



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

Modelação do comportamento ao fogo de ligações mistas de aço e betão

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

Autora

Ana Sofia Filipe Matias

Orientadores

Prof. Doutor João Paulo Correia Rodrigues (FCTUC – Portugal)

Prof. Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago (FCTUC – Portugal)

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

Coimbra, Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Correia, pela total disponibilidade, incentivo, dedicação e ajuda a resolver todos os problemas com que me deparei ao longo desta dissertação.

À minha orientadora Professora Doutora Aldina Maria da Cruz, pela total disponibilidade manifestada.

Ao Luís Laím e ao João Ribeiro, por toda a ajuda que me deram na elaboração do modelo numérico.

Ao Hélder Craveiro pela ajuda no laboratório.

Ao Pedro Barata, pela disponibilidade

À Inês Garcia e à Beatriz Ferrer.

Aos meus amigos, muito em especial à Ana, à Débora, à Teresa, à Ana Rita, ao Dane e ao André.

À minha super mãe.

RESUMO

O comportamento das ligações viga-coluna em situação de incêndio no desempenho global da estrutura, começou a suscitar interesse quando se concluiu que estas eram muitas vezes o motivo da cedência da estrutura. Estudos realizados comprovaram que a resistência e a rigidez da estrutura sofriam redução quando sujeitas a temperaturas elevadas acabando as ligações por entrar em rotura.

Nesta dissertação são analisados os resultados obtidos em ensaios experimentais, anteriormente realizados, numa ligação mista viga-coluna de aço e betão, com laje mista de chapa colaborante. Estes ensaios foram divididos em dois grupos, um grupo à temperatura ambiente, que consistiu em três ensaios com carregamento distintos (monotónico negativo, monotónico positivo e cíclico) e outro a temperaturas elevadas, em que as ligações eram aquecidas até aos 600°C e depois levadas à rotura por aplicação de momento fletor e esforço axial. Estes ensaios são parte dum programa de ensaios mais vasto de ligações ao fogo após sujeição a uma ação cíclica. O efeito da ação cíclica na ligação foi ignorado nesta dissertação e a ligação considerada sem qualquer dano o que na realidade foi quase verdade.

O modelo experimental foi reproduzido numericamente com recurso ao programa de elementos finitos ABAQUS. Neste programa apenas foram realizadas duas simulações, uma à temperatura ambiente, que consistiu em levar a ligação à rotura por aplicação de momento negativo e outra a temperaturas elevadas, que consistiu no aquecimento da ligação até aos 600°C e seguidamente levá-la à rotura por aplicação de esforço axial e momento fletor.

Concluiu-se que em ambas as situações a resistência e a rigidez da ligação diminuíram com o aumento da temperatura. O modo de rotura alterou-se com o aumento da temperatura, à temperatura ambiente ocorreu devido à rotura dos parafusos, já a temperaturas elevadas esta ocorreu devido à plastificação da chapa de topo.

Concluiu-se ainda que a análise numérica previu com alguma exatidão o comportamento mecânico da ligação à temperatura ambiente. Já a temperaturas elevadas o mesmo foi verificado mas não se deve tirar conclusões tão diretas uma vez que nos ensaios experimentais a ligação tinha sido sujeita previamente a um carregamento cíclico.

Palavras chave: ligação, aço, betão, experimental, numérico, resistência ao fogo

ABSTRACT

The behaviour of beam column joints subjected to fire in the global structural performance began to arouse interest when it was shown that the joints were in many cases responsible for the collapse of the structure. Several studies then proved that the resistance and stiffness of the structure diminished when exposed to high temperatures, which results in the failure of the joints.

The main objective of this thesis was to analyse the results obtained from previous fire resistance tests on composite steel concrete joints of a beam to a columns having a composite steel deck attached to the beam. These experimental tests were divided in two groups, the first at ambient temperature and the second at high temperatures. The first consisted in three tests with following load types: hogging bending moment, sagging bending moment, and cyclic. In the second, the joints were first heated up to 600°C and then subjected to axial force and bending moment up to failure. These tests are part of a wider testing program on joints subjected to fire after cyclic loading. In this thesis the effect of cyclic loading in the joint has been ignored and considered without any damage what in reality was almost true.

The experimental model was reproduced numerically using the finite elements software ABAQUS. Two numerical simulations were performed, the first at ambient temperature, consisted on subject the joint to hogging bending moment until failure and the second one at high temperatures, consisted on heating the joint to 600°C and then subject to axial force and bending moment until failure.

It was concluded that the load-bearing capacity and stiffness of the joint diminished with the temperature. The failure mode at ambient temperature was due to the failure of the bolts and at high temperatures was due to the plastification of the end plate.

It was also concluded that the numerical analysis predicted with considerable accuracy the behavior of the joint at ambient temperature. However the same should not be said with the same certainty for the high temperatures tests since the joints had previously been subjected to cyclic loading.

Keywords: joint, steel, concrete, experimental, numerical, fire resistance

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	xi
SIMBOLOGIA	xii
ABREVIATURAS	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento ao tema.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Estrutura da tese	4
2 ESTADO DA ARTE	6
2.1 Estudos experimentais	6
2.2 Estudos numéricos	13
2.3 Estudos analíticos.....	24
2.4 Abordagem dos eurocódigos estruturais	27
3 Análise experimental	30
3.1 Considerações iniciais.....	30
3.2 Provetes de ensaio.....	30
3.3 Plano de ensaios	31
3.4 Modelo experimental	31
3.4.1 Ensaios realizados à temperatura ambiente	32
3.4.2 Ensaios realizados a altas temperaturas	32
3.5 Procedimento de ensaio	33
3.5.1 Ensaios à temperatura ambiente	33
3.5.2 Ensaios a altas temperaturas	33
3.6 Resultados	34
3.6.1 Ensaios à temperatura ambiente	34
3.6.2 Ensaios a temperaturas elevadas.....	36

3.7	Considerações finais	38
4	Análise Numérica	40
4.1	Considerações iniciais.....	40
4.2	Software de modelação de estruturas em situação de incêndio	40
4.3	Modelação segundo o software ABAQUS	44
4.3.1	Considerações gerais sobre o programa	44
4.3.2	Módulo "PART"	45
4.3.3	Módulo "Property"	45
4.3.4	Módulo "ASSEMBLY"	45
4.3.5	Módulo "STEP"	46
4.3.6	Módulo "INTERACTION"	47
4.3.7	Módulo "LOAD"	47
4.3.8	Módulo "MESH"	47
4.3.9	Módulo "JOB"	47
4.3.10	Módulo "VISUALIZATION"	48
4.4	Modelo Numérico	48
4.4.1	Considerações gerais do modelo	48
4.4.2	Modelo à temperatura ambiente	49
4.4.3	Modelo a temperaturas elevadas.....	52
4.5	Resultados.....	53
4.5.1	Ensaaios à temperatura ambiente	54
4.5.2	Ensaaios a temperaturas elevadas.....	55
4.6	Evolução da temperatura em lajes mistas - comparação dos resultados obtidos numericamente pelo ABAQUS com os analiticamente com o método simplificado do anexo D da EN 1994 - 1 - 2	57
5	CONCLUSÕES e DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	60
5.1	Conclusões	60
5.2	Desenvolvimentos futuros	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
	ANEXOS	67
	Anexo A - Ensaaios de determinação das propriedades dos materiais à temperatura ambiente.	67
	A.1 - Considerações Iniciais.....	67
	A.2 - Ensaaios no Betão	67
	A.2.1 Resistência à compressão do betão.....	67
	A.2.2 Determinação da energia de fratura.....	68
	A.3 - Ensaaios no Aço.....	71
	A.3.1 - Ensaaios nas vigas.....	71
	A.3.2 - Conectores	72

Anexo B - Propriedades dos materiais segundo a EN 1992-1-2 (2010) e EN1993-1-2(2010).	76
.....	76
B1 - Propriedades do betão a temperaturas elevadas	76
B.1.1 Propriedades térmicas	76
B.1.2 Propriedades mecânicas	78
B2 - Propriedades do aço a temperaturas elevadas.....	79
B2.1 Propriedades térmicas:	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relação força rotação (Yu et al.2008)	9
Figura 2.2 - (a)Efeito do número de linhas dos parafusos; (b) Efeito da espessura da chapa de topo (Yu et. Al 2008).....	10
Figura 2.3 - Deformação das ligações: (a) "Fin-plate"; (b) Chapa de topo flexível; (c) Chapa de topo; (d) Web cleat e (e) Chapa de topo estendida (Dai et al. 2009).....	10
Figura 2.4 - Comparação entre os métodos simplificados com os resultados obtidos com FEM para UC203×203×46 (Block et al. 2004)	Erro! Marcador não definido.
Figura 2.5 - (a) Cua momento-rotação-temperatura (b) relação rotação-temperatura para os diferentes níveis de carregamento (Al-Jabri et al. 2006).....	14
Figura 2.8 - Deformações nas componentes da ligação (Al-Jabri et al. 2006).....	15
Figura 2.9 – Deformação e tensão de von Mises do modelo de Elementos Finitos da ligação de fin-plate (Sarraj et al. 2007).....	16
Figura 2.10 – Modelo de Elementos Finitos da ligação de Fin-Plate e a ligação da viga (Sarraj et al. 2007).....	17
Figura 2.11 - Comparação entre o método de elementos finitos e os resultados experimentais de CR2 (Qian et al. (2009)).	18
Figura 2.12 – (a) Extensões equivalentes na chapa de topo; (b) Extensões principais nos parafusos (Santiago et al.2010).	20
Figura 2.13 - Deformação das ligações através da análise de elementos finitos: (a) "Fin-plate"; (b) Chapa de topo flexível; (c) Chapa de topo; (d) Web cleat e (e) Chapa de topo estendida Dai et al. (2009).....	21
Figura 2.14 - Comparação entre a deformação prevista e a deformação medida: (a) - deformação obtida pelo FE e (b) deformação obtida pelos resultados experimentais (Li et al.2012).....	21
Figura 2.15 - Comparação entre a relação momento-rotação-temperatura prevista pelo modelo FE(FEM) e o modelo teórico (TM) (Li et al. 2012)	22
Figura 2.16 – Resposta isotérmica da relação momento-rotação (Silva et al.)	26
Figura 2.17 – Resposta Isotérmica do momento-rotação com coeficiente de correção de temperatura de 7.5% (Silva et al. 2001).	26

Figura 2.18 Representação da rigidez de rotação da ligação mista (Li et al 2012).....	27
Figura 2.19 Gradiente térmico na altura de uma ligação mista.....	28
Figura 2.20 - Esquema de distribuição da temperatura (EN1994 - 1 - 2).....	29
Figura 3.1 - Esquema do Sistema de Ensaio à Temperatura Ambiente.....	32
Figura 3.2 - Sistema de ensaio à Temperatura Ambiente.....	32
Figura 3.3 - Ensaio de ligações a temperaturas elevadas (a) esquema de ensaio; (b) sistema de ensaio e (c) sistema de aplicação de carga nos ensaios E5 e E6 . (Barata)	33
Figura 3.4 - Ensaio E1: (a) curva momento-rotação e (b) curva momento atuante-momento na viga.	34
Figura 3.5 - Deformação da ligação após ensaio realizado à temperatura ambiente.....	35
Figura 3.6 - Curva momento-extensão dos parafusos.	35
Figura 3.7 - Esquema de disposição dos extensómetros	37
Figura 3.8 Extensões das armaduras no ensaio E1(a) armaduras transversais e (b) armaduras longitudinais.	36
Figura 3.9 - Deformação da ligação sujeita a situação de incêndio: (a)instabilização da viga, (b) rotura dos parafusos da primeira fila e (c) fendilhação da laje de betão.....	36
Figura 3.10 - Curva esforço axial-deslocamento.....	37
Figura 3.11 - Curva esforço axial-momento fletor.	37
Figura 3.12 - Comparação das curvas momento-rotação do ensaio a realizado a temperatura ambiente com o ensaio a elevadas temperatura.	37
Figura 3.13 - Disposição dos termopares na ligação.	38
Figura 3.14 - Evolução da temperatura dos parafusos.....	38
Figura 3.15 - Evolução da temperatura na viga.....	38
Figura 3.16 - "Evolução da temperatura na laje.....	38
Figura 4.1 - Modelo Numérico: (a) modelo geral e (b) pormenor da ligação.	48
Figura 4.2 - "Parts": (a) chapa colaborante; (b) betão entre os banzos; (c) parafuso; (d) conector; (e) laje de betão; (f) coluna metálica; (g) chapa de topo; (h) macaco hidráulico; (i) simulação da zona inferior e superior da coluna; (j) viga metálica.....	49
Figura 4.3 - Pormenor do Coupling (a) redução dos pontos da coluna central a um ponto único e (b) união de todos os pontos da coluna central ao elemento do tipo "Wire"	50
Figura 4.4 - Pormenor da discretização de elementos (a) parafuso, (b) chapa de topo e (c) laje.	50
Figura 4.5 - Aplicação da ação mecânica.	52
Figura 4.6 - Comparação da curva momento rotação do modelo experimental com o modelo numérico.	54

Figura 4.7 - Extensões nos parafusos: (a) análise numérica e (b) análise numérica vs. experimental.	54
Figura 4.8 - Análise experimental vs. análise numérica: (a) curva momento-rotação e (b) curva momento-esforço axial.	55
Figura 4.9 - Evolução da temperatura na ligação (a) parafusos e (b) viga.	56
Figura 4.10 - Evolução da temperatura: (a) vista geral e (b) pormenor da ligação.	56
Figura 4.11 - Evolução da temperatura na laje.	57
Figura 4.12 - Dimensões da laje em estudo [mm].	58
Figura 4.13 - Comparação da evolução da temperatura na laje entre o método analítico e numérico.	59
Figura A. 1 - Dimensões dos provetes.	66
Figura A. 2 - Disposição dos defletómetros: (a) vista geral do ensaio e (b) pormenor dos defletómetros na zona inferior do ensaio.	67
Figura A. 3 - Disposição dos extensómetros: (a) na viga, (b) esquema.	67
Figura A. 4 - Curva carga-deslocamento (a) 1º betonagem e (b) 2º betonagem.	68
Figura A. 5 - Curva carga extensão para os extensómetros centrais (a) ensaio 2 e (b) ensaio 3.	68
Figura A. 6 - Curva carga extensão para os extensómetros laterais (a) ensaio 2 e (b) ensaio 3.	69
Figura A. 7 - Provede prismático (a) dimensões do provede (mm) e (b) pormenor do provede amarrado à máquina de testes.	70
Figura A. 8 - Curva tensão extensão para o aço da viga IPE 270: (a) alma e (b) banzo.	70
Figura A. 9 - Conectores: (a) dimensões dos provedes e (b) provedes maquinados.	71
Figura A. 10 - Sistema de ensaio dos conectores: (a) vista geral e (b) pormenor do sistema de amarração dos provedes.	71
Figura A. 11 - Sistema de amarração desenvolvido para os conectores à máquina de ensaio.	71
Figura A. 12 - Curva tensão-extensão.	72
Figura A. 13 - Ensaio dos conectores (a) zona de estriação e (b) rotura do conector.	73
Figura A. 14 - Conectores após ensaio.	73
Figura A. 15 - Curva tensão-extensão.	73
Figura A. 16 - Curva tensão-extensão para a chapa trapezoidal.	74
Figura B.1 - Extensão térmica do betão com a temperatura.	75
Figura B.2 - Calor específico do betão em função da temperatura.	75
Figura B.3 - Condutibilidade térmica do betão em função da temperatura.	76
Figura B.4 - Fator de redução do betão com a temperatura: (a) compressão e (b) tração.	77
Figura B.5 - Extensão térmica do aço carbonado em função da temperatura.	78

Figura B.6 - Calor específico do aço em função da temperatura.....	78
Figura B.7 - Calor específico do aço em função da temperatura.....	79
Figura B.8 - Relação tensão-extensão para o aço a elevadas temperaturas.....	80
Figura B.9 - Fatores de redução com a temperatura das propriedades do aço.....	81

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Evolução da temperatura nas ligações.	6
Quadro 2.2 - Ligações viga coluna estudadas (Santiago et al.2010).....	19
Quadro 2.3 – Detalhes dos testes utilizados (Silva et al. 2001)	26
Quadro 3.1 - Plano de ensaios	31
Quadro 4.1 - Coeficientes utilizados na análise térmica	53
Quadro A. 1 - Composição do betão (kg/m ³).....	65
Quadro A. 2 - Resistência à compressão do betão.....	66
Quadro A. 3 - Determinação da energia de fratura.....	68
Quadro A. 4 -Resultados dos ensaios de tração nos provetes da viga IPE 270.....	70
Quadro A. 5 - Resultados dos ensaios de tração nos conetores.....	72
Quadro A. 6 - Resultados à tração dos parafusos.....	73
Quadro A. 7 - Resultados dos ensaios de tração nos provetes da chapa trapezoidal da laje...	74
Quadro B. 1 - Relações tensão extensão do betão em compressão a altas temperaturas.....	76
Quadro B. 2 - Lei constitutiva do aço para temperaturas elevadas.....	79
Quadro B. 3 - Fatores de redução para a relação tensão-extensão para o aço.....	80

SIMBOLOGIA

μ - coeficiente de fricção;

$^{\circ}\text{C}$ - graus Celcius;

mRad - miliradianos

W - watts;

M - momento fletor;

N - esforço axial;

L_r - superfície exposta

$k_{E;\theta}$ - fator de redução da rigidez elástica com a temperatura;

$F_{i,\theta}^y$ - força da componente *i* à temperatura θ ;

$F_{i;20^{\circ}\text{C}}^e$ - força da componente *i* à temperatura ambiente;

$k_{b,\theta}$ - fator de redução para a temperatura adequada dos parafusos;

$F_{v,Rd}$ - valor de cálculo da resistência ao esforço transversal do parafuso;

$F_{b,Rd}$ - valor de cálculo da resistência ao esmagamento;

γ_{M2} - coeficiente parcial à temperatura normal;

$\gamma_{M,fi}$ - coeficiente parcial em situação de incêndio;

α_{slab} - coeficiente que tem em conta a hipótese do bloco retangular de tensões;

$f_{y,i}$ - valor convencional da tensão de cedência para a área de aço A_i ;

$f_{c,i}$ - valor de cálculo da resistência da área elementar do betão A_i ;

$z_i; z_j$ - distância do eixo neutro plástico ao centro de gravidade da área elementar A_i ou A_j

$f_{y,\theta}$ - tensão de cedência à temperatura θ ;

$f_{p,\theta}$ - tensão limite de proporcionalidade à temperatura θ ;

$E_{a,\theta}$ - módulo de elasticidade do aço à temperatura θ ;

$\varepsilon_{y,\theta}$ - extensão de cedência à temperatura θ ;

$\varepsilon_{p,\theta}$ - extensão limite de proporcionalidade à temperatura θ ;

$\varepsilon_{t,\theta}$ - extensão limite, correspondente à tensão de cedência, à temperatura θ ;

$\varepsilon_{u,\theta}$ - extensão última à temperatura θ .

Δl é o alongamento provocado pela temperatura;

θ_a é a temperatura do aço.

ABREVIATURAS

DEC-FCTUC – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LEME–Laboratório Ensaios de Materiais e Estruturas

MEF - Método de elementos finitos

t_p - espessura;

af - espessura do banzo;

aw - espessura da alma;

RILEM– “International Union of laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures”

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento ao tema

O comportamento de estruturas de aço e aço-betão em situação de incêndio começou a ser estudado nas últimas décadas, desde então inúmeros trabalhos de investigação foram feitos com o objetivo de garantir a estabilidade estrutural em caso de incêndio.

A contribuição das ligações em situação de incêndio para o comportamento global da estrutura tem vindo a ser desprezado devido à elevada concentração de massa na zona das ligações. Os incêndios reais em ligações vieram provar que estas têm uma importância fundamental no comportamento das estruturas em situação de incêndio. As ligações muitas vezes entram em rotura nas componentes à tração, na chapa de topo e parafusos por causa das grandes tensões de arrefecimento induzidas pela deformação distorcional nos membros da ligação.

Os ensaios em ligações de aço sujeitas ao fogo tiveram início na década de 70. Na revisão bibliográfica efetuada por Silva et al. são descritos os principais ensaios realizados até à data quer em ligações isoladas quer em grande escala. Relativamente ao comportamento das ligações quando comparados os ensaios realizados em grande escala com os realizados em elementos isolados, verifica-se que estes últimos não representam de forma realista o comportamento de estruturas quer numa situação normal quer em incêndio. Aspectos como o colapso global ou local da estrutura e a capacidade de redistribuição de esforços, apenas ocorrem quando a estrutura interage entre si, estes fenómenos não podem ser representados em elementos isolados (Armeret al., 1994). Para além dos efeitos atrás mencionados, Bailey et al., 1996 referiram também a importância da restrição à expansão térmica causada pela estrutura adjacente não aquecida, provocando um aumento de esforços axiais nos elementos aquecidos, causando a instabilidade das colunas e encurvadura local nas vigas aquecidas.

Na caracterização do comportamento das ligações ao fogo, deve-se ter em conta a evolução da temperatura na zona da ligação com o decorrer do tempo, o efeito da temperatura elevada na resposta na estrutural da ligação e a redistribuição no tempo dos esforços internos resultantes do comportamento global da estrutura.

A abordagem feita pelo Eurocódigo 3 parte 1–2 relativamente à evolução da temperatura numa ligação é muito simplificada. O facto de existir uma grande concentração de massa na zona da ligação, quando comparada com os elementos da mesma, a um aumento mais lento da temperatura, levando a considerar o comportamento das ligações em condições de incêndios é desprezível. Estudos realizados por Al-Jabriet al. e Leston-Jones et al., vieram provar a necessidade de avaliar o comportamento das ligações a elevadas temperaturas, pois estas exibiam uma redução de resistência e rigidez que afetava o comportamento global da estrutura. A determinação do comportamento da ligação numa estrutura em situação de incêndio é complexa, uma vez que depende de fenómenos complicados como a variação das propriedades materiais do aço com a temperatura, a dificuldade de prever a evolução tempo-temperatura nos vários elementos da ligação e o diferente alongamento dos materiais que a compõe.

Com o desenvolvimento científico apareceram diversos programas de cálculo de elementos finitos (como o ABAQUS, LUSAS, FEAST, ANSYS etc.) que têm sido usados na análise do comportamento de estruturas. Estes softwares permitem resolver problemas complicados de engenharia de uma forma relativamente fácil e com aproximações bastante aceitáveis à realidade. Estes programas têm a vantagem de serem muito mais económicos do que os ensaios experimentais uma vez que dispensam gastos de mão de obra, materiais e equipamentos tecnológicos muito específicos, contudo a modelação numérica não dispensa a validação dos resultados, comparando-os com os resultados obtidos nos ensaios experimentais.

Os métodos numéricos são atualmente uma boa alternativa aos ensaios experimentais, quando devidamente calibrados. Nesta dissertação foi utilizado o programa de elementos finitos ABAQUS para a modelação numérica de uma ligação mista de aço e betão em situação de incêndio.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação foi o estudo do comportamento de ligações viga-coluna mistas de aço-betão sujeitas a um carregamento monotónico à temperatura ambiente e em situação de incêndio, através da elaboração de um modelo numérico construído com recurso ao programa de elementos finitos ABAQUS. Nesta dissertação foram comparados os resultados obtidos através deste programa com os resultados de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, realizados no âmbito da Dissertação de Mestrado Integrado do Eng.º Pedro Barata. Os ensaios experimentais foram desenvolvidos em duas fase. A primeira fase consistiu na realização três ensaios à temperatura ambiente, o primeiro consistiu em levar a ligação à rotura por aplicação de um carregamento monotónico negativo, o segundo por aplicação de momento

positivo e o terceiro por carregamento cíclico. Na segunda fase o ensaio decorreu em três etapas distintas, na primeira etapa as ligações foram sujeitas a um carregamento cíclico, sem as levar à rotura, na segunda etapa foram sujeitas à ação da temperatura através da curva de incêndio ISO 834 e por fim, na terceira fase, no instante em que os parafusos atingiram uma temperatura de 550°C, a ligação foi levada à rotura através de um sistema de carregamento que permitiu a aplicação de esforço axial e momento fletor, simulando desta forma uma ligação de continuidade. Uma vez que no modelo numérico não foram simuladas cargas cíclicas, nem momento fletor positivo, apenas foram comparados com as simulações numéricas os resultados experimentais dos ensaios monotónicos negativos à temperatura ambiente e os resultados a temperaturas elevadas.

Pretendeu-se ainda, avaliar o comportamento de ligação mista, composta por uma coluna e laje mista em situação de incêndio, bem como estudar a influência da temperatura na degradação das propriedades mecânicas da ligação (momento resistente e rotação), tendo em conta o efeito de continuidade presente nas estruturas reais.

Esta dissertação teve também como objetivo a avaliação da validade do método de cálculo simplificado de evolução da temperatura em lajes mistas sugerido pelo EC4 parte 1-2 Anexo C, comparando a evolução da temperatura obtida por este processo, com a evolução da temperatura obtida pelo programa ABAQUS.

De forma a completar o trabalho desenvolvido, foram ainda determinadas as propriedades mecânicas dos materiais do modelo experimental e numérico que não haviam sido antes determinadas e são de importância vital para as simulações numéricas. Assim foram realizados à temperatura ambiente ensaios à compressão e à flexão no betão e à tração no aço para os (conectores e viga IPE 270).

1.3 Metodologia

Esta dissertação teve início com o levantamento e estudo da bibliografia existente com o objetivo de, por um lado, compreender melhor o comportamento de ligações sujeitas ao fogo e, por outro conhecer as potencialidades e as limitações do programa de elementos finitos ABAQUS na modelação deste tipo de elementos ao fogo.

Após uma primeira abordagem ao assunto, procedeu-se ao estudo de um trabalho experimental realizado no LEME da UC, sobre o comportamento de ligações mistas sujeitas a cargas cíclicas após sismo. Os resultados obtidos à data do ensaio foram analisados e comentados.

O modelo que foi alvo do estudo experimental, reportado no capítulo anterior, foi replicado numericamente no programa de elementos finitos ABAQUS. Após a reprodução do modelo no programa de elementos finitos, este foi submetido à curva de temperaturas obtidas no ensaio experimental até aos 600°C, instante no qual se levou a ligação à rotura. Os resultados obtidos foram então comparados com os experimentais.

Com a finalidade de obter uma melhor correlação entre o modelo numérico e o modelo experimental, foram realizados ensaios em materiais utilizados no modelo experimental. Os ensaios realizados permitiram determinar as propriedades mecânicas dos materiais. Estes resultados encontram-se em anexo.

Para concluir o trabalho desenvolvido procedeu-se ao tratamento, análise dos resultados e comparação dos resultados obtidos por via experimental e numérica.

1.4 Estrutura da tese

A dissertação aqui apresentada é organizada em cinco capítulos e dois anexos.

No primeiro capítulo é realizada uma abordagem geral ao conteúdo desta dissertação. Neste capítulo é exposto o enquadramento do tema desta tese, os objetivos a que este trabalho se propõe, a metodologia seguida para dar resposta aos objetivos a que se propõe e a forma como o presente documento se encontra estruturado.

No segundo capítulo são abordados os principais estudos realizados sobre a temática da tese: é feito um levantamento do estado da arte, fazendo referência a desenvolvimentos recentes sobre o comportamento de ligações de aço e mistas ao fogo. A organização deste capítulo é feita em quatro subcapítulos intitulados: estudos experimentais, estudos numéricos, estudos analíticos e abordagem dos Eurocódigos estruturais.

No terceiro capítulo é apresentada a descrição dos ensaios experimentais realizados em ligações mistas de aço e betão, no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra, cujos resultados são aqui apresentados e discutidos.

A modelação numérica do modelo experimental apresentado no capítulo anterior é exposta no capítulo quatro. Neste capítulo são relatados os procedimentos adotados na modelação da ligação mista necessários para a implementação do método de elementos finitos com recurso à ferramenta de cálculo ABAQUS/Standard.

As principais conclusões retiradas do trabalho desenvolvido são apresentadas no quinto capítulo, onde são referidas ainda sugestões de futuros trabalhos que possam vir a contribuir para o progresso científico neste domínio.

As referências bibliográficas consultadas para a realização desta dissertação encontram-se expostas no sétimo capítulo.

A dissertação inclui ainda dois anexos, que pretendem complementar o trabalho desenvolvido.

No Anexo A são apresentados ensaios experimentais realizados em materiais obtidos do modelo original ou produzidos de forma semelhante aos originais, através dos quais foi realizado um estudo sobre o comportamento mecânico destes à temperatura ambiente. No Anexo B são estudadas as propriedades mecânicas dos materiais a elevadas temperaturas, de acordo com as normas regulamentares.

2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo são apresentados os resultados das principais investigações realizadas sobre o estudo do comportamento de ligações viga-coluna de aço e mistas aço-betão em situação de incêndio.

2.1 Estudos experimentais

Kruppa (1976) foi o autor dos primeiros ensaios que tiveram como objetivo avaliar a evolução da temperatura numa ligação isolada. Este autor ensaiou ligações viga-coluna em situação de incêndio; as ligações rígidas ou rotuladas foram sujeitas a incrementos lineares de temperatura seguindo a evolução da curva ISO 834. Na sequência deste ensaio avaliou o desempenho dos parafusos de alta resistência quando sujeitos a temperaturas elevadas, concluindo que estes assim como outros elementos da ligação a eles associados sofriam grandes deformações quando sujeitos ao fogo. Este trabalho experimental serviu de calibração para outros ensaios de ligações isoladas viga-coluna sujeitas a incêndio. No Quadro 2.1, encontra-se sintetizado a evolução da temperatura nas diferentes ligações analisadas.

Quadro 2.1 - Evolução da temperatura nas ligações.

Tipo de ligação	Temperatura observada
Metade de IPE500 no topo do banzo	$\theta_{ligação(alma)} \approx 150 - 200^{\circ}C$ inferior do que $\theta_{(alma da viga)}$; $\theta_{ligação(banzo)} \approx 150 - 400^{\circ}C$ inferior do que $\theta_{(banzo da viga)}$.
Fin-plate e placa de extremidade completa	$\theta_{ligação(alma)} \approx \theta_{(alma da viga)}$; $\theta_{ligação(banzo)} \approx 50^{\circ}C$ inferior do que $\theta_{(banzo da viga)}$.
Chapa de topo estendida	$\theta_{ligação(banzo)} \approx 50^{\circ}C$ inferior do que $\theta_{(banzo da viga)}$.
Cantoneiras nos banzos e alma	$\theta_{ligação(banzo)} \approx 250^{\circ}C$ inferior do que $\theta_{(banzo da viga)}$.
Cantoneiras nos banzos e alma (coluna HEB340)	$\theta_{ligação(alma)} \approx 100^{\circ}C$ inferior do que $\theta_{(alma da viga)}$; $\theta_{ligação(banzo)} \approx 150 - 200^{\circ}C$ inferior do que $\theta_{(banzo da viga)}$.

