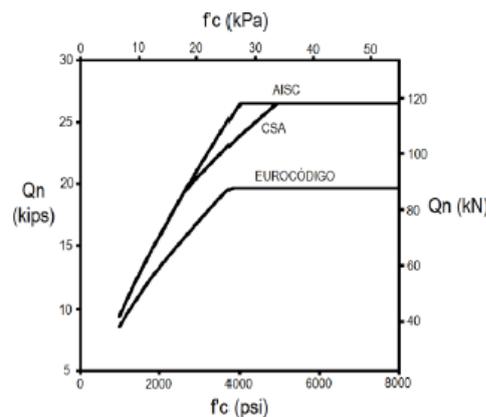


Figura 2.9-Comparação da resistência ao corte de conectores *stud* fornecidas pelas especificações AISC, CSA e Eurocódigo 4 (Easterling *et al*, 1993).

Uma vez que em zonas sujeitas a grande esforço de corte era necessário uma grande concentração de *studs* com dimensões regulares (19 ou 22mm de diâmetro), provocando um

longo tempo de soldadura e tornando mais difícil a remoção de lajes deterioradas (quando fosse necessária reparação), Lee *et al* (2005) procederam a ensaios *push-out*, estáticos e sob cargas cíclicas, em *studs* com 25, 27 e 30mm de diâmetro, para estudar o comportamento de *studs* com maiores dimensões que as previstas na regulamentação.

Com base nos resultados experimentais, Lee *et al* (2005) concluíram que para *Studs* de maiores dimensões é possível obter uma adequada qualidade de soldadura usando uma máquina de soldar corrente, obtendo-se também valores aceitáveis em relação à resistência última da conexão (cerca de 1,59 vezes superiores), bem como relativamente à ductilidade. Além disso, verificaram que as expressões de dimensionamento fornecidas pelo Eurocódigo 4 (equação 2 e equação 3) podem ser aplicadas a *Studs* até 30mm de diâmetro.

A crescente utilização deste tipo de conectores a nível mundial deveu-se às várias vantagens que oferecem. Entre as quais, a sua produtividade (resultado da rápida velocidade de soldadura), o facto de assegurar uma boa ancoragem no betão, a facilidade de colocação de armadura entre conectores, além do custo competitivo.

No entanto, este tipo de conectores apresenta algumas limitações. Destacam-se a sua fraca resistência à fadiga (sendo ainda menor no caso dos *Studs* de maiores dimensões), a necessidade de um equipamento de solda especial (necessitando de alta potência elétrica em estaleiro). Além disso, tal como havia sido referido anteriormente, quando as vigas mistas estão sujeitas a grande esforço de corte, é necessário um grande número de conectores (pois possuem pouca resistência individual), com espaçamento reduzido entre eles.

2.5.3 Conector tipo “*Channel connectors*”

O conector do tipo “*channel*” é obtido a partir da soldadura de um pedaço de perfil em U (podendo este ser laminado ou enformado a frio) ao banzo superior do perfil, como ilustrado na Figura 2.10. Este tipo de conector pode ser produzido em diferentes tamanhos, consoante o tamanho dos perfis comerciais. Tem como principal vantagem o seu bom comportamento à fadiga, isto é, quando se encontra sujeito a cargas cíclicas.

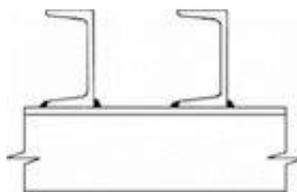


Figura 2.10 - *Channel connector* (Johnson, 1994)

2.5.4 Conector tipo “Hat”

Uma solução alternativa em forma de chapéu (Figura 2.11) foi apresentada por investigadores sul-coreanos (Kim *et al*, 2011). Realizaram um estudo experimental, através de ensaios *push-out*, com o objetivo de avaliar a capacidade de carga. Além do estudo experimental foi realizada uma análise numérica, com base no método de elementos finitos, de modo a verificar a distribuição de tensões nos conectores.



Figura 2.11- Conectores do tipo “Hat” (Kim *et al*, 2011)

Quando comparada com outras soluções (*Stud*, *Perfobond*, *Crestbond*, entre outras), esta solução destacou-se de entre todas as outras pelo seu melhor comportamento ao corte.

2.5.5 Conector tipo “Hilti”

Como alternativa aos conectores soldados, a empresa *Hilti Corporation* desenvolveu um conector de corte cravado denominado por “*Hilti X-HVB*”. A sua fixação é executada através de fixadores pirotécnicos, projetados por uma ferramenta específica (Figura 2.12).



Figura 2.12- Conectores do tipo “*Hilti X-HVB*”, Pregos de fixação e ferramenta de fixação (Hilti@, 2015)

Apesar do facto de este tipo de conectores possuírem uma menor resistência, quando comparados com os restantes conectores, possuem diversas vantagens. Entre estas destaca-se o facto de durante o processo de fixação não ser necessária eletricidade nem mão-de-obra qualificada, podendo assim qualquer trabalhador com prática instalar os conectores com

segurança e rapidez. Dada a sua facilidade de execução, estes conectores são úteis quando se pretende fornecer resistência adicional ao corte em lajes mistas.

Adicionalmente, cumprem o critério de ductilidade do Eurocódigo 4, sendo assim possível colocar a hipótese de comportamento plástico da conexão.

2.5.6 Conector tipo “CR” ou “*Crestbond*”

Os conectores do tipo “CR” ou “*Crestbond*” são formados por uma chapa dentada, de corte simétrico, com saliências e reentrâncias trapezoidais (Figura 2.13). A colocação da armadura na laje torna-se um processo facilitado devido à geometria destes conectores. Além disso, as saliências e reentrâncias fornecem aos conectores a resistência ao corte longitudinal desejada, com o funcionamento do betão de forma semelhante ao pino virtual, bem como uma boa resposta ao efeito de *uplift*.

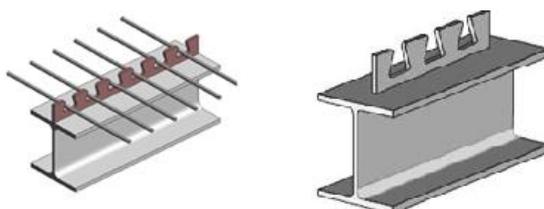


Figura 2.13- Conector tipo *Crestbond*: Contínuo (à esquerda) e interrompido (à direita)
(Figueiredo, 2012)

De acordo com os resultados obtidos experimentalmente por Veríssimo *et al* (2006), a resistência do betão envolvente e a armadura transversal ao conector influenciam tanto a capacidade de carga como a ductilidade da conexão. Assim, é possível controlar a capacidade de conexão variando estes dois fatores (resistência do betão e armadura transversal).

A nível de comparação, tendo por base os resultados obtidos no estudo acima referido, estes conectores têm como vantagem o facto de poderem ser facilmente produzidos em grande escala, facilidade em variar a geometria, a facilidade na soldadura ao perfil metálico, além de possuírem uma maior resistência que os *Studs* (equipara-se a resistência de um único conector a um grupo de 4 *studs*) e maior rigidez para cargas de serviço. Em ligações realizadas com estes conectores, a rotura não se dá por corte do conector, sendo a deformação muito elevada (Verissimo *et al*, 2006), traduzindo-se numa rotura dúctil.

2.5.7 Conector tipo “Perfobond”

Como alternativa aos conectores do tipo *stud*, que apresentam baixo desempenho à fadiga, para a realização da 3ª ponte sobre o rio Caroni na Venezuela, a empresa alemã *Leonhardt, Andra and Partners*, desenvolveu em 1987 um conector de corte denominado por *Perfobond* (Zellner, 1987). Este conector consiste numa chapa plana de aço, com aberturas circulares e soldada sobre o banzo superior da viga de aço. O *Perfobond* pode ser utilizado de modo contínuo ou descontínuo (Figura 2.14).

Quando as aberturas são preenchidas com betão formam cilindros (pinos virtuais) de maneira a resistir ao corte longitudinal, além de prevenirem o levantamento do betão em relação ao perfil metálico, ou seja, *uplift* (Figura 2.15). Adicionalmente, é possível fornecer um aumento da resistência do conector, colocando armadura a passar pelos furos.



Figura 2.14- Conector tipo *Perfobond* (Verissimo *et al*, 2006) e utilização destes em modo descontínuo em estruturas mistas (Costa *et al*, 2010)

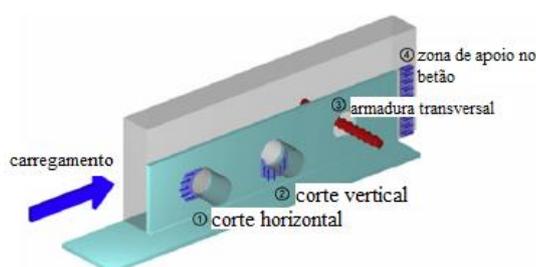


Figura 2.15- Comportamento mecânico do conector *Perfobond* (Ahn *et al*, 2010)

Este tipo de conector apresenta várias vantagens, entre as quais destacam-se a facilidade de produção em grande escala, o facto de a soldadura poder ser efetuada tanto em obra como em fábrica sem recurso a equipamentos especiais, bem como os diferentes tamanhos que pode assumir. Além destas, destaca-se ainda o bom comportamento à fadiga.

São vários os autores que têm estudado o conector *Perfobond*, tendo sido realizados inúmeros ensaios de maneira a determinar a resistência deste conector. De entre os estudos realizados referem-se os de Zellner (1987), Ogueijofor e Hosain (1994, 1997), Medberry e Shahrooz (2002), Neves e Lima (2005), Veríssimo *et al* (2007), Al-Darzi *et al* (2007), Vianna *et al* (2007, 2008, 2009, 2012), Cândido Martins *et al* (2010), Neves *et al* (2013), entre outros.



Figura 2.16- Fotografia de um conector do tipo *Perfobond* (Vianna, 2009)

Segundo os estudos realizados por estes autores, a resposta estrutural do *Perfobond* é influenciada por vários parâmetros, tais como, a geometria do conector (comprimento, altura e espessura da chapa), o número de furos, a resistência do betão à compressão, bem como a presença de armadura transversal. Concluiu-se também que podem ter comportamento dúctil.

2.5.8 Conector tipo “*T-Perfobond*”

Velasco *et al* (2007) propuseram um tipo de conector em bloco, com a geometria de um *Perfobond* mas em forma de “T”, o *T-Perfobond* (Figura 2.17). Este foi inicialmente projetado por Ferreira (2000) para ligações de extremidade viga-coluna.

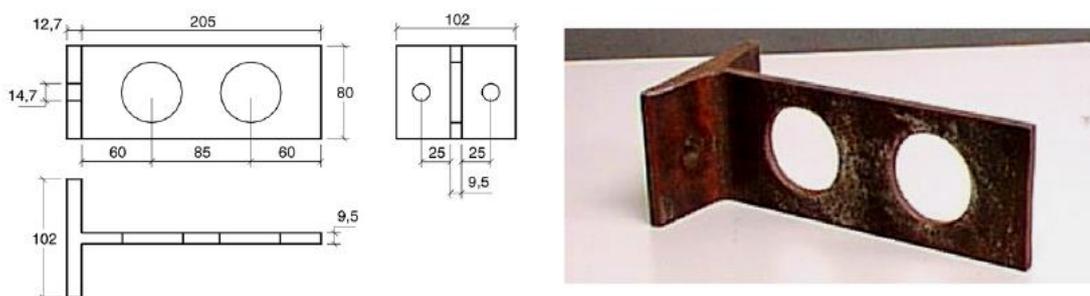


Figura 2.17-Geometria do conector "*T-rib*" (Velasco *et al*, 2007)

O *T-Perfobond* foi desenvolvido com o objetivo de aumentar a capacidade resistente do *Perfobond*. Essa capacidade resistente é conseguida pela ancoragem formada pelo banzo em “T”. Este conector pode ser considerado como o resultado da junção de um *T-connector*, do Eurocódigo 4, com o *Perfobond* (Figura 2.18).

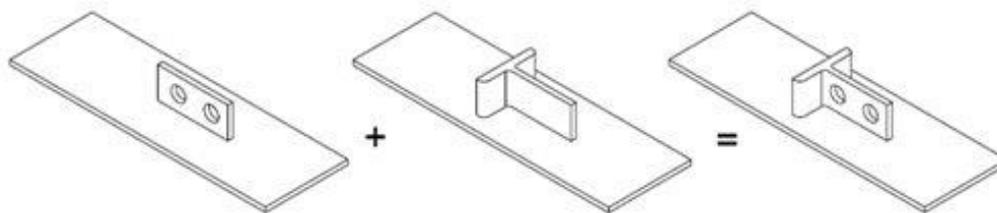


Figura 2.18- Conceção do conector *T-Perfobond* (Vianna, 2009)

Tem como vantagem o facto de ser produzido a partir de perfis laminados, através do seu corte na alma, não sendo assim necessário produzir um novo elemento de ligação específico, como acontece na generalidade dos restantes conectores.

De acordo com os ensaios experimentais realizados por Vianna *et al* (2008), quando comparados com os conectores *Perfobond*, os *T-Perfobond* oferecem uma maior capacidade de carga bem como maior rigidez. No entanto, não apresentou um comportamento dúctil, sendo assim necessário proceder a um dimensionamento elástico, tornando-se por isso menos económico.

2.5.9 Conector tipo “*I-Perfobond*”

Figueiredo (2012) e Neves *et al* (2013) propuseram duas soluções inovadoras, uma delas foi o *I-Perfobond*. O *I-Perfobond* estudado era composto por uma parte de um perfil IPE300, furado como o conector *Perfobond*, e soldado ao banzo da viga (Figura 2.19).

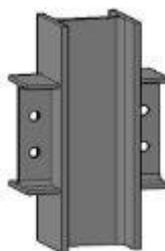


Figura 2.19- Conector do tipo *I-Perfobond* (Figueiredo, 2012)

Os ensaios experimentais realizados consistiram em ensaios *push-out* sujeitos a carregamentos monotónicos e cíclicos. Verificou-se um aumento substancial da capacidade de carga, quando comparado com o *T-Perfobond*, mas com ductilidade insuficiente para poder ser considerada uma análise plástica. É também importante referir que a carga máxima foi atingida para um deslocamento relativo de apenas 2mm entre a laje de betão armado e o conector.

No entanto, nos ensaios cíclicos, o autor verificou que o conector *I-Perfobond* foi o que apresentou melhor desempenho. Tal deve-se ao facto de o conector dispor de uma simetria bem definida, com os banzos suficientemente afastados, permitindo que o betão esteja confinado no seu interior.

2.5.10 Conector tipo “2T-Perfobond”

Outra das soluções inovadoras propostas por Figueiredo (2012) e Neves *et al* (2013) foi o *2T-Perfobond*. Este conector também era composto por um perfil IPE300, cortado a meio e soldado ao banzo do perfil, como ilustrado na Figura 2.20. É importante referir que o afastamento entre banzos foi de 50mm, e que esta solução foi criada na expectativa de melhorar a ductilidade.

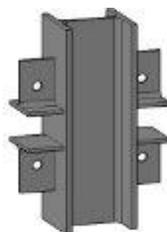


Figura 2.20- Conector do tipo *2T-Perfobond* (Figueiredo, 2012)

Tal como havia sucedido no *I-Perfobond*, este conector também foi submetido a ensaios *push-out* sujeitos a carregamentos monotónicos e cíclicos. Como era desejável, o autor observou que esta solução apresentava melhorias na ductilidade quando comparada com o *T-Perfobond* e com o *I-Perfobond*, no entanto, a ductilidade exigida no Eurocódigo ainda não havia sido verificada. Em relação à capacidade de carga, esta foi a solução que atingiu maior valor absoluto, tendo atingido cerca de 820kN na configuração com armadura passante nos furos.

Nos ensaios cíclicos, ao contrário do que havia sido verificado nos ensaios monotónicos, o *T-Perfobond* não foi o que maior capacidade de carga registou, uma vez que não foi obtido o maior número de ciclos. Além disso, o autor verificou ainda que na presença de armadura, o número de ciclos necessários para atingir a rotura era inferior quando comparado com a configuração sem presença de armadura.

2.5.11 Conector tipo “Y-type Perfobond”

Com base no conector *Perfobond*, os coreanos Kim *et al* (2013) desenvolveram o *Y-type Perfobond*. Este difere no aspeto em que a chapa se encontra inclinada para um e outro lado,

alternadamente. Esta chapa pode ser uma extensão da alma do perfil ou então uma nova chapa soldada ao banzo (Figura 2.21). O espaço entre a alternância de lado, dobras do Y, dispõe na mesma dos furos, de maneira a ser possível a colocação de armadura bem como a formação dos pinos virtuais no interior da laje e nas zonas das dobras do Y.

Nos ensaios experimentais, os autores optaram por variar alguns parâmetros, tais como: a inclinação da chapa (0° e 60°), a espessura da chapa (8mm e 10mm), a resistência do betão (30MPa e 40MPa) e a existência ou não de armadura transversal. Concluíram que o *Y-type Perfobond* tem uma maior capacidade de carga quando comparado com o *Perfobond*. Forneceu também melhores resultados na ductilidade que o *Perfobond*.

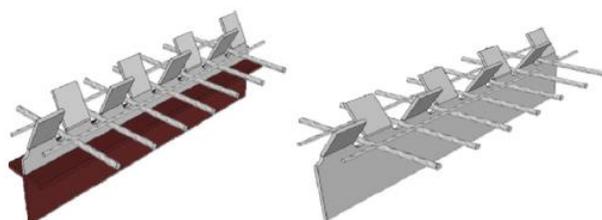


Figura 2.21- Conector *Y-type Perfobond*, soldado ao banzo (à esquerda) e como extensão da alma (direita) (Kim *et al*, 2013)

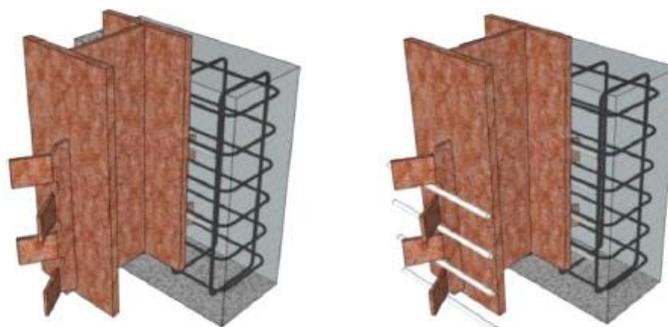


Figura 2.22- Perspectiva 3D de provetes de conectores *Y-type Perfobond*: sem armadura (à esquerda), com armadura (à direita) (Kim *et al*, 2013)

A nível da variação dos parâmetros e influência destes, os autores constataram que aumentando a resistência do betão a capacidade de carga aumentava também. A presença de armadura transversal contribuiu também para um aumento da capacidade de carga, no entanto, a ductilidade diminuía. Verificaram um aumento da capacidade de carga bem como da ductilidade relacionado com o aumento da espessura da chapa

3. O Conector *Perfobond*

3.1 Estudos Previamente Realizados e Modelos Analíticos Existentes

O conector *Perfobond* surgiu em 1987, desenvolvido pela empresa alemã *Leonhardt, Andra and Partners*, com o objetivo de resistir melhor à fadiga que os conectores existentes até à data. Desde então até aos dias de hoje, muitos têm sido os autores que têm contribuído para a criação de modelos de cálculo, com vista à determinação da capacidade resistente deste conector.

Ogueijofor e Hosain (1992) procederam à realização de 6 ensaios em vigas mistas à escala real, com o objetivo de avaliar a viabilidade dos conectores *Perfobond* em sistemas de pisos mistos. Os ensaios experimentais eram compostos por 3 provetes com conectores *Stud* e outros 3 provetes com conectores *Perfobond*. As variáveis adotadas foram o tipo de laje, com ou sem chapa colaborante, a espessura da laje e a espessura da chapa colaborante. Através dos resultados obtidos experimentalmente, os autores concluíram que os conectores *Perfobond* eram uma alternativa viável, uma vez que um *Perfobond* com 4 furos obteve resultados tão satisfatórios como um agrupamento de 24 *studs*. Além disso, todos os provetes demonstraram um comportamento dúctil.

Um par de anos mais tarde, os mesmos autores, Ogueijofor e Hosain, (1994), dando continuidade aos trabalhos anteriores, procederam à realização de 40 ensaios do tipo *push-out* com o objetivo de avaliar alguns parâmetros para propor uma equação que permitisse calcular a capacidade resistente. Variando a quantidade de furos e espaçamento entre eles, a presença ou não de armadura transversal e a resistência do conector, propuseram então a primeira equação para o cálculo da capacidade resistente:

$$q_u = 0,590A_c\sqrt{f_{ck}} + 1,233A_{tr}f_y + 2,871nd^2\sqrt{f_{ck}} \quad (6)$$

No entanto, uma vez que a equação anterior sobrestima a capacidade resistente, pois sobreavalia a contribuição da resistência de ponta e da contribuição da armadura transversal, em 1997, os mesmos autores realizaram um estudo numérico do comportamento do conector *Perfobond* através do método dos elementos finitos com recurso ao *software* ANSYS. Realizando então 14 ensaios do tipo *push-out* numericamente, validando os mesmos com ensaios experimentais com as mesmas características, chegaram à seguinte equação:

$$q_u = 4,50h_{sct}f_{ck} + 0,91A_{tr}f_y + 3,31nd^2\sqrt{f_{ck}} \quad (7)$$

Nestas equações, q_u corresponde à resistência nominal ao corte do conector (N), A_c é a área de betão ao corte por conector (mm²), f_{ck} corresponde à resistência característica do betão à compressão (MPa), A_{tr} é a área total de armadura transversal na laje (mm²), f_y corresponde à tensão nominal das armaduras da laje (MPa), n é o número de furos, d corresponde ao diâmetro dos furos do conector (mm), h_{sc} à altura do conector (mm) e t_{sc} à espessura do conector (mm).

Através de ensaios experimentais, Ushijima *et al* (2001) investigaram algumas variáveis que até então não haviam sido estudadas. Então, nos ensaios *push-out* realizados, variaram: a espessura da chapa do conector, a presença de armadura passante nos furos e diâmetro dos furos. Com base nos resultados obtidos, para calcular a resistência do *Perfobond*, propuseram duas equações: uma considerando a presença de armadura (equação 8) e outra sem armadura passante nos furos (equação 9). Estas fornecem a resistência apenas através contribuição dos furos do conector.

$$q_u = 1,45[(d^2 - d_{st}^2)f_{ck} + d_{st}^2f_y] - 26,1 \quad (8)$$

Limitada pela condição

$$51 < (d^2 - d_{st}^2)f_{ck} + d_{st}^2f_y < 488 \quad (9)$$

$$q_u = 3,38d^2 \sqrt{\frac{t_{sc}}{d}} f_{ck} - 39 \quad (10)$$

Também limitada pela condição

$$22 < d^2 \sqrt{\frac{t_{sc}}{d}} f_{ck} < 194 \quad (11)$$

Nas quais d_{st} corresponde ao diâmetro das armaduras que passam pelos furos (mm), e as restantes variáveis têm o mesmo significado que nas expressões anteriores.

Medberry e Shahrooz (2002) realizaram 30 ensaios *push-out* e compararam os resultados obtidos com alguns dos resultados relatados por Ogueijofor e Hosain, (1994). Com base nos resultados experimentais propuseram uma nova equação para o cálculo da resistência do conector *Perfobond*, verificando a contribuição de cada termo através de uma análise numérica.

Segundo estes autores as equações propostas por Ogueijofor e Hosain (equação 6 e 7) são limitadas a conectores com 12,7mm de espessura, diâmetro máximo dos furos de 50mm, distância entre furos inferior ou igual a 2,25D e resistência do betão entre os 20 e os 40 MPa. Desta forma, os autores propuseram a seguinte equação, que considera a contribuição de outros termos não considerados até então, tais como a contribuição da laje de betão e a ligação química:

$$q_u = 0,747bh\sqrt{f_{ck}} + 0,413b_fL_c + 0,9A_{tr}f_y + 1,66n\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2\sqrt{f_{ck}} \quad (12)$$

Onde, b corresponde à espessura da laje de betão (mm), h é a altura do conector (mm), igual a h_{sc} , b_f é a largura do banzo do perfil metálico (mm), L_c corresponde ao comprimento de contacto entre o betão e o banzo do perfil metálico (mm), e as restantes variáveis têm o mesmo significado que nas expressões anteriores.

Com o objetivo de reforçar uma estrutura de betão armado, Neves e Lima (2005), utilizaram uma nova conceção de aplicação do conector *Perfobond*. Estes eram compostos por 6 furos e foram dispostos em paralelo na viga. Além da consideração do modo de ruína usualmente condicionante, esmagamento e corte do betão, os autores desenvolveram um modelo de elementos finitos de maneira a avaliar a segurança relativamente a outro modo de ruína, a resistência do próprio conector.

Kim e Jeong (2006), realizaram uma série de ensaios experimentais, compostos por ensaios tipo *push-out*, ensaios à escala real e do tipo *deck-to-girder*, de maneira a testar o comportamento do conector *Perfobond* em lajes mistas com chapa colaborante. Com base nos resultados obtidos, os autores puderam observar que a carga última era mais de duas vezes superior que a carga que causava um deslizamento final possível de ser medido, considerando-se o comportamento da laje mista como dúctil. Assim, concluíram que era fiável o uso de conector *Perfobond* em lajes mistas compostas com chapa colaborante.

Anos mais tarde, Jeong *et al* (2009), procederam a ensaios tipo *push-out* e 16 ensaios a escala real de maneira a avaliar os conectores *Perfobond* também em lajes mistas com chapas colaborantes. A resistência ao corte das lajes mistas para pontes sujeitas a cargas superficiais, foi avaliada neste estudo através do método *m-k*. De acordo com os resultados obtidos, a resistência ao corte da laje resultante das cargas superficiais, correspondeu com a resistência ao corte puro obtida através dos ensaios *push-out*. Por outro lado, o valor da resistência ao corte foi sobrestimado quando o comprimento do vão de corte diminuiu. Os autores referem que tal se deveu à força de atrito entre a chapa de aço e o betão, uma vez que esta aumenta com o aumento do esforço normal na interface. Recomendam então a adoção de um vão de corte tal que os efeitos do esforço normal na interface possam ser considerados insignificantes.

Durante o estudo do conector *Crestbond*, Veríssimo (2006), notou que caso considerasse a influência da taxa de armadura e da excentricidade do conector, obteria na equação resultados mais próximos dos obtidos experimentalmente. Assim, com base nas equações anteriores, propôs a seguinte equação:

$$q_u = 4,04 \frac{h_{sc}}{t_c} h_{sc} t_{sc} f_{ck} + 2,37 n d^2 \sqrt{f_{ck}} + 0,16 A_{cc} \sqrt{f_{ck}} + 31,85 \times 10^6 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (13)$$

Onde t_c corresponde à espessura da laje (mm) e A_{cc} é a área de corte do betão por conector (à área longitudinal da laje é subtraída a área do conector) (mm²), sendo que os restantes parâmetros já são conhecidos das expressões anteriores.

Al-Darzi *et al* (2007), recorreram a uma análise numérica através de um modelo de elementos finitos para averiguar a contribuição de vários parâmetros. Simulando os ensaios *push-out* através do *software* de elementos finitos ANSYS, estudaram a contribuição da altura e espessura do conector, a área transversal, a resistência à deformação e resistência à compressão dos furos do conector. Tendo em conta os resultados obtidos, os autores propuseram a seguinte equação para o cálculo da resistência do conector *Perfobond*:

$$q_u = 255,31 + 7,62 \times 10^{-4} h_{sc} t_{sc} f_{ck} - 7,59 \times 10^{-7} A_{tr} f_y + 2,53 \times 10^{-3} A_{sc} \sqrt{f_{ck}} \quad (14)$$

Nesta, q_u , resistência última ao corte do conector é expressa em kN, e A_{sc} corresponde à área de betão nos furos do conector, sendo determinada através de $2n(\pi d^2/4)$. No entanto, segundo os autores, esta expressão é aconselhável apenas para valores das variáveis dentro dos valores limite estudados.

Para avaliar o comportamento do conector *Perfobond* ao corte sob carregamento estático e cíclico, Ahn *et al* (2008), realizaram uma série de ensaios *push-out*. Os ensaios foram realizados com o objetivo de avaliar o efeito dos pinos de betão, da presença de armadura transversal passante nos furos e o comportamento perante carregamento cíclico. Os autores verificaram que a capacidade de carga, tanto sobre carregamento estático como sobre carregamento cíclico, aumenta com a presença de armadura passante nos furos. Desta forma, concluíram que em pontes sujeitas a carregamentos cíclicos, deve-se utilizar armadura nos furos dos *Perfobond*, impedindo que haja perda de capacidade de carga.

Vianna *et al* (2008) procederam à avaliação experimental do comportamento estrutural de conectores *Perfobond* e *T-Perfobond*. Nos ensaios experimentais do tipo *push-out* foram utilizadas várias geometrias. Utilizaram conectores com 76,2 mm de altura para lajes de 120mm de espessura e conectores de 150mm para lajes de 200mm de espessura.

Na figura seguinte encontram-se as geometrias utilizadas para os conectores *Perfobond*.

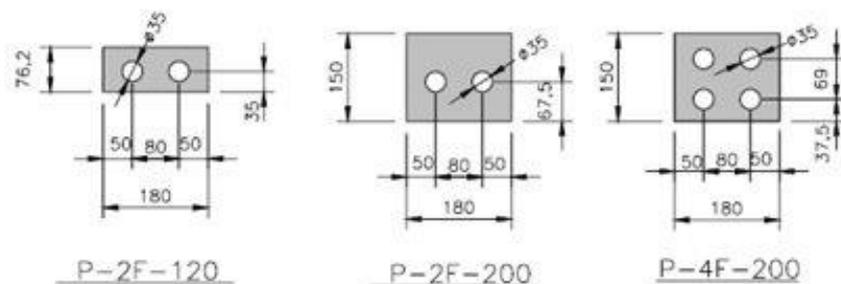


Figura 3.1- Geometria dos conectores *Perfobond* (Vianna *et al*, 2008)

O programa experimental consistiu em duas séries de ensaios, sendo que na primeira série foi utilizado um betão de 25MPa sem armadura passante nos furos e na segunda série o betão utilizado era da classe C50/60, variando a passagem ou não de armadura pelos furos. As características dos modelos ensaiados encontram-se representadas no quadro seguinte. No mesmo encontram-se também os ensaios realizados com *T-Perfobond*, os quais não serão analisados pois não são alvo de estudo na presente dissertação.

Quadro 3.1- Características geométricas dos ensaios (Vianna *et al*, 2008)

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				

Os resultados experimentais obtidos foram comparados com as equações propostas por Oguejiofor e Hosain (1997), Ushijima *et al* (2001), Medberry e Shahrooz (2002), Al-Darzi *et al* (2007) e Veríssimo (2007), e encontram-se no quadro seguinte.

Quadro 3.2- Resultados experimentais vs resultados teóricos para o conector *Perfobond* (Vianna *et al*, 2008)

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

Analisando os resultados obtidos, os autores concluíram que as expressões que mais se aproximaram dos resultados experimentais foram Medberry e Shahrooz (2002), Al-Darzi *et al* (2007) e Veríssimo (2007), sendo que a expressão que melhor representa os valores de cálculo é a proposta por Al-Darzi *et al* (2007).

Martins *et al* (2010) publicaram um estudo experimental no qual avaliaram a resposta estrutural de conectores *Perfobond*. Realizaram 8 ensaios *push-out*, variando alguns parâmetros, tais como o número de furos no conector e a presença de armadura passante nos furos. Além do estudo da influência destes parâmetros, foi ainda avaliada a possível interação de dois conectores *Perfobond* dispostos lado a lado. A configuração dos conectores ensaiados encontra-se na Figura 3.2, e as características dos ensaios no Quadro 3.3.

