



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

# **Análise numérica de vigas de aço enformado a frio com reforços longitudinais em situação de incêndio**

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

Autor

**Diogo João Bazenga Marques Freitas**

Orientadores

**Professor Doutor João Paulo Correia Rodrigues (UC)**

**Doutor Luís Miguel dos Santos Laím (UC)**

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, 2016**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor João Paulo Correia Rodrigues e toda a sua equipa de trabalho, pela orientação e pelo excelente ambiente de trabalho para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Doutor Luís Miguel Santos Laím, pela paciência, dedicação e disponibilidade que demonstrou durante toda a execução deste trabalho.

A todos os amigos que a Universidade de Coimbra me proporcionou, tornando-se na minha segunda família e que sem estas pessoas, este caminho não seria possível.

Um agradecimento especial à minha família pelo carinho, respeito e educação que me deram para concluir este percurso e encarar os próximos desafios sempre com muita força e humildade.

À Maria Gilberta Franco Figueira Fernandes Bazenga Marques pelo esforço e cuidado, pela força de viver e por ser a pessoa fantástica que é, influenciando não só a minha vida, como a de muitas outras pessoas. Obrigado por tudo, AVÓ.

## RESUMO

O aumento significativo da utilização do aço enformado a frio na construção levou a uma necessidade de compreensão do mesmo. Esta compreensão é transmitida através de métodos de cálculo que foram surgindo e que segundo os seus autores se aproximam melhor das capacidades em serviço e/ou de instabilidade dos elementos estruturais. Estes métodos levaram à criação de normas específicas de dimensionamento à temperatura ambiente, o que já não sucede em situação de incêndio.

Neste trabalho avaliou-se o comportamento estrutural em situação de incêndio de vigas simples e compostas de aço enformado a frio, vigas de secção transversal sigma e 2 sigma, respetivamente. Para esta avaliação utilizou-se o *software* Abaqus recorrendo ao método dos elementos finitos. Os modelos numéricos foram calibrados com base nos resultados de ensaios experimentais realizados no Laboratório De Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Os elementos estruturais de aço enformado a frio por serem enformados à temperatura ambiente são constituídos por espessuras reduzidas, apresentando, assim, um comportamento altamente não-linear e conseqüente complexidade no seu dimensionamento.

Este estudo foi dividido em duas partes: calibração e estudo paramétrico. Deste modo, o primeiro objetivo consistiu na calibração dos modelos numéricos e o segundo teve como foco analisar o efeito da variação de alguns parâmetros, como o comprimento das vigas (esbelteza), os níveis de restrição axial e rotacional à dilatação térmica e os níveis de carregamento inicial. Com a realização desta calibração procurou-se determinar um modelo de previsão para novos estudos numéricos, bem como, para o desenvolvimento de investigações experimentais.

A EN1993-1-2:2005 sugere que para elementos de aço enformado a frio em situação de incêndio sejam aplicados os mesmos coeficientes de redução das propriedades mecânicas do aço laminado a quente de secções de classe 4, para as quais a temperatura crítica é limitada a 350°C, o que não se verificou nas vigas em estudo. Também ficou demonstrado que a variação dos níveis de restrição axial durante a exposição ao fogo provocam alterações significativas no comportamento estrutural das vigas.

## PALAVRAS-CHAVE

viga, aço enformado a frio, fogo, análise numérica, restrição, instabilidade

---

## **ABSTRACT**

The significant increase in the use of cold-formed steel in construction has led to a need of its understanding. This understanding is transmitted through calculation methods that were emerging and that approach to its best capabilities in service and/or collapse of the structural elements according to the authors. These methods have led to the creation of specific design methods at room temperature, which no longer succeeds in fire.

In this work the behaviour of simple and composite cold-formed steel beams in situation of fire was evaluated, respectively the sigma and 2 sigma cross-section beams. The software Abaqus was used for this evaluation through the finite element method. The numerical models were calibrated based on the results of experimental tests performed in the laboratory of Testing Materials and Structures of the Civil Engineering Department of Coimbra University. The cold-formed steel structural elements for being shaped at room temperature are constituted of reduced thickness, thus presenting a highly non-linear behaviour and a consequent complexity on its design.

This study was divided into two parts. The first goal was to calibrate the numerical models and a second which focus was to analyse the effect of variation of some parameters such as the length of the beams, the axial and rotational restraint levels and load levels. With this calibration it was tried to set a prediction model for new numerical studies as well as for the development of experimental investigations.