Cooke e Latham (1897) realizaram o primeiro conjunto de ensaios de uma ligação, inserida num pórtico, sujeita a um incêndio real. O pórtico consistia na ligação de uma viga de aço (406×178×52 UB) a duas colunas (203×203×52 UC). As colunas eram rotuladas na base e a

ligação entre estas e a viga era feita através de chapa de extremidade estendida. Para simular as condições reais de aquecimento da viga foi colocada uma laje de betão no topo desta. Neste trabalho verificou-se que o desempenho de uma ligação inserida num pórtico era superior ao obtido em ligações isoladas.

Lawson (1990) quantificou os benefícios da continuidade estrutural em condição de incêndio numa ligação viga-coluna. Realizou oito ensaios em ligações viga-pilar com laje de betão sujeitas à curva ISO 834. Destes ensaios quatro eram com chapa de extremidade (dois ensaios com viga de aço e pilar de aço, um com viga mista e pilar de aço e um quarto com cantoneiras de extremidade), dois ensaios eram com chapa de extremidade estendida (pilar e vigas de aço) e dois ensaios eram com cantoneiras de ligação alma da coluna (um ensaio com viga de aço e um ensaio com viga mista). Neste ensaios observou-se que a temperatura na ligação era mais baixa do que no banzo inferior da viga de aço. A rotura ocorreu após grandes deformações da chapa de extremidade. Concluiu-se que, quando sujeitas a elevadas temperaturas, a capacidade resistente das ligações mistas era superior à das ligações de aço, pois a presença do betão nas ligações mistas, devido ao efeito de sombra e à baixa condutibilidade térmica, contribuiu para um melhor desempenho na ligação.

Armer et al. (1994) referiram que a análise isolada dos vários componentes de uma ligação não refletia com precisão o seu comportamento real quer à temperatura ambiente quer em situação de incêndio, devido à existência de vários aspetos que só ocorriam quando os elementos interagiam entre eles. Fenómenos como a rotura global ou local e a redistribuição de esforços não ocorriam em elementos isolados. Para além dos fenómenos referidos, Bailey et al. (1996), observaram instabilidade na coluna e instabilidade local na viga; estes fenómenos ocorreram devido ao esforço axial provocado pela restrição à expansão térmica imposta pela parte da estrutura não aquecida

Leston-Jones et al.(1997) caracterizaram pela primeira vez o comportamento momento-rotação de ligações mistas de aço e betão sujeitas ao fogo. Neste estudo, realizaram-se onze ensaios em ligações mistas aço-betão de continuidade com chapa de extremidade, dos quais nove foram a altas temperaturas e dois à temperatura ambiente, estes dois ensaios serviram de ensaios de referência. Os ensaios foram realizados com aplicação de carga constante e incrementos de temperatura de 10°C/min. Dos ensaios realizados à temperatura ambiente observaram que a deformação ocorreu na alma da coluna na zona sujeita à compressão e no banzo da coluna na zona de tração. Na viga, placa de extremidade e parafusos também ocorreram deformações embora estas tenham sido pequenas e não condicionantes do desempenho da ligação. Nos ensaios que envolveram ação térmica, observaram modos de rotura semelhantes aos ocorridos à temperatura ambiente, o momento resistente e a rigidez da ligação sofreram degradação com o aumento da temperatura, tendo-se observado uma temperatura crítica entre os 500°C e 600°C.

Al-Jabriet al.(1998) avaliaram a influência do aumento da temperatura em diferentes ligações sujeitas ao fogo, de diferentes parâmetros: dimensão dos elementos, tipo de ligação e diferentes modos de rotura de uma ligação, através dos resultados de cinco grupos de ensaios em ligações viga-coluna. No primeiro grupo foram analisadas quatro ligações de aço com placa de

extremidade de espessura de 8mm, no segundo grupo de ensaios foram analisadas também quatro ligações de aço com chapa de extremidade ($t_p=10\text{mm}$), no terceiro grupo foram estudadas três ligações com placa de extremidade flexível ($t_p=8\text{mm}$), no quarto grupo foram realizados cinco testes em ligações com placa de extremidade flexível ($t_p=8\text{mm}$) e com laje de betão e no quinto grupo foram estudadas ligações de placa de extremidade flexível ($t_p=10\text{mm}$) de dez milímetros de espessura e laje de betão. Dos ensaios realizados concluíram que a variação da temperatura entre as várias partes da ligação foi pequena. Nas ligações mistas a laje de betão criou um efeito de sombra na viga e permitiu uma dissipação do calor mantendo assim o banzo superior da viga com temperaturas mais baixas, permitindo que a ligação suportasse estar exposta a temperaturas mais elevadas. O modo de rotura observado no primeiro grupo de ensaios foi a deformação no topo da placa de extremidade na primeira fiada de parafusos, do banzo da coluna e encurvadura da alma desta. No segundo grupo de ensaios observaram uma deformação na região superior da placa de extremidade, o escorregamento dos parafusos na zona tracionada, e para carregamentos elevados observaram fendilhação na soldadura da chapa de topo. No terceiro grupo observou-se que o modo de rotura ocorreu por deformação significativa da placa de extremidade. No quarto e no quinto grupo de ensaio os modos de rotura foram semelhantes, tendo sido ainda observada rotura da laje de betão devido ao destacamento dos conectores, de seguida o carregamento foi transferido para a ligação e verificou-se a rotura da placa de extremidade.

Liu et al.(2002) estudaram também a influência da restrição à expansão térmica das vigas por parte da estrutura adjacente não aquecida no comportamento da ligação. Nesta investigação foram realizados um total de vinte e cinco ensaios de resistência ao fogo, tendo sido analisadas dois tipos de ligação, uma com placa de extremidade completa e outra com cantoneiras ao nível da alma. As ligações foram sujeitas a três níveis de carregamento, 20%, 50% e 70% do momento resistente da ligação e três níveis de restrição à dilatação térmica da viga, 8kN/m, 35kN/m e 62kN/m. As vigas adjacentes às ligações ao dilatarem e encontrando restrição à sua dilatação térmica tendiam a rodar nos seus extremos. Assim nas ligações com cantoneiras de alma em que existe uma separação entre o extremo da viga e a coluna, a ligação só começava a ser solicitada pelo efeito de rotação da viga quando esta encostava na coluna por efeito de rotação da mesma. As ligações com placas de extremidade transmitiram o momento fletor com muito mais eficácia do que as ligações com cantoneiras

Spyroue et al.(2004^a, 2004^b), com o objetivo de determinar o comportamento individual de cada componente da ligação aparafusada com chapa de topo a temperaturas elevadas, realizaram um programa experimental com ensaios de resistência ao fogo em ligações T-Stub. No total foram realizados vinte e cinco ensaios para analisar os modos de rotura da ligação e vinte e nove ensaios com a finalidade de ensaiar a alma da viga à compressão. Nos ensaios a temperaturas elevadas destacou-se a rigidez do parafuso como parâmetro chave no comportamento deste tipo de ligações. Nos ensaios onde era testada a resistência da alma da coluna à compressão, verificaram-se que existia algumas discrepâncias entre os valores de cálculo obtidos através das normas e os obtidos experimentalmente nos ensaios à temperatura ambiente.

Yu et al (2008) realizaram um conjunto de ensaios experimentais em ligações com chapa de topo aparafusadas, submetidas à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas. Estudaram o comportamento de vigas sem qualquer tipo de proteção em situação de incêndio, incidindo o estudo na rotação, força de corte e de membrana que a viga poderia estar sujeita devido ao deslocamento da mesma. Os provetes consistiam na ligação de uma coluna com secção UC254×89 com uma viga UB305×165×40, através de uma chapa de topo aparafusada. As variáveis testadas foram a influência das diferentes espessuras da chapa de topo, tendo sido analisadas três espessuras diferentes (8mm, 10mm, 15mm), o número de parafusos na ligação (2 ou 3parafusos) e o ângulo inicial de aplicação da força na ligação (35°, 45° ou 55°).

Concluíram que o ângulo de aplicação da carga tem algum efeito sobre a resistência da ligação, mas não tem influência no modo de rotura. Com o aumento da temperatura deixou de ser relevante o ângulo de aplicação da carga (Figura 2.1). Observaram que o modo de rotura é influenciado pela temperatura a que a ligação está sujeita, enquanto à temperatura ambiente a rotura ocorreu na placa de topo, com o aumento da temperatura a rotura passou a ocorrer nos parafusos, devido á ductilidade destes a temperaturas elevadas, diminuindo a capacidade de rotação da ligação.

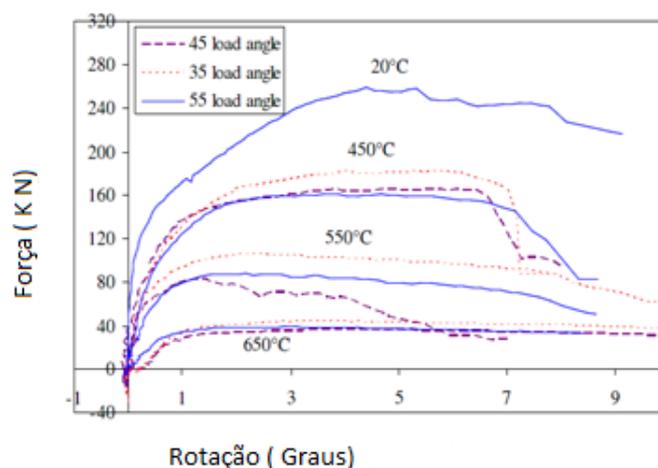


Figura 2.1 - Relação força rotação (Yu et al.2008)

Verificaram que ao retirar a fila de parafusos intermédia, reduzem a resistência da ligação e de acordo com os resultados, para uma temperatura de aproximadamente 550°C reduzem também a ductilidade da ligação (Figura 2.1 (a)). As ligações atingiram o seu máximo de resistência aos dois graus de rotação, mantendo um nível de resistência aceitável até aos sete graus de rotação, momento em que ocorria a rotura. Concluíram também que podiam aumentar a espessura da chapa de topo para aumentar a resistência da ligação, contudo esta solução conduzia a uma diminuição da rotação da ligação (Figura 2.2) (b)).

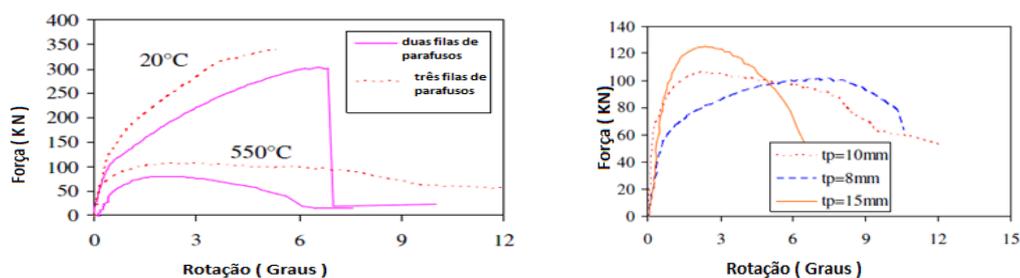


Figura 2.2 - (a) Efeito do número de linhas dos parafusos; (b) Efeito da espessura da chapa de topo (Yu et. Al 2008).

Dai et al. (2009), realizaram um total de dez ensaios ao fogo para estudar cinco tipos de ligações diferentes ("fin-plate", chapa de topo, chapa de topo estendida, chapa de topo flexível, "web cleat"), estas ligações eram estabelecidas entre uma viga e duas colunas, sendo utilizado o mesmo tipo de ligação por sub-estrutura. Por cada tipo de ligação, eram realizados dois ensaios nos quais variavam a secção da coluna; esta alteração permitia simular níveis diferentes de restrição axial. A estrutura foi ensaiada no interior de um forno elétrico, onde era aplicada a carga térmica que seguiu a curva de incêndio ISO 834, para além deste tipo de carregamento, foi aplicado um carregamento mecânico em dois pontos da viga de 40 kN. Para validar este estudo realizaram também modelos numéricos das ligações em estudo, os resultados obtidos são apresentados no sub-capítulo seguinte.

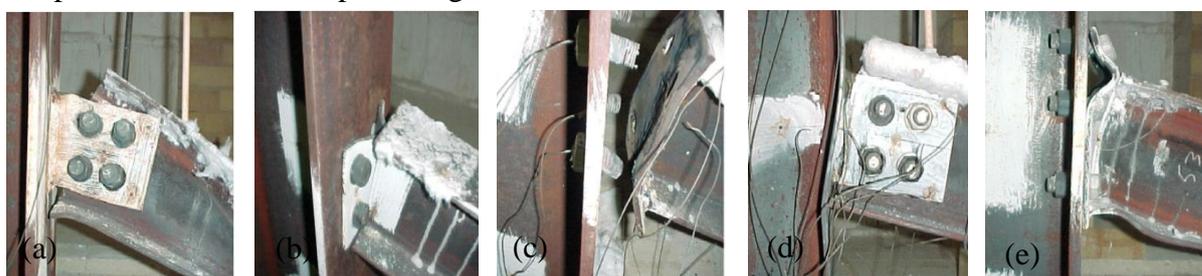


Figura 2.3 - Deformação das ligações: (a) "Fin-plate"; (b) Chapa de topo flexível; (c) Chapa de topo; (d) Web cleat e (e) Chapa de topo estendida (Dai et al. 2009).

Estes ensaios experimentais permitiram observar o modo de rotura das ligações, levando a concluir que nas ligações do tipo "fin-plate" a rotura ocorria a nível da soldadura, já nas ligações com chapa de topo flexível, para além deste tipo de rotura, ocorria rotura na alma da viga. Os parafusos da primeira fila também sofreram rotura, mas esta situação só ocorreu nas ligações com chapa de topo e "web cleat". Contudo não ocorreu rotura na viga, embora esta tenha sofrido grandes deslocamentos a meio vão, nem colapso estrutural. Analisando o esforço axial nas ligações, puderam-se observar que este não era influenciado pelo tipo de ligação, mas comparando o esforço axial em colunas de secção diferente foi possível constatar que estas últimas têm grande influência no esforço axial da viga. O tipo de ligação teve influência na capacidade de rotação, na ligação "web cleat" foram observadas grandes deformações no banzo inferior da viga, tendo sido registadas grandes rotações. A ligação com chapa de topo estendida revelou ser uma ligação extremamente dúctil.

Santiago et al. (2008) realizaram um programa experimental de seis ensaios de ligações metálicas viga-pilar inseridas numa subestrutura sujeitas a um incêndio natural. Tinham como objetivo caracterizar o comportamento da estrutura metálica durante a fase de aquecimento e arrefecimento e estudar o desempenho e influência dos componentes da ligação na estrutura. Os parâmetros estudados foram o tipo de ligação, soldada ou aparafusada, com placa de extremidade, total ou rasa e ainda a espessura da placa de extremidade. Estes concluíram que as ligações de altura parcial, tinham pouca resistência à flexão e rompiam na fase de aquecimento. No que concerne às ligações aparafusadas com placa de topo estas rompiam durante a fase de arrefecimento na fila de parafusos inferiores. A espessura da placa de topo teve influência na ductilidade da ligação, quanto menor era a espessura maior era a ductilidade, permitindo assim resistir a todo o ensaio, contudo o momento resistente da ligação diminuía com a diminuição da espessura da placa de topo. Independentemente do tipo de ligação, foi conclusivo que os esforços axiais elevados e a inversão do momento fletor durante a fase de arrefecimento, levava à rotura dos componentes menos resistentes.

Barata (2010) estudou o comportamento e a resistência de ligações mistas viga-pilar à temperatura ambiente e a altas temperaturas. Ensaiou 6 modelos iguais e com as mesmas características de nó de extremidade à escala real, sujeito a carregamento monotónico, cíclico e posteriormente a ação térmica. As ligações do modelo foram dimensionadas de acordo com a EN 1992-1-2, EN 1993-1-2 e 1-8 e EN 1994-1-2. Estes modelos eram compostos por uma coluna mista HEA240 (aço e betão entre os banzos) e por uma viga de aço IPE 270. A viga encontrava-se ligada a uma laje com chapa colaborante através de conectores. A ligação metálica foi efetuada através de uma chapa de topo com 12mm de espessura, soldada à viga e aparafusada ao banzo através de 6 parafusos M20.

Os ensaios à temperatura ambiente permitiram concluir que este tipo de ligação exhibe grandes deformações antes da rotura demonstrando que tem um comportamento dúctil. Um aspeto importante verificado foi a contribuição do betão no pilar para a resistência da ligação, aumentando a resistência ao corte e a resistência à compressão da alma do pilar. O momento resistente da ligação sofreu degradação quando a ligação foi sujeita a cargas cíclicas. Verificou-se que o modo de rotura da ligação se alterava para temperaturas elevadas, devido à rapidez da degradação de resistência ser superior nos parafusos do que do aço estrutural dos restantes elementos do modelo. À temperatura ambiente a rotura ocorre pela chapa de topo, a temperaturas elevadas a rotura ocorre pelos parafusos, apresentando também uma grande deformação da chapa de topo. A resistência da ligação reduziu-se para metade do valor do momento resistente previsto pela EN1994 parte 1-2.

Li et al. (2012), mais recentemente, avaliaram a influência da restrição axial em ligações mistas viga-pilar semi-rígidas sujeitas ao fogo e a interação entre as partes da estrutura. Estes autores realizaram três ensaios em ligações cruciformes simétricas entre duas vigas e um pilar de aço, por meio de uma chapa de topo, à viga de aço eram soldados conectores que permitiam a ligação da viga com uma laje de betão. Os provetes analisados eram diferentes, na primeira ligação não foi considerado o efeito do esforço axial, já na segunda e terceira ligação, as vigas eram

restringidas axialmente. No segundo ensaio foi adicionada proteção contra incêndio do tipo vermiculite projetada, tanto à ligação como à viga de aço. Os principais fatores avaliados foram o modo de rotura, a distribuição da temperatura na ligação, a capacidade de carga e a influência da existência de interação entre a viga e coluna. Estes ensaios permitiram constatar que no primeiro ensaio sem restrição axial, a carga suportada pela ligação é inferior quando comparada com os outros dois ensaios, assim a restrição axial tem influência no momento resistente da ligação bem como na rigidez rotacional da mesma. Nos dois últimos observaram-se grandes deformações na região de meio vão comparadas com as deformações na zona da ligação. Independentemente do facto de a viga estar ou não restringida, o primeiro modo de rotura da ligação foi a encurvadura do banzo inferior da viga. Relativamente à distribuição da temperatura concluíram que esta é superior no banzo inferior da viga, decrescendo à medida que se aproxima da laje de betão; já na ligação protegida verificaram que a discrepância das temperaturas entre a viga e a laje era menor do que nos casos sem proteção. Por fim, concluíram que a degradação das propriedades mecânicas com a temperatura, dos materiais que constituem a ligação, tem bastante importância no comportamento da ligação e que no caso de vigas sem proteção ao fogo, o efeito de catenária verifica-se mais cedo.

As últimas investigações realizados sobre esta temática em ligações semelhantes foram conduzidos por Haremza et al. (2013). O estudo desenvolvido, pretendia simular um incêndio localizado junto de uma coluna num parque de estacionamento aberto, que tinha como consequência a perda desta. Esta investigação contemplou um total de sete ensaios em sub-estruturas viga-coluna mistas de aço-betão e teve como objetivo o estudo da interação momento fletor (M) e esforço axial (N). A ligação em estudo era formada por uma coluna HEB 300 ligada a duas vigas IPE 550 através de chapas de topo aparafusadas com parafusos M30. O procedimento de ensaio encontrava-se dividido em três fases: na primeira fase foi aplicado um momento fletor negativo, na segunda fase a ligação foi aquecida e por fim, na terceira fase foi simulado a perda da coluna através da aplicação de um momento positivo. O modelo teve sujeito às seguintes ações térmicas: 20⁰C, 500⁰C e 700⁰C ou aumento linear da temperatura até aos 800⁰C. O principal objetivo deste estudo era determinar a influência da ação conjunta do esforço axial e do momento fletor quando ocorria a cedência da coluna (devido ao incêndio localizado), foram ainda estudados vários níveis de restrição: sem restrição axial, restrição axial total e restrição parcial de forma a representar uma situação real. Dos ensaios realizados sem restrição axial da viga, concluíram que a capacidade de rotação, a ductilidade e o momento fletor máximo da ligação diminuem com o aumento da temperatura. Contudo, nos ensaios realizados em que a viga possuía restrição axial total, verificaram que o momento fletor resistente era superior ao observado na situação anterior e que não ocorria rotura nos parafusos, permitindo assim concluir que o efeito do esforço axial era benéfico para o comportamento da ligação. No aquecimento da coluna, foi possível observar que esta só entrou em cedência aos 658⁰C, tendo o seu deslocamento vertical provocado a fendilhação na laje de betão até ao colapso da estrutura.

2.2 Estudos numéricos

Avanços nos métodos computacionais permitiram simular casos complexos de partes estruturais sujeitas a incêndio. Foi possível estudar os parâmetros geométricos e mecânicos das ligações através da análise de elementos finitos, o que até aí não se podia realizar nos ensaios experimentais

Liu (1996) concretizou a primeira modelação numérica de uma ligação em 3D, utilizando o programa de elementos finitos FEAST simulou a resposta de vários tipos de ligações à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas. As partes de aço e a laje de betão foram modeladas com elementos isoparamétricos do tipo Shell, os parafusos foram modelados com elementos mola-viga. Definiu também a superfícies de contacto entre os elementos. Na definição das propriedades dos materiais a temperaturas elevadas teve em conta a expansão térmica não linear dos materiais assim como as grandes deformações a temperaturas elevadas. Estudou a influência das chapas de topo aparafusadas e da restrição axial nas vigas de aço. Concluiu que os pormenores da ligação não influenciam o comportamento da viga quando sujeita ao fogo. Os resultados foram comparados com ensaios experimentais, tendo-se obtido uma boa correlação.

Bolcket al (2004) tendo como base o método das componentes, estudaram o comportamento da alma do pilar à compressão numa ligação mista em situação de incêndio, incluindo o efeito de carga global da estrutura. Foram analisadas uma série de seções de pilares sujeitos a diferentes temperaturas e diferentes valores de carga axial, com a ação de esforço transversal, recorrendo ao programa de análise de comportamento térmico e mecânico de estruturas em situação de incêndio ANSYS. Observaram uma diminuição da ductilidade e da capacidade da zona de compressão com o aumento do esforço axial. Neste estudo foi desenvolvido um fator de redução da resistência ao esforço transversal dependente da temperatura da alma da coluna e foi desenvolvida uma análise simplificada para prever a relação força deslocamento na zona comprimida da alma da coluna (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**).

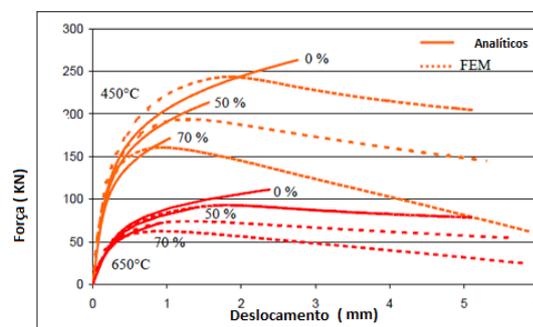


Figura 2.4 - Comparação entre os métodos simplificados com os resultados obtidos com FEM para UC203×203×46 (Block et al. 2004)

Al-Jabri et al. (2006) no seu estudo realizaram uma modelação numérica com o programa de elementos finitos ABAQUS, para simular o comportamento ao fogo de ligações de continuidade com chapa de topo aparafusadas. Para calibrar o modelo recorreram a ensaios experimentais realizados anteriormente pelos mesmos autores, onde compararam as características temperatura-rotação, momento-rotação-temperatura e os diferentes modos de rotura previstos e obtidos (Figura 2.5). Os ensaios eram feitos em condições anisotérmicas, ou seja primeiro a era aplicado o carregamento e só depois foram aplicados incrementos de temperatura. Os valores de carregamento aplicados correspondiam a percentagens do momento último resistente da ligação à temperatura ambiente (20%, 40%, 65% e 85%), eram aplicados a uma distância de 1,423m do banzo da coluna. Uma vez que a ligação era duplamente simétrica, apenas modelaram um quarto desta, permitindo assim uma análise mais rápida do modelo.

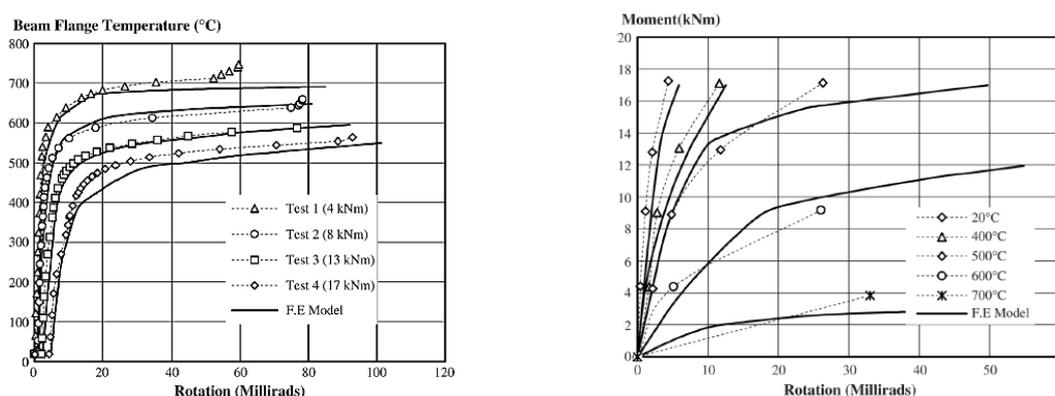


Figura 2.5 - (a) Curva momento-rotação-temperatura (b) relação rotação-temperatura para os diferentes níveis de carregamento (Al-Jabri et al. 2006)

Os deslocamentos foram restringidos nos dois planos de simetria do modelo, na base da coluna existia restrição ao deslocamento, no topo foi impedido apenas o deslocamento horizontal. Os elementos foram definidos como sendo do tipo 3D, o material que lhes foi atribuído tinha comportamento não-linear para temperaturas elevadas e degradação das suas características elásticas e plásticas foi estabelecida de acordo com a EN1993-1.2:2010. Ao definir as interações entre os elementos consideraram que o contacto entre os parafusos e a coluna eram definidos como sendo do tipo “tie” e as restantes superfícies com interações do tipo “surface-to-surface”, com um coeficiente de fricção de 0,1.

A maior deformação observada ocorreu na zona superior da chapa de topo ao nível da primeira fila de parafusos. Esta zona estava sujeita a grandes tensões de cedência, contudo nos parafusos não ocorreram distorções Na zona em que o banzo da coluna se encontrava em tensão e em compressão foram registadas grandes deformações e na zona de compressão foi observada ainda encurvadura da alma da coluna Figura 2.6.

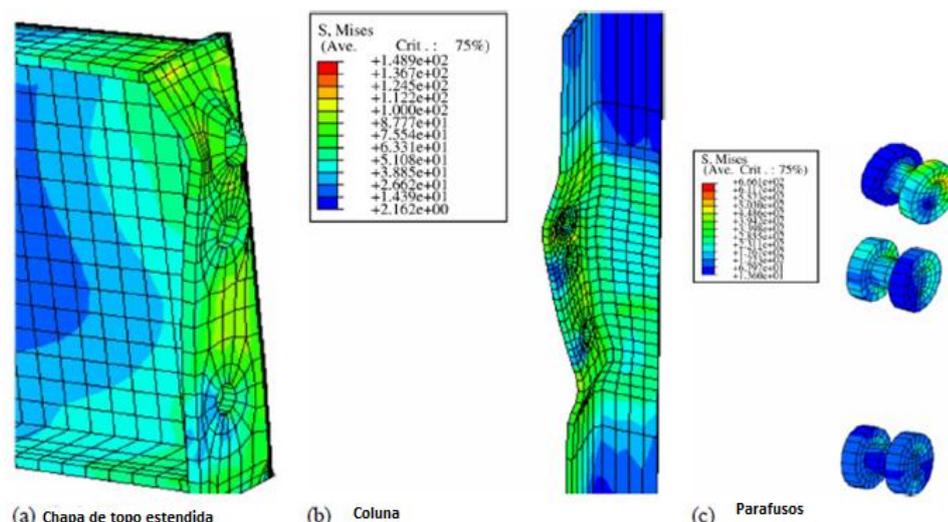


Figura 2.6 - Deformações nas componentes da ligação (Al-Jabri et al. 2006)

Sarraj et al (2007) modelaram uma ligação tridimensional viga-coluna fin-plate sob ação do catenária com recurso ao programa de elementos finitos ABAQUS, tendo como principal objetivo investigar o comportamento da ligação ao corte à temperatura ambiente e sujeita ao fogo. Começaram por modelar uma ligação simples entre duas chapas à tração com um parafuso apenas, modelaram uma viga simples e finalmente o conjunto viga e fin-plate à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas. Os modelos foram calibrados e validados com resultados experimentais existentes na bibliografia, tendo sido obtidas as curvas momentos-rotação, força-deslocamento e tempo-deformação.

