



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

Comportamento de ligações entre vigas e pilares de secção tubular em situação de incêndio

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

Autor

André Miguel Martins Reis

Orientadores

Aldina Maria da Cruz Santiago

Rui António Duarte Simões

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, Janeiro, 2015

AGRADECIMENTOS

Antes de mais, quero agradecer aos melhores pais do mundo: Amadeu Marto e Cecília Reis pois sem o apoio deles nunca tinha chegado onde cheguei hoje, nunca tinha vivido o que vivi nesta mítica cidade do conhecimento, pelo apoio não só financeiro, como apoio psicológico que sempre me levou a mais e melhor no que faço. Não menos importante agradeço aos meus irmãos Tiago Reis e Pedro Reis.

Quero agradecer ao professor Doutor Rui António Duarte Simões e professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago por todos os ensinamentos transmitidos ao longo da realização desta dissertação. Agradeço ainda á Engenheira Guiomar Vicente pela sua simpatia e disponibilidade, e que me cedeu os resultados dos ensaios por si efetuados, fundamentais para a realização da presente tese.

À minha namorada, Ana Catarina Fazenda, pelo seu incentivo, compreensão e encorajamento durante todos estes mês.

Aos meus amigos por todas as horas passadas num ambiente descontraído, bem como pelas proveitosas discussões que em muito me ajudaram neste trabalho. Destaco o contributo de Tiago Palma, João Duarte e Pedro Pires por todo o tempo que passamos juntos e pelo seu apoio e motivação.

E ainda quero agradecer a todos aqueles que contribuíram de forma positiva no meu percurso académico.

RESUMO

Os perfis metálicos de secção tubular (circular, quadrada ou retangular) apresentam enormes vantagens do ponto de vista estrutural, durabilidade e resistência contra incêndios quando comparados com os perfis de secção aberta. Contudo, são bastante penalizados por causa das dificuldades associadas ao cálculo e dimensionamento e execução das ligações.

A norma EN 1993-1-8 é a base do dimensionamento de ligações por toda a Europa. Esta é especificada para o dimensionamento de ligações aparafusadas e soldadas entre perfis metálicos de secção aberta. Mas quando se trata da aplicação a ligações aparafusadas entre perfis tubulares a norma EN 1993-1-8 torna-se dispensável, o que acontece com a tipologia da presente tese.

Cada vez mais se tem optado pelo uso de perfis tubulares em estruturas metálicas, o que tem justificado o aumento do número de estudos no âmbito das ligações entre perfis deste tipo. Tais estudos têm de ter em conta o processo de execução, a segurança e a minimização do custo de fabrico.

Para tal no âmbito de um projeto europeu (FRAMEUP), que está em curso no Departamento de Engenharia Civil da FCTUC foi feito um conjunto de ensaios experimentais estáticos e cíclicos, à temperatura ambiente e ao fogo, para avaliar o comportamento de uma nova tipologia de ligação entre vigas e pilares, ambos constituídos por secções tubulares. Neste projeto pretende-se ainda desenvolver modelos numéricos e analíticos através do método das componentes para caracterizar adequadamente o comportamento desta tipologia de ligação, em particular das novas componentes.

A presente tese pretende caracterizar a ligação em estudo quando sujeita a incêndio. Para tal é necessário identificar e caracterizar as componentes da ligação à temperatura ambiente, utilizando estudos já efetuados e possíveis relações com a norma em vigor. Posteriormente é efetuado o cálculo da resistência das componentes sujeitas a cargas térmicas utilizando a norma EN 1993-1-2, confrontando os resultados obtidos com o verificado experimentalmente.

ABSTRACT

Hollow metallic section shapes (circular, square or rectangular) present large structural, durability and fire resistance advantages in comparison with open section shapes. However, they are rather penalized because of the difficulties associated with the calculation and the connection design.

The European regulation that defines the connection design is the EN 1993-1-8. This regulation is specific for the design of bolted and welded connections between open section metallic shapes. But regarding bolted connections between hollow section shapes this regulation is not applied, which with the typology of this thesis.

The use of hollow sections on metallic structures has increased in the last years, which justifies the number of studies conducted to understand and optimize the connections between this type of sections. These studies must consider the execution process, safety and fabrication costs.

Within the framework of a European project (FRAMEUP), which is underway in the Civil Engineering Department of FCTUC, a set of static and cyclic experimental tests was performed, at fire and room temperature, to evaluate the behaviour of a new column-beam connection typology, both of hollow section. This project also intends to develop numerical and analytical models based on the component method to characterize the behaviour of this connection typology.

This thesis aims to characterize the referred connection when submitted to a fire hazard. As such it is necessary to identify and characterize the connection components at room temperature, using previous studies e possible relations with the current regulation. And then perform the necessary calculations for the component resistance submitted to thermic loads using the EN 1993-1-2, comparing the results obtained with the experimental tests.

ÍNDICE

Simbologia.....	ix
Abreviaturas.....	xii
1 Introdução.....	1
1.1 Comportamento de estruturas metálicas sujeitas a temperaturas elevadas.....	1
1.2 Enquadramento (Projeto FRAMEUP).....	4
1.3 Objetivos da dissertação.....	5
1.4 Estrutura da dissertação.....	7
2 Estado da arte.....	8
2.1 Estudo das ligações metálicas em situação de incêndio.....	8
2.2 Estudo de ligações com “reverse channel” à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas.....	10
3 Ensaaios experimentais no projeto FRAMEUP.....	15
3.1 Introdução.....	15
3.2 Descrição dos ensaios laboratoriais.....	16
3.2.1 Esquema geral.....	16
3.2.2 Procedimento experimental.....	19
3.2.3 Instrumentação.....	21
3.3 Caracterização mecânica do material.....	23
3.4 Resultados.....	24
4 Momento resistente da ligação com “reverse channel” a temperaturas elevadas.....	31
4.1 Introdução.....	31
4.2 Cálculo analítico do momento resistente da ligação à temperatura ambiente.....	31
4.3 Cálculo analítico do momento resistente da ligação a temperaturas elevadas.....	35
4.3.1 Fatores de redução para da capacidade resistente do aço a temperaturas elevadas.....	35
4.3.2 Resultados.....	38
4.4 Comparação dos resultados experimentais com os resultados analíticos.....	44
5 Curva M-N.....	46
5.1 Introdução.....	46
5.2 Modelo analítico para cálculo das curvas M-N em ligações metálicas.....	46
5.3 Modelo analítico para cálculo das curvas M-N em ligações metálicas para temperaturas elevadas.....	54
6 Conclusões e trabalhos futuros.....	59
6.1 Conclusões.....	59
6.2 Trabalhos futuros.....	60
Referências Bibliográficas.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Curva de incêndio natural (Vila Real, 2003)	2
Figura 1.2 - Curva ISO 834 e Paramétrica	4
Figura 1.3 – Edifício FRAMEUP, elevação e integração de módulos 3D (FRAMEUP, 2013)	5
Figura 1.4 - Ligação viga-pilar com “reverse channel”	6
Figura 2.1 Deformações provocadas por carga térmica	9
Figura 2.2 – Tração provocada pelo arrefecimento do material após incêndio.....	10
Figura 2.3 - Ligação que serviu de base aos estudos de Ding e Wang (2009).....	12
Figura 2.4 - Ligação que serviu de base aos testes de Málaga-Chuquitaype e Elghazoul (2010)	12
Figura 3.1 - Elementos constituintes da ligação: Pilar, “reverse channel”, chapa de topo e viga (da esquerda para a direita).....	15
Figura 3.2 - Identificação das soldaduras	16
Figura 3.3 – Representação esquemática do esquema geral do ensaio	17
Figura 3.4 – Imagem real do esquema de ensaio.....	18
Figura 3.5 – Forno elétrico montado para a ligação	20
Figura 3.6 – Curva tempo-temperatura do ar no interior do forno	20
Figura 3.7 – Pormenorização da localização dos termopares na ligação “Reverse Channel”. 21	
Figura 3.8 - Pormenorização da localização dos defletómetros na ligação “Reverse Channel”	22
Figura 3.9 - Pormenorização da localização dos extensómetros na ligação “Reverse Channel”	23
Figura 3.10 - Curva σ - ϵ do aço	23
Figura 3.11 – Curvas Tempo-Temperatura média no interior do forno	25
Figura 3.12 – Identificação das componentes	26
Figura 3.13 – Curvas Tempo-Temperatura referentes ao Ensaio 1	27
Figura 3.14 - Curvas Tempo-Temperatura referentes ao Ensaio 2.....	28
Figura 3.15 Curvas Tempo-Temperatura referentes ao Ensaio 3.....	29
Figura 3.16 - Curvas Tempo-Deslocamento.....	30
Figura 4.1 - Determinação do M_j, R_d da ligação	34
Figura 4.2 – Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas.....	36
Figura 4.3 Defletómetros D05 e D06	44
Figura 4.4 – Deslocamento horizontal e vertical da ligação.....	45

Figura 5.1 – Identificação das linhas e posição do eixo de referência	47
Figura 5.2 – Curva M-N (Ensaio 2).....	52
Figura 5.3 – Curvas N-M (Ensaio 1)	54
Figura 5.4 – Curva N-M (Ensaio 3).....	54
Figura 5.5 – Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (“reverse channel” - chapa de topo, Ensaio 2)	55
Figura 5.6 – Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (chapa de topo - viga, Ensaio 2)	56
Figura 5.7 - Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (“reverse channel” - chapa de topo, Ensaio 1)	56
Figura 5.8 - Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (chapa de topo - viga, Ensaio 1)	57
Figura 5.9 – Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (“reverse channel” - chapa de topo, Ensaio 3)	57
Figura 5.10 – Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (chapa de topo - viga, Ensaio 3)	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Programa de ensaios	18
Tabela 3.2 – Características do carregamento	19
Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas dos elementos	24
Tabela 3.4 – Módulo de elasticidade dos elementos	24
Tabela 4.1 - Resistência das componentes ativas resistentes a compressão.....	31
Tabela 4.2 – Resistência das componentes ativas resistentes a tração	32
Tabela 4.3 - Resistência das componentes ativas resistentes a corte	32
Tabela 4.4 – Resistências associadas as componentes das ligações à temperatura ambiente .	33
Tabela 4.5 – Tabela resumo do cálculo do momento resistente a temperatura ambiente	34
Tabela 4.6 – Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas.....	36
Tabela 4.7 – Fatores de redução da resistência para parafusos e soldaduras	37
Tabela 4.8 – Resistência das componentes sujeitas à tração durante o aquecimento (Ensaio 1)	38
Tabela 4.9 – Resistência das componentes sujeitas ao corte e compressão durante o aquecimento (Ensaio 1).....	39
Tabela 4.10 – Momento resistente da ligação durante o aquecimento (Ensaio 1)	40
Tabela 4.11 – Resistência das componentes sujeitas à tração durante o aquecimento (Ensaio 2)	40
Tabela 4.12 – Resistência das componentes sujeitas ao corte e compressão durante o aquecimento (Ensaio 2)	41
Tabela 4.13 – Momento resistente da ligação durante o aquecimento (Ensaio 2)	41
Tabela 4.14 – Resistência das componentes sujeitas à tração durante o aquecimento (Ensaio 3)	42
Tabela 4.15 – Resistência das componentes sujeitas ao corte e compressão durante o aquecimento (Ensaio 3)	43
Tabela 4.16 – Momento resistente da ligação durante o aquecimento (Ensaio 3)	43
Tabela 5.1 – Resistência das componentes envolvidas na ligação “reverse channel” com a chapa de topo (Ensaio 2).....	48
Tabela 5.2 Resistência das componentes envolvidas na ligação chapa de topo e viga (Ensaio 2)	48
Tabela 5.3 – Associação de valores na ligação “reverse channel”-chapa de topo (Ensaio 2).	49
Tabela 5.4 – Associação de valores na ligação viga chapa de topo (Ensaio 2).....	49

Tabela 5.5 – Cálculo do momento positivo e esforço axial nas várias posições do eixo neutro ligação “reverse channel” – chapa de topo (Ensaio 2)	50
Tabela 5.6 – Cálculo do momento negativo e esforço axial nas várias posições do eixo neutro ligação “reverse channel” – chapa de topo (Ensaio 2)	50
Tabela 5.7 – Cálculo do momento positivo e esforço axial nas várias posições do eixo neutro ligação chapa de topo-Viga (Ensaio 2).....	51
Tabela 5.8 – Cálculo do momento negativo e esforço axial nas várias posições do eixo neutro ligação chapa de topo-viga (Ensaio 2).....	51
Tabela 5.9 – Distribuição de esforços e modo de rotura sobre momento positivo no troço AB e A'B'	53

SIMBOLOGIA

Letras minúsculas latinas

$b_{eff,c,wc}$	–	Largura efetiva da alma da alma comprimida do pilar
$b_{eff,t,wc}$	–	Largura efetiva da alma da alma tracionada do pilar
d_0	–	Diâmetro do furo para colocação de parafuso
f_y	–	Tensão de cedência
$f_{y,\theta}$	–	Tensão de cedência em situação de incêndio ($\theta^\circ\text{C}$)
f_{ub}	–	Tensão última do parafuso
h	–	Altura do braço do momento resistente da ligação
h_b	–	Altura da viga
k_{cw}	–	Coefficiente de redução
$k_{b,\theta}$	–	Coefficiente de redução para ligações aparafusadas
$k_{E,\theta}$	–	Coefficiente de redução para o declive do domínio elástico linear
$k_{y,\theta}$	–	Coefficiente de redução para a tensão de cedência efetiva
$k_{w,\theta}$	–	Coefficiente de redução para ligações soldadas
k_θ	–	Fator de redução para obtenção do valor da propriedade mecânica à temperatura $\theta^\circ\text{C}$
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
$m_{p,rcw}$	–	Momento plástico da alma do “reverse channel” por unidade de comprimento
n	–	Distância entre o eixo do parafuso e extremidade da chapa
t_b	–	Espessura da viga
t_f	–	Espessura da chapa de topo
t_{rcl}	–	Espessura dos banzos do “reverse channel”
t_{rcw}	–	Espessura da alma do “reverse channel”
t_{wc}	–	Espessura da alma do pilar

Letras maiúsculas latinas

A_s	–	Área útil do parafuso
A_{vc}	–	Área de corte do pilar
B	–	Largura da seção da viga
C	–	Distância entre as linhas médias dos banzos do “reverse channel”
E	–	Módulo de elasticidade
E_a	–	Módulo de elasticidade à temperatura ambiente
$E_{a,\theta}$	–	Módulo de elasticidade à temperatura $\theta^\circ\text{C}$
$F_{c,b,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência do componente “viga à compressão”

$F_{t,rcl,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência do componente “banzos do “reverse channel” à compressão”
$F_{c,rcw,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência do componente “alma do “reverse channel” à compressão”
$F_{c,wc,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência do componente “alma do pilar 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 “reverse channel” à tração”
$F_{t,rcw,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência do componente “alma do “reverse channel” à tração”
$F_{t,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência à tração de um parafuso à temperatura ambiente
$F_{ten,t,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência à tração de um parafuso à temperatura ambiente
$F_{t,wc,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência do componente “alma do pilar 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”
$F_{w,t,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência por unidade de comprimento de um cordão de ângulo à temperatura ambiente
$F_{T,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência do componente “chapa de topo à flexão”
L_c	–	Distância entre a linha média do banzo superior da viga e a aresta superior da placa
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
$M_{pl,2,Rd}$	–	Momento plástico de rotura referente ao modo de rotura 2
$M_{pl,Rd}$	–	Momento plástico da viga
R_m	–	Raio do padrão circular de rotura
$V_{wp,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência do componente “alma do pilar e do RC ao corte”
W_{pl}	–	Módulo de flexão plástico
X_k	–	Valor característico da propriedade mecânica à temperatura ambiente (20°C)
$X_{d,\theta}$	–	Valor da propriedade mecânica do material em situação de incêndio (θ °C)

Letras gregas

γ_{M0}	–	Fator de segurança parcial para a resistência de seções transversais de qualquer classe
γ_{M2}	–	Fator de segurança parcial para a resistência de ligações soldadas ou aparafusadas
$\gamma_{M,fi}$	–	Fator de segurança parcial de segurança em situação de incêndio
θ_g	–	Temperatura do compartimento de incêndio
ρ	–	Coefficiente de redução para o enfunamento da chapa
ω	–	Coefficiente de redução

ABREVIATURAS

- CIDECT – Comité Internacional pelo Desenvolvimento do Estudo da Construção
Tubular
RC – “Reverse channel”
RHS – Secção tubular retangular
SHS – Secção tubular quadrada

1 Introdução

1.1 Comportamento de estruturas metálicas sujeitas a temperaturas elevadas

Como é do conhecimento geral o aço tem um fraco desempenho quando sujeito a temperaturas elevadas, como as que ocorrem em situação de incêndio. Por um lado, a sua elevada condutividade térmica faz com que a temperatura se propague rapidamente, e por outro, as suas propriedades mecânicas degradam-se drasticamente com o aumento da temperatura. É pois fundamental saber avaliar a resistência das estruturas metálicas quando sujeitas à ação do fogo, tendo em vista que o objetivo principal da segurança contra incêndios, nos edifícios, é a limitação dos riscos para as pessoas e para a sociedade, para os bens vizinhos e, quando necessário, para os bens diretamente expostos ao incêndio, além de minimizar perdas económicas (Vila Real, 2003).

A segurança contra incêndios tem vindo nos últimos anos a merecer uma atenção redobrada por parte dos legisladores portugueses. A publicação de regulamentos nesta área veio combater o vazio legal existente neste campo. A aprovação de Normas Europeias das partes relativas ao cálculo estrutural ao fogo dos Eurocódigos Estruturais vem fornecer aos projetistas um conjunto de regras e métodos simplificados.

Para a ocorrência de um incêndio é necessário que se reúnam em simultâneo três fatores: existência de uma fonte de calor, um combustível e um comburente (o oxigénio). Ou seja, o incêndio só se dá quando a mistura combustível/oxigénio estão suficientemente quentes para ocorrer a combustão. Na Figura 1.1 podemos observar todas as fases para a ocorrência de um incêndio natural.

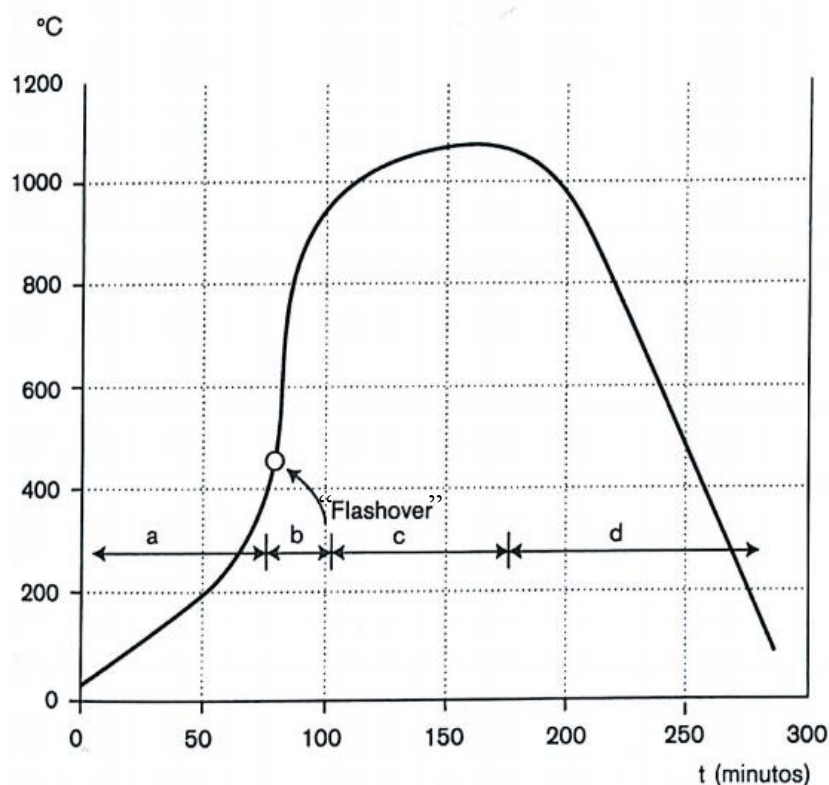


Figura 1.1 – Curva de incêndio natural (Vila Real, 2003)

Numa fase inicial, durante a qual as temperaturas permanecem baixas não existe nenhuma influência no comportamento estrutural do edifício (período *a* na Figura 1.1). Contudo, é esta a fase mais crítica do incêndio, pois é durante a qual se produzem os gases tóxicos. Esta fase pode também ser denominada de fase de ignição. Na fase seguinte, o fogo espalha-se por radiação ou por contacto (período *b* na Figura 1.1). Num determinado instante dá-se a inflamação súbita dos gases, e o incêndio alastra-se a todo o compartimento. Este instante é denominado de “*flashover*”, o qual ocorre quando as temperaturas abaixo do nível do teto se situam entre os 450 °C e os 600 °C. A partir deste instante a temperatura sobe drasticamente, (período *c* na Figura 1.1). Esta fase é denominada de fase de propagação. A fase de desenvolvimento pleno, durante a qual o incêndio se alimenta do material combustível, mantendo-se as temperaturas constantes. Por fim a fase de extinção ou fase de arrefecimento, (período *d* na Figura 1.1). Com a diminuição das temperaturas, com a falta de combustível ou comburente, ou pela intervenção do corpo de bombeiros ou outros (Vila Real,2003).