The EN1993-1-2:2005 suggests that in case of fire must be applied the same reduction coefficients for the mechanical properties of hot rolled steel sections of class 4 in the cold-formed steel elements, whereas for this ones the critical temperature is limited to 350°C, which was not observed in the beams under study. It was also demonstrated that the variation of axial restraint levels in fire condition cause significant changes in the behaviour of beams.

## **Key Words**

beam, cold-formed steel, fire, numerical analysis, restraining, buckling

---

---

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Considerações iniciais.....	1
1.2.	Motivações.....	2
1.3.	Objetivos.....	3
1.4.	Organização da dissertação.....	4
2.	ESTADO DA ARTE.....	5
2.1.	Considerações gerais.....	5
2.1.1.	Aplicações de elementos estruturais de aço enformado a frio.....	6
2.2.	Elementos estruturais.....	7
2.2.1.	Tipos de elementos/secções.....	7
2.2.2.	Processos de fabrico.....	8
2.2.3.	Comportamento estrutural à flexão/Modos de instabilidade.....	10
2.2.4.	Imperfeições geométricas.....	11
2.2.5.	Imperfeições no material/Tensões residuais.....	13
2.3.	Propriedades do aço enformado a frio a temperaturas elevadas.....	14
2.3.1.	Propriedades térmicas.....	14
2.3.2.	Propriedades mecânicas.....	15
2.4.	Estudos realizados sobre vigas de aço enformado a frio.....	18
2.5.	Consideração finais.....	20
3.	MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	22
3.1.	Considerações iniciais.....	22
3.1.1.	Programa experimental.....	22
3.1.2.	Dimensões dos provetes.....	23
3.1.3.	Condições fronteira.....	24
3.2.	Malha de elementos finitos.....	27
3.3.	Calibração do modelo numérico para a análise térmica.....	28
3.4.	Calibração do modelo numérico para a análise mecânica.....	33
3.5.	Comparação entre os modos de instabilidade numéricos e experimentais.....	37
3.6.	Considerações finais.....	40
4.	ESTUDO PARAMÉTRICO.....	42
4.1.	Considerações iniciais.....	42
4.2.	Efeito do nível de carregamento.....	42
4.3.	Efeito do nível de restrição axial.....	43
4.4.	Efeito do nível da restrição rotacional.....	46

---

4.5. Efeito da esbelteza .....	48
4.6. Considerações finais .....	51
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	53
5.1. Conclusões .....	53
5.2. Trabalhos futuros .....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56
ANEXO A .....	A-1
Anexo A-1. Condições fronteira de origem térmica .....	A-1
Anexo A-2. Calibração mecânica .....	A-7
Anexo A-3. Efeito do nível de restrição axial .....	A-8
Anexo A-4. Efeito do nível de restrição rotacional .....	A-9

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplos de aplicação de elementos estruturais de aço enformado a frio: (a) como elemento estrutural secundário (SwedSteel-metecno@); (b) edifício de vários pisos (arabianBusiness.com@); (c) flexibilidade dos elementos estruturais (Walls&Ceilings@); (d) aplicação e manuseamento (IBDA@). .....	7
Figura 2.2 - Secções abertas simples: (a) perfil U; (b) perfil C; (c) e (d) perfis $\Sigma$ ; (e) perfil Z enrijecido; (g) perfil $\Omega$ . Secções fechadas: (h), (i) e (j) perfis tubulares. Secções compostas: (k), (l) e (m), (Yu & Laboube, 2010). .....	8
Figura 2.3 - Painéis de chapa e chapas perfiladas de aço enformado a frio (Yu & Laboube, 2010). .....	8
Figura 2.4 - Processo de fabrico do aço enformado a frio: a) aço derretido e d) bobina (SFIA@); b) bandas quentes e c) processo de galvanização (SteelConstruction.info@). .....	9
Figura 2.5 - a) Perfilhadora (SFIA@); b) Processo por laminação a frio de um perfil $\Omega$ (Rhodes, 1991). .....	9
Figura 2.6 - a) Quinadora; b) Processo de quinagem (FUTURENG@); c) Etapas de quinagem (Veríssimo, 2008). .....	10
Figura 2.7 - a) Modos de encurvadura de elementos de aço enformado a frio de secção C submetidos à flexão: a) local (banzo e alma); b) distorcional; c) lateral-torsional (Dinis & Camotim, 2010). .....	10
Figura 2.8 - a) Variação da configuração do modo de instabilidade com o comprimento da coluna; b) Influência dos reforços intermédios na resistência de secções enformadas a frio (Silvestre & Camotim, 2006). .....	11
Figura 2.9 - Influência das imperfeições geométricas iniciais na temperatura crítica das vigas C (a) e I-enrijecido (b) (Laím <i>et al</i> , 2014). .....	12
Figura 2.10 - Influência das imperfeições iniciais na capacidade resistente das vigas $\Sigma$ para dois níveis de momento aplicado, a) M3 e b) M4 (Gendy & Hanna, 2015). .....	13
Figura 2.11 - Efeito das tensões residuais na capacidade resistente de vigas C de aço enformado a frio (Kankanamge, 2010). .....	14
Figura 2.12 - Propriedades térmicas do aço carbono definidas na EN 1993-1-2: a) Calor específico; b) Condutibilidade térmica. ....	15
Figura 2.13 – Relação tensões-extensões para o aço carbono a temperaturas elevadas (EN 1993-1-2:2005). .....	16
Figura 2.14 – Comparação de resultados referentes ao fator de redução para o valor de cálculo da tensão de cedência de secções Classe 4 enformadas a frio ( $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta} / f_y$ ). .....	17

