



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

Estudo de ligações viga-pilar usando perfis retangulares ou quadrados ocos

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

Autor

Tânia Alexandra Oliveira Silva

Orientadores

Rui António Duarte Simões

Carlos Alberto da Silva Rebelo

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

Coimbra, Julho, 2014

AGRADECIMENTOS

Tal como referiu Isaac Newton um dia, “Se vi mais longe, foi porque me apoiei nos ombros de gigantes”. É desta forma que agradeço a todos os “gigantes” pelo apoio incondicional.

Primeiramente, queria expressar a minha gratidão ao Professor Doutor Rui António Duarte Simões e ao Professor Doutor Carlos Alberto da Silva Rebelo pelos ensinamentos transmitidos ao longo da realização desta dissertação. Da mesma forma agradeço à Engenheira Guiomar Vicente que, tão gentilmente me cedeu os resultados dos ensaios por si efetuados, fundamentais para a realização da presente tese.

Aos meus amigos. Ao grupo dos “Pintados de Fresco”, ao grupo do “Cenas”, aos colegas do Mestrado de Mecânica Estrutural em especial ao João Silva, Jorge Silva e Tiago Manco, pelas palavras certas na hora certa. Ao Tiago Almeida, pela ajuda e amizade. À Mariana Silva, por ser a Mariana.

À minha família, em especial ao meu irmão, porque o facto de me considerar um exemplo me faz ser mais e melhor, todos os dias.

Por último mas não menos importante, aos melhores do Mundo: os meus pais, José Silva e Rosa Amorim. As palavras esgotam-se quando é necessário agradecer àqueles que possibilitaram tudo isto. A vós vos dedico este trabalho.

À minha avó, Lurdes Amorim, e ao meu avô, Alberto Silva. Estamos juntos.

RESUMO

Os perfis metálicos tubulares, sejam estes de secção circular, quadrada ou retangular, apresentam enormes vantagens quando comparados com perfis de secção aberta. Este facto deve-se a razões não só de índole estrutural como também de índole estética. Contudo, são bastante penalizados devido à escassez de metodologias adequadas no dimensionamento de ligações entre perfis deste tipo.

O Eurocódigo 3 - parte 1-8, enquanto norma europeia, é hoje um dos documentos de base utilizado no dimensionamento de ligações entre perfis metálicos. Porém, quando se trata de ligações aparafusadas entre perfis tubulares torna-se num documento dispensável pois não apresenta qualquer formulação do método das componentes aplicada ao tipo de ligações estudadas na presente tese.

O aumento do uso de perfis tubulares em estruturas metálicas justifica, assim, a necessidade do estudo de novos métodos de cálculo que racionalizem as ligações entre perfis deste tipo. Além disso, devem ser investigadas soluções que facilitem o processo de execução e minimizem o fator “custo”.

No âmbito de um projeto europeu – FRAME UP – foram realizados, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, um conjunto de ensaios experimentais estáticos e cíclicos à temperatura ambiente que visam a avaliação do comportamento de uma tipologia inovadora de ligação viga-pilar, ambos constituídos por seções tubulares, a qual é efetuada através de um elemento auxiliar denominado por “reverse channel”. Em simultâneo, serão desenvolvidos modelos numéricos e analíticos através do método das componentes que caracterizem adequadamente o comportamento da nova tipologia de ligação.

A presente tese, para além da identificação das componentes, visa o tratamento dos resultados experimentais, a investigação de metodologias existentes que possam ser aplicadas na quantificação da resistência e rigidez das novas componentes e, por fim, a comparação entre os resultados obtidos de forma a validar as metodologias analíticas existentes.

ABSTRACT

Hollow sections, whether circular, square or rectangular, present huge advantages when compared with open sections. This fact is due to reasons not only of structural nature as well as aesthetics considerations. However, they are considerably penalized due to the lack of appropriate methodologies in the design of joints between such profiles.

Eurocode 3 – Part 1-8 as a European norm, is today one of the background documents used in the design of joints between steel sections. However, when dealing with bolted joints between hollow sections it becomes a dispensable document because it does not present any formulation of component's method applied to the type of connections studied in this thesis.

The increase of the use of hollow sections in steel structures justifies the need to study new methods of calculation that rationalize the joints between such profiles. Moreover, solutions that simplify the implementation process and minimize the factor “cost” should be investigated.

Within a European Project – FRAME UP – were performed in the Department of Civil Engineering, University of Coimbra, a set of experimental monotonic and cyclic tests at room temperature with the aim of evaluate the behaviour of an innovative type of beam-column joint, both constituted by hollow sections, which is performed by an auxiliary element named “reverse channel”. Simultaneously, will be developed numerical and analytical approaches through component's method that adequately characterize the behaviour of the new type of joints.

This thesis, in addition to the identification of the components, aims to treat experimental results, research for new methodologies that could be applied to quantify the resistance and stiffness of new component's and, lastly, a comparison between the results obtained to validate existing analytical methodologies.

ÍNDICE

SIMBOLOGIA	vi
ABREVIATURAS	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Evolução do uso de elementos tubulares	1
1.2 Importância do estudo das ligações entre perfis tubulares	3
1.3 Enquadramento (Projeto FRAME UP).....	4
1.4 Objetivos da dissertação	4
1.5 Estrutura da dissertação	5
2 ESTADO DA ARTE	6
2.1 Classificação de ligações segundo o Eurocódigo 3	6
2.1.1 Classificação consoante a rigidez	7
2.1.2 Classificação consoante a resistência	8
2.1.3 Classificação consoante a ductilidade	8
2.2 Tipologias correntes de ligações viga-pilar	9
2.3 Tipologia da ligação em estudo	12
2.4 Estudos recentes baseados em ligações com “reverse channel”	15
3 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO ANALÍTICO	20
3.1 Introdução	20
3.2 Identificação das componentes ativas.....	20
3.3 Caracterização dos componentes resistentes ao momento fletor.....	21
3.3.1 Zona de tração	21
3.3.2 Zona de corte	30
3.3.3 Zona de compressão	31
3.4 Caracterização das componentes resistentes ao esforço transversal da viga.....	33
3.5 Associação das componentes.....	35
3.5.1 Momento resistente da ligação	36
3.5.2 Rigidez inicial da ligação	36
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	38
4.1 Introdução	38
4.2 Descrição dos ensaios laboratoriais	38
4.2.1 Esquema geral.....	38
4.2.2 Caracterização mecânica do material	39

4.3	Ensaio Monotônicos	41
4.3.1	Instrumentação.....	41
4.3.2	Resultados.....	42
4.4	Ensaio Cíclicos	44
4.4.1	Procedimento de ensaio	44
4.4.2	Resultados.....	45
5	ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS	47
5.1	Introdução	47
5.2	Resultados obtidos analiticamente.....	47
5.2.1	Ensaio monotônicos	47
5.2.2	Ensaio cíclicos	49
5.3	Comparação dos resultados	52
5.3.1	Ensaio monotônicos	52
5.3.2	Ensaio cíclicos	55
6	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	58
6.1	Conclusões	58
6.2	Trabalhos futuros	59
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	ANEXOS.....	A-1
	ANEXO A.....	A-1

SIMBOLOGIA

Letras minúsculas latinas

a	– Espessura efetiva do cordão de ângulo
b_c	– Largura da seção da coluna
$b_{eff,t,wc}$	– Largura efetiva da alma da coluna à tração
b_{rc}	– Largura do RC
c	– Altura da zona de tração na figura 3.5
d_0	– Diâmetro do furo para colocação de parafuso
d_m	– Diâmetro do furo na peça para posterior encaixe do parafuso
d_c	– Altura efetiva da alma da coluna
d_m	– Diâmetro médio da cabeça do parafuso
e_0	– Parâmetro determinado através da expressão: $e_0 = e - t_{rcl} - r_{rcl}$
e_1	– Distância vertical entre a primeira linha de parafusos e a aresta superior da chapa
e_2	– Distância horizontal entre uma fila vertical de parafusos e a aresta lateral da chapa
e_x	– Distância vertical entre a primeira linha de parafusos e a aresta superior da chapa, na figura 3.8
f_y	– Tensão de cedência
f_u	– Tensão última
f_{ub}	– Tensão última do parafuso
h	– Altura da chapa de topo
h_c	– Altura da seção da coluna
h_r	– Distância entre a linha de parafusos r e o centro de compressão
h_{rc}	– Altura da seção do “reverse channel”
h_{viga}	– Altura da viga
i	– Distância horizontal entre parafusos, na figura 3.9 a)
k_1	– Rigidez da componente “alma da coluna e banzos do RC ao corte”
$k_{2,c}$	– Rigidez da componente “alma da coluna à compressão”
$k_{2,rcl}$	– Rigidez da componente “banzos do RC à compressão”
$k_{3,c}$	– Rigidez da componente “alma da coluna à tração”
$k_{3,rcl}$	– Rigidez da componente “banzos do RC à tração”
k_5	– Rigidez da componente “chapa de topo à flexão”
k_{10}	– Rigidez da componente “parafusos à tração”
$k_{eff,r}$	– Rigidez efetiva associada a uma linha de parafusos
$k_{i,r}$	– Rigidez de uma componente associada a uma linha de parafusos

$k_{rcw,c}$	– Rigidez da componente “alma do RC à compressão”
$k_{rcw,t}$	– Rigidez da componente “alma do RC à tração”
l_{eff}	– Comprimento efetivo
m	– Distância horizontal entre uma linha vertical de parafusos e o reforço da chapa, quando a soldadura se efetua por penetração total
m_2	– Distância vertical entre a linha de parafusos mais próxima do banzo superior da viga e o banzo superior da viga, quando a soldadura se efetua por penetração total
m_c	– Distância determinada através da expressão: $m_c = \frac{b_{rc} - 2t_{rcl} - 2r_{rcl} - l}{2}$
$m_{p,rcw}$	– Momento plástico da alma do RC por unidade de comprimento
m_{st}	– Substitui m quando a soldadura se efetua por penetração parcial
m_x	– Substitui m_2 quando a soldadura se efetua por penetração parcial
p_1	– Distância vertical entre linhas de parafusos
p_2	– Distância horizontal entre parafusos
t_b	– Espessura da viga
t_c	– Espessura da coluna
t_p	– Espessura da chapa
t_{rcl}	– Espessura dos banzos do “reverse channel”
t_{rcw}	– Espessura da alma do “reverse channel”
t_{wc}	– Espessura da alma da coluna
z	– Braço do binário

Letras maiúsculas latinas

A_c	– Área da seção da coluna
A_s	– Área útil do parafuso
A_{rc}	– Área do “reverse channel”
A_{vc}	– Área de corte da coluna
B	– Largura da seção da viga
C	– Distância entre as linhas médias dos banzos do RC
C_c	– Coeficiente que depende da largura da viga e da coluna adjacentes
C_t	– Coeficiente que tem em conta a influência da distância entre a linha de parafusos e a aresta superior do RC
E	– Módulo de elasticidade
$F_{c,b,Rd}$	– Valor de cálculo da resistência do componente “viga à compressão”
$F_{t,rcl,Rd}$	– Valor de cálculo da resistência do componente “banzos do RC à compressão”
$F_{c,rcw,Rd}$	– Valor de cálculo da resistência do componente “alma do RC à compressão”
$F_{c,wc,Rd}$	– Valor de cálculo da resistência do componente “alma da coluna à compressão”
$F_{t,b,Rd}$	– Valor de cálculo da resistência do componente “viga à tração”
$F_{t,rcl,Rd}$	– Valor de cálculo da resistência do componente “banzos do RC à tração”
$F_{t,rcw,Rd}$	– Valor de cálculo da resistência do componente “alma do RC à tração”
$F_{t,Rd}$	– Valor de cálculo da resistência à tração de um parafuso
$F_{t,wc,Rd}$	– Valor de cálculo da resistência do componente “alma da coluna à tração”

$F_{T,1,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência à tração de um banzo de uma peça em T, para o modo de rotura 1
$F_{T,2,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência à tração de um banzo de uma peça em T, para o modo de rotura 2
$F_{T,3,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência à tração de um banzo de uma peça em T, para o modo de rotura 3
$F_{T,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência do componente “chapa de topo à flexão”
$F_{V,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência ao corte dos parafusos
L_B	–	Comprimento do parafuso sujeito a alongamento
L_c	–	Distância entre a linha média do banzo superior da viga e a aresta superior da placa na figura 3.9 a)
M	–	Momento fletor atuante
$M_{j,Rd}$	–	Momento resistente da ligação
$M_{pl,1,Rd}$	–	Momento plástico de rotura referente ao modo de rotura 1, ver figura 3.3 a)
$M_{pl,2,Rd}$	–	Momento plástico de rotura referente ao modo de rotura 2, ver figura 3.3 b)
$M_{pl,Rd}$	–	Momento plástico da viga
R_m	–	Raio do padrão circular de rotura
S	–	Esforço transversal atuante, ver figura 3.7
$S_{j,ini}$	–	Rigidez inicial da ligação
T	–	Resistência do componente “alma do RC à tração” por parafuso, ver figura 3.7
$V_{wp,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência do componente “alma da coluna e do RC ao corte”

Letras gregas

β	–	Parâmetro de transformação
γ_{M0}	–	Fator de segurança parcial para a resistência de seções transversais de qualquer classe
λ_p	–	Esbelteza da chapa de topo
ρ	–	Coefficiente de enfunamento da chapa
Φ	–	Rotação da ligação
τ	–	Tensão na interação entre os banzos e alma do RC, ver figura 3.7
ν	–	Coefficiente de poisson
ω	–	Coefficiente de redução

ABREVIATURAS

CIDECT	–	Comité Internacional pelo Desenvolvimento do Estudo da Construção Tubular
EC3	–	Eurocódigo 3
PL	–	Placa/Chapa de topo
RC	–	“Reverse channel”
RHS	–	Secção tubular retangular
SHS	–	Secção tubular quadrada
ST	–	Enrigeedor

1 INTRODUÇÃO

1.1 Evolução do uso de elementos tubulares

Desde os primórdios que a forma tubular é conhecida pelo Homem. O uso de materiais disponíveis na natureza, como o bambu, nas construções antigas, revelou excelentes potencialidades resistentes devido ao arranjo das suas fibras, o que, aliado ao baixo peso resultante do interior oco, torna esta seção bastante apelativa. Com o desenvolvimento da indústria do ferro, surge um novo tipo de perfil que tomou como fonte de inspiração o bambu, o perfil de seção oca (Araújo, 2012).

A escolha de um determinado perfil a usar numa estrutura depende de vários fatores que vão desde a resistência à aparência estética, passando ainda por fatores relativos à economia e ao tempo de execução. Aliando um bom comportamento estrutural à compressão e à torção, e uma forma visivelmente mais atrativa que os perfis de seção aberta, a utilização de perfis de seção tubular oca nas estruturas tornou-se numa solução bastante competitiva com os perfis de outros tipos, em particular em estruturas à vista. Na tabela 1.1 pode observar-se o perfil mais vantajoso, de entre abertos e fechadas, consoante o requisito considerado.

Tabela 1.1 – Análise comparativa entre seções abertas e tubulares

Requisitos preponderantes na escolha dos elementos para construção metálica:		Tipo de seção que oferece melhor resposta:
Eficiência estrutural	Resistência a esforços de flexão simples	Aberta
	Resistência a esforços axiais	Tubular
	Resistência a esforços de torção	Tubular
	Resistência a esforços combinados (flexão e torção)	Tubular
	Resistência a solitação no eixo fraco	Tubular
	Permissão de enchimento com betão	Tubular
Estético	Aspetto visual	Tubular
Económico	Custo de fabrico	Aberta
	Peso	Aberta/Tubular
	Custo de manutenção	Tubular
Temporal	Prazo de construção	Aberta/Tubular
Temporal/ Estético/ Económico	Ligações	Aberta

Relativamente à eficiência estrutural, apenas no que à resistência à flexão simples diz respeito, as seções abertas conferem uma melhor solução devido ao facto de existir menos desperdício de material. No entanto, tendo em conta o fenómeno da encurvadura lateral, e quando não há hipótese de contraventamento, as seções tubulares constituem uma solução mais vantajosa. Em resultado do maior controlo de qualidade existente em seções tubulares, as curvas de encurvadura são menos penalizadoras para perfis tubulares, ora, sendo menos penalizadoras, o valor do coeficiente de redução (χ) para uma esbelteza igual será mais próximo da unidade, o que resulta numa maior resistência à encurvadura.

Na figura 1.1 é ilustrada a comparação entre a quantidade de material necessária para uma dada carga, para os vários tipos de perfil, num elemento com 3 m de comprimento sujeito a compressão pura. Embora para cargas elevadas a diferença não seja tão pronunciada, para cargas baixas os perfis tubulares são bastante mais vantajosos, conduzindo a um gasto menor de material, resultando assim numa solução mais leve e mais barata, apesar do custo de fabrico dos elementos com seção aberta ser inferior ao dos perfis tubulares. Atendendo ainda aos aspetos económicos, o custo de manutenção revela-se inferior em perfis tubulares, resultado de uma menor superfície exposta que lhe confere maior durabilidade e menores custos de reparações. Destaca-se ainda o aspeto estético, para o qual as seções tubulares se mostram mais atrativas.

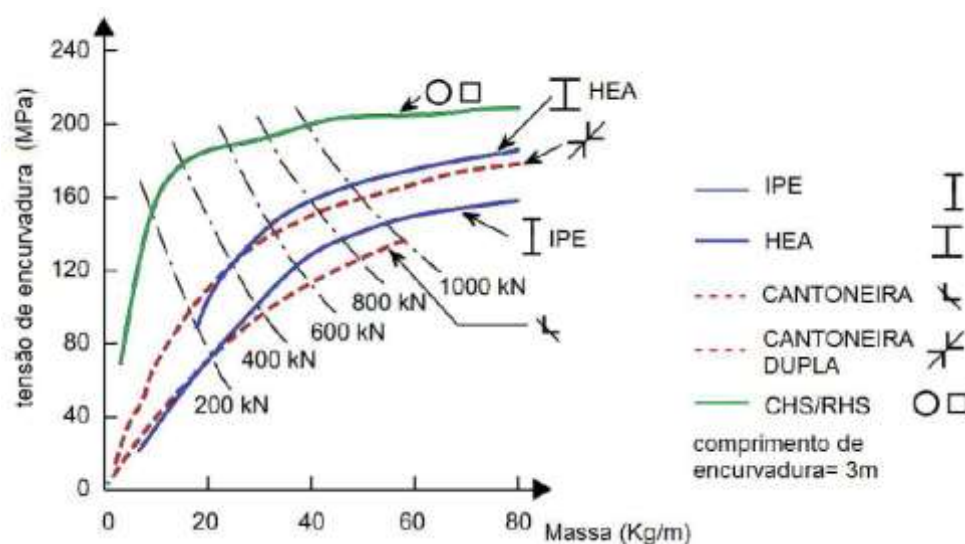


Figura 1.1 – Comparação da quantidade de material dos perfis em relação à carga, sobre carregamento de compressão (adaptado de Wardenier et al.,2010)

O facto de não existirem metodologias standard que possam ser usadas no dimensionamento de ligações entre perfis tubulares penaliza o uso deste tipo de perfis. Assim, para um completo aproveitamento das vantagens que os perfis tubulares conferem, é fundamental investir no

tema das ligações entre perfis deste tipo. A tecnologia das ligações desempenha um papel preponderante no comportamento das estruturas, nomeadamente nas estruturas com perfis tubulares, sendo determinante para tirar o máximo proveito das suas propriedades.

1.2 Importância do estudo das ligações entre perfis tubulares

Uma das grandes dificuldades existente num projeto de estruturas metálicas surge quando se torna necessário prever o transporte dos elementos que desta farão parte. As estruturas devem ser divididas em partes mais pequenas para que possam ser transportadas e, embora o comprimento máximo dos elementos a transportar dependa do tipo de transporte, deve considerar-se um máximo de 12 metros. Em obra, deve ser assegurado que o comportamento da ligação cumpre o que foi definido na modelação.

A definição das ligações entre elementos estruturais torna-se, assim, numa das principais etapas na elaboração de um projeto de estruturas metálicas pois, além de terem impacto nos aspetos técnicos relacionados com resistência, qualidade e segurança, é importante levar em consideração que as ligações representam um importante componente no custo total da obra. A racionalidade torna-se um fator de competitividade que pode, inclusive, influenciar a escolha do sistema construtivo. Salienta-se ainda o facto de que as ligações fazem parte do conjunto de elementos que constituem a estética da construção, o que evidencia ainda mais a importância dos estudos efetuados acerca destas.

Por análise à tabela 1.1 verifica-se que um dos aspetos que pode levar ao uso de seções abertas em vez de tubulares prende-se com a conceção e o dimensionamento das ligações. Desde o cálculo até à execução, uma ligação entre perfis tubulares apresenta maiores dificuldades devido, não só à falta de estudos que incidam sobre este tema, como à falta de acesso às zonas interiores dos perfis tubulares.

Desta forma, o conhecimento do comportamento estrutural de uma ligação entre perfis deste género torna-se fundamental. O referido conhecimento passa pelo estudo da curva momento-rotação, a qual fornece parâmetros necessários à classificação da ligação tais como a resistência, a rigidez e a ductilidade. De uma forma geral, o diagrama $M-\Phi$ pode ser determinado através de investigações experimentais, modelos semi-empíricos, modelos teóricos ou simulações numéricas.

De entre os tipos de ligações existentes, atualmente, tem-se acentuado a importância da consideração de ligações semi-rígidas, tal como a que se estuda na presente tese. A abordagem de uma ligação semi-rígida oferece claras vantagens como a redução de momentos fletores de extremidade ou a meio vão da viga, o que pode levar a um dimensionamento mais económico.

1.3 Enquadramento (Projeto FRAME UP)

A presente tese surge no âmbito de um projeto financiado pelo Fundo de Investigação Europeu de Carvão e Aço. O projeto FRAME UP, tal como é denominado, conta com um fundo monetário de 1.5 M€ e será executado por 7 entidades creditadas das quais faz parte o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Entre Universidades e empresas europeias, o consórcio de investigação compromete-se a dar resposta às tarefas impostas neste projeto através da realização de ensaios experimentais, modelações numéricas e procedimentos analíticos.

No projeto em voga pretende-se estudar um novo método de construção. Assim sendo, o trabalho desenvolvido pelo consórcio de investigação deve cumprir os seguintes objetivos:

- Desenvolver um novo conceito de execução de sistemas estruturais, utilizados essencialmente em edifícios constituídos por módulos;
- Alcançar uma tecnologia de construção de estruturas modulares usando uma técnica de montagem inovadora, começando de cima para baixo;
- Testar e estabelecer o desempenho de um novo tipo de ligação, onde constam componentes que ainda não possuem modelos de cálculo standard;

Ora, a atual dissertação surge com o intuito de auxiliar no cumprimento do último objetivo apresentado.



Figura 1.2 - Projeto FRAME UP, elevação e integração de módulos 3D (Bjorhovde, 2012)

1.4 Objetivos da dissertação

Com vista ao estudo do comportamento global de uma ligação viga-pilar entre dois perfis tubulares, à temperatura ambiente, foram realizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra diversos ensaios de carga estática e cíclica, usando cinco soluções de ligação entre as quais varia a espessura dos seguintes elementos: chapa de topo, “reverse channel” e enrijeecedor.

Ora, a presente dissertação surge com o objetivo, não só de identificar todos os componentes existentes na ligação, como de fazer uma revisão bibliográfica de forma a verificar se as metodologias propostas até então para ligações deste tipo podem ser aplicadas ao caso em questão. A tese consiste ainda no tratamento dos dados obtidos pelos ensaios experimentais acima referidos, para que, por fim, se possa efetuar uma comparação entre resultados analíticos, experimentais e numéricos. Desta forma, pretende-se complementar um projeto de investigação recorrente na mesma Universidade que se enquadra diretamente no projeto FRAME-UP.

1.5 Estrutura da dissertação

A tese encontra-se dividida nos oito capítulos que, de seguida, se enunciam:

No presente capítulo, **capítulo 1**, faz-se referência à evolução do uso de perfis tubulares o que justifica, em grande parte, a importância do estudo de ligações entre perfis tubulares. Apresentam-se ainda os objetivos da dissertação.

O **capítulo 2** diz respeito ao Estado da Arte, encontra-se dividido em quatro subcapítulos sendo que no primeiro se apresenta a classificação de ligações segundo o Eurocódigo 3, no segundo constam as ligações correntes entre perfis tubulares usadas até então, no quarto apresenta-se uma introdução à nova tipologia de ligação e, por último, faz-se referência aos estudos efetuados até então em ligações deste tipo.

No **capítulo 3** efetua-se a identificação das componentes da ligação e apresenta-se o procedimento de cálculo para a resistência e a rigidez de cada uma destas.

O **capítulo 4**, por sua vez, apresenta alguns detalhes sobre a montagem do ensaio experimental, as propriedades dos materiais, observações efetuadas durante os testes bem como o resultado destes.

No **capítulo 5** efetuam-se as devidas comparações entre os resultados analíticos, experimentais e numéricos.

A partir das comparações efetuadas no capítulo anterior, tecem-se alguns comentários e apresentam-se as devidas conclusões, o que pode ser observado no **capítulo 6**. Apresentam-se ainda neste capítulo algumas propostas para trabalhos futuros.

No **capítulo 7** constam as referências aos documentos consultados durante a realização da dissertação.