Inicialmente, para o estudo dos elementos estruturais em situação de incêndio, os métodos baseavam-se em ensaios normalizados; nestes os elementos são posicionados num forno, onde a temperatura varia com o tempo de acordo com uma curva normalizada de aquecimento, a curva padrão ISO 834 (ISO 834-1, 1999). Para se provar que o elemento estrutural está em segurança, ele tem de ter uma resistência ao fogo, determinada em ensaio, igual ou superior, à resistência requerida regulamentarmente.

A representação de incêndios reais através de modelos adequados para a verificação da segurança das estruturas em relação ao fogo é particularmente difícil em fase da grande variedade das situações que se podem apresentar e dos múltiplos parâmetros que condicionam o fenómeno. Para a modelação das temperaturas e dos gases a norma EN 1991-1-2 (2010) recorre às curvas nominais tempo-temperaturas ou sob a forma de curvas paramétricas (Figura 1.2). As curvas nominais são curvas convencionais que podem ser definidas por equações simples como a equação (1) referente Curva de Incêndio Padrão, ISO 834:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)^\circ\text{C} \quad (t \text{ em minutos}) \quad (1)$$

Esta curva não depende da dimensão ou tipo de edifícios, não possui fase de ignição nem de extinção. Esta curva é a utilizada nos ensaios normalizados em fornos, já referidos anteriormente para determinação da resistência ao fogo dos elementos estruturais. Esta curva possui pouca realidade física, mas sendo uma curva normalizada, permite realizar comparações de resultados experimentais da resistência ao fogo obtidos em diferentes laboratórios num determinado país, ou em mesmo entre países diferentes.

As curvas paramétricas tempo-temperatura, ao contrário das curvas nominais, dependem de certos parâmetros físicos, os quais podem ser consultados na norma EN 1991-1-2 Anexo A (CEN, 2010).

Num incêndio real, a transmissão de calor pode ser definida como a propagação de energia de uma região para outra de um meio sólido, líquido ou gasoso, como resultado da diferença de temperaturas entre elas. Sempre que existe uma diferença de temperaturas num sistema, a energia na forma de calor flui da região com temperatura mais elevada, para a de temperatura mais baixa.

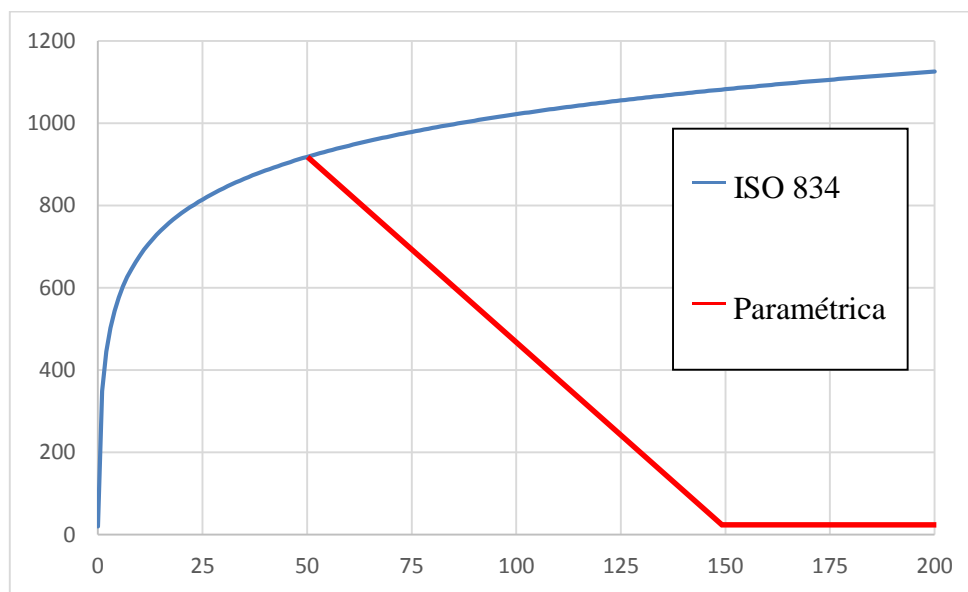


Figura 1.2 - Curva ISO 834 e Paramétrica

1.2 Enquadramento (Projeto FRAMEUP)

O trabalho desenvolvido nesta tese está englobado dentro de um projeto de investigação europeu, o projeto FRAMEUP, o qual é financiado pelo Fundo de Investigação Europeu de Carvão e Aço. O projeto FRAMEUP foi executado por 7 entidades creditadas, entre as quais o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Entre Universidades e empresas europeias, o consórcio de investigação comprometeu-se a dar resposta às tarefas impostas neste projeto através da realização de ensaios experimentais, modelações numéricas e procedimentos analíticos.

O objetivo principal do projeto consistiu no estudo de um novo método de construção, pensado para estruturas metálicas, que consiste na construção de um edifício começado pelo último andar, montado ao nível do chão, elevando este com recurso a macacos hidráulicos, para

adicionar os andares inferiores a estrutura (Figura 1.3). Este objetivo principal foi conseguido através do desenvolvimento de um conjunto de tarefas:

- 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, composta por componentes para as quais ainda não existem modelos regulamentares;
- Desenvolver e estudar modelos do mesmo tipo de ligação sujeitando-os a temperaturas elevadas para avaliação da sua resistência em caso de incêndio.



Figura 1.3 – Edifício FRAMEUP, elevação e integração de módulos 3D (FRAMEUP, 2013)

Para que este tipo de construção seja viável e de rápida de execução, os vários compartimentos são constituídos por módulos pré-fabricados que chegam a obra prontos a ser adicionados à estrutura. Esta é constituída por perfis metálicos de secção quadrada oca nos pilares e perfis metálicos de secção retangular oca nas vigas.

1.3 Objetivos da dissertação

Com base em estudos já efetuados para o cálculo de uma ligação viga-pilar entre dois perfis tubulares à temperatura ambiente (Silva T., 2014), o trabalho realizado nesta tese visa avaliar o comportamento da mesma ligação escolhida, quando submetida a um gradiente crescente de temperatura. Assim, a opção escolhida para a ligação viga-pilar, entre os diferentes tipos de ligação considerados no projeto FRAMEUP, foi o “reverse channel” com reforço acima e a baixo do banzo (Figura 1.4), pois esta mostra um melhor equilíbrio entre o custo e as exigências de segurança estrutural. Esta configuração foi escolhida de forma a cumprir os requisitos de resistência e rigidez rotacional de um edifício com 6 pisos, sem contraventamentos para os efeitos horizontais.

Para tal foram realizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra diversos ensaios em ligações sujeitas a momento fletor constante e aumento de temperatura.

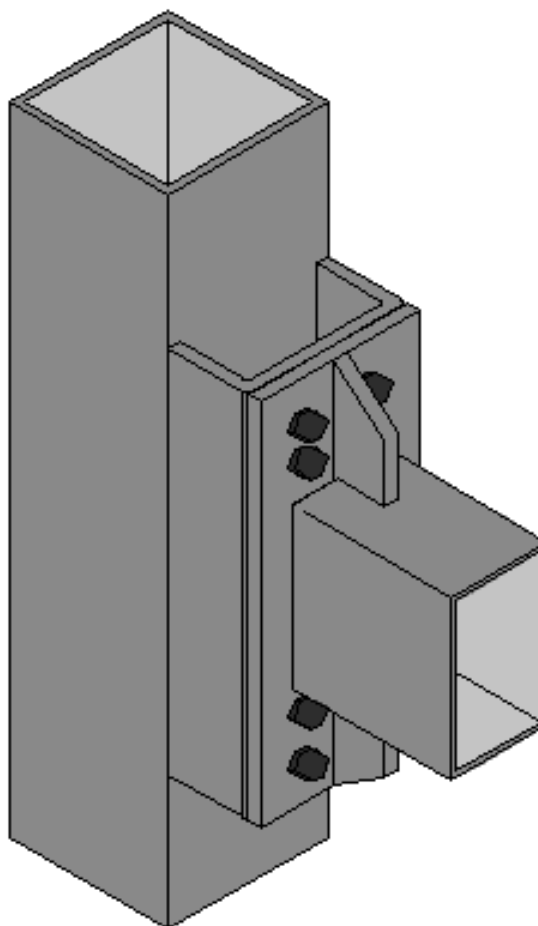


Figura 1.4 - Ligação viga-pilar com “reverse channel”

A presente tese surge com o objetivo de identificar a redução das capacidades resistentes das diversas componentes da ligação ao longo do tempo, analisando alguns ensaios realizados, em ligações sujeitas à ação do fogo. Utilizando os dados provenientes das leituras dos ensaios e utilizando as metodologias propostas para este tipo de ligações, será quantificada a resistência plástica da ligação. Desta forma, pretende-se cumprir uma das tarefas do projeto de investigação FRAMEUP que se encontra em fase de conclusão na Universidade de Coimbra. É ainda estudado o efeito do esforço axial na ligação através do estabelecimento de curvas de interação entre o esforço axial e o momento fletor.

1.4 Estrutura da dissertação

A tese foi estruturada em 6 capítulos.

No presente capítulo, **capítulo 1**, faz-se referência a alguns conceitos essenciais do estudo de elementos metálicos sujeitos à ação do fogo.

O **capítulo 2** diz respeito ao Estado da Arte, onde são descritos os estudos de ligações metálicas em situação de incêndio.

No **capítulo 3** são apresentados os ensaios experimentais, as propriedades dos materiais, observações efetuadas durante os testes e ainda o tratamento dos dados obtidos destes.

No **capítulo 4** é calculado o momento resistente da ligação com “reverse channel” ao longo do tempo com o aumento da temperatura. Os resultados são comparados com os valores obtidos nos ensaios experimentais.

O **capítulo 5** por sua vez, trata do estudo da interação do momento fletor com o esforço axial numa ligação a temperatura ambiente e a temperaturas elevadas.

A partir das comparações efetuadas nos capítulos anteriores, tecem-se alguns comentários e apresentam-se as devidas conclusões no **capítulo 6**. Neste capítulo, apresentam-se ainda algumas propostas para trabalhos futuros.

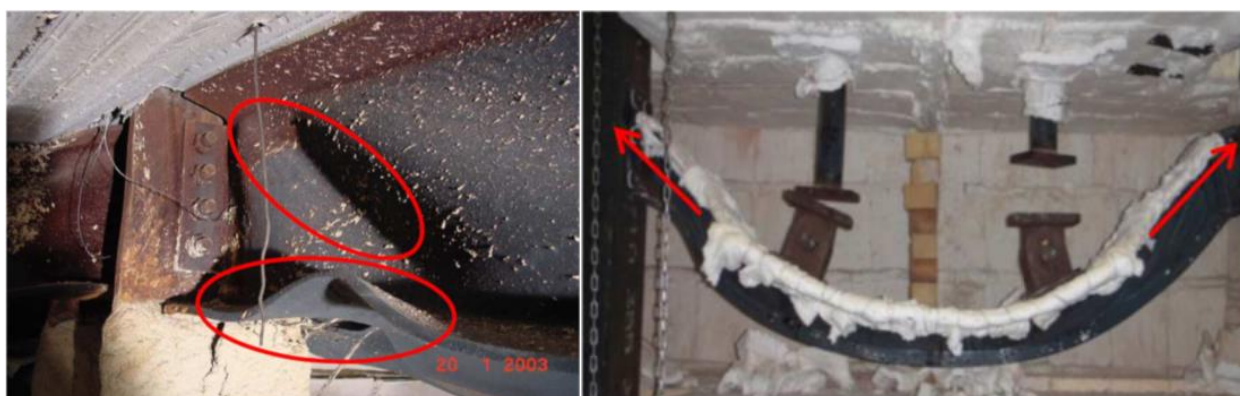
2 Estado da arte

2.1 Estudo das ligações metálicas em situação de incêndio

Tradicionalmente as ligações viga-pilar assumem-se com resistência ao fogo suficiente devido ao facto de estarem sujeitas a temperaturas mais baixas e menor taxa de aquecimento, causado pela concentração de massa na zona da ligação, conclusão obtida a partir de trabalhos de investigação passados (Simões da Silva *et al.* (2005) e Al-Jabri *et al.* (2008)).

O comportamento das ligações metálicas e ligações mistas aço-betão, sob as curvas de tempo-temperatura nominais ou condições de fogo natural (incluindo as fases de aquecimento e de arrefecimento) tem sido amplamente estudado com base em trabalhos de investigação experimentais, analíticos e numéricos. Ligações viga-pilar em um incêndio são expostas a combinações de forças e momentos significativamente diferentes da flexão simples e esforço de corte a temperatura ambiente. Os momentos adicionais e forças axiais na viga, provenientes da restrição da viga, originam grandes deformações verticais e rotações (Block, 2006). Incêndios reais e observações experimentais mostraram que, em várias ocasiões, as ligações de aço também podem romper devido às trações elevadas induzidas pela deformação distorcional dos elementos ligados (Santiago, 2008).

Em situação de incêndio real, no decorrer da fase de aquecimento de elementos que estão restringidos axialmente por elementos não aquecidos, são induzidas forças de compressão a par de ações de flexão, que produzem instabilidades locais. O esforço axial, a flexão, a não linearidade geométrica e a degradação das propriedades do material pode levar a encurvaduras locais (Figura 2.1a) ou ao desenvolvimento de roturas plásticas com o aumento da temperatura. Com temperaturas elevadas, estas encurvaduras locais e roturas reduzem a resistência em regiões localizadas (geralmente próximo de ligações); posto isto, o elemento desenvolve rapidamente trações que podem resultar em ações catenárias (Figura 2.1b) (Heidarpour, 2007).



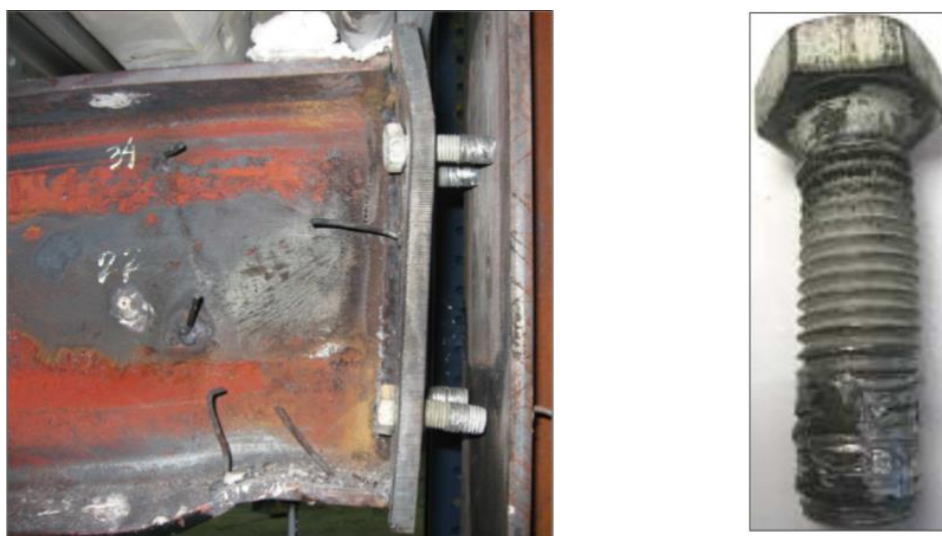
a) Encurvadura local em viga (Santiago, 2008)

b) Ações Catenárias (Simões da Silva *et al.*, 2013)

Figura 2.1 Deformações provocadas por carga térmica

Com o aumento da temperatura o modo de rotura da chapa de topo pode mudar, do modo mais dúctil (Modo 1, plastificação da chapa) para o modo mais frágil (Modo 3, tração dos parafusos), pois com o aumento da temperatura a resistência dos parafusos reduz mais rapidamente que a resistência do aço. O uso de chapas de topo de grande espessura melhora a capacidade plástica da ligação quando sujeitas a temperaturas elevadas, mas em contrapartida reduz a capacidade de rotação da componente. (Yu *et al.*, 2008a). Tendo em conta Hu *et al.* (2008b), a revisão de resultados experimentais da flexibilidade das ligações com chapa de topo, e sabendo que o mínimo de resistência da ligação é 75 kN definido pelo método de amarração definido na norma EN 1991-1-7 (2006), o que não pode ser assegurado em situação de incêndio. A capacidade de rotação de ligações com chapa de topo com o aumento da temperatura é reduzido, e então as ligações podem não possuir ductilidade suficiente para desenvolver a ação de catenária, podendo fraturar prematuramente (Hu *et al.*, 2008b).

Com o arrefecimento surgem outros problemas, recorrentes da contração térmica, que é o caso das forças de tração que aumentam na viga; estas contrações na viga dependem do aumento da temperatura e das restrições axiais. Ligações e parafusos são particularmente vulneráveis a essas forças de tração. O risco do parafuso romper durante o arrefecimento de um fogo real (Figura 2.2 a) e b)) é elevado se forem reunidas duas condições: elevado nível de aquecimento e o efeito da restrição contido (para temperaturas elevadas e alta rigidez das restrições axiais as trações aumentam). Com o decorrer do arrefecimento, as trações continuam a aumentar gradualmente, até a estrutura estar completamente a temperatura ambiente, ou seja, a rotura das ligações pode acontecer várias horas após a completa extinção do incêndio (Santiago, 2008).



a) Rotura da ligação em tração devido ao arrefecimento b) Parafuso tracionado

Figura 2.2 – Tração provocada pelo arrefecimento do material após incêndio

Foram então desenvolvidos vários novos modelos baseados no método das componentes, para o estudo numérico de ligações sob elevadas temperaturas e sujeitas a combinações de forças e momentos. Block (2006), Sulong (2007), Sarraj *et al.* (2007), Santiago (2008), Fang (2012) e Demonceau *et al.* (2013) concluíram, incorporando a rigidez real e resistência da ligação no modelo numérico, a resistência da ligação pode ser mais próximo da realidade em relação ao caso de ser considerado apenas rotulado. Ainda avaliaram o comportamento da ligação com o seu aquecimento e arrefecimento, da qual resultam forças de compressão e de tração, devido à expansão do material em altas temperaturas.

2.2 Estudo de ligações com “reverse channel” à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas

As ligações mais usadas entre viga e pilar de secção tubular oca, são chapas aparafusadas e soldadas às paredes dos perfis a ligar dos quais temos o caso da ligação “fin plate”, a qual usa chapa de aço soldada à parede do pilar.

No caso da presente tese, em que é necessário ligar dois perfis de secção retangular oca, torna-se difícil realizar tal tipo de ligação, pois não existe acesso ao interior dos perfis. Então entre outras opções, foi escolhida a ligação denominada de “reverse channel”, RC. Este tipo de configuração é particularmente útil para a ligação de vigas a pilares de secção circular ou

retangular. Esta ligação consiste na utilização de um perfil em U invertido soldado diretamente no pilar tubular e aparafusado à viga com chapa de topo.

Devido ao potencial apresentado pela ligação com “reverse channel”, alguns estudos têm sido realizados 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 pilares tubulares e vigas constituídas por perfis abertos.

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 de secção aberta (IPE) e perfis de secção retangular oca (RHS). Estes modelos estão presentes no CIDECT (2005).

Os primeiros estudos realizados com base numa ligação com “reverse channel” foram efetuados por Jones (2008). Tratava-se de uma ligação entre uma viga de secção aberta e um pilar de secção tubular, ao qual o “reverse channel” foi soldado (Figura 2.3). 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 “reverse channel”.

Seguindo a mesma tipologia, Ding e Wang (2009) realizaram estudos que se focavam no comportamento tanto estrutural como térmico da ligação. Concluíram que espessuras menores do “reverse channel” são preferíveis pois conduzem a uma maior ductilidade da ligação.

Elsawaf, Wang e Mandal (2011), fizeram uma análise numérica em elementos finitos, nos quais a espessura do “reverse channel” teve influência direta na capacidade resistente da ligação (Figura 2.3 c). Este modelo de elementos finitos foi ainda utilizado para realizar um estudo numérico preliminar para investigar a viabilidade de mudança de alguns dos detalhes de ligação para melhorar a capacidade resistente da estrutura em situação de incêndio.

Málaga-Chuquitaype e Elghazouli (2010) apresentaram uma metodologia de ligação um pouco diferente (Figura 2.4) em que nos ensaios realizados sujeitou-se as ligações a cargas monotónicas e 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 para o cálculo da resistência do “reverse channel” à tração bem como da rigidez inicial da ligação.

