



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

Desenvolvimento de conector metálico para ligação de betões de diferentes idades

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

Autor

João Paulo Vieira Martins

Orientadores

Luís Filipe da Costa Neves

Eduardo Nuno Brito Santos Júlio

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 de 2015

AGRADECIMENTOS

Um sincero agradecimento a todas as pessoas com quem convivi e me fui cruzando neste breve passagem por Coimbra e que, de uma forma directa ou indirecta, contribuíram para que esta dissertação fosse realizada, mas que acima de tudo me acompanharam nesta curta experiência na ‘terra dos estudantes’.

Aos orientadores, o Professor Doutor Luis Costa Neves, que me desafiou a realizar este trabalho, e o Professor Doutor Eduardo Júlio, que impulsionou a realização do projecto, agradeço por toda a ajuda e orientação dadas ao longo dos últimos meses.

Agradeço também aos meus amigos e colegas de projecto, Gonçalo Duarte e José Maria Raposo, e aos amigos Carlos Martins, André Marques, Carlos Fernandes, Luis Bernardo, Pedro Gil e David Ventura por todos os momentos de trabalho, convívio e entajuda partilhados.

De uma forma muito especial agradeço ao Sr. David Rodrigues, responsável da Oficina do DEC, pois sem a sua preciosa ajuda não teria sido possível executar grande parte do trabalho experimental. Tenho a agradecer-lhe o muito que aprendi com ele, mas acima de tudo a disponibilidade, simpatia e genuíno interesse em ajudar que sempre demonstrou.

Agradeço também a todos os funcionários do LEMEC, em especial ao Eng.º Edmundo Pais e ao Luis Gaspar pelo auxílio prestado na concretização do programa experimental, apesar das muitas dificuldades que tiveram que ser ultrapassadas pelo caminho.

À ETMA Metal Parts agradeço o fabrico e fornecimento dos protótipos testados no desenvolvimento do projecto e à Limpa Canal a colaboração na montagem e o fornecimento de todos os materiais necessários à preparação das lajes para os ensaios de corte finais, incluindo a execução da hidrodecapagem e da picagem com martelo pneumático. Deixo também uma palavra de agradecimento ao ISEC por ter disponibilizado parte das instalações para a realização destes ensaios.

À minha irmã e ao meu cunhado por me aturarem durante uns meses e aos meus pequenos sobrinhos, João Pedro e Maria João, por me fazerem rir ao chegar a casa.

RESUMO

A adição de uma nova camada de betão é uma das possíveis técnicas de reforço de uma estrutura existente em betão armado. Quando utilizada essa solução, torna-se necessário assegurar o comportamento monolítico dos elementos compósitos através da mobilização de esforço de corte longitudinal na interface e para isso são utilizados conectores de corte.

A presente dissertação apresenta o estudo e desenvolvimento de um conector metálico para ligação em interfaces betão/betão, realizado com o enquadramento do projecto *QREN 38829 – HiPerConnector: High Performance Connector for Concrete Overlays*. Trata-se de uma dissertação com uma forte componente de trabalho experimental, em que são apresentados os ensaios de caracterização de diversos protótipos testados e é definido um modelo de conector, que recebeu o nome de HiPerConnector, devido ao projecto em que estava inserido.

O programa experimental consistiu na execução de ensaios de tracção, ensaios de corte-flexão, ensaios de arrancamento e ensaios de ancoragem no novo betão. Depois de definida a configuração do HiPerConnector foram ainda realizados ensaios de corte em laje, simulando a solicitação destes elementos numa aplicação real no desempenho da sua função. Paralelamente aos protótipos estudados, foram sempre ensaiados exemplares de um conector de referência no mercado, o conector de corte HILTI HCC-B.

Os resultados obtidos são analisados e comentados.

ABSTRACT

Casting a concrete overlay is a usual strengthening technique that can be applied to a reinforced concrete structure. When applied, the monolithic behavior of the resulting composite member is ensured through interfacial shear strength and so there are used shear connectors.

At this thesis is presented the study and development of a novel steel connector to enhance the shear strength of the interface between concrete layers cast at different times, framed in the research project *QREN 38829 – HiPerConnector: High Performance Connector for Concrete Overlays*. It is a dissertation with a strong experimental work component, which presents the characterization tests of several prototypes and the definition of a novel connector model, which was named HiPerConnector due to the project in which it was developed.

The experimental program consisted on the execution of tensile tests, dowel-action tests, pullout tests and docking trials in the new concrete. After defining the configuration of HiPerConnector were also executed full scale shear tests, simulating the loading of these connectors in a real application situation. Parallel to the studied prototype specimens were also tested specimens of the reference shear conector in the market: HILTI HCC-B.

The results are analyzed and discussed.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE QUADROS	IX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos do Trabalho	2
1.3 Organização da Dissertação.....	2
2. ESTADO DO CONHECIMENTO.....	4
2.1 Considerações Iniciais	4
2.2 Teoria do corte-atrito (<i>shear-friction theory</i>)	5
2.3 Capacidade resistente a esforços de corte longitudinal na interface betão-betão segundo diversos códigos de dimensionamento	7
2.3.1 Eurocódigo 2 – EN 1992-1-1 [1].....	7
2.3.2 CEB-FIP Model Code 2010 [2].....	9
2.3.3 ACI 318 (2008) [4].....	13
2.4 Soluções existentes	14
3. ANÁLISE EXPERIMENTAL	18
3.1 Programa Experimental	18
3.2 Ensaio de tracção	22
3.2.1 Provetes	22
3.2.2 Materiais e Equipamento	23
3.2.3 Procedimento de ensaio	23
3.2.4 Resultados.....	24
3.3 Ensaio de corte-flexão (efeito de ferrolho)	27
3.3.1 Provetes	27
3.3.2 Materiais e Equipamento	27
3.3.3 Procedimento de ensaio	31
3.3.4 Resultados.....	31
3.4 Ensaio de arrancamento	34
3.4.1 Provetes para ensaios de arrancamento na cola.....	34
3.4.2 Provetes para ensaios de arrancamento no betão e em betão e cola.....	35

3.4.3	Materiais e Equipamento	37
3.4.4	Procedimento de ensaios de arrancamento na cola	38
3.4.5	Resultados dos ensaios de arrancamento na cola	39
3.4.6	Procedimento de ensaios de arrancamento no betão e em betão e cola	42
3.4.7	Resultados dos ensaios de arrancamento no betão e em betão e cola	43
3.5	Ensaio de arrancamento do lado da cabeça.....	45
3.5.1	Provetes	45
3.5.2	Materiais e Equipamento	46
3.5.3	Procedimento de ensaio	47
3.5.4	Resultados.....	47
3.6	Escolha da configuração do HiPerConnector.....	49
3.7	Ensaio de corte em laje	50
3.7.1	Provetes	51
3.7.2	Materiais e Equipamento	53
3.7.3	Procedimento de ensaio	55
3.7.4	Resultados.....	56
4.	SÍNTESE DA ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	64
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Viga composta simplesmente apoiada: a) sem mobilização de resistência ao corte longitudinal; b) com mobilização de resistência ao corte longitudinal [adaptado de (Santos, 2009)]	4
Figura 2.2 - Modelo em dentes de serra (<i>saw-tooth model</i>) [retirado de (Santos e Júlio, 2012)]	6
Figura 2.3 - Efeito de ferrolho (adaptado de FIB Model Code 2010[2])	6
Figura 2.4 - Contribuição da adesão, do atrito e do efeito de ferrolho segundo (Zilch & Reinecke, 2000)	7
Figura 2.5 - (a) Rugosidade média; (b) Média pico-vale	9
Figura 2.6 - Exemplos de "adaptações" que pretendem assegurar a resistência ao corte longitudinal	15
Figura 2.7 - a) Conector de corte FISCHER FCC; b) Conector de corte HILTI HCC-K	15
Figura 2.8 - Conector de corte HILTI HCC-B	15
Figura 2.9 - Corte longitudinal e em segmentos na direcção perpendicular de um conector HILTI HCC-B	16
Figura 2.10 - Análise microscópica do material constituinte (ampliação de 100x e de 200x)	17
Figura 3.1 - Elemento do tipo TT1 (preparado para ensaio de tracção)	20
Figura 3.2 - Elemento do tipo TT4	21
Figura 3.3 - Elemento do tipo CT1	21
Figura 3.4 - Elemento do tipo CT2	22
Figura 3.5 - <i>Setup</i> de ensaio de tracção: a) plano geral, b) pormenor da amarração dos conectores HILTI HCC-B, c) pormenor da amarração dos restantes conectores	23
Figura 3.6 - Diagramas Força-Deslocamento dos ensaios de tracção (um elemento de cada série de ensaios)	24
Figura 3.7 - Diagramas tensão-extensão dos ensaios de tracção (um elemento de cada série de ensaios)	26
Figura 3.8 - Provetes para ensaio de corte-flexão (provetes TT4.D)	27
Figura 3.9 - Preparação dos provetes com conectores HCC-B para ensaios de corte-flexão	27
Figura 3.10 - Esquema do <i>setup</i> dos ensaios de corte-flexão	28

Figura 3.11 – Exemplo de ensaios em varões embebidos em betão e ensaios em varões não embebidos [adaptado de (Paiva, 2012)]	29
Figura 3.12 - Corte esquemático do <i>setup</i> de ensaio de corte-flexão e pormenor dos cilindros metálicos que foram soldados no interior dos blocos	30
Figura 3.13 - Ensaio de corte-flexão: perspectiva geral, pormenor durante o ensaio (CT1) e provete no final do ensaio (CT2)	31
Figura 3.14 - Diagramas Força-Deslocamento dos ensaios de corte-flexão	32
Figura 3.15 - Diagramas Força-Deslocamento dos ensaios de corte-flexão (um de cada série de ensaios)	32
Figura 3.16 - Diagramas Esforço Axial - Deslocamento dos ensaios de corte-flexão	33
Figura 3.17 - Provetes para os ensaios de arrancamento na cola (esquema e exemplo)	34
Figura 3.18 - Planificado de elementos que não chegaram a ser fornecidos para ensaiar	35
Figura 3.19 - Aplicação dos elementos do tipo CT2 para ensaio de arrancamento em cola e betão	36
Figura 3.20 - Esquema de ensaios de arrancamento a realizar com os elementos HCC	36
Figura 3.21 - Aplicação dos elementos do tipo HCC para ensaios de arrancamento em cola e betão e pormenor do alargamento da boca do furo	37
Figura 3.22 - Esquema dos ensaios de arrancamento: a) na cola, b) no betão	38
Figura 3.23 - <i>Setup</i> de ensaio de arrancamento na cola e pormenor da colocação dos transdutores de deslocamentos	39
Figura 3.24 - Diagramas Força-Deslizamento dos ensaios de arrancamento na cola dos provetes CT2.AC	40
Figura 3.25 - Resultado de ensaio de arrancamento na cola de um provete CT2 e pormenor da cola presa nos entalhes	40
Figura 3.26 - Resultado do ensaio de arrancamento na cola do provete CT1.AC_1	41
Figura 3.27 - Exemplo de rotura de um provete HCC.AC	41
Figura 3.28 - <i>Setup</i> de ensaio de arrancamento no betão e pormenor da fixação do transdutor de deslocamentos	43
Figura 3.29 - Resultado dos ensaios de arrancamento em cola e betão	44
Figura 3.30 - Preparação da laje para a realização dos ensaios de arrancamento do lado da cabeça	45
Figura 3.31 - Provetes para a execução dos ensaios de arrancamento do lado da cabeça	46
Figura 3.32 - Esquema de colocação dos provetes para ensaios de arrancamento do lado da cabeça	46
Figura 3.33 - Resultado do ensaio de arrancamento do lado da cabeça do provete Est ϕ 24.1	48

Figura 3.34 - Resultado dos ensaios de arrancamento do lado da cabeça	48
Figura 3.35 - HiPerConnector	50
Figura 3.36 - Esquema e dimensões do HiPerConnector	50
Figura 3.37 - Hidrodecapagem. Aspecto geral, pormenor e comparação de superfície tratada e não tratada	51
Figura 3.38 – Tratamento de superfície com martelo pneumático	52
Figura 3.39 - Aplicação dos conectores, preparação e betonagem dos blocos de betão	52
Figura 3.40 - Provetes para execução dos ensaios de corte em laje (laje com tratamento por hidrodecapagem e laje com superfície ondulada)	53
Figura 3.41 - Curva de endurecimento do betão utilizado na betonagem 1	54
Figura 3.42 - Curva de endurecimento do betão utilizado na betonagem 2	54
Figura 3.43 - Esquema dos ensaios de corte em laje	54
Figura 3.44 - <i>Setup</i> para ensaios de corte em laje (plano geral e pormenor dos instrumentos de monitorização)	55
Figura 3.45 - Valores máximos de carga nos ensaios de corte em laje	56
Figura 3.46 - Diagramas força-deslocamento horizontal e força-deslocamento vertical dos ensaios de corte em laje com superfície lisa	57
Figura 3.47 - Quebra da adesão entre as duas camadas de betão em ensaio com superfície lisa	58
Figura 3.48 - Aspecto do provete no final do ensaio (HiPerConnector.1)	58
Figura 3.49 - Esmagamento do betão na zona de aplicação da carga nos ensaios com conectores <i>Hilti</i> HCC e superfície ondulada	59
Figura 3.50 - Diagramas força-deslocamento horizontal e força-deslocamento vertical dos ensaios de corte em laje com superfície ondulada	60
Figura 3.51 - Interface após o ensaio, antes de depois de varrido o material solto	61
Figura 3.52 - Diagramas força-deslocamento horizontal e força-deslocamento vertical dos ensaios de corte em laje com superfície tratada com martelo pneumático	61
Figura 3.53 - Aparecimento de 'fissura' na interface das duas camadas de betão	62
Figura 3.54 - Diagramas força-deslocamento horizontal e força-deslocamento vertical dos ensaios de corte em laje com superfície tratada por hidrodecapagem	63
Figura 3.55 - Laje com superfície tratada por hidrodecapagem depois de realizados os ensaios	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Valores dos coeficiente c e μ , segundo EC2[1] – 6.2.5	8
Quadro 2.2 - Coeficientes de rugosidade de superfície em interfaces reforçadas com conectores (retirado e traduzido de MC2010 [3])	13
Quadro 3.1 - Cargas máximas, áreas da secção e tensão última dos provetes nos ensaios de tracção	25
Quadro 3.2 - Tensões de cedência dos provetes utilizados nos ensaios de tracção	26
Quadro 3.3 - Valores dos ensaios de arrancamento na cola	42
Quadro 3.4 - Cargas máximas atingidas nos ensaios de arrancamento em cola e betão	44
Quadro 3.5 - Valores máximos de carga dos ensaios de arrancamento do lado da cabeça	47
Quadro 3.6 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos cubos recolhidos na betonagem 1	53
Quadro 3.7 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos cubos recolhidos na betonagem 2	53

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Nas últimas décadas, o betão armado tem sido utilizado como solução estrutural nas mais variadas situações, nomeadamente na execução de numerosas obras de arte. Com o passar dos anos, surge a necessidade de reforçar essas estruturas, seja para proceder a reparação de anomalias detectadas, seja para as adequar a novas solicitações. Uma das técnicas de reforço de elementos de betão armado consiste na adição de uma nova camada de betão. Nestes casos, é importante assegurar o monolitismo da secção composta resultante e, para isso, é em geral necessário prever uma armadura de ligação entre a estrutura original e a camada de reforço.

A ligação entre betões de diferentes idades pode ser garantida através da utilização de conectores metálicos que, pese embora com fraca presença no mercado português, são uma solução bastante em uso no mercado internacional, em especial nos países do Norte da Europa, na reabilitação e/ou reforço de obras de arte como pontes, viadutos e túneis. Em Portugal é corrente a solução (mais económica) de chumbar varões de armaduras correntes de betão armado no betão do substrato e, posteriormente, dobrá-las de modo a garantir a necessária ancoragem no novo betão. No entanto, a utilização de conectores metálicos permite uma maior facilidade de aplicação da “armadura de ligação” e é menos condicionante para o desenrolar dos restantes trabalhos da obra. Por esta razão, dependendo do custo dos conectores, poderá ser mais económico utilizar elementos de ligação deste tipo em vez dos varões de armadura corrente, uma vez que a quantidade de material a utilizar é bastante inferior.

Atendendo ao que atrás foi dito, surgiu a motivação, enquadrada num projecto de investigação científica que abaixo se identifica, de procurar desenvolver e produzir um modelo de conector metálico, em parceria com uma empresa portuguesa que actua no sector de fabrico de peças metálicas, a ETMA Metal Parts, que fosse economicamente viável no contexto do mercado nacional.

Este trabalho surge enquadrado no projecto de investigação *QREN 38829 – HiPerConnector: High Performance Connectors for Concrete Overlays*, no qual o autor participou como bolsheiro contratado para a execução da parte experimental do projecto.

1.2 Objectivos do Trabalho

Enquadrado no projecto de investigação HiPerConnector, definiu-se para o presente trabalho o objectivo de desenvolver e produzir, em parceria com a empresa ETMA Metal Parts, um conector metálico para assegurar a ligação entre camadas de betão de diferentes idades.

Assumindo-se como referência o conector HILTI HCC-B, pretendia-se desenvolver um produto de produção nacional que apresentasse um desempenho tão bom ou melhor que o do produto de referência e com um custo competitivo no mercado nacional.

Definiu-se, de modo a garantir bom comportamento mecânico do conector face às solicitações a que é sujeito, que seria necessário assegurar:

- ancoragem suficiente em ambas as camadas de betão,
- capacidade resistente a esforços simultâneos de corte e flexão, ou seja, resistência por efeito de ferrolho,
- capacidade resistente a esforços de tracção.

Pretendendo-se desenvolver um produto competitivo no mercado, foi definido que seriam utilizados processos produtivos simples, de modo a reduzir os custos de produção associados.

Com este trabalho, pretende-se também fazer uma análise comparativa ao desempenho do novo conector e do conector de referência em ensaios que se aproximem de situações reais de aplicação. Entende-se que é importante efectuar esta análise considerando diferentes configurações da superfície da interface entre betões, de modo a compreender qual a importância que essa configuração tem na capacidade resistente ao corte longitudinal da interface.

1.3 Organização da Dissertação

Este documento encontra-se estruturado em cinco capítulos, seguidos da bibliografia relevante, consultada na execução do trabalho.

No presente capítulo é feita uma breve introdução ao tema em análise, são apresentados os objectivos a atingir com o trabalho e é explicada a estrutura que se adoptou para a organização desta dissertação.

Com o segundo capítulo procura-se fazer um enquadramento do estado do conhecimento no que diz respeito a esta área, havendo também o cuidado de analisar o que está definido nos principais códigos, Eurocódigo 2 [1], Model Code 2010 [2][3] e ACI 318 [4], no que respeita ao dimensionamento deste tipo de ligações. Faz-se também uma pequena análise dos tipos de conectores existentes nos mercados nacional e internacional.

O terceiro capítulo é o mais extenso, uma vez que neste é apresentado o estudo experimental. Inicia-se com a apresentação geral do programa experimental, identificando-se os objectivos que se pretendia atingir com cada um dos diferentes tipos de ensaios, sendo depois detalhados os diversos ensaios realizados, referindo o processo de execução e preparação dos provetes, caracterizando os materiais e os equipamentos utilizados, descrevendo o procedimento de ensaio e fazendo uma breve apresentação dos resultados.

No quarto capítulo faz-se uma síntese e uma análise complementar dos resultados obtidos com o programa experimental apresentado no capítulo anterior.

No quinto e último capítulo tecem-se algumas considerações sobre o desenvolvimento do trabalho, são apresentadas conclusões e fazem-se algumas sugestões de possíveis desenvolvimentos futuros.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 Considerações Iniciais

A necessidade de utilização de armadura de ligação entre camadas de betão de diferentes idades, seja em soluções de reforço por adição de uma nova camada de betão ou na ligação entre elementos pré-fabricados e partes betonadas *in situ*, de modo a garantir um comportamento monolítico do conjunto, deve-se essencialmente à necessidade de assegurar a resistência aos esforços de corte longitudinal. Na Figura 2.1 está ilustrada, com uma situação muito simples de uma viga simplesmente apoiada, a importância de se assegurar a capacidade de resistência ao corte longitudinal num elemento compósito.

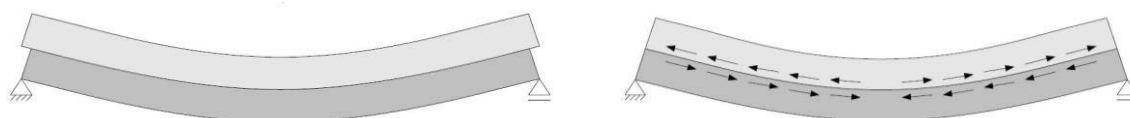


Figura 2.1 – Viga composta simplesmente apoiada: a) sem mobilização de resistência ao corte longitudinal; b) com mobilização de resistência ao corte longitudinal [adaptado de (Santos, 2009)]

A determinação da capacidade resistente ao corte longitudinal tem sido alvo de numerosos estudos ao longo das últimas décadas e, como é natural, tem recebido contribuições de diversos autores e sofrido uma enorme evolução na noção de quais os mecanismos actuantes na mobilização dessa resistência. Uma das primeiras propostas de expressão de cálculo para a determinação da resistência ao corte longitudinal foi apresentada por Anderson (1960), com base em parâmetros calibrados através de ensaios de *push-off*, dependendo apenas da percentagem mecânica de armadura a atravessar a interface. Outros investigadores, como Hanson (1960), Mattock e Kaar (1961), Saemann e Washa (1964) propuseram também expressões de cálculo para a determinação dessa resistência. No entanto, o grande passo foi dado com os trabalhos de Birkeland e Birkeland (1966), com a apresentação da *shear-friction theory* em que estimava a capacidade resistente da ligação com uma expressão linear dependente da percentagem mecânica de armadura, da tensão na armadura e no coeficiente de atrito. Outros investigadores como Shaikh (1978), Loov (1978), o primeiro a incluir explicitamente a resistência do betão numa equação para cálculo da resistência ao corte longitudinal, Walraven (1988), Mattock (1988), Mau e Hsu (1988), Tsoukantas e Tassios (1989), Patnaik (1992) e Randl (1997) também realizaram e publicaram trabalhos neste

campo, contribuindo de forma importante para o desenvolvimento do estado do conhecimento.