Para além destes, apresentam-se os **Anexos** onde constam os cálculos em pormenor.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Classificação de ligações segundo o Eurocódigo 3

O termo ligação é aplicado a todos os detalhes construtivos que promovam a união entre partes da estrutura entre si ou a sua união com elementos externos a ela, como, por exemplo, as fundações (CBCA, 2003). Numa estrutura metálica, as ligações desempenham um papel fundamental no comportamento global da estrutura sujeita às ações exteriores, no entanto, em muitos casos da prática corrente, o seu caso é tratado de forma simplificada e pouco rigorosa.

Tradicionalmente, as ligações viga-pilar nos pórticos metálicos são assumidas como rígidas ou articuladas. As ligações rígidas restringem a rotação dos elementos e permitem a transmissão de momentos, esforços axiais e de corte, contrariamente, as ligações articuladas permitem a rotação independente de cada elemento e impossibilitam a transmissão de momentos.

No entanto, nenhuma ligação é completamente rígida ou perfeitamente articulada, na verdade, as ligações apresentam um comportamento intermédio aos que tradicionalmente se consideravam (figura 2.1). Estudos recentes efetuados em ligações com comportamento semi-rígido demonstram que, tanto em termos do desempenho da ligação em si como em termos económicos, uma ligação deste tipo torna-se bastante competitiva (Heistermann, 2013).

Quando comparada com uma ligação rígida, uma ligação semi-rígida torna-se mais barata pois não requer processos complicados de fabricação bem como a preparação da superfície, o recurso a enrijecedores ou extensos comprimentos de soldadura. Por sua vez, quando comparada com ligações rotuladas, conduzem a elementos com seções mais pequenas, permitindo até que se evite o uso de contraventamentos no caso de estruturas de baixa altura pois providenciam estabilidade suficiente às forças laterais.



Figura 2.1 – Representação esquemática da deformação existente entre uma viga e um pilar em função da rigidez da ligação

Segundo o Eurocódigo 3 Parte 1-8, as ligações são classificadas consoante três características: resistência, rigidez e ductilidade. Estas podem ser calculadas através do método das componentes cujo pressuposto consiste na divisão da ligação num conjunto de componentes (parafusos, chapa de topo, etc.) ao qual está associado um esforço, sendo que a cada componente se associa uma rigidez e uma capacidade resistente. A resistência total da ligação é condicionada pelo componente mais fraco.

2.1.1 Classificação consoante a rigidez

O Eurocódigo 3 – parte 1.8 classifica as ligações, de acordo com a rigidez de flexão inicial, $S_{j,ini}$, em rotuladas, rígidas e semi-rígidas (figura 2.2). Nos parágrafos anteriores já foram descritas as características associadas a cada um destes tipos de ligação. Habitualmente, as ligações só são classificadas consoante a sua rigidez, pois para efeitos de cálculo elástico de estruturas é a classificação mais relevante.

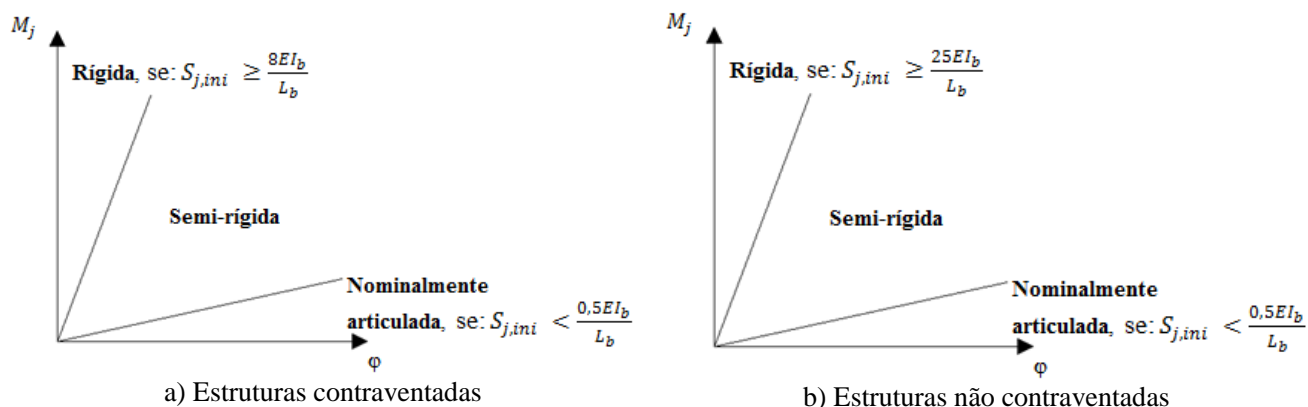


Figura 2.2 – Classificação de uma ligação consoante a rigidez

2.1.2 Classificação consoante a resistência

O momento resistente de uma ligação é requerido, essencialmente, quando se pretende saber qual a carga que leva a estrutura à rotura. Tendo em conta o momento resistente, o Eurocódigo 3 – parte 1.8 apresenta distinção entre ligações com resistência total, ligações com resistência parcial e ligações rotuladas. O mesmo pode ser observado de modo esquemático no gráfico que consta da figura 2.3.

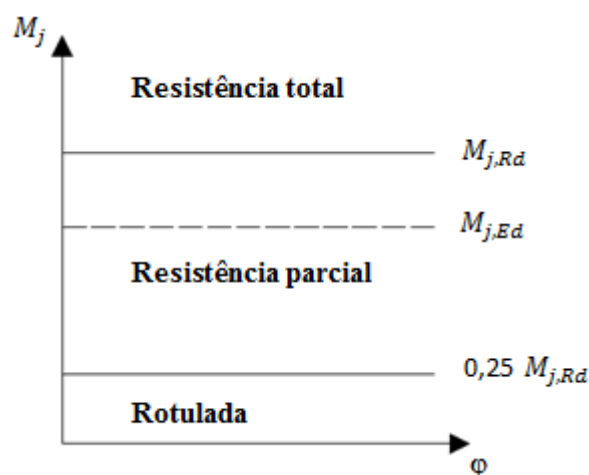


Figura 2.3 – Classificação de uma ligação consoante a resistência

Neste caso, a distinção é feita consoante os esforços transmitidos pela ligação. Uma ligação denominada com resistência total permite transmitir momento fletor, forças axiais e de corte, pelo contrário, numa ligação rotulada apenas se transferem esforços axiais e de corte. Para que uma ligação seja classificada como rotulada, o momento resistente não pode exceder 25% do momento necessário para se ter uma ligação com resistência total. Uma ligação é classificada com resistência total quando apresenta um momento resistente igual ou superior aos momentos resistentes dos elementos ligados. Se o momento resistente da ligação se encontrar entre os dois extremos ($0,25M_{j,Rd}$ e $M_{j,Rd}$) diz-se que a ligação tem resistência parcial.

2.1.3 Classificação consoante a ductilidade

O conceito da ductilidade trata a questão da capacidade de rotação de uma ligação, ou seja, a rotação que a ligação pode sofrer em torno de um eixo, sem que se forme um mecanismo plástico nos membros adjacentes. Este conceito é relativamente novo pelo que o Eurocódigo 3 ainda não apresenta limites exatos que possibilitem a classificação da ligação no âmbito da ductilidade. No entanto, foram já apresentadas sugestões de classificação como é o caso de Simões da Silva et al. (2002). Relativamente à ductilidade, as ligações são divididas em dúcteis, semi-dúcteis e frágeis.

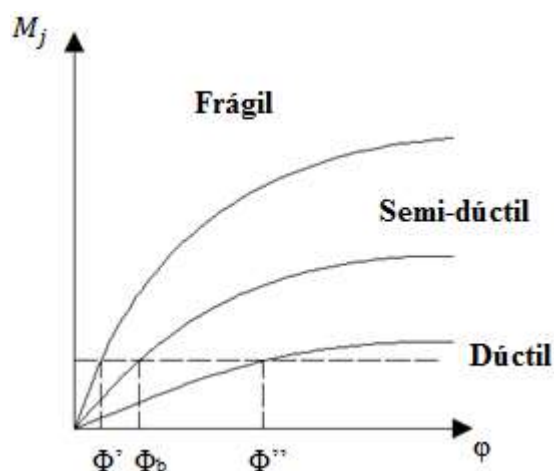


Figura 2.4 – Classificação de ligação consoante a ductilidade (Simões da Silva et al.,2002)

Considera-se dúctil uma ligação que possua capacidade rotacional suficiente para permitir a formação de um mecanismo plástico nos elementos conectados sem comprometer a integridade da ligação. Em contraste, uma ligação frágil só pode ser usada num dimensionamento elástico pois não permite redistribuição de esforços. As ligações semi-dúcteis enquadram-se entre estes dois extremos.

2.2 Tipologias correntes de ligações viga-pilar

Nas últimas décadas foram desenvolvidos vários tipos de ligação viga-pilar, sendo algumas apresentadas na figura 2.5. Tal como foi descrito anteriormente, a cada uma das ligações está associado um comportamento quer em termos de resistência quer em termos de rigidez. Deste modo, o projetista tem à sua disponibilidade um leque de opções para mais precisamente aproximar o comportamento da estrutura real ao modelado nos cálculos de projeto (Resende, 2009).

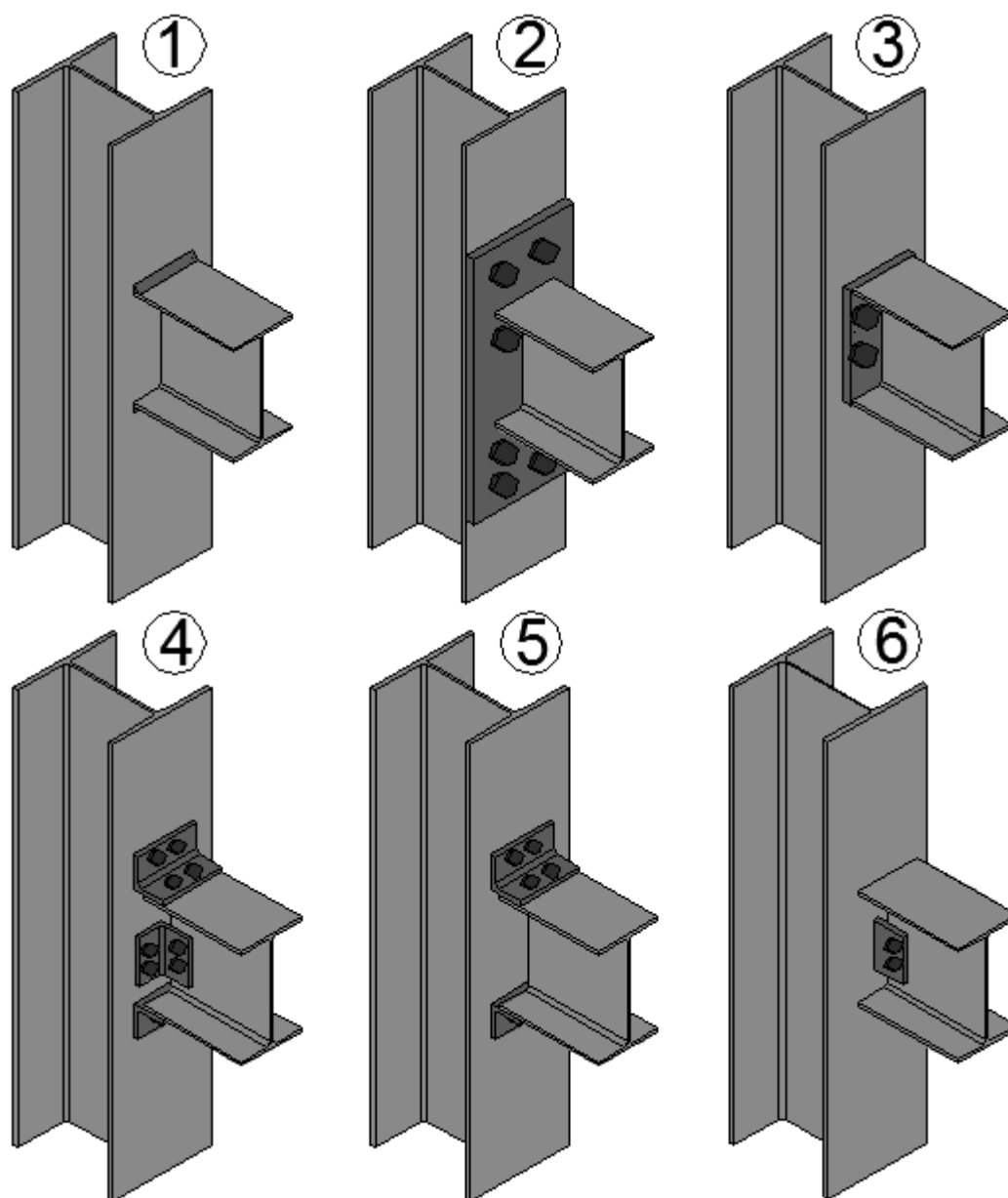


Figura 2.5 - Tipologias correntes de ligações viga-pilar

Quando sujeitas às ações aplicadas na estrutura, as ligações apresentadas na figura 2.5 irão responder de forma diferente. Ou seja, consoante o momento fletor aplicado, a ligação sofre uma rotação que depende de caso para caso. Ao longo dos anos foram efetuados estudos que incidiram sobre estas ligações permitindo, assim, a obtenção por via analítica da curva momento-rotação não linear de cada uma delas, cujo traçado é apresentado na figura 2.6.

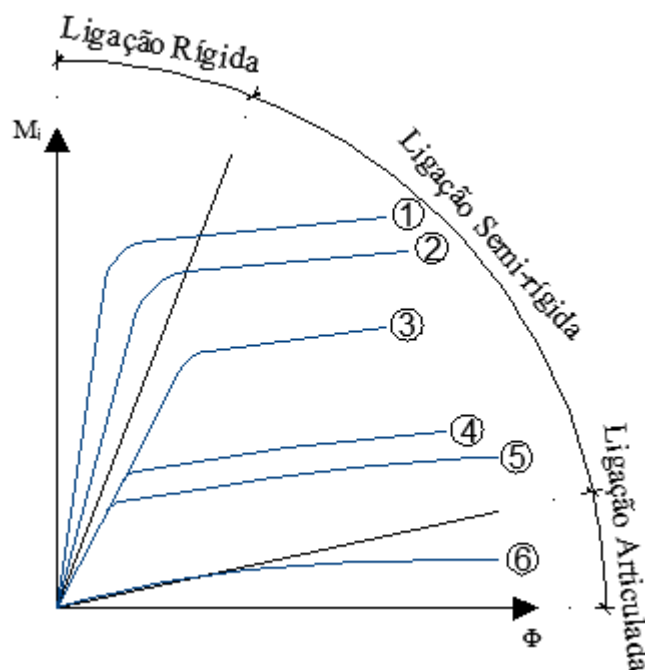


Figura 2.6 - Relação M- ϕ das ligações apresentadas na figura 2.5

Por observação da figura 2.6 facilmente se verifica a rigidez elevada que a ligação do tipo 1 oferece, o que é característico das ligações soldadas. Com uma rigidez inferior a esta, mas fazendo ainda parte do lote das ligações rígidas, existem as ligações do tipo 2, constituídas por uma chapa de extremidade soldada à viga e aparafusada aos banzos do pilar. A referida rigidez é conseguida essencialmente pela fiada de parafusos existente na parte superior da chapa pois, sendo esta maior que a viga, o braço de forças é superior o que origina um $M_{j,Rd}$ maior do que, por exemplo, uma ligação de tipo 3, em que as dimensões da chapa são as mesmas da seção da viga.

As ligações de tipo 4 e 5 apresentam algumas semelhanças na medida em que utilizam cantoneiras que fornecem estabilidade horizontal e vertical à ligação. No entanto, a ligação do tipo 4 apresenta maior rigidez pois, para além de cantoneiras de banzo, conta também com a presença de cantoneiras de alma. A ligação do tipo 6 é efetuada através de uma chapa de alma que é soldada ao banzo do pilar e aparafusada à viga, esta permite a rotação da viga essencialmente pelo espaço existente entre a viga e o pilar. A ligação de tipo 6 classifica-se então como rotulada sendo que, de entre as seis ligações apresentadas na figura 2.5, é a que apresenta menor rigidez.

No primeiro parágrafo deste subcapítulo referiu-se que o projetista, no que às ligações viga-pilar diz respeito, tem um leque de soluções disponíveis. Note-se, porém, o facto de que quando se trata de uma ligação entre um perfil tubular e um perfil aberto este leque diminui,

sendo ainda menor quando se trata de uma ligação entre dois perfis tubulares. É no âmbito da procura por uma solução que tire o melhor partido dos perfis tubulares, que surge uma nova tipologia de ligação, correspondente à que é estudada na presente dissertação. Esta ligação encontra-se descrita com pormenor no subcapítulo seguinte.

2.3 Tipologia da ligação em estudo

A principal dificuldade de execução de uma ligação aparafusada entre dois perfis tubulares prende-se com a questão do aparafusamento apenas possibilitado pelo exterior, visto tratar-se de uma seção fechada. Existe já uma nova tecnologia para aparafusamento do tipo “*blind bolting*” que permite o aparafusamento com acesso apenas por um dos lados, no entanto, trata-se de um sistema mais oneroso que as convencionais ligações aparafusadas (Simões & Santiago, 2003).

Apesar desta limitação, na maior parte das situações, as ligações aparafusadas continuam a ser de utilização vantajosa e económica quando comparadas com ligações efetuadas por soldadura. Os principais tipos de ligações aparafusadas em estruturas de perfis ocos são: ligações aparafusadas tipo “joelho”, com cantoneiras de topo, com empalme, com extremidades em forquilha, pernos roscados, aparafusamento atravessando o perfil oco, aparafusadas com extremidades achatadas, apoio rotulado, bases de pilares, aparafusamento de várias componentes e parafusos colocados através de orifícios de acesso (CIDECT, 1995).

Ao longo do tempo, a necessidade de encontrar uma solução que fosse capaz de oferecer uma rigidez adequada, aliada a outros fatores, permitiu que se chegasse a uma ligação que recorre a um elemento denominado por “reverse channel”, que não é mais do que uma parte de uma seção SHS, providenciando assim o espaço para o aperto dos parafusos (figura 2.7). Segundo ensaios efetuados até então, uma ligação deste tipo parece dar a melhor combinação entre custo de construção, capacidade para resistir a forças de tração resultantes do efeito de catenária, para além da excecional capacidade de rotação permitida através da deformação da alma do “reverse channel” (Heistermann, 2013).

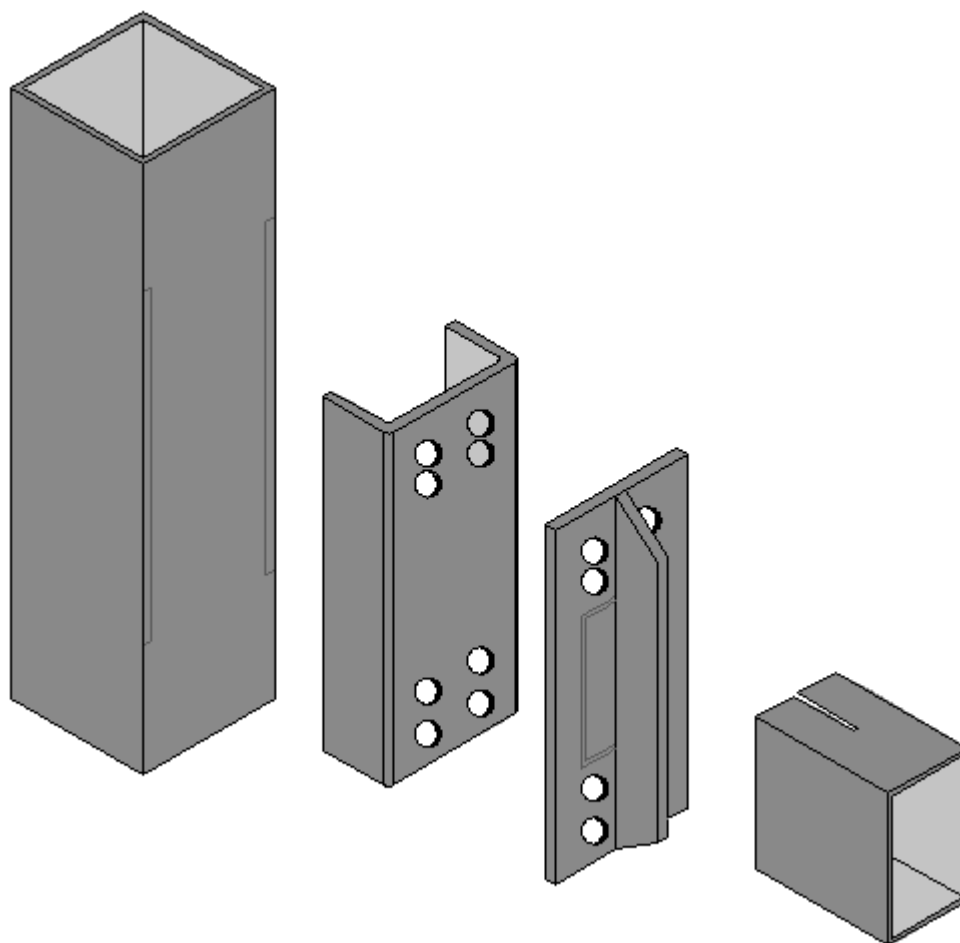


Figura 2.7 – Elementos constituintes da ligação (da esquerda para a direita: coluna, “reverse channel”, chapa de topo e viga)

Se a viga fosse constituída por uma seção, por exemplo, do tipo IPE, permitia uma fiada de parafusos abaixo do banzo superior, desta forma, o reforço existente na chapa de topo poderia ser evitado. No entanto, por imposição de um parceiro do projeto FRAME UP a viga é constituída por uma seção RHS. O facto deste elemento ser constituído por uma seção tubular justifica a necessidade do reforço, é desta forma que a primeira linha de parafusos é considerada efetiva.

Em fábrica, os banzos do “reverse channel” são soldados ao pilar de seção tubular e, da mesma forma, a viga é ligada à chapa de topo, evitando assim as dificuldades existentes em efetuar soldadura em obra. Na fase de construção, o reverse channel é aparafusado à chapa de topo, constituindo assim a ligação final apresentada na figura 2.8.

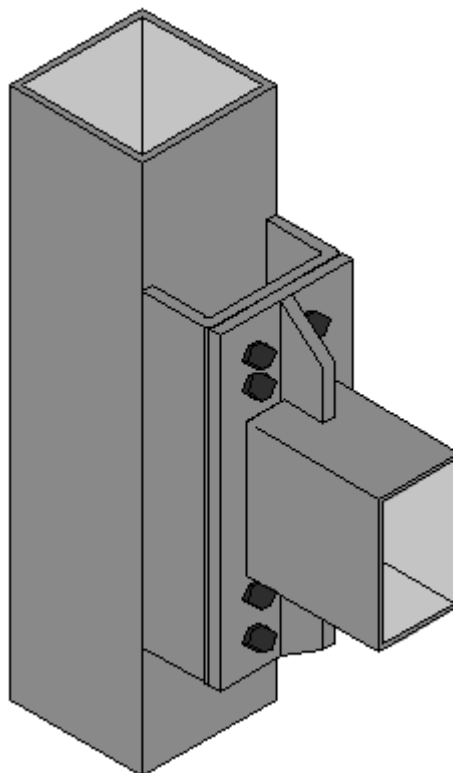


Figura 2.8 – Ligação viga-pilar com “reverse channel”

Tendo em conta a classificação de ligações descrita anteriormente, uma ligação deste tipo é classificada como sendo semi-rígida e de resistência parcial. Ora, por sobreposição dos gráficos presentes nas figuras 2.2 e 2.3, é possível ter uma noção da zona onde esta se deve integrar (figura 2.9). Para além das vantagens já associadas a ligações deste tipo (semi-rígidas e de resistência parcial), esta tem também assumido como uma boa solução em termos de ductilidade.

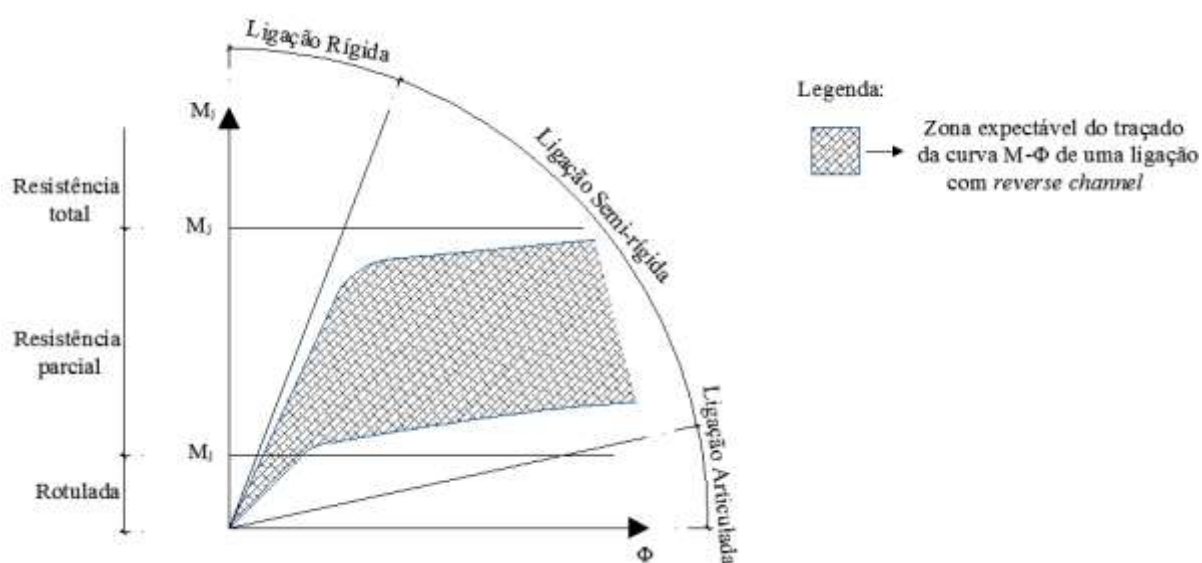


Figura 2.9 - Representação esquemática da zona onde se enquadrará a curva $M-\phi$ de uma ligação com reverse channel

Muito embora as ligações semi-rígidas terem vindo a apresentar um comportamento competitivo, estas apresentam algumas dificuldades, nomeadamente relacionadas com a impossibilidade de calcular a ligação sem os esforços da estrutura, e ao mesmo tempo, calcular a estrutura sem as características da ligação. Uma ligação semi-rígida implica, assim, a necessidade de um cálculo iterativo.