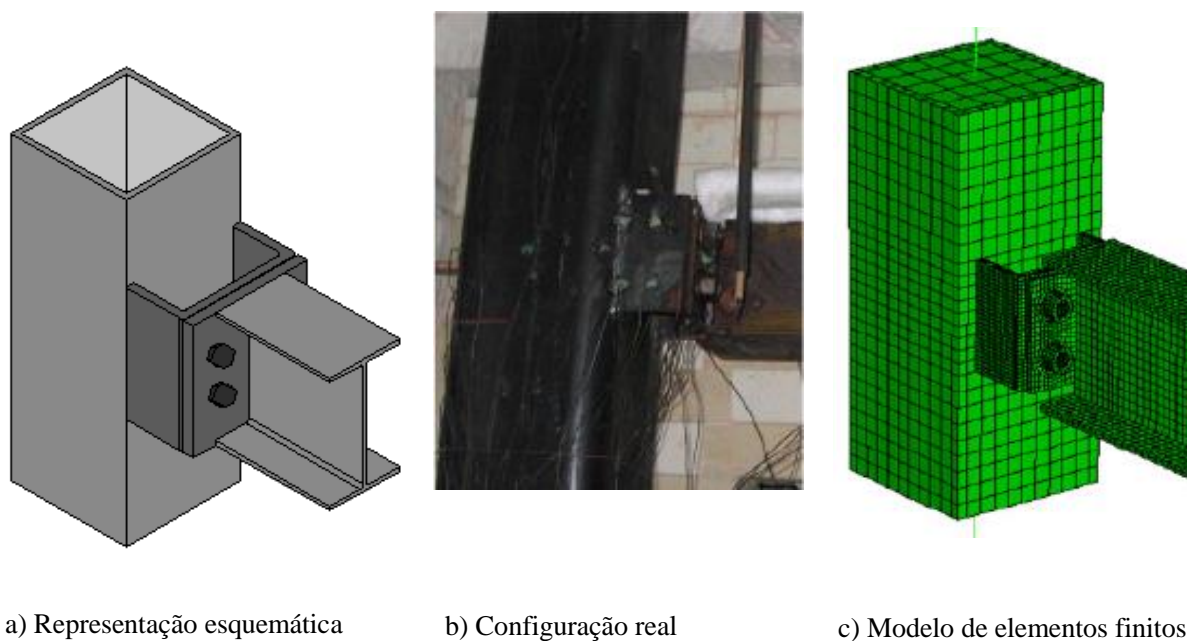


Figura 2.3 - Ligação que serviu de base aos estudos de Ding e Wang (2009)

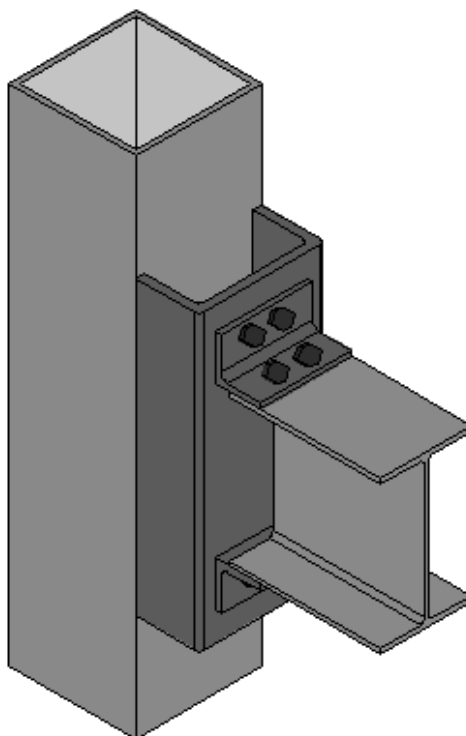


Figura 2.4 - Ligação que serviu de base aos testes de Málaga-Chuquitaype e Elghazoul (2010)

Liu, Málaga-Chuquitaype e Elghazouli (2012), realizaram outros estudos experimentais e analíticos. Destes trabalhos obtiveram-se conclusões idênticas aos autores já enunciados anteriormente, em que a espessura do “reverse channel” tem uma influência direta na rigidez e capacidade resistente da ligação. Foram também realizados ensaios de tração e compressão os quais permitiram a identificação de mecanismos de rotura. Através destes, foi possível criar propostas para a quantificação da resistência e da rigidez de algumas 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, no âmbito do projeto COMPFIRE, Lopes *et al.* (2013) realizou diversos testes, tanto à temperatura ambiente como a temperaturas elevadas, com diversas tipologias com o intuito de encontrar uma relação entre força, deslocamento e temperatura. Destes testes verificou-se que, quando a ligação se encontra sujeita à tração, o modo de rotura ocorre pelo punçoamento dos parafusos na alma do “reverse channel”; 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 *et al.* (2013) concluíram que a secção 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; a rigidez e a resistência diminuem significativamente com o aumento de temperatura, mas a mesma apresenta uma grande ductilidade.

Ainda no projeto COMPFIRE a Universidade de Sheffield o estudo da rigidez inicial resultante da junção entre o “reverse channel” e a chapa de topo. Tal estudo baseou-se na comparação do comportamento do “reverse channel” com o de um pórtico rígido, apresentando uma relação entre força e deslocamento, mas do qual ainda não foram obtidos resultados coerentes.

Até ao presente já muitos estudos incidiram sobre este inovador modelo de ligação metálica através do “reverse channel”, mas ainda não existem modelos regulamentares para o dimensionamento deste tipo de ligação. Existem já algumas metodologias, mas obtidas a partir de ligações idênticas à que se pretende estudar. E o projecto COMPFIRE incide no estudo deste tipo de ligação em situação de incêndio utilizando estas metodologias introduzindo o fator de redução das capacidades mecânicas do material, devido ao aumento da temperatura, seguindo assim a norma EN 1993-1-2 (2010).

Jafarian e Wang (2012) realizaram nove ensaios à temperatura ambiente e a temperatura elevada, onde foram observados três padrões de rotura: cedência da primeira linha de parafusos, formação de linhas de rotura ao longo do “reverse channel” e rotura pelos parafusos. Para além destes ensaios, realizaram-se ainda 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.

Wang e Li (2013) realizaram estudos relativos às características momento-rotação de uma ligação a um pilar de secção tubular com “reverse channel”, sendo que esta segue a mesma tipologia exposta na Figura 2.3 a). Estes estudos permitiram a verificação da rigidez da ligação bem como da resistência parcial que esta oferece, e ainda a rotura que ocorre mais frequentemente inicia-se pela formação de linhas de rotura na intersecção dos banzos do “reverse channel” 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.

Simões, T. (2013) realizou uma primeira abordagem analítica à tipologia de ligação apresentada na Figura 1.4 (Capítulo 1). De forma a quantificar a resistência e a rigidez das componentes “alma do reverse channel à tração” e “alma do reverse channel à compressão”, o autor baseou-se na metodologia proposta no CIDECT (2005). Em género de conclusão, Simões, T. (2013) refere que as 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 sua aplicação.

3 Ensaio experimentais no projeto FRAMEUP

3.1 Introdução

No âmbito do projeto Europeu FRAMEUP, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra foram feitos vários ensaios deste tipo de ligação viga-pilar, com “reverse channel” (Figura 1.4). Estes ensaios foram destinados a verificar a resistência da ligação sujeita a cargas monotónicas, cíclicas, e ainda a cargas de incêndio. O modelo a ensaiar era composto por um pilar de secção quadrada, e viga de secção retangular. A ligação entre estes elementos era ainda constituída por mais 3 componentes, o “reverse channel” a chapa de topo e ainda um reforço (Figura 3.1), de várias espessuras dependendo do ensaio.

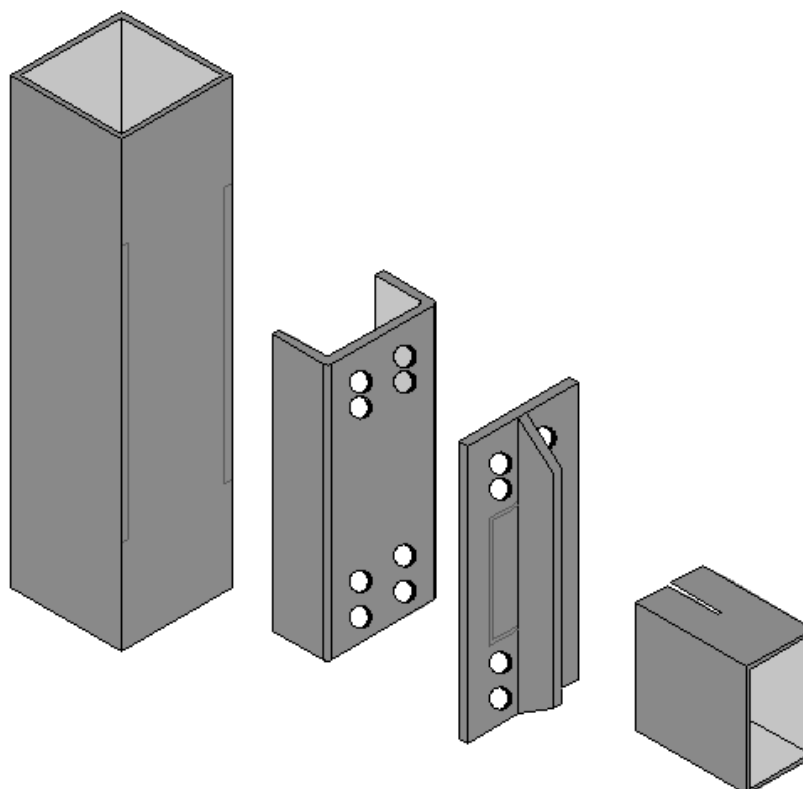


Figura 3.1 - Elementos constituintes da ligação: Pilar, “reverse channel”, chapa de topo e viga
(da esquerda para a direita)

O “reverse channel” consiste na utilização de um perfil em U (neste caso metade da secção do pilar) invertido soldado diretamente ao pilar por penetração total. O mesmo acontece com a ligação entre a chapa de topo que é soldada ao reforço e à viga. A soldadura existente entre o reforço e a viga é efetuada por penetração parcial (Figura 3.2).

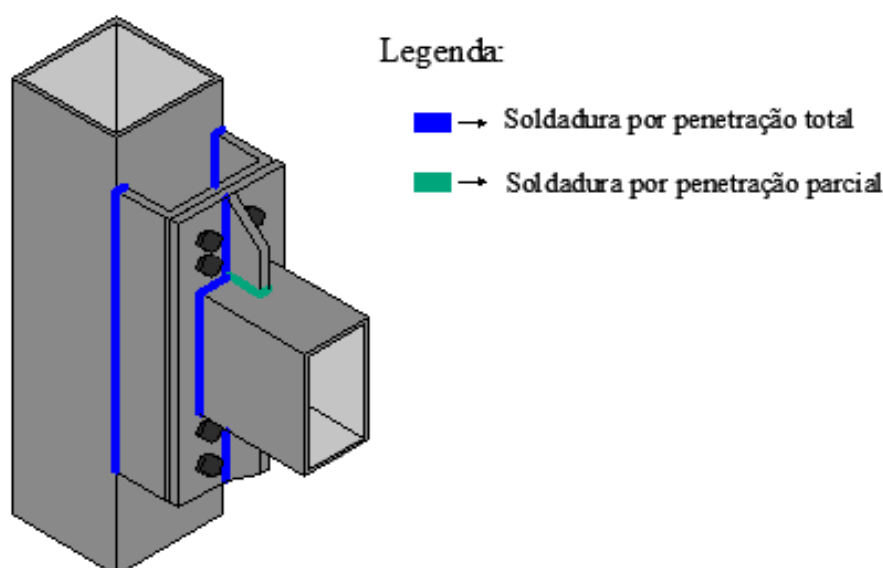


Figura 3.2 - Identificação das soldaduras

3.2 Descrição dos ensaios laboratoriais

3.2.1 Esquema geral

Na Figura 3.3 é representado o esquema geral do ensaio, onde se destaca a ligação viga-pilar com “reverse channel”, identificada com o número 1. A ligação entre a chapa de topo e a alma do “reverse channel” é aparafusada. Para tal foram utilizados parafusos M27 de classe 10.9. Para simular o pilar foi utilizada um perfil de secção SHS250x250x10 com cerca de 2.4 metros de comprimento, número 3, e uma viga de secção RHS250x150x8, número 4.

Como indicado na Figura 3.3, a estrutura de suporte é composta por uma viga de reação de secção HEB 500, número 6, a qual, para obter reação é ligada a uma parede de betão, número 11, e na extremidade oposta, por um pórtico de reação secundária. O pilar obtém reação nesta viga e ainda numa sapata de betão armado, número 13. A parede de betão e a viga de reação estão contidas no mesmo plano, que é ortogonal ao plano em que está contida a estrutura de reação secundária. Isso garante rigidez e estabilidade aos ensaios nesses planos. Na Figura 3.4 é apresentada uma imagem real do esquema de ensaio.

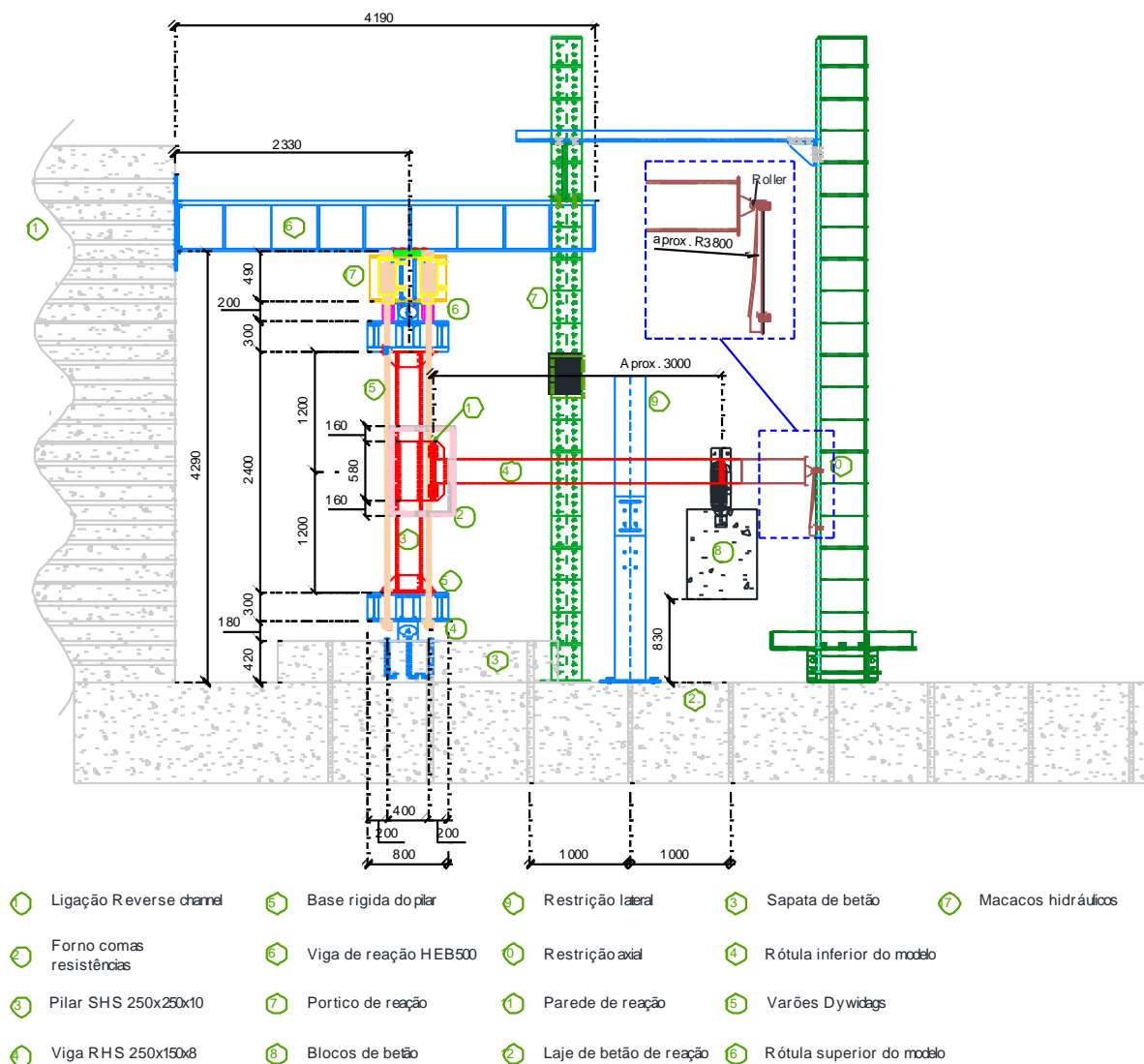


Figura 3.3 – Representação esquemática do esquema geral do ensaio

Na Tabela 3.1 são identificados todos os ensaios realizados no âmbito do projeto FRAMEUP. Foram realizados três tipos de ensaio, cargas monotónicas, cíclicas e térmicas. Destes ensaios apenas foram abordados os de a carga térmica, que recebem o nome de BC1, BC3 e BC4, os quais na presente tese recebem o nome Ensaio 3, 2 e 1 respetivamente.



Figura 3.4 – Imagem real do esquema de ensaio

Tabela 3.1 – Programa de ensaios

Nome do teste	Tipos de ensaio	Espessura do RC	Espessura da chapa	Espessura do reforço
BC.1_CHN20_PL20_ST00	Monotónico Fogo	20 mm	20 mm	0 mm
BC.2_CHN20_PL20_ST20	Monotónico Cíclico	20 mm	20 mm	20 mm
BC.3_CHN16_PL20_ST20	Monotónico Cíclico Fogo	16 mm	20 mm	20 mm
BC.4_CHN16_PL15_ST15	Monotónico Cíclico Fogo	16 mm	15 mm	15 mm
BC.5_CHN250x125x16_PL20_ST20 ⁽¹⁾	Monotónico	16 mm	20 mm	20 mm

¹ Neste ensaio é usada uma secção retangular completa RHS 250*125*16

3.2.2 Procedimento experimental

Para o cálculo do momento fletor imposto na viga, foi tido em conta a combinação de ações acidentais da norma EN 1991-1-2 (2010), o que corresponde a um momento fletor constante de 63 kN.m. Para garantir este carregamento, foram colocados em suspensão dois blocos de betão armado a uma distância de aproximadamente 3 metros (numero 8, Figura 3.3), o que impõe o carregamento pretendido (Tabela 3.2). A viga foi ainda, restringida lateral e longitudinalmente.

Da mesma forma, a partir da combinação de ações de fogo, de acordo com a norma EN1991-1-2 (2010), foi calculada a carga axial esperada, para um edifício de seis andares de altura, na base do pilar. Essa força corresponde a uma carga de 200 kN. Para simular este esforço foram utilizados varões “Dywidag” identificados na Figura 3.3 pelo número 15. Estes ligam o topo do pilar à base do mesmo de modo a obter um sistema de carregamento axial no pilar, no valor pretendido. O sistema de carga aplicada impede a expansão do pilar quando aquecido, que é uma simplificação do que realmente acontece num edifício. Num caso real a expansão de um pilar ao nível do solo é condicionado pelos andares que apoia, no entanto, nunca é totalmente restringido.

Tabela 3.2 – Características do carregamento

Teste nº	Nome do Teste	Carregamento (kN)	Distância Ligação/Ponto de aplicação (m)	M_{Ed} (kNm)
Ensaio 1	BC.F_CHN16_PL15_ST15	21,58	2,92	63,01
Ensaio 2	BC.F_CHN16_PL20_ST20	21,58	2,96	63,88
Ensaio 3	BC.F_CHN20_PL20_ST00	21,58	2,96	63,88

Por último, foi simulado o cenário de incêndio. Foi usado um forno elétrico, o qual foi fabricado de forma a englobar apenas a ligação, zonas adjacentes da viga e do pilar, como se pode verificar na Figura 3.5. O forno foi fabricado no laboratório de estruturas e ensaio de materiais do Departamento de Engenharia Civil com perfis enformados a frio. Este foi revestido com lã de vidro (espessura de 50 mm), que funciona como um alojamento para os "cooperheats" e como um isolamento do forno. Esta disposição deu ao forno uma potência total de aproximadamente 50000 Watts. Este em capacidade máxima atinge cerca de 900 °C em aproximadamente 80 min

como se pode ver na curva média apresentada na Figura 3.6. Com esta curva, pode-se dizer que é simulada uma curva de incêndio natural dentro de um módulo do edifício FRAMEUP.