---

Figura 2.15 – Comparação de resultados referentes ao fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico ( $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$ ), regulamentar e experimental. ....	17
Figura 2.16 – Comparação de resultados referente à extensão térmica relativa do aço carbono ( $\Delta L/L$ ) em função da temperatura, regulamentar e experimentais. ....	18
Figura 2.17 – a) esquema das secções transversais das vigas modeladas; b) relação entre a resistência das vigas e o seu peso próprio em função da espessura, altura e comprimentos das respectivas vigas (Laím <i>et al.</i> , 2013b). ....	19
Figura 2.18 – Comparação dos resultados experimentais com as previsões da EN 1993-1-2 para as vigas de secção transversal $\Sigma$ (a) e $2\Sigma$ (b) (Laím <i>et al.</i> , 2015). ....	20
Figura 3.1 – Dimensões das secções de aço enformado a frio em estudo (unidades em mm): a) secção $\Sigma$ simples; b) secção composta $2\Sigma$ (Ferrer, 2014). ....	24
Figura 3.2 – Vista esquemática das vigas $\Sigma$ modeladas para a análise numérica de vão livre: a) 3m; b) 4m; c) 5m. ....	24
Figura 3.3 – Pormenor do sistema de restrição axial e rotacional dos ensaios experimentais: 1 – provete; 2 – apoio simples; 3 – apoio duplo; 4 e 5 – restrição axial da viga; 6 e 7 – restrição rotacional da viga; 8, 9 e 10 – célula de carga; 11 – laje de betão (Laím <i>et al.</i> 2015). ....	26
Figura 3.4 – Sistema de restrição axial e rotacional introduzido no modelo numérico com o auxílio de molas axiais lineares ( $kr=0.6\text{kN/mm} \Rightarrow Kr=150\text{kN.m/rad}$ e $ka=11\text{kN/mm}$ ). ....	26
Figura 3.5 – Malha de elementos finitos adotada nas secções transversais para a análise térmica: a) $\Sigma$ simples; b) composta $2\Sigma$ . ....	27
Figura 3.6 - Malha de elementos finitos utilizada nas vigas para análise estrutural: a) $\Sigma$ simples; b) composta $2\Sigma$ . ....	28
Figura 3.7 – Comparação da evolução da temperatura média da secção no forno nos ensaios de resistência ao fogo com a curva regulamentar ISO 834: a) secção $\Sigma$ simples; b) secção $\Sigma$ composta. ....	29
Figura 3.8 – a) Localização dos termopares nas secções transversais; b) Localização das diferentes secções onde foram efetuadas as leituras da temperatura nos ensaios experimentais (Ferrer, 2014). ....	30
Figura 3.9 - Condições fronteira de origem térmica: a) e b) consideração inicial; c) e d) solução adotada. ....	31
Figura 3.10 - Calibração da evolução da temperatura no termopar T5 das vigas simplesmente apoiadas: a) $\Sigma$ simples, b) $\Sigma$ composto. ....	31
Figura 3.11 - Calibração da evolução da temperatura no termopar T3 das vigas com restrição axial e rotacional: a) $\Sigma$ simples, b) $\Sigma$ composto. ....	32
Figura 3.12 - Evolução das temperaturas nas secções transversais das vigas em estudo: a) $\Sigma$ simples, b) $\Sigma$ composto. ....	32
Figura 3.13 - Evolução do deslocamento a meio vão da viga $\Sigma$ em função da temperatura: a) simplesmente apoiada; b) com restrição axial e rotacional. ....	35