No ponto 2.2 deste trabalho refere-se um pouco da evolução da teoria do corte-atrito, ou *shear-friction theory*, proposta por Birkeland e Birkeland (1966) e que tem servido de base à análise da resistência deste tipo de interfaces.

De seguida (ponto 2.3) faz-se uma análise da forma como diferentes regulamentos consideram a análise da resistência ao corte longitudinal na interface entre betões de diferentes idades e, no final do capítulo, faz-se referência a conectores já existentes no mercado internacional.

2.2 Teoria do corte-atrito (*shear-friction theory*)

O comportamento de uma interface betão/betão, sujeita a esforço de corte longitudinal, pode ser previsto pela teoria do corte-atrito, ou *shear-friction theory*. Esta teoria foi proposta por Birkeland e Birkeland (1966) e desde então têm sido sugeridas diversas propostas de melhoria, de modo a aumentar a sua precisão e o seu campo de aplicação. Em (Santos e Júlio, 2012) é feita uma revisão muito completa da literatura publicada sobre este tema e é apresentado o estado da arte no que diz respeito ao corte-atrito.

Na teoria do corte-atrito assume-se que a transmissão dos esforços de corte numa interface betão/betão, sujeita simultaneamente a forças de corte (τ) e de compressão (σ), é assegurada apenas por atrito. Um modelo simples em “dentes de serra” (Figura 2.2) permite exemplificar os princípios base desta teoria. Olhando para essa figura, verifica-se que, devido à rugosidade da superfície, ao existir deslizamento (s) entre dois corpos, se dá um afastamento (w) entre eles na direcção perpendicular à interface. Este afastamento é habitualmente designado por dilatação e, ao ocorrer, nos casos em que existe armadura a atravessar a interface, mobiliza esforços de tracção nessas armaduras (σ_s), o que, conseqüentemente comprime a interface, mobilizando o atrito. Sendo assim, é considerada tanto a influência das armaduras que atravessam a interface, que para além de traccionadas são solicitadas ao corte e à flexão, como das forças externas que actuam numa direcção normal ao plano de corte considerado.

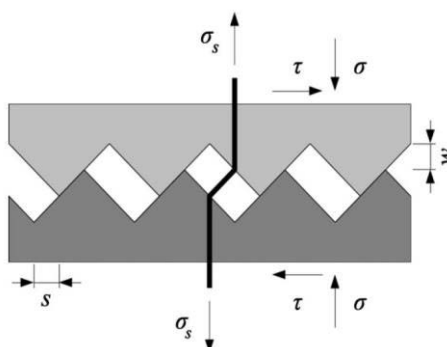


Figura 2.2 - Modelo em dentes de serra (*saw-tooth model*) [retirado de (Santos e Júlio, 2012)]

É importante ter em atenção que existem duas situações a considerar: (a) interfaces em que ainda existe adesão (entendida como adesão química das partículas) entre os dois corpos de betão e (b) interfaces com deslizamento relativo entre as duas partes, em que já se quebrou essa adesão. Importa realçar que a teoria do corte-atrito apenas se aplica à segunda situação, em que se assume que o comportamento da interface é controlado pela coesão (*cohesion*), entendida como o imbricamento das partículas (*aggregate interlock*), pelo atrito (*friction*) e pelo efeito de ferrolho (*dowel-action*). O efeito de ferrolho deve-se à existência de armadura atravessando a interface, a qual é solicitada simultaneamente ao corte e à flexão, conforme ilustrado na Figura 2.3.

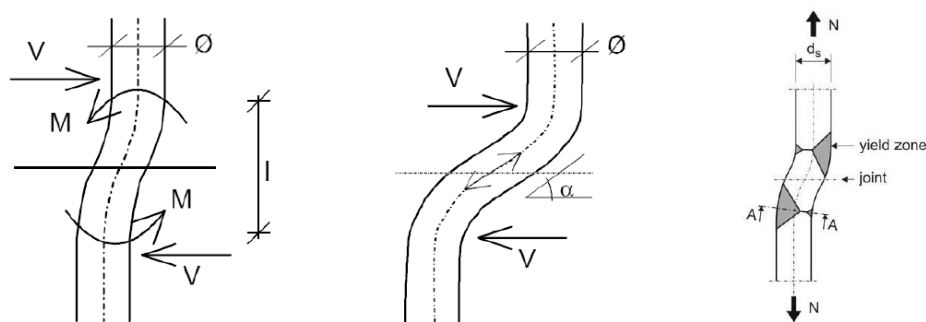


Figura 2.3 - Efeito de ferrolho (adaptado de FIB Model Code 2010[2])

Conforme apresentado por (Zilch & Reinecke, 2000) a resistência ao corte longitudinal numa interface betão/betão pode ser descrita pela combinação dos três mecanismos de transmissão de carga, apresentados na Figura 2.4:

- τ_{adh} — adesão/coesão entre partículas (*adhesion*)
- τ_{sf} — atrito (*shear-friction*)
- τ_{sr} — efeito de ferrolho (*dowel-action*)

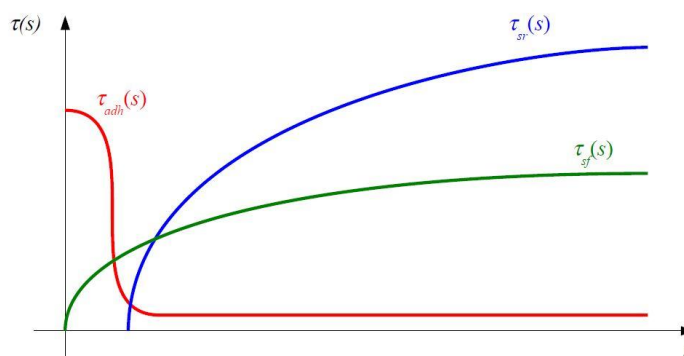


Figura 2.4 - Contribuição da adesão, do atrito e do efeito de ferrolho segundo (Zilch & Reinecke, 2000)

A componente adesão tem origem na ligação química entre as partículas do betão do substrato e do novo betão. Quando é atingida a sua capacidade resistente, ocorre o descolamento na interface e os esforços de corte longitudinal passam a ser transferidos pelo imbricamento entre as partículas (*mechanical interlocking*). Se existirem forças externas que sujeitem a interface a compressão, há transmissão de esforços por atrito entre as partes. Com o aumento do deslocamento relativo entre as duas partes de betão, a armadura que atravessa a interface será tensionada, podendo atingir a cedência. Ao tensionar a armadura, por equilíbrio de forças, esta induz compressão na interface, aumentando a transmissão de esforços de corte longitudinal por atrito. Com o deslizamento entre as duas camadas a armadura que atravessa a interface, para além de traccionada, fica também sujeita a esforços de corte e flexão a que usualmente se dá o nome de efeito de ferrolho. Tem-se assim: $\tau(s) = \tau_{adh}(s) + \tau_{sf}(s) + \tau_{sr}(s)$.

A teoria do corte-atrito tem servido de base à generalidade dos manuais, regulamentos, códigos e guias de dimensionamento para analisar as interfaces betão-betão. De seguida faz-se uma pequena análise de alguns destes documentos.

2.3 Capacidade resistente a esforços de corte longitudinal na interface betão-betão segundo diversos códigos de dimensionamento

2.3.1 Eurocódigo 2 – EN 1992-1-1 [1]

Segundo o EC2 [1], ponto 6.2.5, a resistência ao corte longitudinal em juntas de betonagem de diferentes datas é dada por:

$$V_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd} \quad (1)$$

em que:

- v_{Rdi} – valor de dimensionamento da tensão de corte longitudinal resistente
- c, μ – coeficientes que dependem da rugosidade da superfície da interface
- f_{ctd} – valor de dimensionamento da resistência à tracção do betão
- σ_n – tensão normal na interface devido a acções externas. Sinal positivo quando os esforços são de compressão (com a condição de $\sigma_n < 0,6f_{cd}$) e negativo quando de tracção (neste caso considerar $c \cdot f_{ctd} = 0$).
- ρ – relação entre a área de armadura que atravessa a interface e a área da superfície da interface: A_s/A_i
- f_{yd} – valor de dimensionamento da tensão de cedência da armadura que atravessa a interface
- α – ângulo da armadura que atravessa a interface com o plano da interface
- v – coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transversal
- f_{cd} – valor de dimensionamento da resistência à compressão do betão

Se $\alpha = 90^\circ$, que é o que se verifica na generalidade das situações com aplicação de conectores, e se se considerar uma notação geral, sem coeficientes para valores de cálculo, tem-se:

$$v_u = c f_{ct} + \mu (\sigma_n + \rho f_y) \leq 0,5 v f_c \quad (2)$$

Os valores de c e de μ são definidos, “na falta de informações mais pormenorizadas”, com base numa análise qualitativa da rugosidade da superfície da interface, de acordo com o que se apresenta no Quadro 2.1. A imposição da condição $v_{Rdi} \leq 0,5 v f_{cd}$ tem em conta o esmagamento das bielas que se formam no betão à compressão, sendo $v = 0,6 (1 - f_{ck} / 250)$, com f_{ck} em MPa.

Quadro 2.1 - Valores dos coeficiente c e μ , segundo EC2[1] – 6.2.5

Classificação da superfície	Valores dos coeficientes		Exemplos de superfície
	c	μ	
Muito lisa	0,025 a 0,10	0,5	Superfície moldada por aço, plástico ou por moldes de madeira especialmente preparados
Lisa	0,20	0,6	Superfície extrudida ou executada com moldes deslizantes, ou executada sem cofragem e não tratada após vibração
Rugosa	0,40	0,7	Superfície com rugosidades de pelo menos 3mm de altura e espaçadas cerca de 40mm, obtidas por meio de raspagem, de jacto de água, ar ou areia ou por meio de quaisquer outros métodos de que resulte um comportamento equivalente
Indentada	0,5	0,9	Superfície com recortes, em conformidade com figura apresentada no ponto 6.2.5 do EC2[1], p. 105

Assim sendo, pode-se indicar que o EC2 [1] considera que a capacidade resistente de uma interface betão/betão se obtém pelo somatório da parcela identificada com o efeito de adesão ($c \cdot f_{ct}$) com a parcela que se deve ao atrito ($\mu (\sigma_n + \rho \cdot f_y)$). A parcela que se refere à adesão depende apenas da capacidade de resistência à tracção do betão mais fraco (f_{ct}) e do coeficiente c , que é tanto menor quanto mais lisa for a superfície da interface em questão. Este coeficiente reflecte o aumento da superfície efectiva de contacto entre betões na interface que se dá com o aumento da rugosidade da superfície. A parcela identificada como contributo do atrito depende do coeficiente de atrito (μ), da tensão normal à superfície devida a acções externas (σ_n) e da mobilização de tracção nas armaduras que atravessam a interface ($\rho \cdot f_y$).

O contributo do efeito de ferrolho parece não ser considerado no cálculo da capacidade resistente de forma explícita, no entanto o seu efeito está considerado na definição dos parâmetros μ e c , obtidos de uma forma empírica.

2.3.2 CEB-FIP Model Code 2010 [2]

A abordagem do CEB-FIP Model Code 2010 [2], daqui para a frente denominado apenas como MC2010, relativa à resistência ao corte longitudinal da interface betão/betão, é um pouco diferente da abordagem do EC2 [1], atrás apresentada.

Neste código, a análise das características de interfaces betão/betão é feita no ponto 6.3, em que se começa por definir parâmetros que permitem quantificar a rugosidade de uma superfície de betão. São definidos os parâmetros rugosidade média (R_a), que representa o desvio médio do perfil em relação a uma linha média, que é determinada como o valor médio da altura do perfil num determinado comprimento, e a altura média pico-vale ($R_{z(DIN)}$), que representa a média das alturas máximas pico-vale (z_i) num determinado número de comprimentos de avaliação (λ_c). A obtenção destes parâmetros está ilustrada na Figura 2.5.

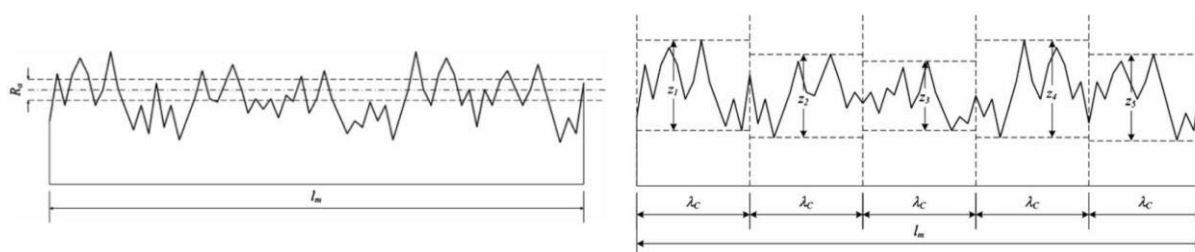


Figura 2.5 - (a) Rugosidade média; (b) Média pico-vale

Por uma questão de simplificação de cálculo, faz-se depois uma divisão em quatro categorias de rugosidade: Muito Lisa (em que R_a não é mensurável), Lisa (com $R_a < 1,5$ mm), Rugosa (com $R_a \geq 1,5$ mm) e Muito Rugosa (com $R_a \geq 3$ mm), que não diferem muito das quatro categorias definidas no EC2 [1], apesar de neste caso haver parâmetros objectivos de classificação.

Após uma descrição dos diferentes mecanismos que contribuem para a resistência global ao corte longitudinal (adesão/coesão, atrito e efeito de ferrolho), refere-se que esta pode ser estimada pela sobreposição dos efeitos de cada um destes processos. No entanto, uma vez que há interacção entre estes, e atendendo a que cada um atinge o máximo para valores diferentes de deslizamento entre as duas camadas de betão, não faz sentido adicionar a contribuição de todos assumindo os respectivos valores máximos.

Dependendo da adesão, da rugosidade da interface e da quantidade de armadura existente, o processo geral de transmissão de cargas será dominado pela adesão e coesão ou pelos processos de atrito e efeito de ferrolho. Em geral, poderão ser consideradas duas situações:

- forte ligação adesiva → comportamento “rígido”: adesão e coesão são os principais mecanismos que contribuem para a resistência ao corte longitudinal;
- fraca ligação adesiva → comportamento “não rígido”: atrito e efeito de ferrolho são os principais mecanismos que contribuem para a resistência ao corte longitudinal.

A tensão última de corte longitudinal na interface, resultante da contribuição de cada um dos mecanismos de resistência, pode ser aproximada de uma forma geral através de:

$$\tau_u = \underbrace{\tau_c}_{\text{adesão}} + \underbrace{\mu (\rho \kappa f_y + \sigma_n)}_{\text{atrito}} + \underbrace{\alpha \rho \sqrt{f_y f_{cc}}}_{\text{efeito de ferrolho}} \leq \beta v f_{cc} \quad (3)$$

em que κ e α são factores de interacção, os quais têm em consideração o facto de as armaduras que atravessam a interface estarem sujeitas, simultaneamente, a flexão, corte e esforço normal e ainda o facto de a máxima contribuição de cada um dos mecanismos ocorrer para valores de escorregamento distintos. O factor κ corresponde à relação entre a tensão de tracção na armadura e a tensão resistente desta ($\kappa = \sigma_s/f_y < 1,0$), a qual será tanto mais baixa quanto mais significativa for a flexão presente em simultâneo e/ou mais baixa for a capacidade de ancoragem da mesma. Dependendo da rugosidade e das características da

deformação esperada, bem como da ancoragem das armaduras, poderão ser adoptados os seguintes valores:

- para armaduras embebidas no betão antigo e com ancoragem apropriada, tanto no antigo como no novo betão, pode-se considerar a tracção das armaduras como mecanismo dominante, i.e. $0,5 \leq \kappa \leq 1,0$, reduzindo-se a capacidade resistente por efeito de ferrolho. Por simplicidade de cálculo, podem ser usados os seguintes valores limite: $k \leq 1,0$ e $\alpha = 0$;
- para armaduras instaladas posteriormente, como é o caso dos conectores, deve ser considerado um factor $\kappa = 0,5$ quando se tiver provocado rugosidade na superfície do betão. Para superfícies lisas o efeito de ferrolho nos conectores é o principal mecanismo de resistência, i.e $k = 0$ e $\alpha = 1,5$.

No que respeita à parcela correspondente à adesão/coesão (τ_c), uma vez que o valor máximo deste mecanismo ocorre numa fase claramente anterior à dos restantes, este termo deverá tomar um valor muito reduzido ou mesmo nulo nas situações em que o mecanismo de adesão não for o principal.

Nos casos em que o efeito predominante é a tração nas armaduras, o efeito de ferrolho fica reduzido, o que ocorre especialmente em interfaces mais rugosas, nas quais se geram maiores aberturas na junta e, por conseguinte, maiores trações nos conectores. A parcela da expressão relativa ao efeito de ferrolho ($\alpha \rho (f_y f_{cc})^{1/2}$) resulta da seguinte expressão para a determinação aproximada da resistência máxima à flexão de conectores:

$$F_{0,max} = k A_s \sqrt{f_y f_{cc}} \quad (4)$$

em que o fator k poderá tomar o valor de 1,6 para secções circulares com betão de classe inferior a C50/60. A força aumenta com o deslizamento relativo das camadas de betão (s), atingindo este valor máximo para deslizamentos com um valor aproximado de 0,1 a 0,2 vezes o diâmetro da armadura existente ($s_{max} = 0,10 - 0,20 d_s$). A força máxima tendo em conta a interação tração-flexão no efeito de ferrolho, será:

$$F_{max} = F_{0,max} \sqrt{1 - \kappa^2} \quad (5)$$

Na secção 7.3.3.6 do MC2010 [3], estas considerações traduzem-se em duas expressões diferentes para a determinação da resistência ao corte em dois cenários considerados: interfaces atravessadas por armaduras correntes de betão armado, devidamente ancoradas de

ambos os lados, (*interfaces intersected by reinforcement steel*) e interfaces atravessadas por conetores pós-instalados (*interfaces connected by dowels*).

Para o primeiro caso é dada uma expressão que, à semelhança do EC2 [1], toma em consideração o ângulo α entre a interface e a armadura:

$$v_{Rd} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd} \quad (6)$$

Esta expressão é resultado da aplicação da expressão geral (3) apresentada anteriormente, na qual são adoptados os factores de interacção $\alpha = 0$ e $\kappa = 1,0$, por se considerar que nestes casos a tração nas armaduras é de tal modo preponderante que mal se chega a verificar o efeito de ferrolho.

Para o segundo caso, próprio da reabilitação de estruturas, em que são aplicados conetores metálicos e em que as superfícies de betão antigo sofrem um tratamento de superfície, de modo a aumentar a rugosidade, a expressão apresentada no MC2010 [3] é:

$$v_{Rdi} = 0,09 k_c \sqrt[3]{f_{ck}} + \mu (\rho \kappa f_{yd} + \sigma_n / \gamma) + \alpha \rho \sqrt{f_{yd} f_{cd}} \leq \beta_c v f_{cd} \quad (7)$$

Esta expressão é semelhante à expressão geral (3) referida anteriormente, adaptada para valores de cálculo e com a especificação da parcela do mecanismo de adesão/coesão. Para esta parcela surge um coeficiente de rugosidade da interface (k_c), que reflete o que já foi referido: será tomado com valor nulo nos casos em que a adesão/coesão não é o mecanismo condicionante (superfícies lisas) e com um valor significativo ($k_c = 2,3$) no caso contrário, como por exemplo no caso de superfícies tratadas com jato de água com alta pressão.

Os coeficientes κ e α seguem os princípios referidos anteriormente: em superfícies lisas o efeito de ferrolho desenvolve-se consideravelmente enquanto a dilatância é muito baixa e, por conseguinte, a tração nas armaduras mal se chega a verificar, pelo que se indicam os seguintes valores: $\alpha = 1,4$ e $\kappa = 0$. Já no caso de superfícies rugosas, dá-se uma interacção entre a flexão e a tração das armaduras, de modo que se deverá tomar: $\alpha = 0,9$ e $\kappa = 0,5$. No Quadro 2.2, apresenta-se o quadro em que estão sintetizados os valores dos coeficientes a adoptar.

Quadro 2.2 - Coeficientes de rugosidade de superfície em interfaces reforçadas com conectores (retirado e traduzido de MC2010 [3])

Rugosidade da superfície	k_c	κ	α_F	β_c	μ	
					$f_{ck} \geq 20$ MPa	$f_{ck} \geq 35$ MPa
Jacto de água de alta pressão $R \geq 2,5$ mm	2,3	0,5	0,9	0,5	0,8	1,1
Jacto de areia $R \geq 0,5$ mm	0	0,5	1,0	0,4	0,7	
Lisa	0	0	1,4	0,4	0,5	

2.3.3 ACI 318 (2008) [4]

Este código da *American Concrete Institute* apresenta no capítulo 11 as considerações relevantes sobre esforço transversal e torção, dedicando o ponto 11.6 à análise das situações em que existe transferência de esforços de corte através de um determinado plano, seja uma fissura, uma interface entre diferentes materiais ou uma interface entre dois betões com diferentes idades.

A fórmula indicada no código de dimensionamento ACI 318 [4] para o cálculo do valor da resistência de corte é:

$$V_n = A_{vf} f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \quad (8)$$

o que, nos casos em que as armaduras/conectores estão aplicados numa direcção perpendicular ao plano da interface, e dividindo tudo pela área da interface, corresponde a:

$$v_n = \rho f_y \mu \quad (9)$$

em que o coeficiente de atrito, μ , toma os valores:

- $1,4 \lambda \rightarrow$ betão monolítico;
- $1,0 \lambda \rightarrow$ betonagem contra betão endurecido com superfície intencionalmente tornada rugosa;
- $0,6 \lambda \rightarrow$ betonagem contra betão endurecido sem tratamento para tornar a superfície intencionalmente mais rugosa;

e o coeficiente λ tem em conta as proporções volumétricas dos agregados do betão e toma os valores $\lambda = 1,0$ para betões normais e $\lambda = 0,75$ para betões leves.