2.4 Estudos recentes baseados em ligações com “reverse channel”

Devido ao potencial apresentado pela ligação com “reverse channel”, alguns estudos têm sido feitos com o intuito de conhecer a resistência e a capacidade de rotação da ligação. No entanto, os estudos efetuados até agora debruçam-se essencialmente sobre ligações entre colunas tubulares e vigas constituídas por perfis abertos.

Os primeiros estudos realizados com base numa ligação deste tipo foram efetuados por Jones (2008). Tratava-se de uma ligação entre uma viga de seção aberta e um pilar de seção tubular, ao qual o “reverse channel” soldado (figura 2.10). Foram efetuados quatro testes de forma a identificar os modos de rotura dos elementos ligados, porém, não foi dada nenhuma atenção especial ao comportamento do RC.

Com base na mesma ligação, Ding e Wang (2009) realizaram um estudo que se debruçava sobre o comportamento estrutural e térmico da ligação. A partir deste, verificou-se que espessuras menores por parte do “reverse channel” são preferíveis pois conduzem a uma maior ductilidade da ligação. Mais tarde, e ainda baseando-se na mesma tipologia de ligação,

Elsawaf, Wang e Mandal (2011) efetuaram uma análise numérica em elementos finitos (figura 2.10 c) para além de alguns estudos paramétricos que os levaram a concluir que a espessura do “reverse channel” tem uma influência direta na capacidade resistente da ligação.

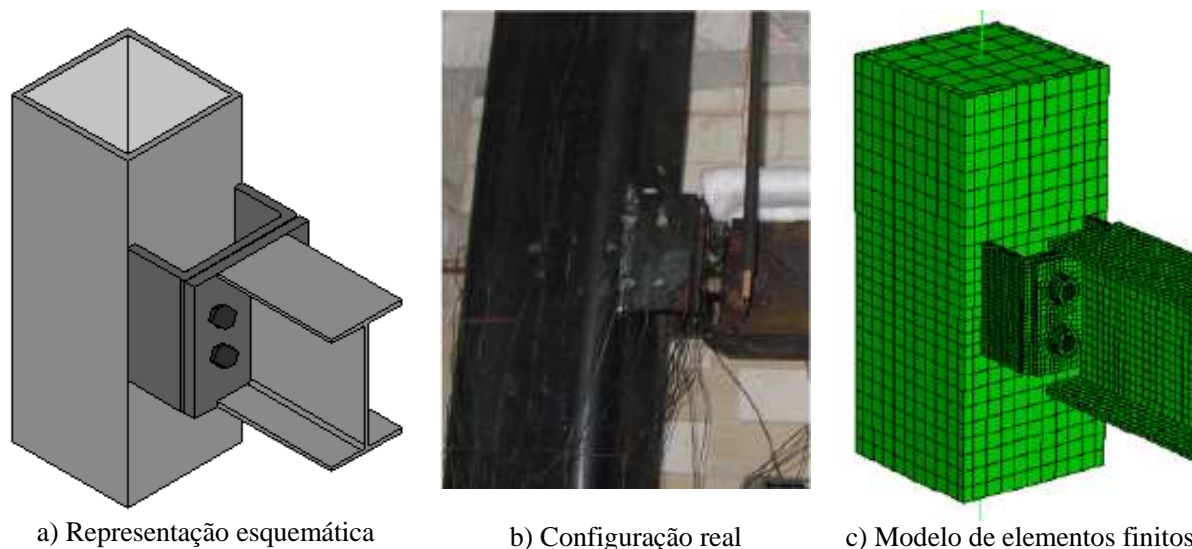


Figura 2.10- Ligação que serviu de base aos estudos de Ding e Wang

Málaga-Chuquitaype e Elghazouli (2010) realizaram um total de dez testes, numa ligação com características do tipo da que é apresentada na figura 2.11, sendo que em metade destes a ligação estava sujeita a uma carga monotónica, e nos restantes, a ligação estava sujeita a cargas cíclicas. Durante os testes mediram-se rotações na ordem dos 120 mrad, pelo que uma vez mais se torna evidente a grande capacidade de rotação que uma ligação deste tipo oferece. A partir destes ensaios, identificou-se um mecanismo de rotura que permitiu que fosse proposta uma metodologia de dimensionamento que permitia o cálculo da resistência do “reverse channel” à tração bem como da rigidez inicial da ligação.

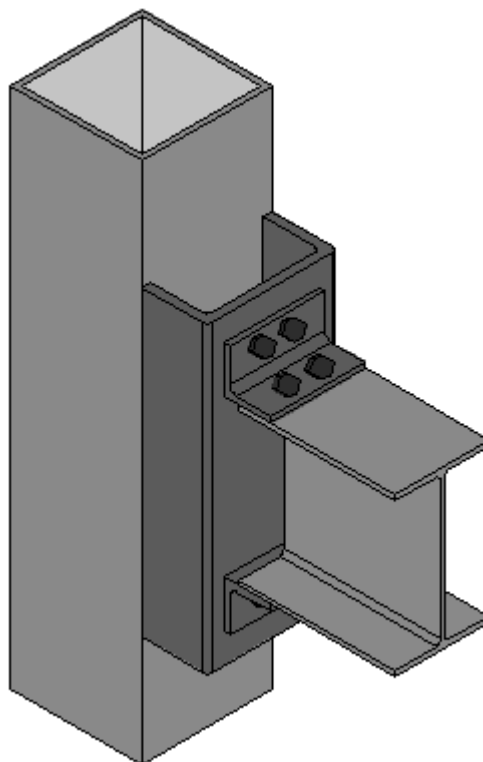


Figura 2.11- Ligação que serviu de base aos testes de Málaga-Chuquitaype e Elghazouli

Em conjunto com Liu, Málaga-Chuquitaype e Elghazouli (2012), sujeitaram a mesma ligação ao esforço transversal e levaram a cabo três ensaios; realizaram ainda um modelo de elementos finitos através do qual concluíram que a espessura do “reverse channel” tem uma influência direta na rigidez e na capacidade da ligação, tal como aconteceu para a ligação apresentada na figura 2.10. Foram ainda realizados ensaios onde a ligação estava sujeita a esforços de compressão e tração, os quais permitiram a identificação de mecanismos de rotura que. Através destes, foi possível criar propostas para a quantificação da resistência e da rigidez de alguns componentes, para os quais ainda não existe formulação nas normas europeias. Para além disso, com a ajuda de um modelo numérico, o cálculo da rigidez da ligação, proposto anteriormente por Málaga-Chuquitaype e Elghazouli (2010), foi alterado.

Na Universidade de Coimbra, Lopes et al. (2013) realizou 21 testes com diferentes tipologias de ligação com “reverse channel” a temperatura ambiente, onde esta se encontrava sujeita a esforços axiais de compressão e tração. Em todos os testes verificou-se que, quando a ligação se encontra sujeita à tração, o modo de rotura ocorre pelo punçoamento dos parafusos na alma do RC. Por outro lado, quando a ligação se encontra sujeita à compressão, constata-se a rotura pelo corte do “reverse channel” na zona da interseção entre a alma e os banzos. Lopes (2013) concluiu que a seção do “reverse channel”, por si só, oferece uma resistência mais alta à

compressão do que à tração, sendo que a diferença é de cerca de três vezes. Para além disso, levou à importante conclusão de que a metodologia sugerida por Jaspert (2005) que consiste na aplicação do método das componentes ao cálculo de uma ligação entre dois elementos, sendo que um deles é constituído por uma seção fechada, não se aplica ao caso em questão.

Realizaram-se ainda, por autoria de Jafarian e Wang (2012), nove ensaios a temperatura ambiente e a temperatura elevada, onde foram observadas três padrões de rotura: cedência da primeira linha de parafusos, formação de linhas de rotura ao longo do RC e rotura pelos parafusos. Para além destes, realizaram-se 12 testes com vista ao estudo da componente da alma do pilar à tração e à compressão, a partir dos quais se verificou, essencialmente, rotura pela soldadura.

Foram ainda realizados estudos relativos às características momento-rotação de uma ligação a um pilar de seção tubular com “reverse channel”, sendo que esta segue a mesma tipologia exposta na figura 2.10 a). Estes foram conduzidos por Wang e Li (2013), e permitiram a verificação da semi-rigidez da ligação bem como da resistência parcial que esta oferece. O modo de rotura que ocorreu num maior número de vezes iniciava-se essencialmente pela criação de linhas de rotura na interseção dos banzos do RC com a alma. No âmbito da sua tese de doutoramento, Li (2013) desenvolveu ainda uma metodologia baseada no princípio dos trabalhos virtuais para o cálculo da resistência da alma do “reverse channel” à tração.

Gomes (1996), Simões da Silva (2003) e Neves (2005), propuseram alguns modelos para a rigidez da alma do pilar, sujeita à compressão e à flexão, no contexto de ligações entre perfis IPE e RHS. Estes modelos estão, atualmente, presentes no CIDECT (2005).

Simões (2013), realizou uma primeira abordagem analítica à tipologia de ligação apresentada na figura 2.8. De forma a quantificar a resistência e rigidez das componentes “alma do RC à tração” e “alma do RC à compressão” o autor baseou-se na metodologia proposta no CIDECT (2005). Em género de conclusão, Simões (2013) refere que expressões utilizadas não providenciam uma boa solução para o cálculo da resistência do “reverse channel” uma vez que foram deduzidas a partir de uma ligação diferente da que foi estudada. Em relação à rigidez, a formulação do CIDECT para cálculo desta não pode ser aplicada na medida em que a ligação não cumpre os requisitos impostos para aplicação desta.

Mais recentemente, no âmbito do projeto COMPFIRE, foi proposto à Universidade de Sheffield o estudo da rigidez inicial resultante da junção entre o RC e a chapa de topo. Estes, baseando-se no pressuposto de que o comportamento do “reverse channel” é similar ao de um pórtico rígido, apresentaram uma aproximação para a relação força-deslocamento da ligação; no entanto, ainda nenhuma expressão foi sugerida.

Em suma, apesar de existirem já alguns estudos que incidiram sobre ligações com “reverse channel”, não existe ainda uma regulamentação que possa ser seguida no dimensionamento de uma ligação deste tipo. As metodologias existentes até agora foram obtidas com base em ligações que, embora idênticas, apresentam características diferentes da ligação que se pretende estudar. Quer a ligação presente na figura 2.8a, quer a ligação presente na figura 2.10 a), quer a ligação em estudo (figura 2.8), respondem de forma diferente quando lhe são aplicadas solicitações. Por conseguinte, existe a incerteza de se poder utilizar as fórmulas existentes até agora para as ligações das figuras 2.10 a) e 2.11, à ligação presente na figura 2.8. É, sobretudo, como objetivo de combater esta incerteza, que surge a presente tese.

3 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO ANALÍTICO

3.1 Introdução

O método de cálculo proposto pelo regulamento europeu – Eurocódigo 3 - parte 1-8, para o dimensionamento de ligações, é o método das componentes. Conceptualmente, o método assenta na identificação de trajetórias distintas para as forças de tração, compressão e corte permitindo, desta forma, a divisão da ligação e o estabelecimento de analogias com componentes mais fáceis de analisar.

O processo de cálculo correspondente ao método das componentes desenvolve-se ao longo de três fases distintas. A primeira fase consiste na identificação das componentes ativas na ligação, a qual é seguida pela caracterização mecânica de cada uma. Uma vez definidas as características mecânicas das componentes, pode passar-se à terceira fase que diz respeito à associação das componentes com o objetivo do cálculo da resistência, $M_{j,Rd}$, da rigidez, $S_{j,ini}$, e da capacidade de rotação da ligação Φ_{cd} .

3.2 Identificação das componentes ativas

Tal como foi descrito no capítulo anterior, a primeira fase consiste na identificação das componentes ativas na ligação, sujeitas à compressão, à tração e ao corte. Para uma melhor perceção destas componentes deve ser consultada a figura 3.1.

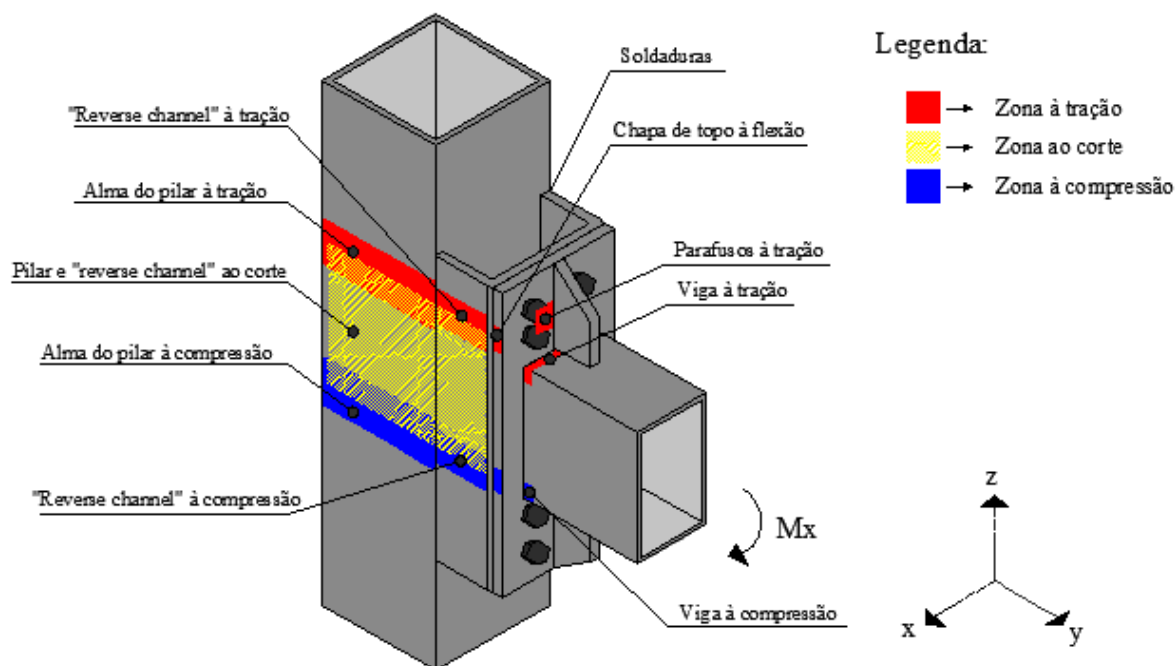


Figura 3.1 – Identificação das componentes

Entre as componentes apresentadas na figura 3.1, destacam-se as que não são previstas no Eurocódigo 3. O elemento “reverse channel”, numa ligação deste tipo sujeita a momento fletor, induz o surgimento das componentes “alma do reverse channel à tração” e “alma do reverse channel à compressão”. Estas são as componentes às quais será dado ênfase neste capítulo, visto que não constam no Eurocódigo 3. O cálculo analítico terá como base metodologias propostas recentemente por Li (2012) e Liu et al. (2012).

A contribuição dos banzos do reverse channel para a resistência e rigidez da ligação deve ainda ser quantificada. Ainda que de forma aproximada, a resistência e rigidez destes elementos foi quantificada por aplicação do Eurocódigo 3 como se de uma “alma do pilar à tração transversal” se tratasse. As restantes componentes apresentadas na figura 3.1 são previstas no Eurocódigo 3.

3.3 Caracterização dos componentes resistentes ao momento fletor

3.3.1 Zona de tração

➤ Soldadura

A componente apresentada é uma das que requer mais atenção num projeto de ligações pelo facto de estar associada a uma rotura frágil, logo, um tipo de rotura a evitar. Na ligação em estudo o “reverse channel” é soldado ao pilar por penetração total; de igual forma a chapa de

topo é soldada ao reforço e à viga. A soldadura existente entre o reforço e a viga é efetuada por penetração parcial (figura 3.2). Sabendo que a soldadura foi dimensionada com o intuito de ser mais resistente que as restantes componentes, foi possível descartá-la do cálculo, uma vez que também não é considerada na avaliação da rigidez. Desta forma, pode afirmar-se que a soldadura não corresponde à componente mais fraca.

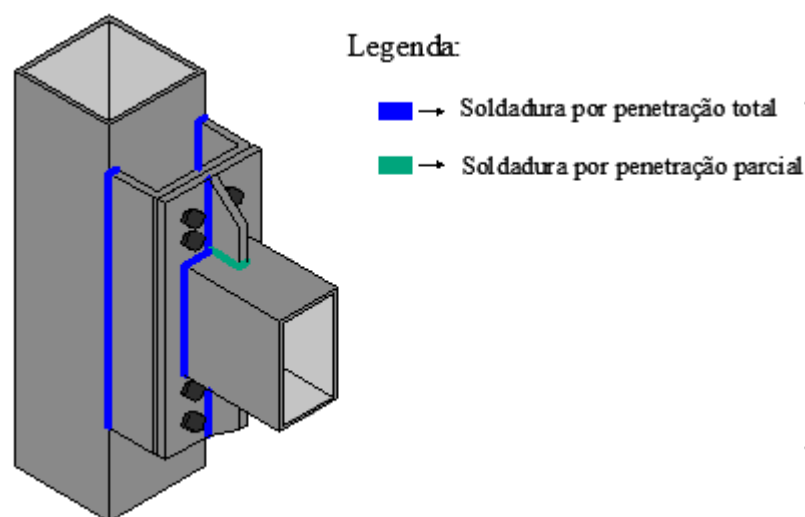


Figura 3.2 – Identificação das soldaduras

➤ Chapa de topo à flexão

Para quantificação da resistência de cálculo da chapa de topo à flexão, recorreu-se ao método do “*T-sub*” equivalente por se tratar de uma chapa que contém um reforço a meio. Este procedimento contempla três modos de rotura: o primeiro considera que a rotura se dá pela plastificação total da chapa, o segundo supõe uma rotura do parafuso com plastificação conjunta da chapa, o último modo parte do pressuposto que a rotura se dá pela tração dos parafusos. Para uma melhor perceção dos modos de rotura podem ser consultadas as figuras 3.3 a), 3.3 b) e 3.3 c), respetivamente.

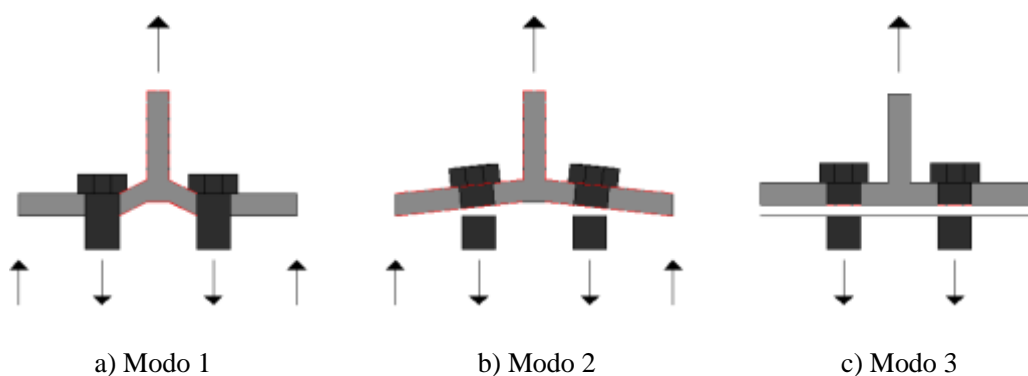
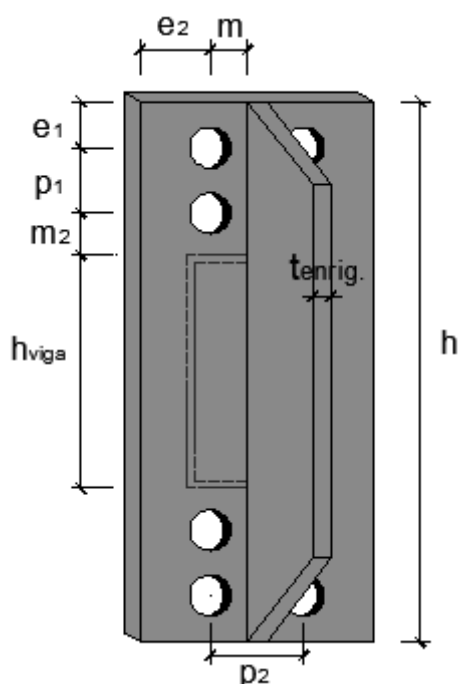


Figura 3.3 – Modos de rotura do “*T-Stub*”

O primeiro passo na quantificação da resistência relativa de cada um dos modos consiste no cálculo dos comprimentos efetivos, como tal deve recorrer-se ao quadro 6.5 do Eurocódigo 3 – parte 1.1, segundo este documento o comprimento efetivo é calculado de acordo com a localização da linha de parafusos em questão. Para que as equações que constam no quadro 6.5 do Eurocódigo 3 – parte 1.1 possam ser aplicadas livres de erros, é necessário que exista um esclarecimento claro acerca do cálculo do coeficiente α bem como das dimensões que constam na mesma tabela, definidas pelas letras: m , e_1 , e_2 e p_1 . As referidas dimensões devem ser calculadas com base na figura 3.4.



Soldadura por penetração total:

$$m = p_2 - \frac{t_{enrig.}}{2} \quad (1)$$

$$m_2 = \frac{h}{2} - \frac{h_{viga}}{2} - e_1 - p_1 \quad (2)$$

Soldadura por penetração parcial:

$$m_{st} = m - 0.8a\sqrt{2} \quad (3)$$

$$m_x = m_2 - 0.8a\sqrt{2} \quad (4)$$

Figura 3.4 – Definição dos parâmetros necessários no cálculo do l_{eff}

A soldadura entre o enrigecedor e a chapa de topo, bem como entre a viga e a chapa de topo é efetuada por penetração total, pelo que serão usados os valores de m e m_2 em vez de m_{st} e m_x . Ora, depois de definidos os valores que se encontram na figura 3.4, facilmente se determina o coeficiente α . Na figura 6.11 do EC3 – Parte 1-8, consta um ábaco que permite o cálculo deste coeficiente.

Para cada um dos modos apresentados na figura 3.3, o Eurocódigo indica uma equação que leva ao valor de cálculo da resistência de cada um destes.

Modo 1:

Modo 2:

Modo 3:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} \quad (5) \quad F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{T,Rd}}{m + n} \quad (6) \quad F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (7)$$

Sendo: $M_{pl,1,Rd}$, $M_{pl,2,Rd}$ e $F_{t,Rd}$ calculados de acordo com o apresentado no quadro 6.2 do EC3 – Parte 1-8.

Definidas as resistências de cálculo para cada um dos modos, obtém-se então a resistência de cálculo do componente “chapa de topo à flexão”, a qual é dada por:

$$F_{T,Rd} = \text{mínimo} (F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}) \quad (8)$$

A rigidez do componente “chapa de topo à flexão” foi calculada de acordo com o apresentado no quadro 6.11 do EC3 – parte 1-8, através da seguinte expressão:

$$k_5 = \frac{0.9l_{eff}t_p^3}{m^3} \quad (9)$$

O mesmo quadro fornece uma expressão para o cálculo da rigidez correspondente à componente “parafusos à tração”, a qual se apresenta de seguida:

$$k_{10} = \frac{1.6A_s}{L_B} \quad (10)$$

➤ Viga à tração

O quadro 6.1 do Eurocódigo 3 – parte 1.8 sugere que se apliquem as regras de cálculo que constam na cláusula 6.2.6.7 deste mesmo documento, para o cálculo da componente “viga à tração”. Segundo esta cláusula, admite-se que a resistência combinada entre o banzo e a alma da viga é dada pela seguinte expressão:

$$F_{t,b,Rd} = \frac{M_{pl,Rd}}{h_b - t_b} \quad (11)$$

➤ Alma do pilar à tração / Banzos do RC à tração

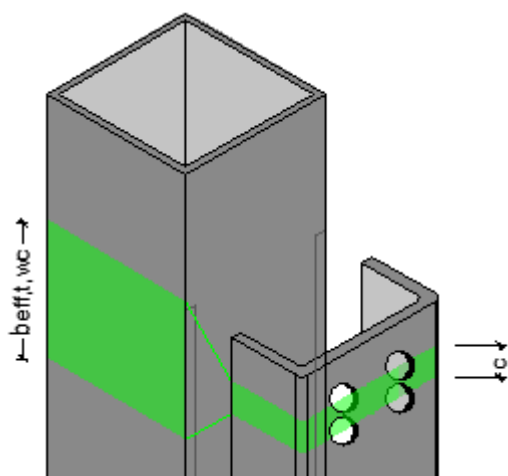
De acordo com o quadro 6.1 do Eurocódigo 3, onde se encontram presentes as componentes básicas das ligações, deve seguir-se o disposto na cláusula 6.2.6.3 para a quantificação da resistência de cálculo da componente “alma do pilar em tração transversal”, a referida cláusula sugere a seguinte equação:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (12)$$

A mesma expressão foi utilizada para o cálculo da resistência dos banzos do “reverse channel” à tração. O coeficiente ω apresentado na expressão anterior tem em conta os

eventuais efeitos do esforço de corte no painel e deve ser determinado com base no quadro 6.3 do EC3 – parte 1.8. Ora, para que se consiga obter o coeficiente ω , alguns valores têm que ser definidos à priori como é o caso do coeficiente β , do comprimento efetivo $b_{eff,t,wc}$, e da área de corte A_{vc} . A tabela 5.4 do EC3 – parte 1.8 deve ser consultada para definição de β .