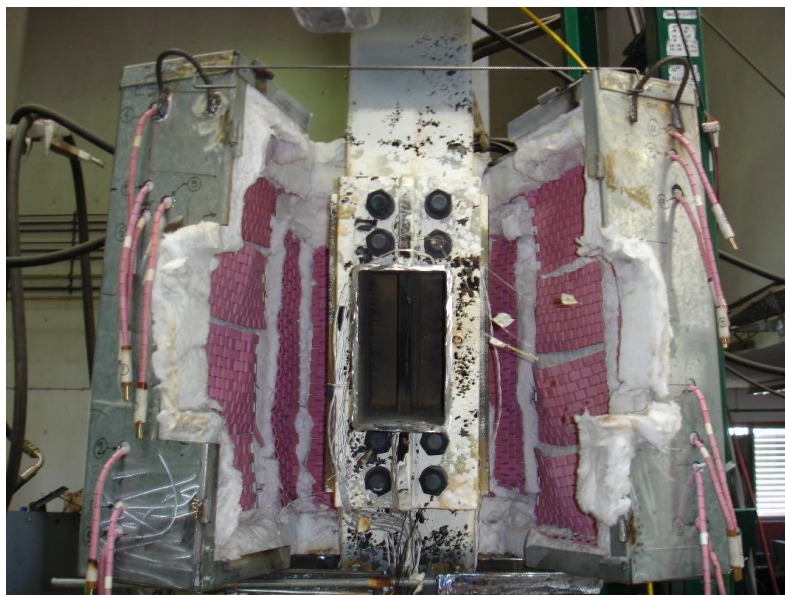


Figura 3.5 – Forno elétrico montado para a ligação

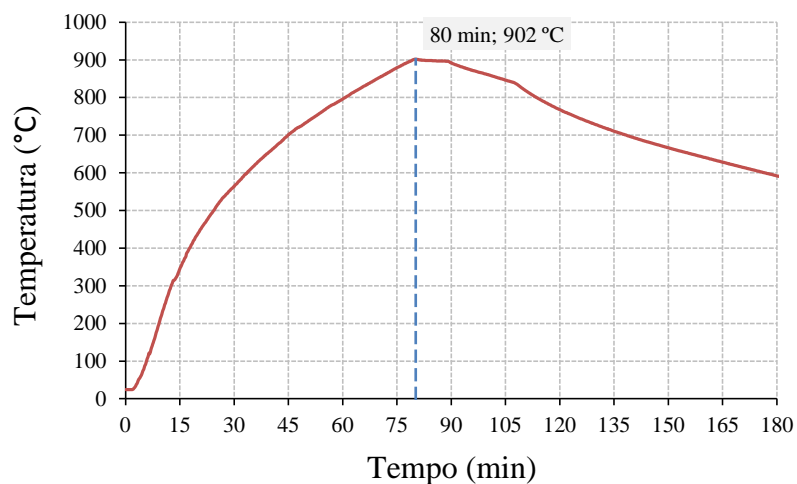


Figura 3.6 – Curva tempo-temperatura do ar no interior do forno

3.2.3 Instrumentação

Foram realizados ensaios, a escala real, simulando a influência de um incêndio, em todas as ligações apresentadas na Tabela 3.1. O principal objetivo destes ensaios foi caracterizar o comportamento da ligação quando sujeita a altas temperaturas, atuando sobre esta um momento constante.

A temperatura no ensaio é medida através de termopares, devidamente colocados de modo a especificar as temperaturas de todas as componentes da ligação (Figura 3.7).

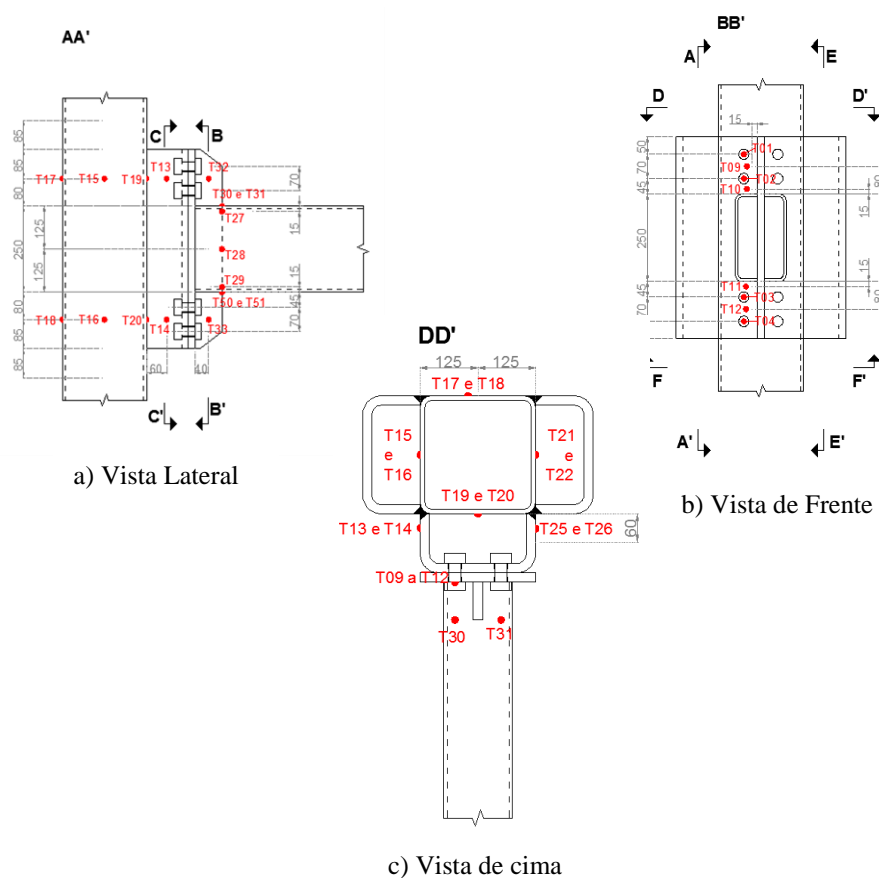


Figura 3.7 – Pormenorização da localização dos termopares na ligação “Reverse Channel”

Fazem ainda parte da instrumentação defletómetros e extensómetros. Os defletómetros foram colocados em pontos estratégicos de forma a possibilitarem o cálculo dos deslocamentos e rotação da estrutura (Figura 3.8).

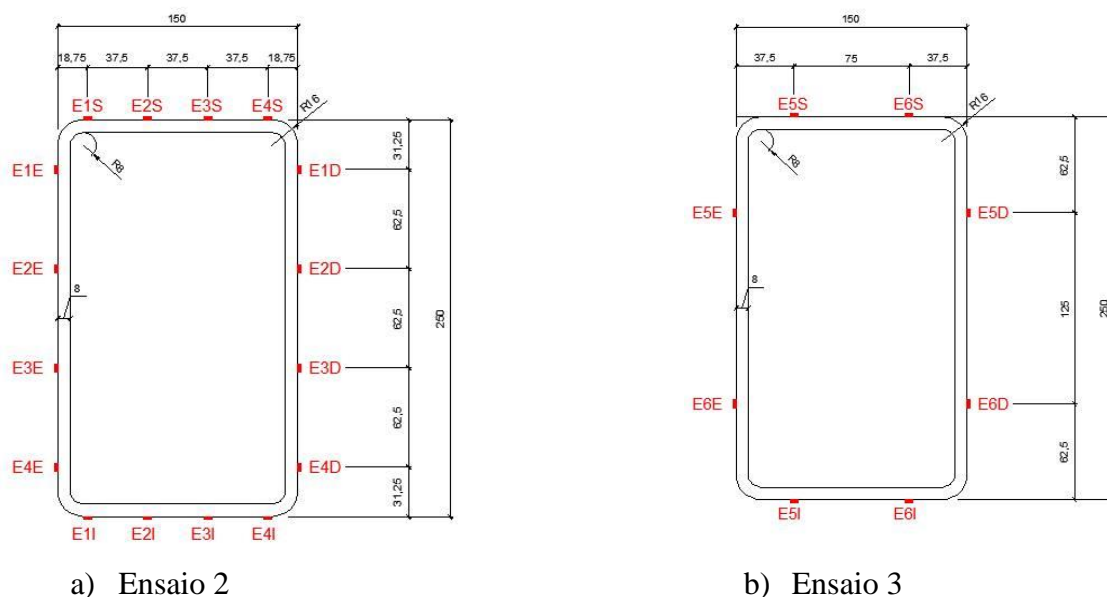


Figura 3.9 - Pormenorização da localização dos extensómetros na ligação “Reverse Channel”

3.3 Caracterização mecânica do material

Para a caracterização mecânica do aço à temperatura ambiente foram realizados ensaios de tração para as diferentes componentes da ligação, os quais seguiram a norma ISO 6892-1 (2009), (tais ensaios encontram-se descritos e pormenorizados em Silva, T. 2014). As propriedades apresentadas na Tabela 3.3 correspondem aos valores médios obtidos em todos os provetes ensaiados, com respetiva localização no gráfico tensão-extensão (σ - ϵ) do aço (Figura 3.10).

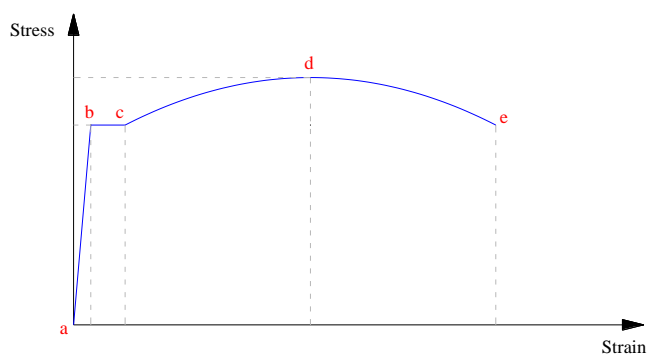


Figura 3.10 - Curva σ - ϵ do aço

Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas dos elementos

Localização gráfico σ - ϵ	RHS 250x150x8		SHS 250x10		Chapa 15 mm		Chapa 20 mm	
	Tensão (MPa)	Extensão	Tensão (MPa)	Extensão	Tensão (MPa)	Extensão	Tensão (MPa)	Extensão
a	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000
b	395,12	0,0019	436,05	0,0020	428,06	0,0020	373,87	0,0020
c	395,12	0,0125	436,05	0,0079	428,06	0,0157	373,87	0,0177
d	570,65	0,1344	617,49	0,1237	612,22	0,1704	561,51	0,1649
e	422,86	0,3001	441,05	0,2695	535,24	0,3032	409,44	0,4068

Foram também analisados os valores do módulo de elasticidade para todas as componentes da ligação cujos valores são indicados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Módulo de elasticidade dos elementos

Elemento	E (GPa)
Chapa 15mm	221,895
Chapa 20mm	219,500
MSH 250x150x8	207,616
MSH 250x10	204,200

Estes valores são utilizados no cálculo da resistência das componentes ativas da ligação (Capítulo 4).

3.4 Resultados

Nos ensaios de resistência ao fogo mediu-se a temperatura ao longo do tempo e os deslocamentos em pontos pré definidos da ligação. Com o aumento da temperatura o aço vai perdendo as suas características resistentes até que o momento resistente seja ultrapassado pelo momento constante imposto no ensaio, que é de aproximadamente 64 kNm (Tabela 3.2), este valor corresponde ao valor de carga obtido a partir da combinação de ações de fogo, de acordo com a norma EN 1991-1-2 (2010). Quanto ao cálculo da rotação da ligação, a informação é proveniente de conjuntos de defletómetros (Figura 3.8), os quais fornecem deslocamentos horizontais. Os deslocamentos, divididos pela distância entre defletómetros, leva ao conhecimento da tangente do ângulo entre a vertical e a posição instantânea da ligação. Os extensómetros foram colocados para medição dos deslocamentos devidos a restrição da viga,

para posterior cálculo do esforço axial imposto na ligação, mas devido a esta restrição não possuir as características desejadas os resultados obtidos foram praticamente desprezáveis.

Com o decorrer dos ensaios foram obtidas as curvas de tempo temperatura do ambiente no interior do forno nos diferentes ensaios (Figura 3.11). Estas curvas são muito semelhantes à curva de incêndio natural (Figura 1.1).

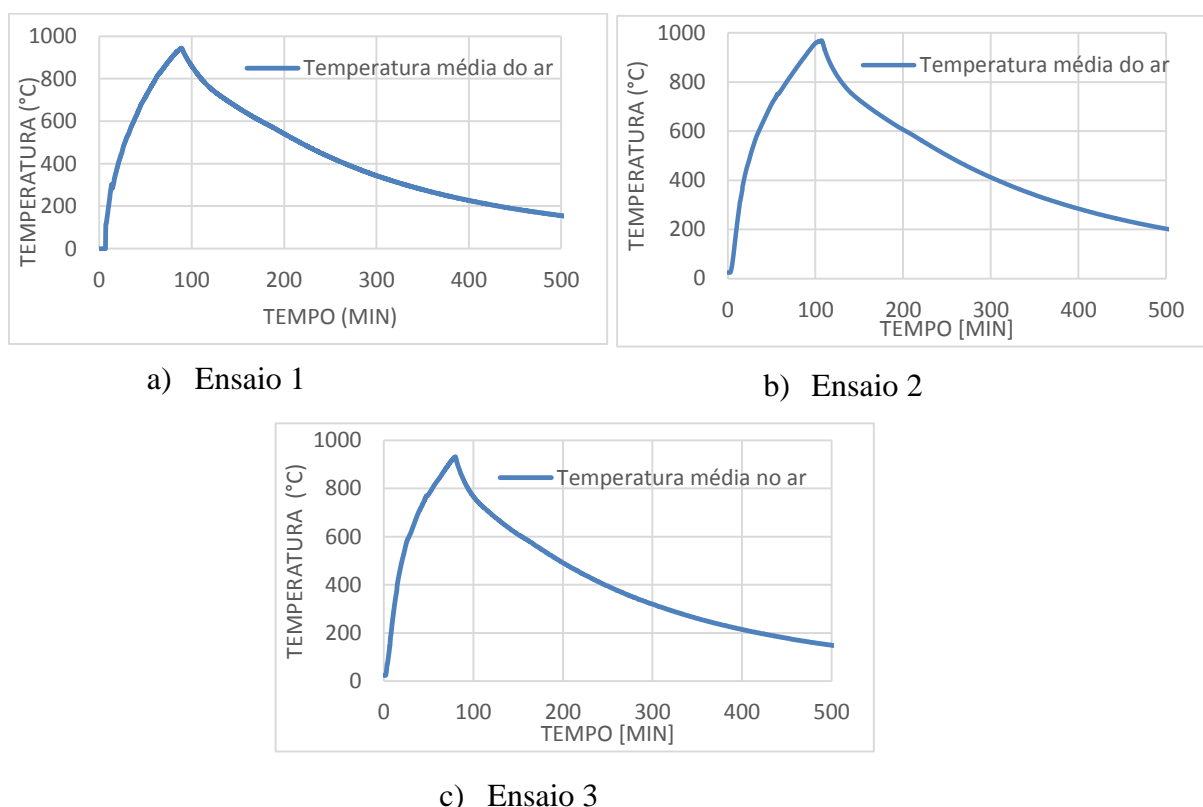


Figura 3.11 – Curvas Tempo-Temperatura média no interior do forno

Para o cálculo da diminuição das propriedades mecânicas do material em cada componente é necessário saber qual a sua temperatura. De maneira a resumir toda a informação obtida a partir de todos os elementos de leitura foram definidas curvas Tempo-Temperatura (min/°C) em todas componentes da ligação, viga, pilar chapa “reverse channel” e ainda a componente conjunta pilar “reverse channel”, dividindo estas para a zona de tração, compressão e corte. Para uma melhor perceção destas componentes deve ser consultada a Figura 3.12.

Estas curvas Tempo-Temperatura estão definidas na Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15. Nestas pode ser observado o aumento da temperatura em cada componente, as quais podem ser comparadas com a curva de incêndio natural, (Figura 1.1, Capítulo 1). Nestas curvas pode se distinguir as diferentes fases da curva de incêndio natural, desde a fase de ignição até a fase de arrefecimento.

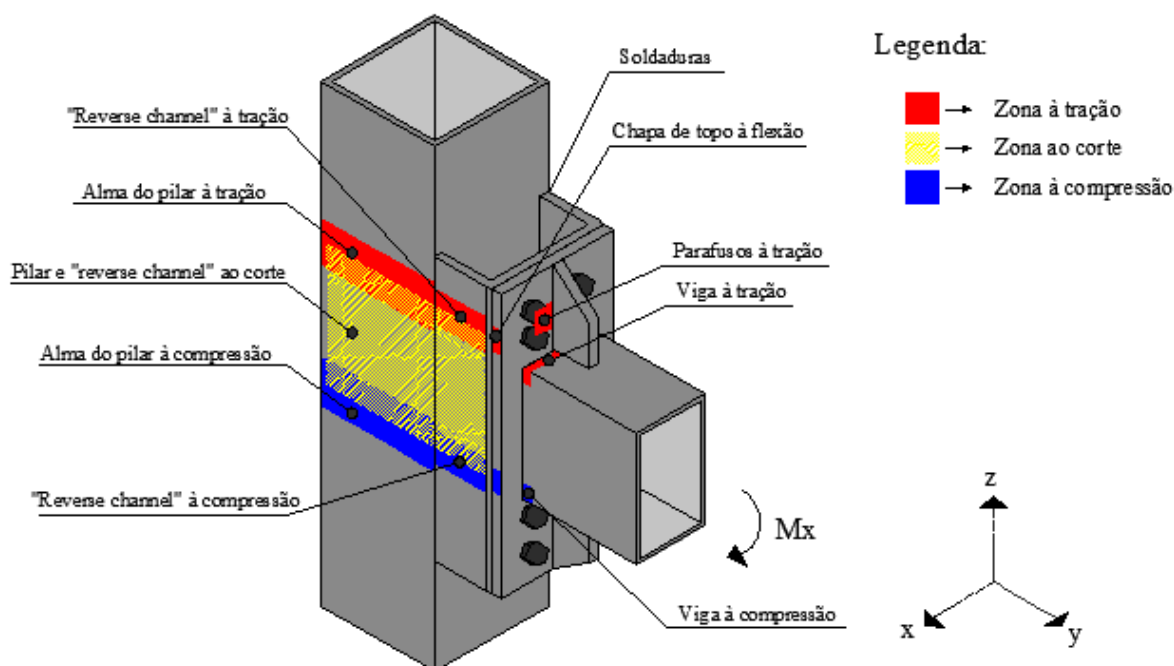
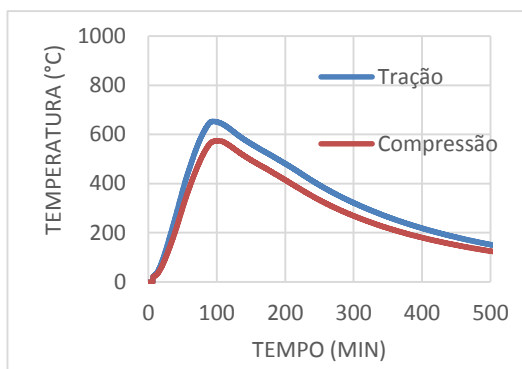


Figura 3.12 – Identificação das componentes

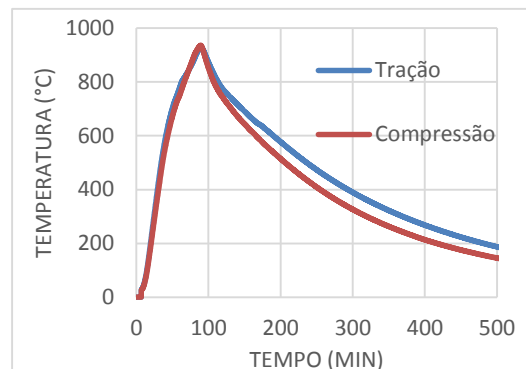
Analisando todas as curvas podemos ver que todas as componentes têm um crescimento gradual idêntico em qualquer um dos ensaios. Em todos os ensaios podemos observar que a componente viga não atinge temperaturas tão elevadas; isto deve-se ao facto de esta se encontrar menos exposta ao calor do forno, pois é um elemento contínuo e apenas se focou o ensaio na ligação em específico. Podemos ainda concluir que, ao contrário do ensaio 1 e 2 que se elevou a temperatura das componentes a cerca de 900 °C, o último ensaio não chegou a uma temperatura tão elevada; neste ensaio, como se pode ver na Tabela 3.1, não é utilizado o reforço, o que faz com que este tenha uma menor resistência à flexão, o que vai ser estudado no capítulo seguinte.

A partir destas curvas, no capítulo 4 foi calculado o momento resistente da ligação ao longo do tempo, que permite obter o instante em que o momento resistente é igual ao atuante, instante em que a ligação deixa de resistir às cargas atuantes e colapsa.

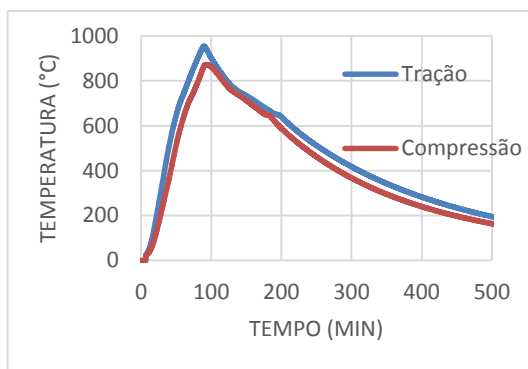
No capítulo seguinte serão apresentados todos os cálculos efetuados para a obtenção da resistência a flexão da ligação.