Nos comentários deste código é referido que o valor obtido através da expressão (8) é um valor conservativo e que uma estimativa mais aproximada pode ser dada, nos casos em que as armaduras/conectores estão colocados numa direcção perpendicular ao plano de corte, por:

$$V_n = 0,8 A_{vf} f_y + A_c K_I \quad (10)$$

em que A_c é a área de betão, em in^2 ($645,16 \text{ mm}^2$), que está a resistir ao esforço de corte longitudinal e K_I toma o valor de 400 psi (2,758 MPa) para betões normais e 200 psi (1,379 MPa) para betões leves. Estes valores de K_I aplicam-se tanto para a análise do esforço de corte em fissuras de betões monolíticos como em interfaces entre betões de diferentes idades, cuja superfície do substrato foi tornada rugosa de uma forma intencional. O primeiro termo da equação (10) representa a contribuição do atrito para a resistência ao corte longitudinal (0,8 representa o coeficiente de atrito), enquanto o segundo termo da equação representa a resistência ao corte das saliências na interface e do efeito de ferrolho nas armaduras ou conectores.

2.4 Soluções existentes

No mercado nacional não se encontram produtos com a função de conector de corte betão-betão, ou seja, a função de assegurar a ligação de uma camada de betão de reforço a um elemento de betão já existente, garantindo o monolitismo do conjunto e assegurando a capacidade resistente a esforços de corte longitudinal. No entanto, são por vezes utilizadas soluções, como as que se apresentam na Figura 2.6, que adaptam materiais já utilizados na construção, de modo a assegurar esse efeito de ligação entre as camadas de betão. Na Figura 2.6 a) pode observar-se a utilização de troços de armaduras correntes de betão armado que, depois de aplicadas no betão do substrato, são dobradas para garantir uma boa ancoragem no novo betão, enquanto nas soluções apresentadas na Figura 2.6 b) e c) são utilizados, em vez de armaduras correntes, varões roscados sobre os quais são depois soldadas ou apertadas umas chapas que, para além de permitirem algum apoio na colocação da armadura da nova camada a ser betonada, visam garantir uma boa ancoragem no novo betão.

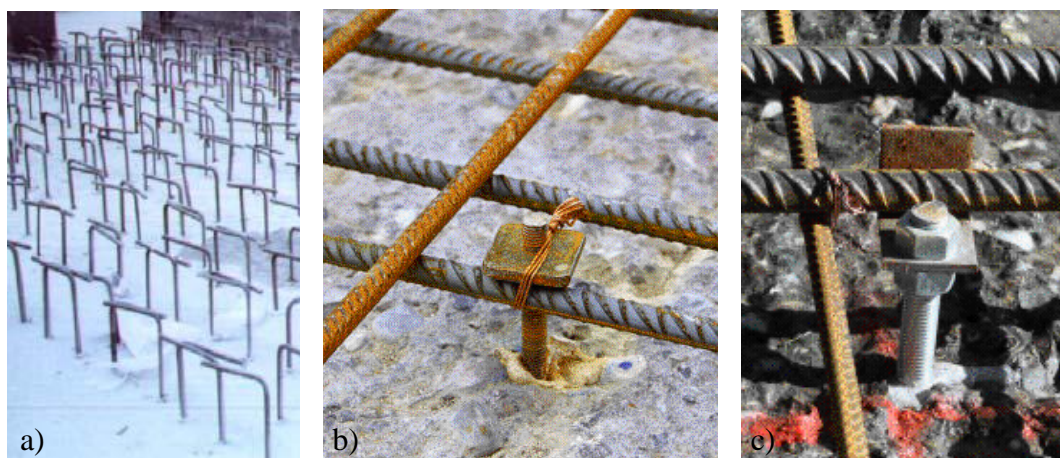


Figura 2.6 - Exemplos de "adaptações" que pretendem assegurar a resistência ao corte longitudinal

Estendendo a pesquisa ao mercado internacional foi possível encontrar marcas como a HILTI e a FISCHER, igualmente a operar no mercado nacional, que disponibilizam artigos desenvolvidos especialmente para solucionar o problema em questão. É o caso dos conectores apresentados na Figura 2.7, que são disponibilizados pelas marcas em diferentes diâmetros e comprimentos. Estes elementos assemelham-se a troços de armadura de betão armado, sobre os quais é feita, numa das extremidades, compressão obrigando à deformação do aço formando uma espécie de cabeça de amarração.



Figura 2.7 - a) Conector de corte FISCHER FCC; b) Conector de corte HILTI HCC-K

Para além dos produtos referidos acima, a HILTI disponibiliza ainda um outro tipo de conector de corte para interfaces betão-betão, que tem o nome comercial de HCC-B, o qual está representado na Figura 2.8. Esta é uma peça mais elaborada do que os artigos apresentados anteriormente.



Figura 2.8 - Conector de corte HILTI HCC-B

O conector HCC-B tem o interior oco, o que permite a injeção da cola pelo seu interior, possui orifícios na ponta que permitem a saída da cola e o seu espalhamento pelo furo e possui um padrão de nervuras com diversas orientações. Existem nervuras longitudinais que asseguram o contacto com as paredes do furo para um correcto posicionamento do conector, nervuras helicoidais que servem para otimizar a aderência ao elemento químico de ligação e uma zona de nervuras transversais que, para além de auxiliar a adesão à cola ou ao betão novo, serve essencialmente como um indicador visual para a aplicação do conector, uma vez que define o intervalo de aplicabilidade do conector em termos de profundidade. A acrescentar a estes elementos há ainda uma cabeça de forma cónica que serve essencialmente para assegurar a ligação ao betão novo e que tem um desenho que permite o apoio das armaduras de reforço da nova camada de betão directamente em cima do conector ou então sobre um varão $\phi 8$ mm que se pode fazer passar pelo furo que existe junto à cabeça, sobre o qual podem ser apoiadas as armaduras da nova camada de betão.

A HILTI justifica o desenvolvimento deste produto como tentativa de melhorar soluções do tipo da que se apresenta na Figura 2.6 a), as quais apresentam baixa rigidez, pelo facto de as soluções que se apresentam na Figura 2.6 b) e c) exigirem um elevado tempo para aplicação e pelo facto de as soluções com o tipo de conectores da Figura 2.7 não serem muito ajustáveis. A configuração apresentada pelo HCC-B permite melhorar todos estes aspectos.

Para perceber melhor como é constituído este produto, foi realizado o corte de um conector na direcção longitudinal e vários cortes na direcção perpendicular, conforme apresentado na Figura 2.9. Assim, conseguiu-se perceber que o furo no seu interior não apresenta uma forma cilíndrica, mas sim uma forma cónica que deriva do seu processo de fábrica, que é o vazamento para o interior de um molde de areia do material que o constitui.



Figura 2.9 - Corte longitudinal e em segmentos na direcção perpendicular de um conector HILTI HCC-B

Através de uma análise microscópica feita a uma pequena amostra do material de um destes conectores (Figura 2.10), foi possível determinar que são fabricados em ferro fundido nodular e não em aço.

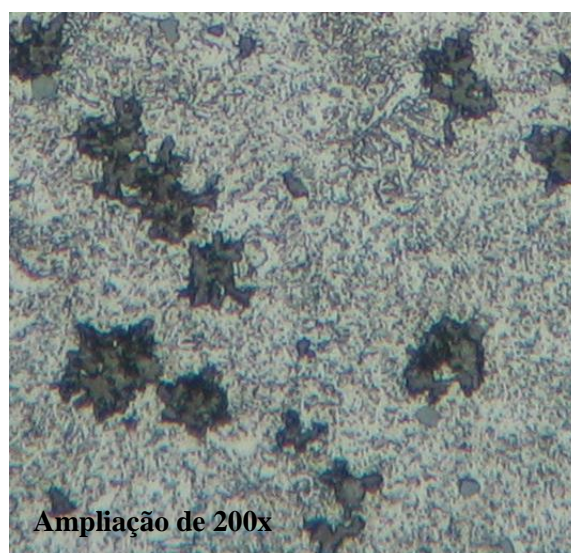
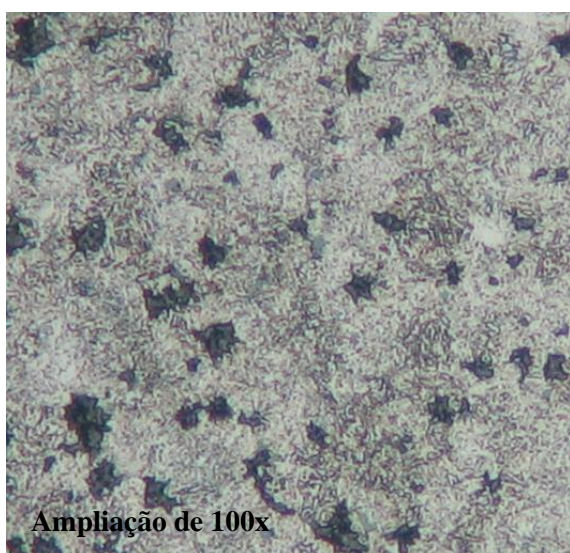


Figura 2.10 - Análise microscópica do material constituinte (ampliação de 100x e de 200x)

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.1 Programa Experimental

O planeamento do programa experimental necessário ao desenvolvimento deste trabalho foi executado tendo como objectivo a criação e desenvolvimento de um conector com características optimizadas face às várias condicionantes do projecto. A principal condicionante foi o tipo de processos de fabrico que a empresa parceira, a ETMA Metal Parts, tinha à disposição nas suas instalações industriais, bem como a existência de matéria-prima necessária à preparação dos provetes a ensaiar.

Foi assumido como ideia base do projecto que se tentaria desenvolver um tipo de conector que tivesse uma forma oca o que, para além de facilitar a correcta aplicação da “cola” que assegura a ligação ao betão do substrato (ao ser intruduzida pelo interior do conector, a “cola” preenche todo o furo, de baixo para cima, sem aprisionar bolhas de ar), permite otimizar a quantidade de material utilizada no seu fabrico, uma vez que a inércia de flexão de um tubo é superior à inércia de flexão de um cilindro com a mesma área.

Com este ponto de partida, foi analisado junto da empresa parceira quais seriam as possibilidades para fabricarem elementos de tipo tubular, tendo-se identificado as seguintes abordagens alternativas: (a) partindo de elementos comerciais de tubos de aço, aplicar-lhes algumas transformações por maquinaria, ou (b) utilizando chapas de aço com espessura não superior a 2 mm obter, por processos de estampagem e quinagem, uma secção fechada hexagonal, a que mais se aproxima da secção circular das que se consegue produzir por estes processos.

Os processos mecânicos disponíveis para executar transformações sobre elementos de tubo de aço comercial são os seguintes:

- Conformação de tubo em prensa (prensagem) – processo em que, por conformação a frio em prensa, são criados entalhes ou nervuras nas paredes do tubo. É utilizada uma prensa, na qual é montada uma ferramenta progressiva que, por operações sucessivas de compressão, cria os entalhes pretendidos na peça;

- Torneamento - processo em que a matéria-prima é fornecida com dimensões superiores às dimensões finais da peça, a máquina, um torno, imprime rotação à peça e, utilizando uma ou mais ferramentas de corte, vai arrancando a peça até obter as dimensões e forma pretendidas. O percurso das ferramentas de corte é comandado por tecnologia CNC (Controlo Numérico Computadorizado). Tecnologia ideal para a obtenção de formas de revolução;
- Repuxagem – processo utilizado para provocar um aumento de diâmetro exterior num elemento tubular cilíndrico. É um processo complementar a outro processo produtivo principal e que pode ser utilizado por exemplo para o alargamento de uma das extremidades, criando uma cabeça cónica no conector.

O tratamento industrial de chapa de aço, com espessura não superior a 2 mm, para a obtenção de elementos conforme pretendido, pode ser feito por operações sucessivas de corte e dobragem, de acordo com os seguintes passos: corte do contorno da peça (planificado), estampagem de figuras na chapa (criando entalhes ou nervuras conforme pretendido), dobragem em etapas sucessivas até à obtenção da forma tubular. O fecho do “tubo” é assegurado por engates cortados nos bordos da peça que serão unidos. Todo este processo é muito rápido, permitindo cadências de produção elevadas.

Em síntese, o programa experimental foi definido com o objectivo de avaliar o tempo e o custo associado ao processo de fabrico de diferentes tipos de conector e de avaliar o comportamento mecânico destes segundo diversos parâmetros.

Face ao apresentado no capítulo 2, pode-se afirmar que os principais requisitos dos conectores a aplicar na interface betão/betão são os seguintes:

- ancoragem adequada no betão do substrato;
- ancoragem adequada no novo betão;
- resistência a esforços de corte-flexão (efeito de ferrolho).

Se o primeiro e o último dos pontos assinalados se devem à constituição e configuração do que se pode denominar ‘corpo do conector’, o segundo ponto deve-se essencialmente ao formato e dimensões da extremidade a que se pode chamar ‘cabeça do conector’.

Assim, foi decidido realizar um conjunto de ensaios para avaliar o comportamento de diversos protótipos do corpo do conector e, paralelamente, realizar um segundo conjunto de ensaios para avaliar o comportamento de diferentes protótipos da cabeça do conector. Posteriormente, seria seleccionada a melhor combinação corpo-cabeça. Na última etapa do projecto estava

prevista a realização de ensaios de corte, considerando para o efeito modelos de laje de betão, com uma nova camada de betão e com a aplicação dos conectores desenvolvidos a atravessar a interface.

Para a avaliação das possíveis configurações do corpo do conector foi decidido efectuar ensaios de tracção (ponto 3.2), para avaliar o comportamento dos aços constituintes dos elementos, ensaios de corte-flexão (ponto 3.3), que pretendem simular a sollicitação dos conectores em efeito de ferrolho, e ensaios de arrancamento na cola e em betão e cola (ponto 3.4), de modo a avaliar a capacidade de ancoragem dos possíveis conectores.

Com o intuito de avaliar o comportamento de diferentes configurações possíveis de cabeça determinou-se que seriam realizados ensaios de arrancamento do lado da cabeça de protótipos aplicados numa laje de betão preparada com esse propósito (ponto 3.5).

Para a realização dos ensaios acima referidos prepararam-se diversos tipos de provetes, cuja execução é detalhada em cada um dos pontos relativo ao respectivo ensaio, mas que se baseavam nos seguintes elementos:

Elementos do tipo TT1

Elementos tubulares simples, sem qualquer tipo de nervura ou entalhe, com diâmetro exterior de 16 mm e espessura de 2 mm, constituído por aço da classe E235. Na Figura 3.1 é apresentado o exemplo de um destes elementos.



Figura 3.1 - Elemento do tipo TT1 (preparado para ensaio de tracção)

Elementos do tipo TT2

Elementos com o mesmo aspecto dos elementos TT1, ou seja tubo liso com diâmetro exterior e espessura iguais, mas constituídos por um tipo de aço diferente. Os elementos do tipo TT2 eram constituídos por um aço de classe E355 e obtidos a partir de tubo metálico sem costura, ao contrário do tubo que deu origem aos elementos TT1, que era tubo com costura.

Elementos do tipo TT4

Obtiveram-se os elementos do tipo TT4 através do processo atrás referido de dobragem de chapa para obtenção de uma secção de formato hexagonal. Foi utilizada na execução destes elementos uma chapa de classe C45E com 2 mm de espessura. As paredes destes elementos também são lisas, não existindo qualquer tipo de entalhe ou nervura. É ilustrado na Figura 3.2 um destes elementos.



Figura 3.2 - Elemento do tipo TT4

Elementos do tipo CT1

Produziram-se estes elementos utilizando o processo de torneamento, anteriormente descrito, a partir de um tubo de aço do tipo E355, sem costura, com um diâmetro exterior de 16 mm e uma espessura de 5 mm. Desse tubo foi retirada a parte de aço até obter a forma que se apresenta na Figura 3.3. Metade do elemento tem as nervuras orientadas num sentido, enquanto a outra metade tem as nervuras orientadas no sentido inverso, uma vez que se pretendia maximizar a capacidade de resistência ao deslizamento em cada um dos lados da interface e que a orientação das nervuras desempenha papel fundamental nessa resistência.



Figura 3.3 - Elemento do tipo CT1

Elementos do tipo CT2

Utilizando o processo de prensagem, foram preparados os elementos do tipo CT2. Os entalhes foram também orientados em direcções opostas em cada uma das metades dos elementos

(Figura 3.4), pelo mesmo motivo já referido no caso dos elementos CT1. Estes elementos foram produzidos a partir de tubos de aço com costura, em aço da classe E235, com diâmetro exterior de 16 mm e paredes com 2,5 mm de espessura.



Figura 3.4 - Elemento do tipo CT2

Elementos do tipo HCC

Elementos obtidos a partir de conectores *Hilti* HCC-B. Na generalidade dos ensaios utilizaram-se conectores sem qualquer alteração à forma como são fornecidos no mercado, mas nos casos em que foi necessário efectuar algum tipo de alteração a essa apresentação comercial isso é devidamente referido.

De seguida faz-se uma apresentação detalhada de todos os ensaios realizados.

3.2 Ensaios de tracção

3.2.1 Provetes

Os ensaios de tracção foram executados em provetes tubulares simples, com 20 cm de comprimento, cuja amarração nas garras da prensa foi feita de tal forma que o comprimento livre entre garras fosse de 10 cm.

Ensaaiaram-se os conectores HILTI HCC-B sem qualquer alteração à sua apresentação comercial, tendo sido no entanto necessário executar uma peça metálica para garantir a fixação da extremidade da cabeça nas garras da prensa.

Foram ensaiados três provetes de cada um dos diferentes tipos: TT1.T, TT2.T, TT4.T, CT1.T, CT2.T e HCC.T.

3.2.2 Materiais e Equipamento

Os ensaios de tracção realizaram-se no LEMEC do DEC da FCTUC, utilizando a prensa electromecânica de ensaios Servosis 20 t aí existente, montada com a célula de carga Microtest PBI/30, com capacidade de aproximadamente 300 kN à tracção.

Para aquisição e registo dos dados recolhidos durante o ensaio utilizou-se um *datalogger* TML TDS-530. Para além da célula de carga da prensa, foram utilizados na monitorização destes ensaios os seguintes equipamentos:

- Extensómetro mecânico HBM DD1;
- Extensómetros eléctricos TML FLK-6-11, apenas nos ensaios dos conectores HILTI HCC-B, por não ser possível a colocação do extensómetro mecânico;
- Transdutores de deslocamentos TML CDP 50.

3.2.3 Procedimento de ensaio

Para cada um dos ensaios foi montado o respectivo *setup* (Figura 3.5), que consistiu na amarração dos provetes nas garras da prensa, na montagem do extensómetro mecânico e na colocação de dois transdutores de deslocamentos, um nas garras da prensa e outro no braço, para monitorizar a evolução do ensaio.

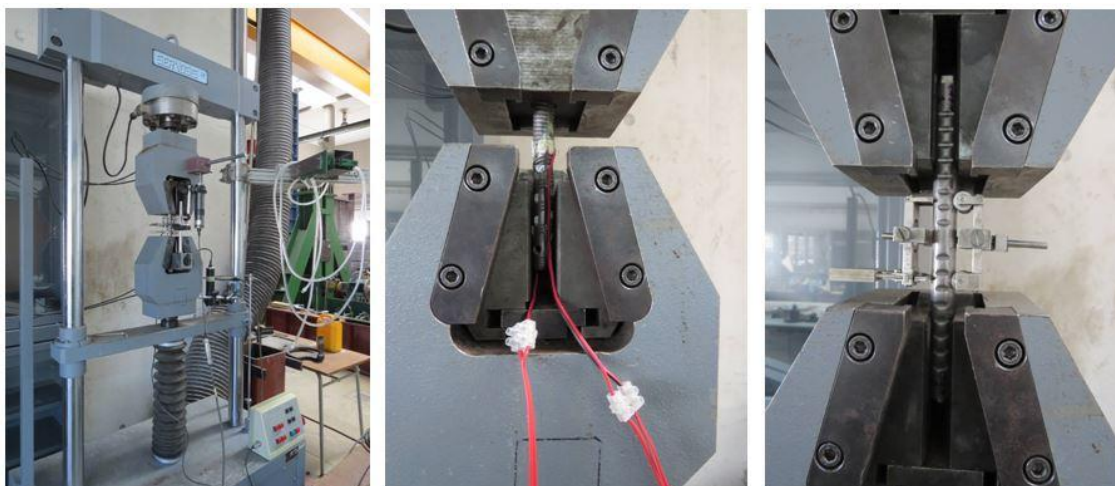


Figura 3.5 - Setup de ensaio de tracção: a) plano geral, b) pormenor da amarração dos conectores HILTI HCC-B, c) pormenor da amarração dos restantes conectores

Foi definido um plano de carga que consistia na aplicação de uma pré-carga a uma velocidade de 0,1 kN/s até atingir os 2,25 kN (aproximadamente 5% da carga estimada para a rotura), seguida de uma descarga à mesma velocidade até aos 0 kN e de uma nova aplicação de carga

com controlo de deslocamentos a uma velocidade de 0,04 mm/s até atingir a rotura. No caso dos conectores HILTI HCC-B foi definida uma velocidade de 0,02 mm/s até à rotura, uma vez que estes apresentavam um comportamento mais rígido.

3.2.4 Resultados

Com os dados recolhidos, traçaram-se os diagramas força-deslocamento para cada um dos ensaios realizados, utilizando os valores de força registados na célula de carga e os valores de deslocamento lidos no transdutor de deslocamentos colocado nas garras da prensa. Na Figura 3.6 são apresentados os diagramas de um representante de cada uma das séries de ensaios realizados. Optou-se por incluir apenas um diagrama de cada uma das séries de ensaios por uma questão de simplicidade de visualização dos mesmos e pelo facto de, dentro de cada uma das séries, os diversos provetes terem apresentado comportamentos semelhantes. Note-se que os valores de deslocamento recolhidos ao longo do ensaio e considerados nesse diagrama não correspondem apenas a deformação do provete, mas incluem também ajustes entre as diferentes peças do sistema de fixação das garras da prensa. Não sendo simples quantificar qual a parcela de deslocamento correspondente a estes ajustes em cada momento dos ensaios, optou-se por traçar os diagramas força-deslocamento com base nestes deslocamentos medidos, porém, a deformação exacta dos provetes foi medida com a utilização de extensómetros.