Na modelação tiveram em conta a não linearidade geométrica dos materiais, sendo as suas propriedades definidas através da relação constitutiva tensão-extensão. As partes que constituíam o modelo (fin-plate, parafuso, viga) eram formadas por elementos hexaédricos com oito nós, possuindo cada elemento uma dimensão de malha adequada para a obtenção dos valores de deformação. Definiram superfícies de contacto para a transmissão de forças (cabeça do parafuso/fin-plate, rosca/fin-plate, corpo do parafuso/zona interior do furo), os contactos definidos foram do tipo "surfasse-to-surface", onde as partes mais discretizadas, parafuso e porca, eram as superfícies "master" e as menos slave, utilizaram um coeficiente de fricção 0.25. À temperatura ambiente, recorrendo a ensaios experimentais existentes, começaram por modelar uma ligação simples com um parafuso apenas, formada por duas chapas de espessura diferente, 9,525mm e 12,7mm, com uma tensão de cedência de 250N/mm² e parafusos ASTM A325 com diâmetro de 19mm e furos de 20,6mm. Observaram que a deformação da ligação e o modo de rotura eram semelhantes. Ainda à temperatura ambiente, compararam resultados experimentais e numéricos de uma ligação fin-plate de 9,5mm de espessura, aparafusada a uma viga W18×35 com três parafusos do mesmo diâmetro e resistência dos anteriores. Nesta análise observaram a deformação final e a tensão de von Mises, constataram que o parafuso central funciona como centro de rotação, tanto o parafuso superior como o inferior têm tendência a deslocar-se em direção ao centro, concentrando as maiores tensões do lado oposto

À temperatura ambiente, recorrendo a ensaios experimentais existentes, começaram por modelar uma ligação simples com um parafuso apenas, formada por duas chapas de espessura diferente, 9,525mm e 12,7mm, com uma tensão de cedência de 250N/mm² e parafusos ASTM A325 com diâmetro de 19mm e furos de 20,6mm. Observaram que a deformada da ligação e modo de rotura era semelhante. Ainda à temperatura ambiente, compararam resultados experimentais e numéricos de uma ligação fin-plate de 9,5mm de espessura, aparafusada a uma viga W18×35 com três parafusos do mesmo diâmetro e resistência dos anteriores. Nesta análise observaram a deformação final e a tensão de von Mises, constataram que o parafuso central funciona como centro de rotação, tanto o parafuso superior como o inferior têm tendência a deslocar-se em direção ao centro, concentrando as maiores tensões do lado oposto ao da rotação (Figura 2.7). Obtiveram uma boa correlação na curva momento-rotação.

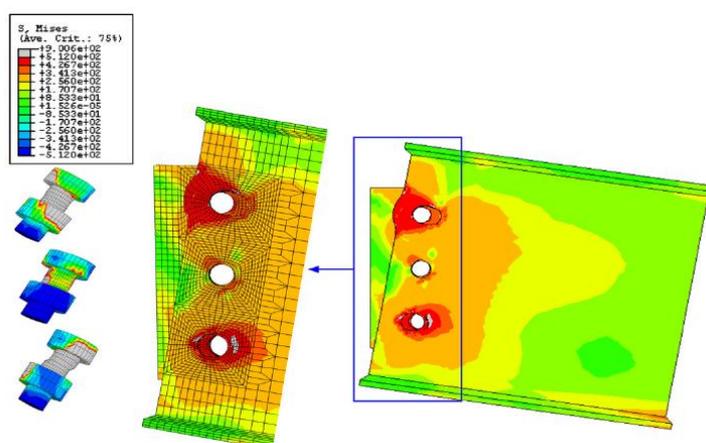


Figura 2.7 – Deformação e tensão de von Mises do modelo de Elementos Finitos da ligação de fin-plate (Sarraj et al. 2007).

Estes autores tinham como objetivo estudar o comportamento de ligações fin-plate sob a ação de cantenária, sujeitas a temperaturas elevadas. Devido à inexistência de ensaios experimentais em ligações deste tipo que permitissem validar os resultados obtidos, estudaram isoladamente o comportamento ao fogo de uma viga simplesmente apoiada com uma carga distribuída e de uma ligação fin-plate, em relação às quais já existiam resultados experimentais. Atendendo a que obtiveram uma boa correlação entre os resultados experimentais e os numéricos construíram o modelo final no ABAQUS. Este modelo consistiu numa ligação fin-plate aparafusada a uma viga IPE 160 com 3m de comprimento, carregada a 250mm de cada extremidade. As dimensões das chapas eram 6×60×125mm aparafusadas com 3 parafusos iguais aos anteriormente testados. Como a viga era simétrica apenas metade da viga foi modelada. O modo de rotura e a deformada determinada pelo modelo numérico consistiu com o observado nos estudos anteriores (Figura 2.8).

Concluíram que o modelo 3D desenvolvido pode ser utilizado para prever o comportamento deste tipo de ligação, tendo sido devidamente validado e calibrado. Pode ser aplicado em estudos paramétricos usando diferentes curvas tempo-temperatura.

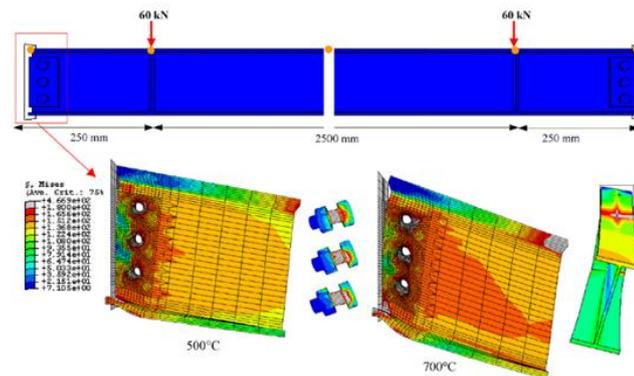


Figura 2.8 – Modelo de Elementos Finitos da ligação de Fin-Plate e a ligação da viga (Sarraj et al. 2007).

Ramli-Sulonget al. (2007) estudaram através do ADAPTIC, um programa de análise de comportamento térmico e mecânico em situação de incêndio, a aplicabilidade do método das componentes em ligações mistas aço-betão à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas, para qualquer tipo de carga. Para a validação do modelo foram feitas comparações com resultados experimentais existentes. O modelo mecânico criado correspondia a três tipos de ligações diferentes, ligação com chapa de topo aparafusada ao banzo da coluna, ligação com chapa de topo estendida e aparafusada ao banzo da coluna e ligação com chapas duplas aparafusadas à alma da viga. Estudaram a influência da condição de apoio da viga na coluna (rígida, semi-rígida ou rotulada) na redistribuição de esforços, esforço axial e rotação da ligação. Os parâmetros testados nesta simulação permitiram identificar as componentes ativas, a evolução da relação força-deformação e o comportamento global da ligação.

Dos testes realizados à temperatura ambiente para carregamentos monotónicos, observaram que na ligação com chapas na alma da viga a primeira parte a entrar em cedência foram as próprias chapas, seguidas pelo banzo do pilar em flexão. Na ligação tipo placa de topo a ligação começou por plastificar na placa em flexão, seguida pelo banzo do pilar em flexão, o mesmo aconteceu para a placa de topo estendida. A influência da ligação na relação entre carga e deslocamento com o aumento gradual da temperatura foi avaliada, verificando que as três ligações tinham comportamentos diferentes. Através desta análise observaram que a perda de resistência da viga era superior para casos em que a viga era contraventada, pois com o aumento da temperatura verificava-se uma maior concentração de tensões de compressão, o que provocava um deslocamento, tal diferença deixava de ser relevante para temperaturas elevadas.

Com este estudo concluíram que o método das componentes pode ser utilizado para ligações mistas de aço-betão, à temperatura ambiente, tanto na situação em que atuam cargas monotónicas como cíclicas. Os resultados obtidos através do modelo numérico foram semelhantes aos obtidos em resultados experimentais.

Qian et al. (2009) avaliaram o comportamento de ligações de aço viga-coluna com chapa de topo sujeitas a temperaturas elevadas, quando estas estavam sujeitas a esforços axiais. Este estudo consistiu na modelação de seis ligações cruciformes com chapa de topo, tendo sido

criados dois grupos de análise. No primeiro grupo foram estudadas três ligações cruciformes (CR1, CR2, CR3) até aos 700°C, as vigas do modelo foram sujeitas a diferentes valores de esforço axial de compressão, correspondendo estes valores a percentagens (0%, 2.5% e 4%) da capacidade de esmagamento plástico da secção da viga à temperatura ambiente. No segundo grupo, três ligações cruciformes (CR4, CR5, CR6), submetidas a temperaturas constantes (400°C, 550°C e 700°C), foram levadas à rotura sem estarem sujeitas a restrições axiais (Figura 2.9).

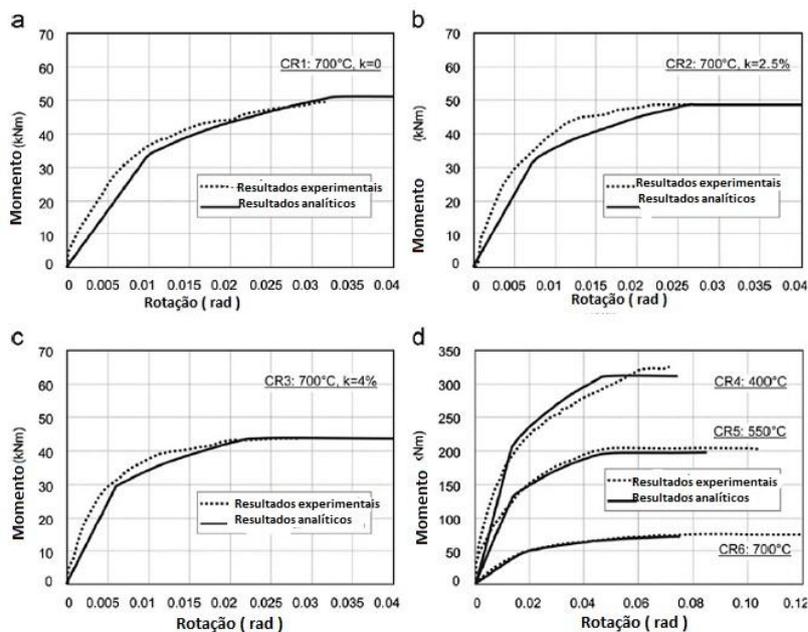


Figura 2.9 - Comparação entre o método de elementos finitos e os resultados experimentais de CR2 (Qian et al. (2009)).

Santiago et al.(2010) desenvolveram modelos numéricos tridimensionais de ligações viga-coluna em aço soldadas ou aparafusadas com chapa de topo, no programa de elementos finitos LUSAS, quando sujeitas a um incêndio natural. As principais variáveis testadas foram a influência da chapa de topo estendida, a classe de resistência dos parafusos, a espessura da chapa de topo e a ligação soldada (Na ligação soldada, compararam o deslocamento a meio vão da viga, deslocamento axial, força axial, momento rotação e modo de rotura da ligação com os resultados experimentais existentes. Concluíram que os modos de rotura são semelhantes tanto no modelo numérico como no experimental (rotura local do banzo inferior e da alma), a força e o deslocamento axial apresentaram uma boa correlação na fase de aquecimento, na fase de arrefecimento observou-se uma discrepância de 10%. Até o banzo inferior atingir 500°C, observou-se expansão térmica diferencial e diminuição do módulo de elasticidade, após aquele valor a ligação começou a perder a resistência ao momento fletor.

Quadro 2.2). Avaliaram a influência dos parâmetros referidos no comportamento da ligação, em cada componente e no modo de rotura, tanto na fase de aquecimento como de arrefecimento. Estudaram ainda o efeito do esforço axial, a restrição da viga à expansão térmica e as tensões de cantenária que se desenvolvem quando a viga perde a resistência a temperatura elevada; na fase de arrefecimento estudaram a contração da viga e o aumento de resistência e rigidez

Na ligação soldada, compararam o deslocamento a meio vão da viga, deslocamento axial, força axial, momento rotação e modo de rotura da ligação com os resultados experimentais existentes. Concluíram que os modos de rotura são semelhantes tanto no modelo numérico como no experimental (rotura local do banzo inferior e da alma), a força e o deslocamento axial apresentaram uma boa correlação na fase de aquecimento, na fase de arrefecimento observou-se uma discrepância de 10%. Até o banzo inferior atingir 500°C, observou-se expansão térmica diferencial e diminuição do módulo de elasticidade, após aquele valor a ligação começou a perder a resistência ao momento fletor.

Quadro 2.2 - Ligações viga coluna estudadas (Santiago et al.2010)

Teste ID	Tipo de ligação	Dimensões da chapa de topo (mm)	Parafusos / soldadura
FJ01	Chapa de topo	(320×200×10)	2 filas de parafusos M20 8.8
FJ02		(320×200×16)	2 filas de parafusos M20 10.9
FJ03		(320×200×16)	2 filas de parafusos M20 8.8
EJ01	Chapa de topo estendida	(385×200×16)	3 filas de parafusos M20 8.8
WJ01	Ligação soldada	-	af=aw=10mm

Confirmaram que a rotura frágil ocorreu nas ligações aparafusadas durante a fase de arrefecimento. A rotura deu-se em componentes que não foram consideradas no dimensionamento à temperatura ambiente. Observaram deformações na zona inferior da chapa de topo assim como extensões na fila de parafusos inferior, isto deveu-se à inversão do momento fletor devido à relaxação da viga.

Da comparação de ligações idênticas com parafusos de classes diferentes, concluíram que a utilização de parafusos com resistência superior reduz a extensão nos parafusos e revelou ser uma boa solução para o aumento da resistência da ligação. De acordo com os modos de rotura observados a chapa de topo foi considerada a componente crítica. Neste elemento da ligação as deformações são superiores no topo da ligação durante a fase de aquecimento e na zona inferior da chapa de topo na fase de arrefecimento. Concluíram que uma maior espessura contribui para uma maior resistência e menores extensões nos parafusos (Figura 2.10)

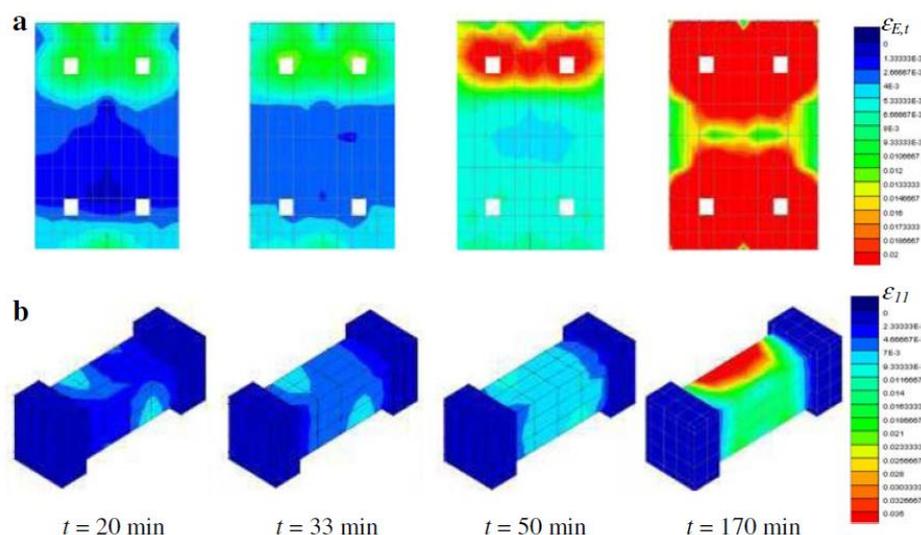


Figura 2.10 – (a) Extensões equivalentes na chapa de topo; (b) Extensões principais nos parafusos (Santiago et al.2010).

Dai et al. (2009), modelaram ligações viga-coluna em aço, com base num estudo experimental realizado pelos mesmos autores, descrito anteriormente, no programa de elementos finitos ABAQUS. O estudo tinha como objetivo estudar a influência do tipo de ligação e o nível de restrição axial. Para satisfazer este propósito construíram dez modelos, estes eram compostos por uma viga ligada a dois pilares de secções idênticas por provete. Nos diferentes ensaios estudaram diferentes tipos de ligação (" web cleat", chapa de topo, chapa de topo estendida, chapa de topo flexível e "fin-plate") e a variação da secção da coluna, de forma a simular diferentes níveis de restrição.

Da análise da ligação "fin-plate", foi observado que o esforço axial atuante na viga sofria uma inversão de sentido, o esforço que inicialmente era de compressão passou a ser de tração, à semelhança do que se passava nos ensaios experimentais. Ao avaliar o modo de rotura da ligação, verificou-se que o comportamento entre os diferentes tipos de ensaios deixava de ser semelhante, na modelação experimental o modo de rotura ocorria na soldadura, já no modelo numérico tal não acontecia uma vez que neste caso não foi modelado este elemento. Pela comparação da influência das diferentes dimensões da coluna, concluíram que os resultados experimentais e numéricos eram concordantes, apresentando a coluna de maior secção, menores deformações no banzo devido à compressão causada pelo banzo inferior da viga. Na ligação com chapa de topo flexível ocorreu por rotura da alma da viga, as forças de catenária observadas eram inferiores no modelo em que a secção da coluna era inferior. Uma vez que os parafusos foram modelados de forma simplificada, na ligação com chapa de topo a rotura não ocorreu nos parafusos como seria de esperar, mas sim na chapa de topo, neste tipo de ligação a secção da coluna não mostrou ter interferência nos esforços. A ligação do tipo "web cleat" mostrou ter grande ductilidade devido à sua capacidade de sofrer deformação. Ao observar o comportamento da ligação com chapa de topo estendida, observou-se que nesta se formou uma

rótula plástica, para além desta situação observaram que o banzo inferior da viga se encontrava comprimido (Figura 2.11).

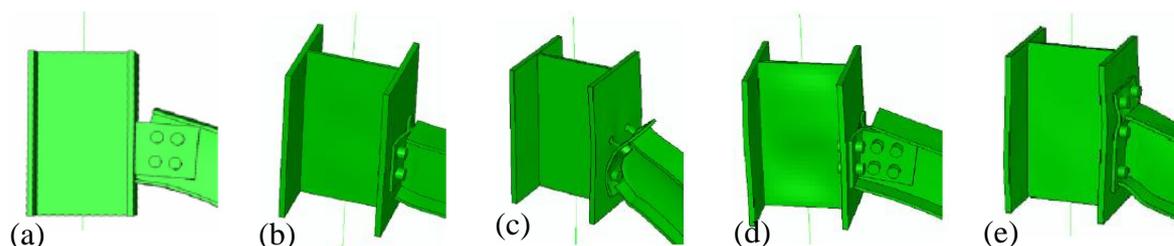


Figura 2.11 - Deformação das ligações através da análise de elementos finitos: (a) "Fin-plate"; (b) Chapa de topo flexível; (c) Chapa de topo; (d) Web cleat e (e) Chapa de topo estendida Dai et al. (2009).

Li et al (2012) desenvolveram um modelo simplificado baseado no método das componentes, com o objetivo de determinar a rigidez inicial e o momento último de ligações mistas, com placa de topo estendida, sujeitas a temperatura elevada. Primeiro começaram por estudar a forma como a ligação se deformava quando sujeita a temperaturas elevadas. Considerando o efeito do esforço axial na viga foi desenvolvido o modelo das componentes elásticas, para calcular o momento último resistente e a rigidez inicial. Foi desenvolvido também um modelo numérico de uma ligação, com o objetivo de validar o método das componentes, no programa de elementos finitos não linear ANSYS. Os resultados obtidos nos dois modelos foram comparados e foi estudada a relação momento-rotação temperatura da ligação, considerando a influência do esforço axial (Figura 2.12).

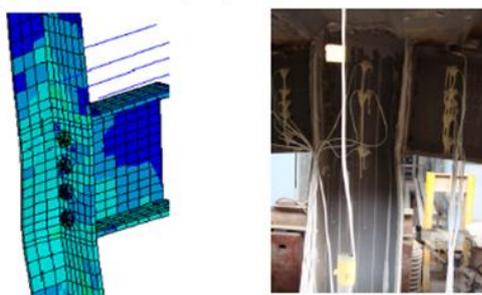


Figura 2.12 - Comparação entre a deformação prevista e a deformação medida: (a) - deformação obtida pelo FE e (b) deformação obtida pelos resultados experimentais (Li et al.2012).

Na análise numérica tiraram partido dos dois eixos ortogonais de simetria, tendo sido analisada apenas um quarto da ligação, tiveram em conta a distribuição não uniforme da temperatura na ligação, a não-linearidade geométrica e o facto de a temperatura depender do comportamento não-linear do material. Simularam interações do tipo convecção, com coeficiente de $25W/m^2\ ^0C$ e radiação com um fator de 0,66. Admitiram que os materiais aço e betão tinham propriedades do tipo condutibilidade térmica, calor específico e a densidade a temperatura elevada. A curva de incêndio seguida foi a ISO 834, que foi aplicada diretamente nos nós externos.

Ao comparar a rigidez rotacional da ligação obtida pelo método das componentes com a simulação numérica (Figura 2.13), concluíram que na primeira análise os resultados foram constantes, enquanto que na segunda análise reduziram rapidamente com o aumento do esforço axial. Para grandes valores de esforço axial, observaram uma grande diferença entre o previsto e o simulado, esta discrepância deveu-se ao facto de a influência do esforço axial na rigidez de rotação da ligação não ter sido considerado no modelo teórico, ignorando o efeito da encurvadura da alma e do banzo quando a ligação foi sujeita a esforços de compressão, este efeito foi considerado no método de elementos finitos.

Os resultados deste estudo permitiram verificar que o método das componentes proposto e o método dos elementos finitos podem prever a resposta de uma ligação mista a elevadas temperaturas com grande precisão. A rigidez rotacional e o momento último da ligação a uma dada temperatura decrescem com o aumento da razão do esforço axial, ou seja, para a mesma temperatura, quanto maior for a razão de esforço axial, pior será a ductilidade da ligação. A relação momento-rotação proposta pode ser usada para calcular as características do momento rotação para ligações mistas a elevadas temperaturas.

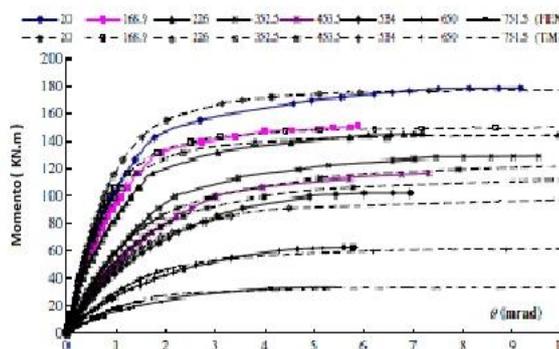


Figura 2.13 - Comparação entre a relação momento-rotação-temperatura prevista pelo modelo FE(FEM) e o modelo teórico (TM) (Li et al. 2012)

Haremza et al. (2013), simularam numericamente com recurso à ferramenta de modelação de elementos finitos ABAQUS, a influência na ligação do colapso de uma coluna devido a um incêndio localizado, a que esta mesma estava ligada, esta sub-estrutura encontrava-se inserida num parque de estacionamento. Este modelo numérico pretendeu reproduzir os ensaios experimentais que tinham sido realizados anteriormente no LEME da UC pelos mesmos autores. À semelhança da modelação experimental, estudaram uma ligação mista de continuidade duplamente simétrica com as seguintes características: viga IPE 550, coluna HEB 300 e quatro filas de parafusos M30. O facto de a ligação ser duplamente simétrica permitiu a redução do volume de cálculo computacional do modelo, tendo sido modelada unicamente um quarto da ligação. A modelação numérica realizada tinha o mesmo propósito que da modelação experimental, avaliar o comportamento da ligação quando sujeita à interação do momento fletor (M) e do esforço axial (N).

O modelo numérico elaborado era constituído maioritariamente por elementos de aço (parafusos, conectores, placa de topo, viga e coluna) sólidos tridimensionais de oito nós com integração reduzida (C3D8R), para reduzir tempo de cálculo os autores recorreram a elementos tipo "wire" (B31) estes encontravam-se na parte superior da coluna, para simular a malha de aço da laje mista usaram elementos do tipo "truss" (T3D2), já o betão pertencente à laje era modelado com elementos que evitassem modos de incompatibilidade (C3D8R). Entre as partes constituintes do modelo eram definidas interações de contacto como sendo do tipo surface-to-surface. A malha utilizada foi refinada tendo em vista a obtenção um maior número de resultados na zona de maior interesse, ou seja os elementos mais discretizados eram os parafusos e a chapa de topo. As propriedades dos materiais utilizados foram definidos de acordo com curvas tensão-extensão obtidas em ensaios experimentais à temperatura ambiente para os diferentes tipos de materiais utilizados no modelo experimental, pretendendo com este procedimento obter uma melhor correlação entre os dois modelos. Estas curvas foram obtidas para 700°C e para 500°C a partir do EN 1993-1-2. As diferentes sequências de análise adotadas tinham em vista a representação precisa da sequência de acontecimentos desenrolados no ensaio experimental: step1 - pré esforço nos parafusos; step2 - momento fletor negativo; step3 - aquecimento; step4 - perda de coluna; step5 - momento fletor positivo.

Ao cruzar os resultados dos modelos numérico e experimental, à temperatura ambiente, foi possível observar uma boa correlação entre ambos quando o parâmetro comparado era a rigidez inicial. Esta correlação era observada quando a ligação era sujeita a momento fletor positivo como negativo. Através do modelo numérico foi possível prever igualmente a carga máxima resistente da ligação (500kN). No ensaio experimental a rotura da ligação ocorreu na fase em que esta era sujeita a momento fletor positivo, tendo sido observada na fila inferior de parafusos bem como na chapa de topo, esta rotura era originada por grandes tensões de tração. Uma vez que no modelo numérico não era possível observar a rotura, os autores assumiram que esta ocorria quando a tensão média atingia a tensão de rotura dos parafusos medida durante o ensaio experimental. A par dos ensaios experimentais, era ainda observado no modelo de elementos finitos a deformação no centro da chapa de topo.

No modelo numérico apenas foi considerada a ação da temperatura a 700°C. Neste estudo eram confrontadas as seguintes relações: carga vertical na coluna vs. deslocamento vertical da ligação e o momento fletor versus rotação da ligação. Concluíram que de uma forma geral os resultados obtidos pelo método de elementos finitos apresentava eram congruentes com os obtidos por via experimental, apresentando apenas maiores discrepâncias quando a ligação era sujeita a momento fletor negativo. Estas discrepâncias revelaram ser mais evidentes na rotação da ligação, tendo sido observada no MEF uma rotação inferior à dos ensaios experimentais, e no deslocamento vertical da coluna. Apesar das discrepâncias serem menores, quando se submeteu a ligação a momento fletor positivo, constatou-se que a curva deslocamento vertical/rotação era inferior à obtida no ensaio experimental. No que diz respeito ao modo de rotura, não foi evidenciada a rotura pelos parafusos na modelação numérica. Este acontecimento foi justificado com o facto de a rotura no modelo experimental ter sido alcançada durante a fase de arrefecimento, devida às elevadas tensões de tração induzidas pela parte aquecida da ligação na

recuperação das tensões e extensões. À semelhança do sucedido nos ensaios à temperatura ambiente, quer na modelação numérica quer experimental também se observou uma deformação da zona central da chapa de topo.

2.3 Estudos analíticos

Para determinar o comportamento de ligações isoladas foram desenvolvidos processos analíticos com base em metodologias aplicadas a ligações a temperatura ambiente. El-Rimawi et al. (1997, 1999) foram os primeiros a desenvolver uma metodologia que permitia a caracterização do comportamento momento-rotação da ligação a elevadas temperaturas. Partindo da equação de Ramberg-Osgood definiu-se uma equação modificada que permitia caracterizar a curva momento rotação da ligação a elevadas temperaturas. Os parâmetros das equações de dimensionamento foram calibrados com recurso aos resultados experimentais obtidos por Lawson (1990) e dependiam da temperatura. Para que a equação pudesse ser aplicada a ligações semelhantes de diferentes dimensões, foi necessário realizar diversos ensaios capazes de prever o mecanismo de rotura da ligação, tendo sido definido um parâmetro λ , que depende do momento resistente da ligação. Assim a rigidez de uma ligação em situação de incêndio pode ser determinada de acordo com a seguinte equação (2.1) onde os parâmetros A, B e n são respetivamente a rigidez e resistência da ligação.

$$\phi = \frac{M}{\lambda^2 A} + 0.01 \left(\frac{M}{\lambda \cdot B} \right)^n \quad (2.1)$$

Silva et (2004) propuseram a aplicação do método das componentes a ligações sujeitas a incêndio, usando um modelo mecânico típico de molas e elos rígidos. O modelo por eles apresentado, assentava na elaboração dum procedimento analítico capaz de prever a resposta do momento-rotação sobre a ação do fogo, tendo em conta a variação da tensão de cedência e do módulo de elasticidade dos componentes com o aumento da temperatura. O estudo analítico foi desenvolvido numa ligação cruciforme com chapa de topo estendida e os resultados foram comparados com os resultados experimentais.

No seu estudo, advertiram para o facto da abordagem feita pela EN 1993-1-2, relativamente ao comportamento de ligações a elevadas temperaturas ser demasiado simplista, justificando tal desconsideração devido à grande concentração de massa na zona da ligação. Pela observação de situações de incêndios reais e ensaios experimentais em grande escala, constataram a necessidade de avaliar o comportamento da ligação a temperaturas elevadas, uma vez que estas possuem uma redução de resistência e rigidez elevada, que afetam o comportamento global da estrutura. Perante este cenário, admitiram que a dificuldade de avaliação do comportamento de uma ligação quando sujeita a incêndio é superior do que quando esta se encontra à temperatura ambiente, prendendo-se esta dificuldade com o facto das propriedades dos materiais dependerem da temperatura, com a dificuldade em prever a variação tempo-temperatura dos vários componentes da ligação, das diferentes expansões térmicas dos diferentes materiais que

constituem a ligação, e da definição adequada de modelos de desenvolvimento de incêndios dentro do próprio edifício.

Uma vez que as propriedades mecânicas dos materiais variavam com o aumento da temperatura, no contexto do método das componentes, analisaram esta alteração ao nível de cada componente. Assim, como a rigidez elástica, k^e , era diretamente proporcional ao módulo de elasticidade do aço e a resistência de cada componente dependia do limite de elasticidade, a resposta força-deformação de cada componente com o aumento da temperatura, poderia ser dada pelas equações (2.2), (2.3) e (2.4). Onde $k_{y,\theta}$, $k_{E,\theta}$, $k_{pl,\theta}$, representavam respetivamente os coeficiente de redução da tensão de cedência, do módulo de elasticidade e do limite de proporcionalidade. As forças à temperatura ambiente eram dadas por $F_{i,20^{\circ}C}^y$, $F_{i,20^{\circ}C}^E$ e $F_{i,20^{\circ}C}^{pl}$. As ações térmicas e mecânicas foram aplicadas de duas formas: carga mecânica aplicada antes do cenário de incêndio (anisotérmico) (a) e carga mecânica aplicada após cenário de incêndio a temperatura constante (isotérmico) (b), não sendo estas as soluções mais realistas eram as mais simples de efetuar, sendo a hipótese mais realista a de a ação térmica e mecânica ser aplicada em simultâneo (análise transiente), uma vez que conduz à inevitável redistribuição de cargas.

$$F_{i,\theta}^y = k_{y,\theta} \times F_{i,20^{\circ}C}^y \quad (2.2)$$

$$F_{i,\theta}^e = k_{E,\theta} \times F_{i,20^{\circ}C}^e \quad (2.3)$$

$$F_{i,\theta}^{pl} = k_{E,\theta} \times F_{i,20^{\circ}C}^{pl} \quad (2.4)$$

O momento-rotação à temperatura Θ para a componente i foi dado pela equação (2.5) onde $M_{i,20^{\circ}C}^y$ é o momento correspondente à temperatura ambiente. A rotação de uma componente da ligação a uma dada temperatura pode ser obtida através da equação (2.6)

$$M_{i,\theta}^y = k_{y,\theta} \times M_{i,20^{\circ}C}^y \quad (2.5)$$

$$\phi_{i,\theta}^y = \frac{M_{i,\theta}^y}{S_{i,\theta}^y} = \frac{k_{y,\theta} \times M_{i,20^{\circ}C}^y}{k_{E,\theta} \times S_{i,20^{\circ}C}^y} = \frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \times \phi_{i,20^{\circ}C}^y \quad (2.6)$$

Assumindo uma distribuição uniforme de temperatura na ligação, compararam os resultados obtidos de forma analítica com resultados experimentais existentes na bibliografia realizados em condições anisotrópicas. O momento fletor atuante aplicado na ligação foi calculado a partir do momento último da ligação à temperatura ambiente, estudaram 4 situações apresentadas no Quadro 2.3. Com o aumento da temperatura observaram uma diminuição do momento resistente e da rigidez, tornando-se desprezíveis para temperaturas perto dos $900^{\circ}C$, sendo estes superiores nos resultados analíticos como se pode observar na Figura 2.14, sendo as componentes representadas (4.1) banzos da coluna à flexão ao nível da primeira fila de parafusos, (5.1) chapa de topo à flexão ao nível da primeira fila de parafusos, (4.2) banzo da coluna à flexão ao nível da segunda fila de parafusos e (2) alma da coluna à compressão levando a concluir que a hipótese de uma distribuição uniforme da temperatura da ligação não é conservativa.