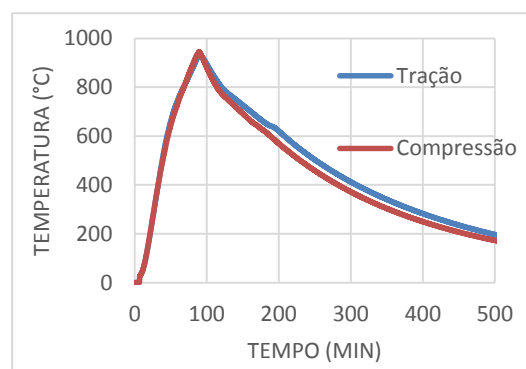
a) Curva Tempo-Temperatura Viga



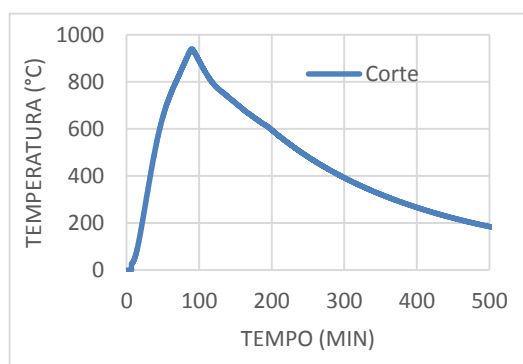
b) Curva Tempo-Temperatura Pilar



c) Curva Tempo-Temperatura Chapa

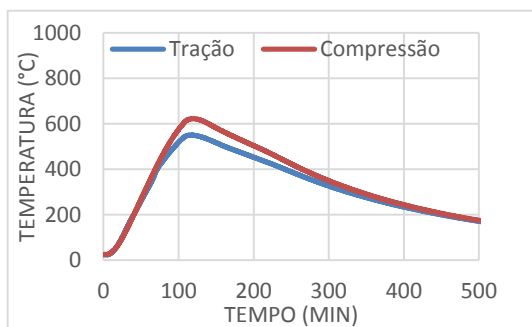


d) Curva Tempo-Temperatura RC

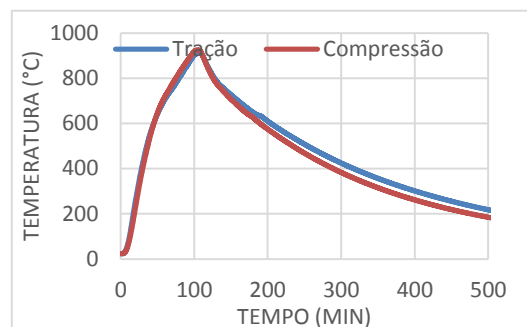


e) Curva Tempo-Temperatura Pilar-RC

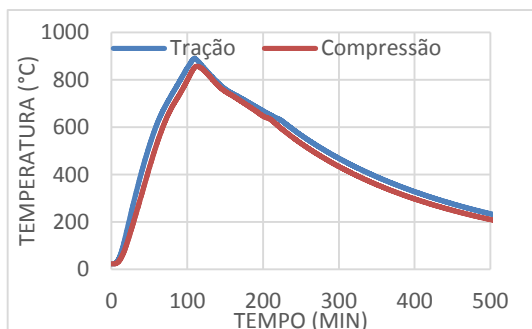
Figura 3.13 – Curvas Tempo-Temperatura referentes ao Ensaio 1



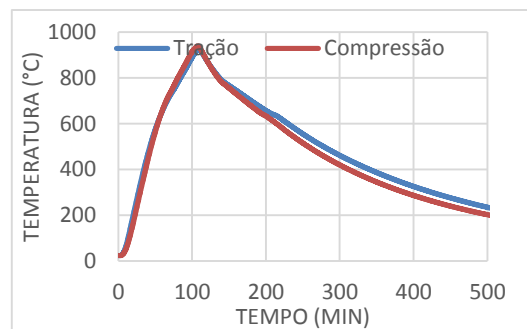
a) Curva Tempo-Temperatura Viga



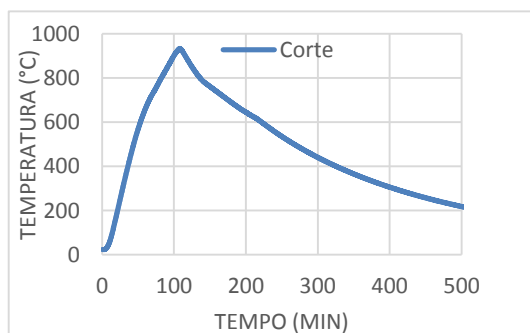
b) Curva Tempo-Temperatura Pilar



c) Curva Tempo-Temperatura Chapa

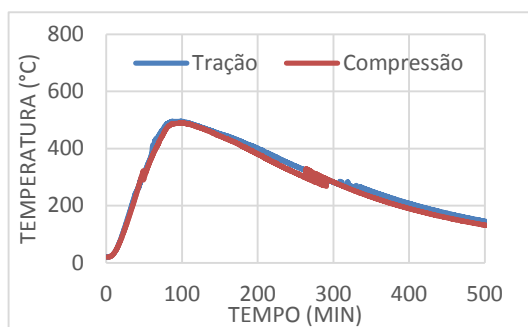


d) Curva Tempo-Temperatura RC

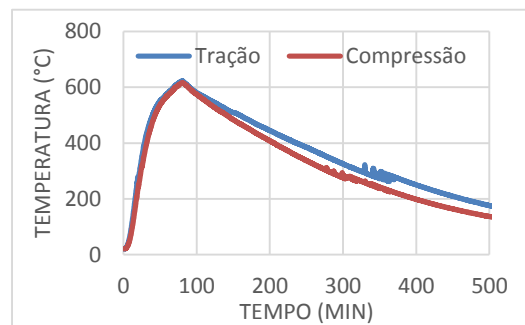


e) Curva Tempo-Temperatura Pilar-RC

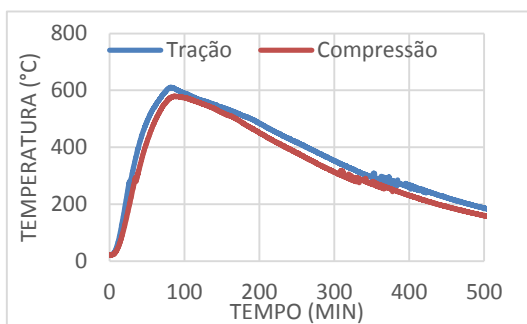
Figura 3.14 - Curvas Tempo-Temperatura referentes ao Ensaio 2



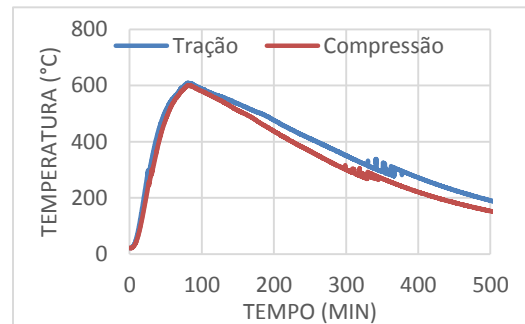
a) Curva Tempo-Temperatura Viga



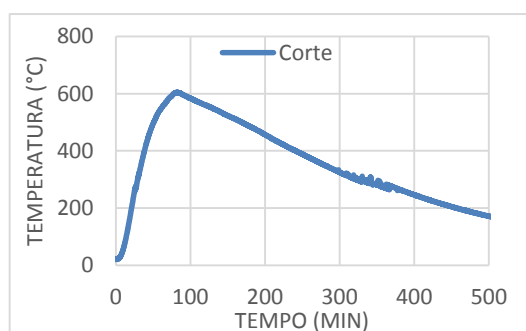
b) Curva Tempo-Temperatura Pilar



c) Curva Tempo-Temperatura Chapa



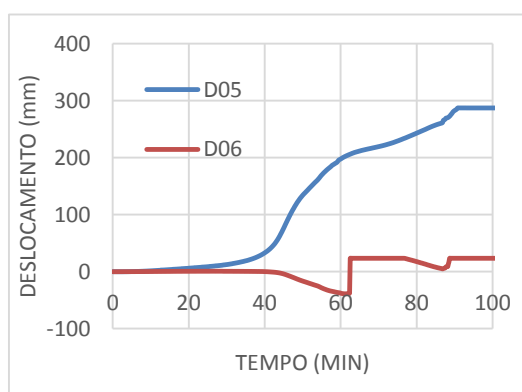
d) Curva Tempo-Temperatura RC



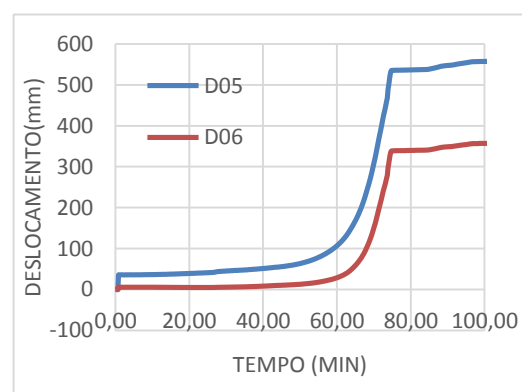
e) Curva Tempo-Temperatura Pilar-RC

Figura 3.15 Curvas Tempo-Temperatura referentes ao Ensaio 3

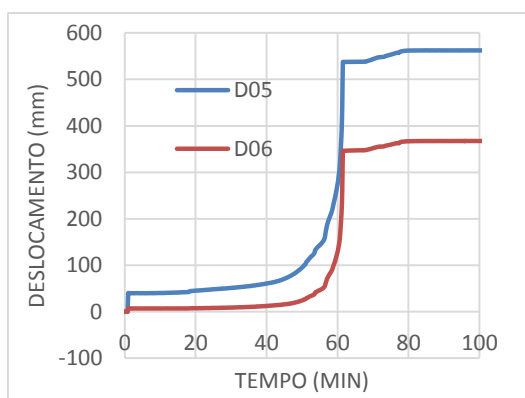
A Figura 3.16 apresenta as curvas de tempo-deslocamento de cada ensaio que serão utilizadas para comparar o tempo obtido experimentalmente e analiticamente no colapso da ligação. É de salientar que no ensaio 1 (Figura 3.16 a)), a curva de tempo-deslocamento não resultou em dados tão precisos como nos restantes ensaios. Isto deveu-se ao facto de a restrição axial da viga ter sido feita de maneira diferente da enunciada na Figura 3.3, número 10, mas tais valores, mesmo assim foram utilizados visto que destas apenas se pretende retirar o instante em que a ligação a ensaiar colapsa.



a) Ensaio 1



b) Ensaio 2



c) Ensaio 3

Figura 3.16 - Curvas Tempo-Deslocamento

4 Momento resistente da ligação com “reverse channel” a temperaturas elevadas

4.1 Introdução

De modo a estabelecer o momento resistente da ligação em função da temperatura, e verificar a aplicabilidade do método das componentes a temperaturas elevadas (estabelecida na norma EN 1993-1-8 para a temperatura ambiente) efetuou-se um estudo analítico tendo em conta as temperaturas retiradas dos termopares diminuem. Com o aumento da temperatura as capacidades mecânicas. Para simular essa diminuição de resistência, a norma EN1993-1-2 (2010) utiliza um fator de redução que depende da temperatura do material, o qual é multiplicado pela tensão de cedência (f_y).

4.2 Cálculo analítico do momento resistente da ligação à temperatura ambiente

Depois de identificadas todas as componentes ativas da ligação, pormenorizadas na Figura 3.12, destacam-se as que não são previstas na norma EN1993-1-8 (2010). 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”. O cálculo analítico tem como base metodologias propostas recentemente por Li (2012) e Liu *et al.* (2012) (cujas formulações são descritas na Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3)

A contribuição dos banzos do “reverse channel” para a resistência da ligação é quantificada por aplicação da norma EN1993-1-8 (2010) como se de uma “alma do pilar à tração transversal” se tratasse. As restantes componentes apresentadas na Figura 3.12 são previstas na norma EN1993-1-8 (2010).

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores obtidos através da metodologia apresentada anteriormente, para o cálculo das resistências das diversas componentes da ligação à temperatura ambiente. É de salientar que se apresentam dois valores de resistência para a componente “alma do reverse channel à tração”. Estes são referentes a diferentes estudos realizados por Li (2012) e Liu *et al.* (2012).

Tabela 4.1 - Resistência das componentes ativas resistentes a compressão

Zona de compressão	
Alma do pilar à compressão / Banzos do RC à compressão EN 1993-1-8 (2010)	$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$
Viga à compressão EN 1993-1-8 (2010)	$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad F_{c,b,Rd} = \frac{M_{pl,Rd}}{h_b - t_b}$
“Reverse channel” à compressão Li <i>et al.</i> (2012)	$F_{c,rcw,Rd} = 2 f_{y,rc} t_{rc}^2 \left[\frac{2L_c}{C-B} + \sqrt{2} \frac{B}{C} + \frac{h_b}{C} \right]$

Tabela 4.2 – Resistência das componentes ativas resistentes a tração

Zona de tração			
Chapa de topo à flexão EN 1993-1-8	$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 \times \sum l_{eff,1} t_f^2 \times f_y}{\gamma_{M0}}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$	$F_{T,Rd} = \min(F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd})$
	$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 \times \sum l_{eff,2} t_f^2 \times f_y}{\gamma_{M0}}$	$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{T,Rd}}{m + n}$	
	$F_{t,Rd} = \frac{K_2 \times f_{ub} \times AS}{\gamma_{M2}}$	$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd}$	
Viga à tração EN 1993-1-8	$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{M0}}$	$F_{t,b,Rd} = \frac{M_{pl,Rd}}{h_b - t_b}$	
Alma do pilar à tração / Banzos do RC à tração EN 1993-1-8	$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega \times b_{eff,t,wc} \times t_{wc} \times f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$		
Alma do “reverse channel” à tração Li <i>et al.</i> (2012)	$m_{p,rcw} = \frac{1}{4} t_{rcw}^2 f_{y,rcw}$	Para o cálculo dos valores da força de tração de cada padrão de rotura consultar Li (2012)	
	$\text{Ou: } F_{t,rcw,Rd} = f_{y,rc} t_{rc}^2 \left(\frac{2R_m - d_0}{2R_m - d_m} \right) \left(\pi \frac{d_0 - R_m}{d_0 - 2R_m} + 2 \frac{i + 2L_c + d_0}{2R_m - d_0} \right)$		

Tabela 4.3 - Resistência das componentes ativas resistentes a corte

Zona de corte	
Alma do pilar e do “reverse channel” ao corte	$V_{wp,Rd} = \frac{0.9 f_{y,wc} A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$

A metodologia proposta por Li (2012), quando comparada pelo autor, com os resultados experimentais obtidos, revelou-se bastante conservativa. Verificou-se uma diferença de cerca de 140% dos resultados analíticos para os resultados experimentais. Já na metodologia de Liu *et al.* (2012), o seu principal problema de aplicação prendeu-se no facto de esta ter sido deduzida com base numa ligação composta por uma única linha de parafusos acima do banzo tracionado da viga, o que vai contra o que acontece na ligação em estudo, visto que é constituída por duas linhas de parafusos. Não existindo outra proposta para a quantificação da segunda linha de parafusos desta componente, foi utilizada a mesma expressão, sabendo que a segunda linha de parafusos oferece maior resistência, ou seja, a opção encontra-se do lado da segurança.

Aplicando estas metodologias enunciadas nas Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3 para o cálculo das resistências das componentes à temperatura ambiente resultaram nos valores apresentados na Tabela 4.4. Tabela 4.4 – Resistências associadas as componentes das ligações à temperatura ambiente

	Componente solicitado	Procedimento de cálculo	Resistência (kN)		
			Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Zona de tração	Chapa de topo à flexão	EN 1993-1-8 (2010)	637,66	903,32	415,42
	Parafusos à tração	EN 1993-1-8 (2010)	1316,16	1316,16	1316,16
	Alma do pilar à tração	EN 1993-1-8 (2010)	1356,79	1356,79	1356,79
	Viga à tração	EN 1993-1-8 (2010)	845,97	845,97	845,97
	Alma do RC à tração	Li (2012)	597,8756	597,88	1073,47
		Liu <i>et al.</i> , (2012)	1022,24	1022,24	1747,50
Zona de corte	Alma do pilar e do RC ao corte	EN 1993-1-8 (2010)	1906,64	1906,64	1906,64
Zona de compressão	Alma do pilar à compressão	EN 1993-1-8 (2010)	1117,26	1117,26	1117,26
	Viga à compressão	EN 1993-1-8 (2010)	845,97	845,97	845,97
	Alma do RC à compressão	Liu <i>et al.</i> , (2012)	1642,59	1642,59	2582,08

Atendendo ao disposto na norma EN1993-1-8 (2010), para uma ligação deste tipo, o momento resistente da ligação é definido pelo mínimo valor do produto entre a resistência de cada componente (Tabela 4.4) e a distância entre esta e o centro de compressão. Isto pode ser descrito pela seguinte equação:

$$M_{j,Rd} = \text{mínimo}[F_{j,Rd} \times h] \quad (2)$$

Para melhor perceção da equação (2) é apresentada a Figura 4.1, onde, a título de exemplo a contabilização da 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. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 4.5.

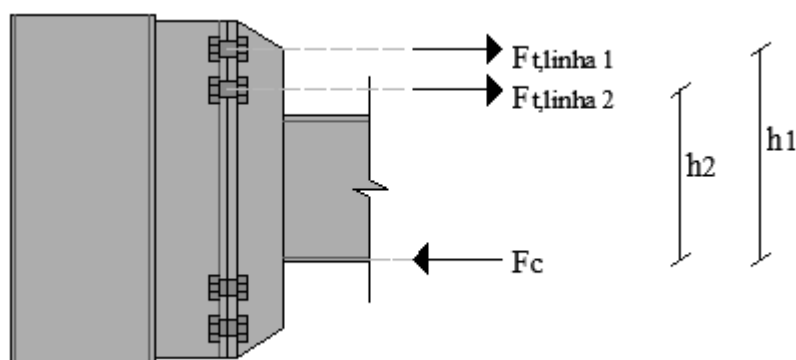


Figura 4.1 - Determinação do $M_{j,Rd}$ da ligação

Tabela 4.5 – Tabela resumo do cálculo do momento resistente a temperatura ambiente

	$M_{j,Rd}$ (kNm)
Ensaio 1	204,72
Ensaio 2	204,72
Ensaio 3	120,89

Podemos observar no ensaio 3 um valor bastante inferior aos restantes. Isto acontece, pois nesta ligação a chapa de topo não possui qualquer reforço, ao contrário dos restantes ensaios; o que faz com que a linha de parafusos não desenvolva força de valor significativo. Para tal cálculo não existe metodologia que possa quantificar a resistência da componente “chapa de topo a flexão”. Optou-se assim por ignorar a primeira linha de parafusos do ensaio 3.

4.3 Cálculo analítico do momento resistente da ligação a temperaturas elevadas

4.3.1 Fatores de redução para da capacidade resistente do aço a temperaturas elevadas

A norma EN1993-1-2 (2010) define o valor de cálculo das propriedades mecânicas do aço em situação de incêndio em função de um fator de redução k_θ :

$$X_{d,fi} = k_\theta X_k / \gamma_{M,fi} \quad (3)$$

Onde:

- X_k – é o valor característico da propriedade mecânica à temperatura ambiente (20°C);
- K_θ – é o fator de redução para obtenção do valor da propriedade mecânica à temperatura θ ;
- $\gamma_{M,fi}$ – é o fator parcial de segurança em situação de incêndio. A norma NP EN1993-1-2 (2010) recomenda a utilização da unidade.

Assim, a tensão de cedência à temperatura θ , ou seja $f_{y,\theta}$, é dada em função da tensão de cedência f_y a 20°C por:

$$f_{y,\theta} = k_{y,\theta} f_y \quad (4)$$

Do mesmo modo o módulo de elasticidade à temperatura θ é dado em função do módulo de elasticidade E_a a 20°C por:

$$E_{a,\theta} = k_{E,\theta} E_a \quad (5)$$

Na Figura 4.2 são representados os fatores de redução relativos à tensão de cedência e ao módulo de elasticidade em função da temperatura. Na Tabela 4.6 podemos ver os valores dos fatores de redução $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ em função da temperatura.