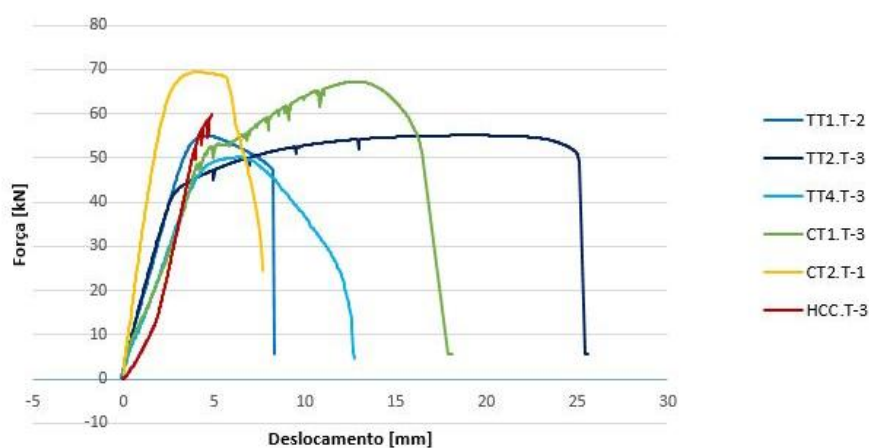


Figura 3.6 - Diagramas Força-Deslocamento dos ensaios de tracção (um elemento de cada série de ensaios)

No Quadro 3.1 apresentam-se os valores máximos de carga registados em cada um dos ensaios, os valores das áreas das secções dos provetes e a correspondente tensão máxima, considerando o valor da força máxima e a área apresentadas. Os conectores HCC-B, devido ao seu processo de fabrico, não têm uma secção constante ao longo do seu desenvolvimento,

bem pelo contrário. Sendo assim, os valores de área que se apresentam no Quadro 3.1 foram obtidos por medição das secções em que se deu a ruptura, com o auxílio de um paquímetro electrónico de precisão. Considerou-se que este era um procedimento válido, uma vez que não existe estricção visível do material constituinte destes conectores durante o ensaio. No caso dos provetes CT1.T a área de secção considerada para o cálculo da tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) foi a área da secção da zona central dos provetes, onde se dá a rotura. No que respeita aos provetes CT2.T, considerou-se que a área da secção era igual à área de secção do tubo antes de executados os entalhes, uma vez que estes são feitos por deformação do material, não existindo remoção de matéria.

Quadro 3.1 - Cargas máximas, áreas da secção e tensão última dos provetes nos ensaios de tracção

Identificação do provete		Força máxima [kN]	Área [mm ²]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]
HCC.T	1	67,08	114,52	585,73
	2	63,57	119,76	530,86
	3	59,80	122,48	488,25
	4	61,51	114,25	538,36
TT1.T	1	---	87,96	---
	2	55,01		625,40
	3	54,39		618,35
TT2.T	1	55,07	87,96	626,08
	2	55,19		627,44
	3	55,14		626,88

Identificação do provete		Força máxima [kN]	Área [mm ²]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]
TT4.T	1	50,11	97,14	515,85
	2	51,19		526,97
	3	50,21		516,88
CT1.T	1	67,40	104,46	645,22
	2	66,54		636,99
	3	67,31		644,36
CT2.T	1	69,42	106,03	654,72
	2	68,77		648,59
	3	69,85		658,78

Foram também traçados os diagramas tensão-extensão de cada um dos ensaios, com base nos dados recolhidos. Calculou-se o valor das extensões em cada momento do ensaio a partir das leituras dos extensómetros eléctricos no caso dos provetes HCC e do extensómetro mecânico nos restantes ensaios. As tensões foram calculadas com base no valor da força exercida e da área de cada uma das secções ($\sigma = F/A$). As áreas consideradas nestes cálculos foram as que se apresentaram no Quadro 3.1, com excepção dos provetes CT1.T, em que se considerou uma área média da secção, tendo em conta o comprimento de provete livre entre garras (l_0). O valor da área média da secção nos 10cm de comprimento do provete entre garras é de 131,79 mm². Na Figura 3.7 são apresentados os diagramas de um representante de cada uma das séries de ensaios realizados (não se apresentam os diagramas de todos os ensaios realizados, uma vez que o comportamento dos diferentes provetes de cada uma das séries foi muito idêntico e deste forma facilita-se a leitura dos diagramas). O gráfico apresentado à direita é exactamente o mesmo que se apresenta do lado esquerdo, mas visualizando as extensões apenas até ao valor de 1%.

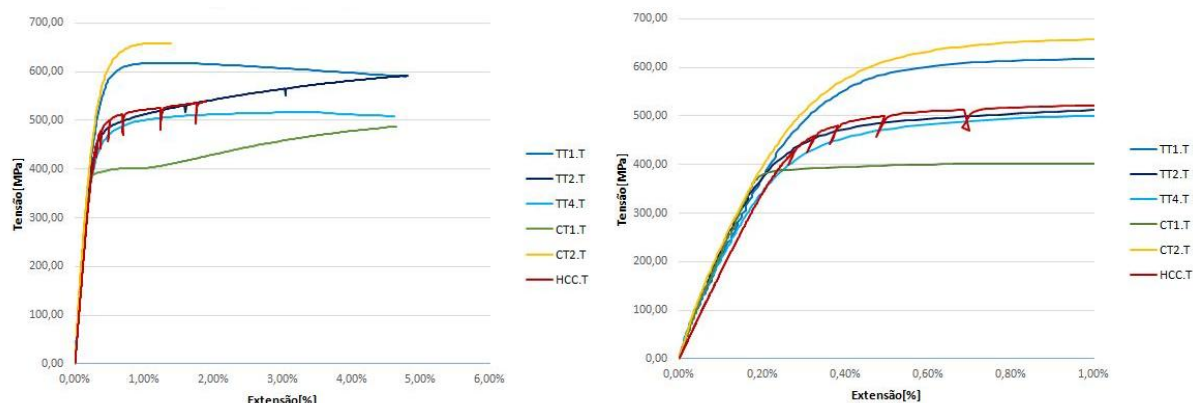


Figura 3.7 - Diagramas tensão-extensão dos ensaios de tracção (um elemento de cada série de ensaios)

A partir dos dados acima referidos foram calculados os módulos de elasticidade correspondentes a cada um dos provetes ensaiados, tendo-se obtido valores de aproximadamente 170 GPa no caso dos provetes HCC e de cerca de 210 GPa em todos os restantes, conforme seria de esperar, atendendo aos materiais constituintes de cada um dos provetes de ensaio.

Procedeu-se ainda ao cálculo da tensão de cedência ($f_{y,i}$) dos materiais para cada um dos ensaios realizados. Considerou-se que esta era atingida quando imposta uma deformação tal que, após descarga completa, implicaria uma extensão definitiva de 0,2%. Os valores obtidos são apresentados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Tensões de cedência dos provetes utilizados nos ensaios de tracção

Identificação do provete		$f_{y,i}$ [MPa]	$f_{y,média}$ [MPa]
HCC.T	1	564,75	521,77
	2	527,96	
	3	479,00	
	4	515,37	
TT1.T	1	---	582,05
	2	581,48	
	3	582,62	
TT2.T	1	512,82	488,08
	2	477,69	
	3	473,71	
TT4.T	1	446,20	451,16
	2	448,36	
	3	458,90	
CT1.T	1	461,33	471,42
	2	499,05	
	3	453,87	
CT2.T	1	600,43	604,82
	2	601,59	
	3	612,43	

3.3 Ensaios de corte-flexão (efeito de ferrolho)

3.3.1 Provetes

Para a execução dos ensaios de corte-flexão prepararam-se provetes constituídos por dois elementos de conector, com 20 cm de comprimento cada um, soldados topo-a-topo, aos quais se soldou uma ponta de varão roscado M14 em cada uma das extremidades, também com 20 cm de comprimento, de modo a permitir a montagem do *setup* de ensaio (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Provetes para ensaio de corte-flexão (provetes TT4.D)

Os provetes preparados com o conector HILTI HCC-B possuem um comprimento inferior (cerca de 12 cm cada elemento de conector), uma vez que o próprio conector tem apenas 18 cm e que ainda se teve que cortar a cabeça e a ponta, como se pode ver na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Preparação dos provetes com conectores HCC-B para ensaios de corte-flexão

3.3.2 Materiais e Equipamento

Os ensaios de corte-flexão foram realizados no LEMEC do DEC da FCTUC e foi utilizada a prensa hidráulica de ensaios AMSLER 500D74 aí existente, com capacidade de 500 tf à compressão.

De modo a solicitar os provetes, mobilizando o efeito de ferrolho, conforme se pretendia, foi utilizado o *setup* de ensaio que se apresenta na Figura 3.10, melhor explicado abaixo, e que foi adaptado a partir dos elementos utilizados no trabalho experimental de (Paiva, 2012). Utilizaram-se três blocos metálicos alinhados, afastados entre si 20 mm, que eram atravessados pelo provete a ensaiar. O bloco central é colocado numa cota 100 mm superior em relação aos outros dois, de modo a possibilitar a aplicação da carga na prensa.

A monitorização dos ensaios realizou-se com a colocação de uma célula de carga TML CLC 20A sobre a caixa central, para determinar a força de compressão exercida pela prensa, uma célula de carga TML CLC 10A em cada uma das extremidades do provete, para determinar o esforço axial mobilizado ao longo do ensaio, e dois transdutores de deslocamentos TML CDP 50 (com a base magnética de cada um deles fixa numa das caixas laterais) para aferir o deslocamento vertical da caixa central com o decorrer do ensaio. Todos os dados foram registados num *datalogger* TML TDS 530.

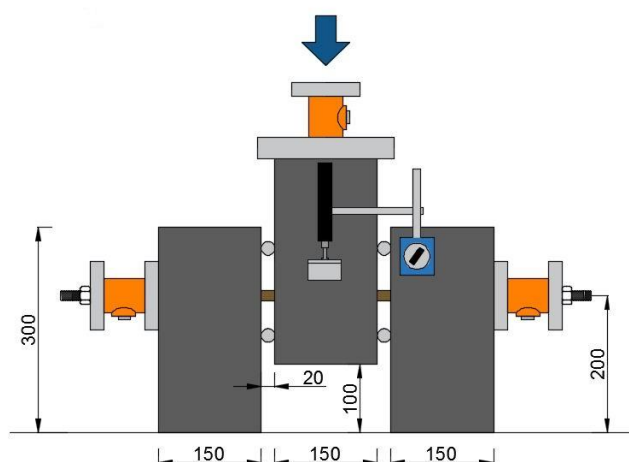


Figura 3.10 - Esquema do *setup* dos ensaios de corte-flexão

Este esquema de ensaio foi concebido no sentido de isolar a capacidade resistente de cada um dos diferentes tipos de conector quando solicitado em corte-flexão, ou seja, quando sujeitos ao efeito de ferrolho. Com o esquema de ensaio utilizado, consegue-se uma concentração das solicitações, deformações e esforços nas zonas do provete localizadas entre os blocos metálicos e nas suas imediações, que era o efeito pretendido.

Em cada uma das extremidades dos provetes foram apertadas porcas, de modo a impedir o deslocamento das extremidades na direcção axial, reproduzindo o efeito de restrição que decorre do embebimento dos conectores no betão. A colocação das células de carga em cada

uma das extremidades do provete permite monitorizar o esforço axial mobilizado com o decorrer do ensaio.

A escolha do espaçamento de 20 mm entre blocos metálicos teve por base o trabalho de Paiva (2012), no qual foram ensaiados provetes de varões de aço de diferentes diâmetros embebidos em blocos de betão e varões de aço não embebidos em betão, testando diferentes afastamentos entre as caixas metálicas (Figura 3.11).

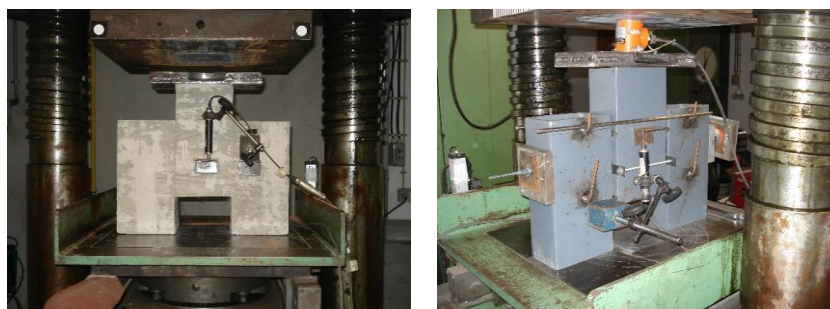


Figura 3.11 – Exemplo de ensaios em varões embebidos em betão e ensaios em varões não embebidos [adaptado de (Paiva, 2012)]

Desses trabalhos pode-se concluir que existe uma certa proporcionalidade entre o diâmetro do varão de aço que está a ser ensaiado e a profundidade de esmagamento do betão provocada pela deformação do varão em cada um dos provetes. Nota-se também que existe uma relação entre o diâmetro do varão ensaiado e o afastamento entre os blocos metálicos que apresenta resultados mais próximos dos valores de deslocamento do bloco central que se verificam nos ensaios dos varões embebidos em blocos de betão. Com base na análise desses resultados foi escolhido o espaçamento de 20 mm entre caixas para a realização dos ensaios de corte-flexão. O espaçamento entre os blocos metálicos é garantido ao longo de todo o ensaio pela colocação de dois cilindros metálicos com 20 mm de diâmetro entre caixas, conforme ilustrado na Figura 3.10. Estes cilindros podem rolar, acompanhando o deslocamento vertical da caixa central, e por isso o afastamento entre as caixas está sempre garantido.

Os blocos metálicos utilizados na realização destes ensaios foram obtidos cortando troços com 300 mm de comprimento de um perfil tubular de secção rectangular em aço S235, com 150 x 95 [mm] e 15 mm de espessura. Em cada uma das faces de menor dimensão foram executados furos com 50 mm de diâmetro, que permitiam a colocação de discos de aço, também de classe S235, com 50 mm de diâmetro e 15 mm de espessura, em cujos centros foram executados furos com 17 mm de diâmetro por onde atravessavam os provetes a ensaiar. Os quatro discos de aço que seriam colocados na zona de maiores solicitações foram temperados, de modo a aumentar a sua resistência ao esmagamento durante o ensaio.

No interior dos blocos metálicos foram soldados uns cilindros ocios, através dos quais passava o provete, que possuíam rosca para a colocação de parafusos no plano da realização do ensaio, conforme se pode ver no esquema da Figura 3.12. Estes parafusos permitem criar pontos de apoio para o provete para além das paredes dos blocos metálicos.

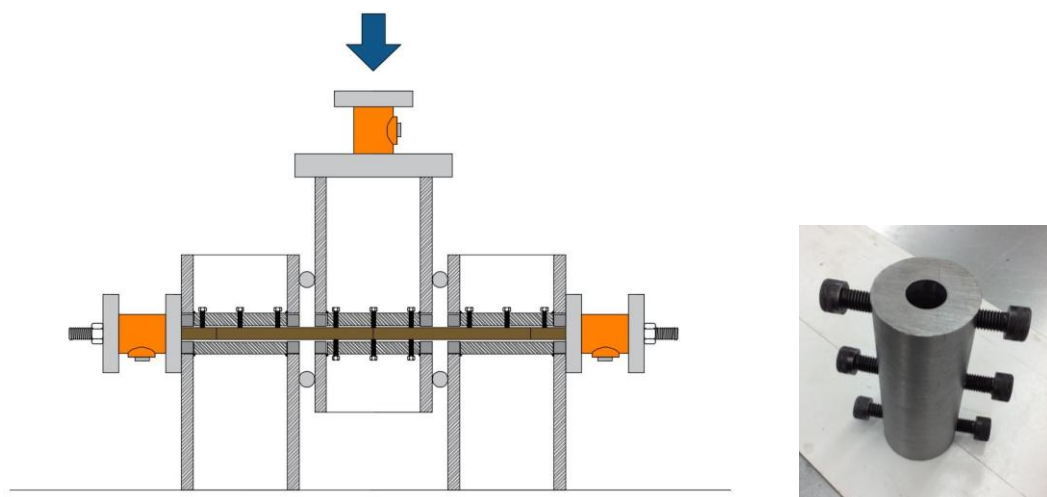


Figura 3.12 - Corte esquemático do *setup* de ensaio de corte-flexão e pormenor dos cilindros metálicos que foram soldados no interior dos blocos

Na realização destes ensaios, assume-se que as deformações elásticas dos blocos e dos cilindros metálicos são desprezáveis. Assim, o deslocamento vertical do bloco central, medido com um transdutor de deslocamentos fixo em cada uma dos blocos laterais, será igual ao deslocamento relativo entre a parte central e as partes laterais do provete.

A montagem do *setup* para a realização de cada um destes ensaios consistiu nos seguintes passos:

- introdução do provete no bloco central, centrando-o no mesmo, e aperto dos parafusos do cilindro metálico desse bloco até encostarem no provete;
- montagem dos blocos laterais, por introdução do provete nos mesmos;
- montagem das células de carga laterais e respectivas chapas de distribuição de cargas, colocação dos cilindros de espessamento e aperto das porcas nas extremidades do provete;
- aperto dos parafusos dos cilindros metálicos existentes nos blocos laterais;
- colocação da célula de carga superior e respectivas chapas de distribuição de carga.

3.3.3 Procedimento de ensaio

Com todos os elementos referidos no ponto anterior montados e cuidadosamente centrados no prato da prensa iniciava-se o ensaio, que consistia na aplicação da carga, com controlo de deslocamentos, a uma velocidade de 0,02 mm/s até atingir a rotura. Na Figura 3.13 são apresentadas imagens da execução destes ensaios.

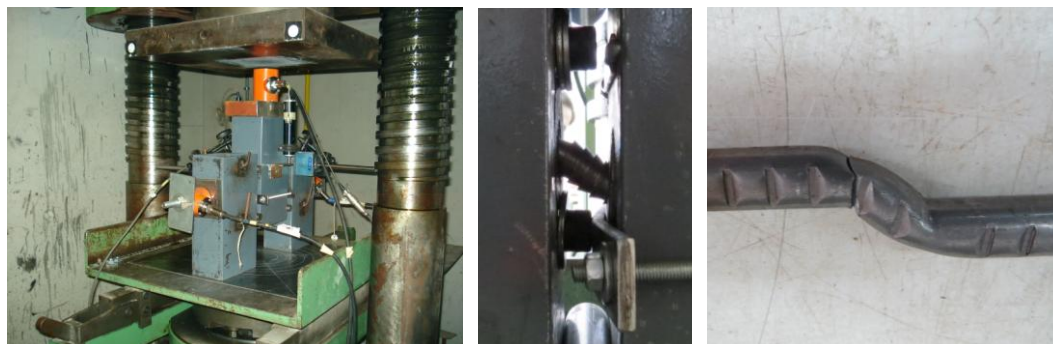


Figura 3.13 - Ensaio de corte-flexão: perspectiva geral, pormenor durante o ensaio (CT1) e provete no final do ensaio (CT2)

A execução de cada um dos ensaios demorava cerca de 10-15 minutos e era claramente visível o aumento da deformação do provete com a evolução do ensaio até que se dava a rotura de um dos lados, altura em que este terminava.

3.3.4 Resultados

Com os dados recolhidos durante os ensaios, foram traçados os diagramas força-deslocamento, utilizando as leituras da célula de carga superior para determinar a carga que estava a ser aplicada em cada instante e a média dos valores medidos em cada instante nos transdutores de deslocamentos para determinar o deslocamento vertical da zona central do provete nesse mesmo instante. Estes diagramas são apresentados na Figura 3.14.

É perceptível nos diagramas da Figura 3.14 que os vários provetes de cada um dos diferentes tipos ensaiados apresentaram comportamento semelhante durante os ensaios. Sendo assim, por uma questão de diminuição da confusão de representação e para facilitar a leitura dos resultados, na Figura 3.15 representa-se apenas a curva de um dos provetes de cada série de ensaios realizada. Para essa representação escolheu-se o provete que durante o ensaio atingiu valores mais elevados de carga.