Quadro 2.3 – Detalhes dos testes utilizados (Silva et al. 2001)

Ensaio	Chapa de topo	Viga	Coluna	Material	Parafuso	Nível de carga
FB11	Flush end-plates (265×130×8)	254×102×22UB	152×152×23UC	$f_y=322,$ $f_u=454$ Mpa	8.8	$0.2M_{j,Rd}$
FB12	Flush end-plates (265×130×8)	254×102×22UB	152×152×23UC	$f_y=322,$ $f_u=454$ Mpa	8.8	$0.4M_{j,Rd}$
FB13	Flush end-plates (265×130×8)	254×102×22UB	152×152×23UC	$f_y=322,$ $f_u=454$ Mpa	8.8	$0.64M_{j,Rd}$
FB14	Flush end-plates (265×130×8)	254×102×22UB	152×152×23UC	$f_y = 322,$ $f_u=454$ Mpa	8.8	$0.85M_{j,Rd}$

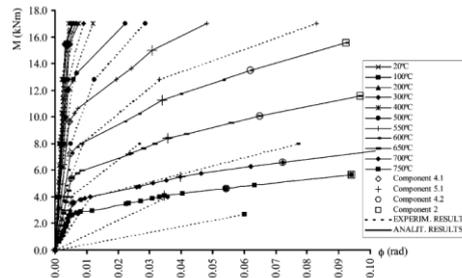


Figura 2.14 – Resposta isotérmica da relação momento-rotação (Silva et al.)

Para corrigir esta situação aplicaram um coeficiente de correção de temperatura global, calibrado através dos ensaios experimentais. Este coeficiente foi de 7.5% e obtiveram uma boa correlação entre os resultados experimentais e os resultados analíticos. Para a mesma ligação sujeita a uma carga anisotrópica obtiveram também uma boa correlação quando aplicaram o coeficiente de correlação Figura 2.15.

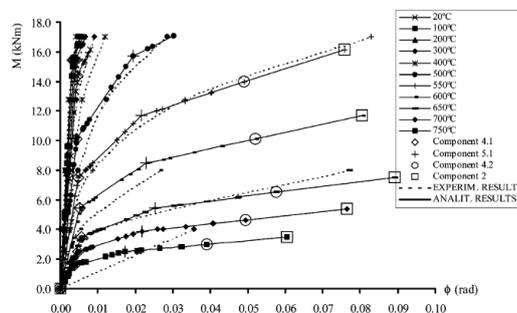


Figura 2.15 – Resposta Isotérmica do momento-rotação com coeficiente de correção de temperatura de 7.5% (Silva et al. 2001).

Neste estudo não consideraram a expansão térmica dos vários componentes, devido à falta de informação necessária na calibração do modelo.

Liu et al (2012) no estudo analítico que realizaram a par da análise numérica mencionada no capítulo 2.2, adaptaram o método das componentes de forma a prever o momento último resistente e a rigidez inicial da ligação mista em situação de incêndio por ação em simultâneo da resistência e rigidez de cada componente da ligação a elevada temperatura. A rigidez equivalente, $K_{eq,T,i}$, de cada fila de parafusos foi calculada pela expressão (2.7) e encontra-se representada na Figura 2.16. O $K_{CW,t,T,i}$, $K_{b0,T,i}$, representavam respectivamente a rigidez axial

da alma da coluna e do parafuso, e $K_{cf,b,T,i}$, $K_{ep,b,T,i}$ a rigidez de flexão do banzo da coluna e da chapa de topo a uma dada temperatura. Sendo h_{eq} a distância da componente ao centro de rotação e $K_{eq,T}$ a rigidez em tensão da mola. A rigidez rotacional inicial da mola a uma dada temperatura é dada pela expressão (2.8) onde $K_{cw,c,T}$ representa a rigidez axial da alma da coluna e compressão. O momento resistente último, foi calculado pelo equilíbrio de forças internas da ligação em relação ao ponto de rotação.

$$\frac{1}{K_{eq,T,i}} = \left(\frac{1}{K_{CW,t,T,i}} + \frac{1}{K_{cf,b,T,i}} + \frac{1}{K_{ep,b,T,i}} + \frac{1}{K_{b0,T,i}} \right) \quad (2.7)$$

$$K_{o,T} = \frac{h_{eq}^2}{(1/K_{eq,T} + 1/K_{cw,c,T})} \quad (2.8)$$

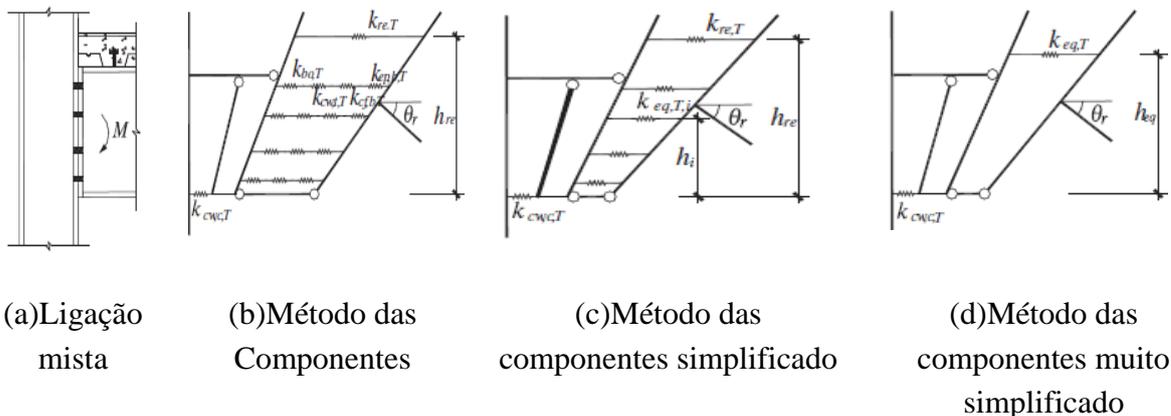


Figura 2.16 Representação da rigidez de rotação da ligação mista (Li et al 2012)

Através de várias análises paramétricas com recurso ao método de elementos finitos, obtiveram curvas de momento-rotação-temperatura. As curvas podiam ser bi-dimensionais, no caso de a temperatura ser constante e eram estabelecidas para diferentes níveis de esforço axial. Podiam ter em conta a perda de capacidade da ligação no caso de serem curvas tridimensionais, tendo em conta um momento constante igual a 0.3 do momento último resistente da ligação.

2.4 Abordagem dos eurocódigos estruturais

No que diz respeito ao anexo D da EN1993-1-2, em ligações aparafusadas deve ser verificada a resistência de cálculo dos parafusos ao corte (2.9), e a resistência dos parafusos em tração (2.10).

$$F_{v,t,Rd} = F_{v,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.9)$$

$$F_{b,t,Rd} = F_{b,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.10)$$

A temperatura na ligação poderá ser avaliada adotando o valor de fator de massividade A/V correspondente a cada uma das partes que constituem a ligação. Como simplificação, poderá ser determinada uma temperatura uniformemente distribuída na ligação que poderá ser calculada adotando o valor máximo dos fatores de massividade A/V dos vários elementos ligados. No caso de ligações viga-coluna a temperatura da ligação poderá ser obtida da temperatura do banzo inferior. A temperatura dos componentes da ligação depende da altura da viga, para uma altura igual ou inferior a 400mm pode ser determinada pela equação (2.10) para alturas superiores a 400mm, quando h for menor ou igual a D/2, quando h for superior que D/2

Figura 2.17.

$$\theta_h = 0,88\theta_0[1 - 0,3(h/D)] \quad (2.11)$$

$$\theta_h = 0,88\theta_0 \quad (2.12)$$

$$\theta_h = 0,88\theta_0[1 + 0,2(1 - h/D)] \quad (2.13)$$

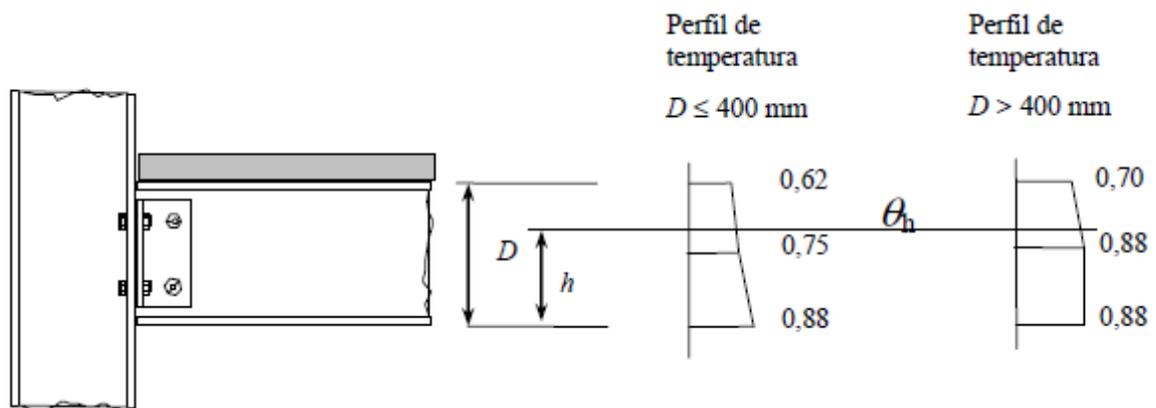


Figura 2.17 Gradiente térmico na altura de uma ligação mista

A EN1994-1-2:2005 propõe no Anexo D, um método para o cálculo da resistência ao fogo para lajes mistas expostas à curva de incêndio normalizada, em relação ao critério de resistência "R". Este método consiste na determinação dos fatores de redução dos ($K_{y,\theta,i}, K_{c,\theta,j}$) através da evolução da temperatura da laje. Conhecendo estes fatores é então possível determinar o eixo neutro plástico da viga (2.14) o que permite finalmente obter o momento resistente (2.15).

$$\sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi,a}} \right) + \alpha_{slab} \sum_{j=1}^m A_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) = 0 \quad (2.14)$$

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i Z_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi}} \right) + \alpha_{slab} \sum_{j=1}^m A_j Z_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) \quad (2.15)$$

A evolução da temperatura na laje é determinada de formas diferentes para o momento fletor positivo e para o momento fletor negativo, tendo em conta o fator de vista (2.16) e o fator de geometria da nervura (2.17).

$$\frac{A}{L_r} = \frac{h_2 \left(\frac{l_1 + l_2}{2} \right)}{l_2 + 2 \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2} \right)^2}} \quad (2.16)$$

$$\phi = \left(\sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 + l_2}{2} \right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2} \right)^2} \right) / l_3 \quad (2.17)$$

O momento fletor positivo, a norma EN1994-1-2 estabelece no anexo D, coeficientes a partir dos quais é determinada a temperatura em diversos pontos da laje (alma, banzo inferior, banzo superior e varões)

$$\theta_A = b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{l_3} + b_2 \cdot \frac{A}{L_r} + b_3 \cdot \phi + b_4 \cdot \phi^2 \quad (2.18)$$

$$\theta_s = c_0 + \left(c_1 \cdot \frac{u_3}{h_2} \right) + (c_2 \cdot z) + \left(c_3 \cdot \frac{A}{L_r} \right) + (c_4 \cdot \alpha) + \left(c_5 \cdot \frac{1}{l_3} \right) \quad (2.19)$$

O momento resistente negativo da laje é calculado considerando uma secção transversal reduzida. As partes da secção transversal com temperaturas para além de uma certa temperatura limite, θ_{lim} , são desprezadas. O resto da secção transversal é considerada como se estivesse à temperatura normal. A secção restante é determinada com base na isotérmica para a temperatura limite (2.20), esquematizada através de quatro pontos (Figura 2.18).

$$\theta_{lim} = d_0 + d_a \cdot N_s + d_2 \cdot \frac{A}{L_r} + d_3 \cdot \phi + d_4 \cdot \frac{1}{l_3} \quad (2.20)$$

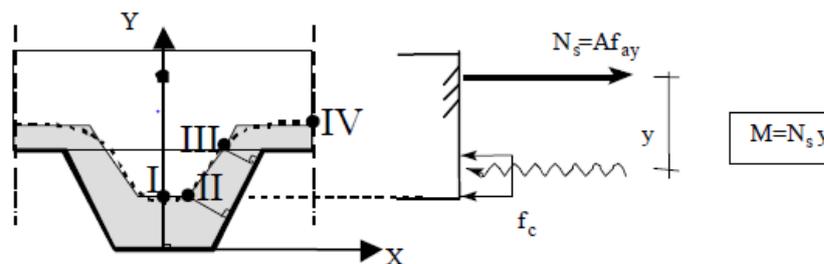


Figura 2.18 - Esquema de distribuição da temperatura (EN1994-1-2).

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é descrito o trabalho experimental desenvolvido por Barata (2010), cujos resultados serviram para aferir os modelos numéricos usados nesta tese de mestrado. Uma vez que o tema da presente tese incide sobre o estudo do comportamento de ligações mistas de aço e betão ao fogo e determinação da sua capacidade de carga a altas temperaturas, neste capítulo focar-se-á a parte dos ensaios de resistência ao fogo.

O programa de ensaio encerrou dois grupos. No primeiro grupo foram realizados três ensaios à temperatura ambiente, num primeiro ensaio a ligação foi sujeita a momento negativo, num segundo ensaio foi sujeita a momento positivo e num terceiro ensaio a ligação foi sujeita a cargas cíclicas. No segundo grupo de ensaios as ligações eram primeiro sujeitas a um carregamento cíclico e depois eram sujeitas à ação da temperatura segundo a curva ISO824 até atingirem os 600°C. Após estabilizada a temperatura nas ligações, estas eram levadas à rotura por aplicação dum momento negativo. A ação mecânica aplicada pelo macaco hidráulico era feita em controlo de deslocamento a uma velocidade de 0,1mm/s.

Dos ensaios realizados apenas serão utilizados os resultados obtidos no provete do primeiro grupo em que a ligação foi sujeita a momento negativo, para calibrar o modelo e os resultados obtidos a temperaturas elevadas.

3.2 Provetes de ensaio

Os provetes de ensaio eram compostos por uma viga metálica (IPE270) (1), ligada através de uma chapa de topo aparafusada(2) a um pilar misto (HEA240) (3) com betão entre os banzos (4) e apresentava superiormente, ligado à viga, uma laje mista (5) com cofragem em aço do tipo trapezoidal (steel deck), esta laje tinha 120mm de altura (chapa colaborante 1mm espessura) Figura 3.1. A viga e a laje eram ligadas por meio de conectores do tipo stud, já entre a viga e a coluna a ligação foi conseguida por intermédio de uma chapa de topo estendida para baixo, para que a ligação tivesse o mesmo comportamento quando fosse sujeita a momentos positivos ou negativos, aparafusada através de três filas de parafusos M20 dispostos em duas colunas.

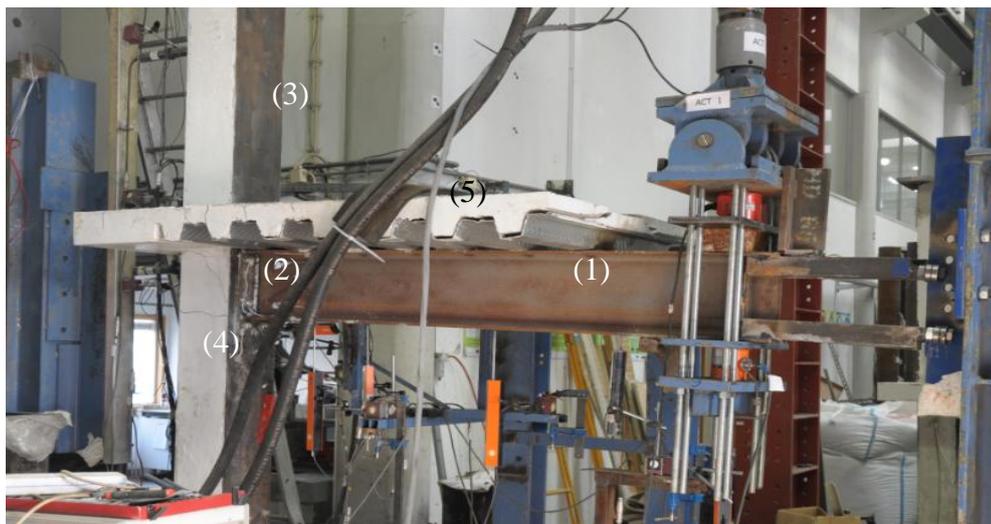


Figura 3.1 - Provede de ensaio.

3.3 Plano de ensaios

O estudo realizado, consistiu na análise de seis ligações viga-coluna com chapa de topo aparafusada Quadro 3.1. Os ensaios foram divididos em dois grupos, o primeiro grupo de ensaios foi submetido a uma fase de testes única realizada à temperatura ambiente, que serviu para calibrar o modelo numérico desenvolvido. No segundo grupo, os ensaios foram realizados a temperaturas elevadas, apesar de as ligações terem sido previamente submetidas a uma ações cíclica, apenas foram considerados a parte dos ensaios a altas temperaturas nas simulações numéricas, partindo do princípio que a ligação se encontrava em situação idêntica à situação original, o que na realidade aconteceu.

Quadro 3.1 - Plano de ensaios

Ensaio	1ª Fase	2ª Fase
E1	Monotónico (M ⁻)	-
E2	Monotónico (M ⁺)	-
E3	Cíclico + Monotónico (M ⁻)	
E4	Cíclico + Monotónico (M ⁻)	Térmico
E5	Cíclico	Térmico+(M ⁻)
E6	Cíclico	Térmico+(M ⁻)

3.4 Modelo experimental

3.4.1 Ensaios realizados à temperatura ambiente

O sistema de ensaio utilizado à temperatura ambiente apresenta-se na Figura 3.2 e Figura 3.3. O modelo experimental encontrava-se ligado a um pórtico externo de elevada rigidez. Deste sistema faziam parte uma laje e uma parede de reação, uma sapata e um conjunto de pórticos e vigas. A sapata era fixa à laje de reação e a viga horizontal à parede horizontal, por intermédio de diwidags de 36mm. A ligação do modelo ao sistema de ensaio era estabelecida por rótulas, localizadas no topo e na base da coluna, que permitiam a rotação no plano do modelo. O sistema experimental era composto por

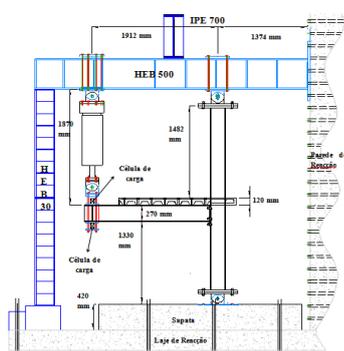


Figura 3.2 - Esquema do Sistema de Ensaio à Temperatura Ambiente (Barata 2010).

Figura 3.3 - Sistema de ensaio à Temperatura Ambiente (Barata 2010)

3.4.2 Ensaios realizados a altas temperaturas

O esquema de ensaio utilizado nos ensaios a temperaturas elevadas era idêntico ao dos ensaios a temperatura ambiente. Para simular a ação do fogo, foi adicionado um forno elétrico, este era constituído por dois módulos (Figura 3.4 (b)), apoiados sobre um maciço, de forma a permitir o aquecimento da zona lateral do modelo. O sistema de carregamento adotado encontra-se na Figura 3.4(c) e foi especialmente concebido para estes ensaios. Este sistema, permitia simular o efeito de continuidade de uma estrutura real. Através deste sistema era possível a aplicação de esforços axiais (N^+) e momento fletor (M^-). O sistema era composto por um macaco hidráulico (1), uma célula de carga com capacidade de 200kN (2), uma rótula (3) e dois tirantes (4) um dos tirantes encontrava-se fixo ao sistema externo de elevada resistência (5) e o outro à viga do modelo a ensaiar (6). Nestes dois últimos ensaios a carga foi aplicada em controlo de deslocamento a uma velocidade de 0,1 mm/s, os deslocamentos foram registados no ponto (7).



Figura 3.4 - Ensaio de ligações a temperaturas elevadas (a) esquema de ensaio; (b) pormenor do provete e (c) sistema de aplicação de carga nos ensaios E5 e E6 . (Barata 2010)

3.5 Procedimento de ensaio

3.5.1 Ensaios à temperatura ambiente

Nos ensaios realizados à temperatura ambiente, as ligações eram sujeitas a um carregamento mecânico, este consistia na aplicação de ações monotónicas (aplicação de momento fletor com sentido único) nos ensaios E1 e E2, onde as ligações eram sujeitas a momento negativo e momento positivo respetivamente.

Os ensaios monotónicos realizados, tinham como objetivo a determinação da resistência da ligação quando esta era submetida a um momento positivo ou negativo e deste modo determinar os seus parâmetros elásticos e a sua capacidade resistente. Com esta finalidade, foi aplicado um deslocamento, a uma velocidade de 0.01mm/s, na extremidade oposta à ligação da viga. Esta ação era aplicada num só sentido, até que ocorresse a rotura da ligação. A carga foi aplicada na estrutura, a uma distância de 1.92m do eixo da coluna, com recurso a uma célula de carga. Este equipamento permitiu que o carregamento fosse aplicado com controlo deslocamentos.

Nestes ensaios realizados à temperatura ambiente, as variáveis medidas foram os deslocamentos e as extensões, estas grandezas permitiram avaliar o estado de tensão e deformação da ligação, bem como das componentes que a constituíam. Os deslocamentos foram medidos com recurso a defletómetros LVDT TML (CDP10, CDP 50, CDP100, SDP 100C, SDP 200D e DP 1000E) e as extensões foram medidas por meio de extensómetros (TML FLK 6-11).

3.5.2 Ensaios a altas temperaturas

Nos ensaios realizados a temperaturas elevadas, após a ligação ter sido submetida ao carregamento cíclico, procedeu-se ao aquecimento desta, tendo a evolução da temperatura do forno seguido a curva ISO 834 até aos 600°C, a partir deste valor a temperatura foi mantida constante. No instante em que a temperatura dos parafusos atingiu os 550°C, valor para o qual

se observa uma redução acentuada nas propriedades mecânicas dos parafusos, a ligação foi sujeita a um carregamento com recurso ao mecanismo apresentado na anteriormente Figura 3.4 (c) e com uma velocidade de 0,1mm/s, de acordo com o apresentado anteriormente.

3.6 Resultados

3.6.1 Ensaio à temperatura ambiente

Na Figura 3.5 (a) encontra-se representada a variação do momento fletor com a rotação da ligação, quando esta era sujeita a momento negativo (E1). Os resultados obtidos revelaram que o momento máximo resistente desta ligação era de 161,1 kN.m, a rigidez inicial era de 41,1 kN.m/mrad e a secante de 15,8 kN.m/mrad. No decorrer do ensaio E1, foi observado o destacamento dos conectores da laje (pull-out), este acontecimento veio precipitar a perda de resistência da ligação, uma vez que a viga e a chapa colaborante passaram a resistir de forma isolada à carga aplicada, tal acontecimento é facilmente perceptível quando se observa a Figura 3.5 (b). Através da análise da curva momento fletor atuante-momento fletor na viga, observou-se também, uma ligeira diminuição deste último após o destacamento dos conectores na laje, voltando a aumentar novamente.

A rotura da ligação deveu-se à plastificação da chapa de topo na zona tracionada. Após esta ter sofrido grandes deformações os parafusos da primeira linha cederam, sendo este fenómeno também ele visível através de ressaltos na curva momento atuante-momento fletor na viga (Figura 3.6). A deformação observada na ligação após ensaio encontra-se na Figura 3.6.

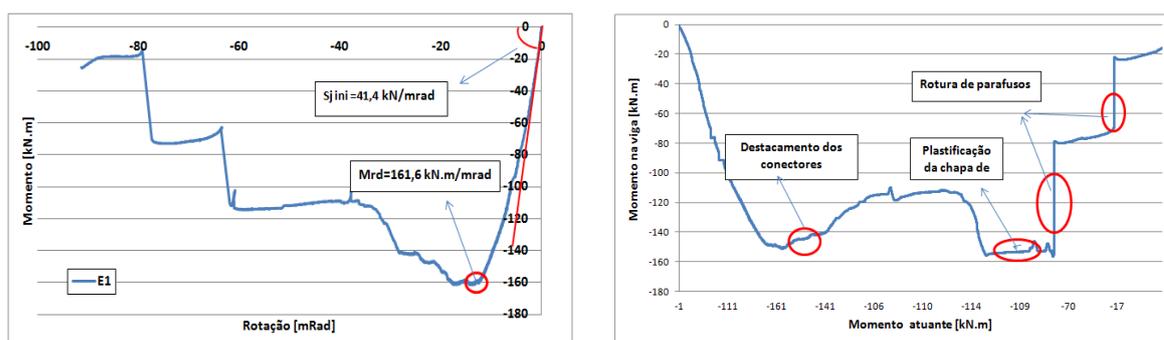


Figura 3.5 - Ensaio E1: (a) curva momento-rotação e (b) curva momento atuante-momento na viga.



Figura 3.6 - Deformação da ligação após ensaio realizado à temperatura ambiente.

As extensões registadas nos parafusos retratam os esforços a que estes tiveram sujeitos. No ensaio E1, tal como referido anteriormente, os parafusos presentes na primeira linha (P1 e P4) entraram em rotura, conduzindo a desníveis nas curvas de momento-extensão dos parafusos da linha seguinte (P2 e P5). Os parafusos da última linha (P3 e P6) situavam-se na zona de compressão da ligação, coerentes com as extensões negativas obtidas. Na Figura 3.7 é ainda visível a instabilização da ligação, uma vez que os parafusos presentes na mesma linha apresentaram extensões diferentes, esta instabilização foi devida ao destacamento dos conectores.

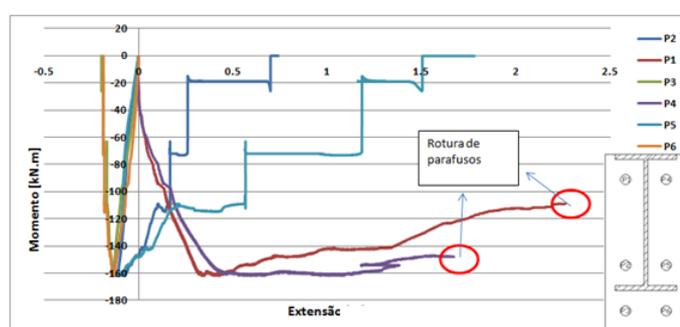


Figura 3.7 - Curva momento-extensão dos parafusos.

Nas armaduras da laje mista também foram medidas as extensões com recurso a extensómetros. No ensaio E1, através da análise das extensões obtidas nas armaduras transversais (Figura 3.8 (a)), pôde-se concluir que estas eram sujeitas a esforços de tração até ao momento máximo, altura em que ocorria o destacamento dos conectores. Após o momento máximo, a armadura transversal mais próxima da coluna (20), sofreu compressão, voltando novamente a ser tracionada, os restantes ressaltos observados no gráfico dizem respeito à rotura de parafusos.

As extensões obtidas nos varões longitudinais (Figura 3.8(b)), mostram que os varões mais próximos da viga (26 e 27), sofreram esforços de tração superiores, revelando maiores extensões. Estas iam diminuindo à medida em que se analisavam extensómetros de varões mais afastados da viga (28 e 29). À semelhança do registado nos varões transversais, também se

observou uma inversão nas extensões após o momento máximo, altura do destacamento dos conectores.

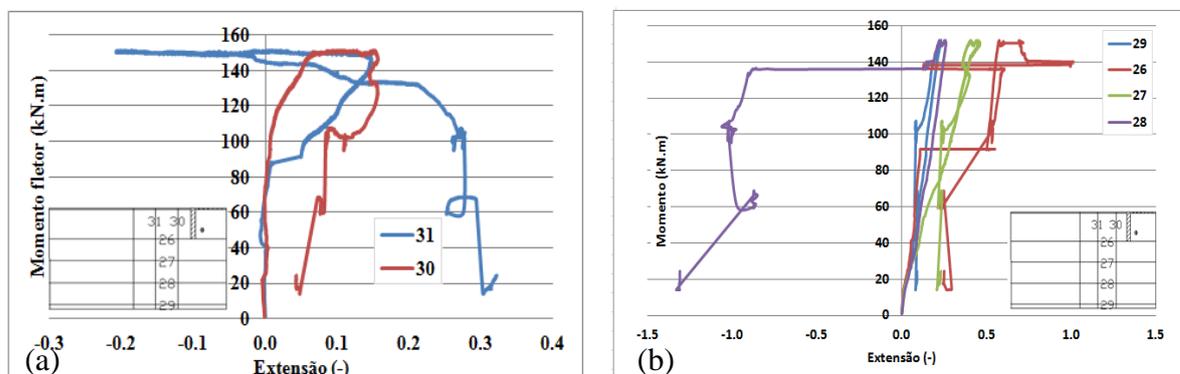


Figura 3.8 Extensões das armaduras no ensaio E1 (a) armaduras transversais e (b) armaduras longitudinais.