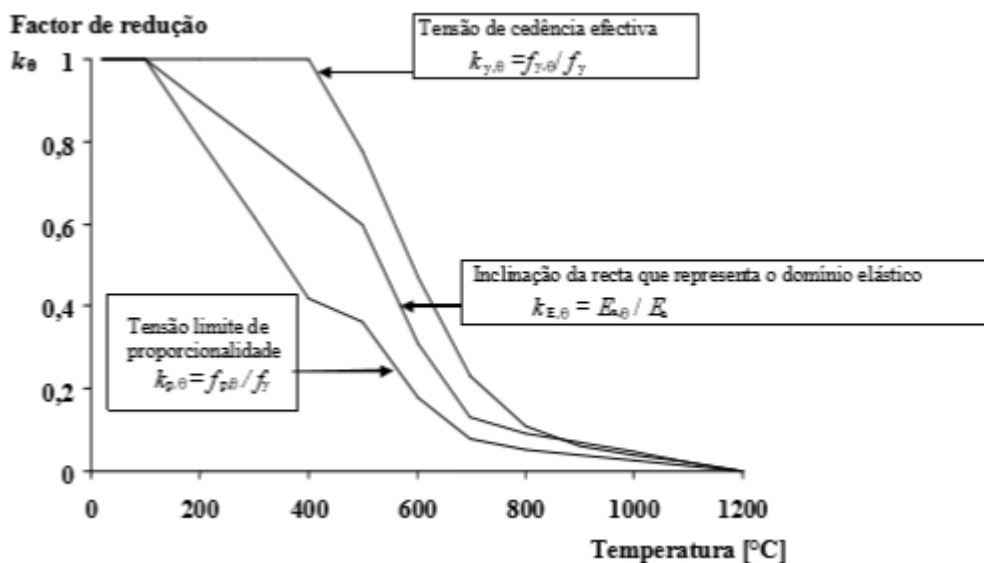


Figura 4.2 – Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas

Tabela 4.6 – Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fatores de Redução à temperatura θ_a relativamente ao valor de f_y ou E_a a 20°C	
	Fator de redução (referência a f_y) para tensão de cedência $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Fator de redução (referência a E_y) para o declive do domínio elástico do domínio $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
800	0,110	0,090
900	0,060	0,0675
1000	0,040	0,0450
1100	0,020	0,0225
1200	0,000	0,0000

O cálculo de outras componentes da ligação é afetado da mesma forma com o aumento da temperatura, as quais têm fatores de redução diferentes dos anteriores, como é o caso dos parafusos e da soldadura. O valor de cálculo da resistência de uma soldadura de topo por penetração total, para temperaturas até 700 °C, deve ser tomada igual ao valor de cálculo da resistência da parte ligada mais fraca, usando o fator de redução correspondente ao aço estrutural dado na Tabela 4.6. Para temperaturas superiores a 700 °C, o fator de redução de resistência a utilizar deve ser o correspondente às ligações soldadas, dado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Fatores de redução da resistência para parafusos e soldaduras

Temperatura θ_a (°C)	Fatores de Redução da resistência para ligações aparafusadas e soldadas	
	Fatores de redução para ligações aparafusadas, k_b, θ (tração ou corte)	Fator de redução para ligações soldadas k_w, θ
20	1,000	1,000
100	0,968	1,000
200	0,952	1,000
300	0,935	1,000
400	0,903	1,000
500	0,775	0,876
600	0,550	0,627
700	0,220	0,378
800	0,100	0,130
900	0,067	0,074
1000	0,033	0,018
1100	0,000	0,000
1200	0,000	0,000

O valor de cálculo da resistência à tração por parafusos e soldadura, em situação de incêndio deve ser determinada no caso dos parafusos:

$$F_{ten,t,Rd} = F_{t,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (6)$$

Onde:

$F_{ten,t,Rd}$ — é o valor de cálculo da resistência à tração por parafuso à temperatura ambiente, de acordo com a cláusula 3.6 da norma EN1993-1-8 (2010).

Enquanto o valor de cálculo da resistência por unidade de comprimento de um cordão de ângulo em situação de incêndio deve ser determinado por:

$$F_{w,t,Rd} = F_{w,Rd} k_{w,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (7)$$

$F_{w,t,Rd}$ – é o valor de cálculo da resistência por unidade de comprimento de um cordão de ângulo, à temperatura ambiente, de acordo com a cláusula 4.5.3.2 ou 4.5.3.3 da norma EN1993-1-8(2010).

4.3.2 Resultados

Posto isto, é então efetuado o cálculo das resistências das componentes ativas existentes na ligação, tendo em conta o gradiente de temperatura. Ao longo do tempo, a temperatura vai subindo, e de acordo com a norma EN1993-1-2 (2010), deve ser feita uma relação com a temperatura ambiente, para tal são utilizadas as equações (4) e (5) que dizem respeito à redução de capacidades mecânicas dos materiais ao longo com o aumento da temperatura.

Como se pode verificar na Tabela 4.8, que corresponde às forças resistentes das componentes sujeitas à tração com o aumento da temperatura, existe uma componente que tem um valor muito mais baixo que as restantes, “Alma do reverse channel à tração” segundo Li (2012).

Tabela 4.8 – Resistência das componentes sujeitas à tração durante o aquecimento (Ensaio 1)

Tempo (min)	Zona de tração					
	Chapa de topo à flexão (kN)	Parafusos a tração (kN)	Alma do pilar à tração (kN)	Viga à tração (kN)	Alma do RC à tração (kN)	
	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	Li (2012)	Liu <i>et al.</i> (2012)
0,00	637,66	1316,16	1356,79	845,97	597,88	1022,24
10,00	637,66	1273,46	1356,79	845,97	597,88	1022,24
20,00	637,66	1244,29	1356,79	845,97	597,88	1022,24
30,00	637,66	1202,98	1231,57	845,97	597,88	1022,24
40,00	584,14	1024,24	614,41	845,97	413,80	707,51
50,00	341,11	701,95	287,31	845,97	196,77	336,44
60,00	169,92	302,37	169,27	738,46	103,50	176,97
70,00	94,13	196,06	118,07	564,66	62,22	106,39

Apesar da componente alma do “reverse channel” à compressão apresentar dois valores de cálculo, foi adotado o modelo de Li (2012), estando assim do lado da segurança.

Para as forças de resistência ao corte e compressão na ligação, em comparação com as forças de tração, foram obtidos valores mais elevados como se pode observar na Tabela 4.9. Isto faz com que estas não sejam condicionantes no cálculo do momento resistente da ligação.

Tabela 4.9 – Resistência das componentes sujeitas ao corte e compressão durante o aquecimento (Ensaio 1)

Tempo (min)	Zona de Corte	Zona de Compressão		
	Alma do pilar e do RC ao corte (kN)	Alma do pilar à compressão (kN)	Viga à compressão (kN)	Alma do RC à compressão (kN)
	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	Li <i>et al.</i> (2012)
0,00	1906,64	1117,26	845,97	1642,59
10,00	1906,64	1117,26	845,97	1642,59
20,00	1906,64	1074,78	845,97	1642,59
30,00	1906,64	974,10	845,97	1642,59
40,00	1413,59	592,77	845,97	1212,22
50,00	709,31	268,73	845,97	602,50
60,00	375,95	158,23	738,46	308,12
70,00	258,01	102,59	564,66	169,93

À temperatura ambiente, como já foi dito no capítulo anterior, quando a ligação é sujeita à flexão, a componente mais fraca deste primeiro ensaio corresponde à “viga à tração”, o que não se verifica com o aumento da temperatura (Tabela 4.10). Neste caso, a componente que perde as características mecânicas mais rapidamente corresponde à Alma do “reverse channel” quando sujeita à tração.

Tabela 4.10 – Momento resistente da ligação durante o aquecimento (Ensaio 1)

Tempo (min)	$M_{j,rd}$ (kN.m)	Componente mais fraca
0,00	204,72	Viga à tração
20,00	204,72	Viga à tração
30,00	204,72	Viga à tração
40,00	204,72	Viga à tração
50,00	128,30	Alma do RC a tração
60,00	67,48	Alma do RC a tração
61,50	62,48	Alma do RC a tração
70,00	40,57	Alma do RC a tração

Um pouco à semelhança do ensaio 1, a componente que oferece menos resistência corresponde à “Alma do reverse channel quando sujeita à tração” o que era de esperar visto que apenas se aumentou a espessura da chapa e do reforço, enquanto o “reverse channel” se mantém igual (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 – Resistência das componentes sujeitas à tração durante o aquecimento (Ensaio 2)

Tempo (min)	Zona de tração					
	Chapa de topo à flexão (kN)	Parafusos a tração (kN)	Alma do pilar à tração (kN)	Viga à tração (kN)	Alma do RC à tração (kN)	
	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	Li (2012)	Liu <i>et al.</i> (2012)
0	903,32	1316,16	1356,79	845,97	597,88	1022,24
10	871,18	1248,70	1356,79	845,97	597,88	1022,24
20	823,95	1153,03	1356,79	845,97	597,88	1022,24
30	718,52	939,48	1356,79	845,97	597,88	1022,24
40	576,39	651,57	1132,62	845,97	505,74	864,70
50	283,00	283,00	725,60	845,97	316,77	541,61
60	196,37	196,37	447,04	845,97	185,58	317,30
70	126,77	126,77	269,97	819,11	115,16	196,90
80	104,75	104,75	180,91	722,58	77,82	133,05

Como já aconteceu no primeiro ensaio, as forças de corte e tração são bastante elevadas para serem as forças condicionantes no cálculo do momento resistente da ligação (Tabela 4.12).

Tabela 4.12 – Resistência das componentes sujeitas ao corte e compressão durante o aquecimento (Ensaio 2)

Tempo (min)	Zona de Corte	Zona de Compressão		
	Alma do pilar e do RC ao corte (kN)	Alma do pilar à compressão (kN)	Viga à compressão (kN)	Alma do RC à compressão (kN)
	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	Li <i>et al.</i> (2012)
0	1906,64	1117,26	845,97	1642,59
20	1906,64	1059,47	845,97	1642,59
30	1895,21	972,23	845,97	1642,59
40	1266,56	699,57	845,97	1642,59
50	729,10	379,71	845,97	1378,07
60	417,65	203,01	845,97	929,62
70	289,47	154,66	819,11	591,66
80	189,95	110,79	722,58	368,93

O ensaio 2 é muito semelhante ao ensaio 1. Ou seja, visto que a componente mais fraca se mantém a mesma, “Alma do reverse channel à tração”, o ensaio 1 e 2 deviam ter um tempo de ensaio semelhante, o que difere em cerca de 15 minutos (Tabela 4.13). Mas visto que, foram usados valores de temperatura retirados de ensaios experimentais, o mesmo ensaio não é possível reproduzir de igual forma várias vezes.

Tabela 4.13 – Momento resistente da ligação durante o aquecimento (Ensaio 2)

Tempo (min)	$M_{j,rd}$ (kN.m)	Componente mais fraca
0	204,72	Viga à tração
40	204,72	Viga à tração
50	184,52	Alma do RC a tração
60	121,00	Alma do RC a tração
70	75,09	Alma do RC a tração
74,50	63,72	Alma do RC a tração
80	50,74	Alma do RC a tração

No último ensaio foi aumentada a espessura do “reverse channel” de 16 mm para 20 mm isto faz com que a resistência à tração aumente em cerca de 100% o seu valor. Foi ainda tirado o reforço existente na chapa de extremidade, o que faz com que a resistência desta desça drasticamente em relação aos ensaios anteriores (Tabela 4.14).

Tabela 4.14 – Resistência das componentes sujeitas à tração durante o aquecimento (Ensaio 3)

Tempo (min)	Zona de tração					
	Chapa de topo à flexão (kN)	Parafusos a tração (kN)	Alma do pilar à tração (kN)	Viga à tração (kN)	Alma do RC à tração (kN)	
	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	Li (2012)	Liu <i>et al.</i> (2012)
0	415,42	1316,16	1356,79	845,97	1073,47	1747,50
10	415,42	1310,74	1356,79	845,97	1073,47	1747,50
20	415,42	1271,01	1356,79	845,97	1073,47	1747,50
30	415,42	1242,76	1310,23	845,97	1073,47	1747,50
40	401,66	1195,57	1046,52	845,97	977,82	1591,80
50	332,80	990,41	842,74	845,97	802,86	1306,98
60	270,13	658,74	732,33	845,97	659,60	1073,77
70	219,01	284,97	622,55	765,88	550,78	896,63

Como se pode verificar as forças de corte e compressão são bastante elevadas, as quais não vão ser condicionantes no cálculo do momento resistente da ligação (Tabela 4.15).

Posto isto, o último ensaio é em tudo diferente dos restantes visto que à temperatura ambiente quando a ligação é sujeita a flexão, a componente mais fraca é a chapa de topo. E o mesmo se mantém no decorrer do restante ensaio, como se pode verificar na Tabela 4.16.

Tabela 4.15 – Resistência das componentes sujeitas ao corte e compressão durante o aquecimento (Ensaio 3)

Tempo (min)	Zona de Corte	Zona de Compressão		
	Alma do pilar e do RC ao corte (kN)	Alma do pilar à compressão (kN)	Viga à compressão (kN)	Alma do RC à compressão (kN)
	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	EN 1993-1-8 (2010)	Li <i>et al.</i> (2012)
0	1906,64	1117,26	845,97	2582,08
10	1906,64	1117,26	845,97	2582,08
20	1906,64	1057,87	845,97	2582,08
30	1881,47	982,67	845,97	2582,08
40	1495,01	831,24	845,97	2582,08
50	1193,03	666,10	845,97	2137,01
60	1024,38	546,06	845,97	1717,86
70	871,56	448,71	807,07	1421,30

Tabela 4.16 – Momento resistente da ligação durante o aquecimento (Ensaio 3)

Tempo (min)	$M_{j,rd}$ (kN.m)	Componente mais fraca
0	120,89	Chapa de topo à flexão
10	120,89	Chapa de topo à flexão
20	120,89	Chapa de topo à flexão
30	120,89	Chapa de topo à flexão
40	116,88	Chapa de topo à flexão
50	96,84	Chapa de topo à flexão
60	78,61	Chapa de topo à flexão
65	63,86	Chapa de topo à flexão
70	41,25	Chapa de topo à flexão

4.4 Comparação dos resultados experimentais com os resultados analíticos

Para o cálculo da resistência das componentes da ligação, ao longo do tempo, foram utilizados valores de temperatura retirados diretamente de ensaios experimentais. Isto leva a que no cálculo analítico esteja sempre presente um pouco o fator erro.

Como se pode ver no sub-capítulo 3.4, as curvas de tempo temperatura variam em alguns graus entre diferentes componentes. Esta variação de temperatura é causada pela grande massividade da ligação, ou seja, a grande concentração de massa presente na ligação.

Para a comparação dos resultados analíticos com os experimentais são utilizadas as curvas de tempo deslocamento. Estas curvas são provenientes de dois defletómetros existentes na extremidade da viga, que se situam a cerca de 4 metros da ligação, em que D05 mede o deslocamento vertical e D06 o deslocamento horizontal, como indicado na Figura 4.3.

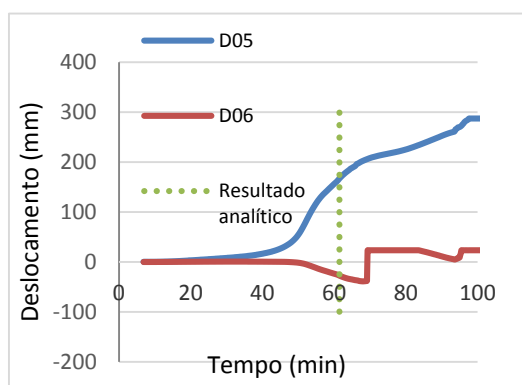


Figura 4.3 Defletómetros D05 e D06

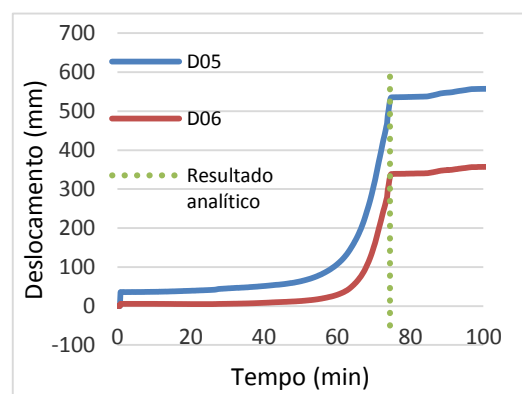
Na Figura 4.4 são combinados os valores de tempo para o colapso da ligação tanto experimental como analítico. Sabe-se que a ligação colapsa quando o momento resistente $M_{j,Rd}$, iguala o momento atuante constante M_{Ed} , que como já enunciado anteriormente é de cerca de 64 kNm.

Analiticamente isso aconteceu, como apresentado na Tabela 4.10, Tabela 4.13 e Tabela 4.16, por volta do minuto 61, 74 e 65 respetivamente nos ensaios 1, 2 e 3.

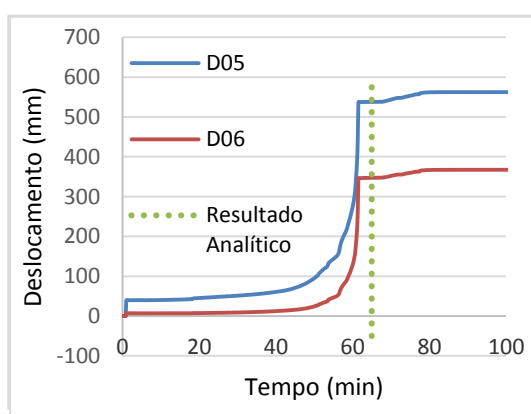
Fazendo então uma leitura dos gráficos pode-se verificar que os resultados analíticos se aproximam dos resultados experimentais. As curvas de deslocamento sofrem uma grande variação de deslocamento quando a ligação deixa de suportar o esforço aplicado, e rompe. Esta grande variação de deslocamento coincide aproximadamente com o tempo calculado analiticamente. É de salientar que a pequena variação que existe entre o tempo de rotura experimental e analítico, deve se ao facto de se utilizar valores de temperatura médios para o cálculo das resistências das componentes a temperaturas elevadas ao longo do tempo.



a) Ensaio 1



b) Ensaio 2



c) Ensaio 3

Figura 4.4 – Deslocamento horizontal e vertical da ligação

5 Curva M-N

5.1 Introdução

O modelo apresentado na norma EN 1993-1-8 (2010) fornece um processo analítico para dimensionamento de ligações metálicas sujeitas a flexão pura. Este método baseia-se no pressuposto de que o esforço axial N_{Ed} na ligação não excede 5% da resistência projetada $N_{pl,Rd}$ da secção transversal.

Com base no método das componentes, na Universidade de Liège foi desenvolvido um processo analítico capaz de avaliar a resposta não linear de ligações metálicas sujeitas a momento fletor, e esforço axial, a temperaturas elevadas. Este processo analítico apenas considera a ligação na rotura, e assim qualquer curva M-N de uma ligação aparafusada pode ser tirada. Este procedimento foi inicialmente desenvolvido para ligações metálicas (Cerfontaine, 2004); em seguida foi adaptado para ligações mistas aço-betão (Demonceau, 2008) e, finalmente, ampliado para ligações metálicas e mistas, aço betão, sujeitas a elevada temperaturas (Demonceau *et al.*, 2013).

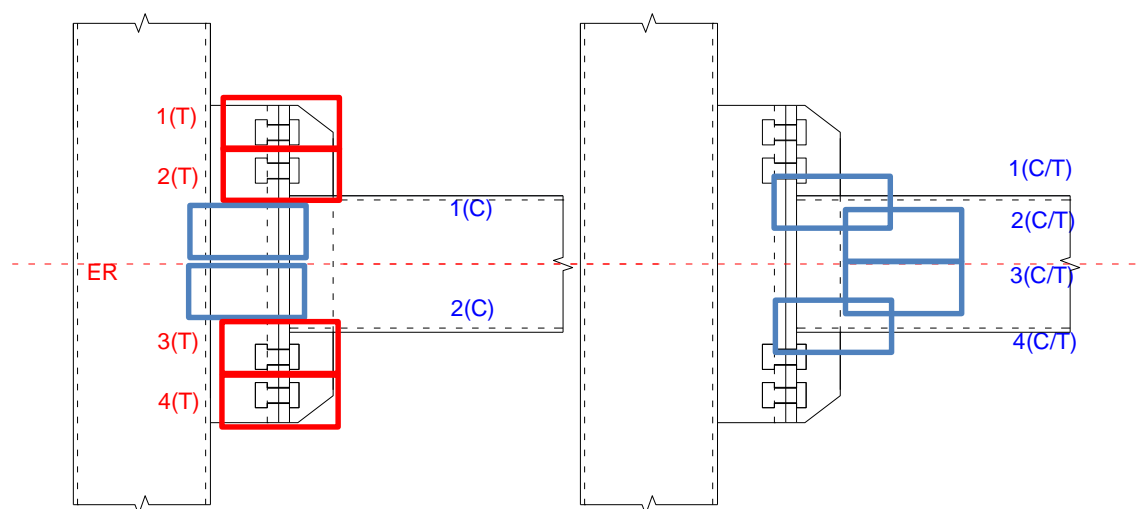
5.2 Modelo analítico para cálculo das curvas M-N em ligações metálicas

Este método baseia-se no pressuposto que todas as componentes ativas se encontram em rotura, e possuem comportamento dúctil, de acordo com o método das componentes presentes na norma EN 1993-1-8 (2010).