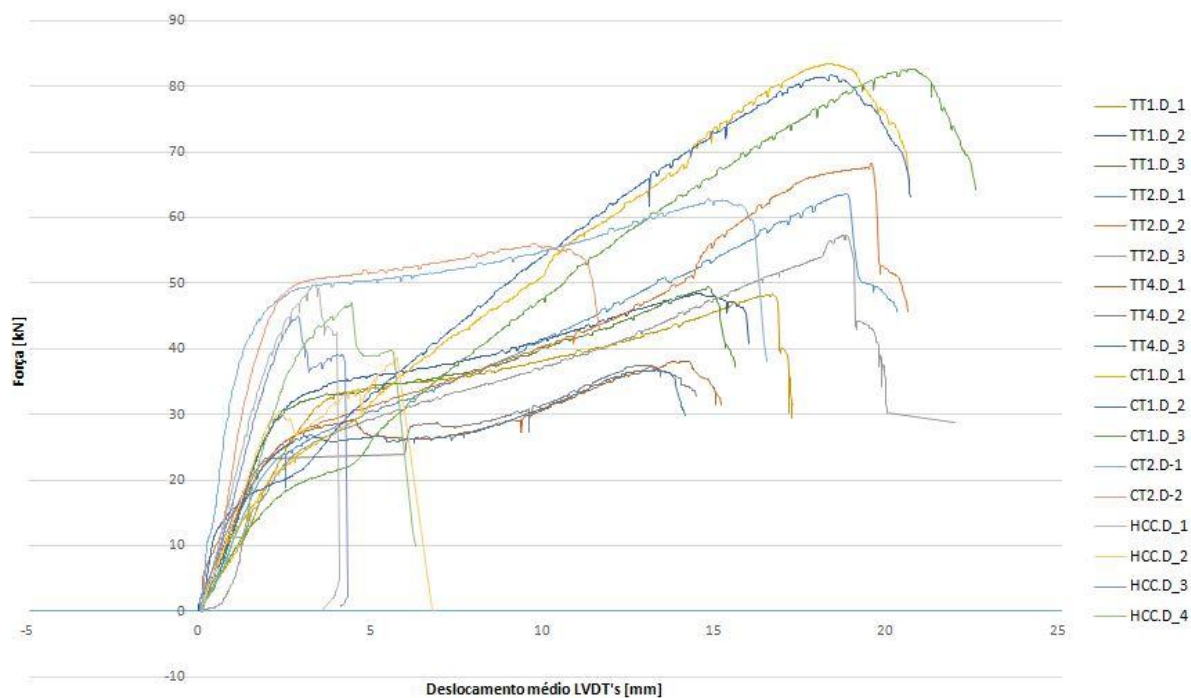


Figura 3.14 - Diagramas Força-Deslocamento dos ensaios de corte-flexão

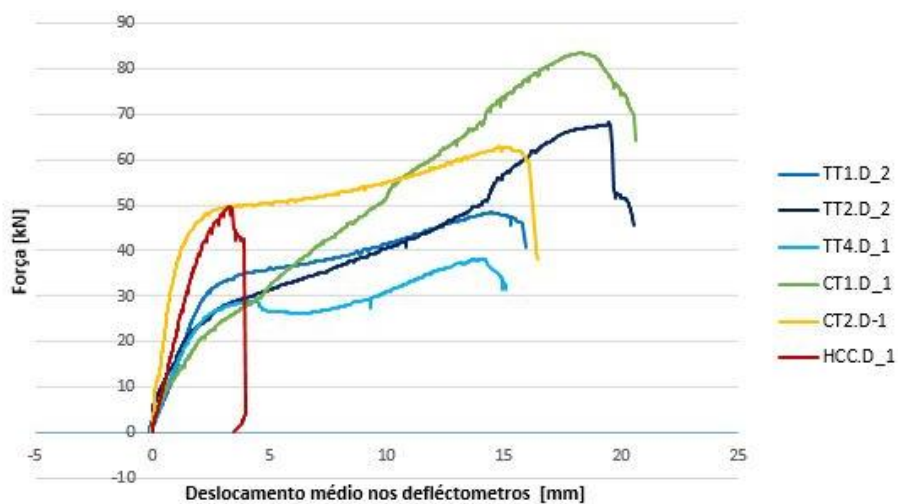


Figura 3.15 - Diagramas Força-Deslocamento dos ensaios de corte-flexão (um de cada série de ensaios)

Dos resultados apresentados nas Figura 3.14 e Figura 3.15, chama claramente a atenção o facto de os provetes HCC apresentarem uma deformação muito inferior a todos os outros no momento em que ocorre a rotura. Os restantes ensaios atingiram valores de deformação três ou quatro vezes superiores, o que se deverá essencialmente ao facto de serem constituídos por

aço que é um material muito mais dúctil que o ferro fundido nodular constituinte dos conectores HILTI HCC-B.

Há também que assinalar que os provetes do tipo HCC e CT2 conseguem suportar uma maior quantidade de carga com pequenas deformações (abaixo de 4mm de deslizamento) do que todos os outros elementos ensaiados. No entanto, os provetes HCC apresentam uma rotura frágil, rompendo pouco depois de atingida a carga máxima e com deformações muito pequenas, enquanto os provetes CT2 apresentam uma rotura dúctil, com um patamar de cedência bastante significativo, chegando a atingir deformações da mesma ordem de grandeza das que se verificaram nos restantes provetes ensaiados. Esta ductilidade, ou capacidade de deformação sem decréscimo da carga resistente, é extremamente importante num caso de aplicação numa estrutura real, uma vez que, na improvável situação de ruína, são visíveis sinais de alerta, não ocorrendo uma rotura repentina.

Sendo assim, de todos os tipos de elementos ensaiados, os provetes do tipo CT2 são os que parecem apresentar um melhor compromisso entre a capacidade resistente e a capacidade de deformação face aos esforços actuantes nos ensaios de corte-flexão.

Na Figura 3.16 apresentam-se os diagramas que relacionam o esforço axial médio verificado ao longo de cada um dos ensaios com o respectivo deslocamento vertical da caixa central. Os diagramas correspondentes aos provetes HCC são apresentados em separado, à direita da imagem, de modo a que se consiga perceber o seu traçado. O esforço axial que se regista em todos os provetes para valores de deslocamento zero corresponde ao esforço axial gerado pelo aperto dos parafusos nas extremidades do provete antes de se dar início aos ensaios.

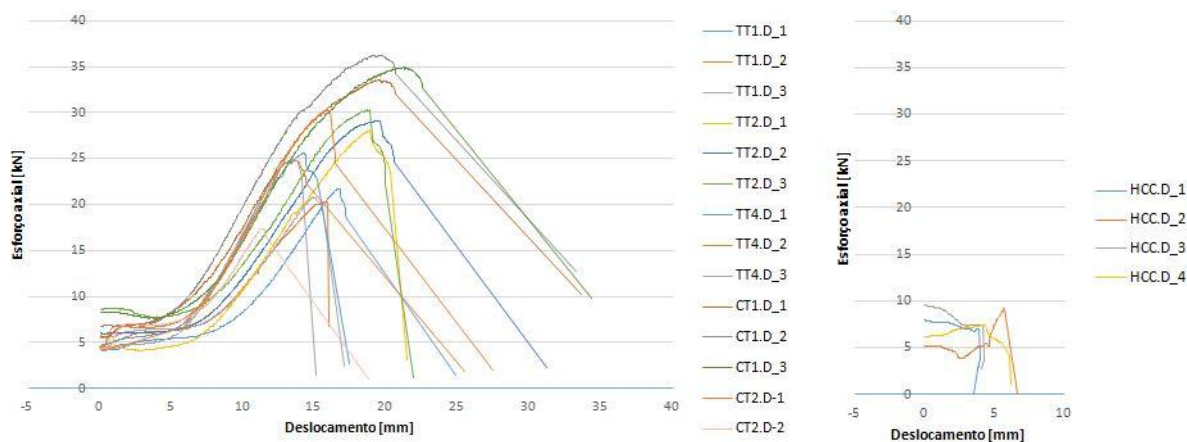


Figura 3.16 - Diagramas Esforço Axial - Deslocamento dos ensaios decorte-flexão

Nos diagramas da Figura 3.16 consegue-se perceber que, com excepção dos provetes HCC, é mobilizado um valor significativo de esforço axial em quase todos os provetes elementos ensaiados.

3.4 Ensaios de arrancamento

3.4.1 Provetes para ensaios de arrancamento na cola

Para os ensaios de arrancamento na cola foram preparados provetes com os elementos embebidos na cola, conforme esquematizado na Figura 3.17. Foi utilizado o químico de injeção HILTI HIT-RE 500, que é um adesivo bi-componente epóxico, desenvolvido para a realização de ancoragens de varões metálicos em elementos de betão. Os provetes foram executados utilizando como confinamento exterior um tubo metálico com diâmetro exterior de 50 mm e foram utilizados tubos de PVC com 40 mm de comprimento como manga para evitar a aderência entre a cola e o conector nesse comprimento.

O comprimento de aderência entre a cola e o conector é assim bem definido e tem o valor de 30 mm. A colocação da manga plástica com comprimento aproximado de $2,5.\phi$ tem como objectivo minimizar o efeito de superfície quando se procede ao arrancamento do conector, conduzindo a uma maior uniformização das tensões na zona de fronteira.



Figura 3.17 - Provetes para os ensaios de arrancamento na cola (esquema e exemplo)

Foram ensaiados três provetes de cada um dos diferentes tipos: 0.AC, CT1.AC, CT2.AC e HCC.AC. Os provetes identificados com o nome 0.AC foram preparados com tubos de aço lisos com 16 mm de diâmetro, de modo a servirem de referência, uma vez que não possuíam qualquer tipo de nervura ou indentamento.

3.4.2 Provetes para ensaios de arrancamento no betão e em betão e cola

Para executar estes ensaios foram preparadas e betonadas duas pequenas lajes com dimensões de 700 x 2000 x 250 [mm³], com uma armadura inferior de # ϕ 16//0,20, nas quais se executaram furos para a aplicação dos conectores a ensaiar. Estas lajes foram betonadas em simultâneo com as lajes referenciadas no ponto 3.7.2 deste trabalho. Julgou-se mais conveniente fazer a caracterização completa do betão nesse ponto e por isso não é aqui apresentada.

Nessas lajes foram executados furos com diferentes diâmetros e profundidades, conforme o conector a ensaiar, que se detalham mais à frente. De seguida, os furos eram limpos utilizando o seguinte procedimento: passagem com escovilhões de aço, utilização de jacto de ar comprimido para remoção do pó, limpeza de novo com o escovilhão de aço mas utilizando também água, sopragem final com jacto de ar comprimido para remoção da água do furo.

Estes ensaios acabaram por ser feitos apenas com a utilização de elementos do tipo CT2 e HCC. Quando foi desenvolvido o programa experimental contava-se poder ensaiar provetes preparados pelo método de estampagem, em que seriam feitas figuras com diversas configurações nas suas faces, que depois funcionariam como pequenas âncoras no betão (exemplo de figuras de forma rectangular na Figura 3.18), no entanto, esses elementos não chegaram a ser fornecidos. Assim, estes ensaios parecem um pouco desprovidos de sentido, no entanto será mesmo assim feita a apresentação do trabalho realizado.



Figura 3.18 - Planificado de elementos que não chegaram a ser fornecidos para ensaiar

Uma vez que os elementos do tipo CT2 não apresentam qualquer tipo de contacto directo entre o conector e o betão, com estes elementos foram feitos apenas ensaios de arrancamento em cola e betão. Foram executados furos com 20 mm de diâmetro e 90 mm de comprimento, nos quais foram colocados os elementos do tipo CT2 e depois foi introduzida a cola pelo seu interior, até que transbordasse na boca do furo (Figura 3.19). Foram executados seis ensaios deste tipo.



Figura 3.19 - Aplicação dos elementos do tipo CT2 para ensaio de arrancamento em cola e betão

Com os conectores HILTI HCC-B foram feitos ensaios de arrancamento tanto no betão, identificados como AB, como em cola e betão, identificados como ACB. Conforme definido no manual de aplicação do produto, os furos realizados para a aplicação destes elementos tinham diâmetro de 16 mm. Foram executados furos com diversas profundidades, conforme apresentado na Figura 3.20, de modo a tentar perceber qual a relação entre o comprimento de embebedimento e a resistência ao arrancamento.

Com excepção dos casos em que foi utilizado comprimento de embebedimento de 90 mm, nos quais seria impossível fazer a amarração para o arrancamento, nos ensaios de arrancamento em cola e betão fez-se um alargamento da boca dos furos com uma broca de 32 mm, numa profundidade de 40 mm, de modo a dissipar a possibilidade de criação de tensões superficiais, que pudessem levar a descascamento do betão (ver Figura 3.21).

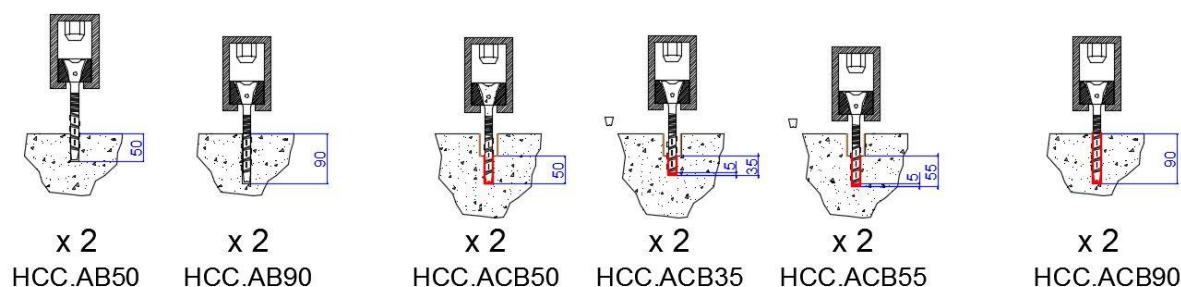


Figura 3.20 - Esquema de ensaios de arrancamento a realizar com os elementos HCC

Depois de executados e limpos os furos, conforme referido acima, foram aplicados os conectores. Para a introdução destes elementos nos furos foi necessário utilizar percussão, uma vez que as suas nervuras longitudinais perfazem um diâmetro superior aos 16mm do furo. De seguida, nos elementos que seriam ensaiados ao arrancamento em cola e betão, foi injectada cola pelo seu interior até chegar à altura pretendida.



Figura 3.21 - Aplicação dos elementos do tipo HCC para ensaios de arrancamento em cola e betão e pormenor do alargamento da boca do furo

Com estes ensaios procurou-se obter informações acerca da resistência por unidade de comprimento que a configuração deste conetores confere ao arrancamento. Para os provetes HCC.ACB50, tomou-se o valor de $h_{ef} = 50\text{mm}$ de modo a permitir uma comparação direta com os valores obtidos para os ensaios sem cola, de modo a determinar a contribuição da cola para a resistência total.

Com os ensaios HCC.ACB35 e HCC.ACB55 procura-se estimar qual a força de resistência da cola por unidade de comprimento do conetor embebido no betão. Para eliminar o efeito de ponta destes conetores e obter uma secção uniforme de contacto cola/betão, nestes provetes foi efetuado um corte na ponta do conetor. Isso obrigou a deixar um pequeno espaço de 5mm no fundo do furo, de modo a permitir a passagem da cola, quando injetada pelo interior do conetor.

3.4.3 Materiais e Equipamento

A força de arrancamento dos conetores foi exercida por actuação manual de um macaco hidráulico Enerpac RCH com capacidade para 12 tf. Para utilizar a força do macaco hidráulico como força de arrancamento dos conetores idealizou-se o sistema que se apresenta na Figura 3.22, em que foi utilizada uma estrutura metálica, que permitia uma superfície elevada para aplicação da força do macaco, um varão *Dywidag* $\phi 16$ e respectivas porcas e uma “moldura” metálica utilizada para puxar o sistema de amarração dos conetores.

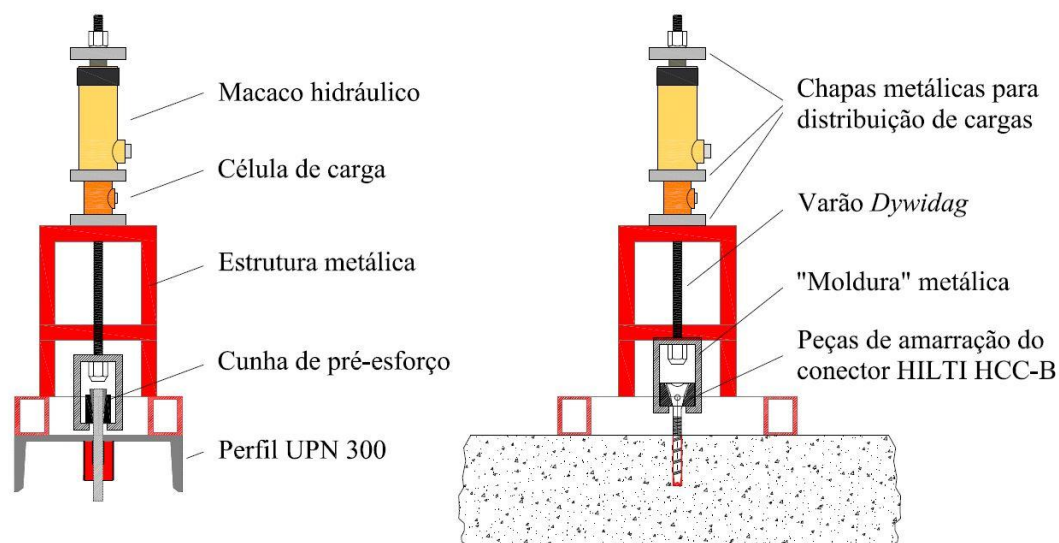


Figura 3.22 - Esquema dos ensaios de arrancamento: a) na cola, b) no betão

Na amarração dos conectores HILTI HCC-B utilizaram-se umas peças metálicas preparadas para encaixar a cabeça do conector, enquanto na amarração dos restantes conectores foi utilizada uma cunha de pré-esforço. Como superfície de reacção nos ensaios de arrancamento na cola foi utilizado um perfil metálico UPN 300.

Para medir a força de arrancamento durante o ensaio foi utilizada uma célula de carga TML CLC 20A e para medir deslocamentos foram utilizados transdutores de deslocamentos TML CDP 25 e TML CDP 50. Para o registo destes valores durante o ensaio foi utilizado um *datalogger* TML TDS 530.

3.4.4 Procedimento de ensaios de arrancamento na cola

Para a execução dos ensaios de arrancamento na cola foi montado um *setup* que, para além dos elementos representados na Figura 3.22a), incluía a colocação de um transdutor de deslocamentos sob o provete, para medir o deslocamento vertical da extremidade inferior, e de um transdutor de deslocamentos sobre a chapa da alma do perfil UPN 300 o mais próximo possível do conector, para medir possíveis deslocamentos verticais por deformação da chapa da alma quando exercida a força de arrancamento (Figura 3.23). O “deslizamento” do conector na cola é obtido pelo cálculo da diferença entre estes dois valores.



Figura 3.23 - Setup de ensaio de arrancamento na cola e pormenor da colocação dos transdutores de deslocamentos

O procedimento destes ensaios é muito simples e consiste em actuar manualmente o macaco hidráulico, tentando fazê-lo com uma cadência lenta e o mais constante possível, até se obter rotura ou mesmo até separar completamente o provete da cola, caso isso seja pretendido. Ao longo do ensaio registam-se os valores da força exercida e dos deslocamentos que se verificam em cada instante.

3.4.5 Resultados dos ensaios de arrancamento na cola

Começou por se ensaiar os provetes com tubos lisos (0.AC) para determinar um valor de referência para a aderência da cola, uma vez que neste caso não existe qualquer nervura ou entalhe. No primeiro ensaio realizado ocorreu um problema com a configuração dos parâmetros do *datalogger* e não foi possível obter resultados desse ensaio. Nos outros dois ensaios obtiveram-se resultados bastante próximos, tendo ambos atingido cargas máximas um pouco inferiores a 9 kN. Após a rotura, que no caso dos tubos lisos se dá quando é vencida a força de aderência entre o conector e a cola, verificou-se que era ainda necessária uma força constante de aproximadamente 4 kN para continuar a fazer os conectores “deslizarem” na cola. Esta força corresponderá à força de atrito entre o tubo liso e a cola.

De seguida foram ensaiados os conectores obtidos pelo processo de prensagem (CT2.AC) que possuem uns entalhes ao longo do seu desenvolvimento. Nos provetes que foram preparados

para estes ensaios existiam seis destes entalhes (três de cada lado) em contacto com a cola. Na Figura 3.24 apresentam-se os diagramas força-deslizamento obtidos para estes ensaios. O diagrama correspondente ao primeiro termina após a rotura, porque o ensaio foi dado como concluído nessa altura. Nos outros dois provetes testados, apenas se deu como terminado o ensaio após a separação total entre o conector e a cola.



Figura 3.24 - Diagramas Força-Deslizamento dos ensaios de arrancamento na cola dos provetes CT2.AC

O comportamento dos três provetes CT2.AC durante os respectivos ensaios foi muito semelhante e a carga máxima atingida por cada um deles foi de aproximadamente 18kN, que é aproximadamente o dobro da carga atingida nos ensaios com provetes de tubo liso. Sendo assim, pode-se concluir que a existência deste tipo de entalhes, obtidos pelo processo de prensagem, permite aumentar a aderência entre o conector e a cola para cerca do dobro do que se verifica sem os entalhes.

O comportamento cíclico que se observa nos diagramas da Figura 3.24 está relacionado com a existência dos entalhes e com a progressão do deslizamento do conector na cola. Quando se dá a rotura, parte da cola fica presa nos entalhes existentes, o que provavelmente provoca um aumento da carga resistente, quando “passa” na zona de onde foi arrancada a parte de cola anterior, uma vez que esta superfície está mais rugosa do que a superfície que estava em contacto com a parede lisa do tubo no início do ensaio.



Figura 3.25 - Resultado de ensaio de arrancamento na cola de um provete CT2 e pormenor da cola presa nos entalhes

Os ensaios dos provetes preparados com conectores obtidos pelo processo de torneamento (CT1.AC) não correram da forma desejada, uma vez que não foi possível proceder ao arrancamento dos conectores da cola, porque se verificou a rotura do aço do conector por esforço de tracção (Figura 3.26). Apesar de se terem preparado três provetes deste tipo, foram apenas realizados dois ensaios, porque se concluiu que a rotura ocorreria sempre desta forma e que não se conseguiriam retirar mais informações da repetição de ensaios. O segundo ensaio foi dado como terminado ainda antes de ocorrer rotura, quando já era claramente visível estricção do aço na zona mais frágil, de modo a evitar a possibilidade de dano dos aparelhos de medição montados para a monitorização do mesmo. Os valores de carga máxima registada nestes ensaios foram bastante próximos dos valores de carga de rotura obtidos nos ensaios de tracção.



Figura 3.26 - Resultado do ensaio de arrancamento na cola do provete CT1.AC_1

Por último foram ensaiados os provetes preparados com os conectores comerciais da HILTI (HCC.AC). Nestes ensaios foram obtidos valores de carga máxima na ordem dos 45kN e a rotura dos provetes ocorreu por abertura de fissuras na cola com origem em locais em contacto com as nervuras longitudinais existentes no conector. Como se pode verificar na Figura 3.27, entre as nervuras transversais do conector são arrancados bocados de cola, tal como aconteceu nos entalhes dos conectores prensados.



Figura 3.27 - Exemplo de rotura de um provete HCC.AC

No Quadro 3.3 resumem-se os valores das cargas máximas atingidas em cada um dos ensaios de arrancamento na cola atrás referidos, bem como a identificação do tipo de rotura verificado.