Relativamente à altura da zona tracionada utilizou-se o valor sugerido pelo CIDECT que tem em conta uma degradação de carga de 45° do “reverse channel” para o pilar, como se pode observar na figura 3.6.



Sendo:

$$c = 0.9d_m + p_1 \quad (13)$$

e

$$b_{eff,t,wc} = c + 5(t_c + r_c) \quad (14)$$

Figura 3.5 – Definição de $b_{eff,t,wc}$

Por fim, a área de corte da coluna deve ser definida através da expressão que se segue.

$$A_{vc} = \frac{A_c \times h_c}{(b_c + h_c)} \quad (15)$$

A área de corte do “reverse channel” é calculada da mesma forma, no entanto, deve ser dividida por dois, visto que a seção se trata de metade de um RHS.

A rigidez da componente “alma do pilar à tração” foi calculada de acordo com o apresentado no quadro 6.11 do EC3 – parte 1-8, através da seguinte expressão:

$$k_{3,c} = \frac{0.7b_{eff,t,wc}t_{wc}}{d_c} \quad (16)$$

Note-se que a mesma expressão pode ser utilizada para quantificação da rigidez do componente “banzos do RC à tração”, sendo $k_{3,rcl}$ o coeficiente que a representa.

➤ Alma do “reverse channel” à tração

Com a incorporação de um novo elemento na ligação - o “reverse channel”, novas componentes surgem. Na zona de tração é necessário quantificar a componente “alma do reverse channel à tração”, de forma a cumprir este objetivo seguiram-se duas metodologias, a primeira proposta por Xue Li (2012) e a segunda proposta por Liu, Chuquitaype e Elghazouli (2012).

Os testes efetuados por Li (2012) levaram à conclusão de que a alma do “reverse channel” oferece menor resistência que os banzos do elemento, o que acontece não só devido ao facto dos banzos apresentarem maior espessura mas também por estar associada à alma um modo de rotura menos eficiente (nos banzos a rotura ocorre por esforço axial, contrariamente à rotura da alma que ocorre por corte). Quando a ligação está sujeita ao conjunto de esforços que provêm da viga, o “reverse channel” fica sujeito a um conjunto de forças horizontais que podem ser consideradas como atuantes no centro dos parafusos, originando flexão no plano da alma e forças de corte na interação entre os banzos e a alma do RC. Sob estas cargas, identificaram-se três mecanismos de rotura possíveis (figura 3.7).

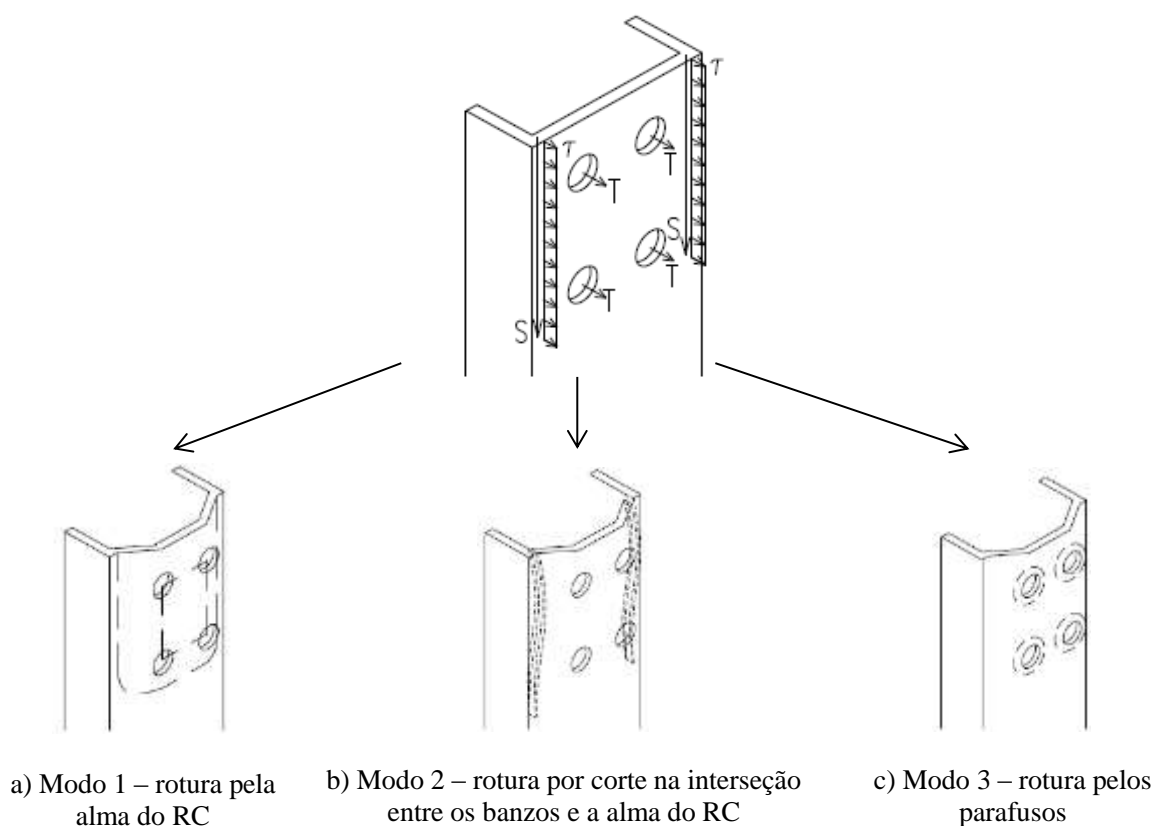
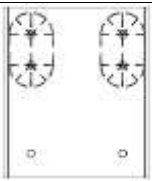

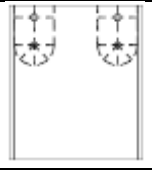
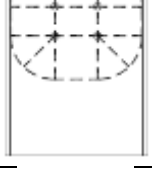
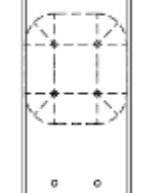
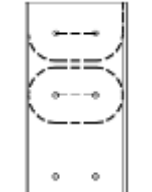


Figura 3.6 – Forças T e S, e tensões τ , atuantes na alma do reverse channel e modos de rotura possíveis quando sujeito a estas forças (Li, 2012)

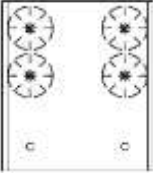
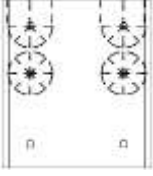
A verificação do modo de rotura 1 torna-se um pouco mais complexa que a dos modos restantes, visto que é necessário ter em conta vários padrões de linhas de rotura que se podem formar. Atenta na deformação da alma do reverse channel, e com base no Princípio dos Trabalhos Virtuais, a autora desenvolveu as equações necessárias à quantificação da força mínima associada a cada padrão de rotura. Na tabela 3.1 apresentam-se os modos de rotura resultantes da consideração do funcionamento dos parafusos em grupo.

Tabela 3.1 – Tabela resumo dos possíveis padrões de rotura em grupo referentes ao modo de rotura 1

Padrão de rotura	Primeira linha de parafusos	Segunda linha de parafusos	
M1 - PG1		$T = 2m_{p,rcw} \left(\pi + \frac{2m_x}{e_0} \right)$	Igual à primeira linha
M1 - PG2		$T = 2m_{p,rcw} \left(\pi + \frac{2m}{e_0} \right)$	Igual à primeira linha
M1 - PG3		$T = 2m_{p,rcw} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{e_x}{e_0} + \frac{2m_x}{e_0} \right)$	Igual à primeira linha
M1 - PG4		$T = m_{p,rcw} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{e_x}{e_0} + \frac{m}{e_0} + \frac{2m_x}{e_0} \right)$	Igual à primeira linha
M1 - PG5		$T = m_{p,rcw} \left(\pi + \frac{2m}{e_0} + \frac{2m_x}{e_0} \right)$	Igual à primeira linha
M1 - PG6		$T_1 = m_{p,rcw} \left(\pi + \frac{2e_x}{e_0} + \frac{2m}{e_0} \right)$	$T_2 = 2m_{p,rcw} \left(\pi + \frac{2m}{e_0} \right)$

No entanto, a distância horizontal entre parafusos pode ser suficientemente larga para que se formem padrões de rotura individuais. Neste caso, pode ocorrer uma das duas situações apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tabela resumo dos possíveis padrões de rotura individuais referentes ao modo de rotura 1

Padrão de rotura	Primeira linha de parafusos	Segunda linha de parafusos
M1 - PI1		Igual à primeira linha
M1 - PI2		

Na sequência das tabelas 3.1 e 3.2, surge a figura 3.8 onde se representam as dimensões e_x , e_0 , m_x e m . Para além destas, nas tabelas 3.1 e 3.2 referencia-se $m_{p,rcw}$, que corresponde ao momento plástico da alma do “reverse channel” por unidade de comprimento e que pode ser calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$m_{p,rcw} = \frac{1}{4} t_{rcw}^2 f_{y,rcw} \quad (17)$$

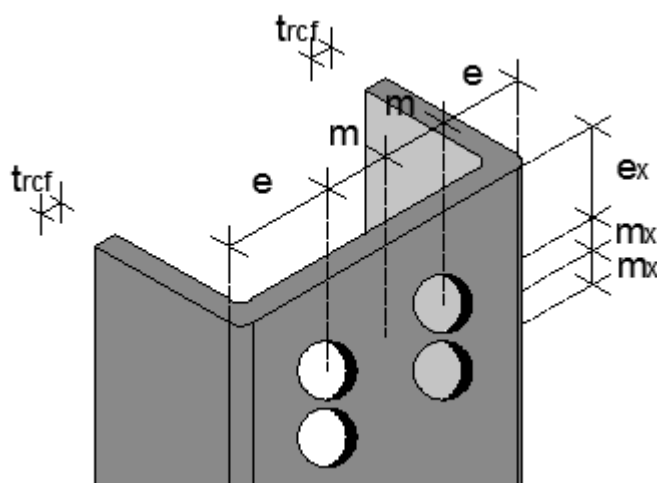


Figura 3.7 – Dimensões relevantes do “reverse channel”

A metodologia analítica proposta por Li (2012), quando comparada com os resultados experimentais obtidos pelo mesmo autor, revelou-se bastante conservativa sendo que o aumento de resistência verificado dos resultados analíticos para os resultados experimentais foi de cerca de 140%. No entanto, deve ter-se em atenção que nos cálculos analíticos foram efetuados com base na tensão nominal do material.

A segunda metodologia aplicada, sugerida por Liu et al. (2012), surge através de uma análise experimental onde sete provetes foram sujeitos a cargas cíclicas e monotónicas de tração e compressão. Os resultados observados mostraram três diferentes padrões de rotura, no entanto, o estudo realizado pelos autores incidiu no padrão de rotura que ocorreu mais vezes. Note-se que, apesar das expressões sugeridas por estes terem sido desenvolvidas com foco na resposta axial, a aplicação destas estende-se a uma ligação sujeita a momento fletor na medida em que este pode ser considerado como um binário de forças axiais com um braço igual à distância entre as linhas médias dos banzos da viga.

A resistência da alma do reverse channel à tração, segundo Liu et al. (2012), é dada pela seguinte expressão:

$$F_{t,rcw,Rd} = f_{y,rc} t_{rc}^2 \left(\frac{2R_m - d_0}{2R_m - d_m} \right) \left(\pi \frac{d_0 - R_m}{d_0 - 2R_m} + 2 \frac{i + 2L_c + d_0}{2R_m - d_0} \right) \quad (18)$$

Na expressão 18, as constantes R_m , d_0 , d_m , i e L_c correspondem, respetivamente, ao raio do padrão circular de rotura, ao diâmetro do furo na peça para posterior encaixe do parafuso, ao diâmetro médio da cabeça do parafuso, à distância horizontal entre parafusos e à distância entre a primeira linha de parafusos e o topo da chapa. Para uma melhor perceção das referidas dimensões, apresenta-se a figura 3.9.

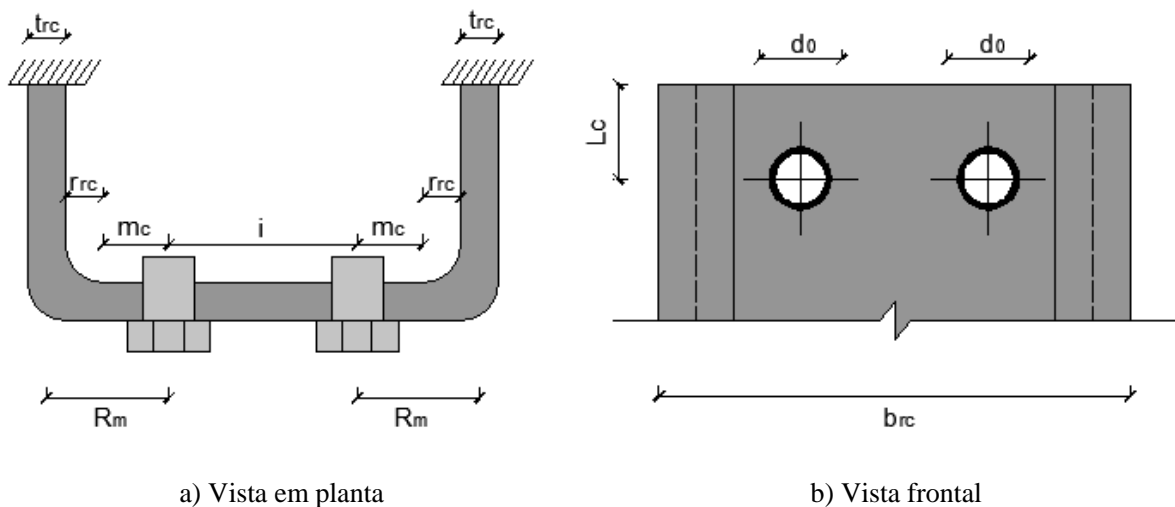


Figura 3.8. Representação esquemática do RC

O principal problema da aplicação da expressão de $F_{t,rcw,Rd}$ à ligação em questão prende-se com o facto de que esta foi deduzida com base numa ligação composta por uma única linha de parafusos acima do banzo tracionado da viga, contrariamente ao que acontece na ligação em análise, a qual é constituída por duas linhas de parafusos. Não havendo qualquer proposta para a quantificação da mesma componente para a segunda linha de parafusos, usou-se a mesma expressão existindo, no entanto, a noção de que a segunda linha de parafusos oferece maior resistência. Desta forma, a opção tomada encontra-se do lado conservativo.

Para além da sugestão de cálculo da resistência do componente tratado neste ponto, Chuquitaype e Elghazouli (2010) apresentaram ainda uma expressão que permite quantificar a rigidez deste componente, a mesma foi utilizada nos cálculos analíticos.

$$k_{rcw,t} = \frac{\pi t_{rcw}^3}{6(1 - \nu^2) C_t \left(\frac{b_{rc} - t_{rcw}}{2} \right)^2} \quad (19)$$

Na expressão anterior t_{rcw} corresponde à espessura da alma do reverse channel, ν corresponde ao coeficiente de poisson e b_{rc} corresponde à largura do RC. O coeficiente C_t surge na equação de modo a que a influência da distância entre a linha de parafusos considerada e a aresta superior da chapa de topo (L_c) seja tida em consideração.

$$C_t = Q_t (0.24 e^{\frac{0.3i}{m_c}}) \quad (20)$$

Sendo:

$$Q_t = 6L_c^{-4}, \text{ se } L_c < 100\text{mm} \quad (21)$$

$$Q_t = 1, \text{ se } L_c \geq 100\text{mm} \quad (22)$$

3.3.2 Zona de corte

- Alma do pilar e do “reverse channel” ao corte

A resistência ao corte da ligação é assegurada não só pela alma do pilar como também pelos banzos do “reverse channel”. Assim sendo, a área de corte considerada é dada pela seguinte expressão:

$$A_v = \frac{A_c \times h_c}{b_c + h_c} + \frac{1}{2} \times \frac{A_{rc} \times h_{rc}}{b_{rc} + h_{rc}} \quad (23)$$

A resistência oferecida pela componente em análise, de acordo com a cláusula 6.2.6.1 do Eurocódigo 3 – parte 1-8, é dada por:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0.9f_{y,wc}A_{vc}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (24)$$

A rigidez da componente foi calculada de acordo com o apresentado no quadro 6.11 do EC3 – parte 1-8, através da seguinte expressão:

$$k_1 = \frac{0.38A_v}{\beta_z} \quad (25)$$

3.3.3 Zona de compressão

- Alma do pilar à compressão / Banzos do RC à compressão

Por analogia à cláusula 6.2.6.2 do EC3 – 1-8, o cálculo da resistência à compressão oferecida pela alma do pilar pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (26)$$

Da mesma forma é possível calcular a resistência dos banzos do “reverse channel” à compressão. Em relação à expressão usada para quantificação dos mesmos elementos à tração, surge ρ , um novo parâmetro que introduz na expressão o efeito do enfunamento da chapa pelo que depende da esbelteza desta, λ_p .

$$\lambda_p = 0.932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{E t_{wc}^2}} \quad (27)$$

Assim, se:

$$\lambda_p \leq 0.72 \rightarrow \rho = 1.0 \quad (28)$$

$$\lambda_p > 0.72 \rightarrow \rho = \frac{(\lambda_p - 0.2)}{\lambda_p^2} \quad (29)$$

Os restantes parâmetros apresentados na expressão calculam-se de acordo com o já apresentado no ponto relativo à “alma do pilar à tração”.

A rigidez do componente “alma do pilar à compressão” foi calculada de acordo com o apresentado no quadro 6.11 do EC3 – parte 1-8, através da seguinte expressão:

$$k_{2,c} = \frac{0.7b_{eff,c,wc}t_{wc}}{d_c} \quad (30)$$

A mesma expressão foi utilizada na quantificação da rigidez dos bantos do “reverse channel” à compressão, sendo esta, posteriormente, designada por $k_{2,rcl}$.

➤ Viga à compressão

A presente componente foi quantificada da mesma forma que a componente “viga à tração”, tal como sugere o Eurocódigo 3.

$$F_{c,b,Rd} = \frac{M_{pl,Rd}}{h_b - t_b} \quad (31)$$

➤ “Reverse channel” à compressão

O “reverse channel” à compressão insere-se no leque das novas componentes que surgem com esta nova tipologia de ligação. À partida, não é das componentes mais fracas pelo que não acarreta grandes preocupações ao projetista. Estudos recentes têm demonstrado que a resistência oferecida pelo reverse channel à compressão é cerca de três vezes superior à resistência deste componente à tração.

O cálculo foi efetuado com base na metodologia proposta por Liu et al. (2012). Baseando-se nas possíveis deformações do elemento, os autores desenvolveram uma expressão que permite a quantificação desta componente para a deformação padrão que requer o mínimo de energia (figura 3.10).

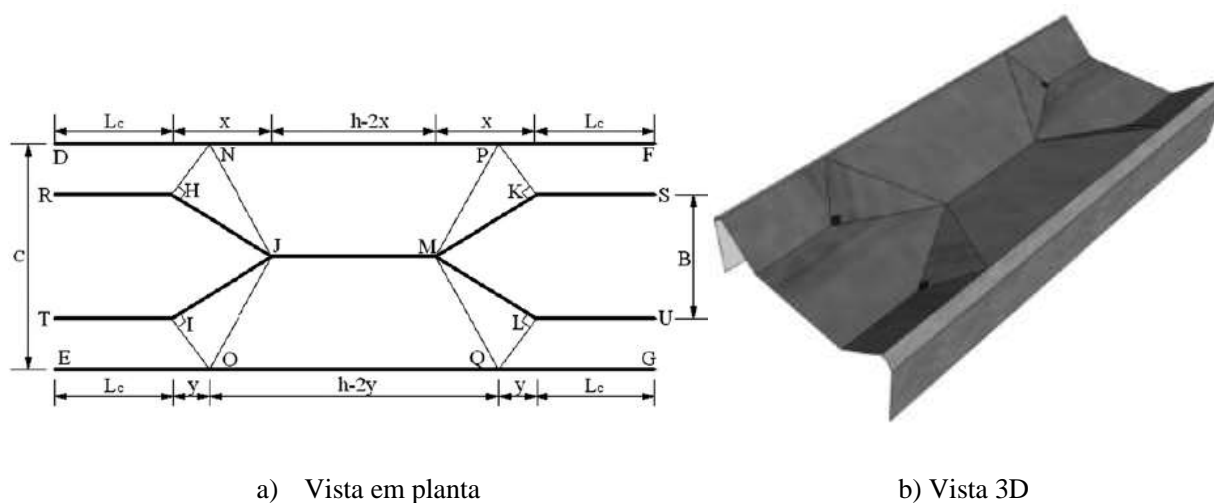


Figura 3.9 – Mecanismo de rotura da alma do RC à compressão (Liu et al., 2012)

Na figura anterior, a constante C representa a distância entre as linhas médias dos banzos do “reverse channel”, B representa a largura da viga, L_c representa a distância entre a linha média do banzo superior da viga e o topo da placa e h_b representa a altura da viga. A expressão que permitiu o cálculo da resistência do componente foi a seguinte:

$$F_{c,rcw,Rd} = 2f_{y,rc}t_{rc}^2 \left[\frac{2L_c}{C-B} + \sqrt{2} \frac{B}{C} + \frac{h_b}{C} \right] \quad (32)$$

De forma análoga ao que se sucedeu no cálculo da rigidez da alma do “reverse channel” à tração, calculou-se a rigidez da alma do “reverse channel” à compressão através da expressão proposta por Málaga-Chuquitaype e Elghazouli (2010) relativa à rigidez inicial de uma face de uma seção fechada.

$$k_{rcw,t} = \frac{\pi t_{rcw}^3}{6(1-\nu^2)C_c \left(\frac{b_{rc} - t_{rcw}}{2} \right)^2} \quad (33)$$

Note-se que as expressões relativas ao cálculo de $k_{rcw,t}$ e de $k_{rcw,c}$ são semelhantes, diferindo apenas no coeficiente empírico $C_{t/c}$. Neste caso, o coeficiente depende da largura da viga e do pilar adjacentes.

$$C_c = Q_c(0.30 \times \ln\left(\frac{C}{B}\right) + 0.03) \quad (34)$$

Sendo:

$$Q_c = 1, \text{ se } L_c > 100\text{mm} \quad (35)$$

$$Q_c = 7L_c^{-0.4}, \text{ se } L_c \leq 100\text{mm} \quad (36)$$

3.4 Caracterização das componentes resistentes ao esforço transversal da viga

Devido ao esforço transversal, surgem também algumas componentes (identificadas na figura 3.11), para as quais é necessário calcular a resistência.

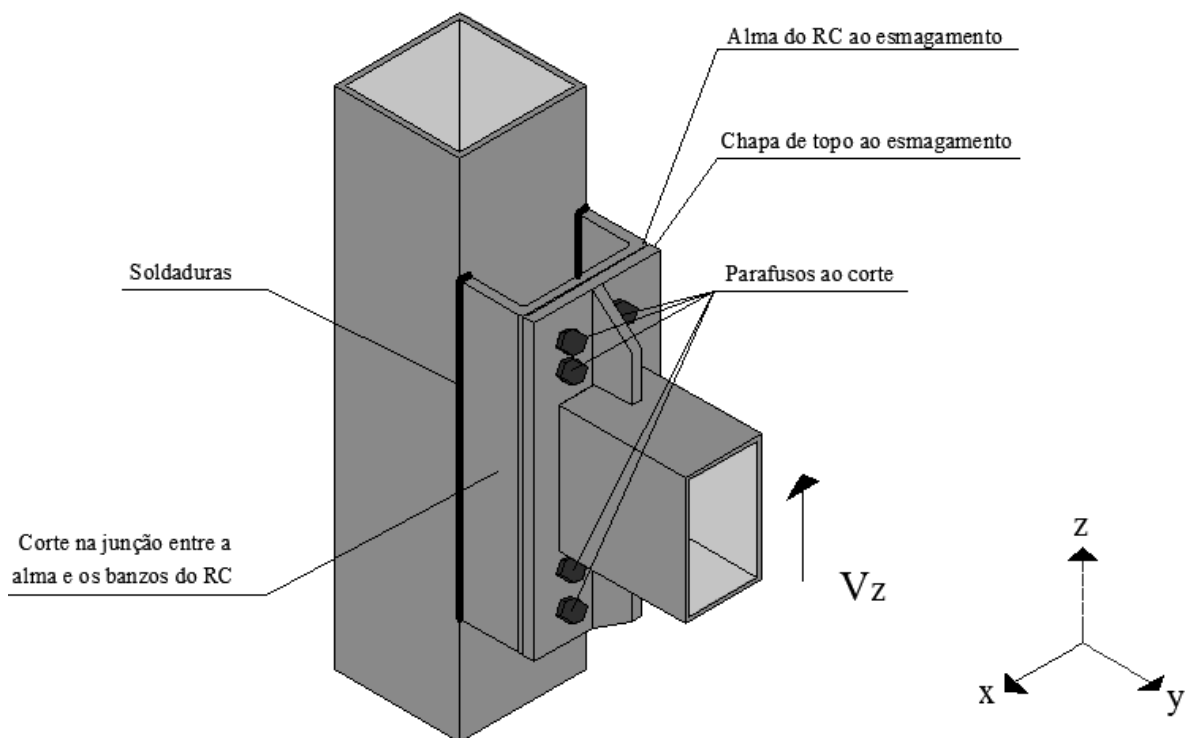


Figura 3.10 – Identificação dos componentes

A quantificação das componentes identificadas na resistência ao esforço transversal não obrigou a uma pesquisa adicional visto que o cálculo destes já se encontra no EC3 – parte 1-8. A componente referente à soldadura não será contabilizada pois, tal como descrito anteriormente, esta foi dimensionada com base na garantia de que não se trata da componente mais fraca.