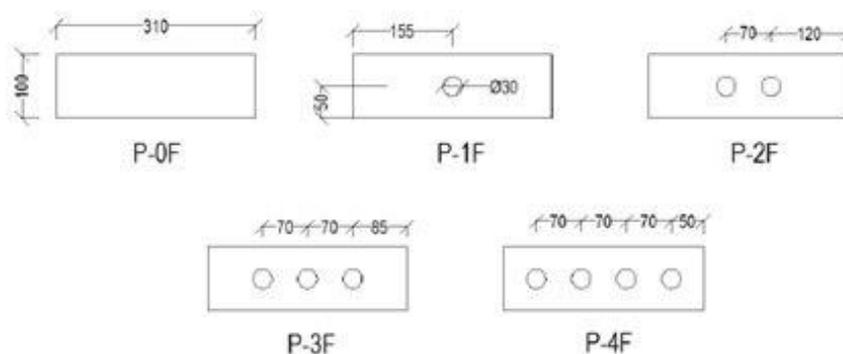


Figura 3.2- Configuração geométrica dos conectores ensaiados (Martins *et al*, 2010)

Quadro 3.3- Características geométricas dos ensaios (Martins *et al*, 2010)

Ensaio	Denominação	Laje de betão				Conector			
		t_c (mm)	h_c (mm)	l (mm)	h (mm)	AR (mm)	D (mm)	t (mm)	n
1	P-0F					-			0
2	P-1F					-			1
3	P-2F					-			2
4	P-3F					-			3
5	P-4F	150	600	310	100	-	30	15	4
6	P-AR12-1F					12			1
7	P-AR20-1F					20			1
8	2xP-1F					-			1

Uma vez realizados os ensaios, os autores chegaram a algumas conclusões com base nos resultados obtidos, expressos no Quadro 3.4.

Quadro 3.4- Resultados dos ensaios *push-out* para o conector *Perfobond* (Martins *et al*, 2010)

Conector/ Ensaio	P_{teste} (kN)	P_{rk} (kN)	$P_{rk, norm}$ (kN)	P_{rd} (kN)	δ_u (mm)	δ_{ult} (mm)
P0F A					15,34	13,81
P0F B					15,32	13,79
P1F A	309,44	278,49	276,13	220,90	9,50	8,55
P1F B					10,15	9,14
P2F A	317,52	285,77	284,30	227,44	17,80	16,02
P2F B					17,44	15,70
P3F A	331,35	298,22	296,69	237,35	10,76	9,68
P3F B					10,52	9,47
P4F A	354,03	318,627	317,40	253,92	10,00	9,00
P4F B					9,44	8,50
P1F-AR 12 A	365,93	329,34	328,07	262,46	10,28	9,25
P1F-AR 12 B					10,42	9,38
P1F-AR 20 A	395,68	356,11	355,02	284,02	11,44	10,30
P1F-AR 20 B					11,10	9,99
2 P1F A	546,84	492,16	490,65	392,52	2,96	2,66
2 P1F B					2,02	1,82

Uma primeira e importante conclusão a reter é o facto de todos os conectores, exceto os conectores dispostos lado a lado (2P-1F), terem apresentado um comportamento dúctil, apresentando capacidade de deslizamento superior a 6mm. Além disso, os autores observaram que a adição de um furo correspondia a um ganho médio de 5% de resistência, sendo que é necessário pelo menos um furo para impedir um *uplift* indesejável e assegurar um bom comportamento. Constataram também que a capacidade do conector aumenta com a adição de armadura, verificando-se um ganho de resistência de 20% para armadura transversal $\varnothing 12$ e de cerca de 30% para $\varnothing 20$.

Comparando os resultados obtidos experimentalmente com os modelos analíticos disponíveis, Martins *et al* (2010), concluíram que o modelo proposto por Al-Darzi *et al* (2007) é um pouco conservativo. Por outro lado, os modelos propostos por Oguejiofor e Hosain (1994), Medberry e Shahrooz (2002) e Veríssimo (2007) não se encontram do lado da segurança, sobrevalorizando a capacidade de carga dos conectores.

Ahn *et al* (2010) avaliaram a capacidade de carga do conector *Perfobond* através de ensaios *push-out* variando a resistência à compressão do betão, além de estudarem o comportamento de conectores *Perfobond* colocados lado a lado com diferente espaçamento - Figura 3.3.



Figura 3.3- Geometria dos ensaios dos conectores *Perfobond* (Ahn *et al*, 2010)

Os 21 ensaios *push-out* encontravam-se divididos em grupos. Os grupos eram compostos por 8 exemplares com variação da resistência à compressão do betão, 6 exemplares estavam destinados à configuração dos *Perfobond* colocados lado a lado, com base no rácio do espaçamento e 7 exemplares para avaliar o efeito dos pinos de betão e da presença de armadura transversal passante nos furos. Estes últimos exemplares eram provenientes do estudo realizado pelos mesmos autores dois anos antes (Ahn *et al*, 2008). A descrição dos ensaios encontra-se no quadro seguinte:

Quadro 3.5- Descrição dos ensaios *push-out* com conectores *Perfobond* (Ahn *et al*, 2010)

Grupo	Provetes	nº barras reforço transversal	Resistência à compressão do betão (MPa)	nº de Provetes	Espaçamento entre conectores (mm)
<i>Perfobond</i> Simples	PF-S-C27	4	27	2	-
	PF-S-C30	4	30	2	-
	PF-S-C40	4	40	2	-
	PF-S-C50	4	50	2	-
<i>Perfobond</i> lado a lado	PF-T-D0,5	4	30	2	64,5
	PF-T-D1	4	30	2	129
	PF-T-D2	4	30	2	258
<i>Perfobond</i> Simples Ahn et al (2008)	PF-S-A	0	30	3	-
	PF-S-B	0	30	2	*apoio de extremidade removido
	PF-S-C	4	30	2	-

Os autores concluíram que a capacidade de carga do conector *Perfobond* aumentava com o aumento da resistência à compressão do betão, tal como a ductilidade. Verificaram também que a presença de armadura transversal passante nos furos contribuiu também para um acréscimo de capacidade de carga e da ductilidade, como concluído pelos restantes investigadores.

Em relação aos conectores *Perfobond* dispostos lado a lado, a capacidade de carga de cada alinhamento de *Perfobond* correspondia a cerca de 80% da capacidade de carga de um conector *Perfobond* colocado isoladamente. Verificou-se também um comportamento dúctil dos agrupamentos, não obtendo valores tão expressivos como quando o conector é colocado isoladamente, mas na generalidade cumprindo o critério de ductilidade do Eurocódigo 4, com um deslizamento superior a 6mm.

Procedendo também a uma comparação entre os resultados obtidos e as expressões existentes para determinação da capacidade de carga do conector *Perfobond* com armadura transversal passante nos furos, os autores constataram que para os *Perfobond* simples as equações existentes, de maneira geral, subestimavam o valor da capacidade. Por outro lado, o valor da capacidade de carga era sobrestimado no caso dos conectores *Perfobond* dispostos lado a lado. Tendo por base os resultados obtidos e as equações existentes, os autores propuseram duas novas equações para estimar a capacidade de carga. Uma para disposição isolada dos conectores (equação 15), outra para a configuração em que os conectores *Perfobond* eram dispostos lado a lado (equação 16).

$$q_u = 3,14h_{sc}t_{sc}f_{ck} + 1,21A_{tr}f_y + 3,79n\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \sqrt{f_{ck}} \quad (15)$$

$$q_u = 2,76h_{sc}t_{sc}f_{ck} + 1,06A_{tr}f_y + 3,32n\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \sqrt{f_{ck}} \quad (16)$$

Kim *et al* (2011), no seu trabalho experimental composto por 3 tipos de conectores (duas configurações de *Studs* e 1 composta por *Perfobond* dispostos lado a lado) aplicaram pela primeira vez os conectores *Perfobond* em betão pré-esforçado. O trabalho experimental consistiu em ensaios a escala reduzida (1:4) e em ensaios à escala real, comparando os resultados com análise numérica. As configurações de *Perfobond* dispostos lado a lado variavam no espaçamento entre *Perfobond*, sendo este correspondente a $0,5h$, h e $2,0h$, onde h corresponde à altura do conector.

Dos resultados obtidos concluíram que a capacidade de carga de cada *Perfobond* correspondia a cerca de 80% a carga de um *Perfobond* isolado. Propuseram ainda uma equação (17) que permite determinar a carga última de vários conectores *Perfobond*.

$$Q_{ult,twin} = Q_{u,Pr} \times \phi_{Pr} \times N \quad (17)$$

$Q_{u,Pr}$, corresponde à força última de um *Perfobond* simples, determinada através da equação 11, proposta por Oguejiofor e Hosain (1997), ϕ_{Pr} , é o fator redutor que deve tomar o valor de 0,8 e N corresponde ao número de conectores. Os autores referiram ainda que não utilizaram o primeiro termo da equação 11 ($4,50h_{sc}t_{sc}f_{ck}$), uma vez que os *Perfobond* utilizados se encontravam soldados a uma chapa de topo. Concluíram ainda que a configuração com *Perfobond* dispostos lado a lado mostrou melhores resultados a nível estrutural que as configurações estudadas com *Studs*.



Figura 3.4- Ligação composta por conectores *Perfobond* lado a lado, antes e após a introdução de armadura de reforço (Kim *et al*, 2011)

Neves *et al* (2013) estudaram experimentalmente a resposta estrutural de vários conectores, nomeadamente *Perfobond*, *T-Perfobond*, *I-Perfobond* e *2T-Perfobond* (Quadro 3.6). A atividade experimental consistiu em 8 ensaios *push-out* submetidos a carregamento monotónico. Nestes ensaios a única variável, além do tipo de conector, era a presença de armadura passante nos furos. A Figura 3.5 representa as características geométricas do conector *Perfobond* ensaiado, o único relevante para a presente dissertação.

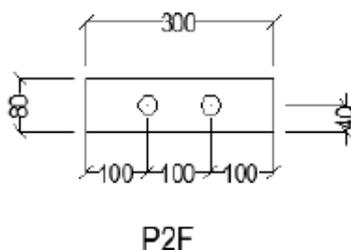


Figura 3.5- Características geométricas do conector *Perfobond* ensaiado, dimensões em mm (Neves *et al*, 2013)

Quadro 3.6- Características geométricas dos ensaios *push-out* (Neves *et al*, 2013)

Provetes		Laje de Betão				Conector		
Teste	Tipo	Designação	t_c (mm)	h_c (mm)	f_{cm}^a (MPa)	Armadura Transv. (mm)	D (mm)	Geometria do conector
1A/B	Perfobond	P2F	150	600	31.44	-	30	80 × 15 × 300
2A/B		P2F-AR12						



Com base nos resultados obtidos (Quadro 3.7), os autores verificaram que o conector *Perfobond* com armadura passante nos furos cumpriu o critério de ductilidade do Eurocódigo 4, apresentando uma capacidade de carga superior ao conector *Perfobond* sem armadura passante nos furos, que por sua vez não cumpriu o critério de ductilidade do Eurocódigo 4.

Quadro 3.7- Resultados dos ensaios *push-out* para conectores *Perfobond* (Neves *et al*, 2013)

Teste	Designação	P_{rest} (kN)	P_{Rk} (kN)	δ_u (mm)	δ_{uk} (mm)
1A	P2F A	280.05	252.05	2.95	2.66
1B	P2F B			3.83	3.45
2A	P2F-AR12 A	398.86	358.97	9.70	8.73
2B	P2F-AR12 B			10.59	9.53

Os resultados obtidos foram ainda comparados com as expressões analíticas propostas por Oguejiofor e Hosain (1994), Medberry e Shahrooz (2002), Veríssimo (2007) e Al-Darzi *et al* (2007). Na Figura 3.6 é possível observar que os dois primeiros modelos teóricos são conservativos com margens de segurança entre os 6% e 26%. O modelo de Al-Darzi *et al* (2007) é conservativo no caso do *Perfobond* com armadura passante nos furos, no entanto, por outro lado, sobrestima em cerca de 25% a carga de rotura na configuração sem armadura passante nos furos. Em relação ao modelo proposto por Veríssimo (2007), os autores verificaram que conduz a estimativas inseguras da capacidade de carga do conector.

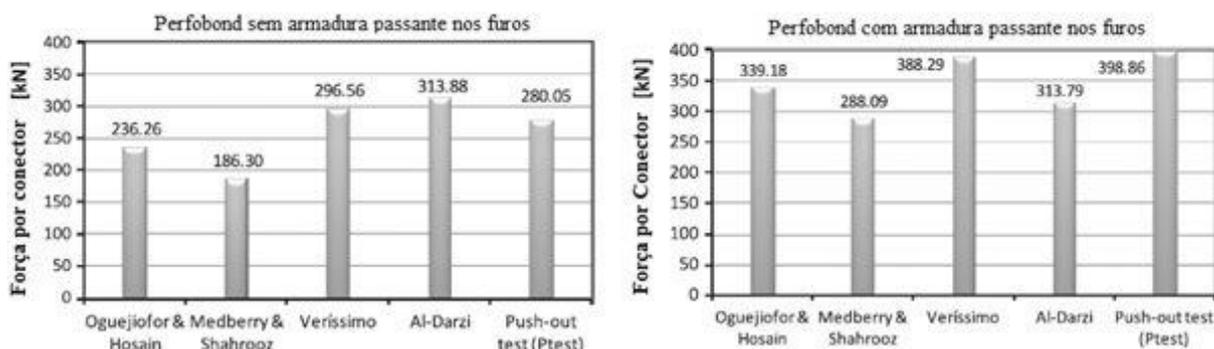


Figura 3.6- Comparação dos resultados obtidos experimentalmente com modelos analíticos propostos para o conector *Perfobond*: Sem armadura passante nos furos à esquerda e com armadura passante nos furos imagem da direita (Neves *et al*, 2013)

Vianna *et al* (2013), com base nos resultados dos ensaios realizados em 2009, utilizaram análises de regressão múltipla para alterar o modelo proposto por Al-Darzi *et al* (equação 13) uma vez que este era o modelo mais adequado até então. Assim, propuseram duas novas equações ajustadas para os resultados das várias séries de teste.

$$q_u = 152,9 + 3,21 \times 10^{-3} h_{sc} t_{sc} f_{ck} - 0,86 \times 10^{-3} A_{sc} \sqrt{f_{ck}} \quad (18)$$

$$q_u = 31,8 + 1,9 \times 10^{-3} h_{sc} t_{sc} f_{ck} - 0,53 \times 10^{-3} A_{tr} f_y - 0,6 \times 10^{-6} A_{sc} \sqrt{f_{ck}} \quad (19)$$

As expressões propostas pelos autores têm em conta a resistência à compressão do betão, tendo em conta que a equação 18 foi proposta para ligações em que a resistência à compressão do betão inferior a 30MPa, enquanto a equação 19 tem aplicabilidade nas conexões em que a resistência à compressão do betão é superior a 30MPa.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Objetivos

Os ensaios realizados no âmbito desta dissertação, em seguida descritos, foram realizados no Laboratório de Estruturas e Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

O principal objetivo é avaliar a interação de conectores próximos em vigas mistas, bem como a influência da armadura transversal passante nos furos e da classe do betão. Pretende-se determinar a capacidade de carga e a ductilidade dos conectores, variando a composição e disposição dos agrupamentos, a armadura transversal passante nos furo e a classe do betão.

Os provetes de ensaio *push-out* foram realizados em duas de oito provetes cada, correspondendo uma série ao betão da classe C16/20 e a outra ao betão da classe C20/25. Para cada série de ensaios foi ensaiada uma disposição com um conector *Perfobond*, agrupamentos de dois conectores *Perfobond* distanciados de $d_1=30\text{mm}$, $d_2=85\text{mm}$ e $d_3=140\text{mm}$, um agrupamento de 3 conectores *Perfobond* e ainda um agrupamento de 6 conectores tipo *Stud* (Figura 4.1).



Figura 4.1- Provetes metálicos utilizados. Em cima, da esquerda para a direita: S-3x2, P-1F, 2P-2F-30E. Em baixo, da esquerda para a direita: 2P-2F-85E, 2P-2F-140E, 3P-2F-64E.

Os agrupamentos de dois conectores *Perfobond* espaçados de d_3 (2P-2F-140E) bem como o agrupamento de três conectores *Perfobond* (3P-2F-64E) consistiam em dois exemplares de cada, para cada classe de betão, variando a existência de armadura transversal passante nos furos. Esta variação tem como objetivo avaliar se é ou não significativo, para efeitos de capacidade de carga, ductilidade e *uplift*, a armadura passante nos furos.

Assim, foram então realizados dezasseis ensaios, correspondendo a trinta e dois agrupamentos de conectores analisados.

4.2 Propriedades e Características Geométricas dos Provetes de Ensaio

Os provetes foram realizados de acordo com o especificado no Anexo B do Eurocódigo 4 para ensaios *push-out*.

A nomenclatura utilizada para a diferenciação dos conectores foi a seguinte: S – *Stud*, P – *Perfobond*, F – furos, E – espaçamento entre conectores, AR – armadura passante nos furos.

As dimensões dos conectores *Perfobond* foram estabelecidas com base na espessura da laje, definindo-se a mesma altura para todos (80mm). De maneira a respeitar o espaçamento mínimo de $2.25D$ entre o centro de cada furo, de acordo com Oguejiofor e Hosain (1994), definiu-se também o mesmo comprimento para todos, 300mm, e espessura 12mm, superior à mínima aconselhável por diversos autores, 10mm.

Utilizaram-se perfis HEA200 em aço S275 (tensão de cedência de 275 MPa, de acordo com EN10025). Os conectores *Perfobond* foram fabricados a partir de chapas de aço S275 (tensão de cedência de 275 MPa, de acordo com EN10025) com espessura de 12mm.

Em relação aos conectores tipo *Stud*, de maneira a estudar uma possível alternativa aos tradicionais *Nelson Stud* com perno de cabeça, optou-se por elaborar uns conectores constituídos com um vulgar varão roscado M20, de classe 4.8, soldados ao banzo do perfil metálico através de um cordão de solda de 10mm. Como estes varões não possuíam uma boa resposta ao *uplift*, optou-se por soldar um varão $\emptyset 10$ no interior destes de maneira a limitar assim o escorregamento vertical da laje de betão. Esta solução foi considerada devido à facilidade de execução desta ligação, quer pelos materiais utilizados, quer pela fácil execução em obra da mesma. Este conector pode ser observado na Figura 4.2

As armaduras ordinárias da laje são varões $\emptyset 10$ em aço A500NR (tensão de cedência de

500MPa, de acordo com a EN10025). A armadura passante nos furos tem 16mm de diâmetro ($\varnothing 16$) e é também em aço A500NR (tensão de cedência de 500MPa, de acordo com a EN10025).



Figura 4.2- Conector tipo *Stud*. À esquerda na fase inicial, à direita após a solda do varão $\varnothing 10$ entre os varões roscados

Os betões utilizados, de acordo com o Eurocódigo 2 (CEN, 2004), pertencem à classe de resistência C16/20, que corresponde a uma resistência característica em provetes cilíndricos, $f_{ck,cyl}$ de 16,3MPa, e à classe de resistência C20/25, ao qual corresponde uma resistência característica em provetes cilíndricos, f_{ck} , de 22,9MPa.

A dimensão *standard* preconizada no Eurocódigo 4 para ensaios *push-out*, bem como a posição dos conectores, perfil metálico e lajes de betão armado podem ser observadas na Figura 4.3, bem como uma perspetiva do provete de ensaios *push-out*.

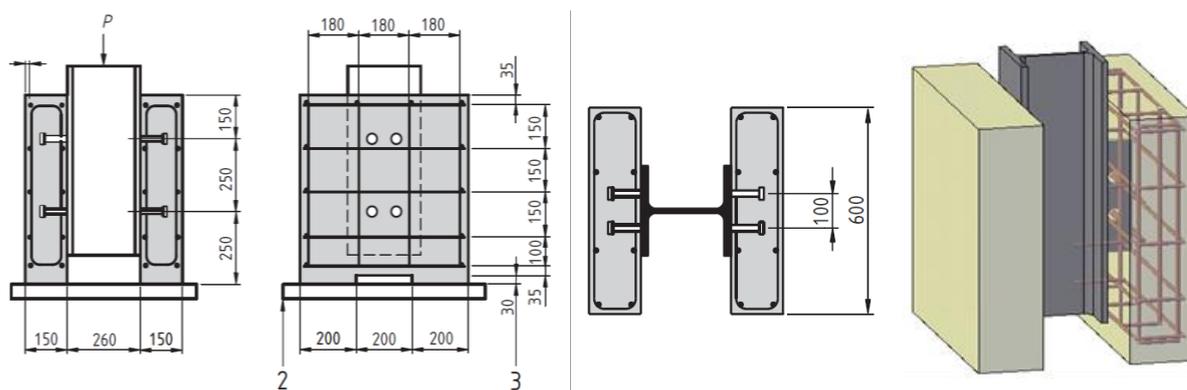


Figura 4.3- Provede de ensaios *standard* (Eurocódigo 4, 2004), e Perspetiva 3D do provede de ensaio do conector *Perfobond* (Figueiredo, 2012)

As características geométricas da laje de betão e dos agrupamentos de conectores são indicadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1- Características geométricas dos ensaios

Ensaio	Designação	Laje de betão			Conector					Geometria		
		t_c (mm)	h_c (mm)	Betão (Mpa)	l (mm)	h (mm)	AR (mm)	D (mm)	t (mm)			
Tipo "Stud"	1	S-3x2	150	600	C16/20	-	100	-	-	M20		
	2	S-3x2			C20/25							
Perfobond- C0	3	P-2F	150	600	C16/20	300	80	-	35	12		
	4	P-2F			C20/25							
2-Perfobond- C1	5	2P-2F-30E	150	600	C16/20	300	80	-	35	12		
	6	2P-2F-30E			C20/25							
2-Perfobond- C2	7	2P-2F-85E	150	600	C16/20	300	80	-	35	12		
	8	2P-2F-85E			C20/25							
2-Perfobond-C3	9	2P-2F-140E	150	600	C16/20	300	80	-	35	12		
	10	2P-2F-140E			C20/25							
	11	2P-2F-140E-AR16			C16/20							16
	12	2P-2F-140E-AR16			C20/25							16
3-Perfobond-C4	13	3P-2F-64E	150	600	C16/20	300	80	-	35	12		
	14	3P-2F-64E			C20/25							
	15	3P-2F-64E-AR16			C16/20							16
	16	3P-2F-64E-AR16			C20/25							16

No Quadro 4.1 t_c representa a espessura da laje de betão (mm), h_c corresponde à largura da laje de betão (mm), l representa o comprimento do conector (mm), enquanto que h corresponde à altura do mesmo (mm), AR diz respeito ao diâmetro da armadura transversal passante nos furos do conector (mm), D representa o diâmetro dos furos do conector e t corresponde à espessura da chapa dos conectores.

Na Figura 4.4 pode ser vista a representação esquemática de cada agrupamento de conectores ensaiados, e na Figura 4.5 é representada a geometria de ensaio do conector 2P-2F-85E (os esquemas dos restantes provetes encontram-se no anexo A.1)

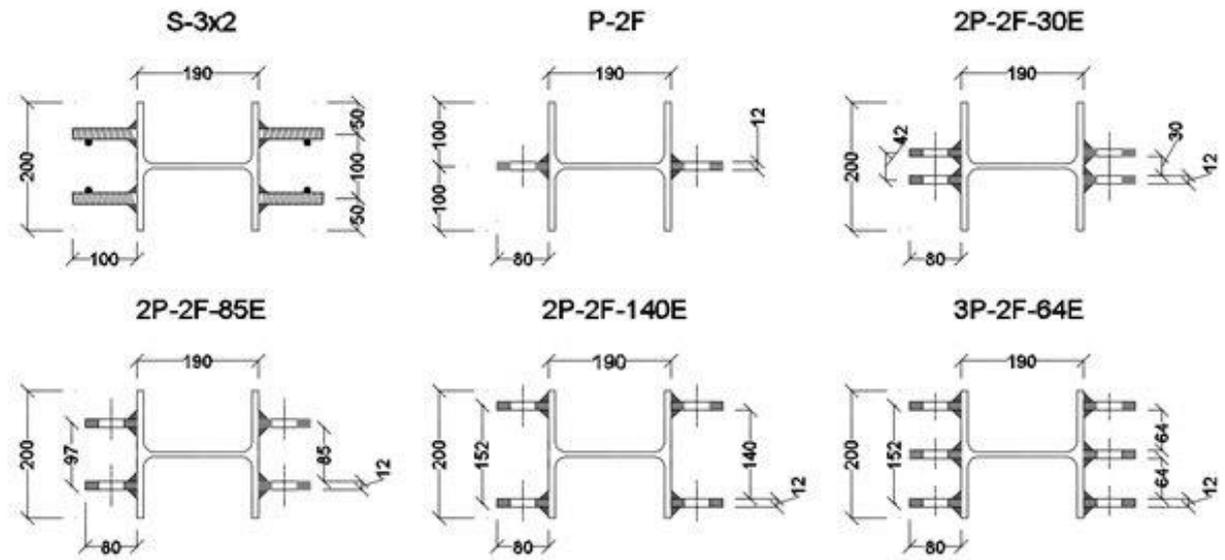


Figura 4.4- Representação esquemática em planta dos diferentes agrupamentos de conectores em estudo

Os ensaios dos conectores designados por 2P-2F-140E-AR16 e 3P-2F-64E-AR16 são aqueles em que existe armadura passante nos furos do conector. A título de exemplo, a Figura 4.6 representa esquematicamente um desses ensaios.

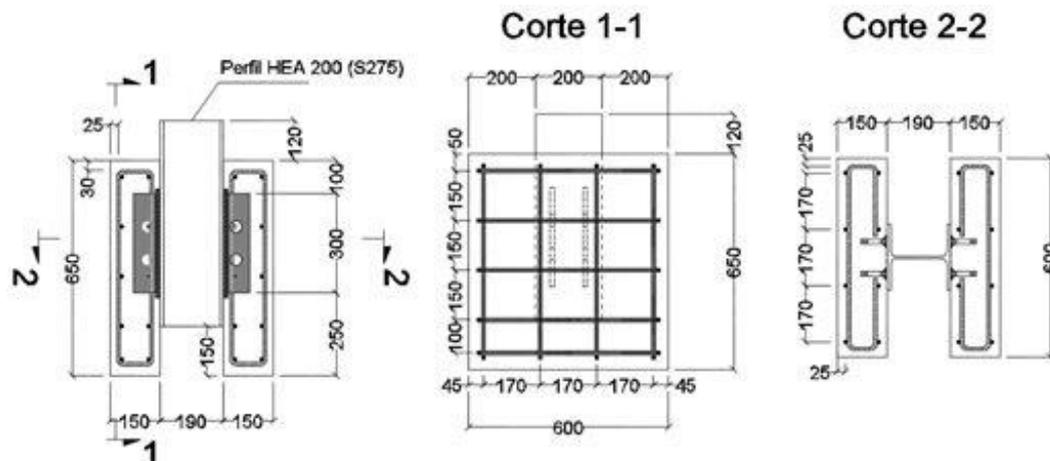


Figura 4.5- Geometria do provete de ensaio do conector 2P-2F-85E

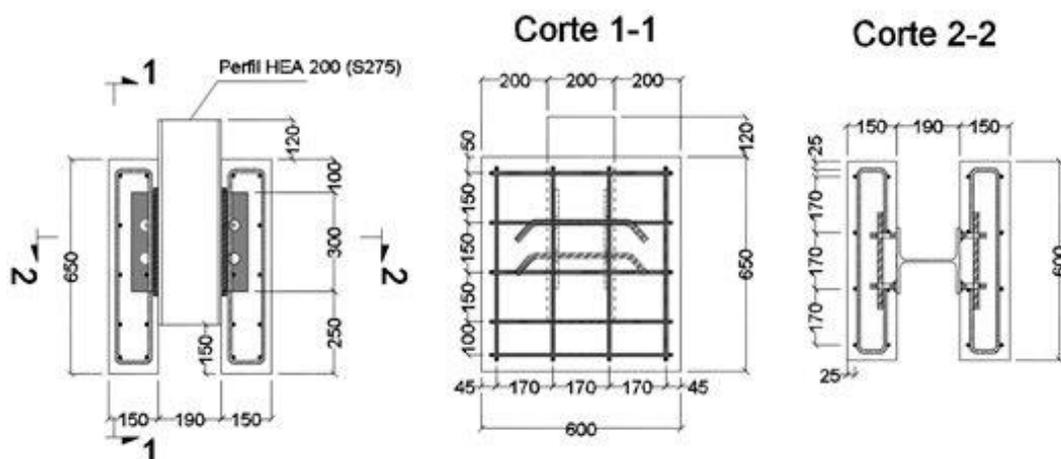


Figura 4.6- Geometria do provete de ensaio do conector 2P-2F-140E-AR16 (dimensões em mm)

4.3 Procedimento dos Ensaios

Segundo a cláusula B.2.4 do Eurocódigo 4 a carga é aplicada em primeiro lugar por incrementos até 40% da carga expectável de rotura do provete, efetuando-se 15 ciclos de carga/descarga entre 5% e 40% da carga expectável de rotura do provete - Figura 4.7. Durante esta fase os incrementos da carga são de 10kN/s. A 2ª fase do ensaio consiste em aplicar a carga monotonicamente até ao colapso, através de controlo de deslocamento.

O escorregamento longitudinal entre cada laje de betão em relação ao conector é o parâmetro de controlo para a fase seguinte do ensaio. É medido, durante cada incremento de carga, até se verificar uma redução de carga de 20% abaixo da carga máxima expectável.

O carregamento foi aplicado por uma prensa hidráulica da marca AMSLER, através de dois procedimentos, ilustrados na Figura 4.7:

- Na primeira fase do ensaio, composto pela fase cíclica, foram aplicados os 15 ciclos de carga/descarga entre as cargas correspondentes a 5% e 40% da carga de rotura expectável.
- A segunda fase consistiu no controlo feito pelo deslocamento relativo e com diferentes velocidades, tendo a carga sido aplicada monotonicamente até ao colapso.

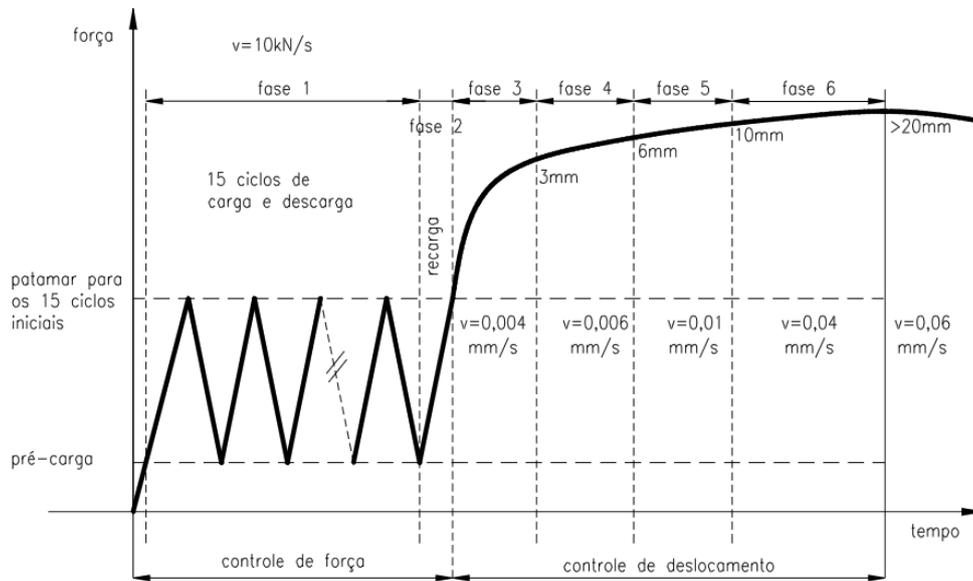


Figura 4.7- Esquema de controlo de carga do ensaio *push-out* (Vianna, 2009)

4.4 Esquema geral dos Ensaio

Os ensaios foram realizados através de uma prensa hidráulica de 5000kN (500tf), ilustrada na Figura 4.8. O circuito hidráulico foi controlado por um *software* e um sistema eletrónico integrado.



Figura 4.8- Prensa hidráulica utilizada para os ensaios.

4.5 Instrumentação dos Modelos

Como equipamento de medida foram utilizados:

- Transdutores de deslocamentos (defletómetros ou LVDT's), para avaliar os deslocamentos entre a laje de betão e o conector, assim como o efeito de *uplift*, Figura 4.9 e Figura 4.10.
- Extensómetros de Roseta FRA-5-11 para medir a extensão em três direções diferentes, permitindo assim determinar o estado de tensão na zona mais solicitada do conector *Perfobond*, ilustradas nas Figura 4.11 e Figura 4.12.
- Extensómetros unidireccionais FLA-6-11 para medição da extensão na direcção longitudinal da armadura passante entre os furos dos conectores em estudo, ilustrados nas Figura 4.12 e Figura 4.13.