Quadro 3.3 - Valores dos ensaios de arrancamento na cola

Provete			Carga máxima [kN]	“Tipo de rotura”
Identificação	Descrição	Ensaio		
0.AC	Tubo liso	ens 2	8,89	Escorregamento na cola
		ens 3	8,57	Escorregamento na cola
CT2.AC	Prensado	ens 1	17,78	Abertura de fissura na cola
		ens 2	18,17	Escorregamento na cola
		ens 3	17,45	Escorregamento na cola
CT1.AC	Torneado	ens 1	61,45	Rotura pelo aço do conector
		ens 2	56,48	Rotura pelo aço do conector*
HCC.AC	Hilti HCC-B	ens 1	48,11	Abertura de fissuras na cola
		ens 2	44,12	Abertura de fissuras na cola
		ens 3	43,60	Abertura de fissuras na cola

* Não chegou a ocorrer rotura, porque o ensaio foi parado quando se notou estricção no aço

Com estes ensaios pretendia-se fazer uma caracterização da aderência entre o conector e a cola para os diferentes tipos em análise, quantificando a tensão de aderência em cada um dos casos. No entanto, face aos resultados obtidos, não é possível fazer essa quantificação, mas, apesar de tudo é possível retirar algumas conclusões:

- a criação de entalhes por prensagem, do tipo dos que foram efectuados nos provetes CT2, permitem aumentar a capacidade resistente ao arrancamento para cerca do dobro da que se obtém sem qualquer tipo de entalhe;
- a configuração das paredes exteriores dos provetes do tipo CT1, obtida por torneamento, confere uma oposição tão forte ao deslizamento na cola e mobiliza uma quantidade tão grande de cola na resistência ao corte da própria cola que a rotura acaba por se dar pelo aço do próprio conector. Note-se que o aço do conector atinge a sua tensão de cedência num ensaio em que o conector está apenas 3cm embebido na cola;
- nos provetes HCC parece que a existência de nervuras no sentido longitudinal é que provoca a rotura, uma vez que ao puxar o conector estas criam tensões muito fortes na cola, obrigando a que se dê um *splitting* da mesma.

3.4.6 Procedimento de ensaios de arrancamento no betão e em betão e cola

O procedimento para o ensaio de arrancamento no betão é em tudo semelhante ao procedimento do ensaio de arrancamento na cola, sendo a única diferença a colocação dos

transdutores de deslocamentos. Nestes ensaios foi apenas utilizado um transdutor de deslocamentos TML CDP 50, que era fixo à moldura metálica através de uma anilha soldada nessa mesma moldura (Figura 3.28).



Figura 3.28 - Setup de ensaio de arrancamento no betão e pormenor da fixação do transdutor de deslocamentos

Assim, o valor da força exercida em cada momento era medido pela célula de carga e o correspondente deslocamento vertical do conector era medido pelo transdutor de deslocamentos, valores estes que eram registados pelo *datalogger*.

3.4.7 Resultados dos ensaios de arrancamento no betão e em betão e cola

Nos ensaios de arrancamento em betão dos conectores HCC, tanto no caso dos conectores com 50 mm de embebimento como no caso dos conectores com 90 mm de embebimento, num dos ensaios quase não se registou resistência ao arrancamento (cerca de 0,1 kN). Nos outros ensaios registaram-se forças máximas de 1,27 kN e de 2,06 kN, par os embebimentos de 50 mm e 90 mm, respectivamente.

Desta forma, pode-se concluir que, apesar de a amostra ser muito reduzida, a resistência ao arrancamento devida à cravação destes conectores no betão não tem muito significado para a resistência final (máximo de 2 kN no caso da cravação com 90 mm) e que para além disso não será muito seguro que se verifique essa contribuição em todas as situações, uma vez que parece depender muito da forma como são cravados os conectores, sendo por isso muito variável.

No Quadro 3.4 são apresentados os valores das cargas máximas registadas nos ensaios de arrancamento em cola e betão realizados, bem como o modo de rotura verificado em cada um desses ensaios.

Quadro 3.4 - Cargas máximas atingidas nos ensaios de arrancamento em cola e betão

Identificação do ensaio		Carga máxima [kN]	Modo de rotura
CT2.ACB90	1	42,29	“pull-out”
	2	35,43	“pull-out”
	3	44,00	“pull-out”
	4	40,18	“pull-out”
	5	42,34	“pull-out”
	6	36,06	“pull-out”
HCC.ACB50	1	32,62	“pull-out”
	2	43,66	“pull-out”
HCC.ACB35	1	44,64	“pull-out”
	2	34,77	“pull-out”
HCC.ACB55	1	41,38	Aço *
	2	45,36	“pull-out”
HCC.ACB90	1	56,48	Aço
	2	63,34	Aço

Tal como esperado, nos ensaios dos provetes HCC.ACB90 a rotura deu-se pelo aço do conector. Nos restantes ensaios foi possível arrancar os provetes da laje de betão (Figura 3.29), com excepção do primeiro ensaio HCC.ACB55, em que *a posteriori* se verificou que existia um defeito de fabrico, uma vez que havia um “chocho” no aço do conector.



Figura 3.29 - Resultado dos ensaios de arrancamento em cola e betão

3.5 Ensaios de arrancamento do lado da cabeça

3.5.1 Provetes

A execução dos ensaios de arrancamento do lado da cabeça implicou a preparação de uma laje de betão em que os conectores a ensaiar estivessem embebidos por essa extremidade. A laje foi betonada sobre uma placa de poliestireno extrudido, na qual foram cravados os conectores, de modo a que o comprimento de embebimento no betão fosse o pretendido. No final da cura do betão virou-se a laje ao contrário, de modo a executar os ensaios. Na Figura 3.30 estão ilustrados alguns passos da preparação dessa laje e é apresentado o seu aspecto final antes da realização destes.



Figura 3.30 - Preparação da laje para a realização dos ensaios de arrancamento do lado da cabeça

O comprimento de embebimento no betão considerado para cada um dos elementos a ensaiar foi de 80 mm e foram realizados dois ensaios para cada um dos seguintes tipos de elementos (apresentados na Figura 3.31, com excepção do conector HCC-B):

- Provette obtido a partir do tubo metálico utilizado para a produção dos conectores do tipo prensado (CT2), sobre os quais era feito, com deformação a

- frio, utilizando o processo de repuxagem, um alargamento cónico de uma das extremidades até um diâmetro de 28 mm [Pre $\phi 28$];
- Provete idêntico ao anterior, mas com um diâmetro de 24 mm [Pre $\phi 24$];
 - Provete obtido a partir de um segmento do tipo TT4 (chapa ‘enrolada’) ao qual era soldado um disco metálico com 2 mm de espessura, um diâmetro exterior de 40 mm e um furo central com diâmetro de 10 mm [Est $\phi 40$];
 - Provete idêntico ao anterior mas com um disco de 32 mm [Est $\phi 32$];
 - Provete idêntico aos anteriores mas com um disco de 24 mm [Est $\phi 24$];
 - Conector HILTI HCC-B, sem qualquer alteração à sua apresentação comercial.



Figura 3.31 - Provetes para a execução dos ensaios de arrancamento do lado da cabeça

A posição dos diferentes elementos na laje é a que se apresenta na Figura 3.32.

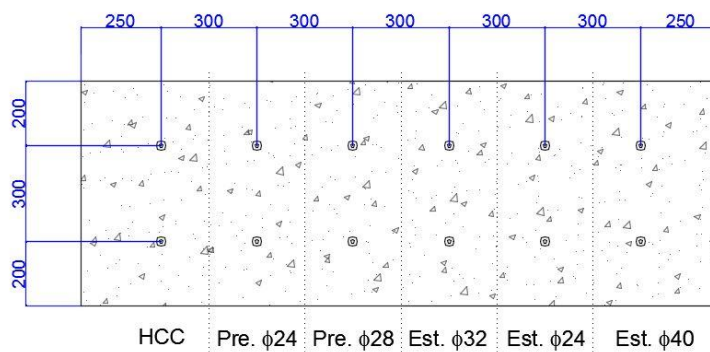


Figura 3.32 - Esquema de colocação dos provetes para ensaios de arrancamento do lado da cabeça

3.5.2 Materiais e Equipamento

Aquando da betonagem da laje apresentada no ponto anterior, foram recolhidos dois cubos de betão (150x150x150 [mm²]) para a execução de ensaios de resistência à compressão no dia de realização dos ensaios de arrancamento. Os valores de resistência à compressão do betão obtidos nesses dois ensaios foram 27,28 MPa e 28,74 MPa. Podemos assim considerar que o

betão utilizado na betonagem desta laje apresentava um valor de resistência à compressão de aproximadamente 28 MPa no dia de realização do ensaio.

Todo o equipamento de carregamento, monitorização e aquisição de dados utilizado foi o mesmo que já foi apresentado para os restantes ensaios de arrancamento.

3.5.3 Procedimento de ensaio

O procedimento destes ensaios foi o adoptado nos ensaios de arrancamento em betão (secção 3.4.6), com a diferença de se ter utilizado uma cunha de pré-esforço para a amarração dos conectores HILTI HCC-B, uma vez que neste caso se pretendia agarrar a extremidade do conector oposta à da cabeça.

3.5.4 Resultados

Em quase todos os ensaios realizados (a única excepção foi o primeiro ensaio com os conectores Est_φ24) o modo de rotura foi pelo aço do conector. No Quadro 3.5 são apresentados os valores máximos de carga obtidos em cada um dos ensaios realizados. Como seria de esperar, face ao facto de termos obtido a rotura pelo aço do conector, estes valores são muito próximos dos valores máximos obtidos nos ensaios de tracção para elementos do mesmo tipo.

Quadro 3.5 - Valores máximos de carga dos ensaios de arrancamento do lado da cabeça

Identificação do ensaio	Carga máxima [kN]	Identificação do ensaio	Carga máxima [kN]
Est φ24.1	43,81	Pre φ24.1	68,01
Est φ24.2	46,06	Pre φ24.2	67,82
Est φ32.1	46,84	Pre φ28.1	67,03
Est φ32.2	46,65	Pre φ28.2	67,82
Est φ40.1	46,16	HCC.1	59,38
Est φ40.2	46,26	HCC.2	58,21

No ensaio Est_φ24.1, o modo de rotura foi por quebra da soldadura entre o disco da cabeça e o corpo do conector (Figura 3.33) para uma carga de aproximadamente 40 kN. No entanto, depois de ter ocorrido esta rotura, prosseguiu-se a actuação do macaco hidráulico para retirar o conector do furo e a carga resistente voltou a aumentar, tendo inclusivamente passado para valores superiores ao registado na altura da rotura da soldadura. Isto poderá ser explicado pelo facto de o conector ter pedaços de solda ainda agarrados que tinham que “rasgar o betão” ou

ser esmagados para que o conector pudesse subir no furo. Note-se que no caso do ensaio Est_φ24.2 ocorreu a mesma situação, mas a resistência dada pelos elementos de solda ainda agarrados ao conector foi superior, tendo sido suficiente para atingir a tensão de cedência no aço do conector e por isso não se chegou a conseguir tirar o conector do furo.



Figura 3.33 - Resultado do ensaio de arrancamento do lado da cabeça do provete Est φ24.1

Em todos os outros ensaios realizados houve sempre um aumento progressivo da carga aplicada ao longo do ensaio até que o aço constituinte dos conectores entrou em cedência e se deu a rotura dessa forma. Na Figura 3.34 estão apresentadas imagens do resultado de todos os ensaios.



Figura 3.34 - Resultado dos ensaios de arrancamento do lado da cabeça

Face a estes resultados, apenas se pode tirar a conclusão que, com a excepção do disco de 24 mm soldado, todas as hipóteses de configuração de cabeça consideradas parecem ser

suficientes para garantir uma boa ancoragem no betão, utilizando comprimentos de embhecimento de 80 mm. Note-se que o betão utilizado nesta laje não tinha qualquer tipo de característica especial e que à data do ensaio possuía uma resistência à compressão de aproximadamente 28 MPa, o que pode ser considerada uma resistência relativamente baixa para um betão utilizado numa camada de reforço. Sendo assim, pode-se considerar que as diferentes configurações de cabeça analisadas, com excepção do disco de 24 mm soldado, serão suficientes para garantir uma ancoragem suficiente nas situações habituais de uso deste tipo de conectores.

3.6 Escolha da configuração do HiPerConnector

A definição da configuração final do conector, designado ‘HiPerConnector’, devido ao nome do projecto de investigação no âmbito do qual foram realizados os trabalhos aqui apresentados, teve por base uma série de critérios. Considerou-se essencialmente o desempenho dos elementos nos diferentes ensaios realizados, a facilidade de produção dos mesmos por parte da empresa parceira e ainda a estimativa de custo de produção associada a cada uma das soluções.

Considerou-se que a hipótese de fazer um conector pelo processo de fabrico denominado de estampagem não era muito viável, devido à necessidade de o conector ter uma cabeça de ancoragem do lado do betão novo. Para fazer elementos “tubulares” simples, este seria um processo extremamente rápido e económico, uma vez que permite uma elevada cadência de produção, no entanto, a necessidade de existir uma cabeça de ancoragem, obrigaria a processos complementares de fabrico que aumentariam em muito o custo unitário de produção. Uma solução possível para a cabeça seria a soldadura de discos metálicos a estes elementos, mas, com os resultados que se apresentaram no ponto 3.5 não se julgou conveniente a utilização dessa solução. Para além disso, em quase todos os ensaios realizados, os elementos do tipo TT4 apresentaram capacidades resistentes abaixo dos outros elementos.

No que diz respeito à opção entre um processo produtivo de prensagem (elementos do tipo CT2) ou um processo de torneamento (elementos do tipo CT1) os dados experimentais apontam para uma maior capacidade resistente dos elementos obtidos por torneamento, especialmente nos ensaios de arrancamento na cola. Nos restantes ensaios, principalmente no ensaio para caracterização do efeito de ferrolho, não é possível afirmar que exista um desempenho muito melhor de um tipo de elemento face ao outro. O processo de criação de uma cabeça de ancoragem num ou noutro tipo de elementos seria o mesmo, uma vez que são ambos obtidos a partir de elementos tubulares e a forma de executar a cabeça num ou noutro

seria idêntica. Sendo assim, optou-se pelo processo de fabrico por prensagem, que é muito mais económico do que o processo de torneamento, uma vez que não implica o desperdício de matéria-prima que se verifica com a retirada da aparas no torneamento.

Apesar de os resultados experimentais dos ensaios de arrancamento do lado da cabeça terem demonstrado que o alargamento com a forma cónica de uma das extremidades dos elementos tubulares até um diâmetro de 24 mm é suficiente para garantir a ancoragem no betão novo, assumiu-se como prudente, atendendo a que não tinha grande implicação no custo de produção, considerar a execução de uma cabeça com diâmetro de 28mm.

Assim sendo, os conectores HiPerConnector que foram ensaiados nos ensaios de corte em laje, têm o aspecto que se ilustra na Figura 3.35 e as características e configurações apresentadas na Figura 3.36.



Figura 3.35 - HiPerConnector

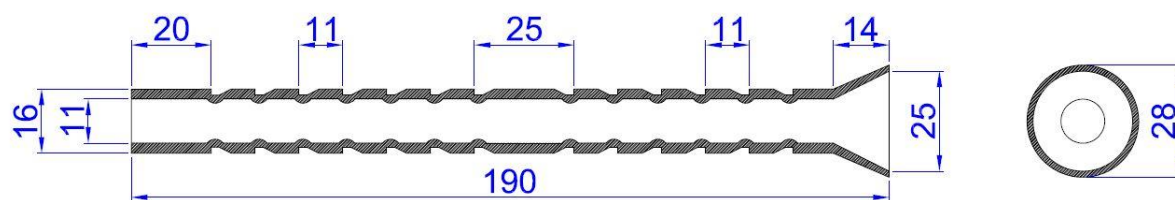


Figura 3.36 - Esquema e dimensões do HiPerConnector

3.7 Ensaios de corte em laje

Com a realização dos ensaios de corte em laje, pretende-se simular a situação real de uma interface betão/betão sujeita a esforço de corte longitudinal e por isso estes são os ensaios com

maior relevância no programa experimental realizado. Pretendeu-se também analisar qual a relevância que o tipo de tratamento que se dá à superfície do betão do substrato, antes da operação de reforço estrutural, tem na capacidade resistente da interface ao corte longitudinal.

3.7.1 Provetes

Os ensaios de corte em laje foram executados sobre provetes que consistiam em blocos de betão armado, com $300 \times 600 \times 200$ [mm³], betonados sobre lajes de betão cuja superfície da interface havia recebido tratamento de diferentes tipos, de modo a analisar diversas configurações da interface. Em cada um desses blocos aplicaram-se dois conectores metálicos, tendo sido preparados dois modelos com conectores HiPerConnector e dois provetes com conectores HILTI HCC-B para cada uma das diferentes características de interface.

Foram analisados quatro tipos diferentes de interface entre as duas superfícies de betão: superfície lisa, superfície ondulada, superfície preparada com martelo pneumático e superfície preparada por hidrodecapagem. Para cada um destes tipos de superfície foi betonada uma laje com $700 \times 2000 \times 250$ [mm³]. As lajes com superfície lisa e com superfície ondulada foram betonadas sobre um plástico e sobre uma chapa metálica ondulada, respectivamente. Depois de curado o betão, foram viradas ao contrário. Os tratamentos de superfície das outras duas lajes foram efectuados após o período de cura do betão por uma empresa especializada, a Limpa Canal – Limpezas Ecológicas, Lda. A hidrodecapagem (Figura 3.37) foi executada utilizando uma pressão de 2000bar e o martelo pneumático foi utilizado com uma ponteira do tipo “talhadeira” (Figura 3.38).



Figura 3.37 - Hidrodecapagem. Aspecto geral, pormenor e comparação de superfície tratada e não tratada



Figura 3.38 – Tratamento de superfície com martelo pneumático

Após a preparação das superfícies de interface foram aplicados os respectivos conectores, montadas cofragens para os blocos de betão, colocadas as armaduras e efectuada a betonagem de todos os elementos (Figura 3.39). Na aplicação de ambos os tipos de conector foi utilizado o químico de injeção bi-componente HILTI HIT-RE 500. Os HiPerConnector foram aplicados com um embebimento de 110 mm na laje de betão de base, o que corresponde a um embebimento de 80 mm no betão constituinte dos blocos, e os conectores HILTI HCC-B foram aplicados com um embebimento de 100 mm na laje de base, o que corresponde a 80 mm no novo betão.



Figura 3.39 - Aplicação dos conectores, preparação e betonagem dos blocos de betão

Após a descofragem dos blocos teve que se aguardar o tempo de cura do betão para que este atingisse a resistência pretendida antes da execução dos ensaios. Na Figura 3.40 estão apresentadas duas dessas lajes, com os respectivos blocos de betão, antes da execução dos

ensaios. Em cada uma das lajes, os dois blocos da esquerda foram preparados com conectores HILTI HCC-B e os dois blocos da direita com conectores HiPerConnector.



Figura 3.40 - Provetes para execução dos ensaios de corte em laje (laje com tratamento por hidrodecapagem e laje com superfície ondulada)

3.7.2 Materiais e Equipamento

Na preparação destes ensaios executaram-se duas betonagens. Na betonagem 1 foram carregadas todas as lajes de base, incluindo as lajes utilizadas nos ensaios de arrancamento referidas no ponto 3.4, e na betonagem 2 foram carregados todos os blocos superiores dos ensaios de corte em laje. Em ambas as betonagens se recolheram cubos com 150 x 150 x 150 [mm³] para a realização de ensaios de resistência à compressão do betão, de modo a obter a curva de endurecimento de cada um dos betões utilizados. Nos Quadro 3.6 e Quadro 3.7 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados e nas Figura 3.41 e Figura 3.42 estão desenhadas as curvas de endurecimento dos betões referentes a cada uma das betonagens.

Quadro 3.6 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos cubos recolhidos na betonagem 1

Betão utilizado na betonagem das lajes inferiores		
Proвете	Idade [dias]	Tensão de rotura [MPa]
P1.1	2	11,7852
P2.1		12,3904
P3.1	7	20,4112
P4.1		20,5000
P5.1	14	24,5613
P6.1		21,4022
P7.1	21	29,4097
P8.1		27,7071
P9.1	28	29,4562
P10.1		28,4054

Quadro 3.7 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos cubos recolhidos na betonagem 2

Betão utilizado na betonagem dos blocos superiores		
Proвете	Idade [dias]	Tensão de rotura [MPa]
P1.2	3	19,3005
P2.2		18,3894
P3.2	7	23,5903
P4.2		23,8895
P5.2	14	27,2814
P6.2		28,7379
P7.2	21	29,8752
P8.2		29,8420
P9.2	28	30,8529
P10.2		31,1588

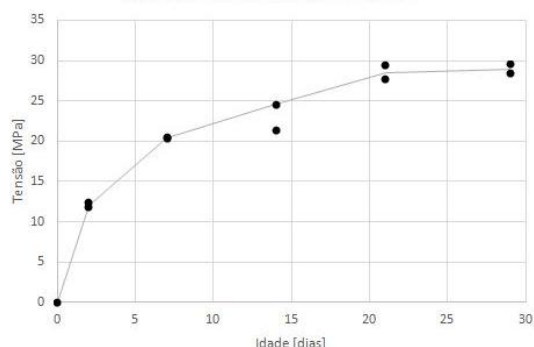


Figura 3.41 - Curva de endurecimento do betão utilizado na betonagem 1

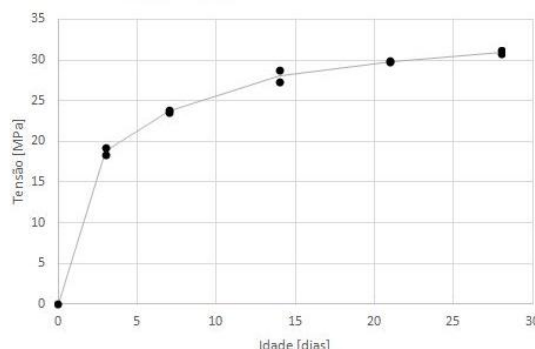


Figura 3.42 - Curva de endurecimento do betão utilizado na betonagem 2

Os ensaios de corte em laje foram realizados 41/42 dias depois de executada a betonagem 1 e 15/16 dias depois de executada a betonagem 2. Sendo assim, tendo em conta os resultados apresentados acima, pode-se considerar que ambos os betões possuíam uma resistência à compressão próxima dos 29 MPa no momento de realização dos ensaios.