➤ Parafusos ao corte

A quantificação do presente componente consiste na aplicação da seguinte expressão:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (37)$$

Sendo que A_s representa a área da seção resistente do parafuso quando o plano de corte atravessa a parte roscada do parafuso, ou representa a área da seção transversal bruta do parafuso quando o plano de corte atravessa a parte não roscada do parafuso. O coeficiente α_v varia consoante a classe do parafusos.

➤ Chapa de topo ao esmagamento / RC ao esmagamento

A equação seguinte encontra-se de acordo com o quadro 3.4 do EC3 – parte 1-8, através desta calculou-se a resistência da chapa e do “reverse channel” ao esmagamento.

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{ub} d t}{\gamma_{M2}} \quad (38)$$

Sendo que:

$$\text{- para parafusos de extremidade: } \begin{cases} k_1 = \text{mínimo} \left(2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7 ; 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7 ; 2.5 \right) \\ \alpha_b = \text{mínimo} \left(\frac{e_1}{3d_0} ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 2.5 \right) \end{cases} \quad (39)$$

$$\alpha_b = \text{mínimo} \left(\frac{e_1}{3d_0} ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 2.5 \right) \quad (40)$$

$$\text{- para parafusos interiores: } \begin{cases} k_1 = \text{mínimo} \left(1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7 ; 2.5 \right) \\ \alpha_b = \text{mínimo} \left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 2.5 \right) \end{cases} \quad (41)$$

$$\alpha_b = \text{mínimo} \left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 2.5 \right) \quad (42)$$

➤ Corte na junção entre a alma e os banzos do RC

Nas figuras 3.7 a), b), e c), apresentaram-se os modos de rotura identificados nos testes efetuados por Li (2012). Neste ponto, dar-se-á especial atenção ao modo de rotura 2, representado na figura 3.7 b), o qual ocorre quando a ligação se encontra sujeita a esforço de corte. Segundo a autora, não se verifica a rotura pelo componente quando verificada a seguinte condição:

$$\sqrt{\left(\frac{S}{t_{rcw} H_{rc}} \right)^2 + \left(\frac{nT}{t_{rcw} l_{eff,rcw}} \right)^2} \leq \frac{f_{y,rcw}}{\sqrt{3}} \quad (43)$$

Na expressão 43, os parâmetros S , t_{rcw} , H_{rc} , n , T e $l_{eff,rcw}$ representam:

- S : metade do valor do esforço transversal atuante na ligação
- t_{rcw} : espessura do “reverse channel”
- H_{rc} : altura do “reverse channel”
- n : número de linhas de parafusos;
- T : força representativa num parafuso;
- $l_{eff,rcw}$: comprimento efetivo do “reverse channel”, dado por $l_{eff,rcw} = 2e + (n - 1)p$

3.5 Associação das componentes

A associação das componentes ativas deve ser realizada para a rigidez e para a resistência, separadamente. No quadro seguinte apresenta-se um resumo da força resistente máxima bem como da rigidez associada a cada componente.

Tabela 3.3 – Identificação dos parâmetros de resistência e rigidez de cada componente

	Componente:	Resistência:	Rigidez:
Zona de tração	Chapa de topo à flexão	$F_{T,Rd}$	k_5
	Parafusos à tração	$F_{t,Rd}$	k_{10}
	Alma do pilar à tração	$F_{t,wc,Rd}$	k_{3c}
	Viga à tração	$F_{t,b,Rd}$	-
	Alma do “reverse channel” à tração	$F_{t,rcw,Rd}$	$k_{rcw,t}$
	Banzos do “reverse channel” à tração	$F_{t,rcl,Rd}$	$k_{3,rcl}$
Zona de corte	Alma do pilar e banzos do “reverse channel” ao corte	$V_{wp,Rd}$	k_1
Zona de compressão	Alma do pilar à compressão	$F_{c,wc,Rd}$	$k_{2,c}$
	Viga à compressão	$F_{c,b,Rd}$	-
	Alma do “reverse channel” à compressão	$F_{c,rcw,Rd}$	$k_{rcw,c}$
	Banzos do “reverse channel” à compressão	$F_{c,rcl,Rd}$	$k_{2,rcl}$

3.5.1 Momento resistente da ligação

Atendendo ao disposto no Eurocódigo 3, para uma ligação deste tipo, o momento resistente da ligação é definido pelo mínimo valor do produto entre a resistência de cada elemento e a distância entre este e o centro de compressão. O descrito pode ser traduzido pela seguinte expressão:

$$M_{j,Rd} = \text{mínimo}[F_{j,Rd} \times h] \quad (44)$$

3.5.2 Rigidez inicial da ligação

Para uma ligação do tipo da que está a ser estudada na presente tese pode recorrer-se ao método geral, cláusula 6.3.3.1 do EC3 - parte 1-8, de forma a calcular a rigidez inicial da ligação. Segundo esta, todos os componentes básicos relativos à zona de tração da ligação devem ser representados por um único coeficiente de rigidez equivalente - k_{eq} , como se pode observar na figura 3.12.

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} \times h_r}{z_{eq}} \quad (45)$$

Sendo:

$k_{eff,r}$ – rigidez efetiva associada a uma linha de parafusos, dada por: $k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}}$

z_{eq} – braço do binário, definido no quadro 6.15 do EC3 – parte 1-8

h_r – distância entre a linha de parafusos e o centro de compressão

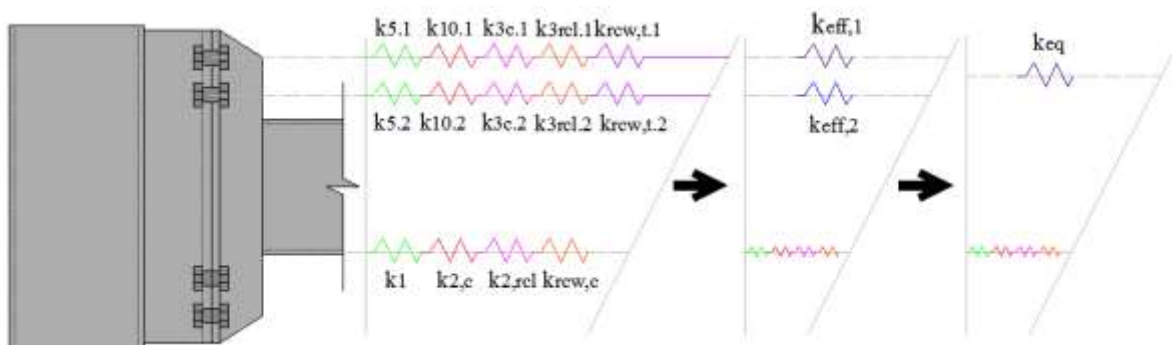


Figura 3.11 – Associação da rigidez dos componentes

Por fim, recorre-se à expressão 46, a qual permite o cálculo da rigidez inicial rotacional da ligação.

$$S_{j,ini} = \frac{E \times z^2}{\mu \times \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (46)$$

Na equação anterior o módulo de elasticidade considerado corresponde ao valor médio de entre os módulos de elasticidade de cada elemento, resultantes dos ensaios de tração efetuados. A constante z corresponde a z_{eq} , calculada de acordo com o quadro 6.15 do EC3 – parte 1-8, enquanto que μ se considera igual a 1.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

No âmbito do projeto Europeu FRAME UP, ensaiaram-se cinco tipos de ligações no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, três destas submetidas a cargas cíclicas e monotónicas, sendo as restantes apenas submetidas a cargas monotónicas. As ligações ensaiadas são constituídas por uma coluna de secção SHS250x250x10, uma viga de secção RHS250x150x8, uma chapa de topo, um “reverse channel” e oito parafusos M27 de classe 10.9. Os parâmetros cuja geometria varia consoante o ensaio apresentam-se na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Configurações das ligações ensaiadas

Designação	Espessura do RC	Espessura da chapa	Espessura do reforço	Tipo de ensaio
BC1_CHN20PL20ST00	20 mm	20 mm	-	Monotónico
BC2_CHN20PL20ST20	20 mm	20 mm	20 mm	Monotónico/Cíclico
BC3_CHN16PL20ST20	16 mm	20 mm	20 mm	Monotónico/Cíclico
BC4_CHN16PL15ST15	16 mm	15 mm	15 mm	Monotónico/Cíclico
BC5_CHNSHSPL20ST20	16 mm	20 mm	20 mm	Monotónico

Importa referir o facto de que os ensaios não foram efetuados pelo autor, tendo este participado ativamente apenas na análise e tratamento de resultados. Por esta razão, não é apresentada uma análise exaustiva acerca da instrumentação dos ensaios, mas apenas uma análise incidente nos aspetos mais importantes, entenda-se, esquema geral do ensaio, caracterização dos materiais e a metodologia de carregamento aplicada.

4.2 Descrição dos ensaios laboratoriais

4.2.1 Esquema geral

O esquema de carga utilizado nos testes experimentais consta na figura 4.1. Atendendo ao apresentado nesta figura constata-se que o esquema é constituído, à esquerda, por uma parede de reação e, à direita, por um pórtico de reação secundário. A ligação entre os referidos

elementos é efetuada através de uma viga de reação, de seção HEB500, que serve também de suporte ao atuador hidráulico de 100 ton.

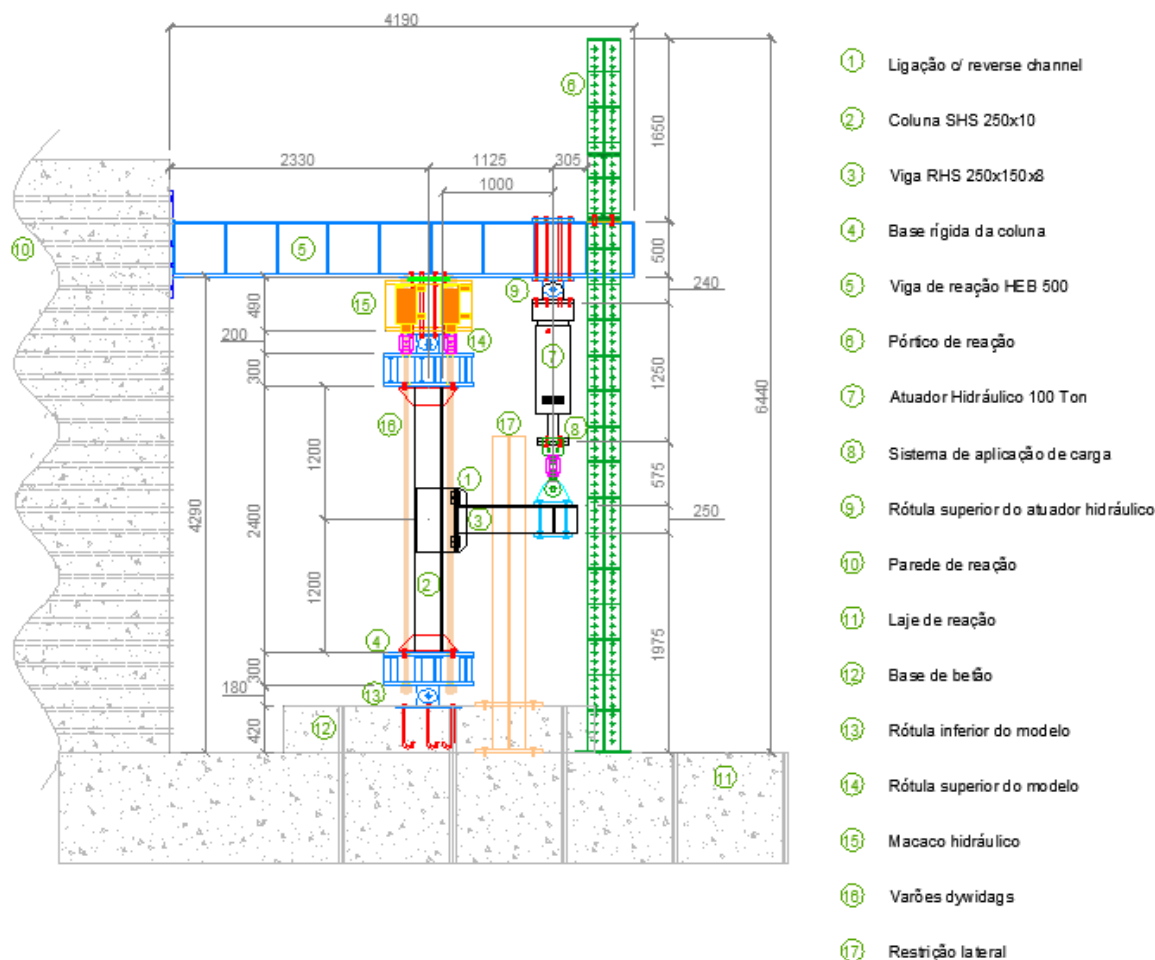


Figura 4.1 – Representação esquemática do *setup* de ensaio

Na figura 4.1 destaca-se a ligação viga-pilar com “reverse channel” – identificada com o número 1, cujo pilar se encontra ligado a uma sapata de betão armado na extremidade inferior, e à viga de reação na extremidade superior através de um sistema rotulado. A ligação entre a laje de reação e a sapata de betão armado é efetuada por varões “Dywidag”. A força, ou o deslocamento pretendido no ensaio, aplica-se na extremidade da consola da viga de carregamento através de um sistema de aplicação de carga - identificado na figura 4.1 com o número 8.

4.2.2 Caracterização mecânica do material

Com o objetivo da caracterização mecânica do aço foram realizados ensaios de tração para os diferentes elementos que compõem a ligação, os quais seguiram as indicações da norma ISO 6892-1 (2009). Para cada elemento ensaiaram-se dois provetes, à exceção do elemento viga

para o qual se ensaiaram três provetes. As propriedades finais, apresentadas na tabela 4.2, correspondem ao valor médio obtido nos referidos ensaios.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas dos elementos

Designação do elemento	Ensaio envolvido	Tensão de cedência f_y [MPa]	Média f_{ym}	Tensão última f_u [MPa]	Média f_{um}	Módulo de Elasticidade E [GPa]	Média E_{cm}
Viga	BC1/BC2/ BC3/BC4/ BC5	392.8	394.9	561.8	568	209.7	206
		392.9		569.8		197.5	
		399.1		573.5		211.5	
Pilar	BC1/BC2/ BC3/BC4/ BC5	452.9	457.9	627.9	621	207.5	216
		462.8		614.0		224.2	
Chapa de topo	BC1/BC2/ BC3/BC5	396.3	389.5	567.5	561	215.8	215
		382.6		555.2		214.8	
	BC4	445.7	441.5	612.7	610	227.1	223
		437.2		607.6		218.7	
“Reverse channel”	BC1/BC2	531.4	477.4	671.1	638	219.8	223
		423.4		605.2		225.9	
	BC3/BC4	413.7	461.0	583.3	632	216.6	217
		508.3		681.5		217.0	

Definidas as propriedades mecânicas do aço utilizado na fabricação dos elementos, verificaram-se os desvios existentes entre os valores que constam na tabela 4.2 e os valores nominais do material, sendo estes definidos por: 355 MPa, 510 MPa e 210 GPa para a tensão de cedência, para tensão última e para o módulo de elasticidade, respetivamente. Na tabela 4.3 apresentam-se os referidos desvios, os quais são relevantes na análise dos resultados obtidos em laboratório bem como na comparação destes com os resultados analíticos.

Tabela 4.3 – Desvio entre os valores das propriedades reais e os valores nominais

Designação do elemento	Ensaio envolvido	f_{ym} [MPa]	% Desvio	f_{um} [MPa]	% Desvio	E_{cm} [GPa]	% Desvio
Viga	BC1/BC2/ BC3/BC4/ BC5	394.9	+10.1%	568.4	+10.3%	206.2	-1.8%
Pilar	BC1/BC2/ BC3/BC4/ BC5	457.9	+22.5%	621.0	+17.9%	215.8	+2.7%
Chapa de topo	BC1/BC2/ BC3/BC5	389.5	+8.9%	561.3	+9.2%	215.3	+2.4%
	BC4	441.5	+19.60%	610.1	+16.4%	222.9	+5.8%
“Reverse channel”	BC1/BC2	477.4	+25.6%	638.2	+20.1%	222.8	+5.8%
	BC3/BC4	461.0	+23.0%	632.4	+19.4%	216.8	+3.1%

Por análise da tabela 4.3 constata-se que o maior desvio ocorre nos valores da tensão de cedência, cujo valor nominal é superior em cerca de 20%. No valor da tensão última o desvio verificado é menor sendo que a média ronda os 15%. Por último, para o módulo de elasticidade verifica-se um desvio significativamente menor cuja média se encontra na ordem dos 3%. Os desvios verificados correspondem a valores correntes para aços macios.

4.3 Ensaios Monotónicos

4.3.1 Instrumentação

Realizaram-se ensaios monotónicos, à escala real, para todas as ligações apresentadas na tabela 4.1. O principal objetivo da execução deste tipo de ensaios é a caracterização do comportamento da ligação quando sujeita a um momento que atua sempre no mesmo sentido. Em suma, através de um ensaio monotónico consegue-se avaliar a resistência oferecida pela ligação em função do deslocamento sofrido - curva $M-\Phi$.

A história de carregamento aplicada nestes ensaios não seguiu nenhuma metodologia específica. Através do esquema de carga apresentado na figura 4.2, que surge como uma analogia à realidade do esquema apresentado na figura 4.1, submeteu-se a ligação a uma força que se iniciou no zero e foi crescendo a uma velocidade muito lenta até se verificar a rotura da ligação.

A força a que a viga é submetida é medida através de células de carga, devidamente colocadas na extremidade da viga onde a carga é aplicada. Fazem ainda parte da instrumentação – figura 4.3 - os transdutores de deslocamento que são colocados em pontos estratégicos de forma a possibilitarem a determinação da rotação da ligação através dos deslocamentos medidos; e os extensómetros que fornecem extensões em diversos pontos, importantes para a compreensão do comportamento da ligação bem como na definição de parâmetros de calibração necessários nos modelos numéricos.



Figura 4.2 – Vista geral do “setup” de ensaio

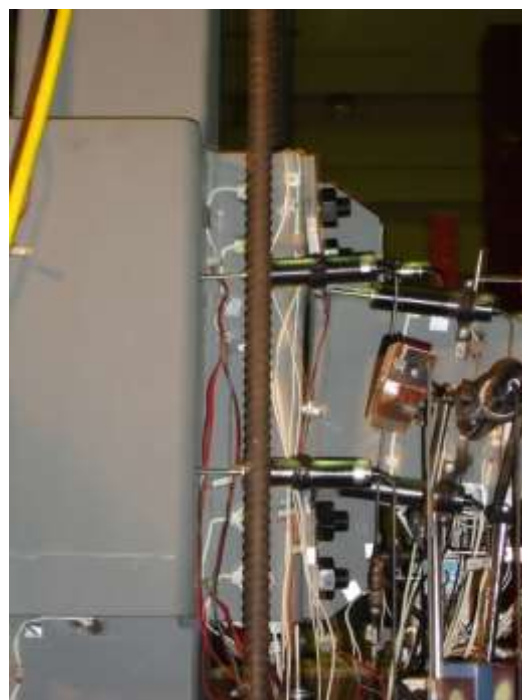
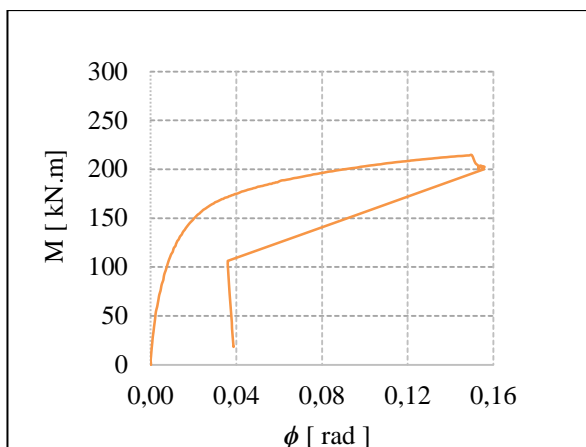
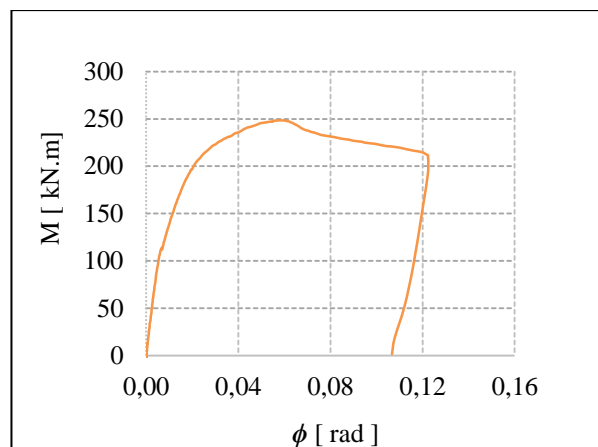
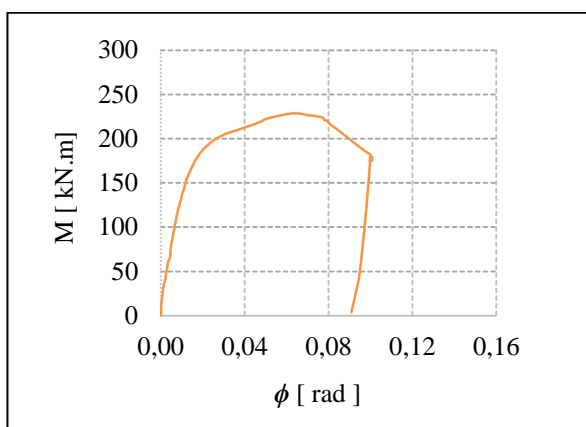
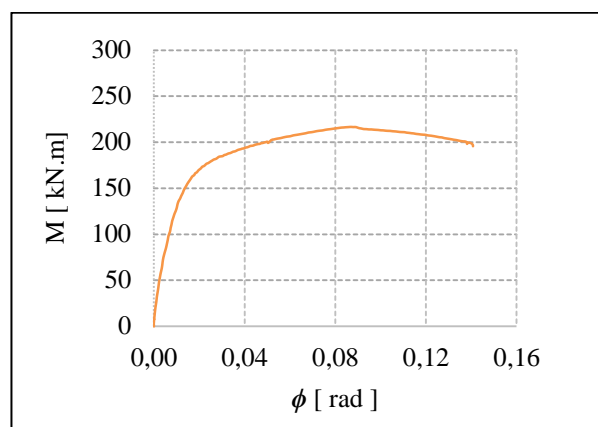
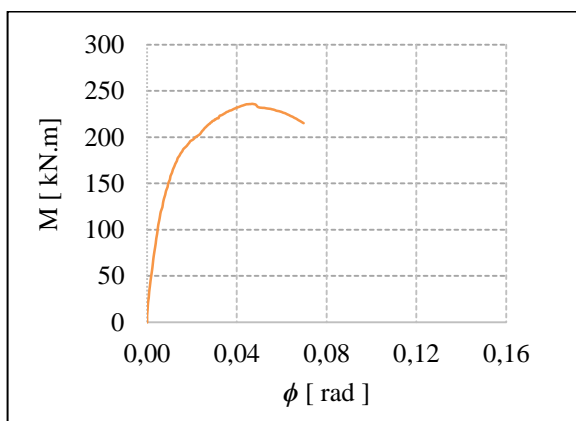


Figura 4.3 – Instrumentação

4.3.2 Resultados

Nos ensaios monotônicos mediu-se a força imposta à ligação bem como o deslocamento em pontos pré definidos. O momento fletor a que a ligação é submetida corresponde ao produto entre a força exercida e a distância entre o ponto de aplicação da força e o banzo do pilar. Relativamente ao cálculo da rotação da ligação, o processo é um pouco mais trabalhoso. A informação proveniente de dois transdutores, sendo um destes colocado acima da seção da viga e o outro abaixo desta, permite o conhecimento do deslocamento horizontal que, dividido pela distância entre transdutores leva ao conhecimento da tangente do ângulo entre a ligação e um eixo horizontal. À referida rotação, deve subtrair-se a rotação elástica do pilar de forma a obter a rotação total da ligação.