3.6.2 Ensaios a temperaturas elevadas

Após os ensaios realizados a temperaturas elevadas, concluiu-se que a ligação não apresentou grandes deformações ao nível da chapa de topo, todavia verificou-se a instabilização da viga por arrancamento dos conectores e por perda de resistência do banzo inferior (Figura 3.9 (a)), este fenómeno é justificado pelas temperaturas elevadas registadas nesta zona do provete, que provocaram uma redução de resistência dessa região. Associado a este acontecimento ocorreu ainda a rotura dos parafusos da linha superior da ligação (Figura 3.9 (b)), tendo esta rotura ocorrido para um deslocamento do macaco hidráulico de 180mm de deslocamento (Figura 3.10). O aumento da temperatura na laje provocou a dilatação dos varões, levando à fissuração. Da ação simultânea do esforço axial e momento fletor, observou-se que estes aumentam de forma linear, atingindo um valor máximo de 46,58 kN e de -67,5 kN.m respetivamente (Figura 3.11) após este valor, foi verificado um aumento de rotação da ligação assim como a redução do esforço transverso e momento fletor.



Figura 3.9 - Deformação da ligação sujeita a situação de incêndio: (a) instabilização da viga, (b) rotura dos parafusos da primeira fila e (c) fendilhação da laje de betão.

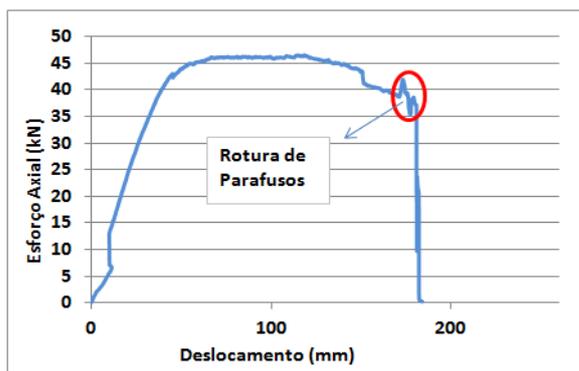


Figura 3.10 - Curva esforço axial-deslocamento.

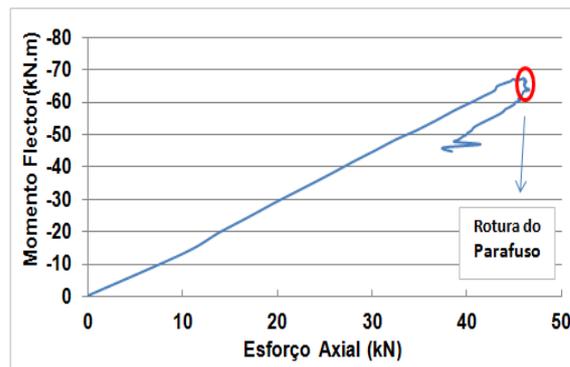


Figura 3.11 - Curva esforço axial-momento fletor.

Através de uma análise comparativa entre os resultados obtidos à temperatura ambiente com os obtidos a elevadas temperaturas, constatou-se que o facto de a ligação ter sofrido uma ação de incêndio, levou a uma redução do momento resistente da ligação (Figura 3.12). Através do gráfico momento-rotação, observou-se também que houve uma diminuição de rigidez e um aumento de rotação da ligação.

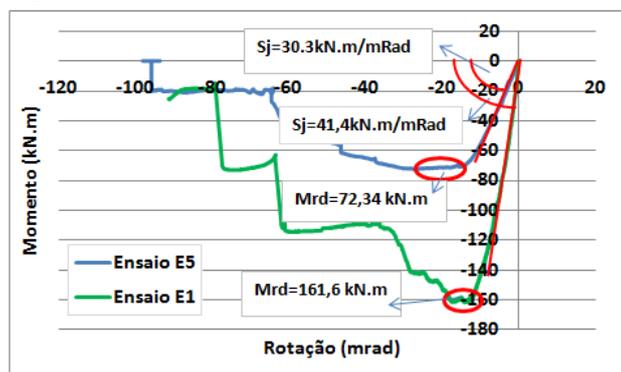


Figura 3.12 - Comparação das curvas momento-rotação do ensaio realizado à temperatura ambiente com o ensaio a temperaturas elevadas.

A disposição dos termopares na ligação é apresentada na (Figura 3.13). Da observação da evolução das temperaturas nos parafusos pôde-se concluir que os parafusos da primeira e da segunda fila (T1 e T2) eram semelhantes (Figura 3.14), apesar da temperatura do parafuso T1 ser ligeiramente superior, este facto pode ser justificado com a acumulação de calor junto à laje.

Na viga (Figura 3.15), observou-se que a zona que sofreu um maior aquecimento, foi o banzo inferior, este facto vem assim acreditar a afirmação de que o decréscimo da resistência do banzo inferior, e conseqüente instabilização, se deveu às elevadas temperaturas registadas nesta zona. O banzo superior, foi a região da viga onde se observaram as temperatura mais baixas, esta diferença de temperaturas deveu-se ao efeito de sombra dos elementos da viga e da dissipação por contacto entre a laje e o banzo superior da viga .

Na Figura 3.16 está exposta a evolução da temperatura nos elementos da laje. Através da consulta dos resultados, é visível uma flutuação dos valores da temperatura na fase de

aquecimento, resultante da migração de água presente no betão através de fissuras existentes

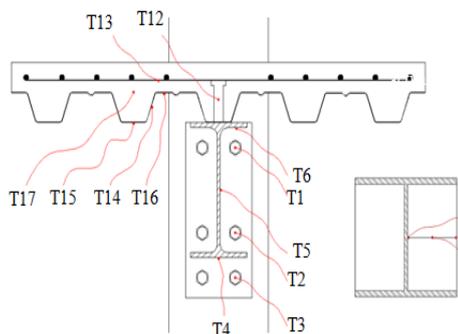


Figura 3.13 - Disposição dos termopares na ligação.

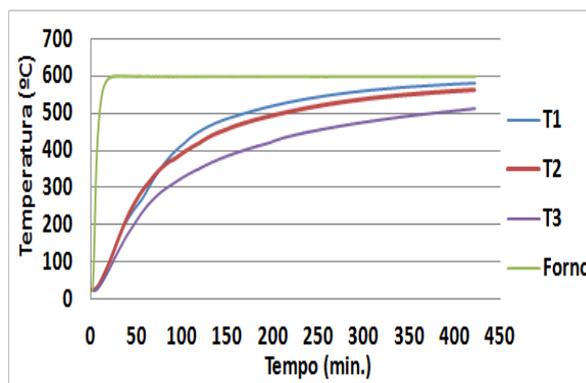


Figura 3.14 - Evolução da temperatura dos parafusos.

devido à ação mecânica e à expansão das armaduras com o aumento da temperatura.

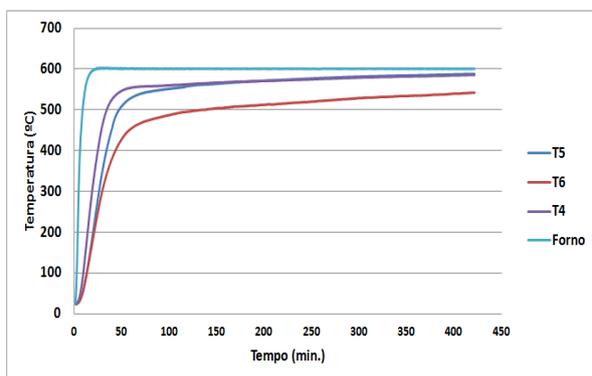


Figura 3.15 - Evolução da temperatura na viga.

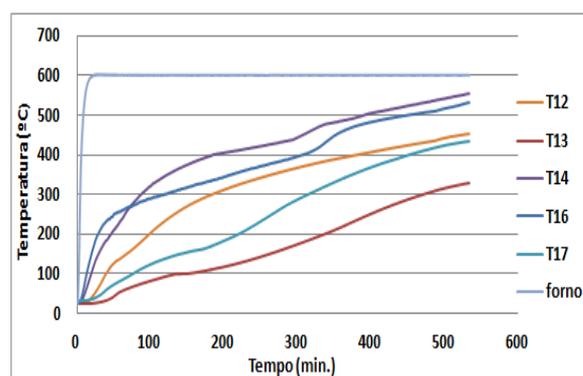


Figura 3.16 - Evolução da temperatura na laje.

3.7 Considerações finais

Através dos ensaios realizados à temperatura ambiente, foi possível concluir que este tipo de ligação tem uma resistência elevada e apresenta também elevada deformabilidade, uma vez que sofreu grandes rotações antes de entrar em rotura.

A temperaturas elevadas, o momento resistente da ligação diminuiu em cerca de metade, tendo-se registado também uma redução da rigidez da ligação. Contudo, a rotação da ligação foi superior ao observado à temperatura ambiente.

Ao comparar o modo de rotura à temperatura ambiente com o observado a elevadas temperaturas, observou-se que este se alterava. Enquanto à temperatura ambiente o modo de

rotura da ligação ocorreu devido a elevadas tensões na chapa de topo, a temperaturas elevadas, ocorreu devido à tração dos parafusos.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

4.1 Considerações iniciais

Uma vez que o tema desta tese incide sobre a simulação numérica de ligações mistas de aço e betão sujeitas ao fogo, serão apresentados nesta secção, alguns programas de cálculo avançado existentes, utilizados na modelação e cálculo de elementos sujeitos a temperaturas elevadas.

O recurso aos métodos avançados de cálculo deverá ser feito sempre que se pretender determinar a evolução das tensões/extensões, deformações e/ou distribuição de temperaturas, em estruturas ou partes das mesmas. Os modelos deverão ser baseados no comportamento físico das estruturas e o seu processo de cálculo deverá poder ser executado por etapas, se assim for necessário.

De forma a cumprir com os requisitos térmicos impostos pela EN 1991-1-2 2010, as teorias de transferências de calor, os fenómenos de convecção e radiação devem ser respeitados, assim como a variação das propriedades térmicas dos diferentes materiais definidas pelos respetivos eurocódigos. Estes modelos deverão ser baseados nos princípios da mecânica estrutural, dos efeitos da não-linearidade e não linearidade geométrica dos materiais, incluindo os efeitos do carregamento na rigidez da estrutura. Os efeitos da temperatura induzidos nas tensões-extensões devem ser tidos em conta no modelo e definidos de acordo com o estipulado na parte 1-2 dos eurocódigos. O modelo de cálculo deverá ser validado através de resultados experimentais, onde deverá constar deformações, temperaturas e tempos de resistência ao fogo. Deverá ser ainda realizada uma análise de sensibilidade, para verificar os parâmetros críticos.

4.2 Software de modelação de estruturas em situação de incêndio

Os modelos de cálculo avançado existentes são agora aqui expostos. Estes são os modelos disponíveis no mercado e os mais na comunidade científica na modelação e cálculo de elementos sujeitos a temperaturas elevadas:

- **ABAQUS:** este programa, de uso comercial desenvolvido pela SIMULIA nos EUA, é uma ferramenta de cálculo bastante completa para a modelação e análise através de programas de elementos finitos do comportamento de materiais, processos e produtos. Através deste programa é possível realizar diferentes tipos de análises, desde acústicas, passando por ligações, avaliações de dano, fratura e falha. O ABAQUS/CAE é dotado

de ferramentas necessárias para criar a geometria do modelo, ou então esta pode ser importada de ficheiros CAD. Permite a criação de malhas de modo automático e/ou manual, permitindo ao utilizador gerar malhas de forma simples, rápida e com boa aproximação. Este programa é usado nas mais diferentes áreas e por empresas de topo no setor automóvel, aeroespacial, defesa, biomédica e de produtos de consumo. ABAQUS é ideal para realizar análises estáticas ou de baixa velocidade, onde a ocorrência de esforços máximos são importantes. De forma complementar, este módulo possui ainda um módulo para análises dinâmicas de alta velocidade, onde podem ser realizadas simulações de queda, acidentes automóveis ou impactos balísticos. Este programa é dotado de uma extensa base de dados de materiais possíveis de serem utilizados e permite a criação de materiais com as características pretendidas. Permite ainda a definição da interação entre materiais e o meio envolvente. Este foi o programa usado para desenvolver este trabalho pelo que será posteriormente descrito de forma mais pormenorizada. (Simulia@, 2008).

- ALGOR: à semelhança do programa anterior, também este é de uso comercial nas áreas de engenharia, mecânica, civil, automóvel, aeroespacial, medica, militar, energia elétrica, petrolífera entre outras. Esta ferramenta de elementos finitos, permite a modelação, análise e simulação do comportamento real de materiais novos e existentes. Com recurso a este programa o utilizador vê possível a realização análises estáticas, mecânicas, com modelação linear e não linear do material, de dinâmicas lineares, de fadiga, a altas temperaturas, de fluidos, electrostáticas, entre outras. À semelhança de outros programas deste género possui interface com o CAD (algor@, 2008).
- ANSYS: este é mais um programa de elementos finitos de uso comercial desenvolvido nos EUA. Deste programa fazem parte uma gama de produtos adequados a diferentes tipos de análises tais como ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical, ANSYS/Structural, ANSYS/Professional, ANSYS/Emag, ANSYS Parallel Processing, ANSYS/DesignXplorer, ANSYS/DesignXplorer VT, ANSYS/DesignModeler, ANSYS/Fatigue e ANSYS/ED. ANSYS/Multiphysics permite simular de forma linear e não linear diversos fenómenos físicos como por exemplo estruturais, térmicos, de alta e baixa frequência eletromagnética, fluidos, electroestáticos e acústicos num único campo, em ambiente estático ou dinâmico. Este programa de cálculo avançado não linear tem em consideração grandes esforços, diferentes materiais não lineares, encurvadura não linear, pós encurvadura e contacto geral. Permite ainda construir e controlar modelos paramétricos e personalizados (ansys@, 2008).
- COSMOS: este programa de elementos finitos foi desenvolvido nos EUA, também ele se enquadra na gama dos softwares comerciais. O programa possui uma variada gama de produtos tais como COSMOWorks, COSMODesignSTAR, COSMOSM, COSMOSMotion e COSMOSFloWorks. É dotado de diversos recursos para análise de tensões e uma biblioteca diversificada de propriedades dos materiais, propriedades estas definidas em função da temperatura, materiais isotrópicos, ortotrópicos, anisotrópicos, e compostos por múltiplas camadas. Permite realizar análise não linear avançada, tendo

em consideração grandes deslocamentos, considera o contacto entre os materiais, considera plasticidade, viscosidade, análise não linear elástica, etc (cosmos@, 2008).

- DIANA: este é mais um software comercial de elementos finitos, desenvolvido na Holanda. Permite realizar análises de elementos de betão, aço, solo, rocha ou interação solo-estrutura. Pode realizar análises do tipo lineares, não lineares, de fluxo, dinâmicas, de instabilidade de Euler, etc. Com recurso a este software é possível realizar modelos bidimensionais e tridimensionais. Permite ainda, à semelhança de outros programas, a importação de ficheiros CAD. Permite a modelação de uma enorme quantidade de problemas da engenharia com qualquer tipo de secção (tnodiana@, 2008).
- FIRES-T3: este programa começou a ser desenvolvido na Universidade da Califórnia em 1977. Permite estudar a evolução de temperaturas em elementos sólidos de três dimensões, simples ou composto como por exemplo o betão armado, duas dimensões e elementos de uma estrutura a uma dimensão. Possibilita ainda conjugar elementos de uma, duas ou três dimensões, tudo no mesmo modelo. As temperaturas geradas pelo FIRES-T3 podem ser utilizadas para realizar análises mecânicas, quando conjugadas com programas como o FIRES-RC II ou FIRES-SL, prevendo desta forma o comportamento global da estrutura. O método de cálculo consiste na aplicação do método dos elementos finitos integrado em intervalos de tempo, a não linearidade requer um processo iterativo ao longo de intervalos de tempo. As curvas de fogo podem ser lineares ou não lineares, e têm em conta os efeitos de condução e radiação (Iding et al., 1977).
- LENAS: este programa foi desenvolvido em França pelo CTICM (Centre Technique Industriel de la Construction Métallique), e permite a modelação de estruturas de aço, expostas a elevadas temperaturas. O programa tem em conta a não linearidade dos materiais, a encurvadura de vigas, grandes deslocamentos e ligações semi-rígidas (Mesquita, 2004).
- LUSAS: é mais um programa de elementos finitos, composto por vários módulos. Um dos módulos foi especialmente concebido para o dimensionamento de pontes, outro para estruturas correntes, um módulo para a criação de elementos sólidos, outro destinado à análise e um último para meio académico. Através deste programa é possível desenvolver análises estáticas e dinâmicas, lineares e não lineares, térmicas entre outras. Na análise térmica, permite definir as características dos materiais em função da temperatura, quer seja um material isotrópico ou anisotrópico. Permite ainda definir outras características térmicas como calor específico, coeficiente de convecção, radiação, etc. Através deste programa é possível definir vários tipos de carregamento (lusas@, 2008).
- NEiNASTRAN: este programa de elementos finitos, de uso comercial, foi desenvolvido nos EUA. Deste programa faz parte uma interface gráfica e um editor de modelação. Permite análises lineares e não lineares de esforços, análises dinâmicas e de transferências de calor entre corpos. Através de um programa de pré e pós-processamento(FEMAP) integrado no sistema, permite a criação importação, geração de malhas de elementos finitos, criação de materiais, cargas, condições de fronteira,

estabelecer tipos de análises e opções de visualização, permitindo ainda a integração de outros programas de análise térmica. A este programa está ainda associado um editor que potencia o controlo sobre as modelações e os resultados obtidos. Em tempos, este foi um programa de uso frequente na indústrias aeroespacial, automóvel e marítima (NEiNastran@, 2008).

- SAFIR: este modelo de cálculo de elementos finitos foi desenvolvido na Universidade de Liège por Jean-Marc Franssen, baseado num programa denominado CEFICOSS. Permite a realização de análises não lineares de estruturas tanto a temperaturas elevadas como à temperatura ambiente. Esta análise é feita por duas etapas, a primeira etapa consiste numa análise térmica e posteriormente, na segunda etapa, é aplicada uma ação mecânica. Este programa é dotado de uma biblioteca com vários materiais e respetivas propriedades térmicas(aço, betão e alumínio) e curvas de incêndio. Este software é de uso comum entre a comunidade científica. (Franssen et al., 2002).
- SUPERTEPCALC: este programa de elementos finitos, foi desenvolvido de forma a ser possível determinar a distribuição de temperaturas numa secção específica de um material, embutido ou não em alvenarias, sujeita a temperaturas elevadas. Com recurso a este software é possível ainda determinar os esforços resistentes de elementos de betão, aço e mistos. Este é mais um dos programas de uso comum entre a comunidade científica da área (CBCA@, 2008).
- TASEF: este programa foi desenvolvido para determinar a segurança de estruturas ao fogo, por SP Technical Research Institute of Sweden, na Suécia, como ferramenta auxiliar de cálculo em trabalhos de investigação e no meio educacional. Este programa, à semelhança dos anteriores, tem em conta a não linearidade das secções e a variação das propriedades mecânicas dos materiais com o aumento da temperatura. Tal como outros softwares, possibilita analisar estruturas em duas dimensões, simétricas, compostas por vários materiais. O programa permite a definição de qualquer curva de incêndio e tem em conta fenómenos como a radiação, convecção e fluxo de calor. Permite ainda considerar fenómenos como a evaporação, devido ao aumento da temperatura. A malha de elementos finitos é gerada apenas de forma automática, mas permite adotar diferentes tipos de elementos, de forma a permitir uma melhor convergência. Os resultados podem ser obtidos em qualquer região do modelo e são facilmente adquiridos, permite ainda traçar gráficos de tempo-temperatura para vários nós e linhas isotérmicas e campos de temperatura num determinado instante (sp@, 2008).
- VULCAN: este programa, desenvolvido pela Vulcan Solutions Ltd, da universidade de Sheffield em Inglaterra, é um programa de elementos finitos que permite modelar a três dimensões o comportamento de edifícios porticados com elementos mistos. O processo de análise tem em conta a não linearidade geométrica de todos os elementos envolvidos no modelo (vigas, pilares e lajes), as ações aplicadas e ações de membrana na laje. Este programa é dotado ainda das curvas tensão-extensão e as características de expansão térmica são incorporadas em função da temperatura para o aço e betão, com distribuição não uniforme de temperaturas. Este programa foi desenvolvido com o intuito de estudar

o comportamento ao fogo de edifícios, permitindo definir lajes mistas através do conceito de rigidez efetiva e o recurso a ligações semi-rígidas, assim como criar interação parcial entre as ações de aço e as lajes. Ao contrário dos outros programas semelhantes, este destaca-se pela facilidade de utilização e pela rapidez de cálculo. Os resultados obtidos foram validados e comparação com os ensaios desenvolvidos pelo BRE, em Cardington, Inglaterra (vulcan-solutions@, 2008).

Outros programas permitem análises de estruturas a elevadas temperaturas, tais como

- Bofire, BRANZ-TR8, CMPST, COMPSL, FASBUS, HSLAB, SAWTEF, SISMEF, STA, STELA, TCSLBM, THELMA, TR8, WALL2D.

4.3 Modelação segundo o software ABAQUS

4.3.1 Considerações gerais sobre o programa

O software ABAQUS, utilizado na presente dissertação, é um programa de simulação numérica de elementos finitos. Este programa é atualmente uma ferramenta de cálculo bastante eficiente na análise do comportamento térmico e mecânico de estruturas em situação de incêndio.

A escolha deste programa foi motivada pelos bons resultados obtidos em problemas semelhantes, pelo conhecimento adquirido em trabalhos anteriores quer na área de Engenharia Civil quer em outras áreas científicas. Procede-se então a uma breve descrição sobre o programa.

O programa ABAQUS subdivide-se em três secções principais:

- ABAQUS/CAE: é uma interface gráfica do software, onde é possível desenvolver os modelos geométricos, definir diferentes materiais, bem como realizar a montagem peça a peça do modelo. Nesta secção são estabelecidas diferentes sequências de análise, às quais são atribuídos diferentes tipos de carregamento e condições de fronteira, estes podem variar ao longo do processo de cálculo, conforme o estabelecido. Ainda é possível gerir as simulações a efetuar e visualizar os resultados. Esta secção encontra-se organizada em módulos: o módulo “PART” permite definir a geometria das várias peças que constituem o modelo; o módulo “PROPERTY” permite definir as propriedades mecânicas dos materiais, o módulo “ASSEMBLY” permite estabelecer a posição que cada "part" ocupa na estrutura, ou seja permite fazer a montagem do modelo, o módulo “STEP” permite definir a sequência da análise pretendida, o módulo "INTERACTION" permite definir a interação entre as diferentes "parts" que constituem o modelo assim como as superfícies onde atua a ação térmica, o módulo “LOAD” permite definir as condições de contorno e os módulos de aplicação das diferentes cargas, o módulo “MESH” permite gerar a malha de elementos finitos para cada elemento do modelo e o módulo “JOB” permite dar início, finalizar e monitorizar o processo de cálculo.

- *ABAQUS/Standard*: é o módulo de solução mais geral do software, capaz de resolver problemas lineares e não lineares de forma implícita, ou seja, através da resolução de um sistema de equações em cada incremento do processo de solução, envolvendo processos estáticos, dinâmicos ou térmicos. A solução baseia-se numa matriz de rigidez do modelo e trata-se de uma solução exata.
- *ABAQUS/Explicit*: é um módulo que está mais direcionado para a solução de problemas dinâmicos ou que envolvam uma mudança de condições fronteira. Enquanto o *Standard* faz iterações para determinar a solução, o *Explicit* determina a solução sem iterações, através da previsão com um método de integração explícita, do próximo estado cinemático a partir do estado obtido no incremento anterior. Requer menor esforço computacional, porém é um método condicionalmente estável, apresentando maiores problemas de convergência do que o *Standard*.

4.3.2 Módulo "PART"

Este módulo permite criar, gerir e editar “parts” que constituem o modelo numérico e que vão ser utilizadas posteriormente no módulo “Assembly”. É nesta secção que são definidas todas as características geométricas do elemento assim como um conjunto de regras que definem o seu comportamento. Este módulo funciona como uma biblioteca onde é possível armazenar uma série de elementos criados tendo em vista a constituição do modelo.

Para criar uma “part” é necessário definir as seguintes características:

- “Modeling Space”, aqui é possível definir a dimensão em que se vai criar a “part”, em duas ou três dimensões.
- “Part Type”, aqui estão disponíveis três opções: “Deformable”, “Discrete Rigid”, “Analytical rigid” e “Eularian”.
- “Base Feature”, em relação a este aspeto estão disponíveis as seguintes opções, “solid”, “shell”, “wire” e “point”.

4.3.3 Módulo "PROPERTY"

O módulo “PROPERTY” permite criar e definir propriedades térmicas e mecânicas, para diferentes tipos de materiais. À semelhança do módulo “PART” permite também definir a geometria de secções, atribuir orientações, normal e tangencial às diferentes “part”.

4.3.4 Módulo "ASSEMBLY"

Este módulo é utilizado para organizar e montar o modelo, ou seja permite definir a posição de que cada “part” ocupa em relação às restantes e a um sistema de coordenadas globais. Este pode

conter diversas "part", contudo apenas um tipo de montagem. O posicionamento de cada "part" é conseguido por aplicação sequencial de restrições, através de relação entre faces, arestas, pontos, ou apenas por translações ou rotações.

É possível criar instâncias dependentes e independentes, mantendo estas associadas com a "part" original. Por defeito o Abaqus/CAE cria instâncias dependentes, este tipo de instâncias apenas podem sofrer alterações, como em relação à dimensão da malha, tipo de elementos, partições e alterações da secção, no módulo parte. Realizada esta alteração no módulo parte, todas as instâncias replicadas a partir dessa parte vão sofrer o mesmo tipo de modificações.

As instâncias independentes são alteradas apenas no módulo de montagem. Comparativamente, apesar das instâncias independentes serem mais práticas, pois permitem a alteração das mesmas no módulo de montagem, as instâncias dependentes envolvem menor esforço de cálculo e no caso de haver "part" dando origem a várias instâncias é preferível alterar a "part" apenas uma vez no módulo "PART", pelo que as instâncias dependentes são preferíveis.

Este módulo permite também a criação de superfícies e conjuntos que permitem uma fácil aplicação de interações, condições de fronteira e cargas.

4.3.5 Módulo "STEP"

O módulo step permite criar e definir os diferentes tipos de análise (elasto-estática, estática dinâmica, difusão de massa, térmica, ou de interação entre ambos). Para cada modelo é possível definir e criar uma ou várias etapas de análise. O facto de as etapas serem sequenciais, permite estabelecer mudanças nas variações de carga e de fronteira do modelo, alterar a interação de peças entre si, remoção ou adição de instâncias constituintes do modelo e outras alterações que podem ocorrer no modelo no decorrer da análise. Através desta análise deste módulo é possível ainda alterar processos de análise e saída de dados. O software escreve a saída de resultados a partir da análise da base de dados de saída, sendo possível o utilizador especificar a sua saída através da criação de pedidos, que serão gerados para análises de etapas posteriores.

O primeiro "step" a ser criado em todos os modelos é o inicial. Neste "step" encontram-se definidas as condições de fronteira e interações que são aplicadas na fase inicial da análise do modelo. O "step" inicial é seguido por um ou vários outros "step", que podem ser de temperatura, aplicação de cargas etc. O tipo de análise realizada pode ser alterada de "step" para "step".

Neste módulo, o programa oferece a possibilidade de o utilizador resolver problemas geometricamente não-lineares, através da ativação do parâmetro de não-linearidade geométrica (*NLGEOM=ON), desta forma tem em conta o efeito de grandes deslocamentos. Caso se pretenda ter em consideração os deslocamentos infinitesimais, este parâmetro deverá ter de ser desativado (*NLGEOM=OF).

4.3.6 Módulo "INTERACTION"

O presente módulo possibilita a definição de interações, do tipo mecânicas e térmicas. Estas interações podem ser estabelecidas entre as diferentes instâncias do modelo ou entre a superfície do modelo e a sua vizinhança. Neste módulo é possível definir características ao nível de montagem, como no caso dos conectores e dos elementos viga, fissurar regiões do modelo, definir molas e amortecedores entre dois pontos do modelo ou entre um ponto do modelo e o solo, definir a inércia (ponto de massa, inércia de rotação e capacidade de calor) para regiões do modelo.

Uma vez que as interações podem sofrer alterações consoante cada etapa, estas encontram-se associadas a diferentes steps de análise em que se pretende que estejam ativas.

4.3.7 Módulo "LOAD"

Através deste módulo é possível definir e gerir as condições de carregamento, condições de fronteira, campos e casos de carga. À semelhança dos módulos anteriores, as condições estabelecidas são associadas a diferentes etapas de cálculo. Através da ferramenta "amplitude" é possível estabelecer no presente módulo dependências de tempo ou frequências que podem ser aplicadas às condições estabelecidas.

4.3.8 Módulo "MESH"

O módulo "Mesh" contém ferramentas que tornam possível definir o tipo de elemento finito e o modo de geração de malhas de elementos finitos em partes do modelo ou em montagens criadas com o ABAQUS/CAE. As diferentes ferramentas disponíveis neste módulo permitem especificar desde a dimensão da malha, realizar um controle da malha, especificar a forma do elemento (triangular, quadrático ou hexagonal) assim como criar malhas diferentes para elementos diferentes e diferentes zonas do mesmo elemento. Todos estes elementos podem ser alterados ao longo do modelo sendo automaticamente regenerados.

4.3.9 Módulo "JOB"

Após a elaboração do modelo de elementos finitos e da introdução de todas as informações necessárias no software, a fase seguinte é executar a resolução do modelo. No módulo "Job" é possível criar um trabalho e submeter a sua resolução ao ABAQUS/Standart ou ao ABAQUS/Explicit, e monitorizar o seu progresso. Este módulo permite realizar uma análise por etapas, sendo esta peculiaridade uma vantagem para modelos que necessitem de efetuar uma análise passo a passo mais complexa. Esta característica revela ser extremamente útil uma vez que prevê por exemplo erros que possam surgir no decorrer da análise por ele efetuada. É possível examinar os resultados obtidos num "step", antes de prosseguir para o "step" anterior.

4.3.10 Módulo "VISUALIZATION"

Este módulo permite acompanhar a evolução do processo de cálculo. Aqui é possível acompanhar a evolução da temperatura, deslocamentos, forças, tensões e extensões ao longo do tempo, nos diferentes "steps" da análise em todos os nós da malha de elementos finitos. Por fim é possível extrair os resultados para um ficheiro "txt" e importá-los para o "excel".

4.4 Modelo Numérico

4.4.1 Considerações gerais do modelo

Neste subcapítulo é explicitada a metodologia seguida na execução do modelo numérico, bem como todos os pormenores adotados na modelação da ligação mista.