A aplicação de força na realização dos ensaios foi conseguida utilizando um macaco hidráulico Enerpac RCS502, com capacidade de 45 tf. Para se utilizar a força exercida pelo macaco hidráulico como força de corte, tal como pretendido, preparou-se uma estrutura metálica de reacção, constituída por troços de perfis UAP 330 e HEB 300 e por algumas chapas de reforço, contra a qual fosse possível encostar o macaco de modo a carregar os provetes. Essa estrutura era movimentada em função do provete a ensaiar e era fixa à laje através da utilização de dois varões *Dywidag* com diâmetro de 32 mm e respectivas porcas e anilhas, conforme se pode ver no esquema da Figura 3.43 e na Figura 3.44. Durante os ensaios estes varões ficavam traccionados, impedindo que se desse o afastamento entre a laje e a estrutura metálica de reacção, o que obrigava ao carregamento dos provetes conforme pretendido.

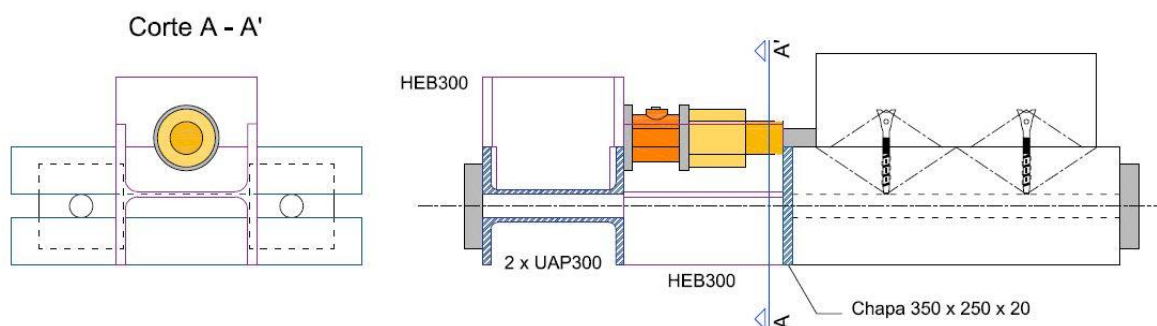


Figura 3.43 - Esquema dos ensaios de corte em laje

O *setup* de cada um dos ensaios realizados (Figura 3.44) foi preparado, seguindo os seguintes passos:

- colocação da estrutura metálica de reacção, tendo o cuidado de a centrar com o provete;
- colocação dos dois varões *Dywidag* $\phi 32$ mm, aplicação das anilhas e aperto das respectivas porcas;
- medição da altura a colocar o macaco hidráulico, de modo a que o seu embolo ficasse centrado com o eixo da peça que encosta no betão;
- colocação da célula de carga (TML CLA 50) e do macaco hidráulico, tendo-se o cuidado de que estes ficassem alinhados com o centro do bloco de betão a ensaiar;
- montagem dos três transdutores de deslocamentos (TML CDP 50). Um dos transdutores de deslocamentos mede o deslocamento vertical do bloco de betão próximo da face onde está a ser empurrado, enquanto os outros dois medem o deslocamento horizontal, sendo colocados um de cada lado do bloco;

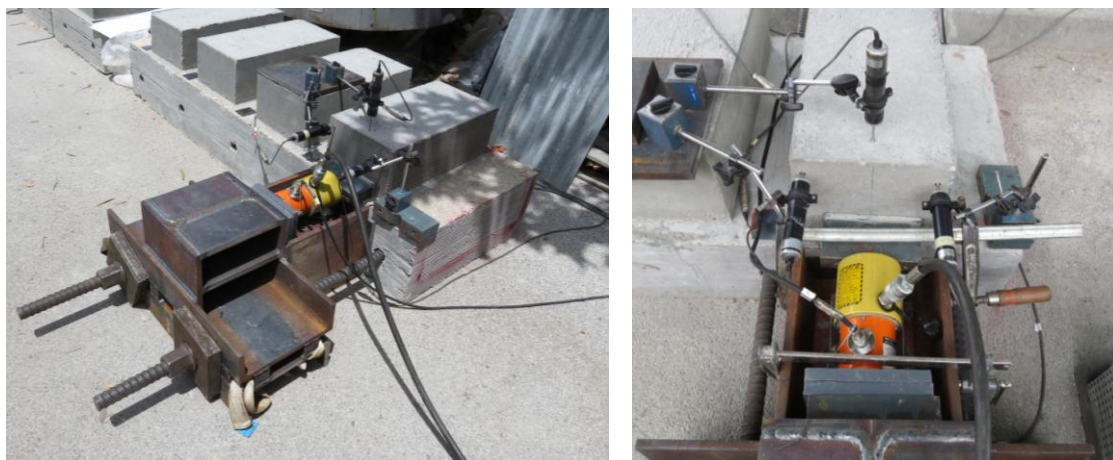


Figura 3.44 - *Setup* para ensaios de corte em laje (plano geral e pormenor dos instrumentos de monitorização)

O registo dos dados recolhidos durante os ensaios foi feito utilizando um *datalogger* TML TDS 530, usado em todos os restantes ensaios realizados ao longo deste trabalho.

3.7.3 Procedimento de ensaio

Com todos os elementos referidos no ponto anterior devidamente montados, dava-se início ao ensaio que consistia no aumento progressivo da carga aplicada até ocorrer rotura. O controlo

do carregamento foi feito de uma forma manual, utilizando o actuador eléctrico do macaco hidráulico, tentando-se que o aumento da carga decorresse da forma mais constante e uniforme possível.

Em cada uma das lajes, que corresponde a um determinado tipo de tratamento da superfície, foram executados quatro ensaios, dois com cada um dos tipos de conector. Os ensaios realizados com os blocos mais próximos das extremidades da laje foram identificados com o número 1 (HiPerConnector.1 e HCC.1), enquanto os ensaios realizados sobre os blocos centrais foram identificados com o número 2 (HiPerConnector.2 e HCC.2)

3.7.4 Resultados

Na Figura 3.45 são apresentados os valores máximos de carga registados nos diferentes ensaios realizados. É notório nesse gráfico que o tipo de tratamento da superfície da interface tem uma grande importância na capacidade resistente da ligação ao corte. Ordenando por ordem decrescente de capacidade resistente as diferentes configurações de superfície estudadas tem-se: superfície tratada com hidrodecapagem e superfície ondulada com valores próximos, seguidas da superfície tratada com martelo pneumático e por último a superfície lisa, com os valores mais baixos de resistência. É também de notar que, em quase todos os ensaios, os valores máximos de carga atingidos nos ensaios dos provetes preparados com conectores HiPerConnector foram um pouco inferiores aos que se atingiram nos ensaios dos provetes com conectores HILTI HCC-B.

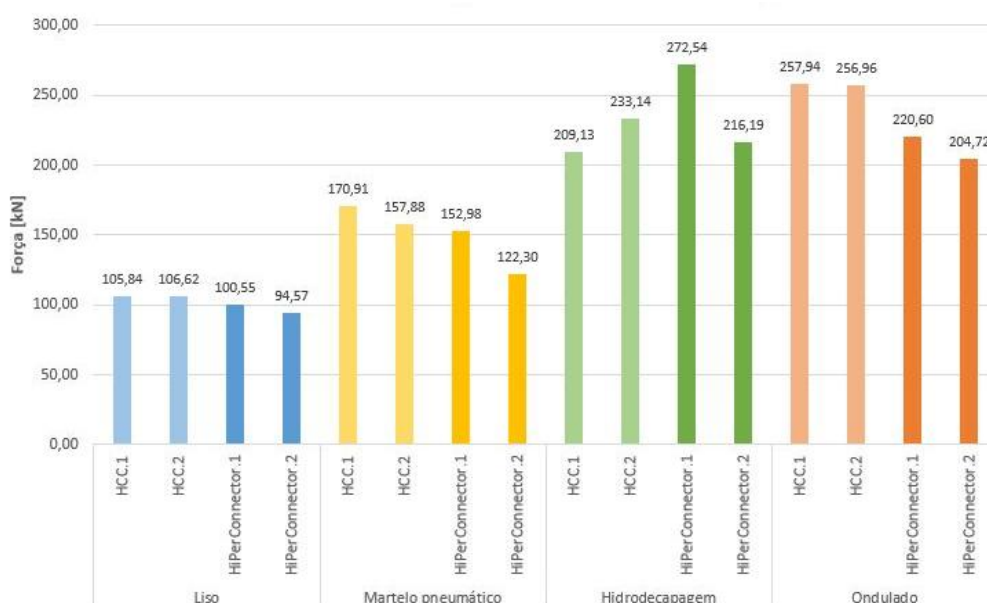


Figura 3.45 - Valores máximos de carga nos ensaios de corte em laje

Não convém, no entanto, olhar apenas para os valores máximos de carga atingidos durante os ensaios, sendo necessário fazer uma avaliação mais detalhada dos resultados obtidos. Essa análise mais pormenorizada é feita de seguida, tendo-se optado por apresentar os dados separando a informação por tipo de tratamento de superfície da laje, uma vez que se julgou ser esta a forma mais clara para essa apresentação.

Superfície lisa

Apresentam-se na Figura 3.46 os diagramas que relacionam a força exercida pelo macaco hidráulico, medida na célula de carga, com os deslocamentos horizontal e vertical, medidos com os respectivos transdutores de deslocamentos. Os valores de deslocamento horizontal correspondem à média dos valores lidos nos dois transdutores de deslocamentos colocados nessa posição.

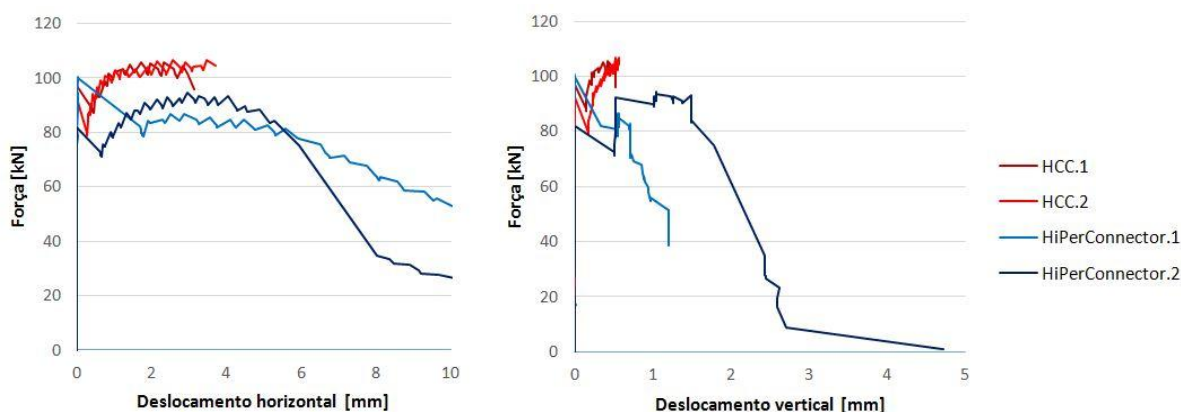


Figura 3.46 - Diagramas força-deslocamento horizontal e força-deslocamento vertical dos ensaios de corte em laje com superfície lisa

Nestes diagramas consegue-se perceber que a carga aplicada atinge valores elevados com deslocamentos, tanto horizontais como verticais, muito próximos do zero até que, de súbito, há uma pequena perda de carga e um aumento dos deslocamentos. Estes pontos deverão corresponder ao momento de quebra de adesão entre as duas superfícies de betão e correspondem aos seguintes valores de carga para cada um dos ensaios:

HCC.1 – 97,80 kN

HiPerConnector.1 – 100,55 kN

HCC.2 – 92,41 kN

HiPerConnector.2 – 81,83 kN

Com a excepção do ensaio 1 com conectores HiPerConnector, todos os outros ensaios atingiram *a posteriori* valores de carga superiores à que se verificou no momento de quebra

da adesão. Durante a execução dos ensaios foi bem perceptível o momento em que se deu a quebra da adesão entre as duas camadas de betão, não só pela perda de carga que se verificou, mas também porque se ouviu um estalido e apareceu uma ‘fissura’ ao longo de toda a interface (Figura 3.47).



Figura 3.47 - Quebra da adesão entre as duas camadas de betão em ensaio com superfície lisa

Após a quebra da adesão começam a verificar-se deslocamentos mais significativos, que se deverão essencialmente ao efeito de ferrolho, uma vez que, não existindo forças de compressão exteriores, no caso da superfície lisa quase não há mobilização da parcela atrito, dado que não há “relevo” que obrigue ao aumento da dilatância. Na Figura 3.48 é apresentada a imagem de uma das situações de rotura, em que se nota claramente a deformação dos conectores por efeito de ferrolho.



Figura 3.48 - Aspecto do provete no final do ensaio (HiPerConnector.1)

Superfície ondulada

Os ensaios dos provetes com conectores HILTI HCC na laje com superfície ondulada não correram conforme previsto, uma vez que se deu o esmagamento do betão na zona de aplicação de carga, conforme ilustrado na Figura 3.49. Sendo assim, não foi possível levar os conectores à rotura e é necessário ter em conta que o valor do deslocamento registado a partir de certa altura deve-se quase em exclusivo a esse esmagamento do betão. Desta forma, o valor da carga registada nestes dois ensaios apenas pode ser considerado um limite inferior à capacidade resistente da ligação.



Figura 3.49 - Esmagamento do betão na zona de aplicação da carga nos ensaios com conectores *Hilti* HCC e superfície ondulada

Apresentam-se na Figura 3.50 os diagramas força-deslocamento para deslocamentos horizontais e verticais, respectivamente, traçados a partir dos dados recolhidos durante os ensaios. Note-se que nesses diagramas os ensaios HCC.1 e HCC.2 apresentam valores elevados de deslocamentos no final do ensaio, mas isso deve-se ao facto já atrás referido de se ter começado a dar o esmagamento do betão na zona de aplicação da carga. Caso não tivesse ocorrido este esmagamento a carga aplicada teria subido mais um pouco, sem grande aumento de deslocamento, até se dar a rotura dos conectores.

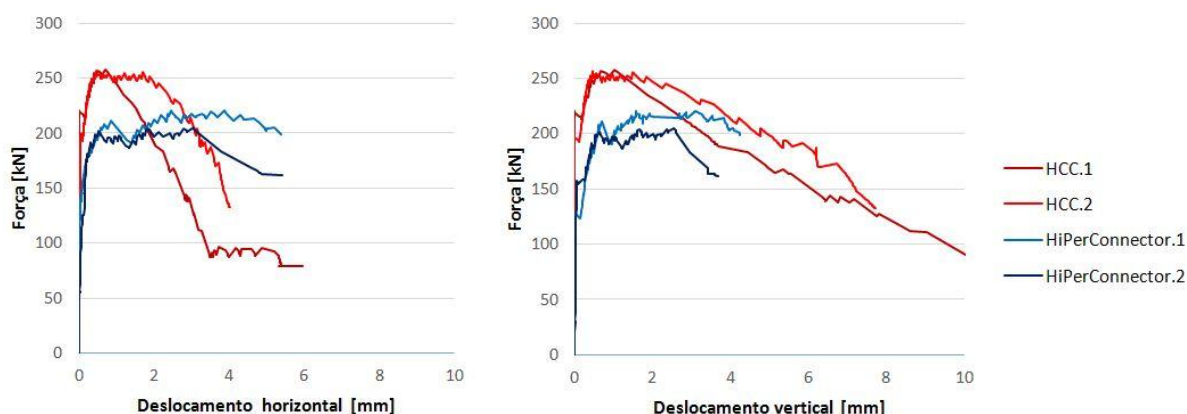


Figura 3.50 - Diagramas força-deslocamento horizontal e força-deslocamento vertical dos ensaios de corte em laje com superfície ondulada

Tal como nos ensaios em superfície lisa, parece ser possível identificar nos diagramas apresentados acima, especialmente no da direita, o instante da rotura da adesão entre as duas camadas de betão, uma vez que se dá um súbito aumento do deslocamento a determinada altura, com uma ligeira perda de carga. Esses instantes correspondem a cargas de:

HCC.1 – 220,70 kN

HiPerConnector.1 – 128,18 kN

HCC.2 – 199,53 kN

HiPerConnector.2 – 155,92 kN

Na execução dos ensaios estes instantes não foram tão perceptíveis como no caso dos ensaios em superfície lisa. No entanto, a partir de certa altura começava a ser visível uma fissura na interface entre os dois betões que ia claramente aumentando de espessura com o decorrer do ensaio.

Nos ensaios dos provetes preparados com os HiPerConnector foi possível efectuar o carregamento até à rotura do aço dos conectores. Notou-se durante o ensaio um progressivo afastamento das superfícies da interface até que, de repente, se deu a rotura dos conectores metálicos. Depois de removidos os blocos, viu-se que, para além da rotura do aço dos conectores, tinha ocorrido o destacamento de algumas partes das ‘ondas’ do betão do bloco superior. Isto aconteceu apesar de a maior parte da superfície do betão já não estar em aderência com o betão da laje inferior, como se pôde confirmar depois de removido o material solto (Figura 3.51).



Figura 3.51 - Interface após o ensaio, antes de depois de varrido o material solto

Superfície tratada com martelo pneumático

Na Figura 3.52 são apresentados os diagramas força-deslocamento, para deslocamentos horizontais e verticais, respectivamente, que se obtiveram com os dados recolhidos durante os ensaios realizados nos provetes da laje com a superfície tratada com martelo pneumático. Nestes diagramas não é muito perceptível o instante da ocorrência da rotura da adesão entre as duas camadas de betão, no entanto na execução dos ensaios foi possível ver que apareceu uma ‘fissura’ na interface das duas camadas antes de ocorrer a rotura (Figura 3.53).

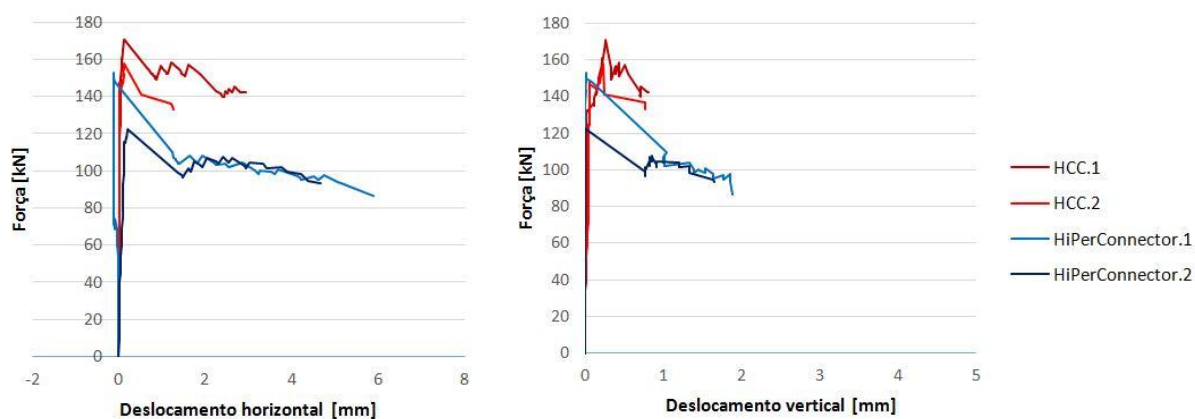


Figura 3.52 - Diagramas força-deslocamento horizontal e força-deslocamento vertical dos ensaios de corte em laje com superfície tratada com martelo pneumático

Note-se que nestes ensaios a carga máxima foi atingida com deslocamentos horizontais muito baixos. Depois de vencida a adesão entre as duas camadas, a carga que os conectores conseguem suportar é inferior à carga que estava a ser suportada por essa adesão, uma vez que baixa e não volta a atingir os mesmos valores. De qualquer forma, os valores de carga registados após esse ‘pico inicial’ são significativamente superiores aos valores máximos de carga registados nos ensaios com superfície lisa, o que leva a entender que a capacidade

resistente está a ser dada por uma combinação do efeito de ferrolho e do efeito de atrito, devido à existência de dilatância e a consequente mobilização de tracção nos conectores metálicos.



Figura 3.53 - Aparecimento de 'fissura' na interface das duas camadas de betão

Superfície tratada por hidrodecapagem

A par dos ensaios realizados na laje com superfície ondulada, estes foram os ensaios em que se registaram valores de carga mais elevados até atingir a rotura. Para além disso, pode-se verificar nos diagramas força-deslocamento apresentados na Figura 3.54 que em todos os ensaios se atingiu a rotura para valores muito baixos de deslocamento tanto horizontal como vertical. O ensaio que registou maiores valores de deslocamento foi o ensaio HCC.1 e os valores máximos foram cerca de 0,45 mm e 0,9 mm de deslocamento horizontal e vertical, respectivamente. Todos os outros ensaios apresentaram deslocamentos horizontais e verticais inferiores a 0,15 mm. Este facto parece dar a entender que toda a carga foi suportada pela adesão entre as duas camadas e que quando esta se rompeu os conectores não foram capazes de a suportar e foram 'cortados' de imediato, sem se chegar a verificar qualquer tipo de dilatância ou efeito de ferrolho.

Os valores máximos registados, que são os que estão apresentados no gráfico da Figura 3.45, corresponderão apenas à capacidade resistente da adesão na interface, mas que toma valores superiores às capacidades resistentes do conjunto verificadas nos ensaios dos provetes com superfície lisa e nos ensaios dos provetes com superfície tratada com martelo pneumático.