A partir das considerações apresentadas no parágrafo anterior definiram-se as curvas $M-\Phi$ para as cinco ligações estudadas, as quais se apresentam nas figuras 4.3 a), 4.3 b), 4.3 c), 4.3 d) e 4.3 e), respetivamente.

a) Curva M- Φ do ensaio BC1b) Curva M- Φ do ensaio BC2c) Curva M- Φ do ensaio BC3d) Curva M- Φ do ensaio BC4e) Curva M- Φ do ensaio BC5Figura 4.4 – Curvas M- Φ resultantes dos ensaios monotônicos efetuados

O momento último com o valor mais baixo registado nos ensaios corresponde à ligação BC1, enquanto na ligação BC2 se registou o momento último com o valor mais elevado. Entre

estes, existe uma diferença de 35 kNm. Apesar da variação da geometria de alguns elementos de ligação para ligação, a diferença de resistência não apresenta valores significativos, o que se justifica pelo facto da rotura se observar na viga qualquer que seja a ligação considerada. Conclui-se, portanto, que a geometria das ligações ensaiadas não é a mais adequada para o estudo das componentes, no entanto, cumpre a elevada rigidez imposta no projeto FRAME UP para resolver o problema do edifício sem necessidade de contraventamento.

As curvas obtidas experimentalmente foram comparadas com as curvas analíticas e numéricas, a análise crítica desta comparação encontram-se no capítulo 5.

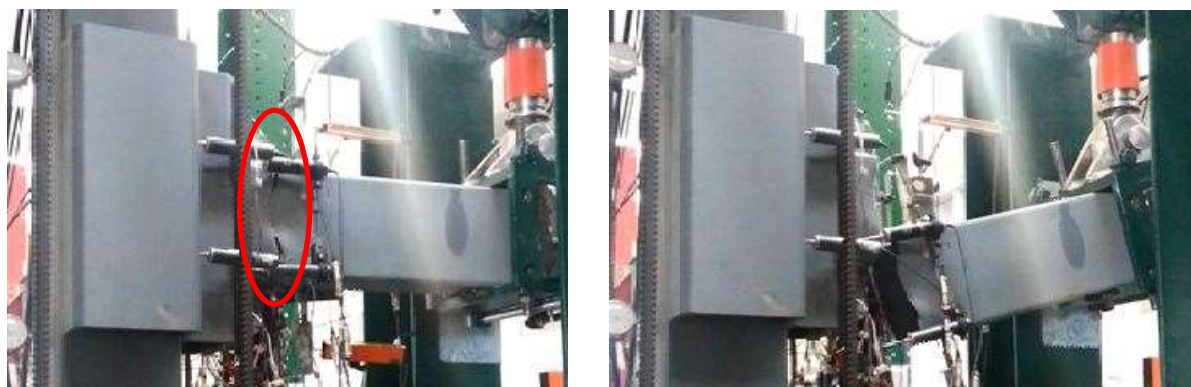
4.4 Ensaios Cíclicos

4.4.1 Procedimento de ensaio

De forma a intensificar o conhecimento acerca do comportamento da tipologia da ligação em estudo, efetuaram-se ainda ensaios cíclicos. A partir deste tipo de ensaios obtêm-se curvas histeréticas - normalmente, curvas histeréticas $M-\Phi$ - que permitem a caracterização do comportamento das ligações quando submetidas a cargas cíclicas como, por exemplo, a ação proveniente de um sismo.

A diversidade das ações sísmicas e de configurações estruturais leva a que não exista uma única, ou uma melhor, história de carregamento a aplicar. Seguiu-se a recomendação proposta pelo ECCS (1986), segundo a qual a ligação deve ser sujeita a uma história de deslocamentos cíclicos e reversíveis, de amplitude crescente, baseados numa amplitude elástica Φ_y . A referida amplitude corresponde à amplitude de cedência e pode ser obtida através da curva $M-\Phi$ proveniente do ensaio monotónico. A história de carga é assim definida pela aplicação, no primeiro ciclo, de $\pm\Delta = \pm 0.25\Phi_y$, no segundo ciclo é de $\pm\Delta = \pm 0.50\Phi_y$, no terceiro ciclo é de $\pm\Delta = \pm 0.75\Phi_y$, no quarto ciclo cumpre $\pm\Delta = \pm\Phi_y$, sendo que no quinto ciclo é dada por $\pm\Delta = \pm 2\Phi_y$. A partir deste devem ser efetuados três ciclos com uma amplitude repetida de $\pm\Delta = \pm(2 + 2n)\Phi_y$.

Em todas as ligações se verificou o aparecimento de fendas ao nível superior e inferior da viga – figura 4.4 a), provenientes da sucessiva aplicação dos deslocamentos referidos no parágrafo anterior. A fadiga da ligação resultou na rotura da mesma – figura 4.4 b).



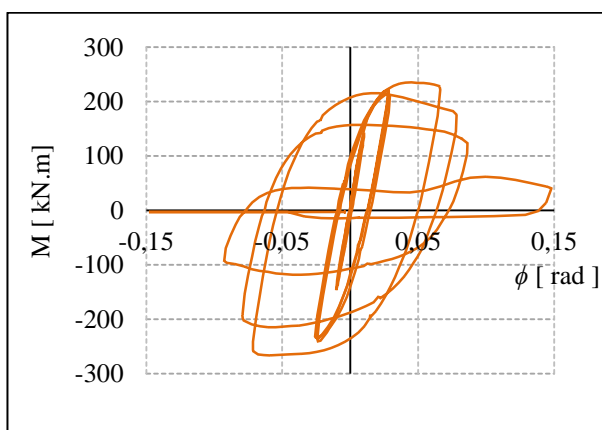
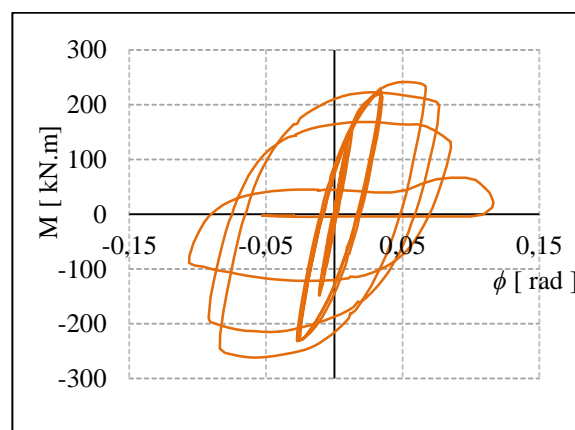
a) Fendas resultantes da carga cíclica

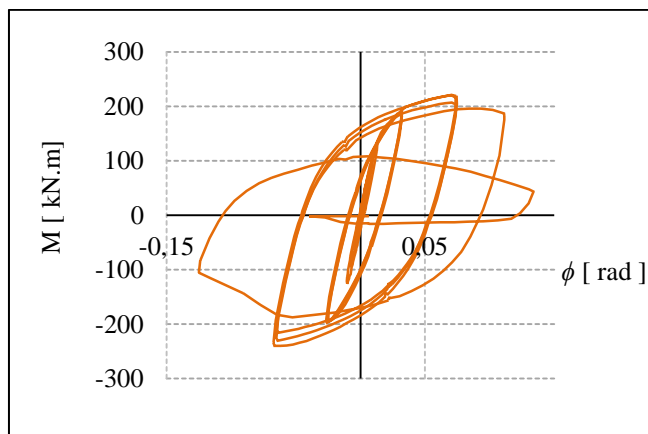
b) Rotura da ligação

Figura 4.5 – Comportamento da ligação quando sujeita a cargas cíclicas

4.4.2 Resultados

Nas figuras 4.5 a), 4.5 b) e 4.5 c) apresentam-se os resultados provenientes dos ensaios cíclicos. Embora já referido anteriormente, salienta-se o facto de que apenas foram realizados ensaios cíclicos nas ligações BC2, BC3 e BC4. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os resultados analíticos provenientes da aplicação do modelo de Richard-Abbot (1975); as conclusões obtidas a partir desta comparação encontram-se no capítulo 5.

a) Curva M- Φ do ensaio BC2b) Curva M- Φ do ensaio BC3

c) Curva M- Φ do ensaio BC4Figura 4.6 - Curvas M- Φ resultantes dos ensaios cíclicos efetuados

A trajetória desenvolvida por qualquer uma das ligações BC2, BC3 e BC4, apresentada nas figuras 4.5 a), 4.5 b) e 4.5 c), respetivamente, demonstra que estas praticamente não exibem deslizamento nem degradação de rigidez, o que demonstra um bom comportamento deste tipo de ligações quando sujeitas a ações cíclicas.

5 ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS

5.1 Introdução

Em ordem ao estabelecimento das curvas $M-\Phi$ de uma tipologia de ligação com “reverse channel” efetuou-se um estudo analítico cuja metodologia foi apresentada no capítulo 3. No presente capítulo apresenta-se a comparação dos resultados provenientes do estudo analítico com os resultados obtidos dos ensaios experimentais, apresentados no capítulo 4.

No âmbito de um projeto de investigação que tem vindo a ser desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra foi efetuada uma modelação numérica das ligações BC2, BC3 e BC4, através do *software* ABAQUS. A informação resultante do estudo numérico completa a presente tese na medida em que permite a comparação dos resultados que deste advêm com os resultados analíticos e experimentais das referidas ligações. No entanto, salienta-se o facto de que o estudo numérico foi efetuado considerando uma tensão de cedência de 424 MPa enquanto no estudo analítico se consideraram as propriedades reais do material apresentadas na tabela 4.2.

5.2 Resultados obtidos analiticamente

5.2.1 Ensaio monotónicos

A aplicação da metodologia descrita no capítulo 3 para o cálculo da resistência, resultou nos valores que se apresentam na tabela 5.1. Como se pode verificar na mesma tabela, a resistência da primeira linha de parafusos na ligação BC1 foi ignorada pois, sem o reforço, deixam de existir metodologias que possam ser aplicadas na quantificação da resistência desta. Assim se justifica o facto da resistência da chapa de topo à flexão, nesta ligação, assumir um valor bastante inferior ao das restantes ligações.

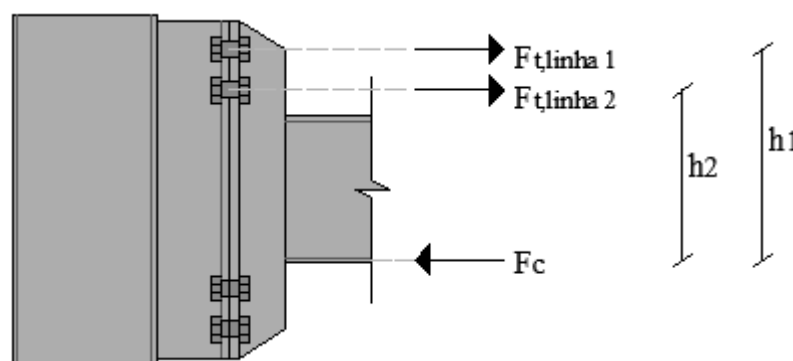
Salienta-se ainda o facto de que, à componente “alma do reverse channel à tração”, estão associados dois valores de resistência, respetivos a cada uma das metodologias apresentadas no capítulo 3.

O gráfico apresentado na figura 5.1 foi obtido por aplicação da expressão 44 a cada uma das ligações, através deste que a ligação BC2 é, efetivamente mais resistente que as restantes.

Tabela 5.1 – Resistência associada aos componentes das ligações

Componente solicitado	Procedimento de cálculo	Resistência [kN]					
		Ensaio BC1	Ensaio BC2	Ensaio BC3	Ensaio BC4	Ensaio BC5	
Zona de tração	Chapa de topo à flexão	Eurocódigo 3	432,74	893,71	915,1	657,65	915,1
	Parafusos à tração	Eurocódigo 3	1316,16	1316,16	1316,16	1316,16	1316,16
	Alma da coluna à tração	Eurocódigo 3	1424,75	1424,75	1424,75	1424,75	1424,75
	Viga à tração	Eurocódigo 3	824,15	824,15	824,15	824,15	824,15
	Alma do RC à tração	Li (2012)	1090,18	1090,18	643,64	643,64	643,64
		Liu et al., (2012)	1998,28	1998,28	1196,57	1196,57	1196,57
Banzos do RC à tração	Eurocódigo 3	1218,24	1218,24	975,93	975,93	1843,24	
Zona de corte	Alma da coluna e do RC ao corte	Eurocódigo 3	2162,73	2162,73	2002,13	2002,13	3459,42
Zona de compressão	Alma da coluna à compressão	Eurocódigo 3	1176,27	1176,27	1185,93	1202,82	1185,93
	Viga à compressão	Eurocódigo 3	824,15	824,15	824,15	824,15	824,15
	Alma do RC à compressão	Liu et al., (2012)	2952,64	2952,64	1922,72	1922,72	1922,72
	Banzos do RC à compressão	Eurocódigo 3	1504,79	1504,79	1192,4	1192,4	1416,33

O momento resistente da ligação deve ser obtido através da expressão 44. Assim, deve contabilizar-se a resistência de cada uma das linhas de parafusos bem como o braço entre estas e um eixo situado a meio do banzo inferior da viga – figura 5.1. Os valores obtidos encontram-se na tabela 5.3.

Figura 5.1 – Determinação do $M_{j,Rd}$ da ligação

Em termos de rigidez, os cálculos efetuados conduziram aos valores apresentados na tabela 5.2, os quais são discutidos no subcapítulo que se segue.

Tabela 5.2 – Rigidez associada aos componentes da ligação

	Componente solicitado	Procedimento de cálculo	Rigidez [m]				
			Ensaio BC1	Ensaio BC2	Ensaio BC3	Ensaio BC4	Ensaio BC5
Zona de tração	Chapa de topo à flexão	Eurocódigo 3	-	0.0140	0.0140	0.0061	0.0140
			0.0005	0.0283	0.0283	0.0106	0.0283
	Parafusos à tração	Eurocódigo 3	-	0.0187	0.0187	0.0187	0.0187
			0.0187	0.0187	0.0187	0.0187	0.0187
	Alma da coluna à tração	Eurocódigo 3	0.0164	0.0164	0.0164	0.0164	0.0164
	Viga à tração	Eurocódigo 3	-	-	-	-	-
	Alma do RC à tração	Li (2012)	-	-	-	-	-
Liu et al., (2012)		-	0.0027	0.0008	0.0008	0.0008	
			0.0021	0.0034	0.0010	0.0010	
Banzos do RC à tração	Eurocódigo 3	0.0362	0.0362	0.0277	0.0277	0.0277	
Zona de corte	Alma da coluna e do RC ao corte	Eurocódigo 3	0.0106	0.0106	0.0098	0.0098	0.0169
Zona de compressão	Alma da coluna à compressão	Eurocódigo 3	0.0261	0.0261	0.0247	0.0165	0.0165
	Viga à compressão	Eurocódigo 3	-	-	-	-	-
	Alma do RC à compressão	Liu et al., (2012)	0.0029	0.0029	0.0015	0.0015	0.0015
	Banzos do RC à compressão	Eurocódigo 3	0.0817	0.0817	0.0574	0.02762	0.0547



$k_{1,eff}$ [m]	-	0.0017	0.0007	0.0006	0.0007
$k_{2,eff}$ [m]	0.0004	0.0021	0.0008	0.0008	0.0008
k_{eq} [m]	0.0004	0.0038	0.0015	0.0014	0.0015
$S_{j,ini}$ [kNm.rad]	6884	30522	15625	15164	15890

5.2.2 Ensaios cíclicos

Os dados obtidos através de um ensaio cíclico fornecem informação suficiente acerca da resistência, rigidez e capacidade de rotação da ligação. No entanto, numa fase de análise e dimensionamento torna-se fundamental que o projetista tenha ao seu dispor ferramentas analíticas que lhe possibilitem a modelação do comportamento da ligação. Entre os modelos analíticos existentes, salienta-se o modelo de Richard-Abbot (1975), o qual foi utilizado nesta dissertação (figura 5.1). Trata-se este de um modelo de simples aplicação com um bom nível de ajuste.

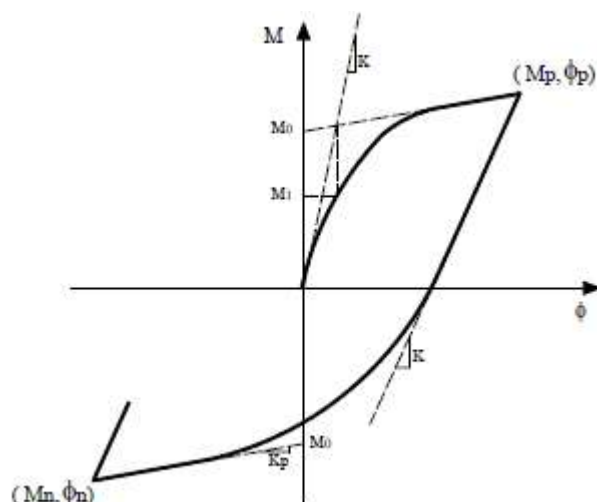


Figura 5.2 – Modelo de Richard-Abbot (1975)

Consoante se trate da curva de carga ou de descarga, o modelo consiste na aplicação de uma expressão (expressão 47 para curva de carga e expressão 48 para curva de descarga) através da qual se obtém o momento fletor em função do deslocamento imposto. N é um parâmetro de ajuste à curva, calculado através da seguinte expressão: $N = \frac{-\ln(2)}{\ln\left(\frac{M_1 - k_p}{M_0 - k - k_p}\right)}$.

$$M = M_n - \frac{(k - k_p)(\Phi_n - \Phi)}{\left[1 + \left|\frac{(k - k_p)(\Phi_n - \Phi)}{2M_0}\right|^N\right]^{\frac{1}{N}}} - k_p(\Phi_n - \Phi) \quad (47)$$

$$M = M_p - \frac{(k - k_p)(\Phi_p - \Phi)}{\left[1 + \left|\frac{(k - k_p)(\Phi_p - \Phi)}{2M_0}\right|^N\right]^{\frac{1}{N}}} - k_p(\Phi_p - \Phi) \quad (48)$$

Nas figuras 5.2 a), 5.3 a) e 5.4 a), encontram-se os gráficos resultantes da aplicação do Modelo de Richard-Abbot às ligações referentes aos ensaios BC2, BC3 e BC4. Note-se que os parâmetros k , k_p , M_0 , M foram avaliados ciclo a ciclo, sendo que M_0 foi obtido com base na reta de inclinação k_p traçada a partir do ponto extremo de cada curva. Para além da avaliação da resistência, rigidez e capacidade de rotação, o comportamento cíclico de uma ligação tem em conta um outro aspeto igualmente importante: a capacidade de dissipação de energia. Com base nos gráficos apresentados nas figuras 5.2 a), 5.3 a) e 5.4 a), avaliou-se a energia dissipada em cada um dos ciclos, que não é mais do que área compreendida entre as curvas de carga e descarga, a qual é apresentada nas figuras 5.2 b), 5.3 b) e 5.4 b).

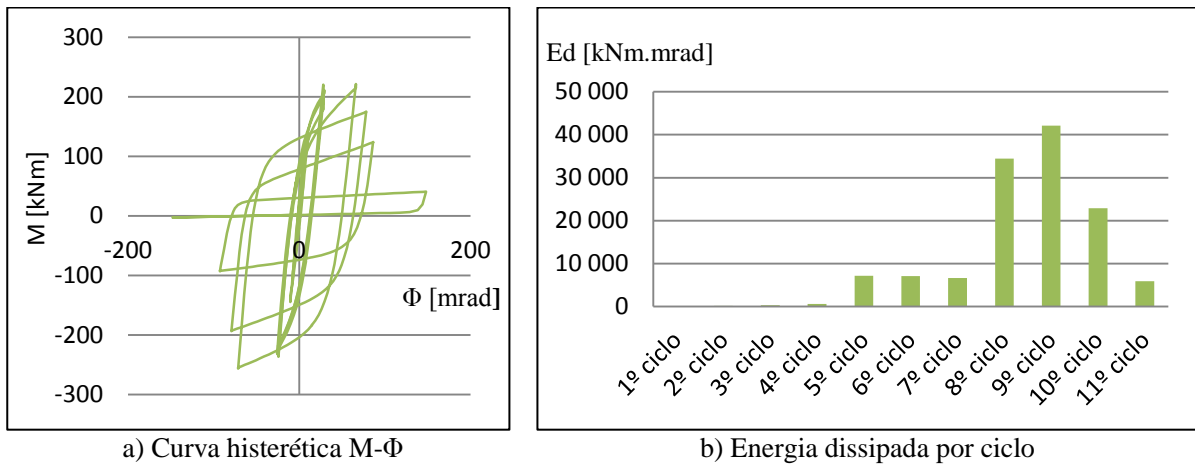


Figura 5.3 – Aplicação do método de Richard-Abbot e quantificação da energia dissipada referente ao ensaio BC2

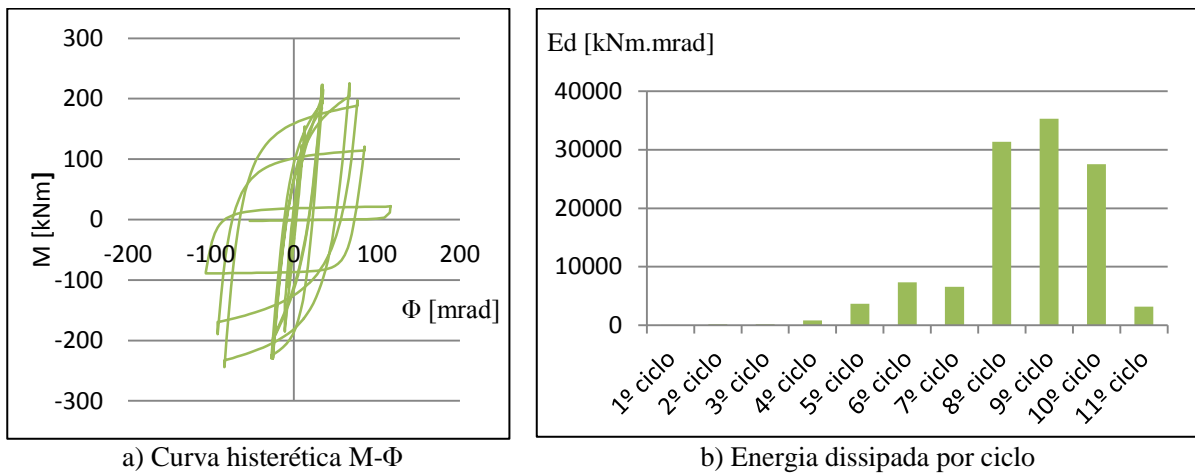


Figura 5.4 – Aplicação do método de Richard-Abbot e quantificação da energia dissipada referente ao ensaio BC3

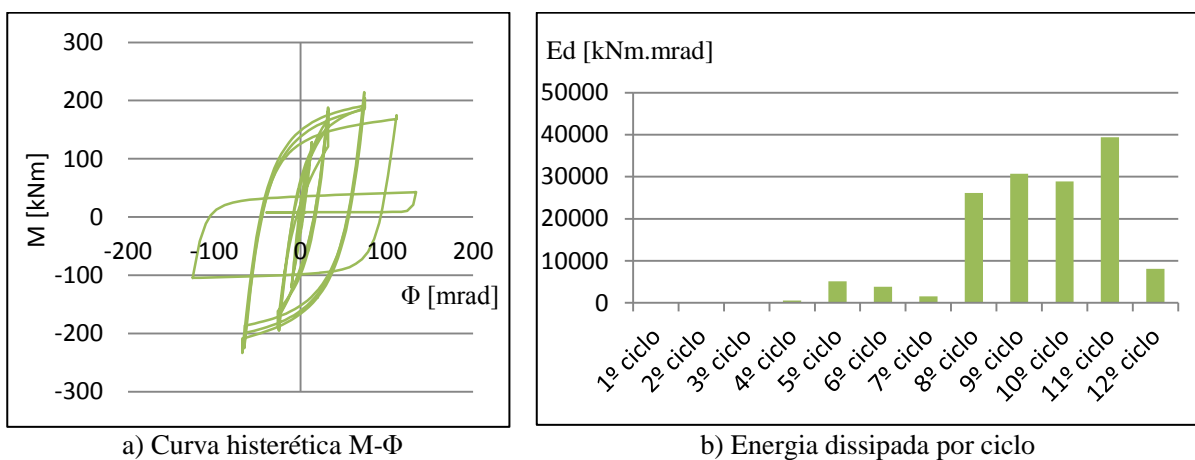


Figura 5.5 – Aplicação do método de Richard-Abbot e quantificação da energia dissipada referente ao ensaio BC4

Para além da forma da trajetória das curvas cíclicas, os elevados valores de energia dissipada nos ciclos plásticos constituem um outro indicador acerca do bom comportamento que este tipo de ligações apresenta quando sujeito a ações cíclicas - figuras 5.4 a), 5.4 b) e 5.4 c).

5.3 Comparação dos resultados

5.3.1 Ensaios monotónicos

A partir da resistência e da rigidez associada a cada uma das componentes, apresentadas respetivamente nas tabelas 5.1 e 5.2, surge a tabela 5.3 onde se apresentam o momento resistente e a rigidez associados a cada uma das ligações.