Figura 4.9-Ilustração dos LVDT's numa das faces do provete

Nos provetes em que existe armadura passante nos furos, optou-se por instrumentar a armadura inferior, colocando o extensómetro linear junto ao conector exterior, de maneira a que na configuração com 3 conectores *Perfobond*, o extensómetro linear pudesse ser colocado exatamente na mesma posição, obtendo-se assim uma comparação legítima da extensão em ambas as configurações. A esquematização da instrumentação do conector 2P-2F-140E-AR16 pode ser observada na Figura 4.12. Na Figura 4.13 é possível observar conector em cima referido pronto a betonar.

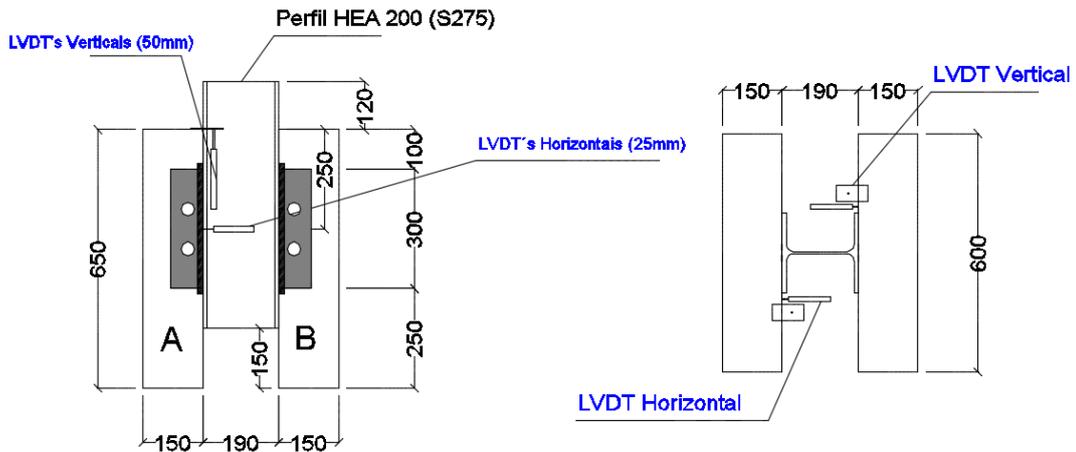


Figura 4.10- Posição dos LVDT's nos provetes



Figura 4.11- Ilustração dos extensómetros de roseta nos conectores, nas várias fases de instrumentação

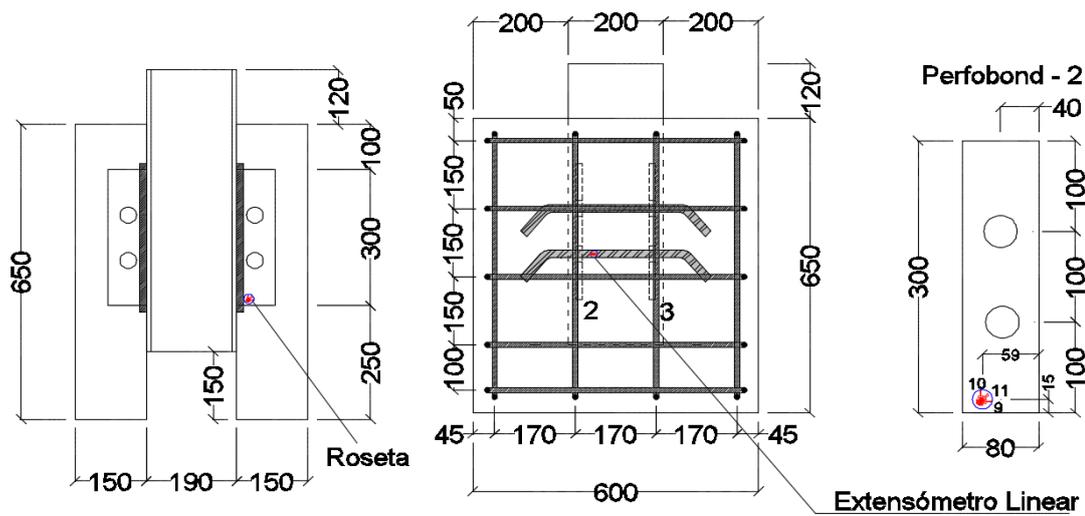


Figura 4.12- Representação esquemática da colocação dos extensómetros de roseta nos conectores e dos extensómetros lineares na armadura



Figura 4.13- Ilustração de um provete na fase pré-betonagem

Uma vez que os conectores *Perfobond* são de aço S275, apresentam uma tensão de cedência nominal de 275MPa, e um módulo de elasticidade de 210GPa. Ora sabendo que a extensão de plastificação é dada por:

$$\varepsilon = \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (20)$$

Então

$$\varepsilon \text{ (micron)} = \frac{275}{210 \times 10^3} \times 10^6 = 1309 \quad (21)$$

A armadura passante nos furos, quando existente, também foi instrumentada, e como o seu aço era um aço A500NR, a extensão nominal de plastificação do varão é de 2381 micron.

4.6 Avaliação da Resistência Última e da Capacidade de Deslizamento

A resistência última característica da conexão, P_{Rk} , segundo a cláusula B.2.5 do Eurocódigo 4, deve ser considerada como a mínima de três ensaios sobre provetes teoricamente idênticos, reduzida de 10%. Visto que, no trabalho experimental, apenas se realizaram dois ensaios para cada tipologia de conectores, a resistência última da conexão é considerada como a média desses dois ensaios obtida experimentalmente reduzida de 10%.

$$P_{Rk} = 0,9 * P_{teste} \quad (22)$$

Na equação 22 P_{teste} corresponde ao valor máximo registado durante o ensaio, ou seja, o valor obtido para a resistência última do ensaio.

Considera-se que a capacidade de escorregamento de um provete, δ_u , é igual ao escorregamento máximo medido ao nível da carga característica, tal como ilustrado pela Figura 4.14. No entanto, a capacidade de escorregamento característica δ_{ik} , é considerada como igual a 90% da capacidade resistente, δ_u .

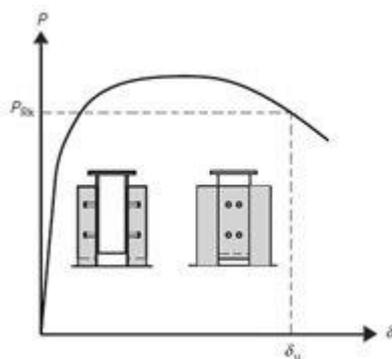


Figura 4.14- Determinação da capacidade de deslizamento δ_u (Eurocódigo 4, CEN2004)

O efeito de *uplift* bem como a capacidade de deslizamento relativo entre o perfil e as lajes de betão foram medidos através da instrumentação dos provetes com os LVDT's referenciados no subcapítulo anterior.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Resultados Gerais

Em primeiro lugar, é importante realizar uma breve explicação da denominação dos ensaios, para melhor compreensão dos resultados. Em cada ensaio *push-out* são analisados dois conectores, tal como ilustrado pelas várias figuras presentes no Capítulo 4, distinguindo-se por conector A e conector B, como ilustra a Figura 5.1.

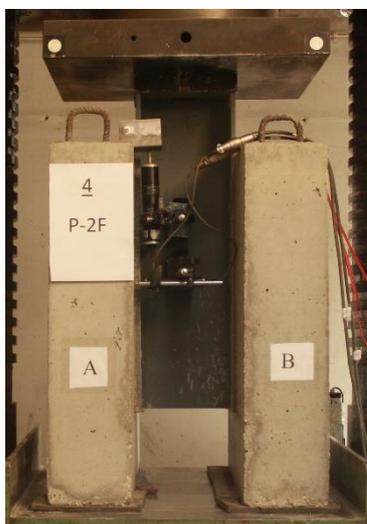


Figura 5.1- Ensaio 4: P-2F

Uma vez que uma das variáveis estudadas foi o comportamento de diversos agrupamentos de conectores embebidos em betões de classes diferentes, optou-se por dividir os provetes em duas séries, constituídas com 8 provetes cada. Uma correspondente aos provetes de betão C16/20, provetes com número ímpar, e outra correspondente aos provetes de betão C20/25, dizendo esta respeito aos provetes identificados com número par.

Segundo o Eurocódigo 2, a resistência à compressão do betão foi determinada a partir de modelos cúbicos de 15x15x15cm, tendo-se obtido um valor médio de 28,41MPa para o betão da 1ª série e 36,58MPa para o betão da 2ª série.

Uma vez que para a aplicação dos modelos analíticos existentes será necessário considerar o valor característico do betão para provetes cilíndricos, procedeu-se então ao cálculo do mesmo. De acordo com Montoya *et al* (1991), para converter a resistência dos provetes cúbicos para

provetes cilíndricos, é necessário multiplicar o valor característico em provetes cúbicos por 0,8. No entanto, em primeiro lugar é necessário determinar o valor característico. Para tal, de acordo com o Eurocódigo 2:

$$f_{ck,cube} = f_{cm,cube} - 8 \quad (23)$$

Tendo o valor característico basta aplicar a equação 24, de acordo com Montoya *et al* (1991):

$$f_{ck,cyl} = 0,8 \times f_{ck,cube} \quad (24)$$

Assim, com base nas equações 23 e 24, obtiveram-se os valores característicos cúbicos e cilíndricos, bem como a classe do betão, para a primeira e segunda betonagem, respetivamente, tal como pode ser observado no Quadro 5.1.

Quadro 5.1- Resultados dos ensaios de compressão para a classificação do betão

1ª Betonagem - 27/Abril/2015						
Cubo	Dia	$f_{c,cubos}$ (MPa)	Valor médio (MPa)	f_{ck} (Mpa)	$f_{ck,cyl}$ (MPa)	Classe betão
1	27/maio	24,24	28,41	20,41	16,3	C16/20
2	29/maio	24,97				
3	29/maio	32,08				
4	01/junho	32,34				
2ª Betonagem - 5/Maio/2015						
Cubo	Dia	$f_{c,cubos}$ (MPa)	Valor médio (MPa)	f_{ck} (Mpa)	$f_{ck,cyl}$ (MPa)	Classe betão
1	01/junho	35,14	36,58	28,58	22,9	C20/25
2	03/junho	38,02				

Os resultados obtidos para cada conector encontram-se nos quadros seguintes. No Quadro 5.2, encontram-se representados os resultados relativamente à primeira série de ensaios, com betão C16/20, e no Quadro 5.3 os resultados referentes à segunda série de ensaios, com betão C20/25.

Embora o Eurocódigo recomende como valor de carga característico uma redução de 10% em relação ao valor máximo registado durante o ensaio, optou-se por em alguns ensaios considerar uma redução próxima, entre os 5% e os 15%. Esta opção foi tomada após a análise dos gráficos resultantes dos ensaios experimentais. Na maioria dos ensaios, os provetes apresentavam um patamar de aumento do deslocamento a carga constante, precedendo uma diminuição considerável de carga, na zona correspondente ao valor de P_{Rk} . No entanto, em alguns ensaios esse patamar encontrava-se em cima ou em baixo desse valor, procedendo-se nesses a um ajuste

do valor de P_{Rk} , denominando-se o mesmo como P_{Rk}^* . Será esse valor P_{Rk}^* que será tomado como valor de carga característico no presente documento. Os ajustes referentes ao valor de P_{Rk} encontram-se descritos nos ensaios em que houve necessidade de os realizar.

Quadro 5.2- Resultados da 1ª série de ensaios

Ensaio	Designação		P_{teste} (kN)	P_{Rk} (kN)	P_{Rk}^* (kN)	δ_u (mm)	δ_{uk} (mm)	$\delta_{uk,médio}$ (mm)
1	S-3x2	A	431,24	388,12	388,12	5,4	4,86	4,74
		B				5,13	4,62	
3	P-2F	A	232,01	208,80	208,80	13,42	12,08	11,77
		B				12,74	11,47	
5	2P-2F-30E	A	325,30	292,77	292,77	1,28	1,15	1,32
		B				1,65	1,49	
7	2P-2F-85E	A	448,92	404,02	404,02	1,95	1,76	1,76
		B				1,95	1,76	
9	2P-2F-140E	A	480,14	432,13	432,13	1,66	1,49	1,35
		B				1,33	1,20	
11	2P-2F-140E- AR16	A	624,76	562,28	562,28	3,35	3,02	2,51
		B				2,22	2,00	
13	3P-2F-64E	A	560,90	504,81	504,81	1,48	1,33	0,93
		B				0,59	0,53	
15	3P-2F-64E- AR16	A	597,30	537,57	537,57	0,83	0,75	1,33
		B				2,12	1,91	

Quadro 5.3- Resultados da 2ª série de ensaios

Ensaio	Designação		P_{teste} (kN)	P_{Rk} (kN)	P_{Rk}^* (kN)	δ_u (mm)	δ_{uk} (mm)	$\delta_{uk,médio}$ (mm)
2	S-3x2	A	446,86	402,17	402,17	5,67	5,103	4,33
		B				3,95	3,555	
4	P-2F	A	249,78	224,80	224,80	7,82	7,038	6,72
		B				7,11	6,399	
6	2P-2F-30E	A	370,72	333,65	333,65	1,79	1,611	1,08
		B				0,62	0,558	
8	2P-2F-85E	A	536,28	482,65	466,56	1,78	1,602	1,64
		B				1,87	1,683	
10	2P-2F-140E	A	446,05	401,45	419,29	0,92	0,828	1,41
		B				2,21	1,989	
12	2P-2F-140E- AR16	A	613,38	552,04	552,04	1,39	1,251	1,54
		B				2,03	1,827	
14	3P-2F-64E	A	540,62	486,55	486,55	0,44	0,396	0,88
		B				1,51	1,359	
16	3P-2F-64E- AR16	A	693,26	623,93	623,93	1,94	1,746	1,32
		B				2,12	1,91	

As primeiras ilações que podem ser retiradas dos quadros anteriores são o facto de apenas a ligação composta por um conector *Perfobond*, P-2F, cumprir o critério de ductilidade de acordo com o EC4, em ambas as séries de ensaios. Também é possível observar um aumento da capacidade de carga com o aumento do espaçamento entre conectores, sendo esse aspeto aprofundado detalhadamente ao longo do presente capítulo.

5.2 Comportamento do agrupamento de conectores tipo *Stud*

Com o objetivo de estudar uma possível alternativa aos tradicionais *Nelson Stud* com perno de cabeça, estudou-se uma configuração tipo *Stud* composta por 6 varões roscados M20 de cada um dos lados da laje, com as características já referenciadas no capítulo anterior. Esta configuração corresponde aos ensaios 1 e 2, com betão C16/20 e betão C20/25, respetivamente. Assim, na Figura 5.2 podem ser observados os gráficos carga/deslocamento ($F-\delta$) enquanto que na Figura 5.3 encontram-se os gráficos carga/*uplift*.

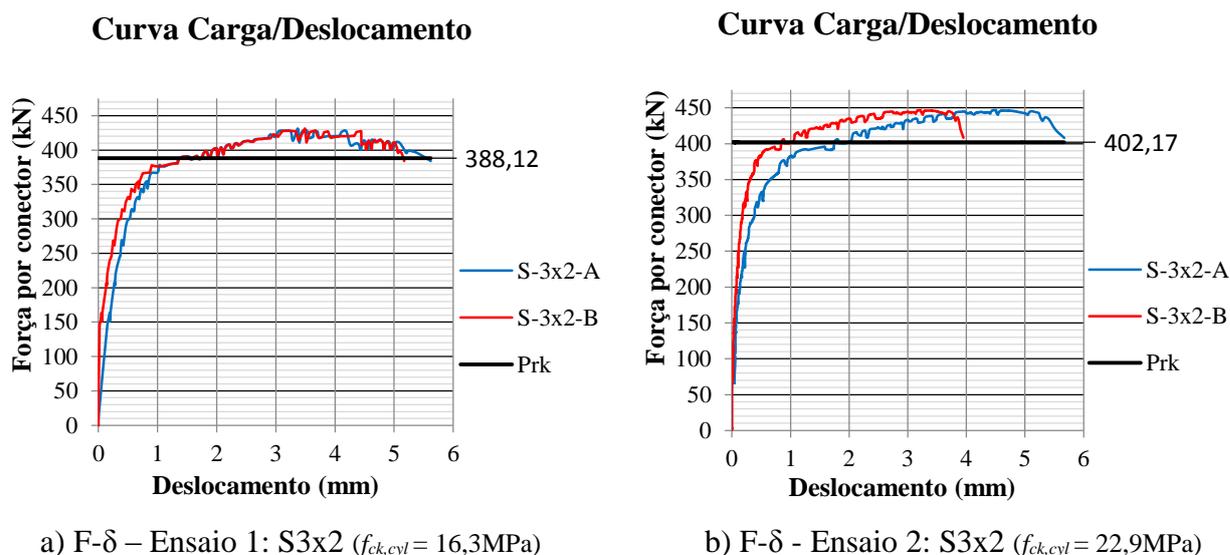


Figura 5.2- Curva carga/deslocamento para o agrupamento de conectores tipo *Stud* S3x2, nas duas séries ensaiadas

Em relação à capacidade de carga, verifica-se que esta configuração oferece uma boa resistência ao esforço de corte. Verifica-se também um aumento da capacidade de carga com o aumento da classe de betão, tal como é possível observar pela Figura 5.2. Em relação à capacidade de deslizamento, este tipo de conectores apresenta uma boa resposta, no entanto, não cumpre o critério de ductilidade do EC4 (6mm), uma vez que tanto na 1ª como na 2ª série o deslizamento característico verificado é de 4,74mm e de 4,33mm, respetivamente. Além disso, em ambos os ensaios verificou-se uma rotura frágil, motivo pelo qual o ensaio terminou repentinamente.

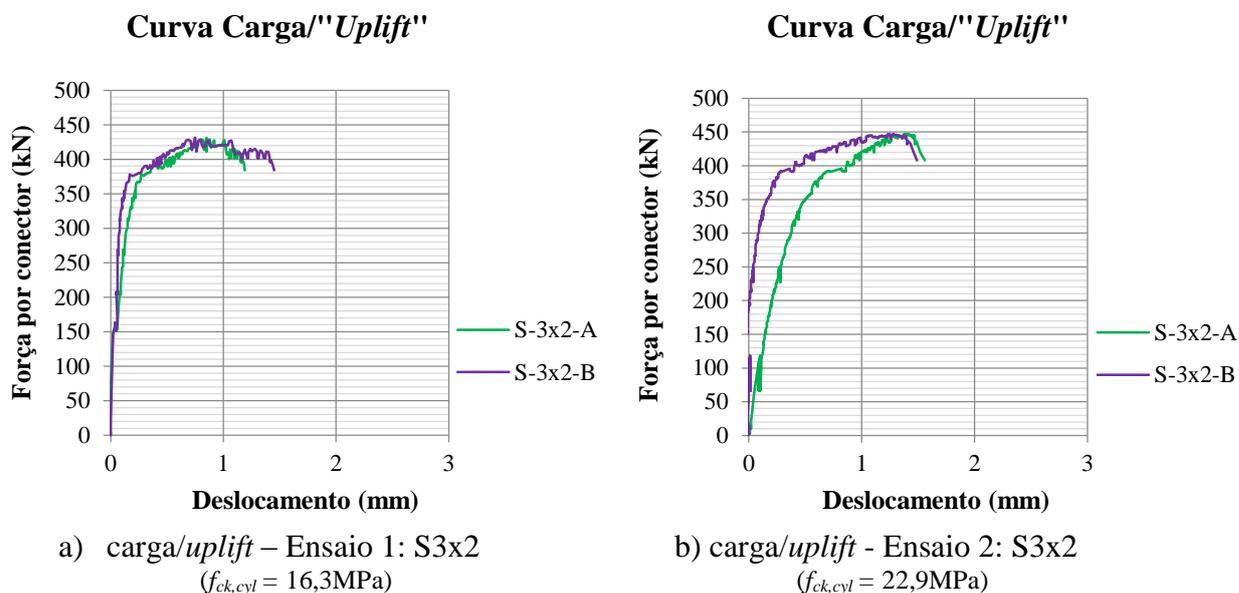


Figura 5.3-Curva carga/*uplift* para o agrupamento de conectores tipo *Stud* S3x2, nas duas séries ensaiadas

Através dos resultados obtidos, ilustrados pela Figura 5.3, é possível concluir que a introdução do varão $\varnothing 10$ no interior dos conectores ofereceu a resposta desejada em termos de *uplift*, uma vez que os valores médios registados para a carga máxima são de aproximadamente 1,3mm e 1,5mm, para a 1ª e 2ª série, respetivamente.

5.3 Comportamento do conector *Perfobond* isolado

O conector *Perfobond* será o conector padrão para as comparações a realizar. Nas figuras seguintes encontram-se os gráficos carga/deslocamento (Figura 5.4), bem como os gráficos carga/*uplift* (Figura 5.5) e curva carga/extensão (Figura 5.6).

Tal como representado na Figura 5.4, é possível observar que o conector *Perfobond* apresenta um comportamento dúctil em ambos os ensaios, uma vez que possui capacidade de deslizamento superior à mínima exigida pelo Eurocódigo (6mm). No entanto, no betão de classe C20/25 ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$) essa ductilidade é menos expressiva que no betão C16/20 ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$). Além disso, verifica-se um aumento significativo de capacidade de carga com o aumento da classe de betão.

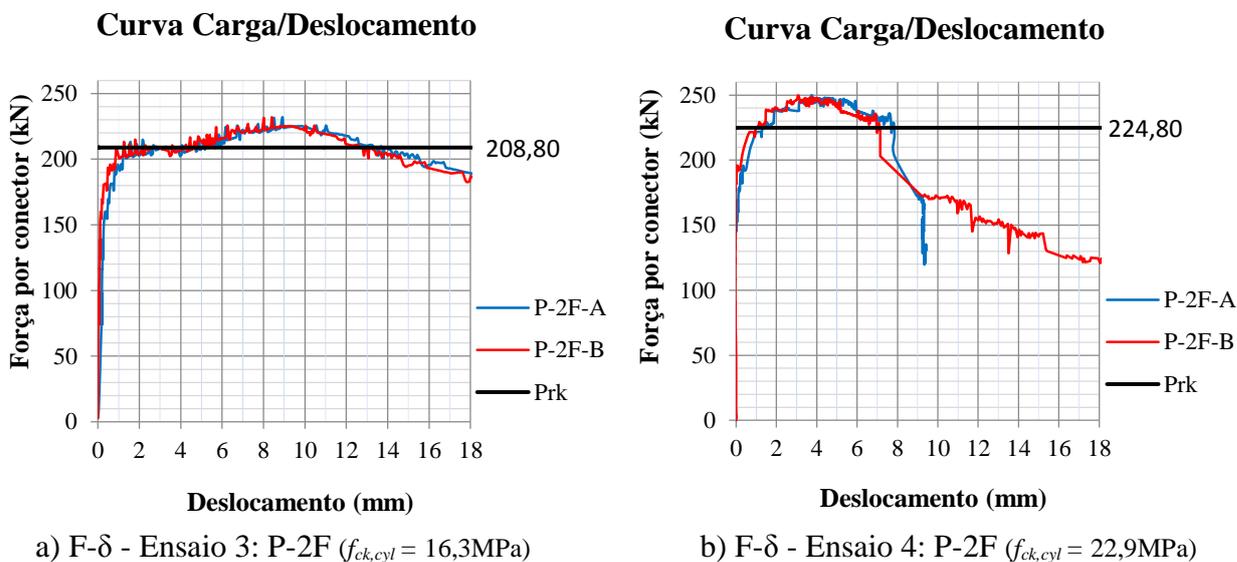


Figura 5.4- Curva carga/deslocamento para o conector *Perfobond*, nas duas séries ensaiadas

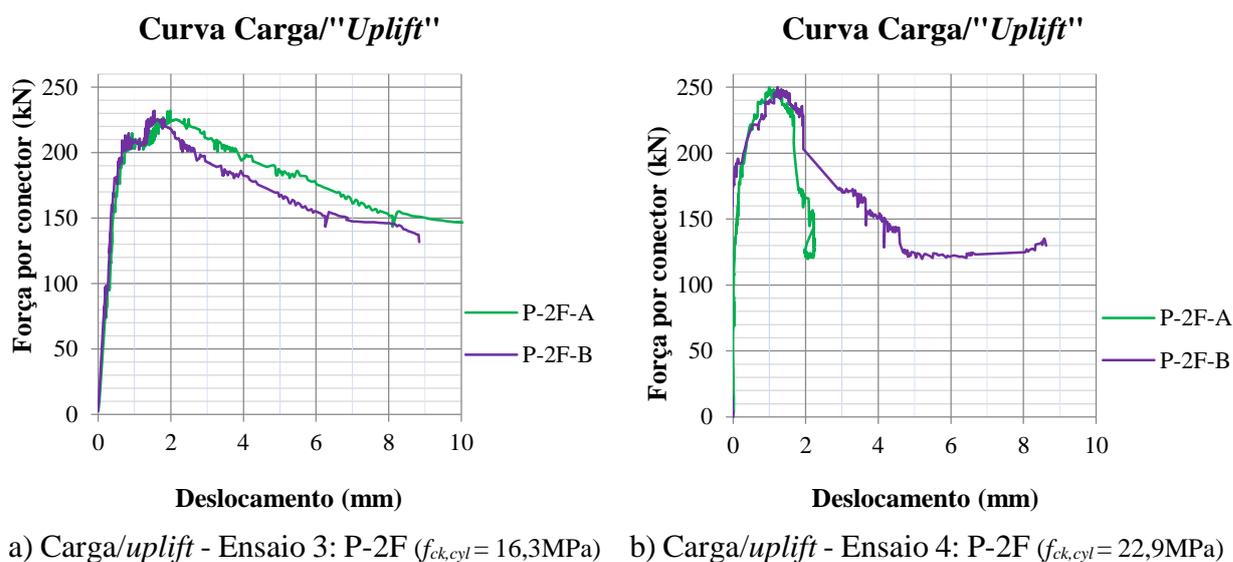


Figura 5.5-Curva carga/*uplift* para o conector *Perfobond*, nas duas séries ensaiadas

Em relação ao fenómeno de *uplift*, os valores médios registados para a carga máxima respeitantes ao conector *Perfobond* na sua configuração isolada são de 1,8mm e 3,4mm, na 1ª e 2ª série, respetivamente. Pode-se então concluir que se encontra concordante com a previsão de todos os outros autores anteriormente referidos, uma vez que oferece uma boa resposta relativamente à separação da laje de betão em relação à viga metálica. Embora o valor registado na 2ª série seja ligeiramente superior, ainda assim é considerado como não sendo suficientemente expressivo.

De maneira a avaliar o estado de tensão nos conectores, instrumentaram-se os *Perfobond*, tal como foi referido no capítulo anterior. Assim, com base nas leituras registadas durante os ensaios é então possível determinar as curvas carga/extensão para os conectores em estudo. Na Figura 5.6 é possível observar a extensão medida nos conectores referentes aos ensaios 3-P-2F e 4-P-2F.

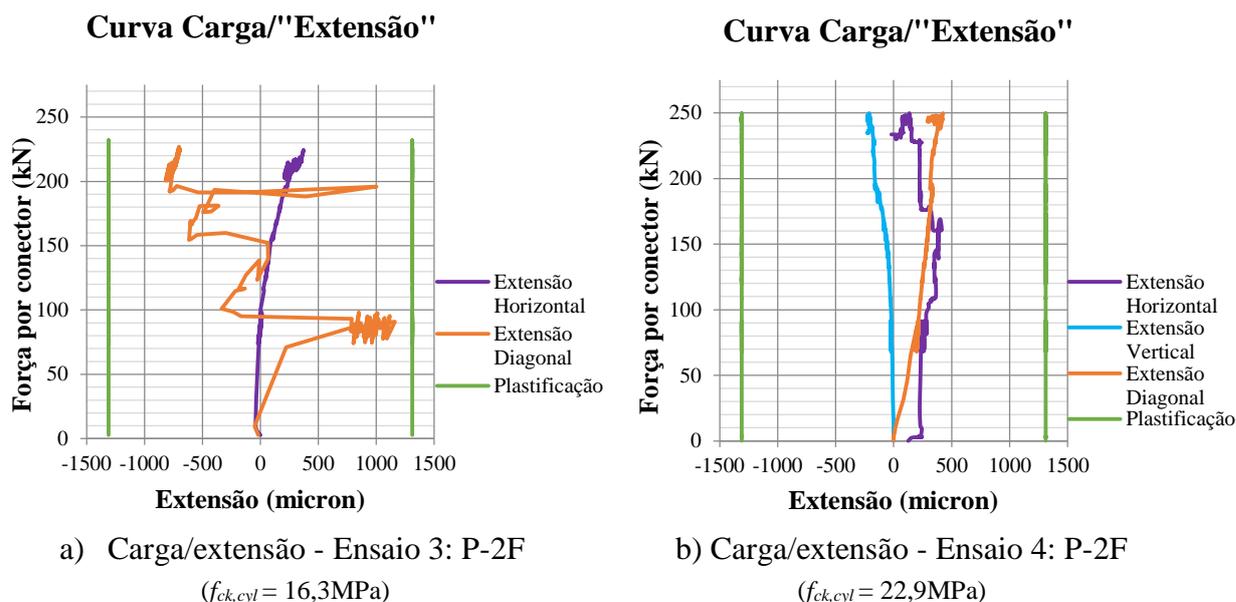


Figura 5.6- Curva carga/extensão para o conector *Perfobond*, nas duas séries ensaiadas

Em nenhum dos ensaios foi atingida a plastificação em qualquer uma das direções medidas. Através dos resultados do ensaio 4 é possível determinar o estado de tensão no conector *Perfobond* (Figura 5.7), uma vez que existem leituras nas 3 direções do extensómetro de roseta. Para o ensaio 3 não é possível, visto que logo no início do ensaio, deixou de haver leituras na direção vertical.

Através da curva da Figura 5.7, que traduz a variação da tensão de von-Mises com o aumento da carga, podemos afirmar que, tal como dito anteriormente, não foi atingida a plastificação do conector *Perfobond*, mantendo-se este no regime elástico.

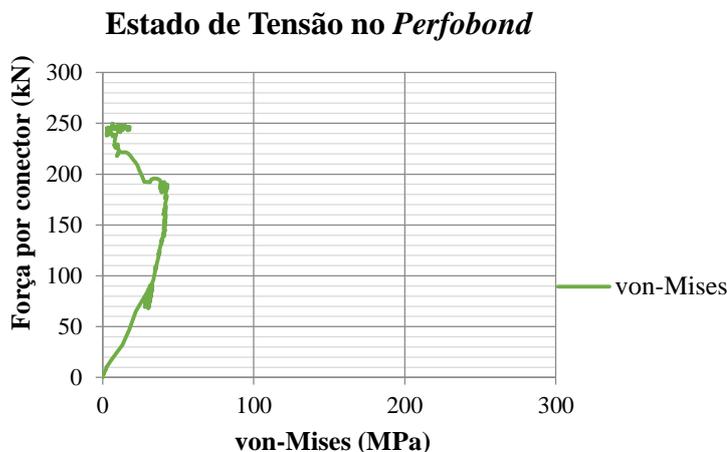


Figura 5.7- Carga/tensão von-Mises - Ensaio 4: P-2F ($f_{ck,cyl} = 22,9$ MPa)

5.4 Influência do número de conectores *Perfobond* e seu espaçamento

Para avaliar a interação de conectores próximos em vigas mistas, procedeu-se ao estudo dos agrupamentos de dois conectores *Perfobond* variando o seu espaçamento (d_1 , d_2 e d_3), e ainda de um agrupamento de três conectores *Perfobond*.

Os resultados experimentais obtidos para os conectores 2P-2F-30E, relativamente à capacidade de carga e deslizamento, encontram-se representados na Figura 5.8, e a Figura 5.9 mostra a curva carga/*uplift*. Nestes, tal como ilustrado no capítulo anterior, os conectores *Perfobond* encontram-se o mais próximo possível um do outro, com 30mm de espaçamento.

Neste agrupamento de conectores verificou-se um aumento substancial da carga, quando comparado com o conector constituído um *Perfobond* isolado, em ambas as séries ensaiadas. É ainda importante referir que, tal como havia sucedido no conector composto por um *Perfobond*, houve um aumento da capacidade de carga com o aumento da classe do betão. No entanto, esta disposição não satisfaz a capacidade de deslizamento proposta pelo Eurocódigo 4, não sendo assim possível uma distribuição plástica da força de corte.