O modelo apresentado é um modelo complexo, com um grande número de nós, que envolve a interação entre diversos elementos de materiais diferentes, conduzindo inevitavelmente a um processo de cálculo moroso. Com o intuito de reduzir o tempo de cálculo, foram adotadas algumas simplificações, a principal foi a redução do modelo a metade, uma vez que este era simétrico em relação a um plano vertical, o que diminuiu consideravelmente o tempo de cálculo (Figura 4.1). Os deslocamentos do modelo para fora do plano (direção X da Figura 4.1), da coluna, viga, laje mista e conectores foram restringidos, uma vez que esses deslocamentos correspondiam ao plano de simetria da ligação. As condições de fronteira impostas no topo da coluna foram: deslocamento na direção-y e na direção-x, e restrição à rotação em relação ao eixo dos yy. Na base da coluna foram restringidos os deslocamentos nas três direções (x,y,z) e a rotação na direção y. Desta forma foi possível simular o tipo de ligação da coluna ao exterior do modelo experimental.

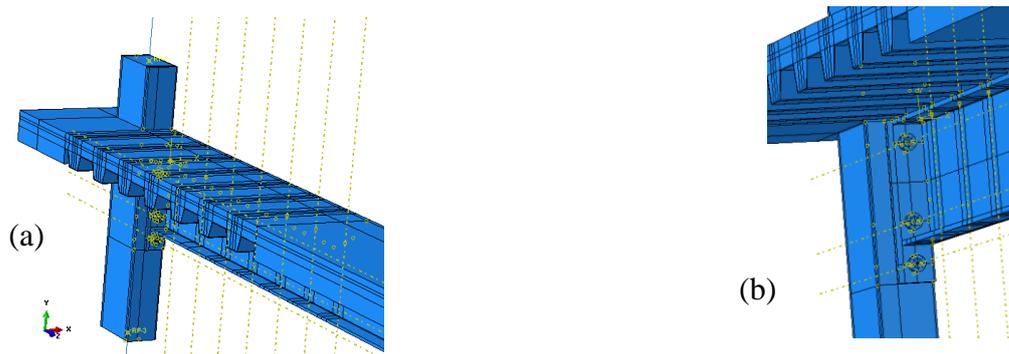


Figura 4.1 - Modelo Numérico: (a) modelo geral e (b) pormenor da ligação.

No total foram criadas dez peças: chapa de topo, coluna/HEA260, coluna/betão entre os banzos, conectores, parafusos, chapa colaborante, laje de betão, viga/IPE270, macaco e parte superior e inferior da coluna.

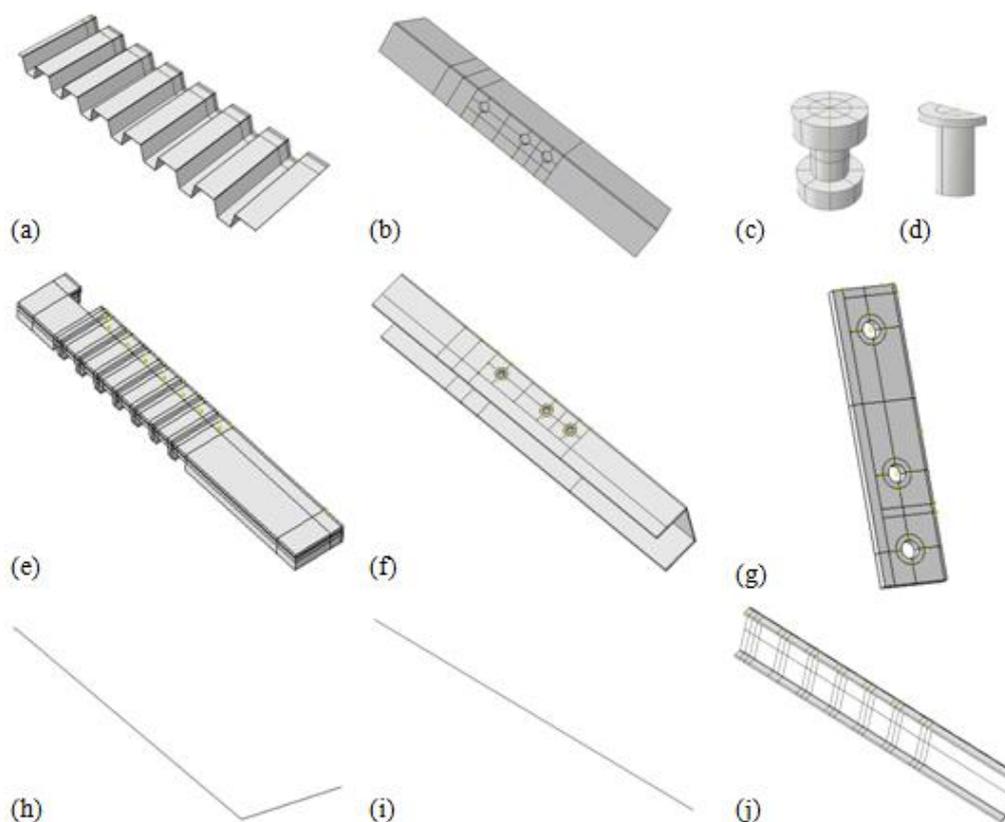


Figura 4.2 - "Parts": (a) chapa colaborante; (b) betão entre os banzos; (c) parafuso; (d) conector; (e) laje de betão; (f) coluna metálica; (g) chapa de topo; (h) macaco hidráulico; (i) simulação da zona inferior e superior da coluna; (j) viga metálica.

4.4.2 Modelo à temperatura ambiente

A maioria dos elementos de aço e betão à temperatura ambiente, foram modelados com elementos sólidos, tridimensionais, com oito nós de integração reduzida (C3D8R), com três graus de liberdade por nó, referentes às translações nas três direções X, Y e Z (coordenadas globais). Os parafusos M20 foram modelados com um diâmetro $d=20\text{mm}$, equivalente a uma secção resistente A_s (245mm^2), a folga entre o parafuso e a coluna era de 2 mm. Os parafuso e as porcas foram simulados como uma peça única, de forma circular, tendo sido desprezada a rosca. De forma a reduzir o número de nós do modelo e deste modo poupar volume de cálculo, a parte superior e inferior da coluna, foram modeladas com recurso a elementos do tipo "wire" (B31), estes elementos têm apenas dois pontos de integração. Para aplicar a carga foi concebido uma parte do tipo "truss" (T3D2) ou seja elemento tridimensional tipo treliça com dois nós de liberdade. Este último elemento vai funcionar no modelo como se de uma treliça se tratasse, apenas vai estar sujeito a esforço axial. A junção entre a zona central da coluna e estes elementos foi estabelecida com recurso à função do ABAQUS "Coupling", esta função permitiu concentrar o comportamento da coluna central a um único ponto, ao qual se acoplou o elemento "wire", através da restrição de deslocamentos e rotações, estes dois elementos passaram a

funcionar como se de um só se tratasse (Figura 4.3). Já na ligação entre o macaco e a viga, recorreu-se novamente à função "coupling", mas desta vez apenas os deslocamentos foram restringidos, assim a ligação funcionava como uma rótula.

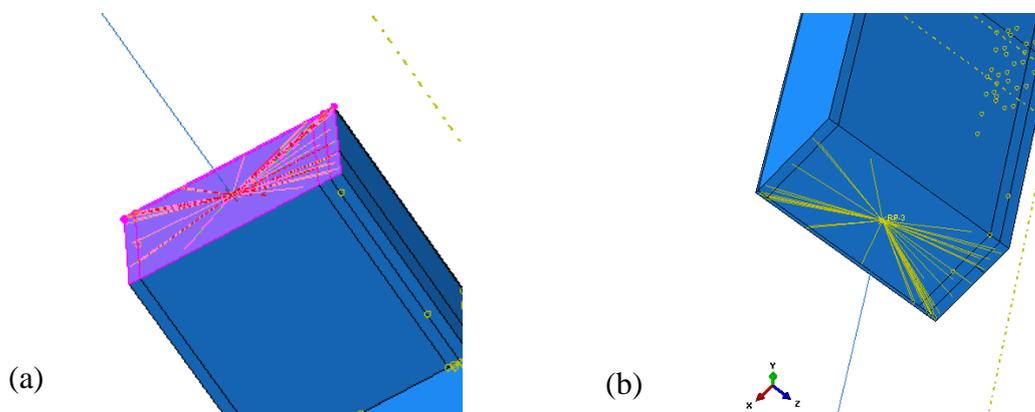


Figura 4.3 - Pormenor do Coupling (a) redução dos pontos da coluna central a um ponto único e (b) união de todos os pontos da coluna central ao elemento do tipo "wire".

Ao conceber o modelo, o processo de discretização é fulcral. A escolha da dimensão da malha é feita tendo em consideração as regiões do modelo que se pretendem analisar com maior detalhe e o tipo de geometrias discretizadas. Esta etapa na modelação, vai ser condicionante no processo de cálculo, é dela que depende a convergência ao longo das iterações. Se por um lado quanto mais refinada for a malha, melhor é o processo de convergência e maior é o leque de resultados retirados de uma região, por outro, pode conduzir a um processo de cálculo extremamente lento, pelo que é fundamental escolher quais as regiões exatas em que é necessário usar malhas de dimensões inferiores. Neste modelo, apesar de o ABAQUS ter a opção de geração automática de malhas, foi necessário gerar a malha de forma manual. Primeiro porque se tratava de um modelo com elevado número de nós e este deveria ser diminuído o tanto quanto possível e segundo porque as zonas discretizadas envolviam superfícies curvas, sendo necessário definir para cada partição realizada em cada "part" o número de "seeds" a adotar.

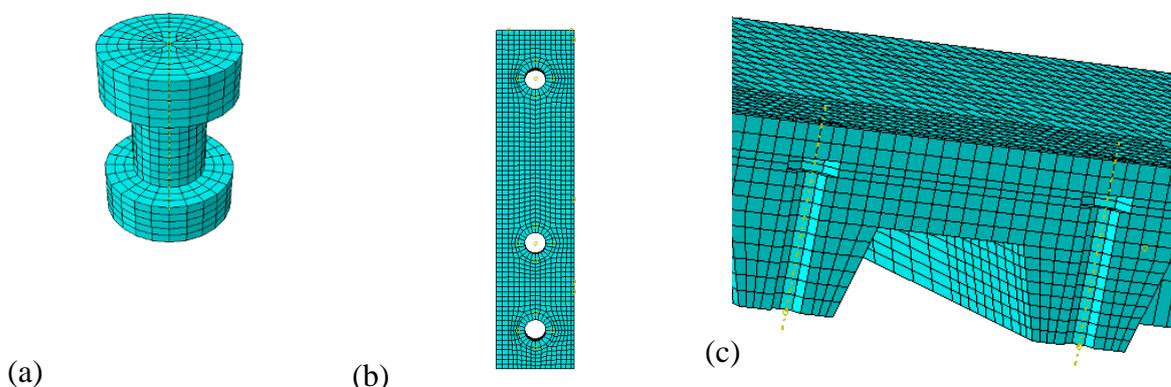


Figura 4.4 - Pormenor da discretização de elementos (a) parafuso, (b) chapa de topo e (c) laje

Neste modelo foram criadas interações do tipo "tie", "surface-to-surface" e "node-to-surface". As interações do tipo "tie" foram adotadas nas regiões em que se previa que os nós das partes

em contacto viessem a ter os mesmos graus de liberdade, este tipo de restrição tem a vantagem de diminuir significativamente os problemas de convergência. Os contactos deste tipo foram adotados para os seguintes pares: cabeça do parafuso/chapa-de-topo, chapa-de-topo/viga, base dos conectores/viga, base da cabeça dos conectores/laje de betão, na coluna - betão/perfil metálico e chapa colaborante/viga.

As interações definidas do tipo "node-to-surface" (cabeça do parafuso/coluna de aço, cabeça do parafuso/chapa de topo, corpo do parafuso-furo) foram utilizadas por se tratar de regiões muito pequenas em contacto, facilitando assim a convergência. A interação definida entre os elementos que tinham uma área de contacto superior (chapa de topo/coluna, chapa colaborante/laje de betão e zona de contacto entre a coluna/laje de betão) era do tipo "surface-to-surface". Estes dois tipos de interação obrigam à definição de uma superfície "master" e uma superfície "slave" entre as duas "part" em contacto, estas são definidas de acordo com o nível de discretização e do material e da sua rigidez (a superfície "master" deverá pertencer ao modelo menos discretizado e mais rígido). Para estes dois tipos de contacto foi definida a opção "penalty" com um coeficiente de fricção de 0,2, para modelar as propriedades de contacto, principalmente na caracterização do comportamento "tangencial" e "normal".

Uma vez que o modelo era composto por elementos diferentes, de materiais diferentes com propriedades específicas, foram criados materiais diferentes. No total foram criados seis materiais, sendo eles para os perfis metálicos e chapa de topo (S355), para a chapa colaborante (S500), para os conectores (S400), parafusos (M20), para o betão (C20/25), para a zona superior e inferior da coluna mista de aço-betão, uma vez que estas se encontravam representadas por uma "part" única, com elementos do tipo "wire", à qual não era possível representar dois materiais (betão e aço), optou-se por criar um material resultante da homogeneização do aço em betão. O mesmo material foi aplicado ainda à "part" denominada por macaco hidráulico, que tinha por fim simular o sistema de aplicação de carga. As propriedades mecânicas dos perfis metálicos, da chapa colaborante, dos conectores, parafusos, varões e betão, foram determinadas experimentalmente (Anexo A). Para cada material foram definidas propriedades elásticas, plástica e massa volúmica, com exceção dos elementos "wire" e "truss", para os quais não foram definidas propriedades plásticas, uma vez que não se previa que o comportamento destes ultrapassasse o limite elástico.

Os "step" criados para a realização da análise da ligação à temperatura ambiente foram o "step inicial" e o "step load". Uma vez que as interações se encontram associadas a cada "step", no "step inicial" para definidas todas as interações de contacto relatadas anteriormente, já no "step" ação mecânica foi aplicada uma carga no macaco em controlo de deslocamento a 0.1mm/s, à semelhança do que se tinha feito no ensaio experimental (Figura 4.5). Neste modelo os efeitos de não linearidade geométrica foram tidos em conta (NLGEOM=ON).

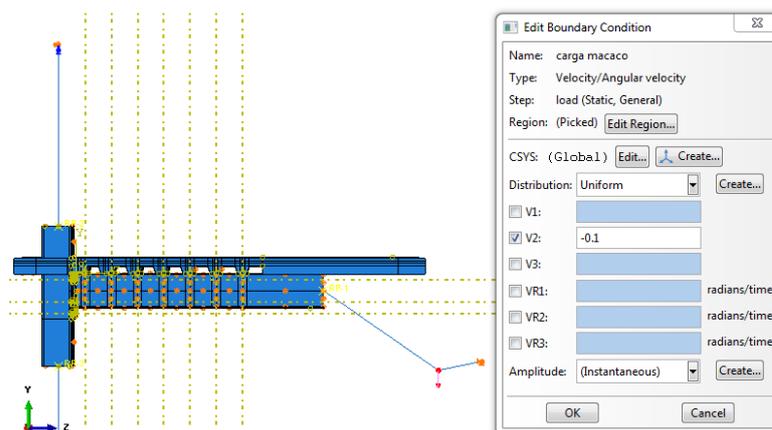


Figura 4.5 - Aplicação da ação mecânica.

Após ter sido criado o modelo, este foi submetido a análise.

4.4.3 Modelo a temperaturas elevadas

Este modelo foi criado semelhança do anterior. As principais diferenças encontram-se no tipo de elementos utilizados nas malhas, no facto de se ter utilizado interações térmicas e na criação de um "step" adicional, o "step" da ação térmica.

Os elementos utilizados na definição da malha de elementos finitos eram do tipo C3D8T, estes são definidos como elementos hexaédricos com oito nós de liberdade, caracterizados por terem pontos de integração com três graus de liberdade por nó, correspondentes às translações e rotações nas direções X,Y e Z, gerando seis componentes de tensão, diferem dos primeiros elementos por terem em conta a ação da temperatura. Nos elementos do tipo "wire" (pilar inferior e superior) e "truss" (macaco), não foi tida em conta a ação da temperatura, uma vez que estas regiões não estiveram sujeitas ao aumento da temperatura no modelo inicial.

As ações da temperatura foram definidas com recurso a dois tipos de superfície "film condition" e "surface radiation" correspondendo respetivamente à transferência de calor por convecção e radiação. As interações do tipo radiação "surface radiation" são definidas pela evolução da temperatura do gás circundante ao sólido, da emissividade do material em questão, já a convecção é definida pela quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa por convecção uma superfície de área unitária do elemento, em função da diferença entre a temperatura global do gás envolvente e da superfície. Os coeficientes de emissividade foram definidos de forma a refletir os resultados obtidos experimentalmente. A transferência de calor por convecção "surface film condition" permite definir o aquecimento ou arrefecimento devido à convecção dos fluidos que cercam a superfície do modelo.

No modelo, uma vez que existiam diferentes elementos a diferentes alturas com diferentes tipos de exposição térmica, os coeficientes de emissividade e os coeficientes de convecção aplicado variaram de zona para zona (Quadro 4.1), tendo em vista o melhor ajuste ao modelo experimental, nem sempre foi possível cumprir o estipulado na EN1992-1-2(2010), que indica

que o coeficiente de convecção deverá ser de 25 W/m²K para zonas expostas e 4 W/m²K para zonas não expostas e uma emissividade de 0,7. A curva de incêndio aplicada ao modelo, de forma a simular o aquecimento dos gases do meio envolvente, foi a registada nos ensaios experimentais, no interior do forno. O ABAQUS permite ainda definir uma perda de calor entre os materiais sólidos em contacto, através da introdução de um coeficiente de condutância térmica (200 W/m.K).

As propriedades mecânicas foram definidas em função da temperatura. No caso do material aço a elevadas temperaturas, foram consideradas de acordo com o fornecido pelo EN 1993-1-2 (2010), já o betão seguiu a EN 1992-1-2 (2010). As propriedades estabelecidas para cada material foram a condutibilidade térmica, o calor específico, a expansão térmica, elasticidade, a plasticidade, a massa volúmica e extensão térmica. Estas propriedades encontram-se expostas no anexo B desta tese.

Quadro 4.1 - Coeficientes utilizados na análise térmica

	Coeficiente de Radiação	Coeficiente de Convecção [W/m ² K]
Laje (superfície não exposta)	0,4	4
Chapa colaborante	0,6	18
Chapa de topo	0,6	18
Viga (banzo superior)	0,4	18
Viga (banzo inferior)	0,7	18
Viga (alma)	0,7	18
Parafuso (1)	0,04	18
Parafuso (2)	0,5	18
Parafuso (3)	0,7	18
Coluna	0,7	20

Nesta análise foram criados três "step", o "step" inicial, o "step" análise térmica e o "step" carga. Esta análise consistiu numa primeira fase em submeter o modelo a uma curva de temperaturas igual à obtida no forno através de ensaios experimentais até aos 600°C e nesse instante submeter a ligação a um carregamento mecânico com recurso ao mesmo tipo de sistema utilizado no sistema anterior. Também neste modelo se teve em conta os efeitos da não linearidade geométrica.

Este modelo foi também ele submetido a análise e os resultados obtidos apresentam-se no capítulo seguinte.

4.5 Resultados

4.5.1 Ensaios à temperatura ambiente

Ao comparar os resultados numéricos com os experimentais, concluiu-se que a rigidez deste último era ligeiramente inferior, assim como o momento resistente (Figura 4.6). Nos resultados numéricos à semelhança dos experimentais verificou-se, o destacamento dos conectores e da chapa colaborante da laje. Os ressaltos observados neste gráfico corresponderam aos instantes em que os parafusos atingiam uma tensão média igual à tensão de rotura nos parafusos observada no modelo experimental.

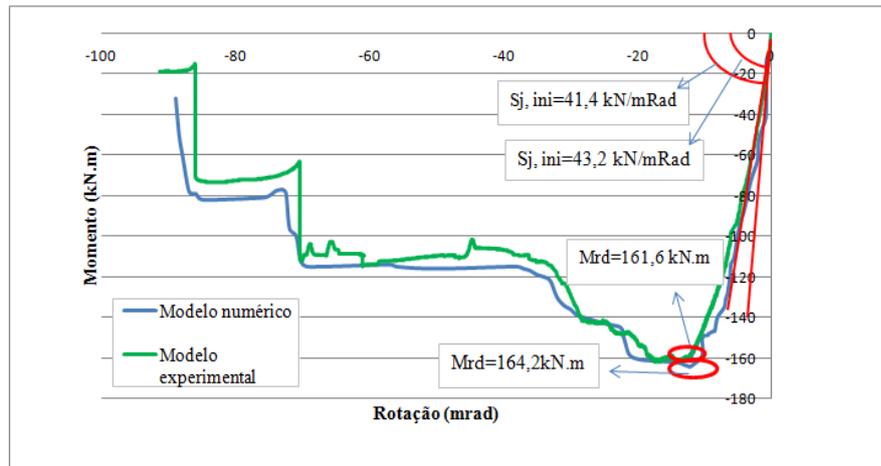


Figura 4.6 - Comparação da curva momento-rotação: experimental vs. numérico.

Uma vez que os deslocamentos da viga foram restringidos no eixo dos X, como referido anteriormente, não ocorreu torção da viga. Observou-se que os parafusos mais tracionados eram os que pertenciam à linha superior P1. Já na linha inferior observou-se que os parafusos sofreram compressão P3 (Figura 4.7 (a)). Ao comparar os resultados da análise experimental com a análise numérica concluiu-se que as extensões obtidas eram muito semelhantes, revelando haver uma boa correlação de resultados (Figura 4.7(b)).

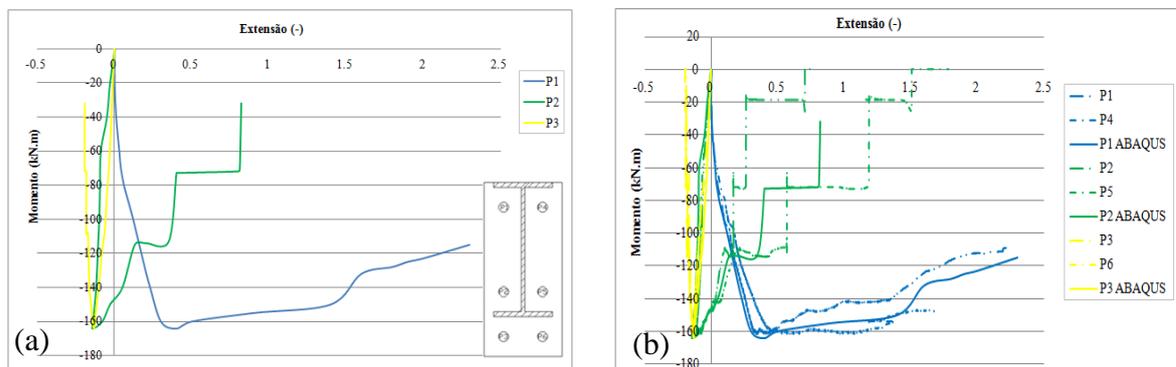


Figura 4.7 - Extensões nos parafusos: (a) numérica e (b) numérica vs. experimental.

4.5.2 Ensaios a temperaturas elevadas

Da comparação dos ensaios experimentais com o modelo numérico, concluiu-se que no modelo numérico o momento resistente era superior, esta discrepância deve-se ao facto de no modelo numérico a ligação não ter sofrido um historial de carregamento cíclico, assim as propriedades mecânicas dos materiais apenas sofreram degradação devido à ação da temperatura. Na análise numérica a ligação exibiu uma rigidez superior e conseqüentemente uma rigidez superior à observada no ensaio experimental (Figura 4.8(a)). Da análise da combinação dos esforços $M-N^+$, concluiu-se que estes aumentavam linearmente, à semelhança do que aconteceu na análise experimental, no modelo numérico o momento fletor registado foi superior, assim como o esforço axial (Figura 4.8).

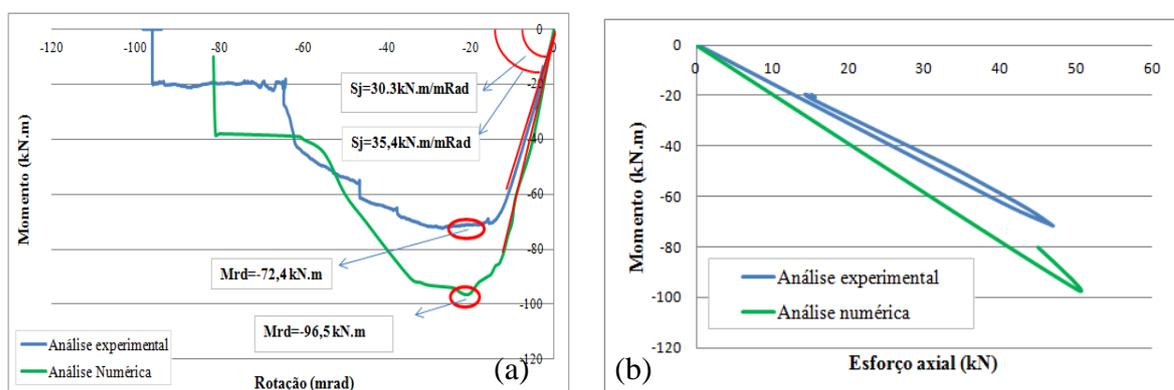


Figura 4.8 - Análise experimental vs. análise numérica: (a) curva momento-rotação e (b) curva momento-esforço axial.

A distribuição da temperatura obtida através da análise numérica, não foi coerente com a que resultou da análise experimental. Na análise numérica, os parafusos que registaram as temperaturas mais elevadas, encontravam-se na última fila (T3), observou-se ainda que o gradiente térmico da temperatura diminuía em altura, ou seja a temperatura verificada no parafuso T3 era superior à verificada no parafuso T2 e esta, por sua vez superior à registada no parafuso T1 (Figura 4.9(a)). Estes resultados devem-se ao facto de o parafuso T3 estar exposto a radiação muito superior à dos outros dois (Figura 4.10). Esta ordem de evolução de temperaturas foi inversa às registadas no ensaio experimental, onde se observou que o parafuso mais aquecido era o T1 e o menos aquecido o T3. No modelo experimental, a variação da convecção em altura era muito superior quando comparada ao modelo numérico, levando a que ocorresse uma grande concentração de calor na região superior da chapa de topo, e pelo facto de o aquecimento da ligação ser condicionado pelas características do forno (resistências nas paredes do forno e a ligação estar situada na zona de junção dos dois módulos do forno, não estando diretamente exposta à radiação, o que levou a que não fosse diretamente aquecida, estando a evolução da temperatura na mesma, praticamente dependente do efeito de convecção).

A distribuição da temperatura na viga, obtida através do ABAQUS, aproximou-se da temperatura registada no modelo experimental. A temperatura mais elevada foi registada no

banzo inferior e a mais baixa no banzo superior (Figura 4.9 (b)). Estes valores devem-se ao facto de o banzo superior estar em contacto com a laje, permitindo a dissipação de calor e o facto de a laje provocar um efeito de sombreamento neste. A temperatura é mais elevada no banzo inferior porque este se encontra mais exposto.

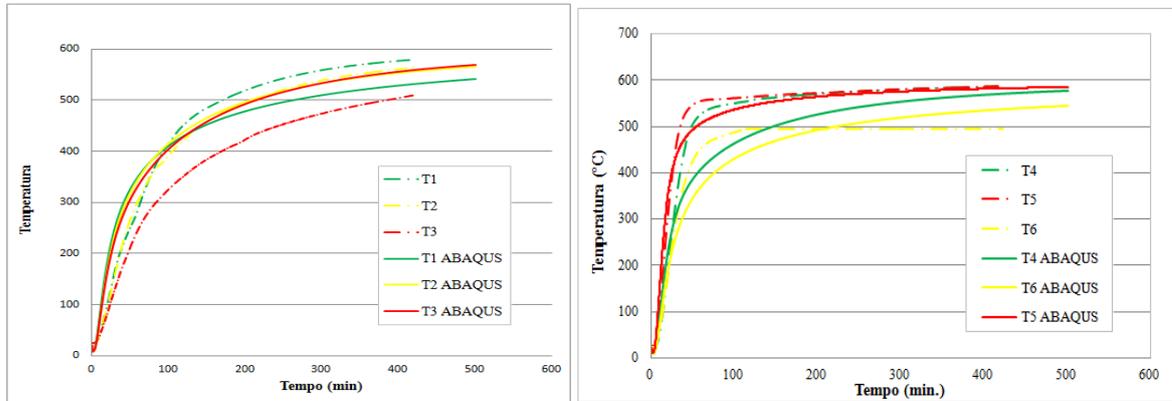


Figura 4.9 - Evolução da temperatura na ligação (a) parafusos e (b) viga: experimental vs. numérico.

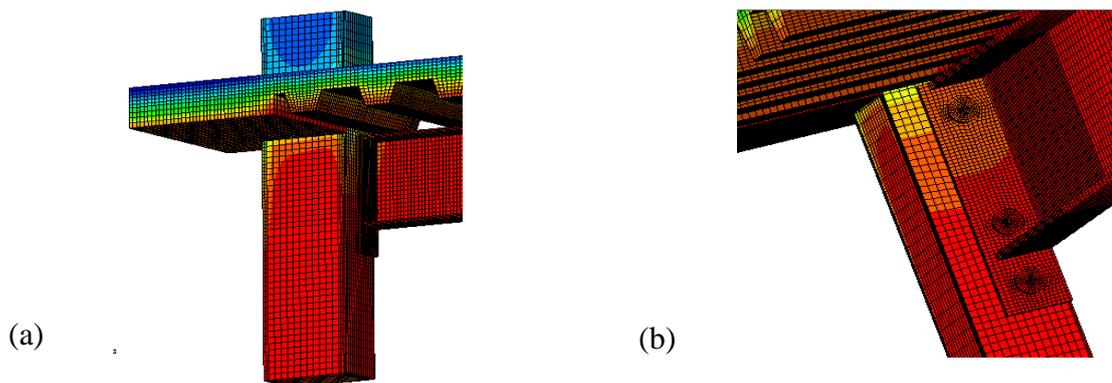


Figura 4.10 - Evolução da temperatura retirado do ABAQUS: (a) vista geral e (b) pormenor da ligação

Na laje, concluiu-se que embora a distribuição da temperatura seja semelhante, esta evolui muito mais rapidamente no modelo numérico do que no modelo experimental. Esta discrepância é justificada pelo facto de no modelo experimental ter ocorrido fissuração do betão e a água existente neste ter evaporado e migrado para a superfície não exposta. A água presente no betão ao evaporar vai fazer com que a temperatura na laje suba mais lentamente. Com o decorrer do tempo a temperatura acaba por se aproximar do modelo numérico (Figura 4.11).