Segundo o modelo proposto por Demonceau *et al.* (2013), a ligação é dividida em diferentes linhas, que poderão ser ativadas tanto em tração como em compressão; estas linhas são numeradas a partir da parte superior para a parte inferior. A posição de cada linha é definida em relação a um eixo de referência, neste caso a linha média da secção da viga à distância h . Este eixo de referência corresponde ao ponto onde a carga axial e momento fletor são aplicados e a distância h é considerada positiva para linhas acima do eixo de referência e negativas para linhas abaixo.

Na Figura 5.1 adapta-se o modelo proposto por Demonceau *et al.* (2013) à ligação estudada na presente tese. Foi feita uma adaptação do método para a ligação em estudo, devido ao facto de o método não ter sido desenvolvido para este tipo de ligações. Esta foi dividida em duas ligações, o “reverse channel” com a chapa de topo e a chapa de topo com a viga (Figura 5.1).

A opção tomada para a ligação em estudo tem como base as resistências das componentes não atuarem todas no mesmo plano. Foi dividida então esta ligação em dois planos de aplicação, obtendo assim duas curvas distintas de interação esforço axial momento fletor resistente.



b) Ligação “reverse channel”-chapa de topo

a) Ligação chapa de topo-viga

1 (T) – Primeira linha de parafusos à tração

2 (T) – Segunda linha de parafusos à tração

3 (T) – Terceira linha de parafusos à tração

4 (T) – Quarta linha de parafusos à tração

1 (C) – Alma do “reverse channel” à compressão

2 (C) – Alma do “reverse channel” à compressão

1 (C/T) – Banzo da viga à compressão/tração

2 (C/T) – Alma da viga à compressão/tração

3 (C/T) – Alma da viga à compressão/tração

4 (C/T) – Banzo da viga à compressão/tração

Figura 5.1 – Identificação das linhas e posição do eixo de referência

A resistência de cada linha é definida pela componente mais fraca envolvida em cada linha, indicada na Figura 5.1. A Tabela 5.1 e Tabela 5.2 apresentam a resistência de cada uma das

componentes envolvidas nas linhas da ligação. Na ligação “reverse channel”-chapa de topo, a resistência da ligação é limitada nas linhas de tração pela resistência dos parafusos e pelo “reverse channel à compressão” nas linhas de compressão (Tabela 5.1), enquanto na ligação chapa de topo-viga é limitada tanto a tração como à compressão pela a alma da viga (Tabela 5.2).

Tabela 5.1 – Resistência das componentes envolvidas na ligação “reverse channel” com a chapa de topo (Ensaio 2)

<i>Linha</i>	h_i		<i>RC à tração</i>	<i>Parafuso à tração</i>	<i>Alma do pilar à tração</i>	<i>Chapa à flexão</i>	<i>Alma do pilar à compressão</i>	<i>Alma do pilar à compressão</i>	<i>RC à compressão</i>
1	0,25	T	1022,24	658,08	1356,79	903,32	1117,26		
2	0,17	T	1022,24	658,08	1356,79	903,32	1117,26		
3	0,121	C						1117,26	821,30
4	-0,121	C						1117,26	821,30
5	-0,17	T	1022,24	658,08	1356,79	903,32	1117,26		
6	-0,25	T	1022,24	658,08	1356,79	903,32	1117,26		

h_i – distância da linha ao eixo de referência / T – Tração / C - Compressão

Tabela 5.2 Resistência das componentes envolvidas na ligação chapa de topo e viga (Ensaio 2)

<i>Linha</i>	h_i		<i>Banzo da viga à tração</i>	<i>Almas da viga à tração</i>	<i>Banzo da viga à compressão</i>	<i>Almas da viga à compressão</i>
1	0,121	C-T	474,15		474,15	
2	0,0585	C-T		739,67		739,67
3	-0,0585	C-T		739,67		739,67
4	-0,121	C-T	474,15		474,15	

h_i – distância da linha ao eixo de referência / T-C – Tração e Compressão

Fazendo então a associação dos menores valores resistentes de cada linha, obtemos os esforços descritos nas Tabela 5.3 e Tabela 5.4, e identificação da respetiva componente mais fraca.

Tabela 5.3 – Associação de valores na ligação “reverse channel”-chapa de topo (Ensaio 2)

<i>Linha</i>	h_i	M^- F_{rd}^-	M^+ F_{rd}^+	<i>Componente mais fraca</i>
1	0,25	658,08	658,08	Parafuso à tração
2	0,17	658,08	658,08	Parafuso à tração
3	0,121	821,30	821,30	RC à compressão
4	-0,121	821,30	821,30	RC à compressão
5	-0,17	658,08	658,08	Parafuso à tração
6	-0,25	658,08	658,08	Parafuso à tração

M^- - Momento negativo; M^+ - Momento positivo; F_{rd}^- - Força resistente negativa; F_{rd}^+ - Força resistente positiva

Tabela 5.4 – Associação de valores na ligação viga chapa de topo (Ensaio 2)

<i>Linha</i>	h_i	M^- F_{rd}^-	M^+ F_{rd}^+	<i>Componente mais fraca</i>
1	0,121	474,15	474,15	Banzo da viga a tração
2	0,0585	739,67	739,67	Almas da viga a tração
3	-0,0585	739,67	739,67	Almas da viga a tração
4	-0,121	474,15	474,15	Banzo da viga a tração

M^- - Momento negativo; M^+ - Momento positivo; F_{rd}^- - Força resistente negativa; F_{rd}^+ - Força resistente positiva

Quando a ligação é sujeita a combinação de esforço axial e momento fletor, as linhas podem estar ativas ou não, dependendo então da posição do eixo neutro, tendo em conta se as linhas são ativas em compressão ou em tração. As linhas estão ativas quando o esforço iguala a sua resistência plástica, enquanto as linhas não ativas suportam uma força igual a zero. A posição do eixo neutro varia entre a zona superior e inferior da ligação; por exemplo, na linha superior, em seguida, entre as linhas 1 e 2, em seguida, entre as linhas 2 e 3, etc. Para definir a posição do eixo neutro e a correspondente carga (M, N) são utilizadas as equações (8) e (9).

$$N = \sum \text{linhas ativas}_i \times F_{Rd,i} \quad (8)$$

$$M = \sum \text{linhas ativas}_i \times F_{Rd,i} \times h_i \quad (9)$$

Na Tabela 5.5 e Tabela 5.6 são calculados momentos fletores e esforços axiais nas diferentes posições do eixo neutro. Para cada posição do eixo neutro, resulta um ponto com coordenadas

(M, N). Estas posições foram identificadas com letras, A, B, C, D, E, F e G para momento positivo, e A', B', C', D', E', F' e G' para momento negativo. É de salientar que a compressão é definida como esforço axial positivo e tração como esforço axial negativo. O mesmo processo é definido na Tabela 5.7 e Tabela 5.8 para a ligação chapa de topo-viga.

As curvas de interação M-N para a ligação “reverse channel”-chapa de topo e para a ligação chapa de topo-viga, são apresentadas na Figura 5.2. Qualquer combinação de esforço axial e momento fletor que se encontrem dentro da curva M-N corresponde a uma situação segura, para qualquer outra combinação que se encontre no exterior desta verifica-se a rotura da ligação.

Tabela 5.5 – Cálculo do momento positivo e esforço axial nas várias posições do eixo neutro ligação “reverse channel” – chapa de topo (Ensaio 2)

Linha	h_i (mm)	M^+						
		A	B	C	D	E	F	G
1	0,25	0	658,08	658,08	658,08	658,08	658,08	658,08
2	0,17	0	0	658,08	658,08	658,08	658,08	658,08
3	0,121	821,30	821,30	821,30	0	0	0	0
4	-0,121	821,30	821,30	821,30	821,30	0	0	0
5	-0,17	0	0	0	0	0	658,08	658,08
6	-0,25	0	0	0	0	0	0	658,08
M (kN.m)		0,00	164,52	276,39	375,77	276,39	164,52	0,00
N (kN)		-1642,59	-984,51	-326,43	494,86	1316,16	1974,24	2632,32

Tabela 5.6 – Cálculo do momento negativo e esforço axial nas várias posições do eixo neutro ligação “reverse channel” – chapa de topo (Ensaio 2)

Linha	h_i (mm)	M^-						
		A'	B'	C'	D'	E'	F'	G'
1	0,25	0	0	0	0	0	0	658,08
2	0,17	0	0	0	0	0	658,08	658,08
3	0,121	821,30	821,30	821,30	821,30	0	0	0
4	-0,121	821,30	821,30	821,30	0	0	0	0
5	-0,17	0	0	658,08	658,08	658,08	658,08	658,08
6	-0,25	0	658,08	658,08	658,08	658,08	658,08	658,08
M (kN.m)		0,00	-164,52	-276,39	-375,77	-276,39	-164,52	0,00
N (kN)		-1642,59	-984,51	-326,43	494,86	1316,16	1974,24	2632,32

Tabela 5.7 – Cálculo do momento positivo e esforço axial nas várias posições do eixo neutro
ligação chapa de topo-Viga (Ensaio 2)

<i>Linhas</i>	h_i (mm)	M^+				
		H	I	J	K	L
1'	0,121	-474,15	474,1481	474,1481	474,1481	474,1481
2'	0,0585	-739,67	-739,671	739,671	739,671	739,671
3'	-0,0585	-739,67	-739,671	-739,671	739,671	739,671
4'	-0,121	-474,15	-474,148	-474,148	-474,148	474,1481
M (kN.m)		0	114,7438	201,2853	114,7438	0
N (kN)		-2427,64	-1479,34	0	1479,342	2427,638

Tabela 5.8 – Cálculo do momento negativo e esforço axial nas várias posições do eixo neutro
ligação chapa de topo-viga (Ensaio 2)

<i>Linhas</i>	h_i (mm)	M				
		H	I	J	K	L
1'	0,121	-474,15	-474,148	-474,148	-474,148	474,1481
2'	0,0585	-739,67	-739,671	-739,671	739,671	739,671
3'	-0,0585	-739,67	-739,671	739,671	739,671	739,671
4'	-0,121	-474,15	474,1481	474,1481	474,1481	474,1481
M (kN.m)		0	-114,744	-201,285	-114,744	0
N (kN)		-2427,64	-1479,34	0	1479,342	2427,638

Como já concluído no capítulo 4 da presente tese, à temperatura ambiente a componente mais fraca é a viga quando solicitada apenas à flexão pura; o mesmo podemos concluir com a respetiva curva M-N (Figura 5.2), onde esta tem um momento resistente máximo de cerca de 200 kN, ponto J. Este momento vai descer se for submetida tanto a esforços de tração como de compressão, pois é uma ligação simétrica onde todas as componentes atuam tanto à compressão como à tração, como se pode ver no modelo, Figura 5.1.

A ligação “reverse channel” tem uma resistência superior quando apenas solicitada à flexão pura, como se concluiu no capítulo anterior, mas para esta pode ter um efeito benéfico a atuação de uma força de compressão, como se pode observar entre o ponto C e E, o que vai provocar um aumento do momento resistente. Este fenómeno deve-se ao facto de o eixo neutro subir quando sujeito a um esforço de compressão, fazendo diminuir a força de tração resultante do

binário de forças do momento atuante. Neste caso este efeito benéfico nota-se até estar aplicado na ligação um esforço axial de compressão com cerca de 40% do esforço máximo de compressão axial.

Quando a ligação é apenas sujeita a esforços de compressão conclui-se que a ligação é limitada pela viga, ponto L, mas se for aplicado um esforço de tração já é limitado pela ligação “reverse channel” à compressão, ponto A.

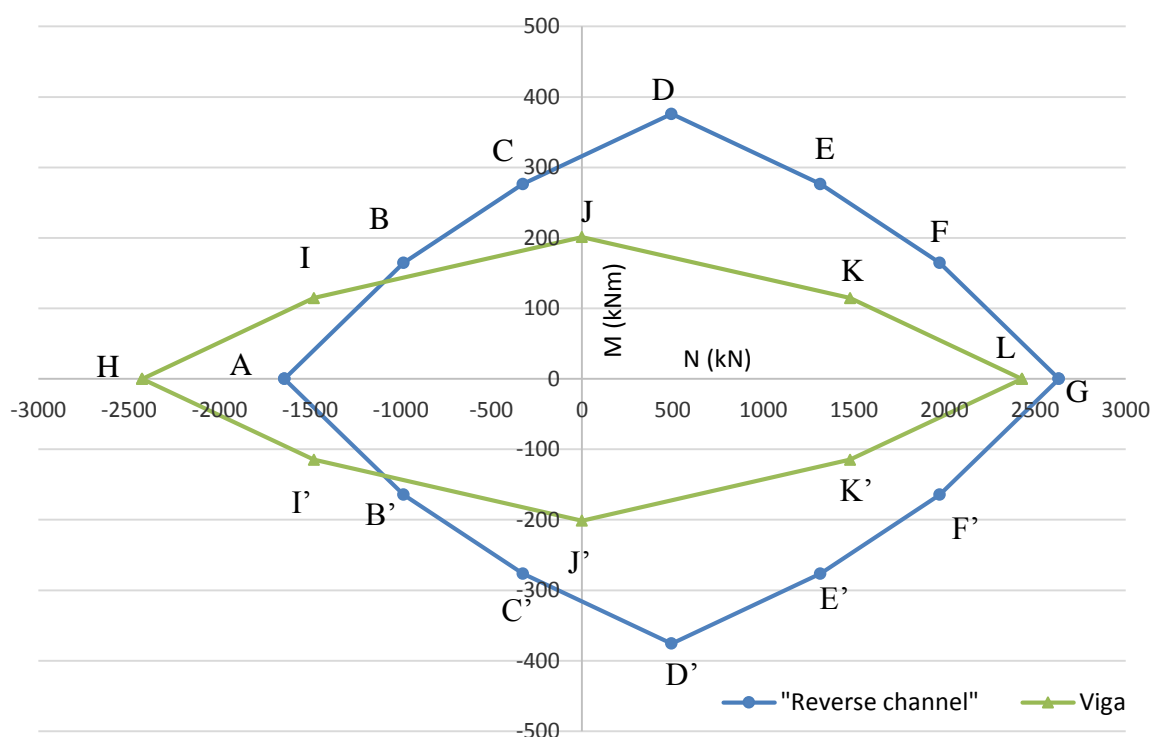


Figura 5.2 – Curva M-N (Ensaio 2)

Para explicação do processo é utilizado o segmento A-B da ligação entre o “reverse channel” e a chapa de topo. No segmento A-B as resistências últimas foram alcançadas nas linhas 3 e 4, e a resistência da linha 1 variou de 0 kN (ponto A) para F_{Rd} (ponto B). Então a resistência última da linha 1 não é alcançada, assim a linha 1 corresponde a linha k definido por Cerfontaine (2004): a linha 1 é a única linha onde as forças podem aumentar mais, mas este valor é limitado segundo a equação (10). Na Tabela 5.9 pode ver-se a distribuição de carga, tanto para momento positivo como negativo, deduzido a partir da curva M-N (segmento AB e A'B'). A rotura é definida a partir da última linha a alcançar a resistência final, a primeira linha de parafusos (linha 1). Então a componente associada à rotura da ligação é a componente “reverse channel” à compressão.

$$N = 0 = \sum_{F_{Rd,i} > 0} F_{Rd,i} + \sum_{F_{Rd,i} < 0} F_{Rd,i} \quad (10)$$

Tabela 5.9 – Distribuição de esforços e modo de rotura sobre momento positivo no troço AB e A'B'

	<i>M</i> -	<i>M</i> +
Distribuição da carga		
Modo de rotura	RC a compressão	RC a compressão

Os mesmos cálculos podem ser feitos ao longo de toda a curva M-N, e os modos de rotura podem ser identificados nas Figura 5.1 a) (ligação RC chapa) e Figura 5.1 b) (ligação Chapa Viga).

São ainda apresentados as curvas dos restantes dois ensaios, calculadas utilizando exatamente o mesmo método. Na

Figura 5.3 e Figura 5.4 pode observar-se as curvas M-N para o ensaio 1 e ensaio 3 respetivamente. As conclusões que foram tiradas anteriormente para o ensaio 2 serão idênticas para os seguintes ensaios. É de salientar que no ensaio 3 (Figura 5.4) na curva pertencente à ligação “reverse channel”-chapa de topo, esta possui menos pontos que as restantes, pois já como enunciado nos capítulos anteriores, se optou por ignorar a primeira linha de parafusos.

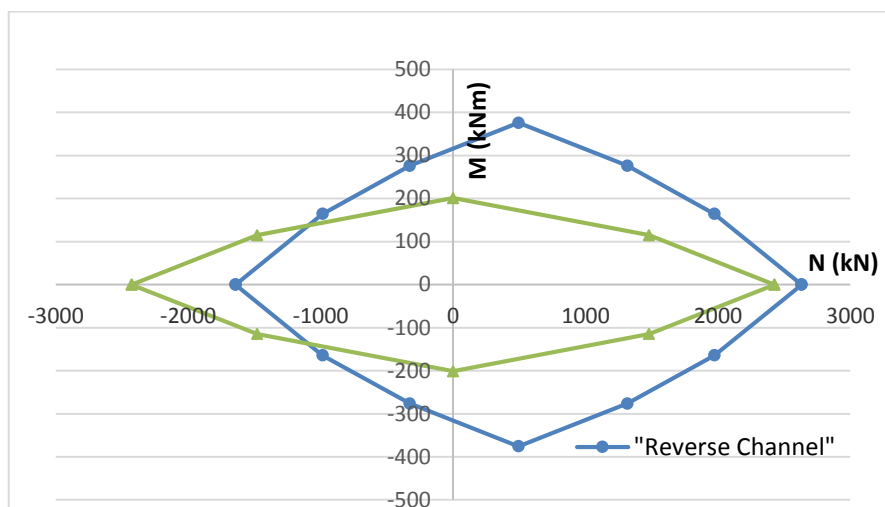


Figura 5.3 – Curvas N-M (Ensaio 1)

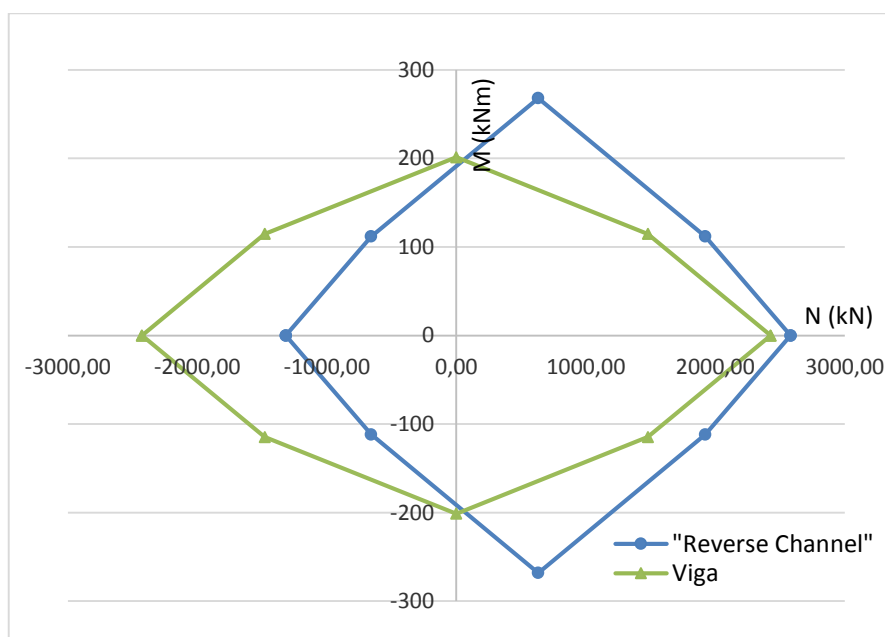


Figura 5.4 – Curva N-M (Ensaio 3)

5.3 Modelo analítico para cálculo das curvas M-N em ligações metálicas para temperaturas elevadas

O modelo enunciada na Figura 5.1 foi também estudado durante as fases de aquecimento. O procedimento de cálculo é exatamente o mesmo, onde apenas foi introduzida a metodologia apresentada no sub-capítulo 4.3.1, para redução das capacidades resistentes do material quando sujeito à ação do fogo, segundo a norma EN1993-1-2 (2010).

Para mais fácil percepção do evoluir das curvas de resistência de ambas as partes da ligação, estas foram divididas em duas figuras. Na Figura 5.5 são apresentadas as curvas de M-N da ligação “reverse channel” chapa de topo, onde podemos ver o decréscimo das capacidades resistentes devido ao aumento da temperatura. Para a ligação chapa de topo viga, as curvas correspondentes são estão apresentadas na Figura 5.6.