Relativamente ao comportamento do conector, é possível observar que no ensaio 5, referente à 1ª série, com betão C16/20, o conector apresenta um comportamento semelhante numa e outra laje, suportando inclusive uma carga de 160kN por conector enquanto se deformava até à rotura. Por outro lado, no ensaio 6, com betão da classe C20/25, as lajes A e B deformaram-se de formas distintas após atingir a carga máxima. Enquanto a laje A se foi deformando à medida que o ensaio decorria, a laje B não passou dos 0,95mm de deformação.

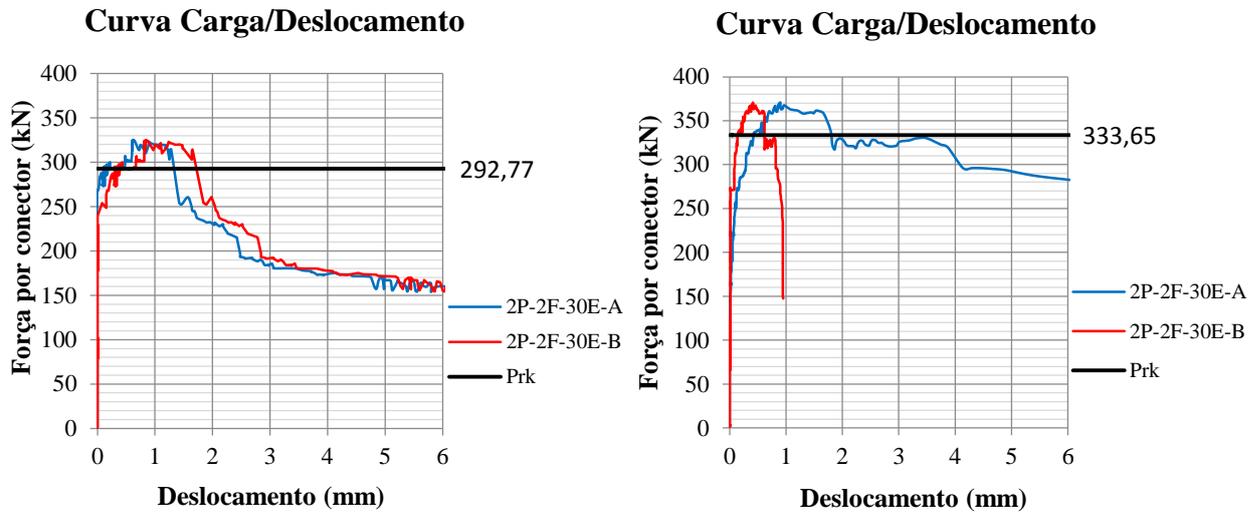
a) F- δ - Ensaio 5: 2P-2F-30E ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)b) F- δ - Ensaio 6: 2P-2F-30E ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

Figura 5.8- Curva carga/deslocamento para o agrupamento de conectores *Perfobond* 2P-2F-30E, nas duas séries ensaiadas

A Figura 5.9 mostra que o agrupamento de conectores *Perfobond* oferece uma boa resposta relativamente ao fenómeno de *uplift*. É de notar que o valor médio verificado no ensaio 6 para a carga máxima registada foi de 0,85mm, o que traduz uma excelente resposta ao *uplift*. No entanto, o ensaio 5, apresenta um deslocamento negativo. Tal ocorrência deve-se ao facto de como a leitura foi efetuada. O deslocamento negativo resulta de uma rotação relativa entre as lajes de betão e o perfil metálico com o aumento da carga.

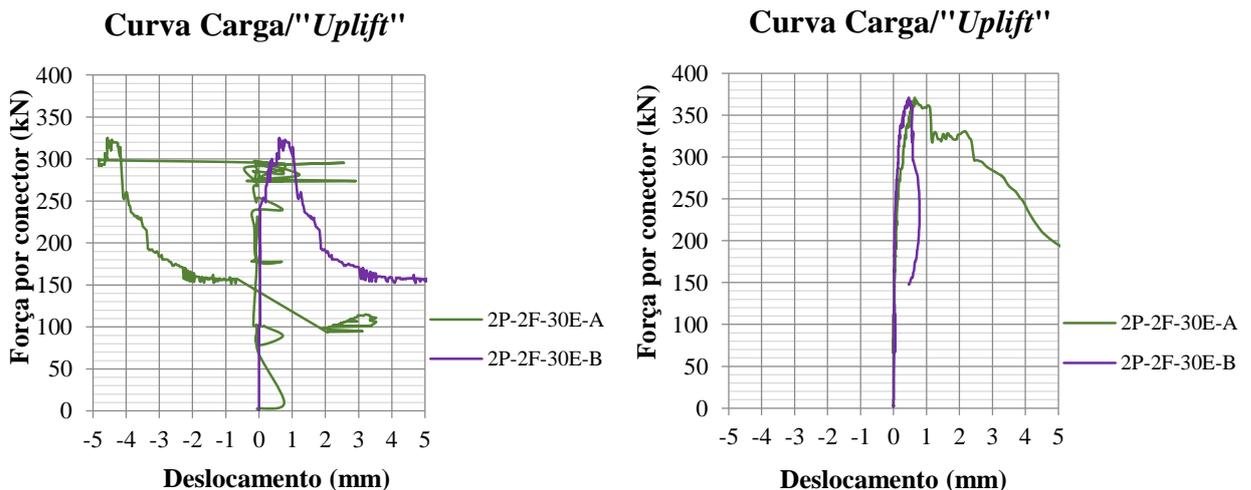
a) Carga/*uplift* - Ensaio 5: 2P-2F-30E ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)b) Carga/*uplift* - Ensaio 6: 2P-2F-30E ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

Figura 5.9-Curva carga/*uplift* para o conector 2P-2F-30E, nas duas séries ensaiadas

Tal como já referido anteriormente, os conectores *Perfobond* bem como os agrupamentos de conectores *Perfobond* fornecem uma boa resposta em relação ao fenómeno de *uplift*. Razão pela qual, somada ao elevado número de dados para análise, neste capítulo apenas serão apresentadas as curvas relativas ao *uplift* para o agrupamento de conectores 2P-2F-30E, encontrando-se as curvas referentes aos restantes ensaios no Anexo A.1. No entanto, algumas considerações sobre as mesmas serão de seguida apresentadas.

Dos ensaios experimentais, constatou-se que o fenómeno de *uplift* não é de todo relevante nos agrupamentos de conectores *Perfobond*, uma vez que, para a carga máxima, em cada configuração de conectores, verificou-se um valor médio de *uplift* de 0,7mm. O valor médio de *uplift* verificado nos conectores *Perfobond* é de cerca de 2,5mm e 1,75mm, para a 1ª e 2ª série de ensaios, respetivamente. Valor ligeiramente superior ao observado nos agrupamentos de conectores, uma vez que o conector *Perfobond* possui menos mecanismos que impeçam a separação da laje de betão em relação ao perfil metálico quando comparado com os agrupamentos destes conectores.

Tal como o conector *Perfobond* isolado, também os agrupamentos de conectores *Perfobond* foram instrumentados de modo a poder determinar o estado de tensão no conector. Assim, os resultados referentes à relação carga/extensão do agrupamento de conectores 2P-2F-30E, encontram-se na Figura 5.10.

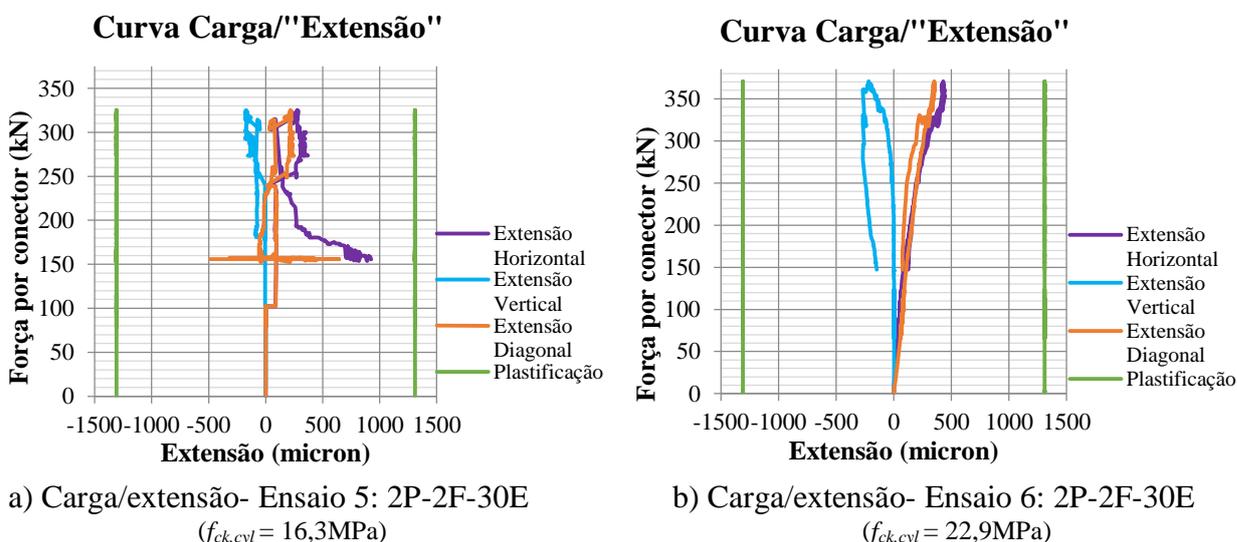


Figura 5.10- Curva carga/extensão para o conector 2P-2F-30E, nas duas séries ensaiadas

Através dos resultados dos extensómetros de roseta, observa-se que ambos os ensaios se encontraram claramente em regime elástico, pois não atingiram os 1309 micron em nenhuma

das direções. Tal comprova-se observando os gráficos da Figura 5.11, confirmando que não houve plastificação do conector *Perfobond*.

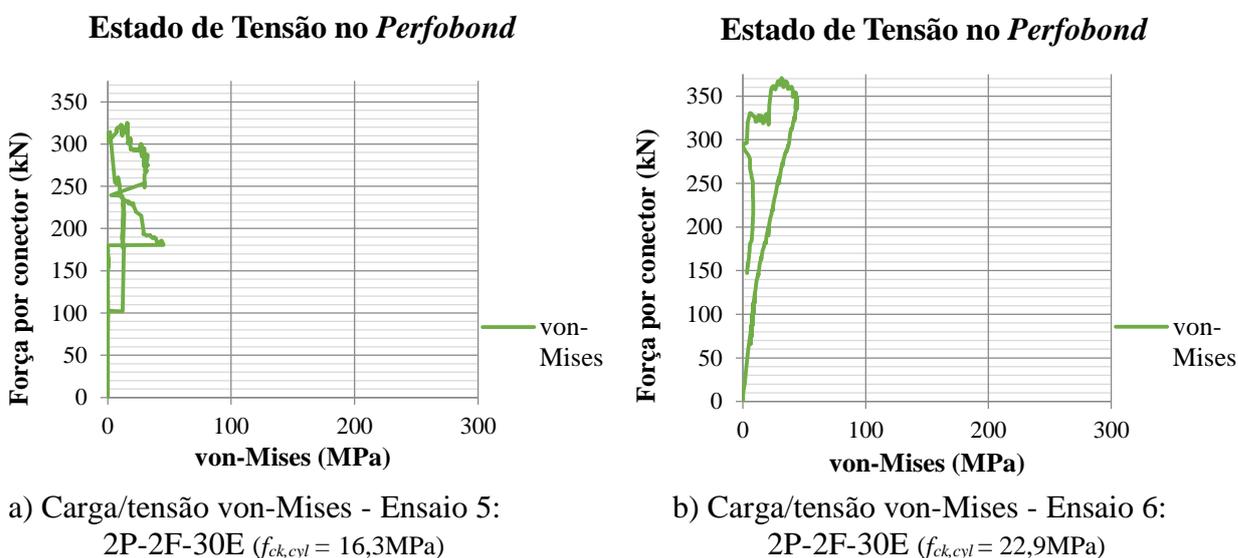


Figura 5.11- Carga/tensão von-Mises para o agrupamento 2P-2F-30E nas duas séries ensaiadas

Na Figura 5.12 encontram-se representados os resultados experimentais obtidos para os conectores 2P-2F-85E, variando estes dos anteriores pelo espaçamento entre conectores.

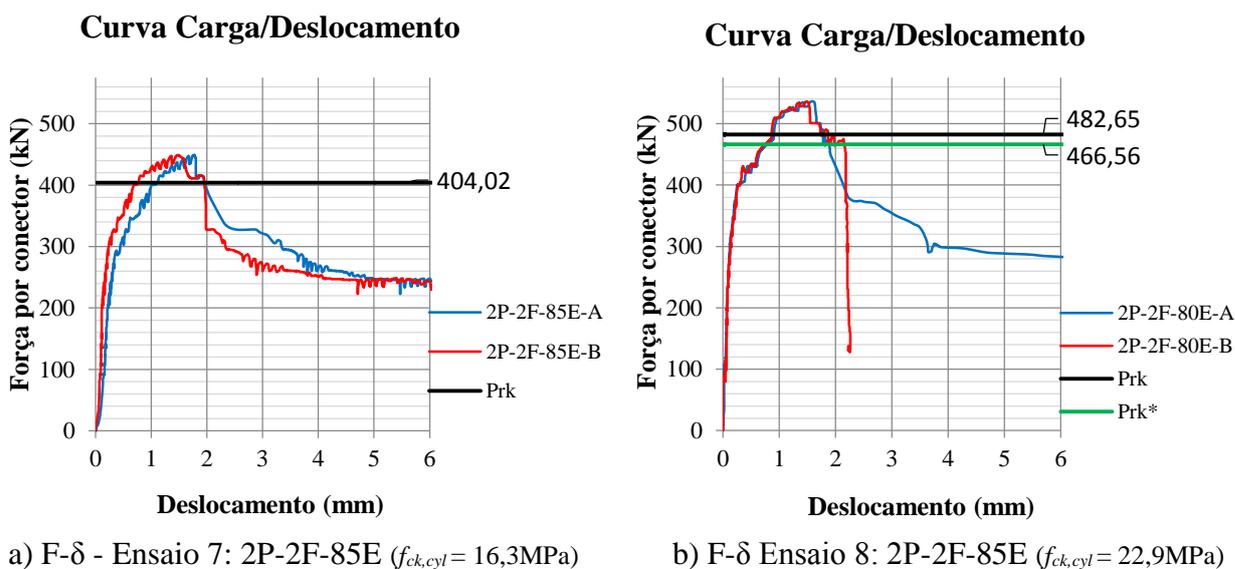


Figura 5.12-Curva carga/deslocamento para o agrupamento de conectores *Perfobond* 2P-2F-85E, nas duas séries ensaiadas

O ensaio 8 foi um dos ensaios em que foi necessário ajustar ligeiramente o valor da carga característica. Tal como pode ser observado na Figura 5.12, a carga máxima foi atingida num pico singular, encontrando-se o patamar de aumento de deformação, precedendo uma diminuição brusca da carga aplicada, ligeiramente abaixo do valor de P_{Rk} . Então, localizando a carga característica nesse mesmo patamar, obteve-se um valor de P_{Rk}^* de 466,56 kN, correspondente a 87% do valor da carga máxima atingida durante o ensaio.

Tal como na configuração anterior, é observável um aumento significativo da capacidade de carga quando comparado com o conector constituído apenas por um *Perfobond*, bem como com o agrupamento de conectores *Perfobond* 2P-2F-30E. À semelhança dos ensaios anteriores, também nestes é notório o aumento de capacidade de carga com o aumento da classe de betão.

Também esta configuração foi instrumentada de modo a ser possível determinar o estado de tensão no conector. Assim, os resultados referentes à relação carga/extensão do agrupamento de conectores 2P-2F-85E, encontram-se na Figura 5.13. Uma vez que no ensaio 8, não houve leituras numa das direções não foi possível determinar o estado de tensão no conector *Perfobond* para esse ensaio.

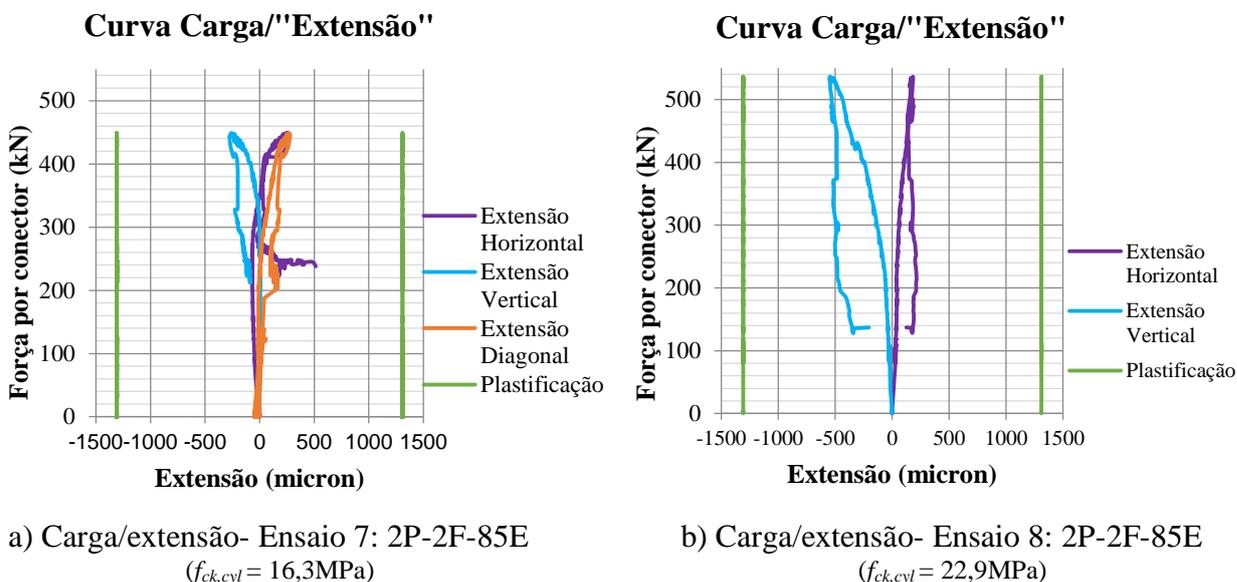


Figura 5.13-Curva carga/extensão para o conector 2P-2F-85E, nas duas séries ensaiadas

Através da análise dos gráficos da Figura 5.13, podemos afirmar que nem o ensaio 7 nem o ensaio 8 atingiram a plastificação. Ao contrário do sucedido no ensaio 8, para o ensaio 7 foi possível determinar o estado de tensão do conector *Perfobond*, podendo o mesmo ser observado através da Figura 5.14, confirmando-se na mesma a não plastificação do conector.

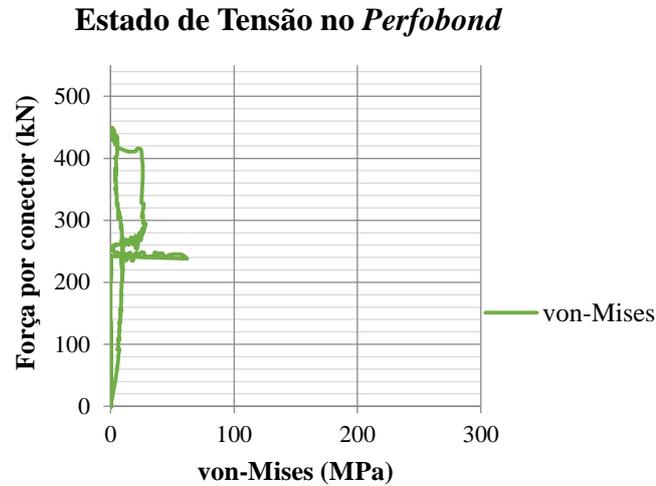
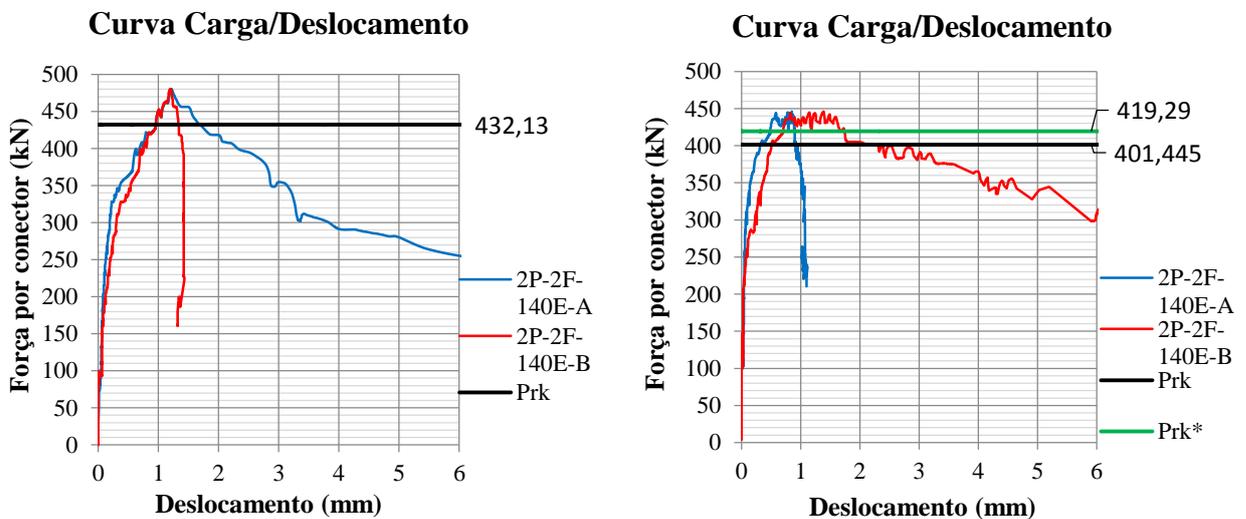


Figura 5.14-Carga/tensão von-Mises - Ensaio 7: 2P-2F-85E ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

A configuração de agrupamento de conectores *Perfobond*, 2P-2F-140E, dispõe de dois conectores *Perfobond* tão afastados quanto possível (140 mm). Os resultados obtidos para esta configuração, para ambas as séries de betão, podem ser observados na Figura 5.15.



a) F- δ - Ensaio 9: 2P-2F-140E ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

b) F- δ - Ensaio 10: 2P-2F-140E ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

Figura 5.15- Curva carga/deslocamento para o agrupamento de conectores *Perfobond* 2P-2F-140E, nas duas séries ensaiadas

O ensaio 10 foi outro dos ensaios em que foi necessário ajustar o valor da carga característica. Tal como observado na Figura 5.15, a carga máxima foi atingida num patamar constante, no qual a laje B se foi deformando mais que a laje A. Então, localizando a carga característica no

patamar que precede uma diminuição brusca da carga aplicada, obteve-se um valor de P_{Rk}^* de 419,29 kN, correspondente a 94% do valor da carga máxima atingida durante o ensaio.

Na presente configuração, à semelhança do que já havia sido observado anteriormente, é notável um aumento da capacidade de carga com o aumento do espaçamento, embora não tão expressivo como o verificado entre as duas configurações anteriores. No entanto, ao contrário do verificado nos ensaios anteriores, a capacidade de carga diminuiu com o aumento da classe do betão. Além disso, também ao contrário do que se havia verificado até aqui, nos ensaios 9 e 10, o deslizamento característico observado foi inferior no betão de classe C16/20 quando comparado com o betão de classe C20/25, tendo-se registado os valores de 1,35mm e 1,41mm, respetivamente.

Os resultados obtidos relativamente aos extensómetros de roseta instrumentados no conector *Perfobond*, para ambas as séries de ensaios, do agrupamento 2P-2F-140E, encontram-se na Figura 5.16.

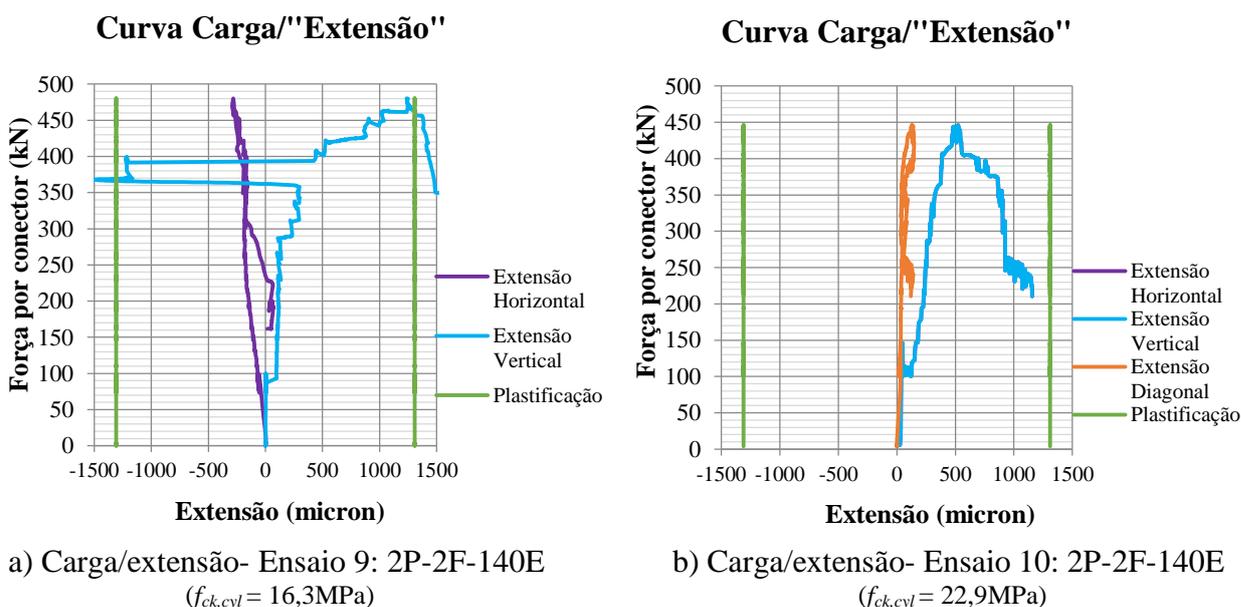


Figura 5.16-Curva carga/extensão para o conector 2P-2F-140E, nas duas séries ensaiadas

Como se observa na figura anterior, no ensaio 9, o conector mantém-se em regime elástico na direção horizontal, tendo atingido uma possível plastificação e conseqüentemente entrado em regime plástico na direção vertical, uma vez que ultrapassa os 1309micron nessa direção. Por outro lado, no ensaio 10 não se verificou tal plastificação em nenhuma das direções. Além disso, neste ensaio a extensão horizontal apresenta valores apenas até uma fase muito prematura do

mesmo, não sendo possível determinar o estado de tensão no conector, à semelhança do que aconteceu com o ensaio 9.

Uma outra configuração de agrupamento de conectores consta na disposição em paralelo de 3 conectores *Perfobond* igualmente espaçados. Os resultados experimentais obtidos para o agrupamento de conectores 3P-2F-64E encontram-se na Figura 5.17.

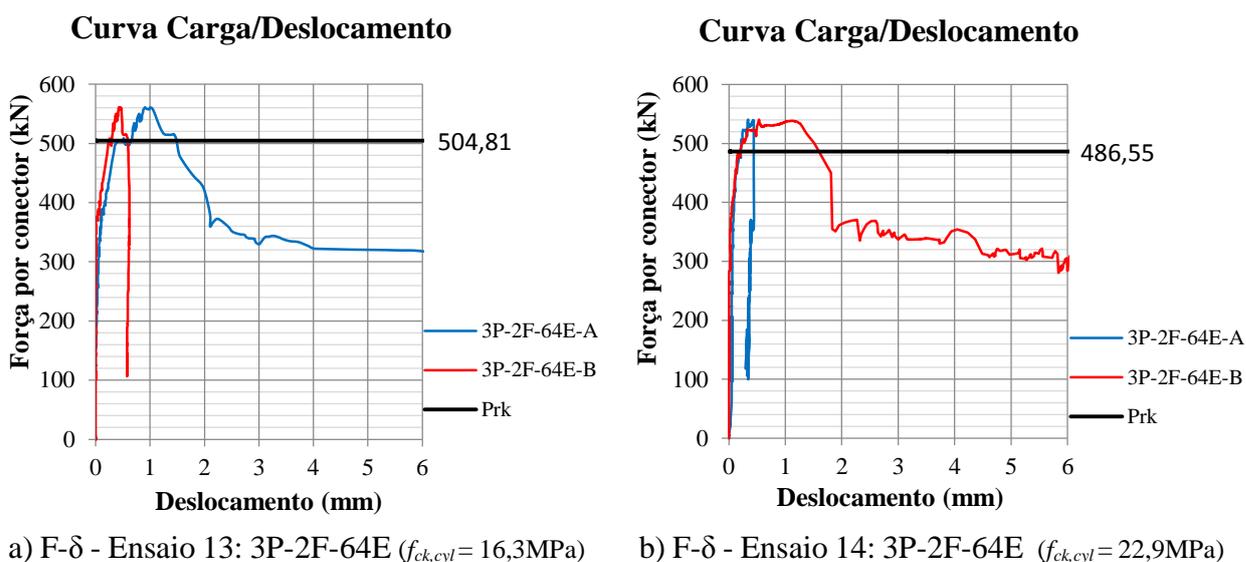


Figura 5.17-Curva carga/deslocamento para o agrupamento de conectores *Perfobond* 3P-2F-64E, nas duas séries ensaiadas

O acréscimo do número de conectores *Perfobond* revelou, tal como seria esperado, um aumento da capacidade de carga. No ensaio 13 esse aumento de capacidade de carga é bastante significativo quando comparado com as configurações anteriores. Por outro lado, e devido ao aumento de rigidez desta ligação, o deslizamento característico teve um ligeiro decréscimo, registando-se o valor de 0,93mm. Aumentando a classe de betão, no ensaio 14, é observável um ligeiro aumento da capacidade de carga em relação às configurações anteriores, no entanto, verificou-se uma diminuição desta com o aumento da classe de betão. Além disso, também o deslizamento característico diminuiu para um valor médio de 0,88mm.

Tal como nos agrupamentos de dois conectores *Perfobond*, também neste agrupamento de três *Perfobond* se instrumentaram os *Perfobond* de maneira a se poder determinar o estado de tensão no conector. Uma vez que nesta configuração existem três conectores *Perfobond*, optou-se por instrumentar o conector exterior, de maneira a ser possível comparar os resultados obtidos com os verificados nos agrupamentos de dois conectores *Perfobond*. Assim, os resultados obtidos podem ser observados na Figura 5.18 e na Figura 5.19.

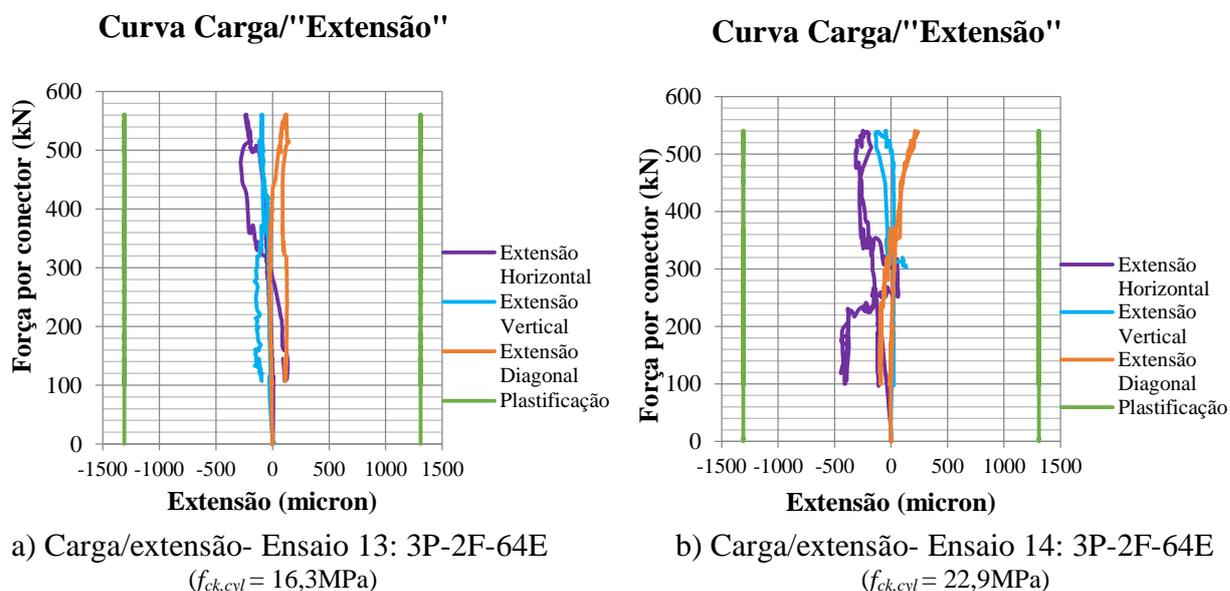


Figura 5.18-Curva carga/extensão para o conector 3P-2F-64E, nas duas séries ensaiadas

Tanto no ensaio 13 como no ensaio 14 não foi atingida a plastificação em nenhuma das direções, encontrando-se portanto os conectores em regime elástico. Uma vez que foram registadas leituras ao longo de cada ensaio, em todas as direções, foi possível determinar o estado de tensão dos conectores, encontrando-se os mesmos representados na Figura 5.19, que demonstra que os conectores se mantiveram em regime elástico.