---



---

Figura 3.14 - Evolução da força de restrição axial em função da temperatura para a viga $\Sigma$ com restrição: a) axial; b)axial e rotacional. ....	35
Figura 3.15 - Evolução do deslocamento a meio vão da viga $2\Sigma$ em função da temperatura: a) simplesmente apoiada; b) com restrição axial. ....	36
Figura 3.16 - Evolução da força de restrição axial em função da temperatura para a viga $2\Sigma$ com restrição: a) axial; b)axial e rotacional. ....	36
Figura 3.17 - Configuração deformada da viga $\Sigma$ sem restrições após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b). ....	38
Figura 3.18 - Configuração deformada da viga $\Sigma$ com restrição axial após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b). ....	38
Figura 3.19 - Configuração deformada da viga $\Sigma$ com restrição axial e rotacional após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b). ....	39
Figura 3.20 - Configuração deformada da viga $2\Sigma$ sem restrições após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b). ....	39
Figura 3.21 - Configuração deformada da viga $2\Sigma$ com restrição axial após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b). ....	39
Figura 3.22 - Configuração deformada da viga $2\Sigma$ com restrição axial e rotacional após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b). ....	40
Figura 4.1 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de carregamento das vigas $2\Sigma$ (a) e $\Sigma$ (b) simplesmente apoiadas. ....	43
Figura 4.2 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição axial das vigas $2\Sigma$ (a) e $\Sigma$ (b) para 70% do nível de carregamento. ....	45
Figura 4.3 – Modos de colapso das vigas de secção composta $2\Sigma$ com 100% de restrição axial: a) 3m de vão livre; b)5m de vão livre. ....	45
Figura 4.4 – Deformadas a meio vão relativas aos modos de colapso das vigas de secção composta $2\Sigma$ com 100% de restrição axial: a) 3m de vão livre; b)5m de vão livre. ....	45
Figura 4.5 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional das vigas $2\Sigma$ (a) e $\Sigma$ (b) para 15% de restrição axial e 30% do nível carregamento. ....	47
Figura 4.6 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional das vigas $2\Sigma$ (a) e $\Sigma$ (b) para 60% de restrição axial e 70% do nível de carregamento. ....	48
Figura 4.7 – Modos de colapso das vigas de secção $\Sigma$ simples com 4m de vão livre sujeitos a 70% do carregamento, 60% de restrição axial e a a)30%, b)60% e c)100% de restrição rotacional. ....	48
Figura 4.8 - Efeito da esbelteza na temperatura crítica das vigas simplesmente apoiadas. ....	49
Figura 4.9 - Efeito da esbelteza na temperatura crítica das vigas com 100% de restrição axial. ....	50
Figura 4.10 - Efeito da esbelteza na temperatura crítica das vigas com 60% de restrição axial e 100% de restrição rotacional. ....	50

---

---

Figura 4.11 - Efeito da esbelteza na temperatura crítica das vigas com diferentes condições de apoio e para 50% do nível de carregamento.....	51
Figura A-1 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga $\Sigma$ simplesmente apoiada para os restantes termopares.....	A-1
Figura A-2 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga $\Sigma$ com restrição axial para os restantes termopares. ....	A-2
Figura A-3 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga $\Sigma$ com restrição axial e rotacional para os restantes termopares.....	A-3
Figura A-4 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga $2\Sigma$ simplesmente apoiada para os restantes termopares.....	A-4
Figura A-7 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga $2\Sigma$ com restrição axial para os restantes termopares. ....	A-5
Figura A-8 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga $2\Sigma$ com restrição axial e rotacional para os restantes termopares.....	A-6
Figura A-9 - Evolução do deslocamento a meio vão em função da temperatura: a) viga $\Sigma$ com restrição axial; b) viga $2\Sigma$ com restrição axial e rotacional.....	A-7
Figura A-10 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição axial das vigas $2\Sigma$ (a) e $\Sigma$ (b) para 30% do nível de carga.....	A-8
Figura A-11 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição axial $2\Sigma$ (a) e $\Sigma$ (b) para 50% do nível carga.....	A-8
Figura A-12 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional das vigas $2\Sigma$ (a) e $\Sigma$ (b) para 15% de restrição axial e 50% do nível de carga.....	A-9
Figura A-13 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional $2\Sigma$ (a) e $\Sigma$ (b) para 15% de restrição axial e 70% do nível de carga.....	A-9
Figura A-14 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional $2\Sigma$ (a) e $\Sigma$ (b) para 60% de restrição axial e 30% do nível de carga.....	A-10
Figura A-15 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional $2\Sigma$ (a) e $\Sigma$ (b) para 60% de restrição axial e 50% do nível de carga.....	A-10