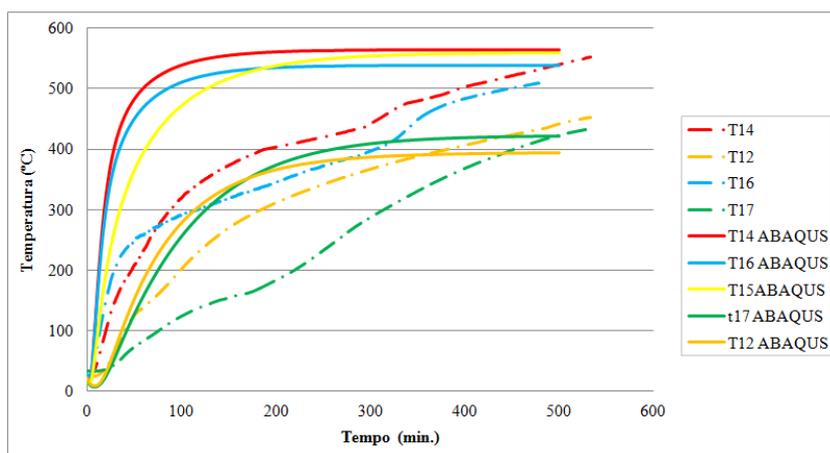


Figura 4.11 - Evolução da temperatura na laje.

4.6 Evolução da temperatura em lajes mistas - comparação dos resultados obtidos numericamente pelo ABAQUS com os analiticamente com o método simplificado do anexo D da EN 1994 - 1 - 2

O Anexo D da EN1994-1-2 (2010), apresenta uma metodologia para o cálculo da evolução da temperatura em lajes mistas com chapa de aço perfiladas sem proteção ao fogo, sujeitas à curva de incêndio padrão, ISO 834, na face inferior. Esta metodologia de cálculo é aqui discutida e comparada com resultados numéricos obtidos através do programa de elementos finitos ABAQUS.

O modelo numérico desenvolvido consistiu na modelação de uma laje mista com chapa nervurada, sujeita à curva de incêndio padrão na face inferior. Os elementos utilizados na modelação do betão e da chapa colaborante eram do tipo DC3D8, elementos tridimensionais com oito nós de integração e transferência de calor, já os utilizados para modelar a malha de armaduras eram do tipo DC1D2 com elementos com difusão de massa ou transferência de calor e dois nós de integração.

Nesta análise apenas foram definidas propriedades térmicas para os materiais, uma vez que a finalidade deste estudo era determinar a evolução da temperatura numa laje mista e compará-la com a evolução obtida pelo método da EN1994-1-2 (2010). À semelhança do modelo anterior, as propriedades térmicas do material aço eram formuladas em função da temperatura de acordo com o EN 1993-1-2(2010), estas consistiam na determinação do calor específico, condutividade térmica e calor específico. Do mesmo modo foram estabelecidas as mesmas propriedades térmicas para o betão, determinadas de acordo com o EN 1992-1-2.

O método analítico sugere que a temperatura da laje, representada na Figura 4.12, seja determinada de acordo a Eq. (4.3) e a temperatura nos varões de acordo com a Eq. (4.4). Estas duas equações dependem do fator de geometria da nervura (Eq. (4.1)) e do fator de vista (Eq. (4.2)), sendo este a fração da energia radiada de forma difusa que emana de uma superfície e

incide na outra. Os coeficientes presentes em cada equação são estabelecidos na EN1994-1-2(2010).

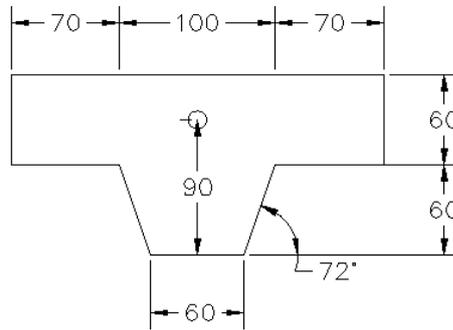


Figura 4.12 - Dimensões da laje em estudo [mm].

l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)
100	60	145	60	60

$$\frac{A}{L_r} = \frac{h_2 \left(\frac{l_1 + l_2}{2} \right)}{l_2 + 2 \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2} \right)^2}} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

$$\phi = \left(\sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 + l_2}{2} \right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2} \right)^2} \right) / l_3 \quad \text{Eq. (4.2)}$$

$$\theta_A = b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{l_3} + b_2 \cdot \frac{A}{L_r} + b_3 \cdot \phi + b_4 \cdot \phi^2 \quad \text{Eq. (4.3)}$$

$$\theta_s = c_0 + \left(c_1 \cdot \frac{u_3}{h_2} \right) + (c_2 \cdot z) + \left(c_3 \cdot \frac{A}{L_r} \right) + (c_4 \cdot \alpha) + \left(c_5 \cdot \frac{1}{l_3} \right) \quad \text{Eq. (4.4)}$$

As temperaturas obtidas pelo modelo numérico do ABAQUS foram comparadas com as calculadas através do método simplificado do anexo D da EN1994-1-2(2010). Ao cruzar os resultados (Figura 4.13), constatou-se que dos 60 aos 120 minutos, valores de resistência ao fogo aos quais o método se aplica, a curva da evolução da temperatura obtida pelos métodos numéricos foi superior à obtida pelo método analítico no caso do banzo superior e alma da laje, levando a concluir que a norma não se encontra do lado da segurança, levando a uma avaliação errónia do momento resistente da laje. A discrepância de valores observada foi de cerca 20°C,

valor que poderia ser superior se o termo de comparação utilizado fosse um modelo experimental em vez de numérico, uma vez que os coeficientes de convecção iriam sofrer uma variação em altura muito superior. À semelhança dos resultados obtidos na laje, os resultados da temperatura registados nos varões através do programa computacional apenas se mostraram conservativos para valores de temperatura superior aos 420°C.

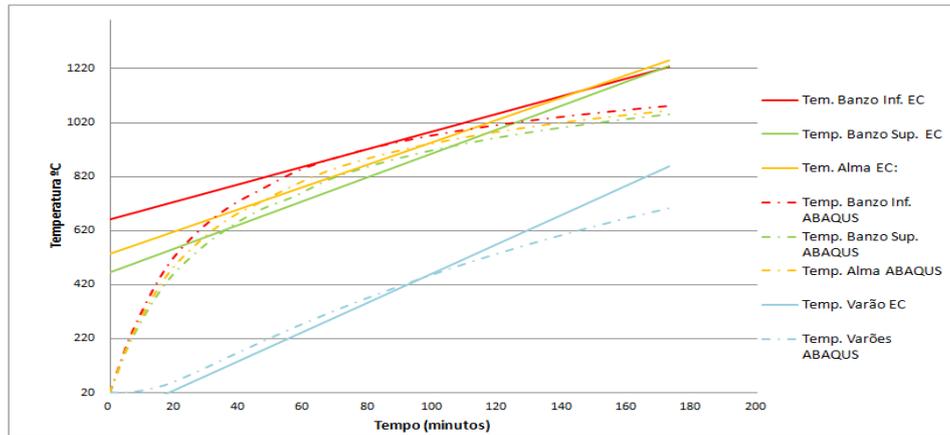


Figura 4.13 - Comparação da evolução da temperatura na laje entre o método analítico da EN1994-1-2 e numérico do ABAQUS.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

No âmbito desta dissertação foi modelada uma ligação coluna-viga mista de aço-betão em situação de incêndio, no programa de elementos finitos ABAQUS. O modelo numérico desenvolvido, foi calibrado com recurso aos resultados obtidos em ensaios experimentais realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra âmbito duma tese de mestrado integrado (Barata 2010). Este modelo representa bem o comportamento desta ligação mista ao fogo e pode agora ser utilizado para um estudo paramétrico mais completo onde se façam variar diferentes parâmetros.

Os resultados obtidos quer nos ensaios experimentais, quer numéricos foram analisados, tendo-se chegado às seguintes conclusões:

- a ação de incêndio em ligações contribui para a diminuição da resistência e rigidez;
- o modo de rotura sofre alteração quando a ligação é sujeita a temperaturas elevadas, a rotura deixa de ocorrer nos parafusos e acaba por ocorrer por plastificação da chapa de topo;
- o modelo de elementos finitos tem a capacidade de prever a resistência e a rigidez de uma ligação, quer quando esta se encontra à temperatura ambiente quer a elevadas temperaturas, quando bem calibrado;
- os modos de rotura não são visíveis no modelo numérico, mas são facilmente perceptíveis quando se procede à análise das tensões;
- a evolução da temperatura na ligação teve algumas discrepâncias relativamente ao modelo experimental, contudo é possível afirmar que o modelo numérico permite uma boa aproximação ao ensaio experimental;
- a evolução discrepância da evolução da temperatura na laje prendeu-se com o facto da migração e evaporação da água na laje não poder ser contabilizada no modelo numérico;
- a evolução da temperatura na ligação revelou algumas discrepâncias em relação ao ensaio experimental. Estas deveram-se ao facto de no modelo experimental, a ligação se situar numa zona de descontinuidade do forno, não sendo possível aquece-la diretamente. Outro motivo que justifica também as diferenças é a acumulação de calor na região superior da chapa de topo devido ao fenómeno de convecção no modelo experimental, fenómeno impossível de simular no modelo numérico.

A construção de um modelo numérico deste tipo é um processo complexo e moroso. Para além de requerer um grande domínio do programa, uma vez que implica a definição de inúmeros parâmetros diferentes, o processo de cálculo é moroso, originando muitas vezes resultados que não são satisfatórios, ou até não obter mesmo resultado nenhum.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Perante os resultados apresentados neste trabalho, julga-se ter conseguido uma boa aproximação do modelo numérico ao modelo experimental. Contudo, devido á morosidade da análise do modelo em causa, existiram diversos aspetos que deveriam ser tidos em conta e não foram considerados. Propõe-se agora, que se proceda ao desenvolvimento do modelo em causa. Este desenvolvimento passa por usar modelos mais desenvolvidos para o comportamento do betão ao fogo que prevejam o spalling, a fissuração e a evaporação da água e as alterações físicas e químicas do betão. A partir da análise dos resultados, deverá ser desenvolvido um estudo paramétrico que permita propor um método de avaliação do comportamento de ligações em situação de incêndio, mais evoluído ao atualmente existente.

De forma a contribuir para o avanço do conhecimento no domínio do comportamento de ligações viga-coluna em situação de incêndio, embora muito já se tenha feito nesta área, existem ainda alguns campos de investigação por explorar, como os que se referem a seguir:

- Estudar diferentes tipos de configurações de ligações;
- Compreender o desempenho de ligações viga-coluna, para a situação em que a viga se encontre contraventada, prevenindo a torção da mesma;
- Estudar ligações de continuidade simétricas e assimétricas com diferentes níveis de carregamento;
- Avaliar a influência dos níveis de restrição axial no comportamento da ligação;
- Determinar a influência dos diferentes ângulos de aplicação dos carregamentos na extremidade da ligação;
- Entender a capacidade, deste tipo de ligação, de dissipar energia no decorrer do ensaio/simulação numérica;
- Reavaliar quais os componentes desta ligação que tiveram um comportamento pior, e desenvolver métodos construtivos que permitam reforçar estes componentes;
- Examinar o comportamento deste tipo de ligações para a situação em que a viga e/ou ligação se encontram revestidas por um material de proteção ao fogo; ação cíclica provocadora de dano;
- Simular o comportamento da ligação ao fogo após esta ter sido sujeita a um

- Analisar as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais após estes terem sido sujeitos a carregamento cíclico e utilizar esses dados para definir propriedades dos materiais a utilizar em modelos numéricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Silva, L. S., Santiago, A.; (2004). “Behaviour of steel joints under fire loading” The second International Conference on Steel & Composite Structures, Seoul, Korea, September 2-4

Armer, G.S.T., Moore, D.B. (1994) – “Full-scale testing on complete multistory structures”, *The Structural Engineer*, vol.72, no. 2, p.30-31

Al-Jabri KS, Burgess IW, Lennon T, Plank, R.J.:(1998) “Behaviour of steel and composite beam-column connections in fire”. - *Journal of Constructional Steel Research.*, Vol. 46, pp1-3

Cooke, G.M.E., Latham, D.J (1987). – “The inherent fire resistance of a loaded steel framework”, *Steel Construction Today*, no.1,1987 pp.49-58.

Lawson, R.M.(1990) – “Behaviour of steel-beam-to-column connections in fire”, *The Structural Engineer*, vol. 68, no. 14, pp. 263-271.

Armer, G.S.T., Moore, D.B. (1994) – “Full-scale testing on complete multistory structures”, *The Structural Engineer*, vol.72, no. 2, pp.30-31

Leston-Jones, L.C., Burgess, I.W., Lennon, T., Plank, R.J. (1997) – “Elevated-temperature moment-rotation tests on steelwork connections”, *Proc. Inst. Civil Eng., Structures & Buildings*, vol.122, pp. 410-419.

Al-Jabri, K.S., Lennon, T., Burgess, I.W., Plank, R.J. (1998) – “Behaviour of steel and composite beam-column connections in fire”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol.46, no. 108, pp 1-3.

Liu, T.C.H., Fahad, M.K., Davies J.M. (2002) – “Experimental investigation of behaviour of axial restrained steel beams in fire”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol.58, pp 1211-1230.

Spyrou, S., Davidson, J.B., Burgess, I., Plank, R., (2004a) – “Experimental and analytical investigation of the “compression zone” components within a steel joint at high temperature”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol.60, pp.841-865.

Spyrou, S., Davidson, J.B., Burgess, I., Plank, R., (2004b) – “Experimental and analytical investigation of the “tension zone” components within a steel joint at high temperature”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol.60, pp.867-896.

Yu, I.W.H., Burguess, J.B., Davinson, R. J., Plank, R., (2008) – “Tying capacity of web connections in fire, Part 1: Test and finite element simulation”, *Engineering Structures*, vol. 32, no. 3, pp 651 – 663.

Dai, X.H., Wang, Y.C., Bailey C.G. (2009) - "An experimental study of structural behaviour of joints in restrained steel frames in fires." In: International conference, Application of structural fire design. Praga , República Checa

Santiago, A., Silva, L.S., Vaz, G., Real, P. V., Lopes, A. G. (2008)– “Experimental investigation of the behaviour of a steel sub-frame under a natural fire”, *Steel and Composite Structures*, vol. 8, no.3, pp 1-22.

Li, J., Li, G., Lou, G. Chen, L. (2012) – “Experimental investigation on flush end-plate bolted composite connection in fire”, *Journal of Constructional Steel Research*, no. 76, pp 121-132.

Haremza, C., Santiago, A., Simões da Silva, L. (2013) – “Experimental behaviour of heated composite steel-concrete joints subject to variable bending moments and axial forces”, *Engineering Structures*, vol. 51, pp 151-165.

Liu, T.C.H. (1996) – “Finite element modeling of behaviour of steel beams and connections in fire”, *Journal Constructional Steel Research*, vol.36, no. 2, pp 181-199.

Block, F., Burguess, I., Davisson, B. – “Numerical and analytical studies of joint component behaviour in fire”, *Proc of Third Int. Workshop Structures in Fire*, Ottawa.

Al-Jabri, K.S. (2004) – "Component-based model of the behaviour of flexible end-plate connections at elevated temperatures", *Composite Structures*, vol. 66, pp. 215-221.

Sarraj, M., Burgess, I., Davison, J.B., Plank, R.J. (2007) “Finite element modeling of steel fin plate connections in fire”. *Fire Safety Journal*, Elsevier, vol.42, pp 408-415.

Ramli-Sulong, N.H., Elghazouli, A.Y., Izzuddin, B.A., (2007) - "Behavior and design of beam-to-column connections under fire conditions", *Fire Safety Journal*, Vol. 42, pp437-451.

Qian, Z., Tan, K., Burgess, I. W. (2009), "Numerical and analytical investigation of steel beam-to-column joints at elevated temperatures". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.65, pp.1043-1054.

Santiago, A., Silva, L.S., Real, P.V. (2010).“Numerical Modelling of the Influence of Joint Typologies on the 3D Behaviour of a Steel Sub-Frame Under a Natural”. *Fire Technology*, vol.46, pp. 49-65.

Dai, X. H., Wang, Y.C., Bailey, C.G., (2009), "An experimental study of structural behaviour of joints in restrained steel frames in fire" *In International Conference, Application of structural fire design, República Checa.*

Li, G. Q., Chen, L.Z., Li, J.T, Lou, G.B. (2012) – “Modelling of end plate bolted composite connection in fire considering axial force effects”, *Journal Constructional Steel Research*, vol. 76, pp 133-143

Haremza, C., Santiago, A., Simões da Silva, L. (2013) – “Numerical behavior of a composite steel-concrete joint under localized fire”, 2º CILASCI - Congresso Ibero-Latino Americano Contra Incêndio, Coimbra, Portugal, pp376

El-Rimawi, J.A., Burgess, I.W., Plank, R.J. (1997) – “The Influence of connections stiffness on the behaviour of steel beams in fire”, *Journal Construction Steel Research*, vol.43 , pp 1-15.

El-Rimawi, J.A., Burgess, I.W., Plank, R.J.(1999) – “Studies of the behaviour of steel subframes with semirigid connections in fire”, *Journal of .Construction Steel Research*, vol.49, pp 83-98.

Simões da Silva, L., Santiago, A., Vila Real, P.(2001) – “A componente model for the behaviour of steel joints at high temperatures”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol.57, no.11, pp.515-531.

Barata, P.M.R. (2010) – “Comportamento ao Fogo de Ligações Viga-Pilar em Estruturas Mistas de Aço e Betão Após Sismo”, *Tese de Mestrado Integrado*, Universidade de Coimbra, 2010, 81 p .

NP EN 206-1 (2007). Betão, Parte 1: “Especificação, desempenho, produção e conformidade”. IPQ, Junho de 2007.

NP EN 10002 - 1 (2006)., Materiais metálicos - Ensaio de tração, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. IPQ, Agosto de 2006.

Recomendações do RILEM 50 - FMC (1985). “Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams”. *Materials and Structures*, Vol. 18, pp. 285-290.

EN 1991-1-2 (2010) Eurocódigo 1: Ações em Estruturas. - parte 1.2: Ações gerais - Ações em estruturas expostas ao fogo.

EN 1993-1-2 (2010) Eurocódigo 2; Projeto de estruturas de betão – parte 1.2: Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo.

EN 1993-1-2 (2010) Eurocódigo 3; Projeto de estruturas de aço - parte 1.2: Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo.

EN 1994-1-2 (2010) Eurocódigo 4; Projeto de estruturas mistas de aço-betão – parte 1.2: Regras gerais – Verificação da resistência ao fogo.

Abaqus, “*ABAQUS analysis : user's manual 2006*”, Providence, RI: ABAQUS Inc.

algor@ (2008). <http://www.algor.com/>. ALGOR, EUA.

ansys@ (2008). <http://www.ansys.com/>. ANSYS, EUA.

osmos@ (2008). <http://www.cosmosm.com/>. COSMOS, EUA.

csefire@ (2008). <http://www.firemodelsurvey.com/FireEnduranceModels.html>. Combustion Science & Engineering, Inc., Maryland.

lusas@ (2008). <http://www.lusas.org/>. LUSAS, Inglaterra.

NeiNastran@ (2008). <http://www.nenastran.com/>. NEiNASTRAN, EUA.

sp@(2008). <http://www3b.sp.se/en/index/services/calculations/TASEF/Sidor/default.aspx>. SP Technical Research Institute of Sweden, Suécia.

tnodiana@ (2008). <http://www.tnodiana.com/>. TNODIANA, Holanda.

Vulcan-solutions@ (2008). <http://www.vulcan-solutions.com/>. Vulcan Solutions Ltd, Inglaterra.

ANEXOS

Anexo A - Ensaios de determinação das propriedades dos materiais à temperatura ambiente.

A.1 - Considerações Iniciais

Este anexo apresenta um conjunto de ensaios experimentais desenvolvidos no âmbito deste mestrado para determinar as propriedades mecânicas dos materiais dos modelos da ligação mista de aço-betão.

No âmbito desta tese foi estudado o betão à compressão e a energia de fratura interna do mesmo, e o comportamento do aço à tração, tendo sido ensaiados os conectores e as vigas do modelo. Uma vez que já existiam ensaios realizados em varões, parafusos e chapa colaborante, estes ensaios não foram executados, contudo os dados dos mesmos foram tratados e encontram-se aqui reportados.

A.2 - Ensaios no Betão

A.2.1 Resistência à compressão do betão.

Uma vez que se pretendia uma reprodução fiel do betão utilizado por Barata em (2010), procedeu-se á execução de uma amassadura com a mesma composição do betão fornecido. Devido à dimensão reduzida da betoneira, foram realizadas duas amassaduras.

Quadro A. 8 - Composição do betã (kg/m³)

Areia	Brita 2	Brita1	Brita 0,5	CEM II 42,5R	Àgua	Adjuvante 1 Chrysoplast 920	Adjuvante 2 Chrysofluid 430	A/C
994	594	295	116	300	165	1,2	2	0,55

Para determinar a classe de resistência do betão, foram realizados ensaios à compressão em provetes cúbicos (150×150×150), após 7, 14 e 28 dias. A determinação da classe de resistência do betão para cada composição foi obtida com base na Norma Portuguesa NP EN 206-1 (2007).

Quadro A. 9 - Resistência à compressão do betão

Identificação do provete		7 dias			14 dias			28 dias		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Dimensões (cm)		15×15×15	15×15×15	15×15×15	15×15×15	15×15×15	15×15×15	15×15×15	15×15×15	15×15×15
1º Betonagem	Carga máxima (kN)	880,9	865,2	815,5	1137	1110	1143	1242	1290	1449
	Tensão de rotura (Mpa)	39,2	38,5	36,2	50,6	49,3	50,8	55,2	57,4	63,4
	Tipo de rotura	normal								
	Massa do provete	10,0	8,1	8,1	8,2	8,1	8,1	8,1	8,0	7,8
2º Betonagem	Carga máxima (kN)	801,3	796,9	805,5	1010	985	1007	875	1190	965
	Tensão de rotura (Mpa)	35,21	37,2	34,8	43,4	47,3	39,7	39,9	52,9	42,9
	Tipo de rotura	normal								
	Massa do provete (kg)	7,9	8,1	8,0	7,9	8,2	8,1	7,5	8,1	7,8

A.2.2 Determinação da energia de fratura

A resistência à tração do betão é uma propriedade mecânica bastante importante na modelação de estruturas em situação de incêndio. Contudo, não são apenas os esforços à tração que são importantes, mas também o comportamento do betão face à rotura por tração. A segurança das estruturas, principalmente quando sujeitas a grandes impactos, depende da capacidade destas em absorver energia antes e durante o processo de rotura em zonas fendilhadas.

Uma das metodologias adotadas na determinação da resistência à tração assenta no cálculo da energia de fratura, ou seja da quantidade de energia necessária para criar uma unidade de área de fenda (área projetada no plano paralelo á direção da fendilhação). O procedimento para a realização destes ensaios experimentais seguiu as recomendações do RILEM (RILEM TC-50 FMC 1985).

O método proposto para a determinação da energia de fratura (G_f) consiste na realização de um ensaio à flexão de uma viga entalhada apoiada em três pontos. As dimensões dos provetes foram definidos em função da máxima dimensão do agregado (20mm) Figura A. 17.

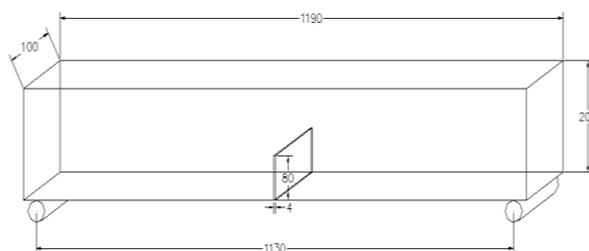


Figura A. 17 - Dimensões dos provetes.

- Metodologia de ensaio

Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, o sistema de ensaio foi constituído por um sistema de apoios rotulados, uma prensa SERVOSIS com capacidade de carga de

600kN, um DataLogger TML TDS-601 para aquisição de dados (força aplicada, deslocamento e extensões) e extensómetros PFL-30-11 (TML) e transdutores de deslocamento.

No total foram ensaiados oito provetes. Os transdutores de foram aplicados na face superior da viga a um quarto de distância de cada lado do ponto de aplicação da carga e na face inferior de cada lado do entalhe (Figura A. 18). Para ter em conta o movimento de assentamento dos apoios da viga, deforma a descontar este nas medidas dos outros transdutores de deslocamento, foram aplicadas duas cantoneiras na longitudinal do provete, uma de cada lado da viga.



Figura A. 18 - Disposição dos defletómetros: (a) vista geral do ensaio e (b) pormenor dos defletómetros na zona inferior do ensaio.

Em duas das vigas ensaiadas foram ainda colocados um total de doze extensómetros PL-30-11, distribuídos por quatro filas e três colunas (Figura A. 19).

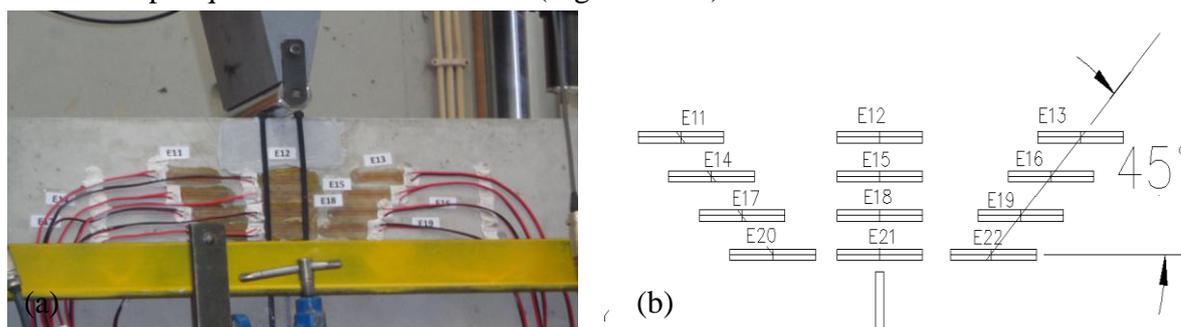


Figura A. 19 - Disposição dos extensómetros: (a) na viga, (b) esquema.

Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, a velocidade constante de 0,01mm/s, até à rotura. Os resultados obtidos permitiram traçar a curva carga-deslocamento, a área do gráfico representa a energia W_0 (Figura A. 20). No Quadro A. 10 estão apresentados todos os valores que permitem calcular a energia de fratura (G_f).

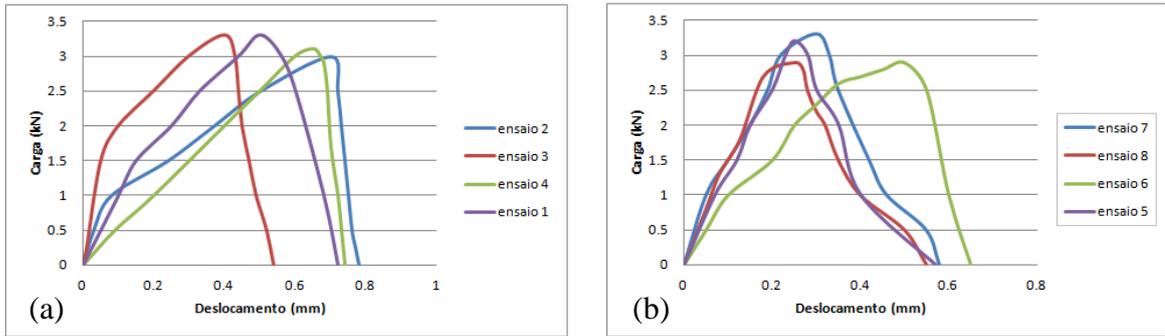


Figura A. 20 - Curva carga-deslocamento (a) 1º betonagem e (b) 2º betonagem.

Quadro A. 10 - Determinação da energia de fratura

Provete	W_0 [N/m]	m [kg]	g [m/s ²]	δ_0 [m]	$A_{lig.}$ [m ²]	G_f [N/m]	Carga de Rotura [kN]
1	1,075	53,37	9,81	0,00072	0,012	92,785	3,3
2	1,102	52,99	9,81	0,00078	0,012	95,277	3,0
3	1,287	54,22	9,81	0,00054	0,012	109,690	3,1
4	1,085	53,75	9,81	0,00074	0,012	93,731	3,3
5	0,945	52,23	9,81	0,00057	0,012	81,226	3,1
6	1,240	52,23	9,81	0,00065	0,012	106,162	3,2
7	1,169	53,27	9,81	0,00058	0,012	99,991	3,3
8	1,12	52,89	9,81	0,00055	0,012	95,758	2,9

Das extensões obtidas, pôde-se concluir que os extensómetros laterais registaram valores de extensão superiores aos extensómetros colocados por cima do entalhe. Observou-se ainda que a extensão era tanto maior quanto mais próximos estes tivessem do entalhe.

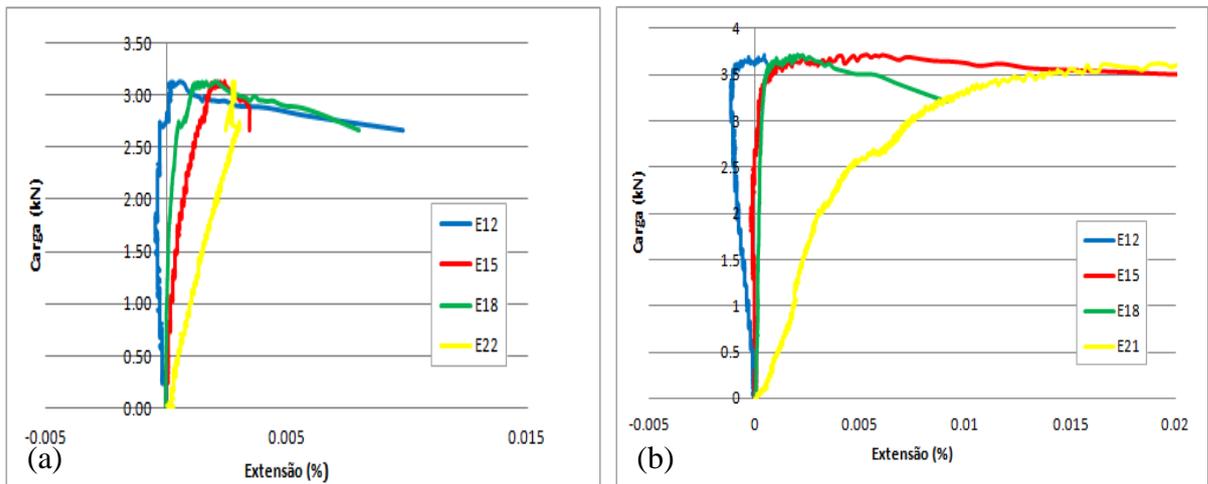


Figura A. 21 - Curva carga extensão para os extensómetros centrais (a) ensaio 2 (b) ensaio 3.