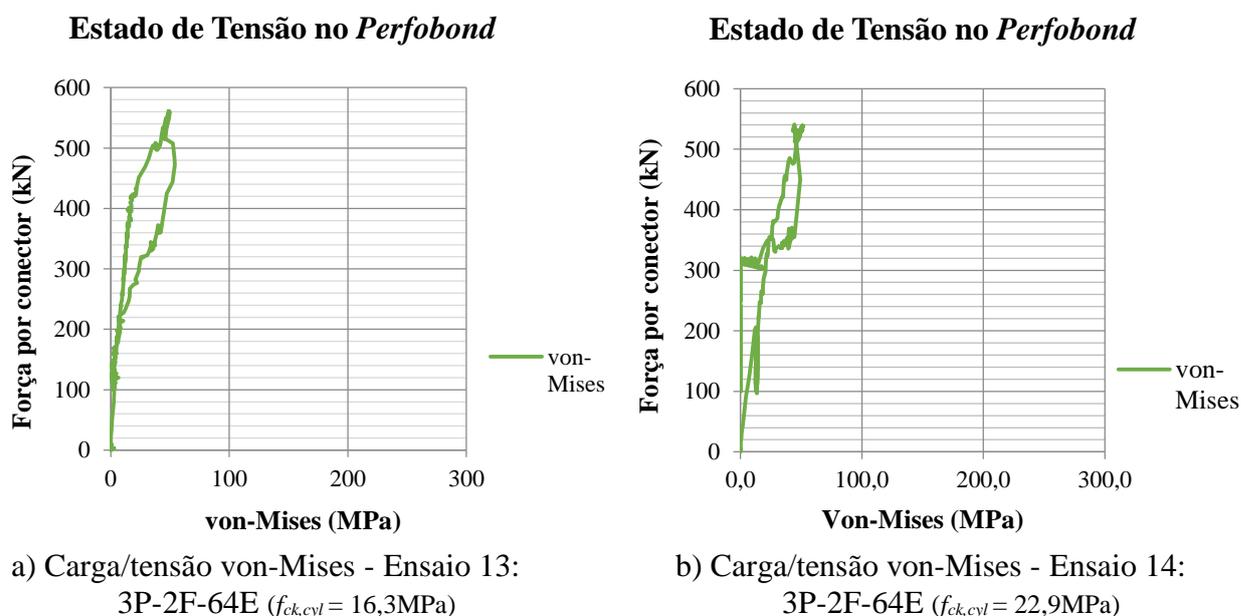


Figura 5.19- Carga/tensão von-Mises para o agrupamento 3P-2F-64E nas duas séries ensaiadas

Procedendo, a uma comparação direta com o conector *Perfobond* isolado, podemos tecer algumas considerações: Em ambas as séries ensaiadas é notório um acréscimo da capacidade de carga com o aumento do espaçamento e aumento do número de conectores *Perfobond*. De maneira a facilitar a leitura de resultados para comparação dos mesmos, na Figura 5.20 representa-se o gráfico de barras comparativo para as configurações cujos resultados foram anteriormente apresentados para a 1ª série de ensaios, enquanto que o gráfico relativo à 2ª série de ensaios pode ser observado na Figura 5.21. As diferenças de carga podem ser consultadas no Quadro 5.4 e no Quadro 5.5.

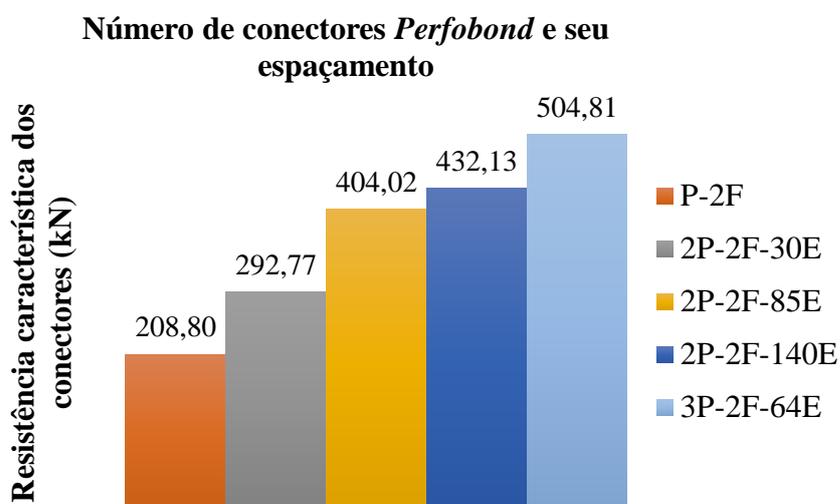


Figura 5.20-Comparação do número de conectores *Perfobond* e seu espaçamento ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

Como pode ser observado no Quadro 5.4, um aumento no número de conectores bem como o aumento do espaçamento, traduz-se no aumento de capacidade de carga. Na configuração em que os conectores se encontram o mais próximo possível, 2P-2F-30E, o ganho é de apenas 40,2%, ou seja, o conjunto suporta cerca de 1,4 vezes a carga de um conector *Perfobond* isolado. Já no agrupamento de conectores espaçados de 85mm, 2P-2F-8, a diferença é mais expressiva, equivalendo a carga do conjunto a 1,93 vezes a carga de um *Perfobond* isolado. No agrupamento de dois conectores em que estes se encontram tão espaçados quanto possível, 2P-2F-140E, o ganho de capacidade de carga do conjunto quando comparada com a disposição de um conector *Perfobond* isolado, é de cerca de 2,07 vezes.

O agrupamento composto por 3 conectores *Perfobond*, como seria de esperar tem um ganho ainda mais expressivo. A capacidade de carga do conjunto equivale a 2,42 vezes a capacidade de carga de um conector *Perfobond* isolado.

Quadro 5.4- Ganhos a nível de capacidade de carga relativamente ao conector *Perfobond* Isolado ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

Ganho de carga (P_{rk}) em relação ao <i>Perfobond</i> isolado		
Designação	Diferença	
	(kN)	(%)
2P-2F-30E	83,97	40,2%
2P-2F-85E	195,22	93,5%
2P-2F-140E	223,32	107,0%
3P-2F-64E	296,01	141,8%

Em relação à segunda série de ensaios, no geral, a tendência de aumento de capacidade de carga com o aumento do número de conectores e seu espaçamento voltou a confirmar-se, tal como pode ser observado na Figura 5.21.

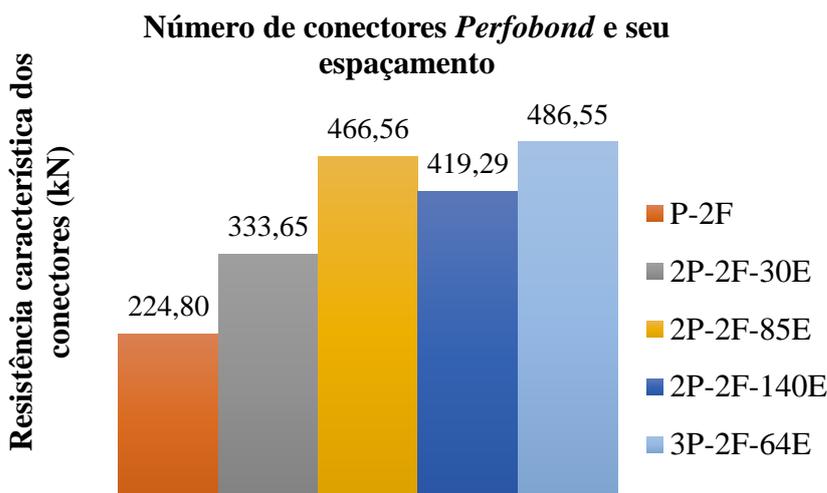


Figura 5.21-Comparação do número de conectores *Perfobond* e seu espaçamento ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

Nesta segunda série de ensaios, no agrupamento de conectores 2P-2F-30E, verificou-se que o conjunto suporta cerca de 1,48 vezes a carga suportada por um conector *Perfobond* na sua configuração isolada. Já o agrupamento 2P-2F-85E tem um aumento significativo na capacidade de carga, suportando este conjunto 2,08 vezes a carga suportada por um *Perfobond* apenas. Por outro lado, no agrupamento em que o espaçamento é o maior possível, 2P-2F-140E, houve uma redução de carga quando comparado com os restantes agrupamentos, suportando apenas 1,87 vezes a carga de um conector *Perfobond* na sua configuração isolada.

Quadro 5.5- Ganhos a nível de capacidade de carga relativamente ao conector *Perfobond* Isolado ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

Designação	Diferença	
	(kN)	(%)
2P-2F-30E	108,85	48,42%
2P-2F-85E	241,77	107,55%
2P-2F-140E	194,49	86,52%
3P-2F-64E	261,76	116,44%

No agrupamento composto por 3 conectores *Perfobond* espaçados de 64mm, 3P-2F-64E, voltou a verificar-se a tendência de aumento de capacidade de carga, embora não tão expressivo como nas configurações anteriores. Neste, o agrupamento de conectores suporta cerca de 2,16 vezes a carga suportada por um *Perfobond* isolado.

Em relação à capacidade de deslizamento, os resultados são idênticos em ambas as séries ensaiadas. Todos os agrupamentos verificaram um deslizamento característico abaixo do verificado pelo *Perfobond* na sua configuração isolada. Aliás, tal como havia sido referido ao longo deste capítulo, nenhuma configuração cumpriu o critério de ductilidade segundo o Eurocódigo 4. Em ambas as séries, a configuração com maior capacidade de deslizamento foi o agrupamento 2P-2F-85E, enquanto que, como seria de esperar, a que teve menor capacidade de deslizamento foi o agrupamento de 3 conectores *Perfobond*, 3P-2F-64E, como se observa na Figura 5.22 e Figura 5.23, correspondendo à 1ª e 2ª série de ensaios respetivamente.

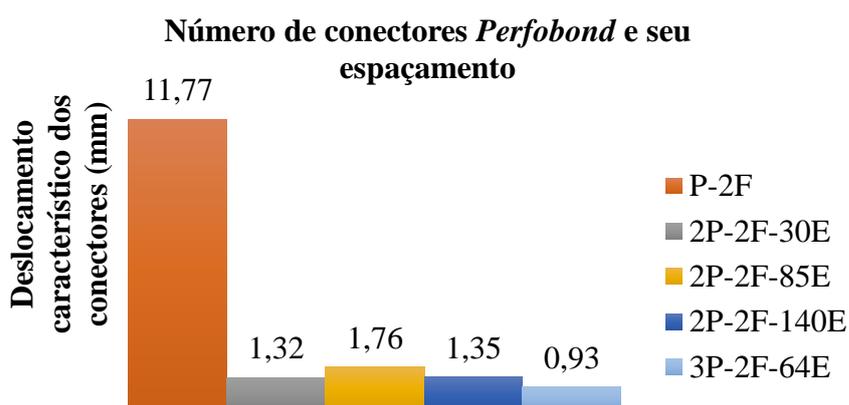


Figura 5.22- Comparação do número de conectores *Perfobond* e seu espaçamento ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

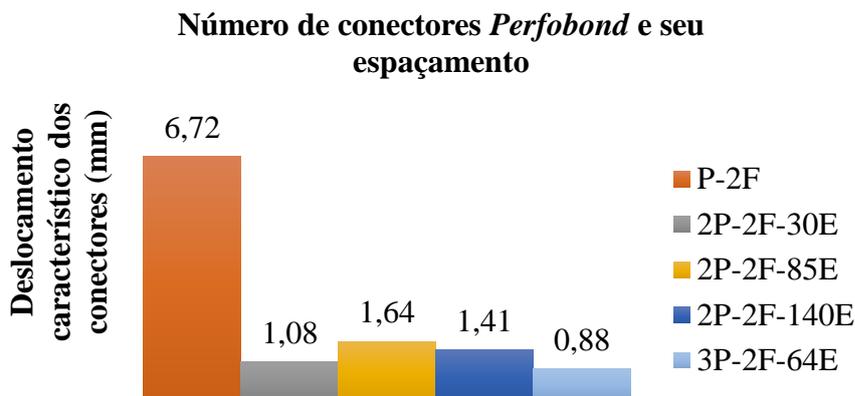


Figura 5.23-Comparação do número de conectores *Perfobond* e seu espaçamento ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

5.5 Influência da armadura

Como descrito no capítulo anterior, era também objetivo do programa experimental estudar a influência da armadura passante nos furos. Para tal, nas configurações 2P-2F-140E, a mais espaçada das configurações compostas pelo agrupamento de dois conectores *Perfobond*, e ainda para o agrupamento 3P-2F-64E, optou-se por introduzir varões $\varnothing 16$ nos furos dos conectores de maneira a aferir o comportamento dos conectores com a presença de armadura. Os resultados experimentais obtidos para os ensaios 11 e 12 correspondentes à configuração 2P-2F-140E-AR16, podem ser observados através da Figura 5.24.

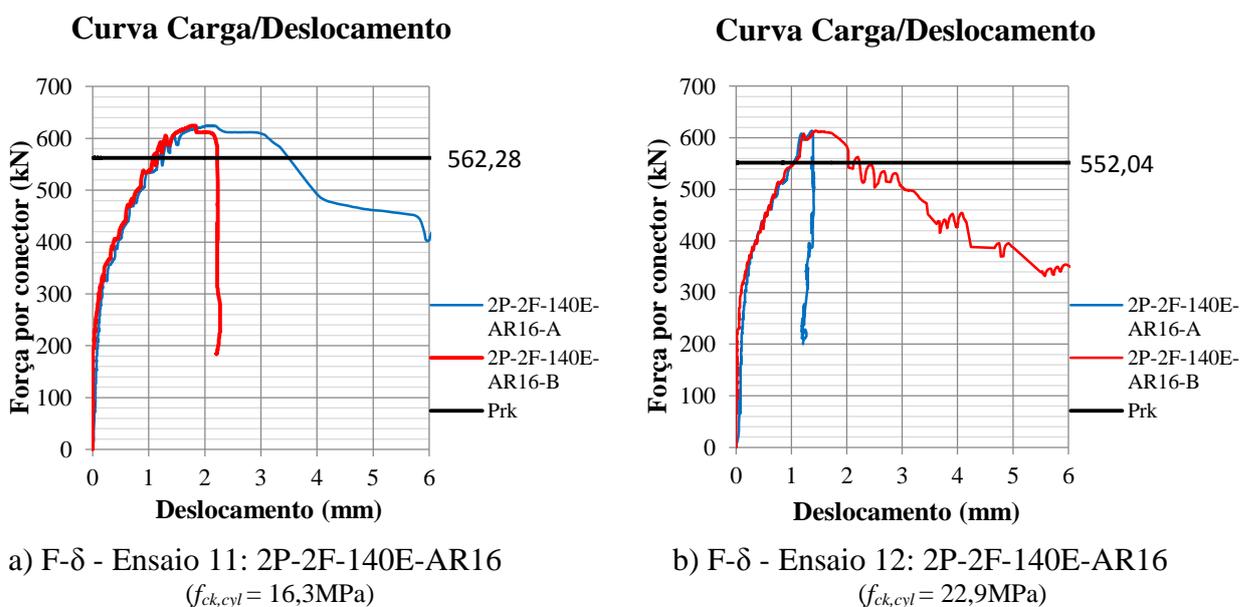


Figura 5.24- Curva carga/deslocamento para o agrupamento de conectores *Perfobond* 2P-2F-140E-AR16, nas duas séries ensaiadas

Em relação à capacidade de carga, é notório um aumento da mesma com a introdução da armadura. No entanto, nesta configuração com armadura, à semelhança do que havia sucedido na mesma configuração sem armadura, 2P-2F-140E, houve uma pequena diminuição da capacidade de carga com o aumento da classe de betão. Quanto ao deslizamento característico, as melhorias são notórias quando comparado com a configuração sem armadura. No entanto este deslizamento diminui também com o aumento da classe de betão.

De maneira a determinar o estado de tensão da armadura, instrumentou-se a mesma com um extensómetro linear, para além do extensómetro de roseta no conector *Perfobond*. Assim, os resultados obtidos relativamente à extensão no conector *Perfobond* podem ser consultados na Figura 5.25, enquanto que a extensão verificada na armadura é representada na Figura 5.26.

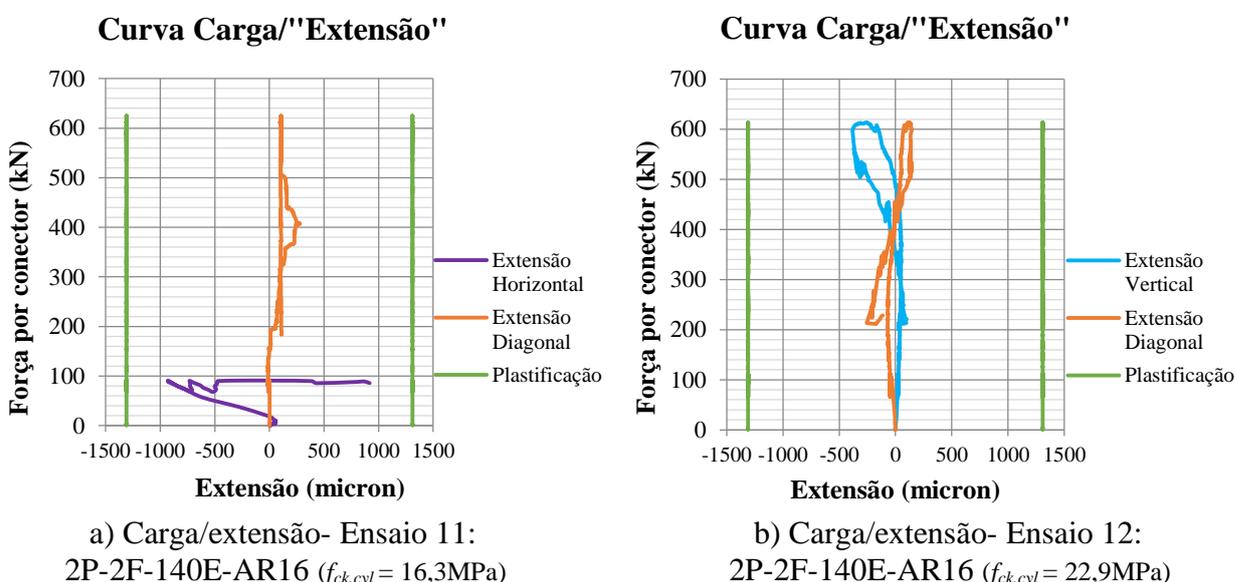


Figura 5.25-Curva carga/extensão para o conector 2P-2F-140E-AR16, nas duas séries ensaiadas

Relativamente à extensão verificada, a Figura 5.25 indica que em ambos os ensaios a plastificação não é atingida em nenhuma das direções. Em relação ao comportamento da armadura, é visível que também esta se encontra em regime elástico em ambos os ensaios. No entanto, é notória a sollicitação desta, tendo em conta a extensão verificada no ensaio 12.

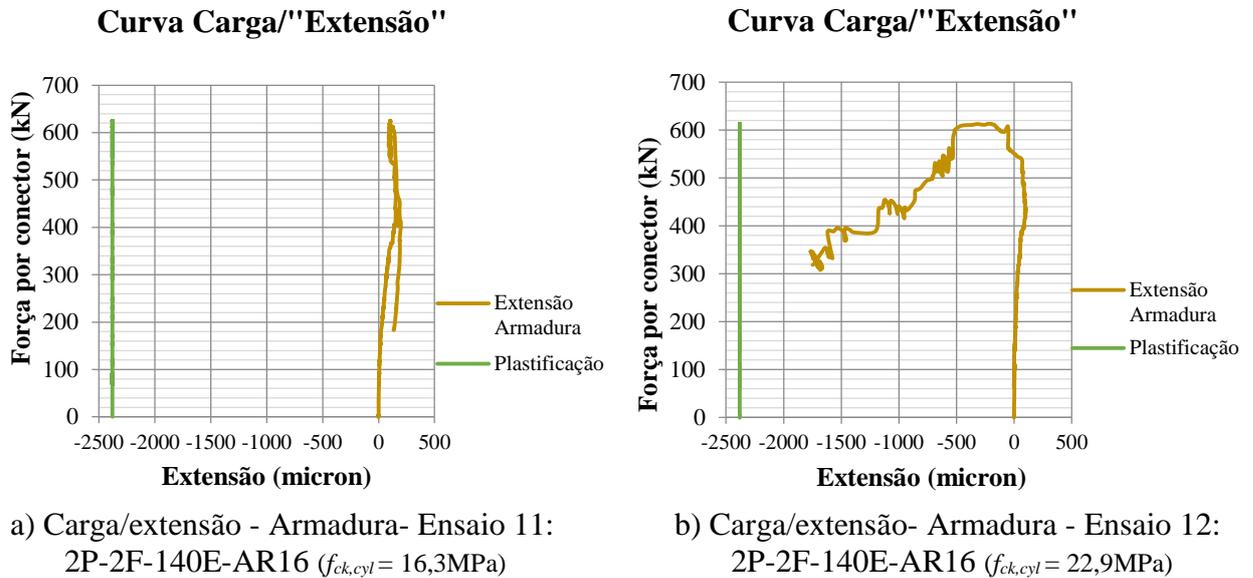


Figura 5.26-Curva carga/extensão para a armadura do conector 2P-2F-140E-AR16, nas duas séries ensaiadas

Para além do agrupamento de conectores 2P-2F-140E, também o agrupamento composto por três conectores *Perfobond* foi estudado de maneira a aferir o efeito da armadura passante nos furos. Na Figura 5.27, é possível observar as curvas carga/deslocamento referentes aos ensaios 15 e 16 da configuração 3P-2F-64E-AR16.

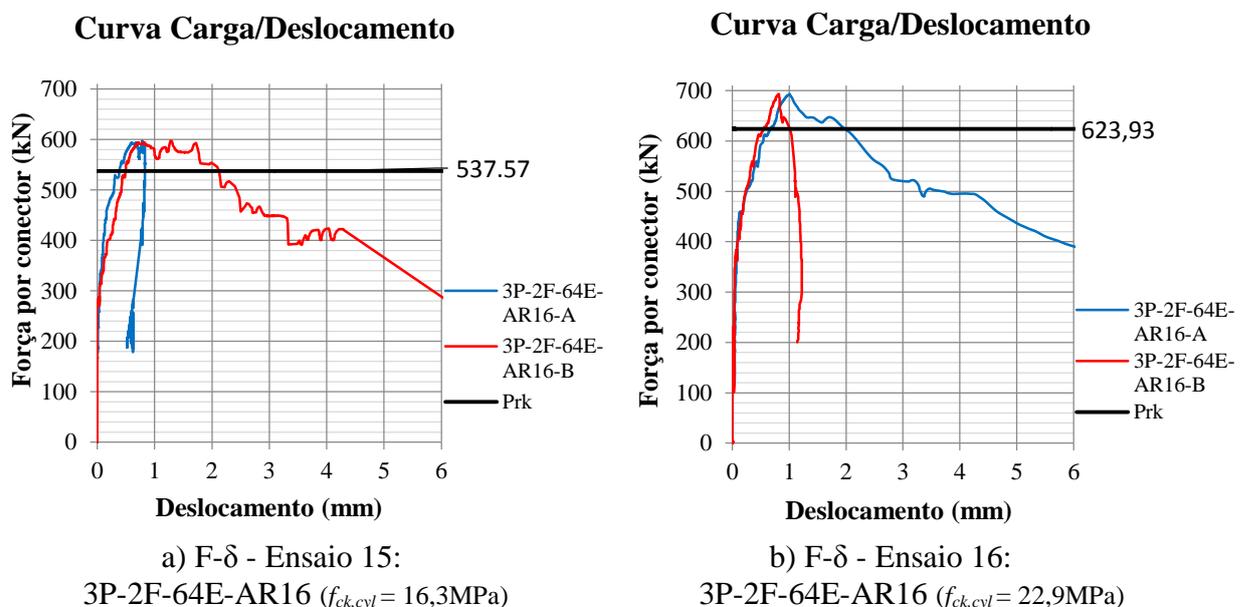


Figura 5.27-Curva carga/deslocamento para o agrupamento de conectores *Perfobond* 3P-2F-64E-AR16, nas duas séries ensaiadas

À semelhança do que havia sido verificado na configuração anterior, também nesta é visível o aumento da capacidade de carga com a introdução de armadura. Além disso, na presente configuração existe um aumento substancial da capacidade de carga com o aumento da classe de betão, registando-se um acréscimo de cerca de 85kN. Em relação à capacidade de deslizamento é notório também um aumento dessa capacidade quando comparado com a configuração sem armadura, no entanto, verifica-se uma diminuição do deslizamento com o aumento da classe de betão.

Na Figura 5.28 é possível observar o comportamento do conector *Perfobond*. Através da análise dos resultados obtidos, é claro que em ambos os ensaios os conectores se encontram em regime elástico, não se verificando plastificação em nenhuma das direções.

Uma vez que foram registadas leituras em todas as direções do extensómetro de roseta em ambos os ensaios, foi possível determinar o estado de tensão no conector *Perfobond*, encontrando-se o mesmo representado na Figura 5.29.

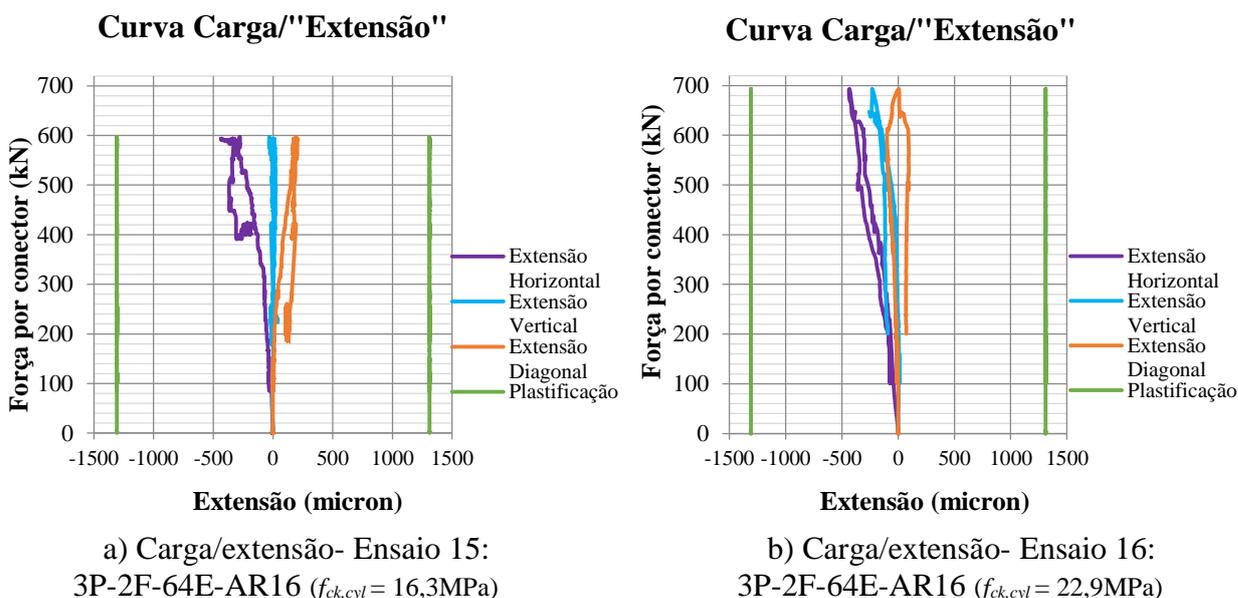


Figura 5.28-Curva carga/extensão para o conector 3P-2F-64E-AR16, nas duas séries ensaiadas

Os resultados obtidos na relação carga/tensão de von-Mises, referentes a ambos os ensaios espelham o afirmado anteriormente, não se tendo verificado plastificação dos conectores *Perfobond*, encontrando-se estes em regime elástico.

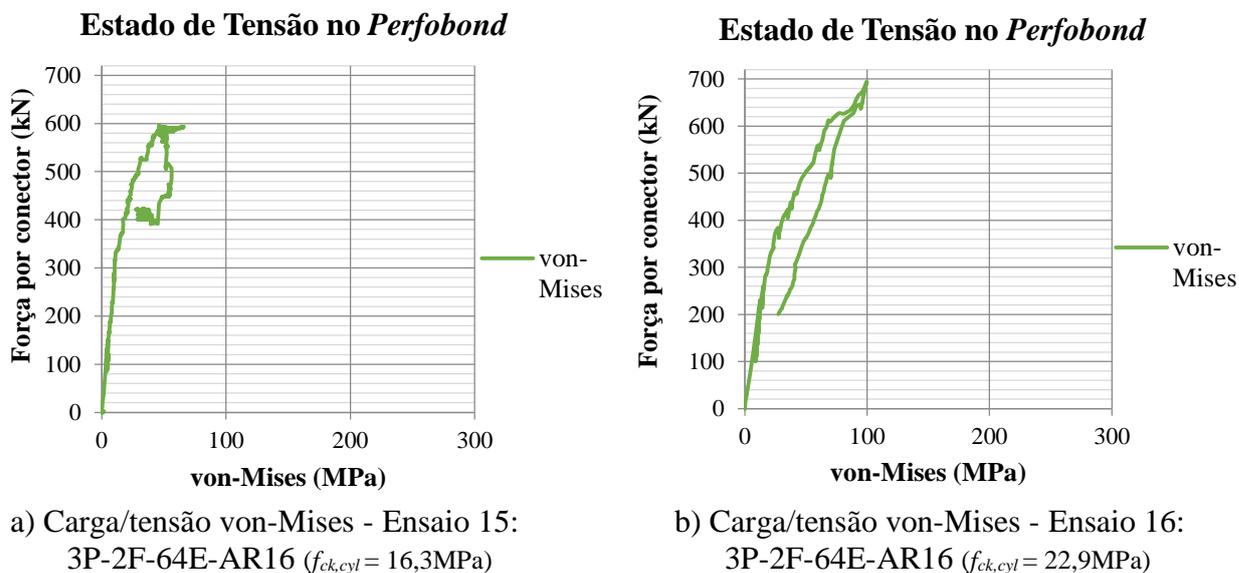


Figura 5.29- Carga/tensão von-Mises para o agrupamento 3P-2F-64E-AR16 nas duas séries ensaiadas

Na Figura 5.30 encontra-se a extensão verificada pela armadura passante nos furos em ambas as séries de ensaio.