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Programa experimental a modelar .....	23
Quadro 3.2 – Aproximações obtidas para a temperatura crítica.....	37
Quadro 4.1 – Rigidez axial, rigidez rotacional e esbelteza adimensional das vigas em estudo. .....	42

---

## SIMBOLOGIA

### Letras maiúsculas latinas

°C	Graus Celsius
$E_a$	Módulo de elasticidade do aço
$E_{a,\Theta}$	Módulo de elasticidade do aço à temperatura $\Theta$
K	Graus Kelvin
L	Comprimento de vão livre das vigas
$M_{b,Rd}$	Valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral à temperatura normal
S	Aço
Z	Zinco

### Letras minúsculas latinas

$f_y$	tensão de cedência a 20°C
$f_{y,\Theta}$	tensão de cedência efetiva à temperatura $\Theta$
$f_{p,\Theta}$	tensão limite de proporcionalidade
$f_{0,2p,\Theta}$	tensão limite de proporcionalidade do aço a 0.2% à temperatura $\Theta$
$k_a$	restrição axial à elongação térmica da viga
$k_{a,b}$	rigidez axial da viga
$k_r$	restrição rotacional nos apoios da viga
$k_{r,b}$	rigidez rotacional da viga
m	metros
mm	milímetros
min	minutos

### Letras maiúsculas gregas

$\Sigma$	secção transversal sigma
----------	--------------------------

### Letras minúsculas gregas

$\epsilon_{p,\Theta}$	extensão limite de proporcionalidade à temperatura $\Theta$
$\epsilon_{y,\Theta}$	extensão de cedência à temperatura $\Theta$

$\varepsilon_{t,\Theta}$	extensão limite para o patamar de cedência à temperatura $\Theta$
$\varepsilon_{y,\Theta}$	extensão última à temperatura $\Theta$
$\bar{\lambda}_{LT}$	esbelteza adimensional para a encurvadura lateral

## ABREVIATURAS

DEC	Departamento de Engenharia Civil
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da UC
FEA	Análise por elementos finitos
Exp.	Experimental
UC	Universidade de Coimbra

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações iniciais

A aplicação de elementos estruturais de aço enformado a frio tem apresentado um crescimento na indústria da construção. Este crescimento deve-se às vantagens que este material pode apresentar relativamente aos materiais mais conhecidos e mais comuns nas obras de engenharia civil, como o betão armado, o aço laminado a quente ou a madeira. Entre as várias características deste material, pode-se referir como principais vantagens, a sua elevada relação resistência/peso, o tempo reduzido quanto à produção e montagem, baixos custos no transporte, facilidade de manuseamento, dispensa de cofragens, ser reciclável, fatores que, de um modo geral, podem conduzir a uma construção económica para alguns tipos de estruturas. Portanto, esta solução torna-se competitiva quando houver necessidade de vencer vãos de pequenas dimensões ou cargas reduzidas. Também pode-se destacar que os elementos estruturais de aço enformado frio podem surgir com várias formas, secções transversais em U, C, Z,  $\Sigma$ ,  $\Omega$ , tubulares, entre outras. Estas secções podem apresentar enrijecedores (reforços intermédios e/ou de extremidade) e podem ser constituídas por vários perfis aparafusados (secções compostas), o que facilmente possibilita um aumento da relação resistência/peso, favorecendo ainda mais esta vantagem. Por outro lado, estas secções tem uma forte suscetibilidade a fenómenos de instabilidade devido ao elevado coeficiente de esbelteza que apresentam, oferecem uma baixa resistência quando sujeitas ao fogo, por apresentarem elevada condutibilidade térmica e massividade (ou fator de forma). Ao nível do dimensionamento das suas capacidades resistentes, apresenta uma metodologia complexa e extensa e que pode levar a uma falta de confiança e interesse por parte dos projetistas neste tipo de material.