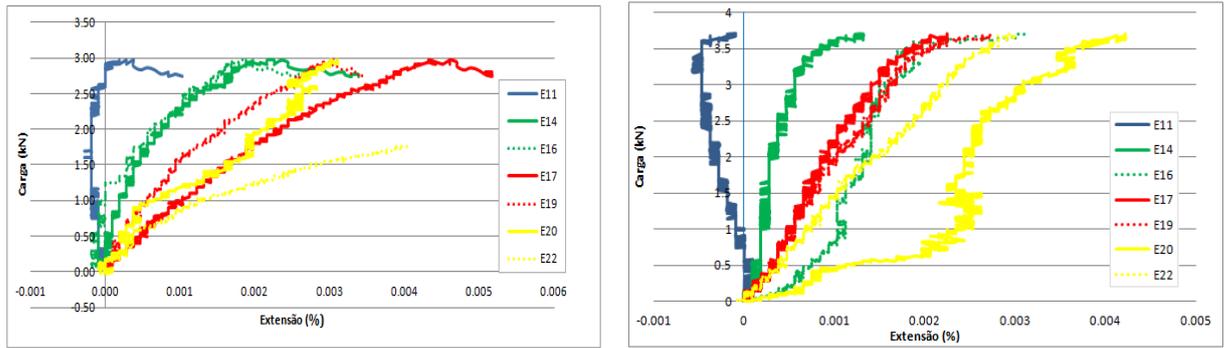


Figura A. 22 - Curva carga extensão para os extensómetros laterias (a) ensaio 2 e (b) ensaio 3.

A.3 - Ensaio no Aço

Os elementos de aço foram sujeitos a ensaios de tração de acordo com o estipulado na norma EN 10002-1 (2006), com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade, a tensão de cedência, a tensão de rotura, a extensão de cedência, a extensão de rotura e a extensão última, até à rotura.

A.3.1 - Ensaio nas vigas

Os ensaios foram realizados em provetes retirados de um perfil IPE 270. Os provetes prismáticos foram retirados da viga IPE 270, quatro do banzo e os restantes da alma. Estas peças foram depois maquinadas de forma a respeitar as dimensões impostas pela norma EN 10002-1 (2006)(Figura A. 23). Aos provetes foram aplicados extensómetros FLK-6-11 que permitiam medir extensões no regime elástico.

No total foram ensaio dos oito provetes, extraídos de um perfil IPE 270 (quatro da alma e quatro do banzo). Os provetes prismáticos foram depois levados à rotura na máquina de ensaios de tração tendo os ensaios sido realizados em controlo de deslocamento.

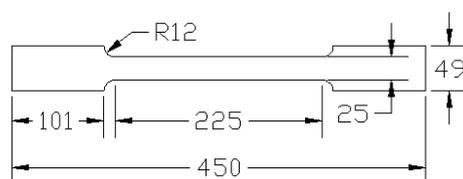


Figura A. 23 - Proвете prismático (a) dimensões do provete (mm) e (b) pormenor do provete amarrado à máquina de testes.

Os resultados destes ensaios apresentam-se no Quadro A. 11 e a curva tensão-extensão na Figura A. 24.

Quadro A. 11 -Resultados dos ensaios de tração nos provetes da viga IPE 270.

Provete	Módulo de Elasticidade [GPa]	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Cedência -	Extensão de Rotura -	Extensão Última -
1	200,88	311,88	421,15	0,005	0,186	0,209
2	193,79	320,42	424,72	0,010	0,159	0,179
3	183,09	300,97	495,94	0,008	0,144	0,194
4	-	-	-	-	-	-
5	202,27	387,29	496,43	0,009	0,158	0,201
6	129,76	347,14	443,14	0,006	0,148	0,196
7	189,78	343,80	449,65	0,007	0,155	0,200
8	182,41	322,63	434,98	0,008	0,119	0,164

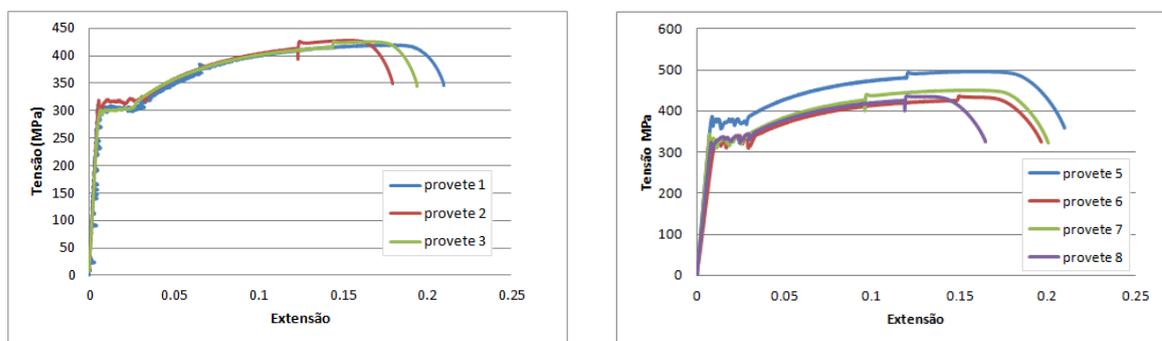


Figura A. 24 - Curva tensão extensão para o aço da viga IPE 270: (a) alma e (b) banzo.

A.3.2 - Conectores

No total, foram ensaiados quatro conectores. As dimensões dos provetes encontram-se na Figura A. 25. Uma vez que os conectores eram demasiado pequenos para as amarras da máquina de ensaios (Figura A. 26), foi desenvolvido um sistema ao qual foram enroscados os conectores. Este sistema encontra-se representado na (Figura A. 27) e consistia num dispositivo rotulado, que evitava que os conectores sofressem outro tipo de esforços que não o axial de tração. Aos conectores foram aplicados extensómetros TML FLk-6-11 que permitiram medir as extensões em regime elástico.

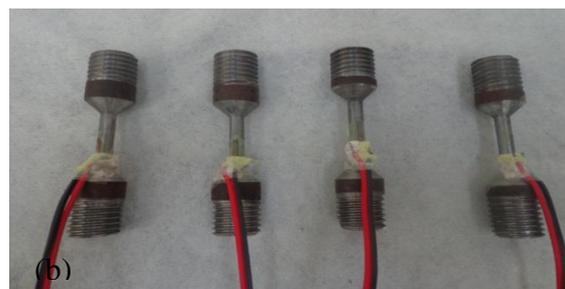
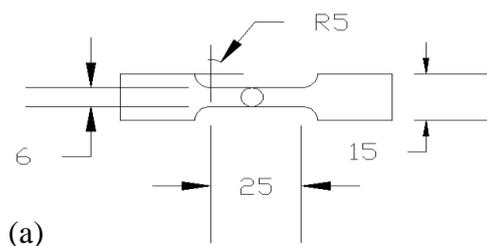


Figura A. 25 - Conectores: (a) dimensões dos provetes (mm) e (b) provetes maquinados

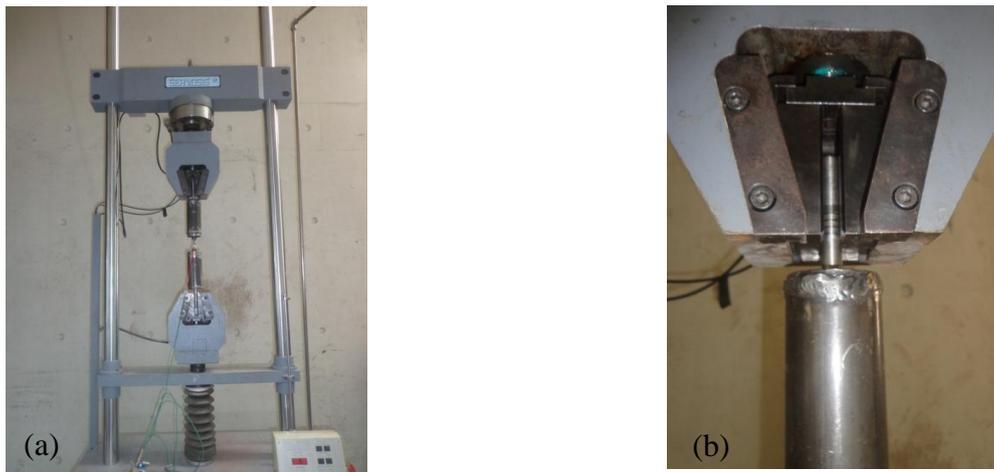


Figura A. 26 - Sistema de ensaio dos conetores: (a) vista geral e (b) pormenor do sistema de amarração dos provetes.



Figura A. 27 - Sistema de amarração desenvolvido para os conetores à máquina de ensaio.

Através destes ensaios foi possível traçar as curvas tensão-extensão (Figura A. 28)

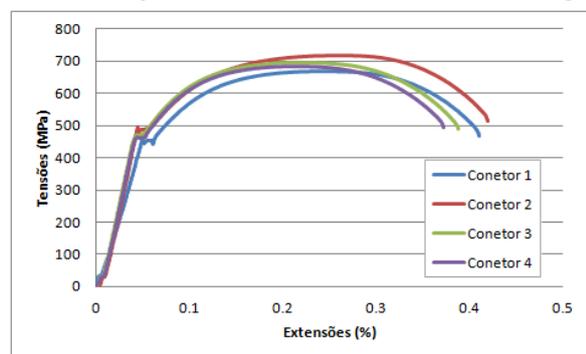


Figura A. 28 - Curva tensão-extensão.

Quadro A. 12 - Resultados dos ensaios de tração nos conetores.

Provete	Módulo de Elasticidade [GPa]	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Cedência -	Extensão de Rotura -	Extensão Última -
1	187,6	459,78	667,74	0,0504	0,260	0,410
2	193,1	495,50	717,96	0,0448	0,259	0,420
3	25,0	471,86	695,98	0,0441	0,214	0,388
4	186,2	464,38	684,719	0,0437	0,215	0,372

Na Figura A. 29 (a), encontra-se apresentado um conector, onde é bem visível o alongamento que este está a sofrer devido aos esforços de tração, já na Figura A. 29(b) o mesmo conector já se apresenta em rotura. O conjunto dos quatro conectores após ensaio está apresentado na Figura A. 30.

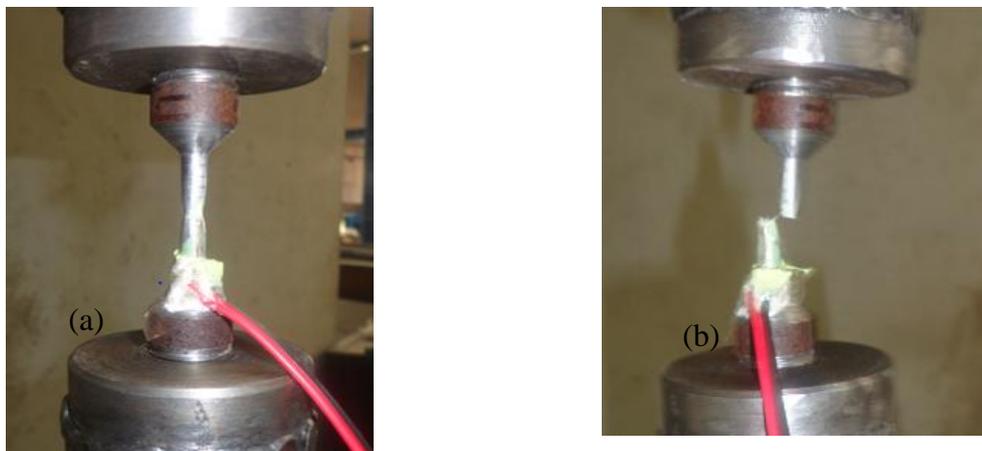


Figura A. 29 - Ensaio dos conectores (a) zona de estriação e (b) rotura do conector.



Figura A. 30 - Conectores após ensaio.

A.3.3 Parafusos

Os parafusos foram testados por (Barata 2010), que cederam os resultados. No Quadro A. 13 - Resultados à tração dos parafusos Quadro A. 13 encontram-se os principais parâmetros e na Figura A. 31.

Quadro A. 13 - Resultados à tração dos parafusos

Provete	Módulo de Elasticidade [GPa]	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Cedência -	Extensão de Rotura -	Extensão Última -
1	177,35	830,04	1002,10	0,006	0,026	0,04
2	190,39	809,15	1023,23	0,005	0,020	0,04

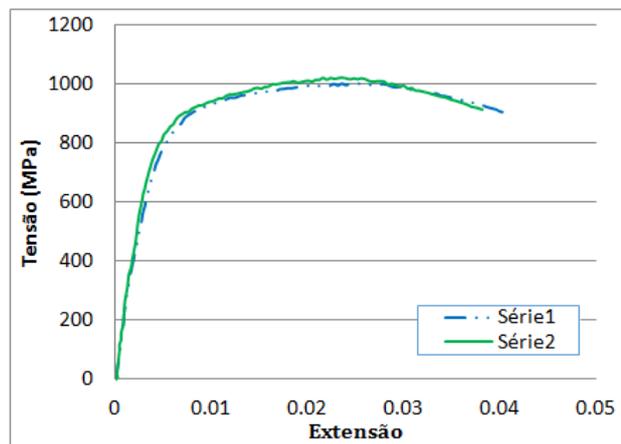


Figura A. 31 - Curva tensão-extensão.

A.2.4 Chapa trapezoidal da laje

Os seguintes resultados aqui apresentados foram também eles cedidos por outros (Haremza 2013). No Quadro A. 14 - Quadro A. 14 encontram-se os parâmetros

Quadro A. 14 - Resultados dos ensaios de tração nos provetes da chapa trapezoidal da laje

Provete	Módulo de Elasticidade [GPa]	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Cedência -	Extensão de Rotura -
1	182,71	332,32	427,6	0,001	0,04
2	201,91	350	428,86	0,0052	0,06

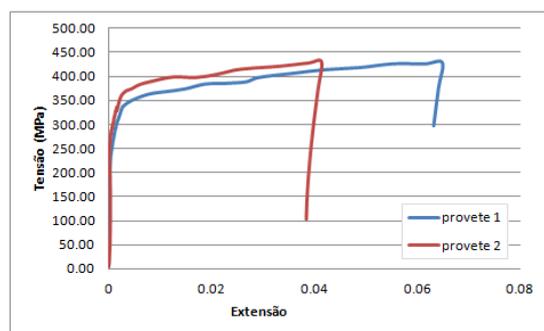


Figura A. 32 - Curva tensão-extensão para a chapa trapezoidal.

Anexo B - Propriedades dos materiais segundo a EN 1992-1-2 (2010) e EN1993-1-2(2010).

B1 - Propriedades do betão a temperaturas elevadas

B.1.1 Propriedades térmicas

- Extensão térmica

A expansão térmica do betão, $\varepsilon_c(\theta)$, varia com a temperatura, em função do tipo de agregado e da sua composição. Esta encontra-se representada na (Figura B.10) e pode ser determinada através das seguintes expressões:

Agregados siliciosos:

para $20\text{ °C} \leq \theta_a < 700\text{ °C}$

$$\varepsilon_c(\theta) = 1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta + 2,3 \times 10^{-11} \theta^3$$

para $700\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$

$$\varepsilon_c(\theta) = 14 \times 10^{-3}$$

Agregados calcários:

para $20\text{ °C} \leq \theta_a < 805\text{ °C}$

$$\varepsilon_c(\theta) = -1,2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \theta + 1,4 \times 10^{-11} \theta^3$$

para $805\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$

$$\varepsilon_c(\theta) = 12 \times 10^{-3}$$

onde:

l é o comprimento a 20 °C ;

ε_c é a extensão térmica;

θ é a temperatura do betão.

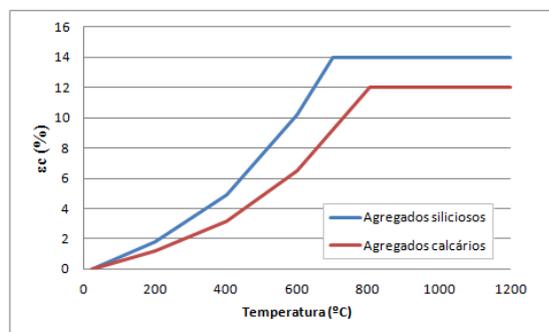


Figura B.10 - Extensão térmica do betão com a temperatura

- Calor específico

A evolução do calor específico do betão $C_p(\theta)$, para o betão seco ($u=0\%$) poderá ser determinado através das seguintes expressões ou pela Figura B.11:

para $20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 100\text{ }^\circ\text{C}$

$$C_p = 900(\text{J}/\text{Kg}.\text{K})$$

para $100\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 200\text{ }^\circ\text{C}$

$$C_p = 900 + (\theta - 100)(\text{J}/\text{Kg}.\text{K})$$

para $200\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 400\text{ }^\circ\text{C}$

$$C_p = 1000 + (\theta - 200)/2(\text{J}/\text{Kg}.\text{K})$$

para $400\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 1200\text{ }^\circ\text{C}$

$$C_p = 1100(\text{J}/\text{Kg}.\text{K})$$

em que:

θ temperatura do betão ($^\circ\text{C}$);

C_p calor específico (θ)($\text{kJ}/\text{kg}.\text{K}$).

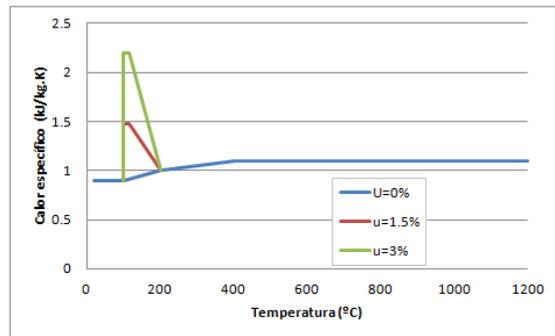


Figura B.11 - Calor específico do betão em função da temperatura .

- Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica λ_c do betão, poderá ser determinada entre os valores dos limites inferior e superior (Figura B.12).

O limite superior pode ser determinado por:

para $20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 1200\text{ }^\circ\text{C}$

$$\lambda_c = 2 - 0,2451(\theta/100) + 0,0107(\theta/100)^2 \quad \text{W}/\text{m}.\text{K}$$

O limite inferior pode ser determinado por:

para $20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 1200\text{ }^\circ\text{C}$

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136(\theta/100) + 0,0057(\theta/100)^2 \quad \text{W}/\text{m}.\text{K}$$

em que:

θ temperatura do betão ($^\circ\text{C}$);

λ_c condutibilidade térmica($\text{W}/\text{m}.\text{K}$);

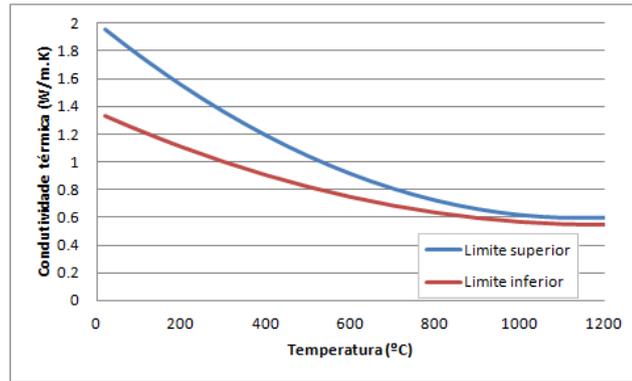


Figura B.12 - Condutibilidade térmica do betão em função da temperatura.

B1.2 Propriedades mecânicas

As propriedades de resistência e deformação do betão a temperaturas elevadas, devem ser obtida através de relações constitutivas presentes no Quadro B. 4. Estas relações são definidas pelos parâmetros $f_{c,\theta}$, resistência à compressão e $\varepsilon_{c1,\theta}$, a extensão correspondente.

Quadro B. 4 - Relações tensão extensão do betão em compressão a altas temperaturas

Domínio	Tensão $\sigma(\theta)$
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c1,\theta}$	$\frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$
$\varepsilon_{c1(\theta)} < \varepsilon < \varepsilon_{cu1,\theta}$	Para fins numéricos deverá adotar-se um ramo descendente. Admitem-se modelos lineares ou não lineares.

O fator de redução com a temperatura do betão à compressão pode ser determinado através da Figura B.13 (a), já o do betão em tração, que em alguns casos pode ser desprezado por simplificação, apresenta-se na Figura B.13 (b).

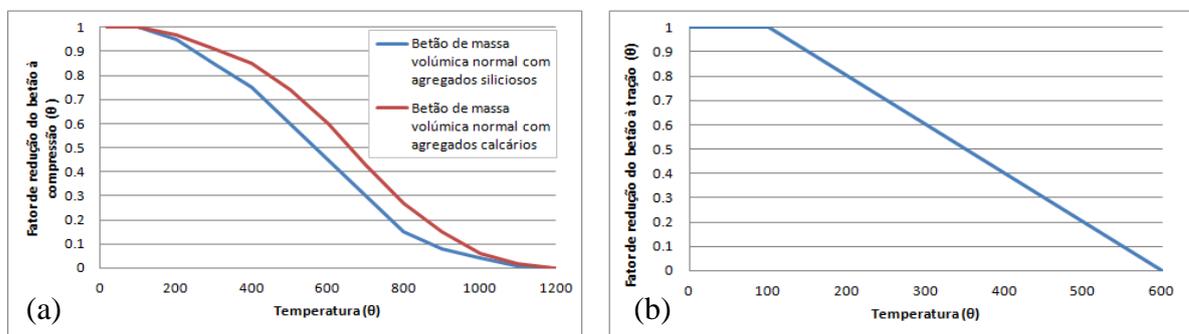


Figura B.13 - Fator de redução do betão com a temperatura: (a) compressão e (b) tração.

B2 - Propriedades do aço a temperaturas elevadas.

B2.1 Propriedades térmicas:

- Extensão térmica

A extensão térmica do aço, $\Delta l/l$, em função da temperatura é ilustrada na Figura B.14 ou pode ser calculado através das expressões seguintes:

para $20\text{ °C} \leq \theta_a < 750\text{ °C}$

$$\Delta l/l = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4} \quad (5.1)$$

para $750\text{ °C} \leq \theta_a \leq 860\text{ °C}$

$$\Delta l/l = 1,1 \times 10^{-2} \quad (5.2)$$

para $860\text{ °C} < \theta_a \leq 1200\text{ °C}$

$$\Delta l/l = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \quad (5.3)$$

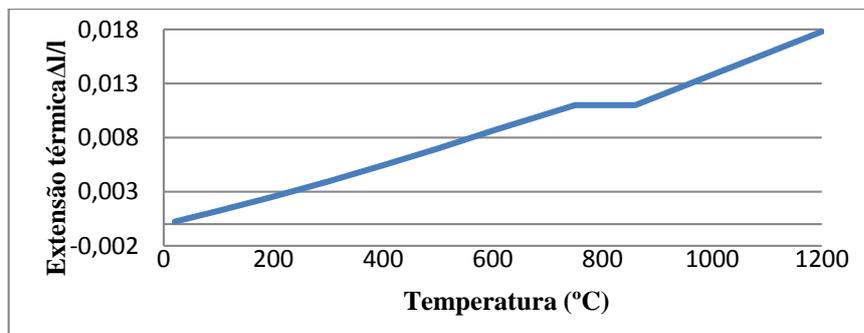


Figura B.14 - Extensão térmica do aço carbonado em função da temperatura.

- Calor específico:

A evolução do calor específico do aço, c_a , em função da temperatura pode ser obtida com consulta da Figura B.15 ou pode ser calculado através das expressões seguintes:

para $20\text{ °C} \leq \theta_a < 600\text{ °C}$

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad j/kgK \quad (5.4)$$

para $600\text{ °C} \leq \theta_a \leq 735\text{ °C}$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad j/kgK \quad (5.5)$$

para $735\text{ °C} < \theta_a \leq 900\text{ °C}$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad j/kgK \quad (5.5)$$

para $900\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$

$$c_a = 650 \quad j/kgK \quad (5.6)$$

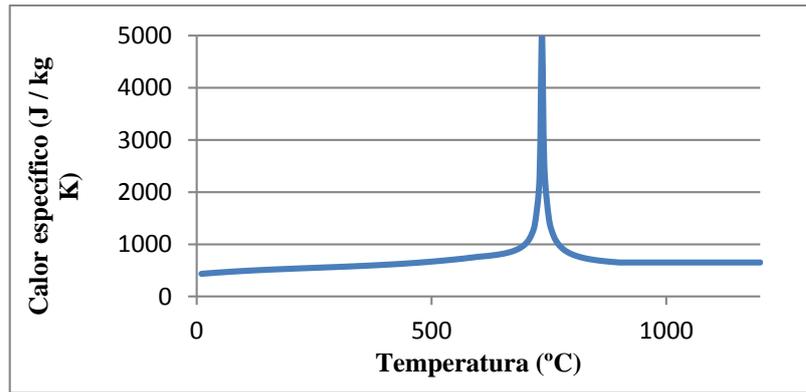


Figura B.15 - Calor específico do aço em função da temperatura.

- Condutividade térmica:

A evolução da condutividade do aço, λ_a , em função da temperatura é apresentada na Figura B.16 ou pode ser calculado através das expressões seguintes:

para $20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800\text{ }^\circ\text{C}$

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK} \quad (5.7)$$

para $800\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ }^\circ\text{C}$

$$\lambda_a = 27,3 \text{ W/mK} \quad (5.8)$$

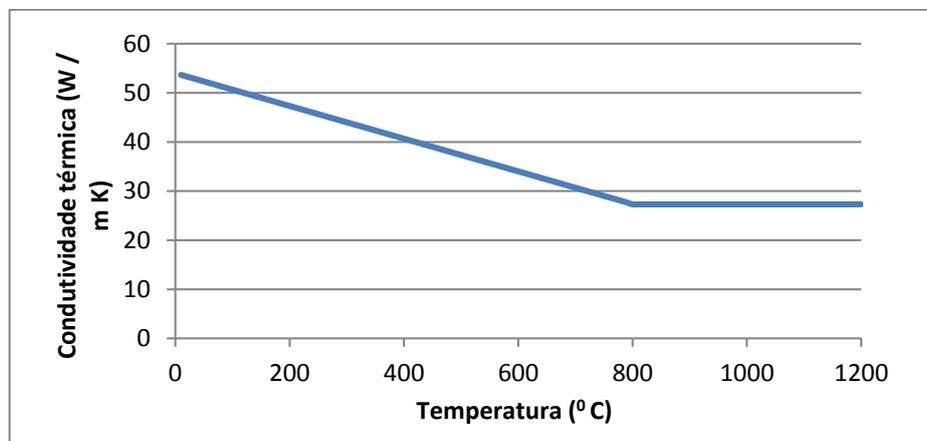


Figura B.16 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura.

B2.2 Propriedades mecânicas

A evolução das propriedades mecânicas de resistência e deformabilidade do aço em função da temperatura é ilustrada na Figura B.17 ou pode ser calculado através das expressões do Quadro B. 5

Quadro B. 5 - Lei constitutiva do aço para temperaturas elevadas

Extensões	Tensão σ	Módulo de Elasticidade tangente
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0.00
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} (1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}))$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0.00	-
Parâmetros	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta} \quad \varepsilon_{y,\theta} = 0.02 \quad \varepsilon_{t,\theta} = 0.15 \quad \varepsilon_{u,\theta} = 0.20$	
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{a,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	

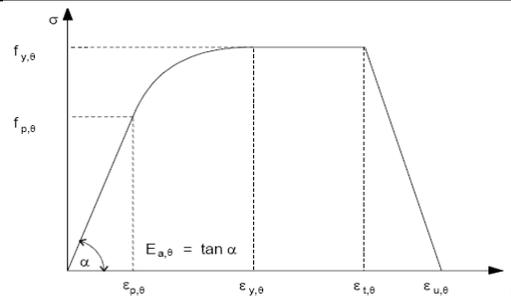


Figura B.17 - Relação tensão-extensão para o aço a elevadas temperaturas.

Os fatores de redução com a temperatura encontram-se expostos no

Quadro B. 6 e Figura B.18.

Os fatores de redução são dados pelas seguintes expressões:

- Tensão de cedência efetiva em função da tensão de cedência a 20 °C $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y \quad (5.9)$
- Tensão proporcional limite em função da tensão de cedência a 20 °C $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y \quad (5.10)$
- Módulo de elasticidade em função do módulo de elasticidade a 20 °C $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a \quad (5.11)$

Quadro B. 6 - Fatores de redução para a relação tensão-extensão para o aço

Temperatura do aço θ_a	Factor de redução $k_{y,\theta}$	Factor de redução $k_{p,\theta}$	Factor de redução $k_{E,\theta}$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,025	0,045
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,000	0,000

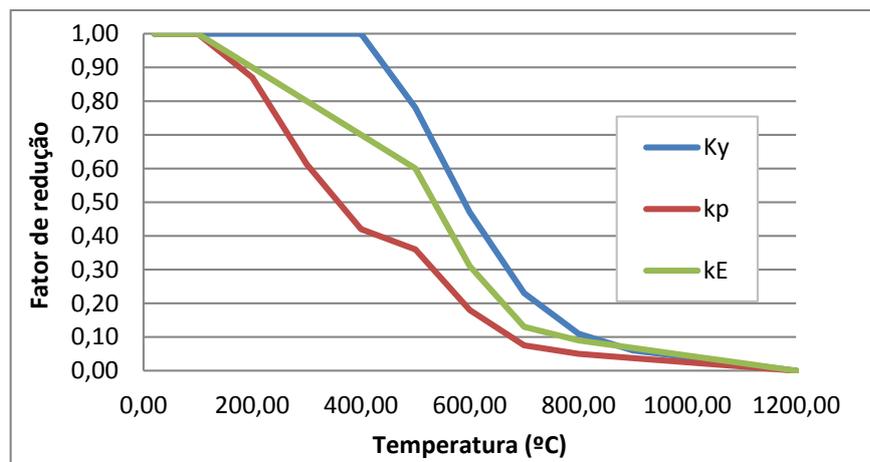


Figura B.18 - Fatores de redução com a temperatura das propriedades do aço.