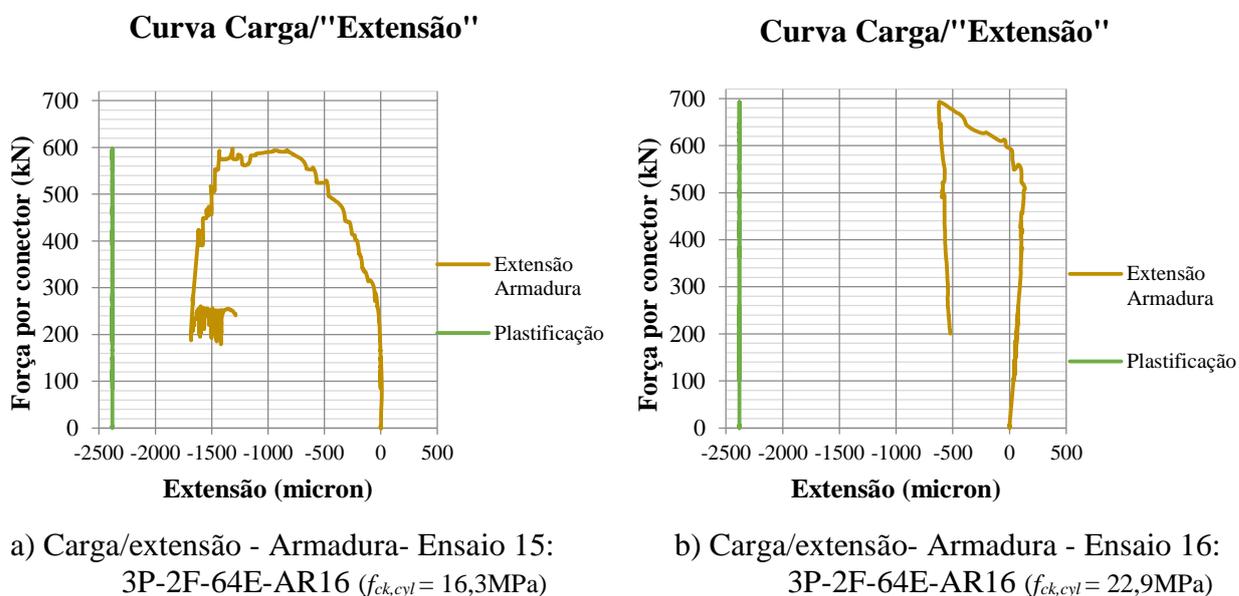


Figura 5.30-Curva carga/extensão para a armadura do conector 3P-2F-64E-AR16, nas duas séries ensaiadas

Através da análise da figura anterior, é notório que a armadura não plastificou. É no entanto de notar a solicitação da mesma, bastante visível no gráfico correspondente ao ensaio 15, bem como na Figura 5.31.



Figura 5.31- Solicitação da armadura no ensaio 15

Procedendo agora a uma comparação direta com as configurações correspondentes sem armadura, é possível tecer algumas considerações.

Em ambas as séries, os ganhos de capacidade de carga com a introdução de armadura passante nos furos são notáveis. Na 1ª série de ensaios os ganhos variam entre os 30% e os 6%, sendo mais expressivos no agrupamento com dois conectores *Perfobond*, 2P-2F-140E. Já na 2ª série de ensaios os ganhos são mais expressivos, variando entre os 32% e os 28%, sendo na mesma a configuração com dois conectores *Perfobond* a mais influenciada pela introdução de armadura passante nos furos. Tais resultados podem ser mais facilmente observados na Figura 5.32 e Figura 5.33, bem como no Quadro 5.6 e Quadro 5.7.

Quadro 5.6-Ganhos a nível de capacidade de carga com a introdução de armadura nos furos dos conectores *Perfobond* ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

Designação	Ganho de carga (P_{rk}) com Armadura	
	Diferença (kN)	Diferença (%)
2P-2F-140E-AR16 vs 2P-2F-140E	130,15	30,12%
3P-2F-64E-AR16 vs 3P-2F-64E	32,76	6,49%

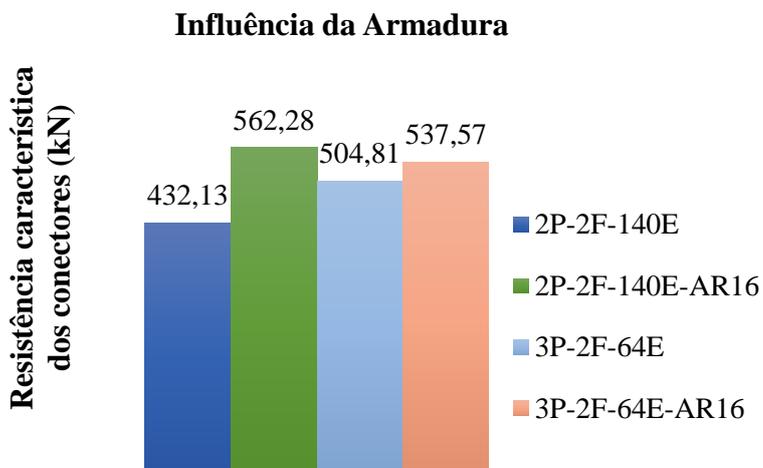


Figura 5.32- Influência da Armadura na capacidade de carga ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

Quadro 5.7- Ganhos a nível de capacidade de carga com a introdução de armadura nos furos dos conectores *Perfobond* ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

Ganho de carga (P_{rk}) com Armadura		
Designação	Diferença	
	(kN)	(%)
2P-2F-140E-AR16 vs 2P-2F-140E	132,75	31,66%
3P-2F-64E-AR16 vs 3P-2F-64E	137,38	28,23%

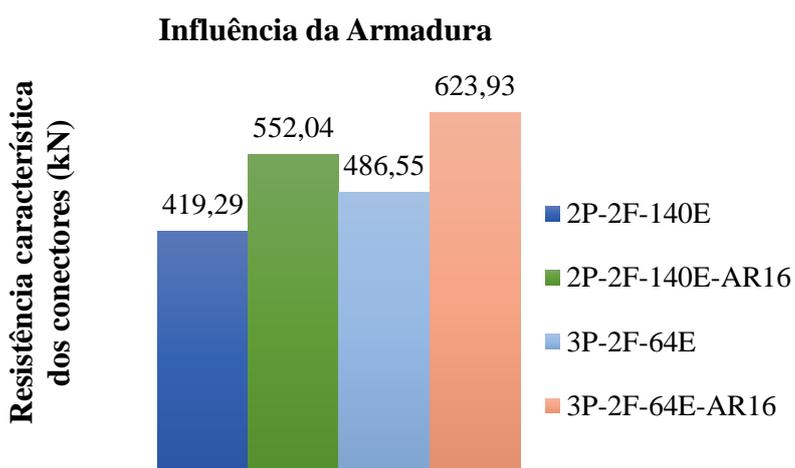


Figura 5.33-Influência da Armadura na capacidade de carga ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

Em relação à capacidade de deslizamento, é notável o aumento desta com a introdução de armadura. Na 1ª série de ensaios os ganhos de capacidade de deslizamento foram bastante expressivos, embora não o suficiente para serem considerados dúcteis. Na 2ª série de ensaios também se verificaram ganhos embora não tão expressivos, tal como pode ser observado na Figura 5.34 e na Figura 5.35.

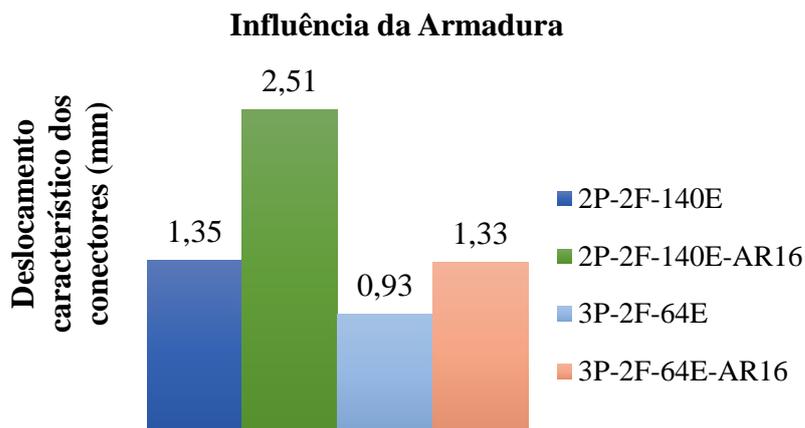


Figura 5.34- Influência da Armadura na capacidade de deslizamento ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

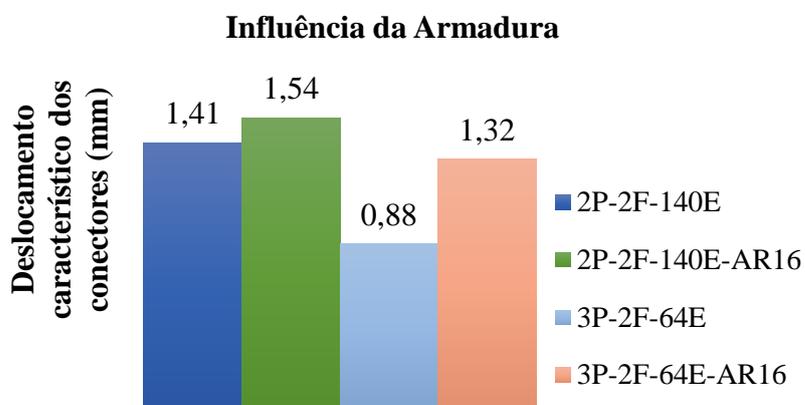


Figura 5.35- Influência da Armadura na capacidade de deslizamento ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

5.6 Influência da resistência do betão

Ao longo do presente capítulo foi sendo feita a comparação entre séries ensaiadas, correspondentes aos dois tipos de betão utilizados, C16/20 e C20/25, de maneira a facilitar a leitura e análise. Tais comparações serão agora resumidas, encontrando-se compiladas no Quadro 5.8.

Quadro 5.8- Influência do aumento da classe de betão a nível de capacidade de carga e de deslizamento

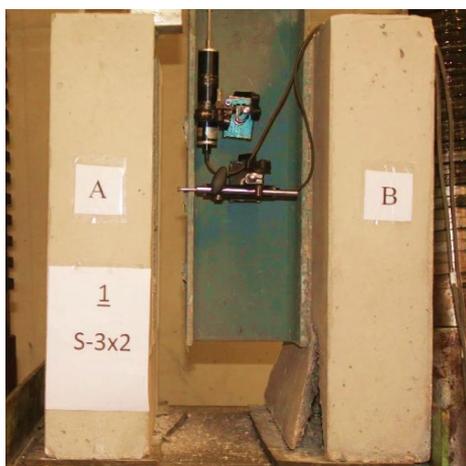
Betão 2 vs Betão 1				
Designação	$P_{rk2} - P_{rk1}$		$\delta_{uk2} - \delta_{uk1}$	
	Diferença		Diferença	
	(kN)	(%)	(mm)	(%)
S-3x2	14,05	3,49%	-0,41	-9,46%
P-2F	15,99	7,11%	-5,05	-75,22%
2P-2F-30E	40,88	12,25%	-0,23	-21,58%
2P-2F-85E	62,54	13,40%	-0,11	-6,85%
2P-2F-140E	-12,84	-3,06%	0,06	4,47%
2P-2F-140E-AR16	-10,24	-1,86%	-0,97	-62,87%
3P-2F-64E	-18,26	-3,75%	-0,05	-6,15%
3P-2F-64E- AR16	86,36	13,84%	0,005	-0,34%

As variações verificadas com o aumento da classe de betão não foram lineares. Regra geral verificou-se um aumento da capacidade de carga com o aumento da classe de betão, em alguns casos significativo, tais como nos ensaios 2P-2F-30E, 2P-2F-85E e 3P-2F-64E-AR16, com ganhos acima dos 10%. Por outro lado, no agrupamento de dois conectores mais espaçados, 2P-2F-140E (com e sem armadura) e no agrupamento de três conectores sem armadura, 3P-2F-64E, verificou-se uma ligeira diminuição da capacidade de carga, o que é naturalmente próprio da natureza de ensaios deste tipo, em que existem variações imprevisíveis de propriedades geométricas e da sequência de rotura.

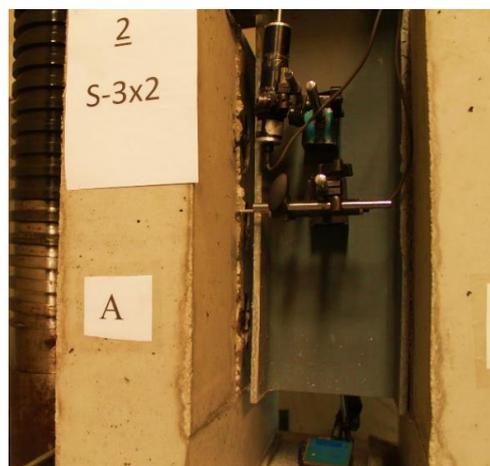
Em relação à capacidade de deslizamento, verificou-se uma tendência geral de diminuição dessa capacidade com o aumento da classe de betão. Exceção feita, mais uma vez, ao ensaio 2P-2F-140E, na qual se verificou um deslizamento característico superior no ensaio 10 com betão C20/25 quando comparado com o ensaio 9 com betão C16/20, bem como o ensaio 16 que apresentou também uma capacidade de deslizamento ligeiramente superior à do ensaio 15, na configuração 3P-2F-64E-AR16.

5.7 Análise do Modo de Rotura

Os conectores tipo *Stud* usados nestes ensaios não cumpriram o critério de ductilidade do Eurocódigo 4 e apresentaram rotura frágil provocada pelo corte dos varões na zona da solda, observando-se um corte e separação dos mesmos em relação ao perfil metálico numa das lajes, como pode ser observado na Figura 5.36. Esta rotura ocorreu para ambas as séries ensaiadas. Além disso, na 1ª série de ensaios verificou-se uma abertura de fendas significativa na laje B, levando mesmo à separação de parte da laje pouco antes de ocorrer rotura na laje A.



a) Modo de rotura final - Ensaio 1



b) Modo de rotura final - Ensaio 2

Figura 5.36- Modo de rotura final do conector S-3x2 em ambas as séries ensaiadas

Nos provetes correspondentes ao conector *Perfobond* isolado, verificou-se um modo de rotura que se iniciou com a abertura de fendas no betão, na direção do conector, junto à sua extremidade inferior. De seguida, surgiram fendas com uma inclinação de aproximadamente 45°. Com o aumento da carga verificou-se um ligeiro destacamento da laje de betão ao longo do comprimento do conector, devido ao *uplift* registado, como pode ser observado na Figura 5.37. A rotura final ocorreu com o esmagamento do betão na zona inferior do provete.



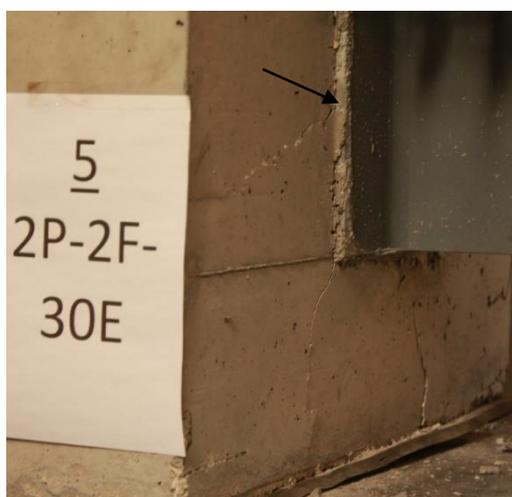
a) Modo de rotura intermédio - Ensaio 3



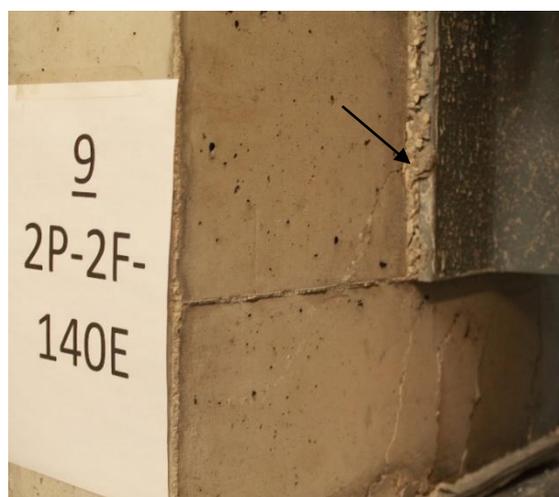
b) Modo de rotura intermédio - Ensaio 4

Figura 5.37- Modo de rotura intermédio do conector P-2F em ambas as séries ensaiadas

Nos agrupamentos de conectores *Perfobond* sem armadura passante nos furos, o modo de rotura caracteriza-se pela abertura de fendas a 45°, junto à parte inferior do conector, variando a sua origem com o espaçamento entre conectores - Figura 5.38. À semelhança do sucedido com a configuração do conector *Perfobond* isolado, com o aumento da carga verificou-se o esmagamento do betão na zona inferior do conector.



a) Modo de rotura intermédio - Ensaio 5



b) Modo de rotura intermédio - Ensaio 9

Figura 5.38- Modo de rotura intermédio nas configurações 2P-2F-30E e 2P-2F-140E

Na 2ª série de ensaios, correspondente ao betão de classe C20/25, nos agrupamentos de dois e três *Perfobond* verificou-se geralmente uma deformação ligeiramente diferente nas duas lajes, uma vez que após o aparecimento das primeiras fendas, numa das lajes o esmagamento do betão

era mais notório que na outra. A situação mais discrepante aconteceu no ensaio 10 em que a laje A não passou mesmo do aparecimento das primeiras fendas. Neste ensaio a prensa descarregava por completo com o aparecimento da mais pequena fenda, situação não verificada nos restantes ensaios. O aspeto final de ambas as lajes pode ser observado na Figura 5.39.



a) Modo de rotura final - Ensaio 10: laje A



b) Modo de rotura final - Ensaio 10: Laje B

Figura 5.39 - Modo de rotura final no ensaio 10: 2P-2F-140E (C20/25)

Para os provetes com armadura nos furos o modo de rotura iniciou-se da mesma forma do que nos sem armadura. No entanto, à medida que o carregamento continuava, a armadura ficava cada vez mais solicitada à tração, deslizando da laje de betão. Além disso, verificou-se um destacamento de betão na zona da armadura, como ilustrado na Figura 5.40 e na Figura 5.41.



a) Modo de rotura intermédio - Ensaio 12

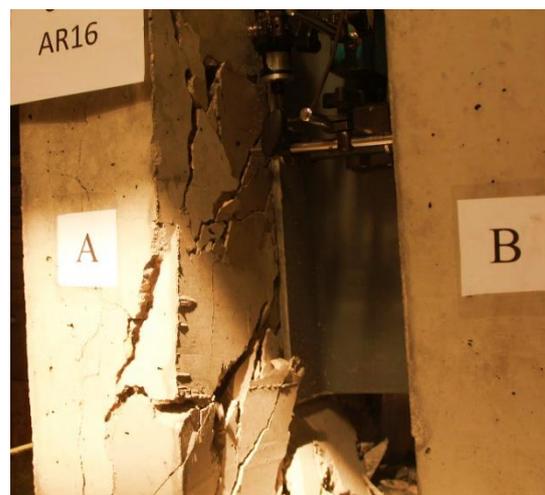


b) Modo de rotura intermédio - Ensaio 15

Figura 5.40- Modo de rotura intermédio nos ensaios 12 e 15



a) Modo de rotura intermédio - Ensaio 16



b) Modo de rotura final - Ensaio 16

Figura 5.41- Modos de rotura no ensaio 16

O provete de ensaio 3P-2F-64E revelou uma situação inicial idêntica, podendo-se no entanto concluir que a distribuição de esforços para a laje de betão é superior às configurações anteriores, uma vez que se verificou um aumento de carga sem ocorrência de fissuras.

No ensaio 16 verificou-se que o aparecimento da primeira fenda ocorreu após ter sido ultrapassada uma carga superior a 500kN.

5.8 Comparação com os Conectores *Stud*

Os ensaios 1 e 2 foram realizados com o intuito de estudar uma possível alternativa aos tradicionais *Nelson Stud*, com materiais correntes e sem execução especial. Verificou-se que esta alternativa, ao contrário dos tradicionais *Nelson Stud*, não cumpre o critério de ductilidade do Eurocódigo 4. No entanto, os resultados obtidos para a capacidade de carga foram bastante próximos dos resultados teóricos para os *Nelson Stud*, como se observa no Quadro 5.9. É importante referir que a configuração S-3x2 era composta por 6 conectores, portanto, a nível de capacidade de carga, os resultados são praticamente idênticos aos *Studs*.

Como havia sido referido no capítulo 2, os conectores *Stud* dispõem de algumas limitações, e o conector *Perfobond*, devido à sua capacidade de carga e boa resposta perante cargas cíclicas, capaz de substituir um grupo de conectores tipo *Stud*, como mostra o Quadro 5.9 para ambas as séries ensaiadas.

De maneira a efetuar uma comparação entre as configurações ensaiadas experimentalmente e os tradicionais *Stud*, utilizaram-se as equações 2 e 3 do Eurocódigo 4 com o objetivo de determinar a quantidade de conectores do tipo *Stud* necessários para obter a mesma capacidade de carga que as configurações ensaiadas experimentalmente.

Utilizaram-se as seguintes características dos *Stud*: conectores de 19mm de diâmetro em aço S400, (tensão de cedência de 400MPa, de acordo com EN10025), betão das classes ensaiadas C16/20 e C20/25 (com uma resistência característica em provetes cilíndricos de 16,3 e 22,9 MPa, respetivamente).

Quadro 5.9- Equivalência dos conectores ensaiados com conectores do tipo *Stud* de 19mm

Número equivalente de Studs				
	C16/20		C20/25	
S-3x2	(6)	6,73	(5)	5,80
P-2F	(3)	3,62	(3)	3,24
2P-2F-30E	(5)	5,08	(4)	4,81
2P-2F-85E	(7)	7,01	(6)	6,73
2P-2F-140E	(7)	7,50	(6)	6,04
2P-2F-140E-AR16	(9)	9,76	(7)	7,96
3P-2F-64E	(8)	8,76	(7)	7,01
3P-2F-64E- AR16	(9)	9,33	(9)	9,00

Através desta comparação é possível concluir que, apesar de não se ter atingido a ductilidade suficiente para se poder efetuar um dimensionamento plástico, exceção feita ao *Perfobond* isolado, P-2F, é notória a elevada capacidade de carga quando comparada com um conector do tipo *Stud*. É de notar que em alguns dos casos nem seria possível colocar um número tão elevado de conectores *Stud* no espaço disponível.

6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM MODELOS TEÓRICOS

Uma vez que, de todas as configurações ensaiadas, o conector *Perfobond* na sua configuração isolada, é sem dúvida o mais estudado, a comparação dos resultados experimentais com os modelos teóricos existentes até à data começará por este conector. No Quadro 6.1 e no Quadro 6.2 são apresentadas as comparações dos resultados obtidos com os modelos teóricos propostos por Oguejiofor e Hosain (1997), Ushijima (2001), Medberry e Shahrooz (2002), Al-Darzi (2007), Verissimo (2007), Ahn *et al* (2010) e Vianna *et al* (2013), já referidos no capítulo 3.

Quadro 6.1- Comparação dos resultados experimentais com modelos teóricos para o conector *Perfobond* na sua configuração isolada, relativo à 1ª série de ensaios ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

<i>Perfobond - P-2F</i>			
	P_{Rk}	Diferença	
		kN	%
<i>Push-out</i>	208,80	---	---
Oguejiofor e Hosain (1997)	244,35	35,54	17,02%
Ushijima (2001)	364,88	156,07	74,75%
Medberry e Shahrooz (2002)	90,43	-118,38	-56,69%
Al-Darzi (2007)	306,59	97,79	46,83%
Verissimo (2007)	104,75	-104,06	-49,83%
Ahn <i>et al</i> (2010)	78,68	-130,12	-62,32%
Vianna <i>et al</i> (2013)	189,84	-18,97	-9,08%

Quadro 6.2-Comparação dos resultados experimentais com modelos teóricos para o conector *Perfobond* na sua configuração isolada, relativo à 1ª série de ensaios ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

<i>Perfobond - P-2F</i>			
	P_{Rk}	Diferença	
		kN	%
<i>Push-out</i>	224,80	---	---
Oguejiofor e Hosain (1997)	278,60	53,80	23,93%
Ushijima (2001)	383,25	158,45	70,49%
Medberry e Shahrooz (2002)	99,44	-125,36	-55,77%
Al-Darzi (2007)	318,59	93,79	41,72%
Verissimo (2007)	131,29	-93,51	-41,60%
Ahn <i>et al</i> (2010)	103,79	-121,00	-53,83%
Vianna <i>et al</i> (2013)	207,53	-17,27	-7,68%

Através da análise dos quadros anteriores, é possível concluir que os resultados obtidos pelo modelo teórico de Vianna *et al* (2013) são os que mais se aproximam dos resultados obtidos experimentalmente, apresentando uma margem de segurança de 9% e 8% para cada série ensaiada. O modelo proposto por Oguejiofor e Hosain (1997) apresenta valores próximos, no entanto sobrevaloriza ligeiramente a capacidade de carga obtida entre os 17 e os 24%. Os modelos de Ushijima (2001) e Al-Darzi (2007) sobrestimam a carga de dimensionamento em valores próximos dos 75% e dos 45%. Por outro lado, os restantes modelos são conservativos, com margens de segurança a rondar os 50%. Tais diferenças devem-se aos parâmetros considerados para a formulação de cada modelo, referidos e descritos no capítulo 3 para cada modelo teórico.

Os gráficos da Figura 6.1 e da Figura 6.2 apresentam graficamente aquela comparação entre os modelos teóricos e os resultados obtidos, para cada série de ensaios.

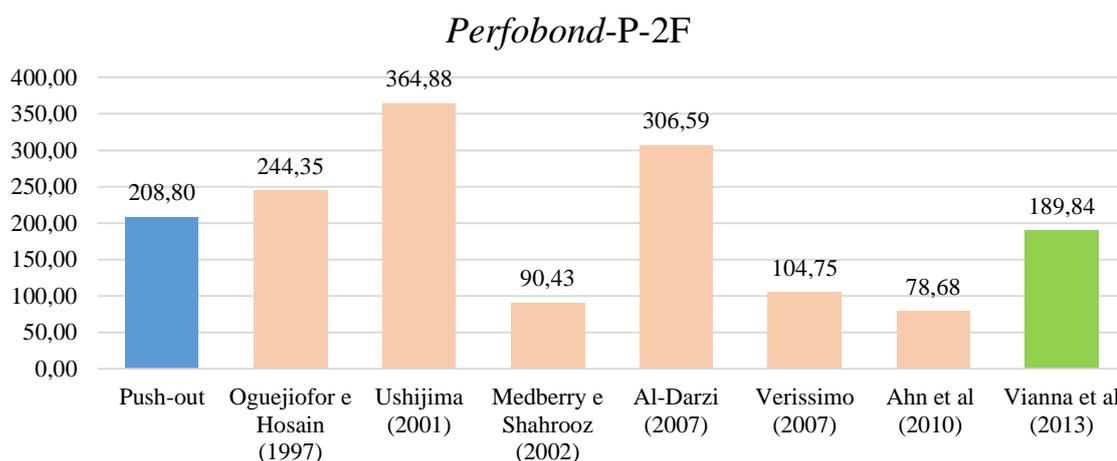


Figura 6.1- Comparação dos modelos teóricos com os resultados obtidos ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

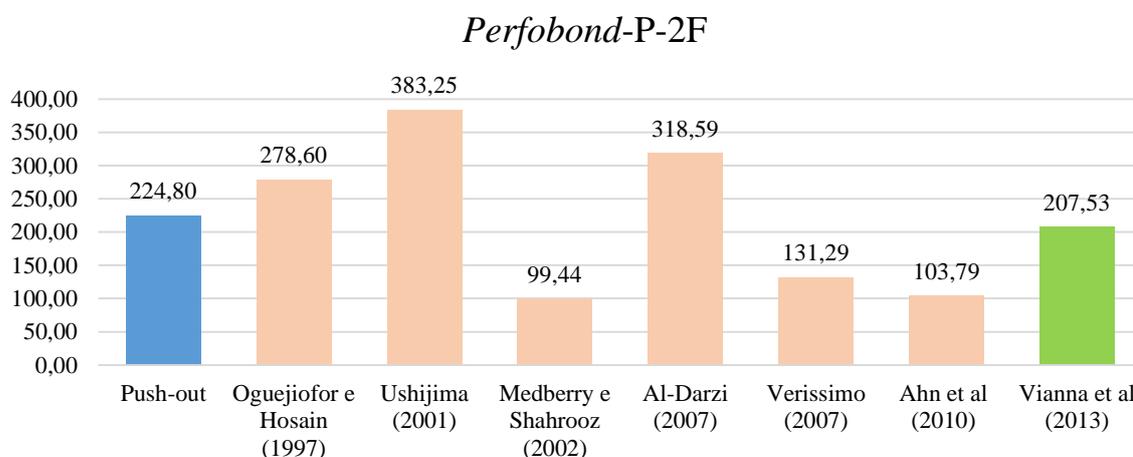


Figura 6.2- Comparação dos modelos teóricos com os resultados obtidos ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

Relativamente aos agrupamentos de conectores *Perfobond* ensaiados, as fontes de comparação existentes até à data são limitadas. Atualmente, no conhecimento do autor, existem dois modelos que consideram a interação entre dois conectores *Perfobond* próximos permitindo a determinação da carga de dimensionamento do conjunto: o modelo proposto por Ahn *et al* (2010); e o modelo proposto por Kim *et al* (2011), que foram descritos no Capítulo 3. No entanto, nenhum destes modelos tem em consideração o espaçamento entre os conectores para a determinação da carga de dimensionamento. Além disso, estes modelos foram aplicados em configurações com apenas dois conectores *Perfobond*.

Pelos motivos acima referidos, a carga prevista por aqueles modelos para os agrupamentos de dois conectores é a mesma para todas as configurações ensaiadas no presente estudo. Os resultados da comparação em cada uma das séries ensaiadas, sem armadura passante nos furos, podem ser consultados no Quadro 6.3 e Quadro 6.4.

Como é possível observar pelos resultados obtidos, o modelo teórico proposto por Ahn *et al* (2010) provou-se bastante conservativo em relação à carga de dimensionamento. Por outro lado, o modelo proposto por Kim *et al* (2011) é conservativo nos agrupamentos de dois conectores *Perfobond*, nas configurações mais espaçadas, e sobrevaloriza a capacidade de carga na configuração de dois conectores menos espaçada e na configuração composta pelo agrupamento de três conectores *Perfobond*. É de notar que este modelo está diretamente relacionado com o modelo de Oguejiofor e Hosain (1997).

À semelhança do que tem vindo a ser adotado ao longo do presente documento, os gráficos correspondentes às comparações realizadas podem ser observados na Figura 6.3 e Figura 6.4.