Tabela 5.3 – Tabela resumo do comportamento monotónico das ligações

Designação	Procedimento	Ensaios Monotónicos	
		$S_{j,ini}$ [kNm/rad]	$M_{j,Rd}$ [kNm]
BC1_CHN20PL20ST00	Analítico	6884	141
	Experimental	11617	214
	Numérico	-	-
BC2_CHN20PL20ST20	Analítico	30522	199
	Experimental	18145	249
	Numérico	18657	231
BC3_CHN16PL20ST20	Analítico	15625	199
	Experimental	14663	229
	Numérico	14343	226
BC4_CHN16PL15ST15	Analítico	15164	199
	Experimental	13601	218
	Numérico	10227	206
BC5_CHNSHSPL20ST20	Analítico	15869	199
	Experimental	14890	236
	Numérico	-	-

A sobreposição dos resultados, não só analíticos e experimentais, como numéricos, torna-se fundamental quando se pretende retirar conclusões acerca da viabilidade das metodologias analíticas propostas para a quantificação dos novos componentes. Nas figuras 5.6, 5.7 e 5.8 apresenta-se a sobreposição dos resultados analíticos, experimentais e numéricos referentes às ligações BC2, BC3 e BC4, respetivamente. Para as ligações BC1 e BC5 não existem

resultados numéricos, pelo que apenas se apresentam os resultados analíticos e experimentais dos ensaios monotónicos – figuras 5.5 e 5.9, respetivamente.

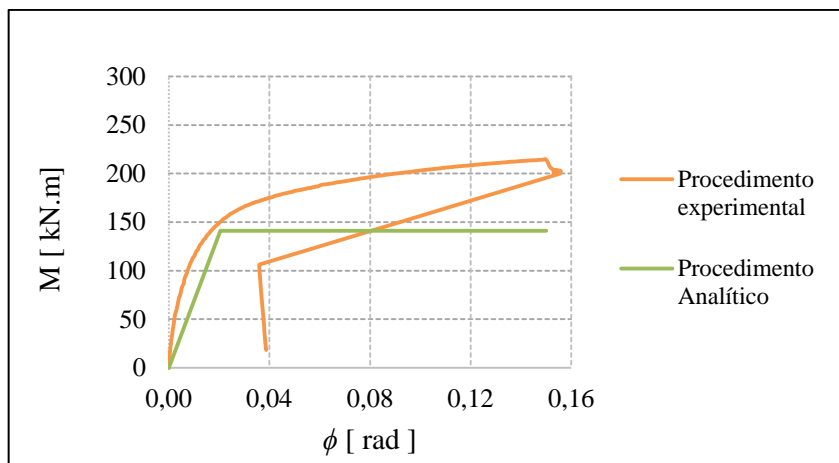


Figura 5.6 – Curvas monotónicas $M - \Phi$ referentes ao ensaio BC1

A principal diferença entre o ensaio BC1 e os restantes encontra-se no reforço da chapa de topo. Neste ensaio, a chapa é desprovida de qualquer reforço, ao contrário dos restantes. O cálculo da resistência e rigidez dos componentes seguiu o disposto no capítulo 3, no entanto, atendendo ao facto de que o Eurocódigo 3 não apresenta qualquer procedimento para o cálculo da componente “chapa de topo à flexão” para a primeira linha de parafusos, ignorou-se a resistência desta linha. Em termos de resistência a diferença não é tão grande como em termos de rigidez, o facto de se ignorar a influência da primeira linha de parafusos leva a que a rigidez inicial estimada apresente uma maior diferença relativamente à rigidez obtida experimentalmente (cerca de 40%), quando comparada com as restantes ligações ensaiadas.

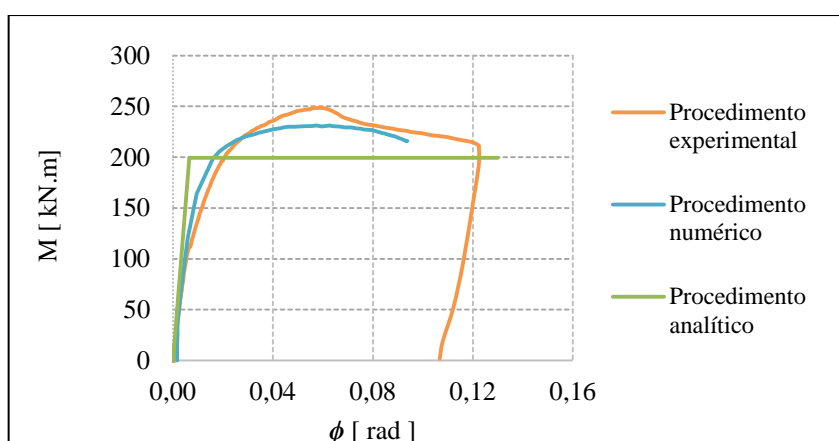


Figura 5.7 - Curvas monotónicas $M - \Phi$ referentes ao ensaio BC2

Depois de efetuada a montagem dos componentes verificou-se que o momento resistente da ligação referente ao ensaio BC2, obtido de forma analítica, é de 199.44 kN.m, condicionado pela componente “viga à tração/compressão”. Relativamente à rigidez inicial da ligação prevista analiticamente, obteve-se $S_{j,ini} = 30522.19$ kNm/rad. O valor obtido é superior ao numérico e ao experimental, o que se pode justificar pelo facto de que a rigidez da componente “alma do RC à tração” é fortemente influenciada pela espessura do “reverse channel”.

Na figura 5.7, onde se apresentam as curvas $M-\Phi$ relativas à ligação BC3, repara-se que a rigidez inicial da ligação predita de forma analítica é próxima da rigidez inicial obtida experimentalmente. Neste ensaio, a espessura do “reverse channel” diminui 4 cm relativamente à espessura da ligação BC2. Analiticamente, foi previsto um momento resistente de 199.44 kN.m sendo que a componente que se assumiu como a mais fraca foi a “viga à tração/compressão”.

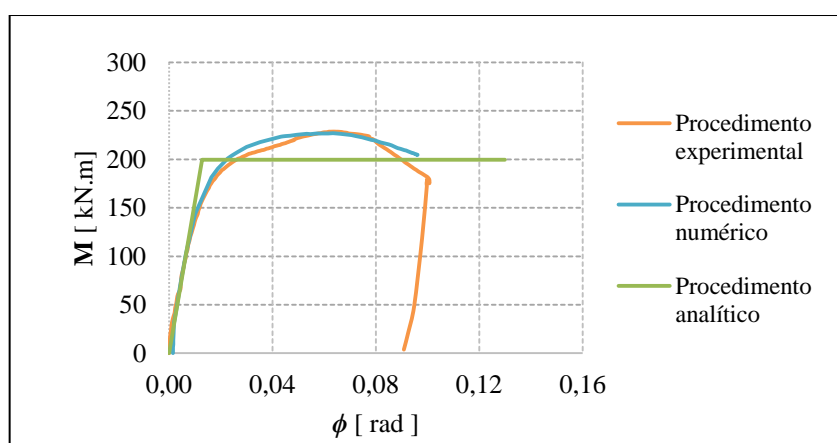
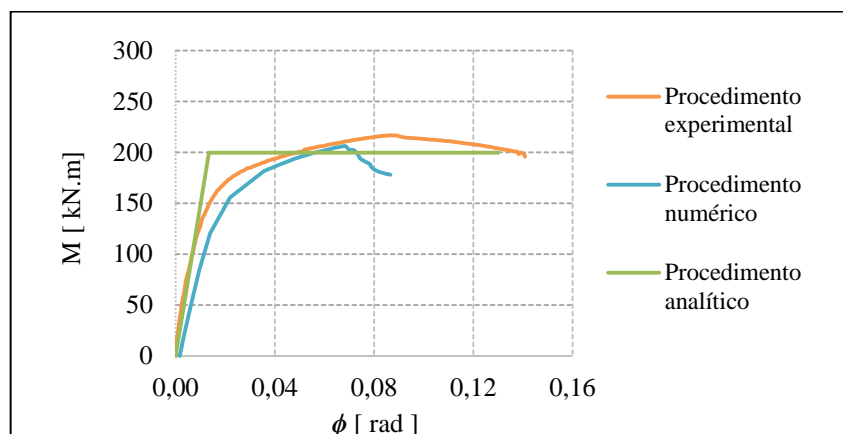
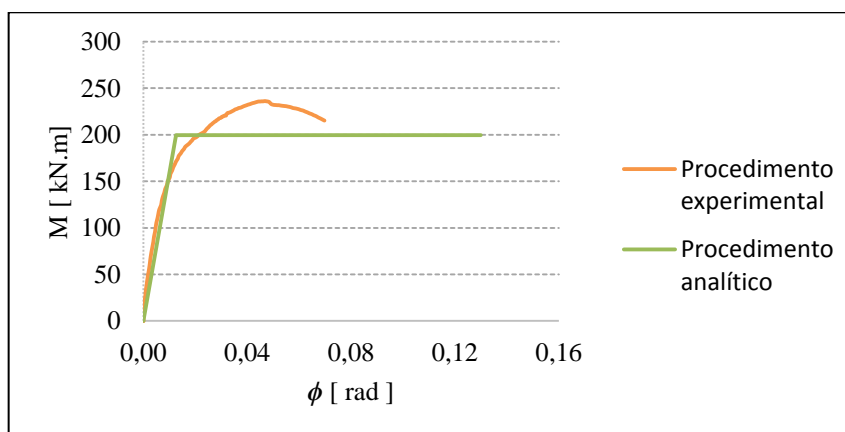


Figura 5.8 - Curvas monotónicas $M - \Phi$ referentes ao ensaio BC3

O ensaio BC4 foi efetuado numa ligação semelhante à apresentada no ensaio BC3, diferindo apenas na espessura da chapa e do reforço, diminuindo ambos de 20 mm para 15 mm. Através dos resultados obtidos constata-se que a componente mais fraca é a “viga à tração/compressão” à qual está associado um momento resistente de 199.44 kNm.

Figura 5.9 - Curvas monotónicas $M - \Phi$ referentes ao ensaio BC4

Entre as ligações ensaiadas, a que apresenta maiores diferenças entre todas é a ligação BC5, cujas curvas $M-\Phi$ se apresentam na figura 5.9. Nesta ligação, o “reverse channel” trata-se de uma peça com secção SHS inteira, ao contrário das anteriores em que este elemento era composto por uma peça cuja secção correspondia a metade de um SHS. O ganho de se considerar o “reverse channel” com uma secção deste tipo observa-se, essencialmente, nas componentes mais resistentes. Desta forma, a solução apresentada neste ensaio não é compensatória.

Figura 5.10 - Curvas monotónicas $M - \Phi$ referentes ao ensaio BC5

5.3.2 Ensaio cíclicos

Nas figuras 5.10 a), 5.11 a) e 5.12 a) apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios experimentais (a cor-de-laranja), bem como o resultado da aplicação do modelo de Richard-Abbot (a verde) a cada uma das ligações. Em complemento destas, apresentam-se as figuras 5.10 b), 5.11 b) e 5.12 b) onde consta o valor da energia dissipada por ciclo, segundo os procedimentos experimental e analítico.

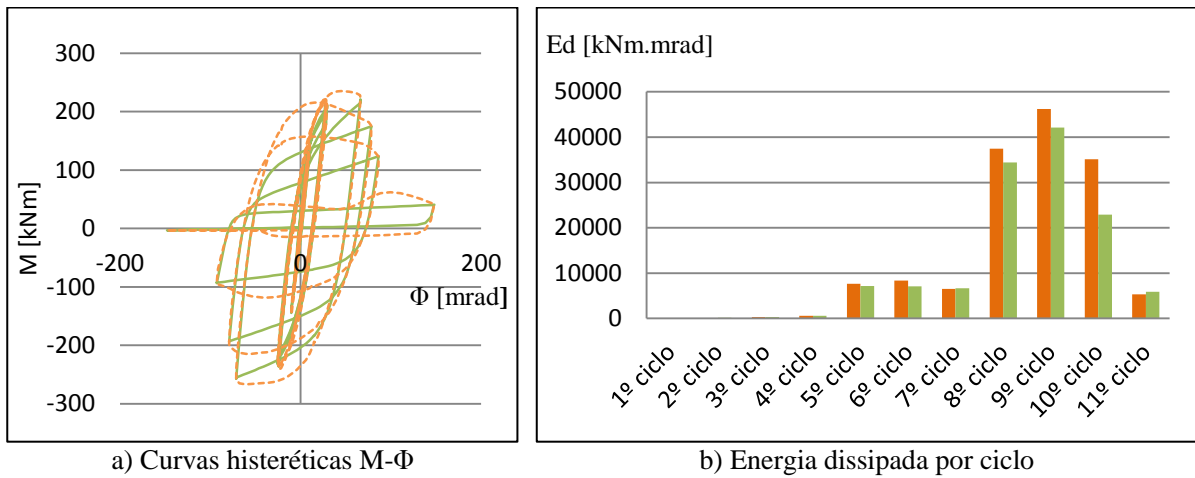


Figura 5.11 – Curvas histeréticas M- Φ e quantificação da energia dissipada referente ao ensaio BC2

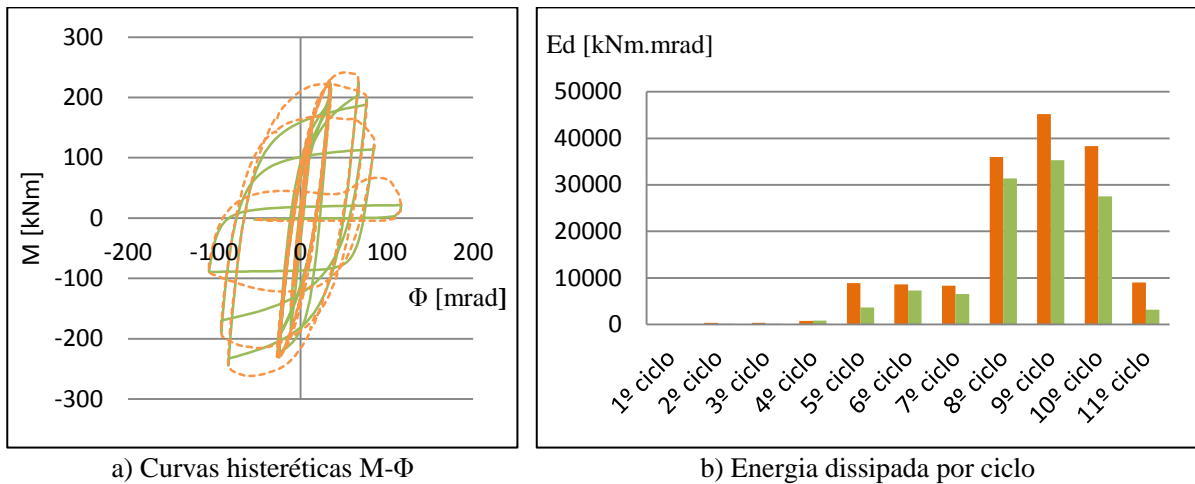


Figura 5.12 – Curvas histeréticas M- Φ e quantificação da energia dissipada referente ao ensaio BC3

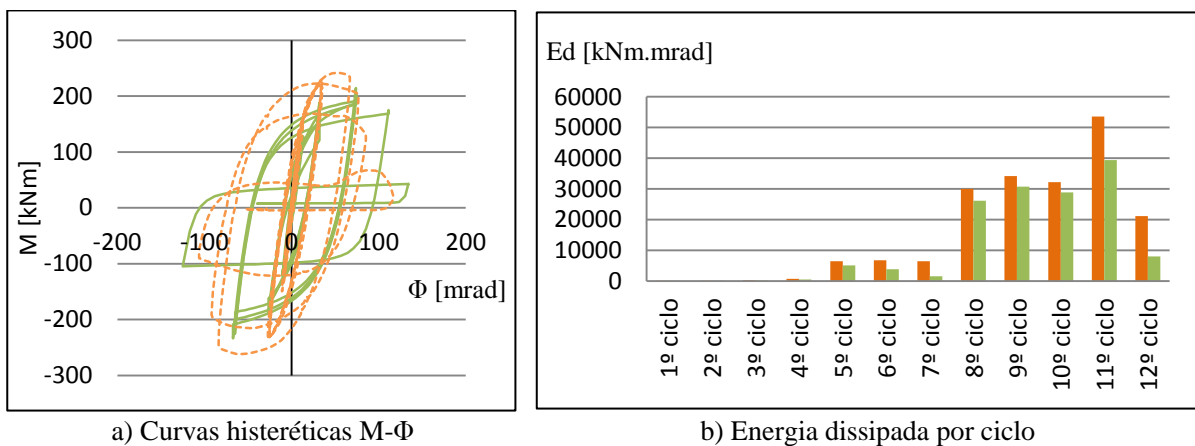


Figura 5.13 – Curvas histeréticas M- Φ e quantificação da energia dissipada referente ao ensaio BC4

Os resultados obtidos demonstram a que o Modelo de Richard-Abbot é, de facto, um modelo que apresenta um bom ajuste àquele que é o comportamento histerético real da ligação. Apesar de se tratar de um bom ajuste, deve justificar-se que a forma como se obteve os parâmetros k , k_p , M_0 , M não é a mais prática. Uma aproximação deste tipo apenas é conseguida quando os parâmetros são adaptados ciclo a ciclo, ou seja, com o conhecimento prévio dos resultados de um ensaio experimental cíclico da ligação.

No âmbito de uma aplicação prática deveria ser possível prever o comportamento cíclico de uma ligação sem necessidade de realizar ensaios cíclicos. Para isso, e no caso da utilização do modelo de Richard-Abbot, os parâmetros k e k_p deveriam ser determinados exclusivamente a partir dos dados provenientes dos ensaios monotónicos. Existem já alguns estudos desenvolvidos com este objetivo, dos quais se destaca o trabalho de Nogueiro (2009). No entanto, isso não foi aqui efetuado pois não constituiu o objetivo principal desta dissertação.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O presente trabalho fixou-se, essencialmente, no cálculo analítico da resistência e da rigidez de cinco ligações com tipologia semelhança mas diferente geometria dos elementos. O procedimento analítico baseou-se no método das componentes. O cálculo dos diversos componentes foi efetuado com base nos pressupostos do Eurocódigos 3, à exceção das componentes “alma do reverse channel à tração” e “alma do reverse channel à compressão” cuja resistência e rigidez foi calculada segundo metodologias propostas recentemente por Li (2012) e Liu et al. (2012), ainda não devidamente validadas para este tipo de ligação.

A metodologia proposta por Li (2012) para o cálculo da componente “alma do reverse channel à tração” tem em conta vários padrões de rotura, sendo em qualquer uma das ligações o mais condicionante, o padrão M1-PG4 (tabela 3.4). Para qualquer uma das ligações, a resistência da componente “alma do reverse channel à tração”, calculada através da metodologia de Li (2012) foi cerca de metade da resistência calculada através da metodologia proposta por Liu et al. (2012). No entanto, as duas metodologias não podem ser comparadas diretamente visto que as expressões sugeridas não têm como base o mesmo padrão de rotura.

A metodologia proposta por Liu et al. (2012) foi sugerida com base num estudo numa ligação com “reverse channel” com cantoneiras de banzo e de alma, com uma linha de parafusos. O facto de não existir qualquer proposta para a quantificação da resistência da segunda linha de parafusos levou a que se considerasse a mesma resistência para ambas as linhas. Relativamente à sugestão dos mesmos autores para a previsão da componente “alma do reverse channel à compressão”, apesar da expressão não ter em conta a influência do reforço, obteve-se um valor três vezes superior à resistência do mesmo elemento à tração, tal como se verificou nos testes de Lopes (2013).

Nos ensaios experimentais monotónicos que foram efetuados, a rotura deu-se pela viga em todas as ligações, inclusive na ligação BC1, apesar da deformação acentuada da chapa de topo aquando da rotura.

Em relação ao comportamento cíclico desta tipologia de ligação, os resultados dos ensaios cíclicos levaram à conclusão de que uma ligação com “reverse channel” apresenta uma grande

capacidade de rotação e como tal, bastante adequada para aplicação em edifícios que se situem em zonas sísmicas.

O modelo de Richard-Abbot forneceu um bom ajuste do comportamento cíclico da ligação, como se pode constatar pelas figuras 5.10 a), 5.11 a) e 5.12 a). O que também é evidenciado pelas figuras 5.10 b), 5.11 b) e 5.12 b), onde se apresenta a energia dissipada que se obtém dos ensaios efetuados e a energia dissipada calculada através do comportamento cíclico previsto na analiticamente.

6.2 Trabalhos futuros

Nesta dissertação apresentou-se um estudo do comportamento de uma ligação com “reverse channel”. No entanto, há ainda muito que investigar e desenvolver de forma a que se consiga obter uma completa compreensão do comportamento do “reverse channel” sob diferentes condições. Assim, sugerem-se os seguintes estudos:

- Devem ser efetuados ensaios às componentes do “reverse channel” de forma a que se possam identificar mecanismos de rotura que permitam o desenvolvimento de expressões para a quantificação da resistência dos componentes, com uma ou mais linhas de parafusos;
- Devem ser estudadas outras configurações para o “reverse channel”, por exemplo, uma associação de três chapas soldadas;
- Devem ser estudadas ligações com “reverse channel” com diferentes secções para a viga e para o pilar
- Um estudo numérico das ligações ensaiadas, com as propriedades reais dos materiais, seria útil para validação dos resultados analíticos;
- A aplicabilidade do Modelo de Richard-Abbot como previsão analítica do comportamento cíclico das ligações, apenas com base nos dados dos ensaios monotónicos, deve ser estudada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, A. (2012). “Estudo do comportamento de ligações metálicas entre perfis tubulares e chapas de gousset”. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto.

AISC@ (2013). <http://www.aisc.org/Store/p-2270-current-steel-structures-research-no-32.aspx> Último acesso: 9 de Abril de 2014.

CBCA. (2003). “Ligações em estruturas metálicas”. Campo grande, Brasil.

Ding, J., Wang, Y.C. (2007). “Experimental study of structural fire behaviour of steel beam to concrete filled tubular column assemblies with diferente types of joints”. Engineering Structures, Vol. 29, Issue 12, pp. 3485–3502.

ECCS (1986). “Recomended Tested Procedure for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads”, N° 45.

Elsawaf, S., Wang, Y.C., Mandal, P. (2011). “Numerical modelling of restrained structural subassemblies of steel beam and CFT columns connected using reverse channels in fire.” Engineering Structures, Vol 33, Issue 4, pp. 1217–1231.

Gomes, F., Jaspert, J., Maquoi, R. (1996). “Moment capacity of beam-to-column minor-axis joints”. Engineering IA for B and S, pp. 319–326.

Heistermann, T. (2013). “Stiffness of reverse channel connections at room and elevated temperatures”. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Lulea, Lulea.

Jafarian, M., Wang, YC. (2012). “Experimental behaviour of reverse channel connection component under bolt tension at elevated temperatures”. Tubular Structures XIV, pp. 623–632.

Jaspert, JP., Pietrapertosa, C., Weynand, K., Busse, E., Klinkhammer, R., (2005). “Development of a full consistent design approach for bolted and welded joints in building frames and trusses between steel members made of hollow and / or open sections - Application of the component method”.

Jones, M. (2008). “Tensile and Shear Behaviour of Fin-Plate Connections to Hollow and Concrete-Filled Steel Tubular Columns at Ambient and Elevated Temperatures”. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Manchester,

Manchester.

Li, X. (2012) “Moment-rotation behaviour of universal beam to tubular column connections using reverse channel”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Manchester.

Liu, Y., Málaga-Chuquitaype, C., Elghazouli, Y. (2012). “Behaviour of beam to tubular column angle connections under shear loads.” *Engineering Structures*, Vol. 42, pp. 434-456

Liu, Y., Málaga-Chuquitaype, C., Elghazouli, Y. (2012). “Response and component characterisation of semi-rigid connections to tubular columns under axial loads”. *Engineering Structures*, Vol. 41, pp. 510–532.

Lopes, F., Santiago, A., Simões da Silva, L., Heistermann, T., Veljkovic, M., Guilherme da Silva, J. (2013). “Experimental Behaviour of the Reverse Channel Joint Component at Elevated and Ambient Temperatures”. *International Journal of Steel Structures*, Vol. 13, Issue 3, pp.459–472.

Málaga-Chuquitaype, C., Elghazouli, Y. (2010). “Behaviour of combined channel/angle connections to tubular columns under monotonic and cyclic loading”. *Engineering Structures*, Vol. 32, Issue 6, pp.1600-1616.

Resende, V. “Análise e dimensionamento de ligações metálicas segundo o Eurocódigo 3”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto.

Richard, R. M., Abbot, B. J. (1975). “Versatile Elasto-Plastic Stress-Strain Formula”. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 101, pp. 511-515.

Simões da Silva, L., Santiago, A., Vila Real, P. (2002). “Post-limit stiffness and ductility of end-plate beam-to-column steel joints”. *Computers and Structures*, Vol. 80, Issues 5-6, pp. 515-531.

Simões da Silva, L., Santiago, A. (2003). “Manual de ligações metálicas”. Coimbra.

Simões da Silva, L., Neves, L., Gomes, F. (2003) “Rotational Stiffness of Rectangular Hollow Sections Composite Joints”. *Journal of Structural Engineering*, Issue 129, pp. 487–494.