Comparando a Figura 5.5 e Figura 5.6 é de salientar que às capacidades resistentes do “reverse channel” se degradam muito mais rapidamente que as da viga, no ensaio 2. Com o decorrer do ensaio, a ligação chapa de topo-viga praticamente não perdeu as suas capacidades resistentes, apenas sofreu um pequeno decréscimo, nada comparado com a ligação “reverse channel” chapa de topo. Após 80 minutos de carga térmica, esta perde cerca de 80% da sua resistência a flexão, e a resistência axial tanto à tração como à compressão perde 85% do seu valor, enquanto a ligação chapa de topo viga apenas se reduziu em cerca de 30% e 20% momento fletor e esforço axial, respetivamente.

Para o ensaio 1 (Figura 5.7 e Figura 5.8) as curvas são idênticas as do ensaio 2. Pode ver-se que estas têm um decréscimo de resistência muito mais rápido ao longo do tempo, o que era de prever visto que têm uma menor espessura da chapa e do reforço. No ensaio 3 pode ver-se o decréscimo das resistências das componentes resistentes da ligação é feita de uma maneira muito mais lenta pois neste ensaio as componentes não chegam a uma temperatura tão elevada como nos restantes.

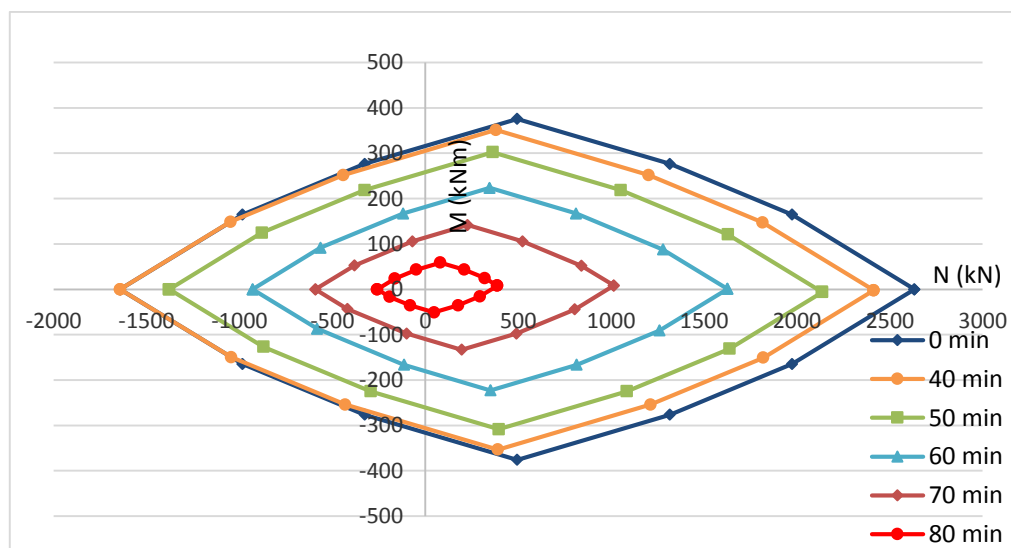


Figura 5.5 – Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (“reverse channel” - chapa de topo, Ensaio 2)

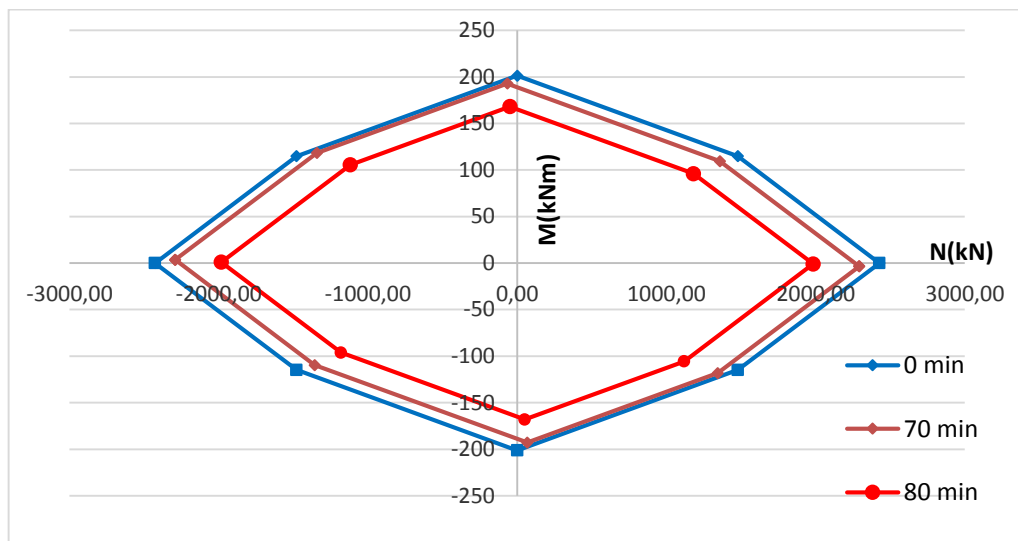


Figura 5.6 – Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (chapa de topo - viga, Ensaio 2)

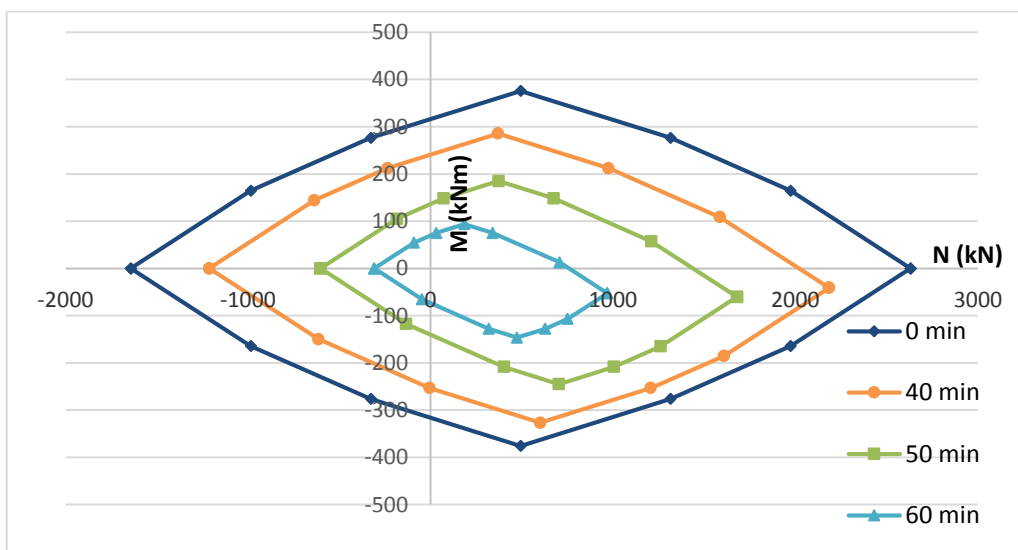


Figura 5.7 - Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (“reverse channel” - chapa de topo, Ensaio 1)

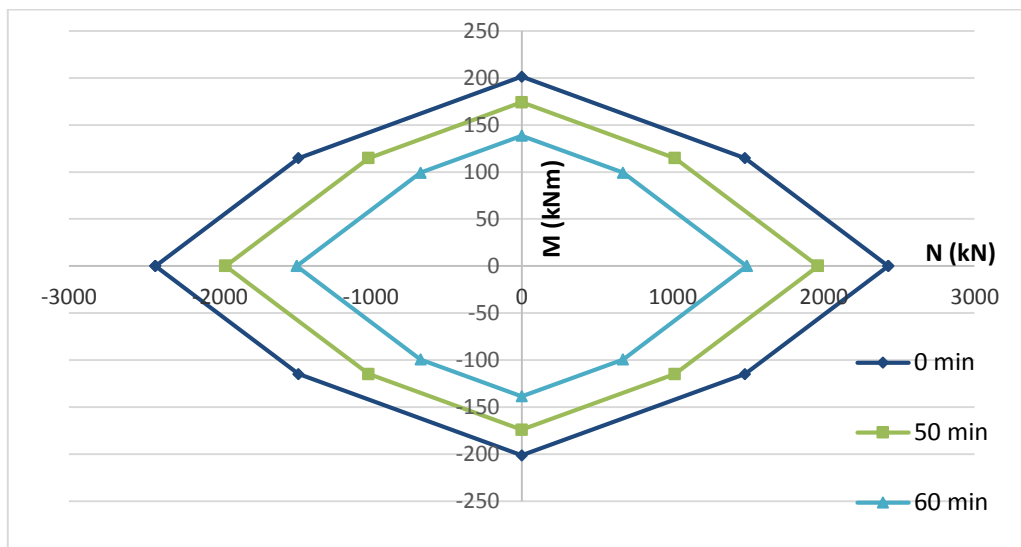


Figura 5.8 - Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (chapa de topo - viga, Ensaio 1)

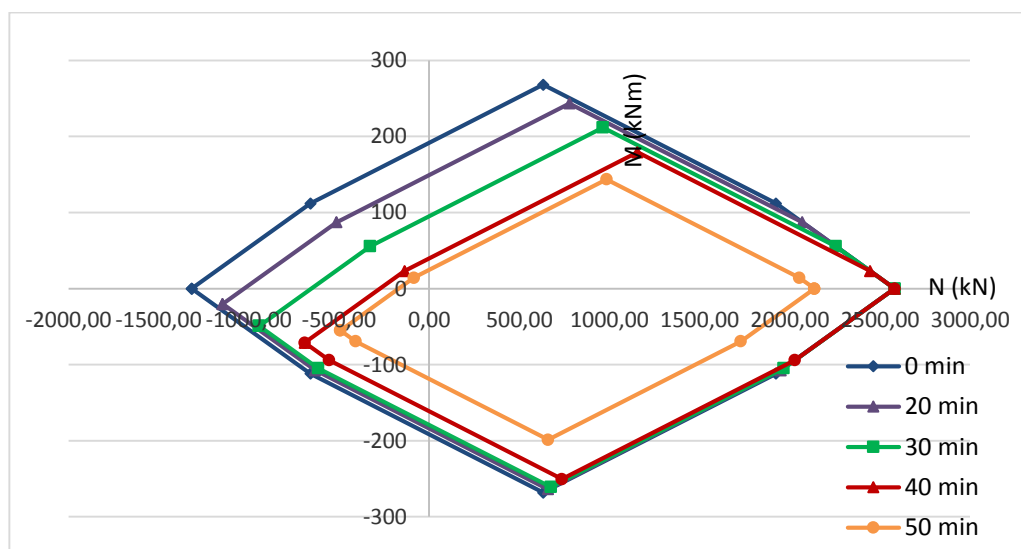


Figura 5.9 – Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (“reverse channel” - chapa de topo, Ensaio 3)

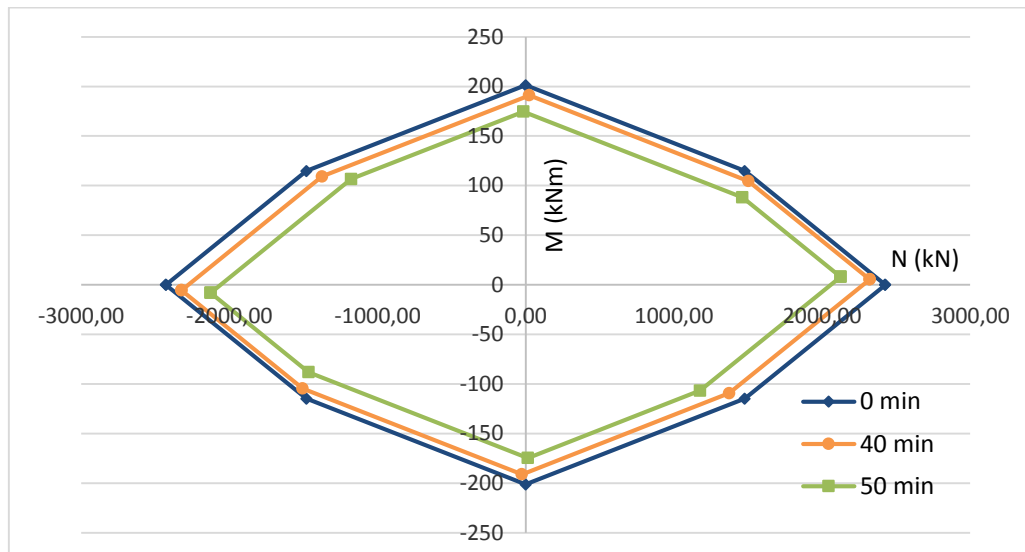


Figura 5.10 – Curvas de interação M-N com aumento da temperatura (chapa de topo - viga, Ensaio 3)

6 Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

O presente trabalho consistiu essencialmente no cálculo e comparação dos resultados analítico da resistência, à temperatura ambiente e temperaturas elevadas de um novo tipo de ligação, com “reverse channel”, com os resultados experimentais. Para este estudo foram analisadas três tipologias semelhantes mas com geometria diferente. O procedimento analítico baseou-se no método das componentes. O cálculo das resistências das diversas componentes foi baseado na norma EN1993-1-8 (2010), à exceção das componentes relativas ao “reverse channel”. Para estas foram usadas metodologias propostas recentemente por Li (2012) e Liu *et al.* (2012), as quais ainda não estão validadas.

Nos ensaios experimentais efetuados foram levadas à rotura com carga térmica três ligações das quais as duas primeiras sofreram grandes deformações do “reverse channel” e a última sofreu rotura a partir da chapa de topo.

Para o cálculo dos fatores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono a temperaturas elevadas foi utilizada a metodologia presente na norma EN 1993-1-2 (2010). Este define o valor de cálculo das propriedades mecânicas do aço em situação de incêndio em função de um fator de redução, k_θ , fator de redução para obtenção do valor da propriedade mecânica à temperatura θ . Assim, as características mecânicas do material à temperatura θ são dadas em função das mesmas a 20 °C.

No cálculo analítico conclui-se, tal como nos ensaios experimentais, tanto o primeiro ensaio como no segundo, que a rotura devido à carga térmica e ao momento constante dá-se pelo “reverse channel”, enquanto à temperatura ambiente se dava pela viga. Já o terceiro ensaio devido à inexistência de um reforço na chapa de topo, os cálculos remeteram para uma rotura tanto à temperatura ambiente como a elevadas temperaturas da chapa de topo.

Foi utilizado o modelo desenvolvido por Cerfontaine (2004) para obter a curva M-N da ligação. Este é um processo analítico capaz de avaliar a resposta não linear de ligações metálicas sujeitas a momento fletor e esforço axial. Este método foi experimentado por Demonceau *et al.* (2013) para ligações sujeitas a temperaturas elevadas, de onde se obtiveram bons resultados. O mesmo

se pode constatar nas Figura 5.5 a Figura 5.10 onde se pode ver as capacidades resistentes da ligação a reduzir ao longo do tempo.

6.2 Trabalhos futuros

Na presente dissertação apresentou-se um estudo do comportamento de uma ligação com “reverse channel” à temperatura ambiente e a temperatura elevadas. Posto isto ainda há algum trabalho a realizar de forma a compreender o comportamento da ligação com “reverse channel” de modo mais aprofundado. Sugerem-se então os seguintes temas:

- É essencial efetuar mais ensaios às componentes do “reverse channel, pois é um elemento ainda pouco estudado, de maneira a identificar mais mecanismos de rotura tanto à temperatura ambiente como a temperaturas elevadas de modo a desenvolver uma formulação mais precisa para a quantificação da resistência dos componentes;
- Deve ser feito um estudo numérico das ligações ensaiadas com as propriedades reais dos materiais e respetiva carga térmica de modo a validar os resultados obtidos analiticamente;
- Os mesmos ensaios devem ser feitos numa maior variedade de secções, tanto para a viga como para o pilar;
- Devem ser estudadas outras configurações de “reverse channel”, de modo a otimizar o seu desempenho estrutural, tendo em conta todos os parâmetros de segurança impostos pela norma EN 1993-1-8;
- O método de Cerfontaine (2004) deve de ser aprofundado de modo a melhorar as curvas de interação M-N, obtendo mais pontos da mesma, encontrando assim uma curva mais próxima da realidade.
- Realizar ensaios com reprodução de incêndio real com restrição axial da viga para comparar os ensaios analíticos da curva de interação M-N com os resultados experimentais.

Referências Bibliográficas

Al-Jabri et al., (2008) Al-Jabri K.S., Davison J.B., Burgess I.W. “Performance of beam-to-column joints in fire - A review”. *Fire Safety Journal* 43, 2008.

Block F., (2006) “Development of a component-based finite element for steel beam to-column connections at elevated temperature”. Ph.D. Thesis, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, UK, 2006.

CEN (2010), Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-2: General actions – Actions on structural exposed to fire, EN 1991-1-2, European Committee for Standardization, Brussels, 2010.

CEN (2010), Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-7: General actions –Accidental actions, EN 1991-1-7, European Committee for Standardization, Brussels, 2010.

CEN (2010), Eurocode 3: Design of steel Structures, Part 1-2: General rules Structural fire design, EN 1993-1-2, European Committee for Standardization, Brussels, 2010.

CEN (2010), Eurocode 3: Design of steel Structures, Part 1-8: Design of joints, EN 1993-1-8, European Committee for Standardization, Brussels, 2010.

Cerfontaine, (2004) Cerfontaine F. “Etude de l’interaction entre moment de flexion et effort normal dans les assemblages boulonnés”. PhD thesis presented at the University of Liège. Belgium, 2004.

Demonceau *et al.*, (2013) Demonceau J.F., Huvelle C., Comelieu L., Hoang L. V., Jaspard J.P., Fang C., *et al.* “Robustness of car parks against localised fire (Robustfire)”, European Commission, Grant Agreement Number RFSR-CT-2008-00036, Final report, EUR 25864, 2013.

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.

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.

Fang, (2012) Fang C., “Robustness of multi-storey steel-composite structures under localised fire”, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Imperial College London, UK, 2012.

FRAMEUP (2013) – Optimization of frames for effective assembling – Work package2 – Preliminary beam-to-column connection analysis;

FRAMEUP (2013) – Optimization of frames for effective assembling – Work package 2 – Preliminary beam-to-column connection analysis_Rev.01;

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

Hanus F, (2010), “Analysis of simple connections in steel structures subjected to natural fires”, Ph.D. Thesis, University of Liège, Belgium, 2010.

Heidarpour A., (2007) “Behaviour of steel and steel-concrete composite beams and beam-to-column connections at elevated temperatures”. Ph.D. Thesis, School of Civil and Environmental Engineering, the University of New South Wales, Sydney, Australia, November 2007.

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

Hu, (2009) Hu Y., “Robustness of flexible end-plate connections under fire conditions”, Ph.D. Thesis, University of Sheffield, Dep. of Civil and Structural Eng., 2009.

ISO 834-1, (1999) “Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements”, International Standard, 1 st Edition, 1999.

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

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 Doutoramento, 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.

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.

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.

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.

Simões da Silva *et al.*, (2003) Simões da Silva L, Neves L, Baniotopoulos L, Perdikaris P, Zygomalas M, Bosiljkov V, et al. “Evaluation of structural robustness of members and connections”, In: Simões da Silva L, Mendes J, editors. *Proceedings of the COST C12 seminar on improvement of building’s structural quality by new technologies*, European Commission, Brussels; 2003.

Santiago A, (2008) “Behaviour of beam-to-column steel joints under natural fire”. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Coimbra, 2008.

Sarraj *et al.*, (2007) Sarraj M., Burgess I.W., Davison J.B., Plank R.J. “Development of a component model approach to fin-plate connections in fire”, *Proceedings of the 3rd International Conference of Steel and Composite Structures* (Eds.: Wang Y.W., Choi C.K.), 549-555, Manchester, U.K., 2007.

Silva T. (2014). “Estudo de ligações viga-pilar usando perfis retangulares ou quadrados ocos”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Simões da Silva *et al.*, (2005) Simões da Silva L., Santiago A., Vila Real P., Moore D. “Behaviour of steel joints under fire loading”. *The Second International Conference on Steel and Composite Structures*, Seoul, Korea, September 2-4, 2004; *International Journal of Steel and Composite Structures* 5(6).

Simões da Silva L, *et al.* (2013) COMPFIRE – Design of composite joints for improved fire robustness, Final Report – Technical report No. 4, Grant agreement no. RFSR-CR-2009-00021. Brussels: 2013.

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.

Sulong, (2007) Ramli Sulong N.H. “Structural fire performance of steel connections”. Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, South Kensington Campus, London, UK, 2007.

Vila Real, P. V. (2003) “Incêndios em Estruturas Metálicas-Cálculo Estrutural”, Alfragide: Edições Orion

Yu *et al.*, (2008) Hongxia Yu, I. W. Burgess, J.B. Davison, R.J. Plank, “Numerical simulation of bolted steel connections in fire using explicit dynamic analysis”, *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (5), 2008.

Zhao *et al.*, (2011), Roosefid M., Breunese A., Koutlas G., Zilli G., Franssen J.M., Hanus F. “Connections of Steel and Composite Structures under Natural Fire Conditions (COSSFIRE)”. Contract number RFSR-CT-2006-00028, Final report, EUR 25046 EN, 2011.