Quadro 6.3- Comparação dos resultados experimentais com modelos teóricos para os agrupamentos de conectores *Perfobond*, relativo à 1ª série de ensaios ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

	2P-2F-30E	Diferença		2P-2F-85E	Diferença	
	P_{rk} (kN)	kN	%	P_{rk} (kN)	kN	%
<i>Push-out</i>	292,77	---	---	404,02	---	---
Ahn <i>et al</i> (2010)	138,14	-154,63	-52,82%	138,14	-265,88	-65,81%
Kim <i>et al</i> (2011)	390,95	98,18	33,54%	390,95	-13,07	-3,24%
	2P-2F-140E	Diferença		3P-2F-64E	Diferença	
	P_{rk} (kN)	kN	%	P_{rk} (kN)	kN	%
<i>Push-out</i>	432,13	---	---	504,81	---	---
Ahn <i>et al</i> (2010)	138,14	-293,99	-68,03%	207,21	-297,60	-59,95%
Kim <i>et al</i> (2011)	390,95	-41,17	-9,53%	586,43	81,62	16,17%

Quadro 6.4-Comparação dos resultados experimentais com modelos teóricos para os agrupamentos de conectores *Perfobond*, relativo à 2ª série de ensaios ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

	2P-2F-30E			2P-2F-85E		
	P_{rk} (kN)	kN	%	P_{rk} (kN)	kN	%
<i>Push-out</i>	333,65	---	---	466,56	---	---
Ahn et al (2010)	182,26	-151,39	-45,38%	182,26	-284,31	-60,94%
Kim et al (2011)	445,76	112,11	33,60%	445,76	-20,81	-4,46%
	2P-2F-140E			3P-2F-64E		
	P_{rk} (kN)	kN	%	P_{rk} (kN)	kN	%
<i>Push-out</i>	419,29	---	---	486,55	---	---
Ahn et al (2010)	182,26	-237,03	-56,53%	232,65	-253,90	-52,18%
Kim et al (2011)	445,76	26,47	6,31%	603,90	117,35	24,12%

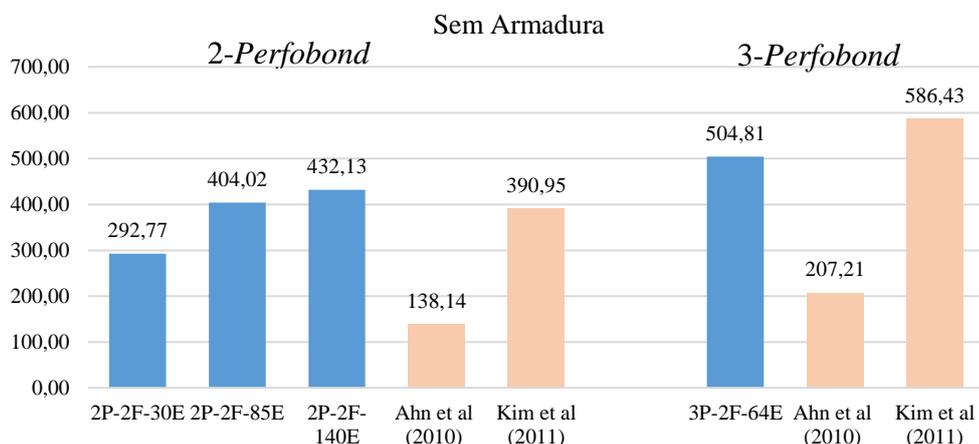


Figura 6.3- Comparação dos resultados experimentais com modelos teóricos para os agrupamentos de conectores *Perfobond*, relativo à 1ª série de ensaios ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

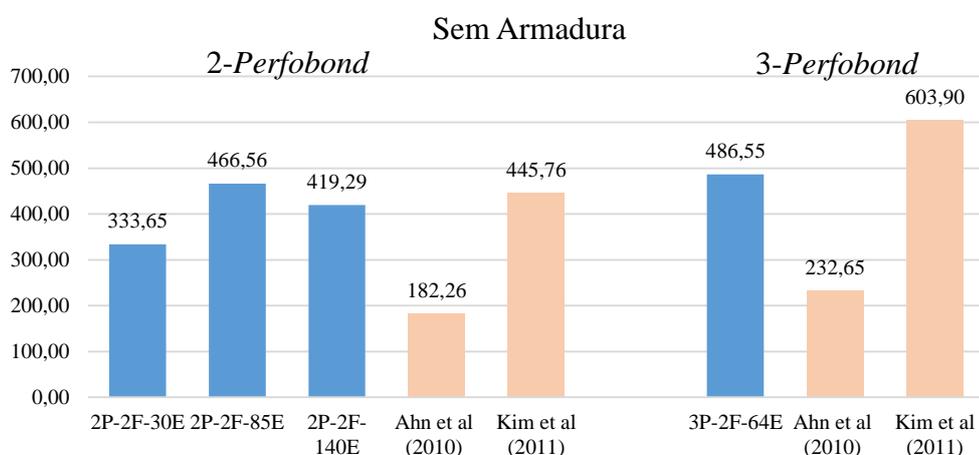


Figura 6.4- Comparação dos resultados experimentais com modelos teóricos para os agrupamentos de conectores *Perfobond*, relativo à 2ª série de ensaios ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$).

Além dos agrupamentos de dois e três conectores *Perfobond* sem armadura, também as configurações com armadura passante nos furos foram comparadas com os modelos teóricos de Ahn *et al* (2010 e Kim *et al* (2011). Os resultados de tais comparações podem ser observados no Quadro 6.5 e no Quadro 6.6, encontrando-se os gráficos para comparação na Figura 6.5 e Figura 6.6, referentes a cada série ensaiada.

Quadro 6.5- Comparação dos resultados experimentais com modelos teóricos para os agrupamentos de conectores *Perfobond* com armadura passante nos furos, relativo à 1ª série de ensaios ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

	2P-2F-140E- AR16 P_{rk} (kN)	Diferença		3P-2F-64E- AR16 P_{rk} (kN)	Diferença	
		kN	%		kN	%
Push-out	562,28	---	---	537,57	---	---
Ahn <i>et al</i> (2010)	155,10	-407,18	-72,42%	232,65	-304,92	-56,72%
Kim <i>et al</i> (2011)	414,25	-148,03	-26,33%	621,37	83,81	15,59%

Quadro 6.6- Comparação dos resultados experimentais com modelos teóricos para os agrupamentos de conectores *Perfobond* com armadura passante nos furos, relativo à 2ª série de ensaios ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

	2P-2F-140E- AR16 P_{rk} (kN)	Diferença		3P-2F-64E- AR16 P_{rk} (kN)	Diferença	
		kN	%		kN	%
Push-out	552,04	---	---	623,93	---	---
Ahn <i>et al</i> (2010)	199,22	-352,82	-63,91%	298,82	-325,11	-52,11%
Kim <i>et al</i> (2011)	469,05	-82,98	-15,03%	703,58	-79,65	12,77%

Através da análise dos quadros anteriores é possível afirmar que nas configurações dos agrupamentos *Perfobond* com armadura passante nos furos os modelos são conservativos, exceção feita ao modelo de Kim *et al* (2011) para a configuração com três *Perfobond*, 3P-2F-64E-AR16, uma vez que sobrevaloriza a capacidade de carga, em ambas as séries.

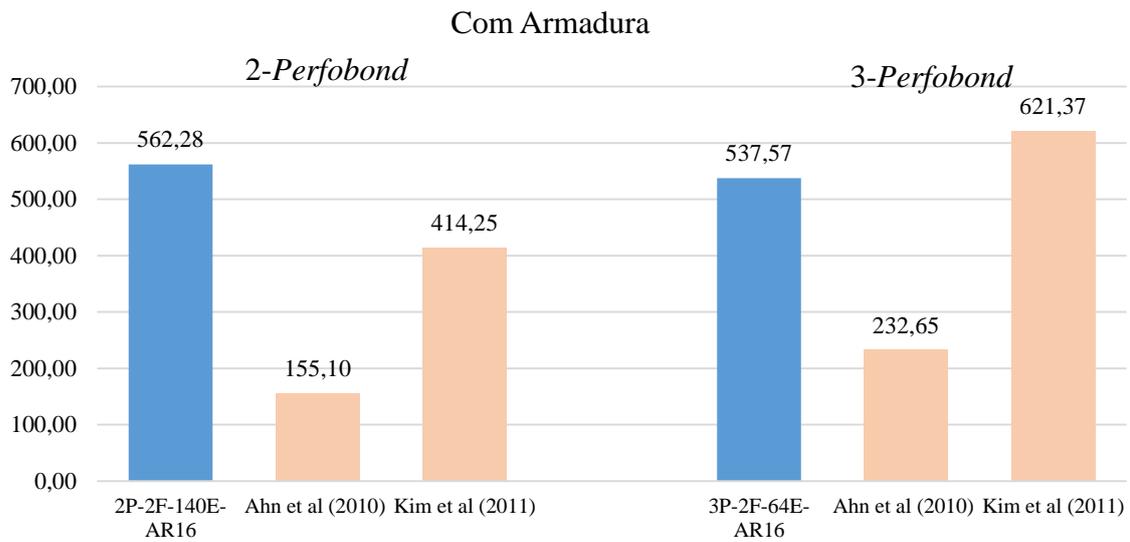


Figura 6.5-Comparação dos resultados experimentais com modelos teóricos para os agrupamentos de conectores *Perfobond* com armadura passante nos furos, relativo à 1ª série de ensaios ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

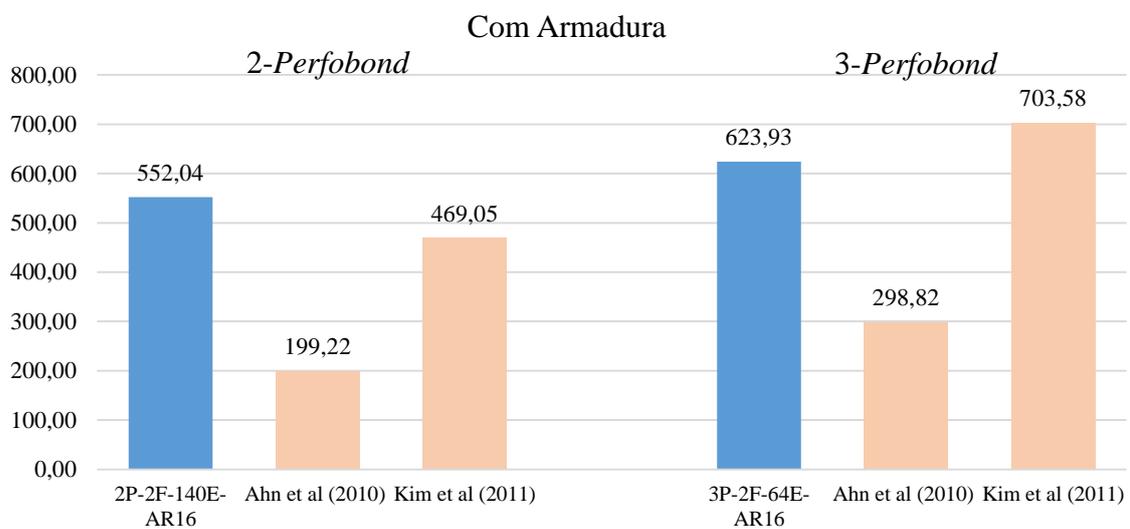


Figura 6.6- Comparação dos resultados experimentais com modelos teóricos para os agrupamentos de conectores *Perfobond* com armadura passante nos furos, relativo à 2ª série de ensaios ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

7. PROPOSTA DE UM MODELO ANALÍTICO PARA A INTERAÇÃO DE CONECTORES *PERFOBOND*

7.1 Modelo analítico proposto com base nos resultados obtidos

Os modelos analíticos existentes não têm em conta o espaçamento entre conectores *Perfobond* para a determinação da carga de dimensionamento. Tendo em conta que ficou demonstrado experimentalmente que esse parâmetro tem uma influência importante sobre a resistência do conjunto de conectores, neste trabalho propõe-se um modelo que incorpore essa variável, o que constitui uma contribuição para o avanço do estado do conhecimento nesta matéria.

Uma vez que os agrupamentos estudados consistem num número variado de conectores *Perfobond*, podendo conter um, dois ou três *Perfobond*, procedeu-se à determinação da resistência individual equivalente dos conectores que compõem o agrupamento (R_i), dividindo P_{Rk}^* pelo número de conectores *Perfobond* do agrupamento. Além disso, de maneira a adimensionalizar o espaçamento utilizado, relacionou-se este com a altura dos conectores (s/h), à semelhança dos estudos existentes.

Uma vez que a capacidade de carga do agrupamento pode ser relacionada com a resistência de um conector *Perfobond* isolado, procedeu-se à normalização da resistência individual dos conectores R_i em relação à resistência do conector *Perfobond* na sua configuração isolada; $R_i / P_{Rk}^*_{P-2F}$. Tais relações podem ser consultadas no Quadro 7.1 (série 1), no Quadro 7.2 (série 2), e ainda na Figura 7.1 e Figura 7.2, nas configurações sem armadura passante nos furos.

Quadro 7.1- Relações de espaçamento, resistência individual e normalização nas configurações ensaiadas ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

	n (número de conectores <i>Perfobond</i>)	s (espaçamento)	s/h ($h=80\text{mm}$)	P_{Rk}^* (kN)	$R_i =$ P_{Rk}^*/n (kN)	Normalização <i>Perfobond</i> $R_i / P_{Rk}^*_{P-2F}$
P-2F	1	0	0,00	208,80	208,80	1,00
2P-2F-30E	2	30	0,38	292,77	146,39	0,70
2P-2F-85E	2	85	1,06	404,02	202,01	0,97
2P-2F-140E	2	140	1,75	432,13	216,06	1,03
3P-2F-64E	3	64	0,80	504,81	168,27	0,81

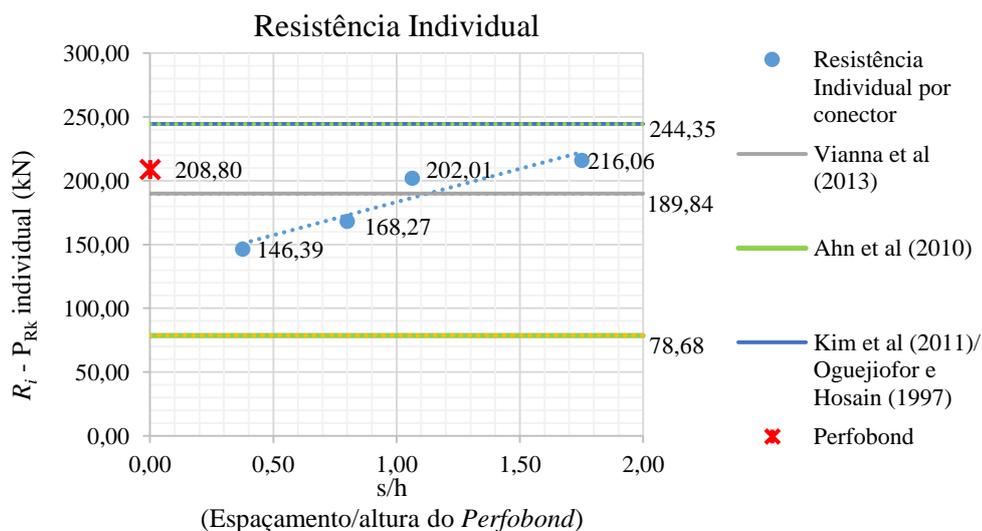
Quadro 7.2- Relações de espaçamento, resistência individual e normalização nas configurações ensaiadas ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

	n (número de conectores <i>Perfobond</i>)	s (espaçamento)	s/h ($h=80\text{mm}$)	P_{Rk}^* (kN)	$R_i = P_{Rk}^*/n$ (kN)	Normalização <i>Perfobond</i> $R_i / P_{Rk}^*_{P-2F}$
P-2F	1	0	0,00	224,80	224,80	1,00
2P-2F-30E	2	30	0,38	333,65	166,82	0,74
2P-2F-85E	2	85	1,06	466,56	233,28	1,04
2P-2F-140E	2	140	1,75	419,29	209,64	0,93
3P-2F-64E	3	64	0,80	486,55	162,18	0,72

Os resultados dos modelos de Vianna *et al* (2013) e Oguejiofor e Hosain (1997), como referido no capítulo 6, são os que mais se aproximam dos experimentais para um só conector. No Quadro 7.3 Comparam-se estes modelos e ainda os modelos de Kim *et al* (2011) e Ahn *et al* (2010), na situação particular de um conector isolado, com a resistência individual obtida experimentalmente. O modelo de Oguejiofor e Hosain (1997) sobrestima a capacidade de carga e o modelo de Vianna *et al* (2013) encontra-se do lado da segurança - Figura 7.1 e Figura 7.2.

Quadro 7.3- Valores expectáveis segundo os modelos teóricos para as duas séries ensaiadas, para a resistência de um conector *Perfobond* isolado

	$f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$	$f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$
Oguejiofor e Hosain (1997)	244,35	278,60
Vianna et al (2013)	189,84	207,53
Ahn et al (2010)	78,68	103,79
Kim et al (2011)	244,35	278,60

Figura 7.1- Comparação entre resistência individual e modelos teóricos ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

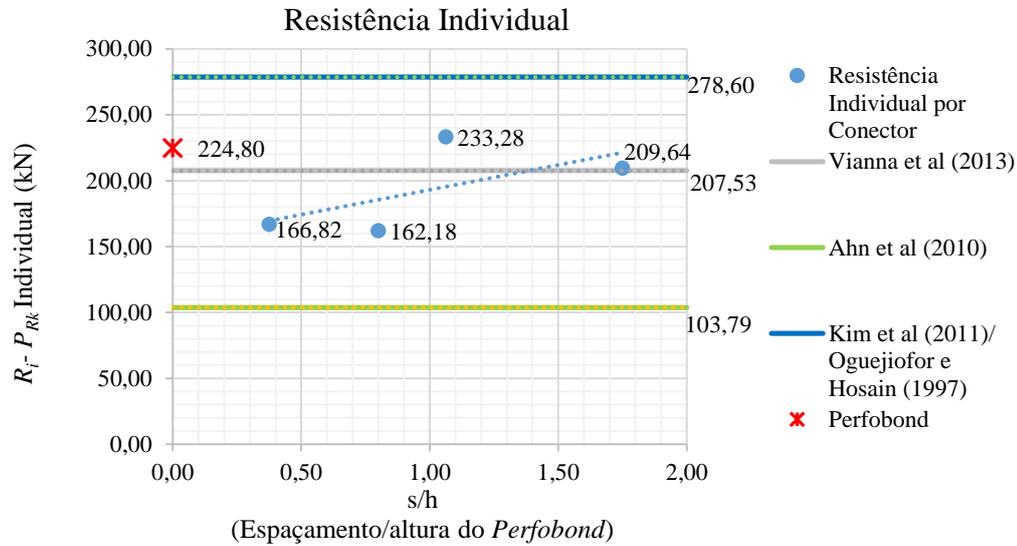


Figura 7.2-Comparação entre resistência individual e modelos teóricos ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

Como se pretende um modelo que tenha em consideração o espaçamento e o número de conectores, diretamente relacionado com a resistência individual de cada conector, tem-se:

$$Q_{u,mult} = n\alpha Q_{u,isolado} \quad (25)$$

Onde n corresponde ao número de conectores *Perforbond* que compõem o agrupamento e α é um fator de redução função do espaçamento. O modelo tem como base a resistência de um conector *Perforbond* na sua configuração isolada $Q_{u,isolado}$. É necessário recorrer a uma relação entre o espaçamento dos conectores e a capacidade de carga observada, normalizando em relação ao conector *Perforbond* na sua configuração isolada, para definir a função do espaçamento. Tal é possível através das regressões lineares ilustradas na Figura 7.3.

A regressão obtida para a primeira série de ensaios ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$) apresenta uma melhor correlação do que a regressão da segunda série ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$). No entanto, se aplicada a regressão da primeira série a todos os ensaios, as diferenças não são significativas - Quadro 7.4. Não se justifica assim incorporar no modelo proposto a resistência do betão, e será a primeira regressão que servirá como base para função de espaçamento independentemente de f_{ck} .

$$\alpha = 0,25s + 0,63 \leq 1 \quad (26)$$

$$\text{Com } s \geq 0,25h \quad (27)$$

Nestas equações, s corresponde ao espaçamento entre faces interiores dos conectores *Perforbond*, em mm, e h à altura do *Perforbond*, também em mm.

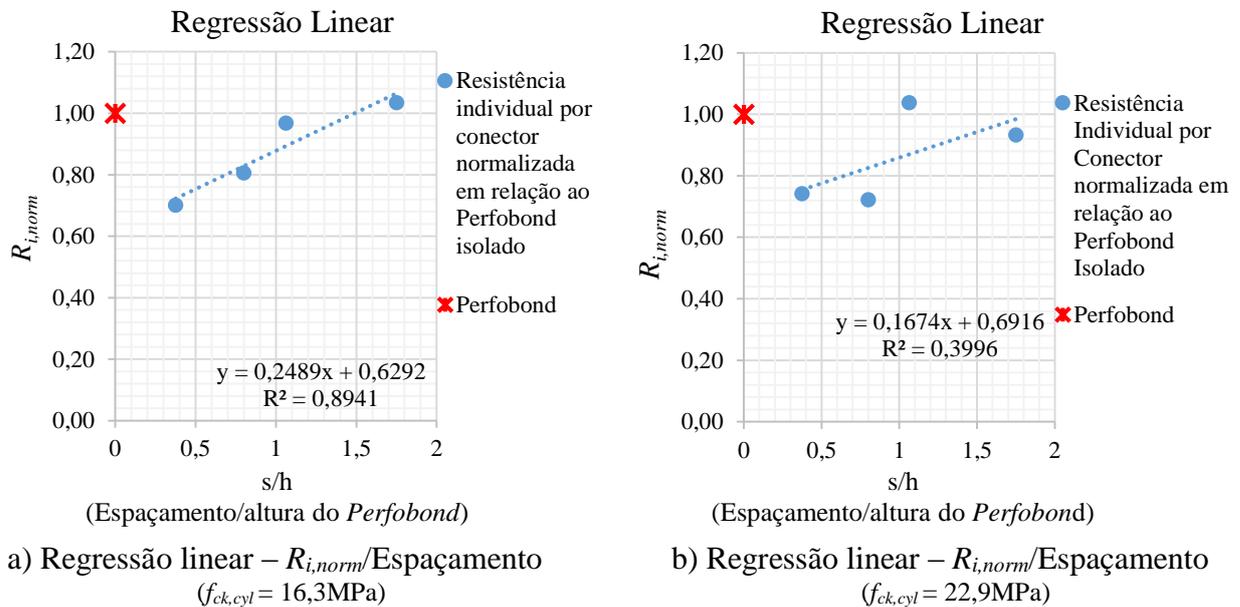


Figura 7.3- Regressões Lineares - $R_{i, norm}$ /Espaçamento para ambas as séries ensaiadas

Como os modelos teóricos existentes que apresentaram resultados mais próximos dos experimentais foram os de Oguejiofor e Hosain (1997) e Vianna *et al* (2013) para os conectores *Perfobond* isolados, serão esses a ser considerados para determinar $Q_{u, isolado}$.

Quadro 7.4- Aplicação da regressão linear da primeira série de ensaios ($f_{ck, cyl} = 16,3 \text{ MPa}$) à segunda série de ensaios ($f_{ck, cyl} = 22,9 \text{ MPa}$)

	<i>Push-out</i> (kN)	Regressão 1 (kN)	Diferença (%)
2P-2F-30E	333,65	301,72	-10,58%
2P-2F-85E	466,56	373,18	-25,02%
2P-2F-140E	419,29	444,65	5,70%
3P-2F-64E	486,55	518,85	6,22%

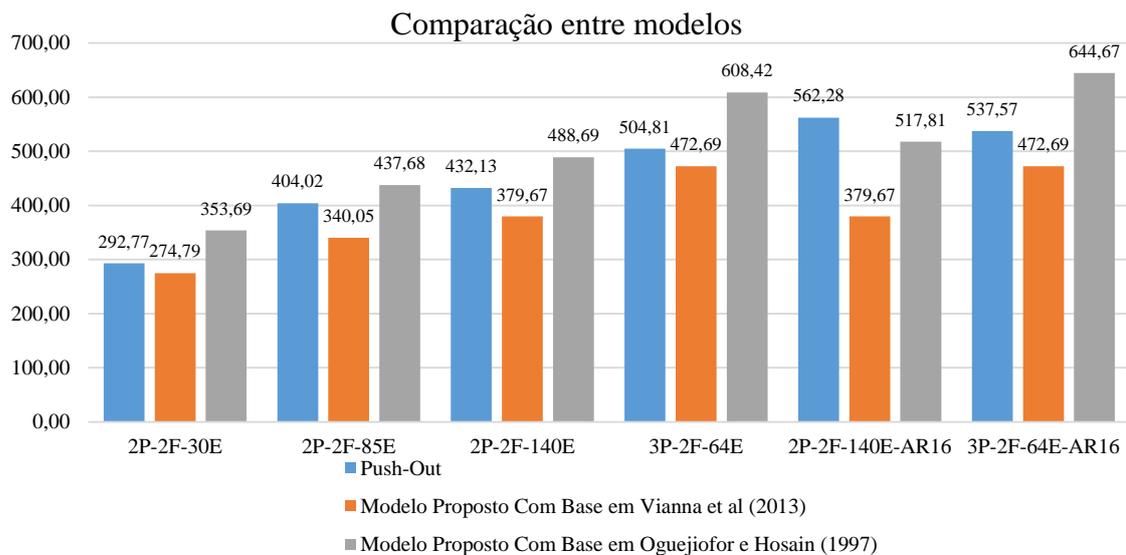
Aplicando a equação 7, referente ao modelo proposto por Oguejiofor e Hosain (1997), e a equação 18 que diz respeito ao modelo proposto por Vianna *et al* (2013), é possível observar no Quadro 7.5 e no Quadro 7.6 e na Figura 7.4 e Figura 7.5, que a consideração do modelo proposto por Oguejiofor e Hosain (1997) para $Q_{u, isolado}$ se traduz numa formulação insegura relativamente à capacidade de carga do agrupamento de múltiplos conectores *Perfobond*. Assim será considerado o modelo proposto para Vianna *et al* (2013) para a determinação de $Q_{u, isolado}$.

Quadro 7.5- Aplicação do modelo proposto com base nos modelos propostos por Oguejiofor e Hosain (1997) e Vianna *et al* (2013) ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

	Oguejiofor e Hosain (1997)			Vianna <i>et al</i> (2013)	
	<i>Push-out</i> (kN)	$Q_{u,múltiplo}$ (kN)	Diferença	$Q_{u,múltiplo}$ (kN)	Diferença
P-2F	208,80	NA	-----	NA	-----
2P-2F-30E	292,77	353,69	17,22%	274,79	-6,54%
2P-2F-85E	404,02	437,68	7,69%	340,05	-18,81%
2P-2F-140E	432,13	488,69	11,57%	379,67	-13,81%
3P-2F-64E	504,81	608,42	17,03%	472,69	-6,79%
2P-2F-140E-AR16	562,28	517,81	-8,59%	379,67	-48,10%
3P-2F-64E-AR16	537,57	644,67	16,61%	472,69	-13,72%

Quadro 7.6- Aplicação do modelo proposto com base nos modelos propostos por Oguejiofor e Hosain (1997) e Vianna *et al* (2013) ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

	Oguejiofor e Hosain (1997)			Vianna <i>et al</i> (2013)	
	<i>Push-out</i> (kN)	$Q_{u,múltiplo}$ (kN)	Diferença	$Q_{u,múltiplo}$ (kN)	Diferença
P-2F	224,80	NA	-----	NA	-----
2P-2F-30E	333,65	403,27	17,26%	300,40	-11,07%
2P-2F-85E	466,56	499,04	6,51%	371,74	-25,51%
2P-2F-140E	419,29	557,20	24,75%	415,06	-1,02%
3P-2F-64E	486,55	693,71	29,86%	516,75	5,84%
2P-2F-140E-AR16	552,04	586,32	5,85%	415,06	-33,00%
3P-2F-64E-AR16	623,93	644,67	3,22%	516,75	-20,74%

Figura 7.4- Aplicação do modelo proposto com base nos modelos propostos por Oguejiofor e Hosain (1997) e Vianna *et al* (2013) ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

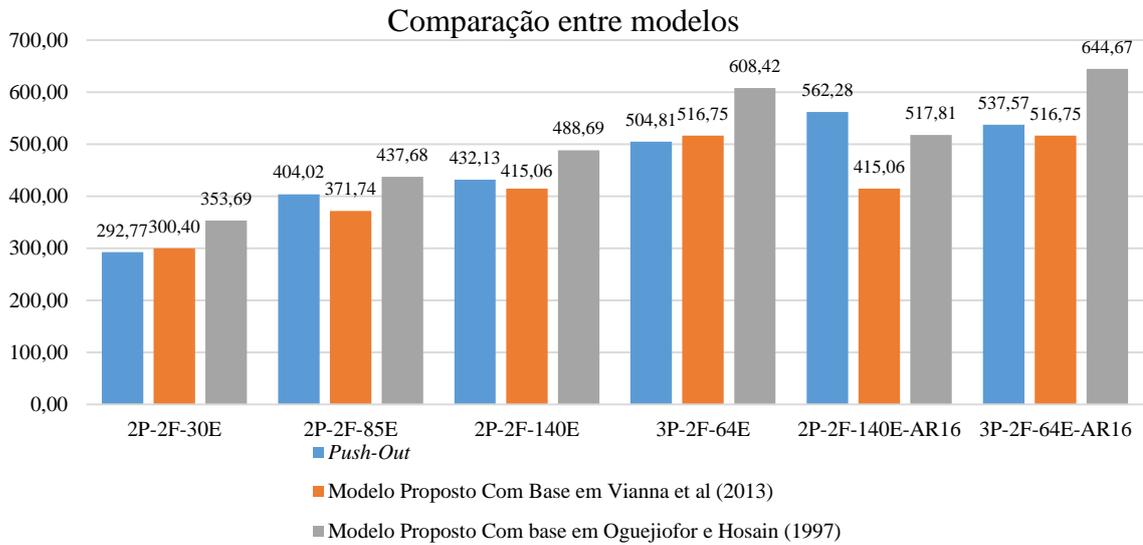


Figura 7.5- Aplicação do modelo proposto com base nos modelos propostos por Oguejiofor e Hosain (1997) e Vianna *et al* (2013) ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

Tendo em consideração os parâmetros que compõem o modelo proposto por Vianna *et al* (2013) presentes na equação 18, é notório que neste não existe um parâmetro para a contribuição da armadura. Motivo pelo qual, nas figuras anteriores, no modelo com base em Vianna *et al* (2013) a resistência nas configurações com armadura ser igual às configurações sem armadura.

$$q_u = 152,9 + 3,21 \times 10^{-3} h_{sc} t_{sc} f_{ck} - 0,86 \times 10^{-3} A_{sc} \sqrt{f_{ck}} \quad (18)$$

Por este motivo e tendo em consideração os resultados obtidos, procedeu-se a uma regressão linear nas configurações com e sem armadura, 2P-2F-140E, 2P-2F-140E-AR16, 3P-2F-64E e 3P-2F-64E-AR16, de maneira a prever a influência desta na formulação do modelo. A regressão linear obtida pode ser observada na Figura 7.6.

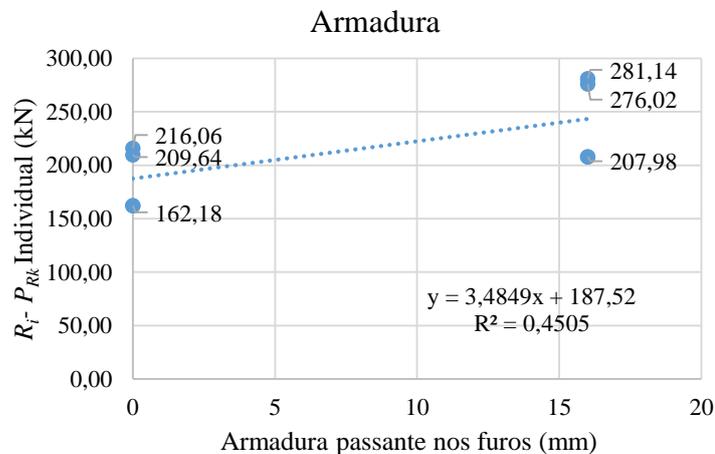


Figura 7.6- Regressão linear da influência da armadura passante nos furos

Através da análise da regressão analisada, considera-se que a armadura passante nos furos tem uma influência de 3,5 vezes o diâmetro da armadura.

Assim, para a determinação da capacidade de carga de um agrupamento de conectores *Perfobond*, propõe-se que esta seja determinada com base na equação 28, onde $Q_{u,Vianna}$ é obtido através da aplicação da equação 18.

$$Q_{u,mult} = n\alpha Q_{u,Vianna} + 3,5\phi_r \quad (28)$$

Onde

$$\alpha = 0,25s + 0,63 \leq 1 \quad (29)$$

$$\text{Com } s \geq 0,25h \quad (30)$$

Neste modelo, s corresponde ao espaçamento entre faces interiores, em mm, h à altura do *Perfobond*, $Q_{u,Vianna}$ é obtido aplicando a equação 18 e ϕ_r corresponde ao diâmetro da armadura passante nos furos, em mm.