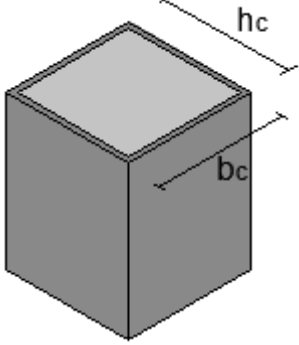
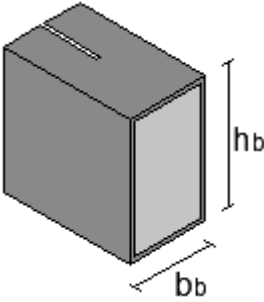
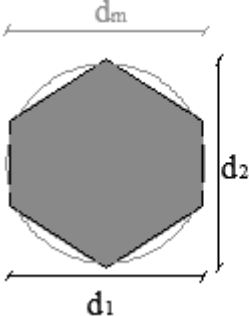
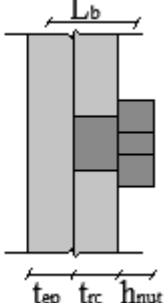
Simões, T. (2013). “Beam-column steel joint between square or rectangular hollow sections”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Coimbra, Coimbra.

Wang, YC., Xue, L. (2013) “Experimental study of moment–rotation characteristics of reverse channel connections to tubular columns”. *Construction Steel Research*, Vol. 85, pp. 92–104.

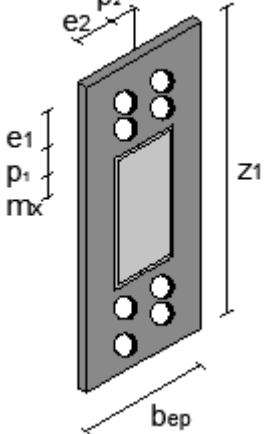
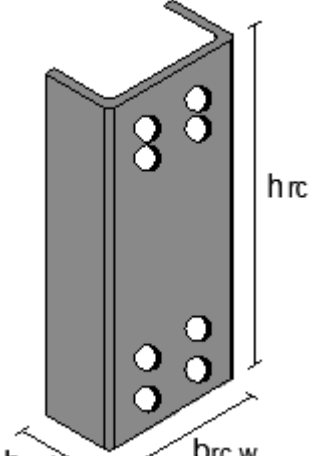
Wardenier, J., Packer, J. A., Zhao, X. L., Vegte, G. J. (2010). “Seções tubulares aplicadas às estruturas”. Zoetermeer, Holanda.

Anexos

Anexo A

Dados dos elementos constituintes da ligação simultâneos a todos os ensaios:					
Pilar – SHS250x250x10		Viga – RHS250x150x8		Parafusos M27 – Classe 10.9	
				 	
				A_s [m ²]	0.00046
				h_{nut} [m]	0.017
				d [m]	0.027
b_c [m]	0.25	b_c [m]	0.15	d_0 [m]	0.030
h_c [m]	0.25	h_c [m]	0.25	L_b [m]	0.039
t_c [m]	0.01	t_c [m]	0.008	d_1 [m]	0.043
r_c [m]	0.015	r_c [m]	0.01	d_2 [m]	0.046
A_c [m ²]	0.0095	A_c [m ²]	0.0061	d_m [m]	0.044
f_y [MPa]	458	f_y [MPa]	395	k_2	0.9

Nome do teste:	BC1_CHN20PL20ST20
----------------	-------------------

Chapa de topo			“Reverse channel”		
	z_1 [m]	0.58		h_p [m]	0.58
	b_{ep} [m]	0.25		b_{rc} [m]	0.25
	t_{ep} [m]	0.02		h_{rc} [m]	0.125
	e_1 [m]	0.05		t_{rc} [m]	0.02
	e_2 [m]	0.075		r_{rc} [m]	0.02
	p_1 [m]	0.07		A_{rc} [m ²]	0.0174
	p_2 [m]	0.05		f_y [MPa]	477
	m_x [m]	0.045			
	L_{stiff} [m]	0.08			
	f_y [MPa]	389			

		Chapa de topo à flexão								
		e_x [m]	0.120							
		m_2 [m]	0.045							
		e [m]	0.075							
		w	0.100							
		λ_1	-							
		λ_2	-							
		α	-							
		Linha de parafusos considerada isoladamente:				Linha de parafusos considerada como parte de um grupo:				
		$l_{eff,cp}$ [m]	$l_{eff,nc}$ [m]	$l_{eff,1}$ [m]	$l_{eff,2}$ [m]	$l_{eff,cp}$ [m]	$l_{eff,nc}$ [m]	$l_{eff,1}$ [m]	$l_{eff,2}$ [m]	
1ª linha	-	-	-	-	-	-	-	-		
2ª linha	0.241	0.125	0.125	0.125	-	-	-	-		
$M_{pl,1}$ [kN.m]	4.87			Modo 1	$F_{t,1,Rd}$ [kN]	432.74				
$M_{pl,2}$ [kN.m]	4.87			Modo 2	$F_{t,2,Rd}$ [kN]	1292.96				
$F_{t,Rd}$ [kN]	329.0			Modo 3	$F_{t,3,Rd}$ [kN]	1316.16				
					$F_{T,Rd}$ [kN]	432.74				
Zona de tração		Alma da coluna à tração								
		k_{wc}	1.00							
		β	1.00							
		$b_{eff,1}$ [m]	0.1096							
		$b_{eff,t,wc}$ [m]	0.2346							
		A_{vc} [m ²]	0.00474							
		w	0.663							
							$F_{t,wc,Rd}$ [kN]	1424.75		
		Viga à tração								
		$M_{pl,Rd}$ [kN.m]	199.44							
					$F_{t,fb,Rd}$ [kN]	824.15				
		Alma do “reverse channel” à tração (metodologia Li, 2012)								
			$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]						$m_{p,rcw}$ [kN.m]	47.74
		M1 – PI1	2131.26							
		M1 – PI2	2083.01							
		M1 – PG1	1744.03							
		M1 – PG2	2034.77							
		M1 – PG3	1695.79							
		M1 – PG4	1090.18							
		M1 – PG5	1356.59							
		M1-PG6	1768.36							
					$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	1090.18				
		Alma do “reverse channel” à tração (metodologia Liu et al, 2012)								
		b_{rc} [m]	0.250							
		L_c [m]	0.050							
		i [m]	0.100							
		R_m [m]	0.065							
		d_h [m]	0.030							

	d_{bh} [m]	0.044			
			$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	1998.28	
Zona de corte	Alma da coluna e do “reverse channel” ao corte				
	$A_{v,rc}$ [m ²]	0.0044			
	$A_{v,c}$ [m ²]	0.0047			
	A_v [m ²]	0.0091			
			$V_{wp,Rd}$ [kN]	2162.73	
Zona de compressão	Alma da coluna à compressão				
	β	1.00			
	w	0.487			
	$b_{eff,c,wc}$ [m]	0.373			
	k_{wc}	1.00			
	d_{wc} [m]	0.20			
	λ_ρ	1.1725			
	ρ	0.7074			
				$F_{c,wc,Rd}$ [kN]	1176.27
	Alma da viga à compressão				
	$M_{pl,Rd}$ [kN.m]	199.44			
				$F_{c,fb,Rd}$ [kN]	824.15
	Alma do “reverse channel” à compressão				
	L_c [m]	0.169			
B [m]	0.170				
C [m]	0.230				
h [m]	0.242				
			$F_{c,rcw,Rd}$ [kN]	2952.64	

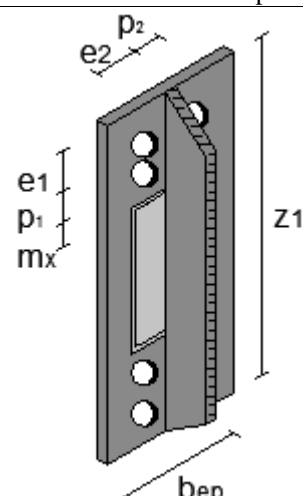
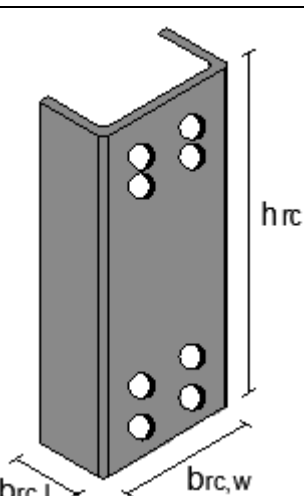
Nome do teste:	BC2_CHN20PL20ST20
-----------------------	--------------------------

Chapa de topo			“Reverse channel”		
	z_1 [m]	0.58		h_p [m]	0.58
	b_{ep} [m]	0.25		b_{rc} [m]	0.25
	t_{ep} [m]	0.02		h_{rc} [m]	0.125
	e_1 [m]	0.05		t_{rc} [m]	0.02
	e_2 [m]	0.075		r_{rc} [m]	0.02
	p_1 [m]	0.07		A_{rc} [m ²]	0.0174
	p_2 [m]	0.05		f_y [MPa]	477
	m_x [m]	0.045			
	L_{stiff} [m]	0.08			
	f_y [MPa]	389			

		Chapa de topo à flexão									
		m [m]	0.040								
		m_2 [m]	0.045								
		e_{min} [m]	0.035								
		n	0.035								
		λ_1	0.348								
		λ_2	0.391								
		α	6.9								
		Linha de parafusos considerada isoladamente:				Linha de parafusos considerada como parte de um grupo:					
		$l_{eff,cp}$ [m]	$l_{eff,nc}$ [m]	$l_{eff,1}$ [m]	$l_{eff,2}$ [m]	$l_{eff,cp}$ [m]	$l_{eff,nc}$ [m]	$l_{eff,1}$ [m]	$l_{eff,2}$ [m]		
1ª linha	0.226	0.177	0.177	0.177	0.170	0.085	0.269	0.269			
2ª linha	0.251	0.276	0.251	0.276	0.196	0.184					
		$M_{pl,1}$ [kN.m]	10.48		Modo 1		$F_{t,1,Rd}$ [kN]	1048.2			
		$M_{pl,2}$ [kN.m]	10.48		Modo 2		$F_{t,2,Rd}$ [kN]	893.71			
		$F_{t,Rd}$ [kN]	329.0		Modo 3		$F_{t,3,Rd}$ [kN]	329.0			
								$F_{T,Rd}$ [kN]	893.7		
Zona de tração		Alma da coluna à tração									
		k_{wc}	1.00								
		β	1.00								
		$b_{eff,1}$ [m]	0.1096								
		$b_{eff,t,wc}$ [m]	0.2346								
		A_{vc} [m ²]	0.0047								
		w	0.663								
								$F_{t,wc,Rd}$ [kN]	1424.75		
		Viga à tração									
		$M_{pl,Rd}$ [kN.m]	199.44								
						$F_{t,fb,Rd}$ [kN]	824.15				
		Alma do “reverse channel” à tração (metodologia Li, 2012)									
								$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	$m_{p,rcw}$ [kN.m]	47.74	
		M1 – PI1	2131.26								
		M1 – PI2	2083.01								
		M1 – PG1	1744.03								
		M1 – PG2	2034.77								
		M1 – PG3	1695.79								
		M1 – PG4	1090.18								
		M1 – PG5	1356.59								
		M1-PG6	1768.36								
						$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	1090.18				
		Alma do “reverse channel” à tração (metodologia Liu et al, 2012)									
		b_{rc} [m]	0.250								
		L_c [m]	0.050								
		i [m]	0.100								
		R_m [m]	0.065								
		d_h [m]	0.030								

	d_{bh} [m]	0.044			
			$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	1998.28	
Zona de corte	Alma da coluna e do “reverse channel” ao corte				
	$A_{v,rc}$ [m ²]	0.0044			
	$A_{v,c}$ [m ²]	0.0047			
	A_v [m ²]	0.0091			
			$V_{wp,Rd}$ [kN]	2162.73	
Zona de compressão	Alma da coluna à compressão				
	β	1.00			
	w	0.4868			
	$b_{eff,c,wc}$ [m]	0.3730			
	k_{wc}	1.00			
	d_{wc} [m]	0.20			
	λ_ρ	1.1725			
	ρ	0.7074			
				$F_{c,wc,Rd}$ [kN]	1176.27
	Alma da viga à compressão				
	$M_{pl,Rd}$ [kN.m]	199.44			
				$F_{c,fb,Rd}$ [kN]	824.15
	Alma do “reverse channel” à compressão				
	L_c [m]	0.169			
	B [m]	0.170			
C [m]	0.230				
h [m]	0.242				
			$F_{c,rcw,Rd}$ [kN]	2952.64	

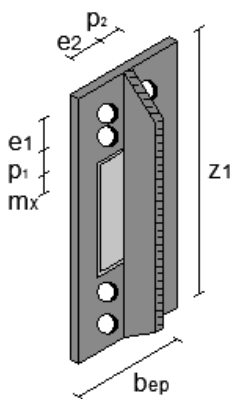
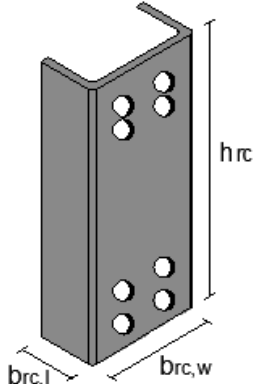
Nome do teste:	BC3_CHN16PL20ST20
----------------	-------------------

Chapa de topo			“Reverse channel”		
	z_1 [m]	0.58		h_p [m]	0.58
	b_{ep} [m]	0.25		b_{rc} [m]	0.25
	t_{ep} [m]	0.02		h_{rc} [m]	0.125
	e_1 [m]	0.05		t_{rc} [m]	0.016
	e_2 [m]	0.075		r_{rc} [m]	0.02
	p_1 [m]	0.07		A_{rc} [m ²]	0.0147
	p_2 [m]	0.05		f_y [MPa]	461
	m_x [m]	0.045			
	L_{stiff} [m]	0.08			
	f_y [MPa]	389			

		Chapa de topo à flexão								
		m [m]	0.040							
		m_2 [m]	0.045							
		e_{min} [m]	0.039							
		n	0.039							
		λ_1	0.348							
		λ_2	0.391							
		α	6.9							
		Linha de parafusos considerada isoladamente:				Linha de parafusos considerada como parte de um grupo:				
		$l_{eff,cp}$ [m]	$l_{eff,nc}$ [m]	$l_{eff,1}$ [m]	$l_{eff,2}$ [m]	$l_{eff,cp}$ [m]	$l_{eff,nc}$ [m]	$l_{eff,1}$ [m]	$l_{eff,2}$ [m]	
1ª linha	0.226	0.177	0.177	0.177	0.170	0.085	0.269	0.269		
2ª linha	0.251	0.276	0.251	0.276	0.196	0.184				
$M_{pl,1}$ [kN.m]	10.48			Modo 1	⇒	$F_{t,1,Rd}$ [kN]	1048.2			
$M_{pl,2}$ [kN.m]	10.48			Modo 2		$F_{t,2,Rd}$ [kN]	915.1			
$F_{t,Rd}$ [kN]	329.0			Modo 3		$F_{t,3,Rd}$ [kN]	1316.2			
						$F_{T,Rd}$ [kN]	915.10			
Zona de tração		Alma da coluna à tração								
		k_{wc}	1.00							
		β	1.00							
		$b_{eff,1}$ [m]	0.1096							
		$b_{eff,t,wc}$ [m]	0.2346							
		A_{vc} [m ²]	0.0047							
		w	0.663							
						$F_{t,wc,Rd}$ [kN]	1424.75			
		Viga à tração								
		$M_{pl,Rd}$ [kN.m]	199.44							
						$F_{t,fb,Rd}$ [kN]	824.15			
Zona de tração		Alma do “reverse channel” à tração (metodologia Li, 2012)								
			$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]						$m_{p,rcw}$ [kN.m]	29.51
		M1 – PI1	1364.00							
		M1 – PI2	1301.32							
		M1 – PG1	1071.65							
		M1 – PG2	1238.64							
		M1 – PG3	1008.96							
		M1 – PG4	643.64							
		M1 – PG5	814.14							
		M1-PG6	1068.14							
						$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	643.64			
		Alma do “reverse channel” à tração (metodologia Liu et al, 2012)								
		b_{rc} [m]	0.250							
		L_c [m]	0.050							
		i [m]	0.100							

	R_m [m]	0.067			
	d_h [m]	0.030			
	d_{ph} [m]	0.044			
			$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	1196.57	
Zona de corte	Alma da coluna e do “reverse channel” ao corte				
	$A_{v,rc}$ [m ²]	0.0037			
	$A_{v,c}$ [m ²]	0.0047			
	A_v [m ²]	0.0084			
			$V_{wp,Rd}$ [kN]	2002.13	
Zona de compressão	Alma da coluna à compressão				
	β	1.00			
	w	0.5074			
	$b_{eff,c,wc}$ [m]	0.3530			
	k_{wc}	1.00			
	d_{wc} [m]	0.20			
	λ_ρ	1.1406			
	ρ	0.7230			
				$F_{c,wc,Rd}$ [kN]	1185.93
	Alma da viga à compressão				
	$M_{pl,Rd}$ [kN.m]	199.44			
				$F_{c,fb,Rd}$ [kN]	824.15
	Alma do “reverse channel” à compressão				
	L_c [m]	0.169			
B [m]	0.178				
C [m]	0.234				
h [m]	0.242				
			$F_{c,rcw,Rd}$ [kN]	1922.72	

Nome do teste:	BC4_CHN16PL15ST15
-----------------------	--------------------------

Chapa de topo			“Reverse channel”		
	z_1 [m]	0.58		h_p [m]	0.58
	b_{ep} [m]	0.25		b_{rc} [m]	0.25
	t_{ep} [m]	0.015		h_{rc} [m]	0.125
	e_1 [m]	0.05		t_{rc} [m]	0.016
	e_2 [m]	0.075		r_{rc} [m]	0.02
	p_1 [m]	0.07		A_{rc} [m ²]	0.0147
	p_2 [m]	0.05		f_y [MPa]	461
	m_x [m]	0.045			
	L_{stiff} [m]	0.08			
	f_y [MPa]	441			

		Chapa de topo à flexão								
		m [m]	0.043							
		m_2 [m]	0.045							
		e_{min} [m]	0.039							
		n	0.039							
		λ_1	0.362							
		λ_2	0.383							
		α	6.9							
		Linha de parafusos considerada isoladamente:				Linha de parafusos considerada como parte de um grupo:				
		$l_{eff,cp}$ [m]	$l_{eff,nc}$ [m]	$l_{eff,1}$ [m]	$l_{eff,2}$ [m]	$l_{eff,cp}$ [m]	$l_{eff,nc}$ [m]	$l_{eff,1}$ [m]	$l_{eff,2}$ [m]	
1ª linha	0.234	0.182	0.182	0.182	0.170	0.085	0.281	0.281		
2ª linha	0.267	0.293	0.267	0.293	0.204	0.196				
$M_{pl,1}$ [kN.m]	6.99			Modo 1	⇒	$F_{t,1,Rd}$ [kN]	657.7			
$M_{pl,2}$ [kN.m]	6.99			Modo 2		$F_{t,2,Rd}$ [kN]	801.3			
$F_{t,Rd}$ [kN]	329.0			Modo 3		$F_{t,3,Rd}$ [kN]	1316.2			
						$F_{T,Rd}$ [kN]	801.30			
Zona de tração		Alma da coluna à tração								
		k_{wc}	1.00							
		β	1.00							
		$b_{eff,1}$ [m]	0.1096							
		$b_{eff,t,wc}$ [m]	0.2346							
		A_{vc} [m ²]	0.0047							
		w	0.663							
						$F_{t,wc,Rd}$ [kN]	1424.75			
		Viga à tração								
		$M_{pl,Rd}$ [kN.m]	199.44							
						$F_{t,fb,Rd}$ [kN]	824.15			
Zona de tração		Alma do “reverse channel” à tração (metodologia Li, 2012)								
								$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	$m_{p,rcw}$ [kN.m]	29.51
		M1 – PI1	1364.00							
		M1 – PI2	1301.32							
		M1 – PG1	1071.65							
		M1 – PG2	1238.64							
		M1 – PG3	1008.96							
		M1 – PG4	643.64							
		M1 – PG5	814.14							
		M1-PG6	1068.14							
						$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	643.64			
		Alma do “reverse channel” à tração (metodologia Liu et al, 2012)								
		b_{rc} [m]	0.250							
		L_c [m]	0.050							
		i [m]	0.100							

	R_m [m]	0.067			
	d_h [m]	0.030			
	d_{ph} [m]	0.044			
			$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	1196.57	
Zona de corte	Alma da coluna e do “reverse channel” ao corte				
	$A_{v,rc}$ [m ²]	0.0037			
	$A_{v,c}$ [m ²]	0.0047			
	A_v [m ²]	0.0084			
			$V_{wp,Rd}$ [kN]	2002.13	
Zona de compressão	Alma da coluna à compressão				
	β	1.00			
	w	0.663			
	$b_{eff,c,wc}$ [m]	0.235			
	k_{wc}	1.00			
	d_{wc} [m]	0.20			
	λ_ρ	0.9306			
	ρ	0.8436			
				$F_{c,wc,Rd}$ [kN]	1202.82
	Alma da viga à compressão				
	$M_{pl,Rd}$ [kN.m]	199.44			
				$F_{c,fb,Rd}$ [kN]	824.15
	Alma do “reverse channel” à compressão				
	L_c [m]	0.169			
B [m]	0.178				
C [m]	0.234				
h [m]	0.242				
			$F_{c,rcw,Rd}$ [kN]	1922.72	

Nome do teste:	BC5_SHS16PL20ST20
-----------------------	--------------------------

Chapa de topo			“Reverse channel”		
	z_1 [m]	0.58	h_p [m]	0.58	
	b_{ep} [m]	0.25	b_{rc} [m]	0.25	
	t_{ep} [m]	0.02	h_{rc} [m]	0.25	
	e_1 [m]	0.05	t_{rc} [m]	0.02	
	e_2 [m]	0.075	r_{rc} [m]	0.016	
	p_1 [m]	0.07	A_{rc} [m ²]	0.0147	
	p_2 [m]	0.05	f_y [MPa]	461	
	m_x [m]	0.045			
	L_{stiff} [m]	0.08			
	f_y [MPa]	389			

		Chapa de topo à flexão								
		m [m]	0.040							
		m_2 [m]	0.045							
		e_{min} [m]	0.039							
		w	0.039							
		λ_1	0.348							
		λ_2	0.391							
		α	6.9							
		Linha de parafusos considerada isoladamente:				Linha de parafusos considerada como parte de um grupo:				
		$l_{eff,cp}$ [m]	$l_{eff,nc}$ [m]	$l_{eff,1}$ [m]	$l_{eff,2}$ [m]	$l_{eff,cp}$ [m]	$l_{eff,nc}$ [m]	$l_{eff,1}$ [m]	$l_{eff,2}$ [m]	
1ª linha	0.226	0.177	0.177	0.177	0.170	0.085	0.269	0.269		
2ª linha	0.251	0.276	0.251	0.276	0.196	0.184				
$M_{pl,1}$ [kN.m]	10.48	Modo 1		⇒		$F_{t,1,Rd}$ [kN]	1048.2			
$M_{pl,2}$ [kN.m]	10.48	Modo 2				$F_{t,2,Rd}$ [kN]	915.10			
$F_{t,Rd}$ [kN]	329.0	Modo 3				$F_{t,3,Rd}$ [kN]	1316.2			
						$F_{T,Rd}$ [kN]	915.10			
Zona de tração		Alma da coluna à tração								
		k_{wc}	1.00							
		β	1.00							
		$b_{eff,1}$ [m]	0.1096							
		$b_{eff,t,wc}$ [m]	0.2346							
		A_{vc} [m ²]	0.0047							
		w	0.663							
						$F_{t,wc,Rd}$ [kN]	1424.75			
		Viga à tração								
		$M_{pl,Rd}$ [kN.m]	199.44							
						$F_{t,fb,Rd}$ [kN]	824.15			
Zona de tração		Alma do “reverse channel” à tração (metodologia Li, 2012)								
							$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	$m_{p,rcw}$ [kN.m]	29.50	
		M1 – PI1	1364.00							
		M1 – PI2	1301.32							
		M1 – PG1	1071.65							
		M1 – PG2	1238.64							
		M1 – PG3	1008.96							
		M1 – PG4	643.64							
		M1 – PG5	814.14							
		M1-PG6	1068.14							
						$F_{t,rcw,Rd}$ [kN]	643.64			
Zona de tração		Alma do “reverse channel” à tração (metodologia Liu et al, 2012)								
		b_{rc} [m]	0.25							
		L_c [m]	0.05							
		i [m]	0.10							

	R_m [m]	0.067			
	d_h [m]	0.030			
	d_{bh} [m]	0.044			
			$F_{trcw,Rd}$ [kN]	1196.57	
Zona de corte	Alma da coluna e do “reverse channel” ao corte				
	$A_{v,rc}$ [m ²]	0.0098			
	$A_{v,c}$ [m ²]	0.0047			
	A_v [m ²]	0.0145			
			$V_{wp,Rd}$ [kN]	3459.42	
Zona de compressão	Alma da coluna à compressão				
	β	1			
	w	0.6625			
	$b_{eff,c,wc}$ [m]	0.2350			
	k_{wc}	1			
	d_{wc} [m]	0.20			
	λ_ρ	0.9306			
	ρ	0.8436			
				$F_{c,wc,Rd}$ [kN]	1202.82
	Alma da viga à compressão				
	$M_{pl,Rd}$ [kN.m]	199.44			
				$F_{c,fb,Rd}$ [kN]	824.15
	Alma do “reverse channel” à compressão				
	L_c [m]	0.169			
B [m]	0.178				
C [m]	0.234				
h [m]	0.242				
			$F_{c,rcw,Rd}$ [kN]	1922.72	