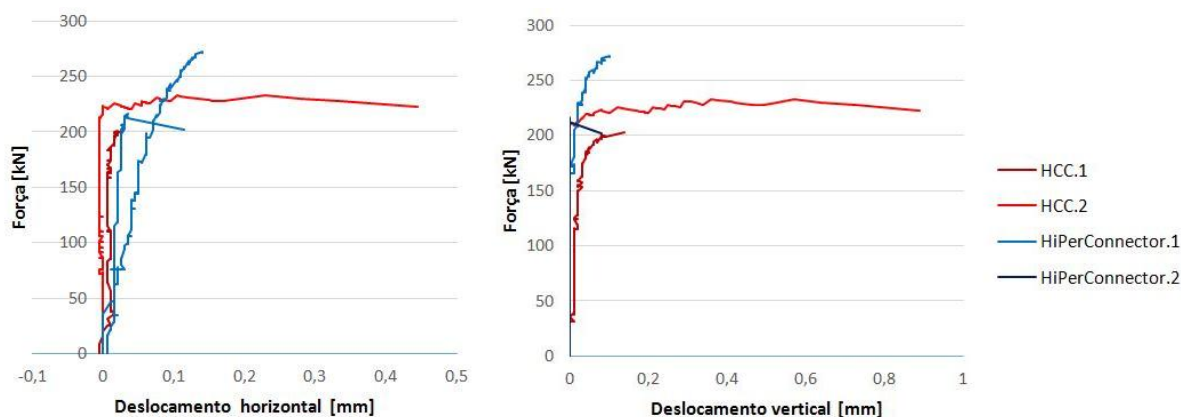


Figura 3.54 - Diagramas força-deslocamento horizontal e força-deslocamento vertical dos ensaios de corte em laje com superfície tratada por hidrodecapagem

Em todos os ensaios realizados com este tipo de tratamento da superfície da laje deu-se o destacamento de um bocado de betão da laje inferior na parte posterior do provete. A rotura do ensaio HCC.2 deu-se de uma forma completamente diferente de todas as outras, uma vez que ocorreu por formação de cone de betão na envolvente de ambos os conectores. O bloco foi projectado, rodando em torno de um eixo da parte posterior do mesmo (Figura 3.55).



Figura 3.55 - Laje com superfície tratada por hidrodecapagem depois de realizados os ensaios

4. SÍNTESE DA ANÁLISE EXPERIMENTAL

À medida que se apresentaram os resultados experimentais no capítulo anterior, estes foram analisados e comentados, no entanto, parece importante tecer ainda algumas considerações de carácter mais geral, cruzando as informações recolhidas nos diferentes ensaios.

Com os ensaios de tracção conseguiu-se a caracterização do comportamento dos materiais em estudo e das possíveis configurações para o corpo dos conectores que se analisaram. Antes de mais, verificou-se que, pelo facto de se estar a utilizar aço no desenvolvimento dos novos conectores, conseguia-se um comportamento dúctil destes elementos, uma vez que todas as configurações analisadas apresentaram maior capacidade de deformação plástica do que a que se verificou nos ensaios dos conectores HILTI HCC-B. Em condições normais de utilização este é um aspecto que não tem especial importância, bastando assegurar a capacidade resistente necessária, no entanto, no caso de ocorrências extraordinárias poderá ser extremamente importante como forma de permitir rearranjos na distribuição dos esforços ou, em caso limite, dando sinais de aviso para uma possível rotura.

Nestes ensaios surpreenderam um pouco os valores das tensões de cedência (Quadro 3.2) que se verificaram nos provetes identificados como TT1 e CT2, fabricados a partir de tubo de aço do tipo E235. Obtiveram-se valores de tensão de cedência superiores a 580 MPa, o que é muito superior ao que seria de esperar dada a identificação comercial da matéria-prima. Com a realização dos ensaios de tracção percebeu-se que os engates que asseguravam o fecho da secção dos provetes do tipo TT4 poderiam não ser suficientes para cumprir essa função, uma vez que permitiram a abertura da secção durante a execução do ensaio.

Sendo o efeito de ferrolho uma das principais contribuições da presença das armaduras/conectores para a capacidade resistente de uma interface a esforços de corte longitudinal, deu-se especial atenção aos ensaios de corte flexão, que pretendiam analisar de forma isolada esse mecanismo de resistência.

Também nestes ensaios se verificou uma maior capacidade de deformação antes da rotura de todos os elementos ensaiados, quando comparados com o conector de referência. Tal como já se referiu, este é um factor importante a ter em consideração em casos de situações limite para a estrutura, no entanto, por si só, não se justifica como uma vantagem. Analisando os diagramas da Figura 3.14 verifica-se que os elementos do tipo TT1 e TT4 apresentam uma

deformação antes da rotura superior ao triplo da que se verifica nos elementos de referência, porém, a carga máxima que conseguem suportar é inferior à carga máxima registada no ensaio desses elementos. Assim, apesar de possuírem uma maior ductilidade, verifica-se que o desempenho de elementos do tipo TT1 e TT4, quando solicitados em efeito de ferrolho, é inferior ao de referência.

Nos mesmos diagramas, constata-se que, tanto os elementos do tipo TT2 como os elementos do tipo CT1, para além de possuírem uma capacidade de deformação antes da rotura cerca de quatro vezes superior à dos de referência, conseguem ainda suportar uma carga máxima bastante superior a estes, 30 % e 65 %, respectivamente. Chama-se no entanto a atenção para o facto de o desempenho destes elementos ser bastante menos rígido do que os de referência.

Os elementos em que se verificou um melhor desempenho global foram os do tipo CT2. Constata-se que possuem uma rigidez inicial superior à de todos os restantes elementos ensaiados, incluindo os de referência, o que equivale a uma maior capacidade resistente associada a deslocamentos baixos, para além de que se verifica uma capacidade de deformação antes da rotura que é cerca do triplo da dos elementos de referência. Apesar de se constatarem valores de carga e deslocamento máximos inferiores aos que se verificam nos ensaios dos elementos TT2 e CT1, considera-se mais significativa a capacidade resistente inicial associada a valores baixos de deslocamento, uma vez que, numa situação de aplicação real o deslocamento relativo entre as duas camadas não será muito elevado.

Nos ensaios de corte-flexão registou-se o valor do esforço axial mobilizado nos provetes no decorrer dos ensaios e constatou-se que, em quase todos, este foi aumentando de uma forma progressiva, até que se atinge a rotura. Os valores máximos de esforço axial estão relacionados com os valores de resistência à tracção de cada um dos diferentes elementos.

Com os ensaios de arrancamento realizados conseguiu-se verificar que o factor mais influente no aumento da capacidade resistente dos conectores ao arrancamento da cola é a existência de nervuras nos mesmos. A execução de entalhes no corpo do conector também permite aumentar de forma significativa a capacidade resistente ao arrancamento, mas não da mesma forma.

A existência de nervuras na direcção perpendicular ao eixo do conector permite um melhor desempenho do que a colocação destas na direcção longitudinal. Ao analisar o modo de rotura pela cola dos provetes preparados com os conectores HILTI HCC, verificou-se que o *splitting* da cola teve sempre origem em pontos onde se localizavam nervuras na direcção longitudinal. Isto indica que a presença desses elementos conduz à criação de um campo de tensões de tal

forma elevado nessa zona que obriga a cola a rasgar, pois atinge o limite da sua capacidade resistente. Caso as nervuras estejam orientadas na direcção perpendicular ao eixo do conector o mesmo já não acontece, como se comprovou nos ensaios executados com elementos do tipo CT1, que possuem nervuras apenas nesta direcção, em que se atingiram valores de carga muito superiores aos que se verificaram nos outros ensaios e a rotura se deu pelo aço do conector. Acrescente-se que não se registou qualquer deslocamento relativo entre a cola e o conector. Um comprimento de embebição de 3 cm na cola revelou-se suficiente para que se atingisse a rotura pelo aço do conector e não pela ligação cola-conector.

A execução de entalhes no corpo dos elementos de ensaio, como é o caso dos elementos CT2, permite aumentar a capacidade resistente ao arrancamento para cerca do dobro do que se verifica sem esses entalhes. Como neste caso se verificou um deslocamento relativo entre o conector e a cola é possível o cálculo da tensão média de aderência, τ_b . Considerando que a força que resiste ao arrancamento é determinada pelo produto do perímetro médio da secção, P_s , com o comprimento de amarração, l_b , e uma tensão média de aderência, τ_b , pode-se calcular o valor desta aderência através de:

$$\tau_b = F_{m\acute{a}x,b} / (P_s l_b) \quad (11)$$

o que, nos ensaios de arrancamento na cola, $l_b = 30$ mm, corresponde a $\tau_b = 11,8$ MPa e nos ensaios de arrancamento em cola e betão, $l_b = 90$ mm, corresponde a $\tau_b = 8,9$ MPa. Esta diferença que se verifica nos valores de tensão média de aderência terá essencialmente a ver com o menor período de cura da cola que se verificou nos provetes de ensaio em cola e betão que, apesar de superior ao definido no manual de aplicação da cola, foi inferior ao do tempo de cura dos provetes dos ensaios de arrancamento na cola.

Dos ensaios de arrancamento que se realizaram do lado da cabeça concluiu-se não ser necessário um grande diâmetro desta extremidade do conector para assegurar ancoragem suficiente no novo betão. Os diâmetros mais pequenos que se ensaiaram, 24 mm, revelaram-se suficientes para que essa condição fosse satisfeita.

Escolhida a configuração final do HiPerConnector, que se apresenta nas Figura 3.35 e Figura 3.36, foram executados os ensaios de corte em laje, em que, para além de testar a aplicação dos novos conectores, se pretendia avaliar a influência do tratamento aplicado à superfície da interface na capacidade resistente desse plano ao esforço de corte longitudinal.

Dos resultados dos ensaios de corte em laje, apresentados na secção 3.7, confirmou-se que o tipo de tratamento aplicado na superfície do substrato antes da aplicação da nova camada de

betão desempenha um papel crucial na capacidade resistente da interface. Testaram-se dois tipos de tratamento de superfície que são muitas vezes utilizados em obra: (a) picagem por martelo pneumático e (b) hidrodemolição, uma superfície lisa, utilizada como referência, e uma superfície ondulada, o que obriga a uma forte sollicitação à tracção dos conectores.

Como esperado, verifica-se que os ensaios feitos em elementos com superfície lisa foram os que apresentaram uma capacidade resistente ao corte longitudinal mais baixa. Nesses ensaios, verificou-se um comportamento muito semelhante nos provetes preparados com os conectores HiPerConnector e nos provetes preparados com conectores HILTI HCC-B, tendo os segundos resistido a uma carga ligeiramente superior à verificada nos primeiros. Depois de vencida a aderência química entre as duas camadas, a resistência ao corte longitudinal é dada essencialmente pelo efeito de ferrolho e, uma vez que os conectores HiPerConnector são mais dúcteis do que os HILTI HCC-B, verifica-se um valor de deslocamento horizontal antes da rotura muito superior no caso dos primeiros.

Pensou-se na realização de ensaios utilizando uma superfície de interface ondulada de forma a aumentar o efeito de tracção sobre as armaduras e a analisar que influência isso poderia ter no desempenho dos conectores, no entanto, o facto de se ter dado o esmagamento do betão na zona de carga nos ensaios dos provetes HCC limitou um pouco essa análise.

Apesar de possuir uma configuração ondulada, a superfície desta interface é bastante lisa, uma vez que foi betonada contra uma chapa metálica, o que leva a que o nível de imbricamento das partículas, *mechanical interlocking*, seja semelhante ao que se verifica na superfície lisa. O aumento muito significativo da carga resistente que se verifica em relação a esse tipo de superfície deve-se ao facto de a existência das ondas implicar um forte aumento da dilatância para que se possa verificar deslocamento horizontal do bloco superior. A resistência ao aumento da dilatância é dada pela sollicitação à tracção dos conectores que atravessam a interface, o que por sua vez mobiliza a força de atrito, contribuindo para o aumento da capacidade resistente às sollicitações de corte. Da análise dos diagramas força-deslocamento, Figura 3.50, verifica-se que no caso destes ensaios os valores de deslocamentos horizontais e verticais são muito idênticos o que se deve à configuração das ondas da interface.

Os tratamentos de superfície do betão do substrato por picagem com martelo pneumático ou por hidrodécapagem são soluções habituais nas obras de construção. Em Portugal não está ainda muito difundida a prática da hidrodécapagem, no entanto esta técnica aparenta possuir uma série de vantagens quando comparada com a utilização do martelo pneumático, incluindo a obtenção de melhores resultados em ensaios de corte longitudinal entre duas camadas de betão cuja superfície da interface seja tratada por esse método. Confirma-se na análise aos

resultados destes ensaios que a capacidade resistente de superfície tratada por hidrodecapagem é 30% a 60% superior à da superfície tratada com martelo pneumático.

Verificou-se nos ensaios dos provetes cuja superfície da interface tinha sido preparada por hidrodecapagem ou com martelo pneumático que a resistência inicial, correspondente à parcela da adesão, e por isso apresentando valores de deslocamento muito próximos de zero, é muito elevada. Tanto no caso de um tipo de superfície como no outro se verificou que o valor da capacidade resistente da adesão é superior à capacidade resistente por atrito e efeito de ferrolho mobilizada após a rotura da mesma. No caso dos ensaios em laje hidrodecapada não foi possível confirmar a mobilização de outros mecanismos de resistência, uma vez que após a quebra da adesão se deu logo a rotura do provete, tendo os conectores sido incapazes de redistribuir os esforços que estavam a ser resistidos pela adesão e sido cortados nesse instante.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o trabalho executado e apresentado nos capítulos anteriores pensa-se ter atingido os objectivos propostos no início do mesmo.

No que respeita ao comportamento mecânico do conector, os ensaios experimentais realizados permitem concluir que é possível, utilizando processos de produção simples, obter um produto que apresente um desempenho equiparado ao do conector HILTI HCC-B. Pode-se afirmar que a utilização de aço como material constituinte dos novos conectores, quando comparado com o ferro fundido nodular que constitui os conectores de referência, permite a obtenção de um comportamento muito mais dúctil destes elementos, o que é vantajoso em termos de desempenho estrutural.

Tinha-se definido que seria necessário, para assegurar um bom desempenho do novo conector, que este garantisse ancoragem suficiente em ambas as camadas de betão, capacidade resistente por efeito de ferrolho e capacidade resistente a esforços de tracção equivalentes ou superiores às apresentadas pelo modelo de referência.

Dos resultados experimentais dos ensaios de tracção e de corte-flexão, apresentados e analisados nas secções 3.2.4 e 3.3.4 respectivamente, conclui-se que o desempenho dos elementos do tipo CT2, constituintes do HiPerConnector, é superior ao verificado nos elementos de referência. Verifica-se uma maior capacidade de suporte de carga e também uma capacidade de deformação plástica antes da rotura.

No que se refere à ancoragem do novo conector em ambas as camadas de betão, não é possível afirmar-se que apresente desempenho superior ao do modelo de referência. No novo betão, lado em que fica embebida a cabeça do conector, a ancoragem que se obtém é suficiente, uma vez que a rotura ocorre pelo aço do conector e não por *pull-out* ou esmagamento do betão. Já no que se refere à ancoragem do novo conector no betão do substrato, conclui-se que não é tão forte como a que se verifica no conector de referência, uma vez que ocorreu o arrancamento por *pull-out*, enquanto no caso de referência se verifica a rotura do aço do conector. No entanto, apesar de um desempenho inferior ao do modelo de referência, verificou-se que a ancoragem conferida é suficiente para garantir um bom comportamento do conector.

Nos ensaios de corte em laje verificou-se que os resultados obtidos com os conectores HiPerConnector foram ligeiramente inferiores aos obtidos com os conectores HILTI HCC-B, o que surpreendeu um pouco, atendendo aos resultados dos ensaios anteriores. Seria de esperar que, tendo os novos conectores apresentado melhores resultados nos ensaios de caracterização, apresentassem também um desempenho superior nestes ensaios. Não sendo muito claro porque terá isto ocorrido, sugeria-se a realização de uma modelação numérica deste ensaio, de modo a procurar identificar o que acontece. No entanto, tal não foi possível no âmbito deste trabalho.

Confirmou-se, com os resultados obtidos nos ensaios de corte em laje, que o tratamento dado à superfície da interface antes da adição da nova camada de betão, representa um papel determinante na capacidade resistente da interface a esforços de corte longitudinal. Verificase que essa capacidade resistente é tanto maior quanto maior for a superfície efectiva de contacto entre as duas camadas e quanto maior for o imbricamento mecânico entre elas.

O aspecto financeiro não foi muito abordado na apresentação deste trabalho, por se considerar não ser isso o mais importante no desenvolver da dissertação. Apesar disso, convém referir que, o valor comercial do conector HILTI HCC-B é de cerca de 6,50 €/ud, enquanto que o custo de produção e embalagem do conector HiPerConnector seria de cerca de 1,50 €/ud, a que acresceria um investimento inicial para criação de ferramentas de cerca de 15.000,00 €, segundo a empresa parceira do projecto. Assim sendo, parece ser possível a criação de um produto com um custo competitivo no mercado nacional.

Atendendo a tudo o que atrás se referiu, pode-se afirmar que se criou um conector metálico, desenvolvido e produzido nacionalmente, obtido a partir de métodos de produção simples, que apresenta um desempenho semelhante ao do conector HILTI HCC-B, com um custo de produção competitivo e que foi denominado por HiPerConnector.

Apesar de concluído o projecto e de se ter criado um novo conector, houve algumas questões que ficaram em aberto e que poderão ser melhor estudadas no futuro. Antes de mais, seria interessante efectuar uma modelação numérica dos ensaios de corte em laje, tentando identificar todos os mecanismos resistentes ao esforço de corte longitudinal. Apesar de útil, tal não parece uma tarefa muito simples, atendendo às muitas variáveis do problema e diversos elementos a considerar: duas camadas de betão com características diferentes, superfície da interface que pode assumir diversas configurações, conector metálico de corte e cola para ancoragem no betão do substrato.

Sugere-se também o estudo de novas configurações para os conectores, nomeadamente através da utilização de novos processos de fabrico. Seria interessante o desenvolvimento de um modelo que pudesse ser fabricado por vazamento de aço para dentro de um molde, o que permitiria o teste de geometrias mais complexas.

Para terminar, refira-se que seria também interessante a criação de um manual de dimensionamento para a utilização dos HiPerConnector, fornecendo *guidelines* para a sua aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Normas e manuais de dimensionamento

- [1] NP EN 1992-1-1 (2010), Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Comité Europeu de Normalização. Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- [2] Model Code 2010 (2010). First complete draft – vol.1. Comité Euro-International du Béton, Secretariat Permanent. Lausanne, Switzerland.
- [3] Model Code 2010 (2010). First complete draft – vol.2. Comité Euro-International du Béton, Secretariat Permanent. Lausanne, Switzerland.
- [4] ACI 318-08 (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-08) and commentary. American Concrete Institute. Michigan, U.S.A.

Trabalhos e artigos

- [5] Anderson, A. R. (Setembro de 1960). Composite designs in precast and cast-in-place concrete. *Progressive Architecture* , pp. 172-179.
- [6] Birkeland, P. W., & Birkeland, H. W. (3 de Janeiro de 1966). Connections in Precast Concrete Construction. *American Concrete Institute Journal* , pp. 345-368.
- [7] Francklin, A. R. (2009). *Um Breve Estudo Sobre Ferro Fundido Nodular*. Rio de Janeiro: UEZO - Centro Universitário Estadual da Zona Oeste.
- [8] Hanson, N. W. (1960). Precast-prestressed concrete bridges. 2. Horizontal shear connections. *Journal PCA Research and Development Laboratories* , 38-58.
- [9] Husain, H., Oukaili, N., & Muhammed, H. (15 de Junho de 2009). Dowel Action Between Two Concretes. *Journal of Engineering* , pp. 3583-3605.
- [10] Lin, F., Lu, H., & Dong, Y. (2014 (Data de submissão)). Component Model for Shear Transfer in Reinforced Concrete. *ACI Structural and Materials Journal* .
- [11] Louro, A. M. (2008). *Comportamento de Vigas de Betão Armado com Aço Inoxidável*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa.

- [12] Mattock, A. H., & Kaar, P. H. (Janeiro de 1961). Precast-Prestressed Concrete Bridges - 4. Shear Tests of Continuous Girders. *Journal PCA Research and Development Laboratories* , 9-46.
- [13] Paiva, N. F. (2012). *Quantificação da "dowel action" na Resistência de Interfaces Betão-Betão*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.
- [14] Patnaik, A. K. (1992). *Horizontal Shear Strength of Composite Concrete Beams With a Rough Interface*. Ph.D. Thesis, University of Calgary, Department of Civil Engineering, Calgary.
- [15] Randl, N. (1997). *Investigations on Transfer of Forces Between Old and New Concrete at Different Joint Roughness*. Ph.D Thesis, University of Innsbruck, Innsbruck.
- [16] Rocha , D. (2012). *Flexural Strengthening by Means of a RC Overlay in the Tension Zone*. MSc Thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [17] Saldanha, R., Santos, P., & Júlio, E. (2012). Utilização de betões de ultra elevada durabilidade (UHDC) na pré-fabricação e reabilitação de estruturas. *Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012* . Porto.
- [18] Santos, P. D., & Júlio, E. N. (2011). Factors affecting bond between new and old concrete. *ACI Materials Journal* , 449-456.
- [19] Santos, P. M. (2009). *Assessment of the Shear Strength between Concrete Layers*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil. Coimbra: Universidade de Coimbra.
- [20] Santos, P. M., & Júlio, E. N. (Dezembro de 2012). A state-of-the-art review on shear-friction. *Engineering Structures* , pp. 435-448.
- [21] Shaikh, A. F. (1978). Proposed Revisions to Shear-Friction Provisions. *PCI Journal* , 12-21.
- [22] Tsoukantas, S. G., & Tassios, T. P. (1989). Shear Resistance of Connections Between Reinforced Concrete and Linear Precast Elements. *ACI Structural Journal* , pp. 242-249.
- [23] Veludo, J. (2012). *Reforço de Fundações com Micro-Estacas. Ligações Aço/Calda/Betão*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.
- [24] Zilch, K., & Reinecke, R. (2000). Capacity of shear joints between high-strength precast elements and normal-strength cast-in-place decks. *FIB International Symposium on High Performance Concrete*. Orlando, USA.