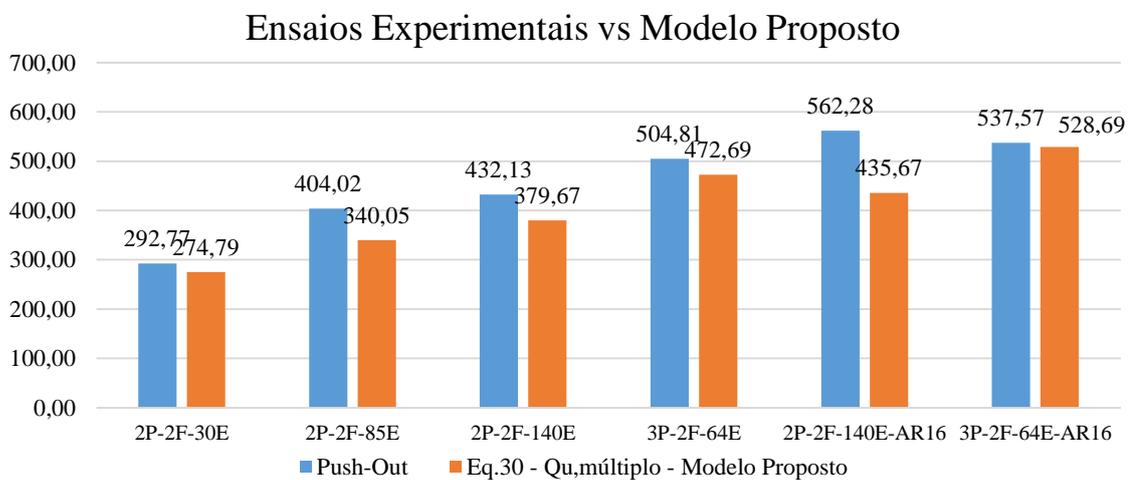
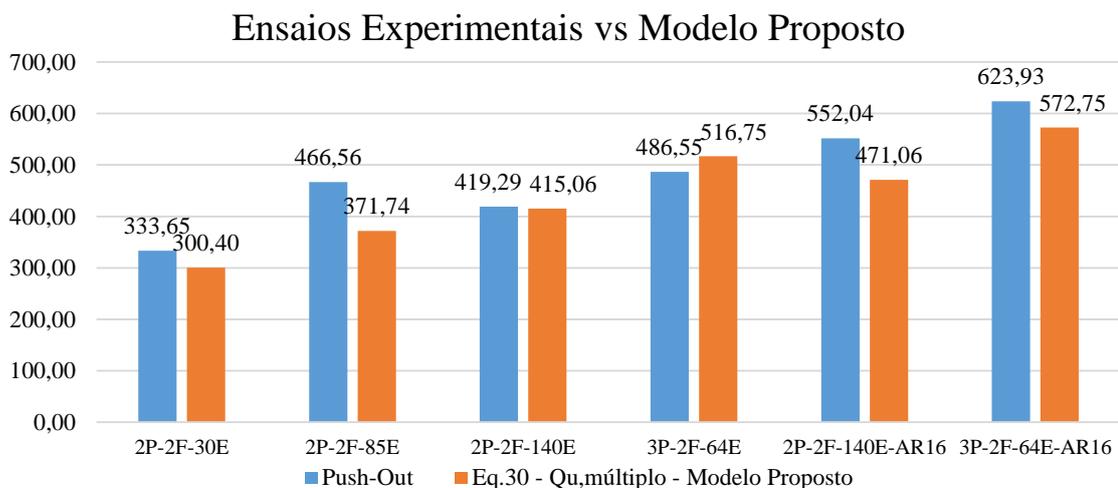
Aplicando agora o modelo proposto e comparando com os resultados obtidos pelos ensaios experimentais, é possível observar no Quadro 7.7 e Quadro 7.8 bem como na Figura 7.7 e na Figura 7.8 que o modelo proposto se encontra pelo lado da segurança, apresentando diferenças bastante razoáveis, subvalorizando a capacidade de carga num valor médio de 11 %.

Quadro 7.7- Comparação entre os valores obtidos pelos ensaios experimentais e os resultados obtidos aplicando o modelo proposto ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)

	<i>Push-out</i> (kN)	$Q_{u,mult}$ (kN)	Diferença
P-2F	208,80	NA	-----
2P-2F-30E	292,77	274,79	-6,54%
2P-2F-85E	404,02	340,05	-18,81%
2P-2F-140E	432,13	379,67	-13,81%
3P-2F-64E	504,81	472,69	-6,79%
2P-2F-140E-AR16	562,28	435,67	-22,52%
3P-2F-64E-AR16	537,57	528,69	-1,68%

Quadro 7.8- Comparação entre os valores obtidos pelos ensaios experimentais e os resultados obtidos aplicando o modelo proposto ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

	<i>Push-out</i> (kN)	$Q_{u,mult}$ (kN)	Diferença
P-2F	224,80	NA	-----
2P-2F-30E	333,65	300,40	-11,07%
2P-2F-85E	466,56	371,74	-25,51%
2P-2F-140E	419,29	415,06	-1,02%
3P-2F-64E	486,55	516,75	5,84%
2P-2F-140E-AR16	552,04	471,06	-17,19%
3P-2F-64E-AR16	623,93	572,75	-8,93%

Figura 7.7- Comparação entre os valores obtidos pelos ensaios experimentais e os resultados obtidos aplicando o modelo proposto ($f_{ck,cyl} = 16,3\text{MPa}$)Figura 7.8- Comparação entre os valores obtidos pelos ensaios experimentais e os resultados obtidos aplicando o modelo proposto ($f_{ck,cyl} = 22,9\text{MPa}$)

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 Conclusões

Através dos resultados obtidos nesta dissertação pretende-se contribuir para o conhecimento de ligações mistas aço-betão com agrupamento de conectores, nomeadamente agrupamentos de conectores *Perfobond*, tendo sido também estudada uma alternativa aos usuais *Nelson Stud*.

Embora os conectores *Perfobond*, na sua configuração isolada, sejam já bastante estudados, existindo vários modelos teóricos para previsão da sua capacidade resistente, os agrupamentos de conectores *Perfobond* encontram-se longe de ter o seu estudo concluído. Além disso, até à data, os estudos com agrupamentos de conectores *Perfobond* basearam-se apenas em dois conectores *Perfobond* dispostos lado a lado e sem considerar a influência do espaçamento entre eles.

Foram analisados experimentalmente 32 agrupamentos de conectores, tendo-se verificado os requisitos de ductilidade preconizados no Eurocódigo 4.

Em relação à alternativa aos usuais *Nelson Stud*, composta por materiais correntes, verificou-se que ao contrário daqueles, não cumpre os requisitos de ductilidade exigidos no Eurocódigo 4, 6mm de deformação. No entanto, a capacidade de carga foi bastante próxima da prevista para os tradicionais *Nelson Stud*.

Em relação ao conector *Perfobond* na sua configuração isolada, os resultados obtidos encontram-se de acordo com os estudos anteriormente efetuados. Uma boa capacidade de carga, boa resposta ao *uplift*, o cumprimento do critério de ductilidade e um aumento da capacidade de carga com o aumento da classe de betão.

Em relação aos agrupamentos de conectores *Perfobond*, o aumento de capacidade de carga quando comparado com o *Perfobond* na sua configuração isolada foi notório. Porém, nenhuma destas configurações cumpriu o critério de ductilidade proposto no Eurocódigo 4. Além disso, foi significativo também o aumento da capacidade de carga à medida que se aumentava o espaçamento entre conectores. Exceção feita apenas na 2ª série de ensaios verificada na configuração 2P-2F-85E, que apresentou mais capacidade de carga que a configuração 2P-2F-140E. Verificou-se também um aumento da capacidade de carga com um aumento da classe do

betão, exceção feita às configurações 2P-2F-140E, com e sem armadura e 3P-2F-64E sem armadura.

A introdução de armadura nos furos dos conectores resultou no aumento de capacidade de carga bem como na capacidade de deslizamento, em ambas as séries ensaiadas, não tendo mesmo assim verificado um deslizamento suficiente para poderem ser consideradas dúcteis.

Embora estas configurações não tenham atingido a ductilidade desejada, são soluções bastante satisfatórias quanto à sua capacidade de carga, ultrapassando em cerca de duas vezes a resistência de um *Perfobond* isolado, variando esse valor consoante a distância entre conectores.

Através das comparações efetuadas com os modelos teóricos existentes, é possível concluir que, para o conector *Perfobond* na sua configuração isolada, o modelo que mais se ajusta aos resultados obtidos é o modelo proposto por Vianna *et al* (2013), apresentando margens de segurança entre os 7,5 % e os 9%. O modelo de Oguejiofor e Hosain (1997) apresenta valores próximos dos obtidos, sobrevalorizando a capacidade de carga em 17% e 24%. As formulações propostas por Ushijima (2001) e Al-Darzi (2007) são formulações inseguras com erros na ordem dos 75% e os 40%, respetivamente. Os restantes modelos teóricos conduzem a estimativas grosseiras da capacidade de carga.

Em relação aos agrupamentos de conectores *Perfobond*, a comparação com modelos teóricos foi efetuada com os dois únicos modelos existentes, propostos por Ahn *et al* (2010) e por Kim *et al* (2011). Verificou-se que devido às limitações de ambos os modelos, os resultados previstos pelos mesmos se encontram frequentemente longe dos experimentais, com erros entre 65% (seguros) e 35% (inseguros), sem armadura passante, e até 70% (seguros) e 15% (inseguros), com armadura passante.

Propõe-se neste documento um modelo analítico mais preciso para a determinação da capacidade de carga do agrupamento de conectores (equação 28). Este modelo tem como base o modelo proposto por Vianna *et al* (2013), e tem explicitamente em consideração o número de conectores que compõem o agrupamento e o seu espaçamento. Além destes fatores, introduziu-se ainda um parâmetro que contabiliza o efeito da armadura passante nos furos. A precisão do modelo proposto é consideravelmente superior aos existentes, com erros máximos de 25%, do lado da segurança, e de 6%, para o lado inseguro.

8.2 Recomendações Para Trabalhos Futuros

Com a conclusão do presente trabalho é possível identificar alguns aspetos cujo estudo possa contribuir para um melhor conhecimento e aperfeiçoamento no comportamento deste tipo de ligações.

Tendo em conta os estudos realizados anteriormente e os resultados obtidos deste trabalho experimental, considera-se que novos esforços de investigação poderão passar por:

- Utilização de células de carga individuais em cada uma das lajes para obter a força real em cada um dos conectores.
- Testar as mesmas configurações sob cargas cíclicas.
- Efetuar variações da armadura transversal, utilizando as configurações ensaiadas, de maneira a ser possível analisar melhor a capacidade de deslizamento de cada um dos conectores, bem como a variação de capacidade de carga consoante a armadura de reforço introduzida.
- Reproduzir os ensaios analisados em modelação numérica de modo a complementar o trabalho realizado.
- Efetuar uma variação da altura dos conectores de maneira a analisar a percentagem no ganho de resistência e a influência desta na ductilidade.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros

- Calado, L., e Santos, J. (2010). “Estruturas Mistas de Aço e Betão”, IST Press, Lisboa.
- Johnson, R.P. (1994) “Composite Structures of Steel and Concrete”, Volume I, Second Edition, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Montoya, P., Meseguer, A. e Morán, F., “Hormigón Armado”, Volume 1, Edição Gustavo Gilli, Barcelona, 1991, 3ª Edição (em Espanhol)
- Simões, Rui. (2014). “Apontamentos da Disciplina de Estruturas Metálicas II”. Perfil de Mecânica Estrutural, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Artigos em Revista

- Ahn, J.-H., Kim, S.-H., Jeong, Y. -J. (2008), “Shear Behaviour of Perfobond Rib Shear Connector Under Static and Cyclic Loadings”, Magazine of Concrete Research, 60, N°5, pp. 347-357.
- Ahn, Jin-Hee; Lee, Chan-Goo; Won, Jeong-Hun; Kim, Sang-Hyo. (2010). “Shear resistance of the Perfobond-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement”, Journal of Constructional Steel Research, N°66, pp.1295-1307.
- Al-Darzi, S. Y. K., Chen, A.R., Liu, Y. Q., (2007), “Finite Element Simulation and Parametric Studies of Perfobond Rib Connector”, American Journal of Applied Sciences, 4, N°3, pp. 122-127.
- Baran, E e Topkaya, C. (2012) “An experimental study on channel type shear connectors”, Journal of Construction Steel Research, N°74, pp.108-117.
- Easterling , W. S., Gibbings, D.R., Murray, T. M. (1993). “Strength of Shear Studs in Steel Deck on Composite Beams and Joists”, AISC Engineering Journal, Vol.30, N°2, pp.44-55
- Jeong, Youn-Ju; Kim, Hyeong-Yeol; Koo, Hyun-Bon., (2009), “Longitudinal shear resistance of steel–concrete composite slabs with perfobond shear connectors”, Journal of Constructional Steel Research, N°65, pp 81-88.
- Kim, Hyeong-Yeol e Jeong, Youn-Ju. (2006). “Experimental evaluation on behaviour of steel-concrete composite bridge decks with perfobond ribs”, Journal of Constructional Steel Research, N°62, pp.463-471.
- Kim, Sang-Hyo, Choi, Kuy-Tae, Park, Se-Jun, Park, Seung-Min, Jung, Chi-Young. (2013). “Experimental shear resistance evaluation of Y-type perfobond rib shear connector”. Journal of Constructional Steel Research, N°82, pp.1–18.

- Kim, Sang-Hyo, Lee, Chan-Goo, Ahn, Jin-Hee, Won, Jeong-Hun., (2011) “Experimental Study on joint of spliced steel-PSC hybrid girder, Part 1: Proposed parallel-perfobond-rib-type joint”, *Engineering Structures*, N°33, pp. 2382-2397
- Kim, Y.H., Choi, H., Lee, S., Yoon, S. J., (2011) “Experimental and Analytical Investigations on the Hat Shaped Shear Connector in the Steel-Concrete Composite Flexural Member”. *International Journal of Steel Structures*, Vol.11, pp.99-107.
- Lee, Pil-Goo, Shim, Chang-Su e Chang, Sung-Pil. (2005). “Static and fatigue behaviour of large stud shear connectors for steel-concrete composite bridges”, *Journal of Constructional Steel Research*, N°61, pp.1270-1285.
- Martins, J. P. S. C., Neves, L. F. C., Vellasco, P. C. G. da S., (2010), “Experimental evaluation of the structural response of Perfobond shear connectors”, *Engineering Structures*, N°32, pp.1976-1985.
- Medberry, S. B., Shahrooz, B. U., (2002), “Perfobond shear connector for composite construction”, *AISC Engineering Journal*, Vol.39, N°1, pp. 2-12.
- Neves, L. F. C., Figueiredo, J. P., Vellasco, P. C. G. da S., Vianna, J. C., (2013), “Perforated shear connectors on composite girders under monotonic loading: An experimental approach”, *Engineering Structures*, N°53, pp. 721-737.
- Oguejiofor, E.C. e Hosain, M. U., (1992), “Behaviour of perfobond rib shear connectors in composite beams: full-size tests”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, N°19, pp. 224-235.
- Oguejiofor, E.C.; Hosain, M.U. (1994). “A parametric study of perfobond rib shear connectors”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, N°21, pp.614-625.
- Oguejiofor, E.C.; Hosain, M.U. (1997). “Numerical analysis of Push-out specimens with Perfobond rib connectors”. *Journal of Computer and Structure*, N°62, pp.617-624.
- Vellasco, P. C. G. S., Andrade, S. A. L., Ferreira, L. T.S., Lima, L.R.O. (2007). “Semi-Rigid Composite Frames with perfobond and T-rib connectors - Part 1: Full scale tests”, *Journal of Constructional Steel Research*, N°63, pp. 263-279.
- Vianna, J.C.; Andrade, S.A.L.; Vellasco, P.C.G. da S.; Neves, L.F. da Costa, (2008). “Structural behaviour of T-Perfobond shear connectors in composite girders: An experimental approach”, *Engineering Structures*, N°30, pp.2381-2391.
- Vianna, J.C.; Andrade, S.A.L.; Vellasco, P.C.G. da S.; Neves, L.F. da Costa, (2013). “Experimental Study of Perfobond shear connectors in composite construction”, *Journal of Constructional Steel Research*, N°81, pp.62-75.
- Vianna, J.C.; Neves, L.F. Costa; Vellasco, P. C. G. da S.; Andrade, S. A. L., (2008) “Estudo Comparativo de Conectores de Corte para Estruturas Mistas de Aço e Betão”, *Construção Magazine*, N°23, pp.23-30.

Zellner, W. (1987), "Recent designs of composite bridges and new type of shear connectors", Proceedings of the IABSE/ASCE Engineering Foundation Conference on Composite Construction, Henniker NH, pp. 240-252.

Artigos em Ata de Congresso

Costa, C., Costa Neves, L. F., Lima, L. R. O. (2010). "Steel and Concrete Composite Building Structures: An Economical Approach", SDSS'Rio 2010 Stability And Ductility Of Steel Structures, Rio de Janeiro, Brazil.

Neves, L. F. Costa, Lima, L. R. O., (2005), "Concepção e Construção de Uma Estrutura Metálica Para Reforço de um Edifício de Pequeno Porte", V Congresso de Construção Metálica e Mista, Lisboa, Portugal.

Neves, L.F. Costa; Cândido-Martins, J.P.S.; Vellasco, P.C.G. da S.; (2011), "Influence of perfobond connectors disposition in steel and concrete composite girders". 6th European Conference on Steel and Composite Structures, Budapeste, Húngria

Ushijima, Y., Hosaka, T. Wanabe, H., Tachibana, Y., Hiragi, H. (2001). "An experimental study on shear characteristics of "Perfobond" strip and its rational strength equations". Eligehausen, R., Proceedings of the international Symposium on Connections between Steel and Concrete, Stuttgart, University of Stuttgart, pp. 1066-1075.

Verissimo, G. S., Valente, I., Paes, J. L. R., Cruz, P. J. S., Fakury, R. H.; (2006), "Design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures", in Cruz, P. J. S., Fangopol, D. M., Costa Neves, L. F., editors, Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost, IABMAS'06, Porto, Portugal

Vianna, J.C., Neves, L.F. Costa; Vellasco, P.C.G. da S.; Andrade, S.A.L.; (2007). "Comportamento Estrutural de Conectores de Corte para Estruturas Mistas de Aço e Betão". VI Congresso de Construção Metálica e Mista, Porto, Portugal.

Teses de Mestrado/Doutoramento

Figueiredo, J.P.M. (2012). "Conectores Perfobond submetidos a carregamento monotónico e cíclico". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Martins, J.P.S.C. (2008). "Avaliação do Comportamento Estrutural de Conectores em Estruturas Mistas: o Perfobond". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Pashan, A. (2006) "Behaviour of Channel Shear Connectors: push-out tests." MSc Thesis, University of Saskatchewan, Department of Civil and Geological Engineering, Canada.

- Veríssimo, G.S., (2007), “Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento”, Tese de Doutoramento, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 287p.
- Vianna, J.C. (2009) “Avaliação do Comportamento Estrutural de Conectores Perfobond e T-Perfobond para Vigas Mistas”, Tese de Doutoramento, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 307p.

Especificações

- AISC - Specification for Structural Steel Buildings. Chicago (Illinois): American Institute of Steel Construction, Inc., 2005.
- CEN - Eurocode N°4 - Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Building - European Standard EN 1994-1-1. Commission of the European Communities, Bruxelas, 1994.
- CEN - Eurocode N°4 - Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Building - European Standard EN 1994-1-1. Commission of the European Communities, Bruxelas, 2004.
- CSA (2001) CAN/CSA-16-01, Limit States Design of Steel Structures, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario
- CEN- Eurocódigo N°2, Projecto de Estruturas de Betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edificios. European Standard EN 1992-1-1. Commission of the European Communities, Bruxelas, 2004

Site da Internet

- Historicbridges@, <http://www.historicbridges.org/bridges/browser/?bridgebrowser=british+columbia/regentroad/> e <http://www.historicbridges.org/bridges/browser/?bridgebrowser=wisconsin/bienemanfarm/>, acesso em 12 de Abril de 2015
- LAP@, <http://www.lap-consult.com/en/awards/artikel/1994-caroni.html>, acesso em 12 de Abril de 2015
- NELSONSTUD@, <http://www.nelson-europe.co.uk/>, acesso em 12 de Abril de 2015
- MOTA@, [http://www.mota-engil.pt/ME-no-Mundo/portfolio/\(tipo\)/0/\(regioes\)/136](http://www.mota-engil.pt/ME-no-Mundo/portfolio/(tipo)/0/(regioes)/136), acesso em 14 de Abril de 2015
- Maiahoje@, <http://www.maiahoje.pt/noticias/ler-noticia.php?noticia=165#.VS2EIfnF-R4>, acesso em 14 de Abril de 2015
- DolceVita@, <http://www.dolcevita.pt/dolce-vita-coimbra>, acesso em 14 de Abril de 2015
- Hilti@, https://www.hilti.pt/#/stage1/topnavigation-link-1_foldout/, acesso em 14 de Abril de 2015

ANEXOS

A.1 Curvas carga/"uplift" dos ensaios realizados

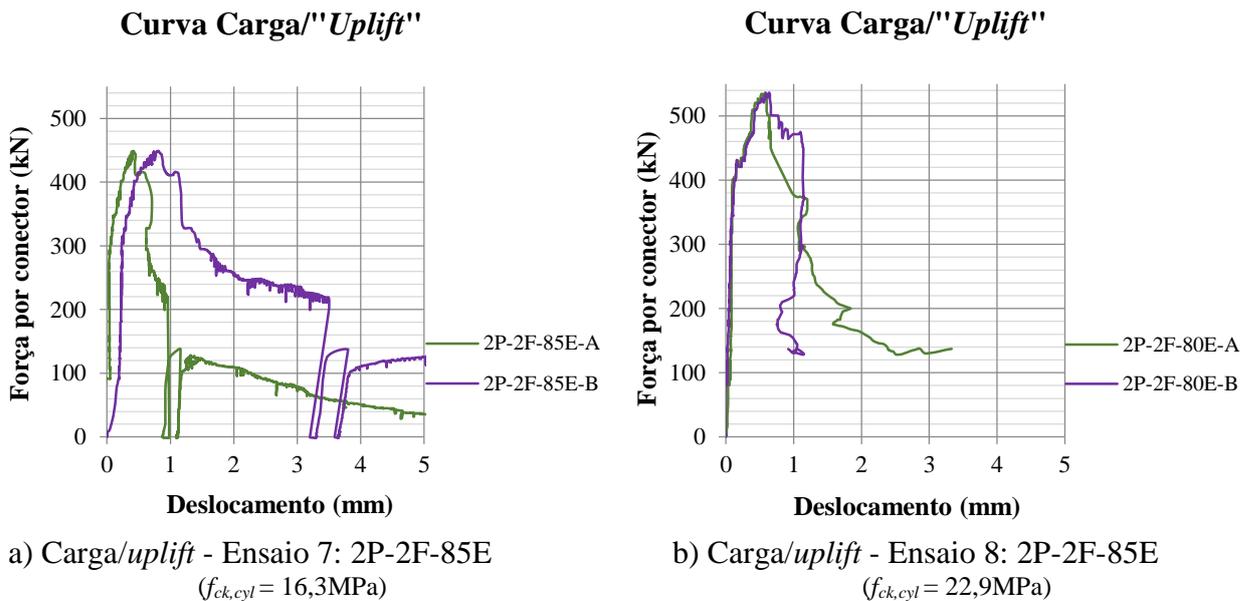


Figura A.0.1-Curva carga/*uplift* para o conector 2P-2F-85E, nas duas séries ensaiadas

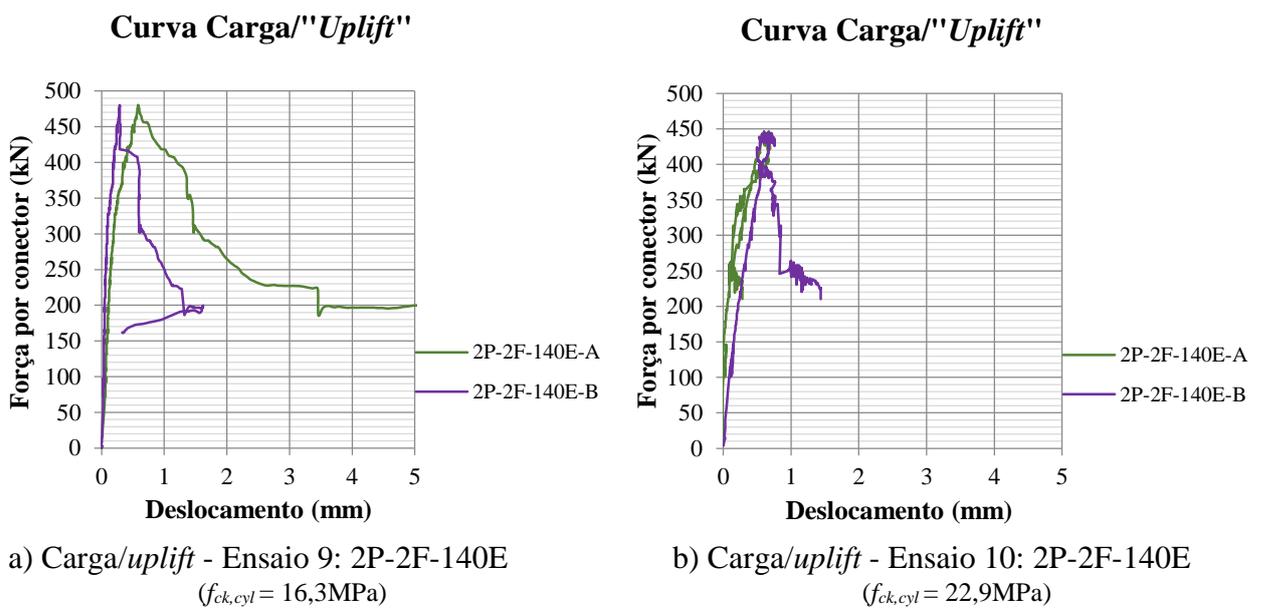


Figura A.0.2-Curva carga/*uplift* para o conector 2P-2F-140E, nas duas séries ensaiadas

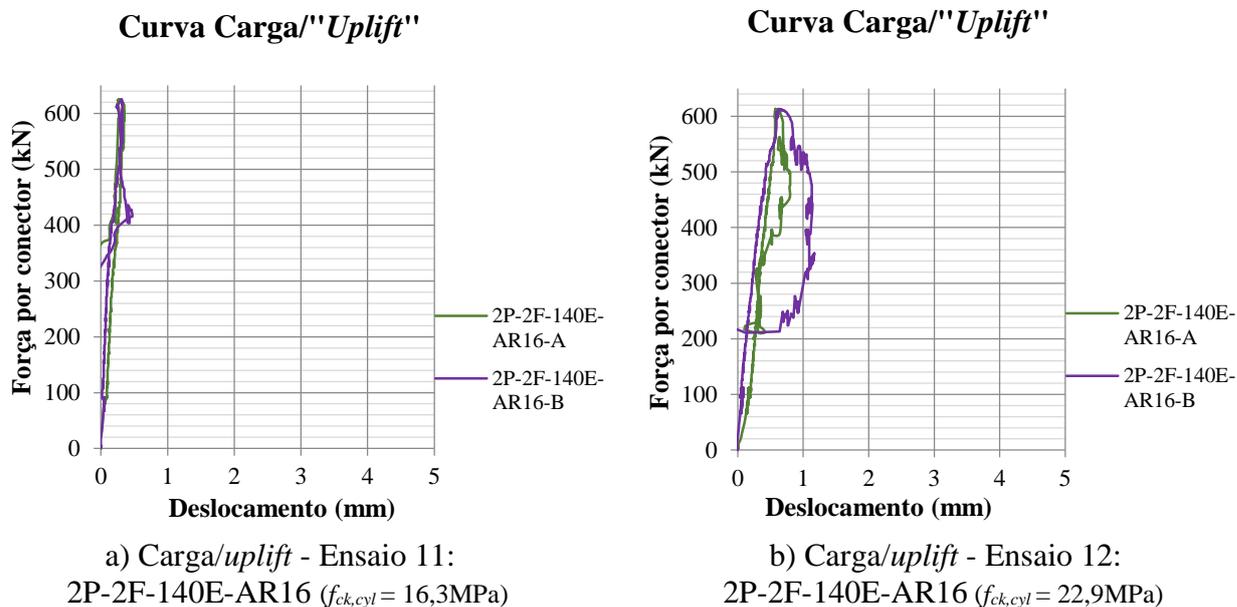


Figura A.0.3-Curva carga/*uplift* para o conector 2P-2F-140E-AR16, nas duas séries ensaiadas

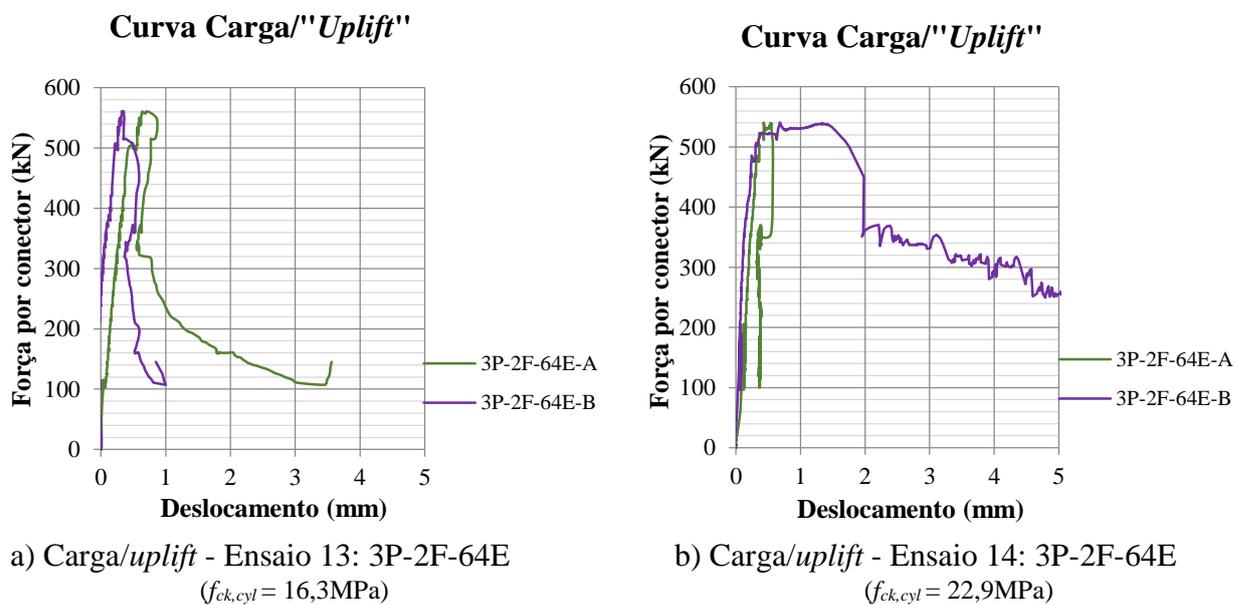
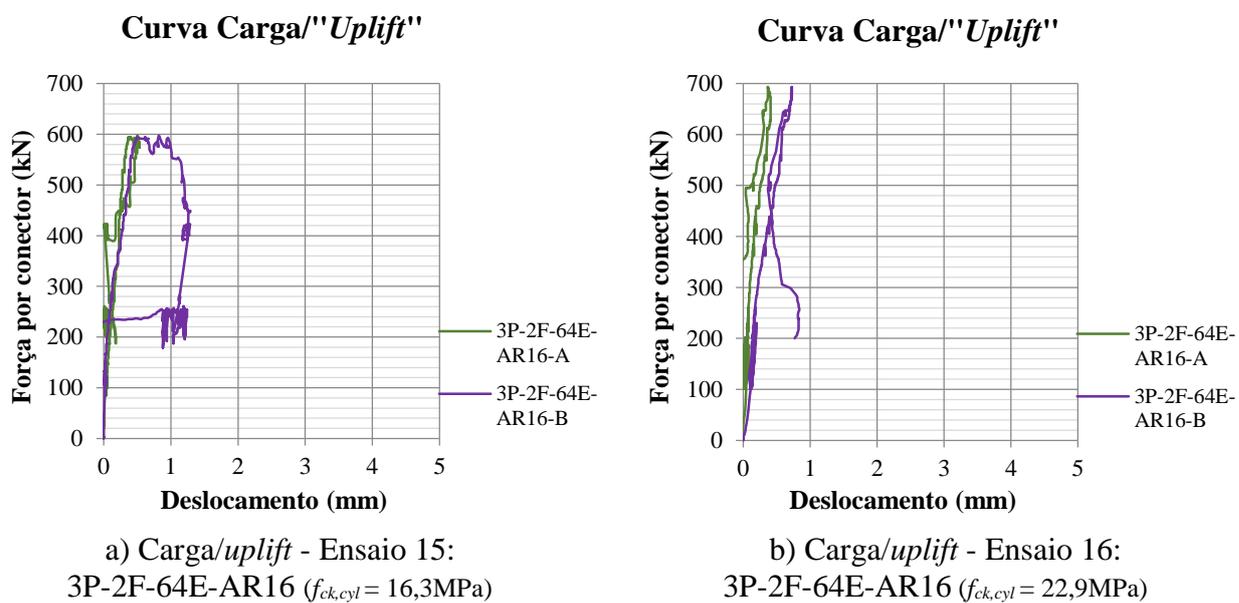


Figura A.0.4-Curva carga/*uplift* para o conector 2P-2F-64E, nas duas séries ensaiadas

Figura A.0.5-Curva carga/*uplift* para o conector 2P-2F-140E-AR16, nas duas séries ensaiadas