O dimensionamento complexo das capacidades resistentes dos perfis de aço enformado a frio deve-se à versatilidade do processo de fabrico e quando comparado com os perfis de aço laminado a quente, além de ser necessário analisar os fenómenos de instabilidade globais, por flexão, por torção, por flexão-torção e por encurvadura-lateral, ainda é indispensável a consideração de outros fenómenos de instabilidade como local e distorcional. Em geral, estas secções também apresentam o centro de corte não coincidente com o centro de gravidade, ou seja, possuem uma baixa resistência à torção, elevando assim a complexidade de cálculo.

Ao longo dos últimos tempos verifica-se um aumento no desenvolvimento de vários sistemas estruturais de aço enformado a frio, sendo estes aplicados principalmente em pavilhões industriais e mais recentemente na construção residencial, destacando os sistemas de paredes

porticadas (“*stud walls*”), sistemas de vigas para suporte de pisos e utilização de lajes mistas com chapa colaborante de aço enformado a frio. Estes desenvolvimentos têm sido acompanhados pelas normas de dimensionamento destes elementos estruturais à temperatura ambiente, EN 1993-1-3:2006, e que já apresenta métodos de cálculo de modo a considerar os fenómenos de instabilidade anteriormente referidos na obtenção da resistência dos mesmos. No entanto, quando se trata do comportamento destes elementos em situação de incêndio, pode-se afirmar que os estudos e investigações realizadas são insuficientes, principalmente no que diz respeito a estudos experimentais e numéricos referentes a vigas. Portanto, esta insuficiência transmite-se na ausência de uma norma específica no cálculo da resistência dos elementos estruturais de aço enformado a frio em situação de incêndio. Todavia, pode-se encontrar na EN1993-1-2:2005 metodologias de cálculo para elementos de aço enformado a frio mas que podem resultar em soluções muito conservativas, como a adoção de sistemas pouco otimizados de proteção ao fogo e consequente dimensionamento pouco económico e ecológico. Isto deve-se também ao facto desta mesma norma encontrar-se dedicada, na sua generalidade, ao dimensionamento ao fogo de perfis de aço laminado a quente.

## 1.2. Motivações

A criação de normas específicas para o dimensionamento ao fogo de elementos de aço enformado a frio deve-se à necessidade de garantir a segurança durante a vida útil das estruturas constituídas por este material, otimizando ao máximo as suas capacidades resistentes. Portanto, para que estes elementos estruturais sejam uma opção competitiva no mercado, nas diversas soluções estruturais, é de extrema necessidade desenvolver e aprofundar o conhecimento sobre o seu comportamento quando sujeitos a temperaturas elevadas.

Ao aprofundar este conhecimento é possível criar metodologias de cálculo mais simples, facilitando e incentivando a aplicação destes elementos estruturais por parte dos projetistas, aumentando assim a utilização deste na construção. Neste sentido, a realização deste estudo numérico vem dar continuidade a uma investigação experimental efetuada no DEC da FCTUC sobre o comportamento de vigas  $\Sigma$  simples e compostas de aço enformado a frio sujeitas a altas temperaturas (Ferrer, 2014), inserido no projeto de investigação PTDC ECM/116859/2010 financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

A falta de confiança neste material como “esqueleto” principal de uma estrutura era muito comum num passado recente, e por isso, era utilizado geralmente em elementos secundários numa estrutura, como madres de cobertura e suporte de fachadas, ou ainda como vigas de suporte de pisos sujeitos a carregamentos reduzidos. A falta de sentimento de segurança por parte de possíveis clientes deve-se ao facto das estruturas constituídas por este tipo de elementos

serem visualmente muito esbeltas. Atualmente este panorama tende a alterar, sendo possível encontrar nos dias de hoje inúmeras estruturas constituídas totalmente por aço enformado a frio (embora algumas das vezes sobredimensionadas).

### 1.3. Objetivos

O objetivo principal deste estudo é desenvolver os modelos de cálculo de forma a serem capazes de estimar/prever o comportamento das vigas  $\Sigma$  (simples e compostas) quando sujeitas a altas temperaturas com uma grande aproximação, utilizando o programa de elementos finitos Abaqus. A partir destes modelos numéricos desenvolveu-se um estudo paramétrico, onde foi possível observar e analisar diferentes comportamentos dos elementos estruturais em estudo.

Para a realização do estudo foi necessário, numa primeira fase, calibrar os modelos térmicos e estruturais deste tipo de perfis, sendo esta calibração feita através de comparação gráfica com os resultados obtidos na investigação experimental anteriormente efetuada (Ferrer, 2014). A análise numérica desenvolvida envolveu um estudo paramétrico que consistiu na variação de alguns parâmetros – comprimento de vão livre, níveis de carregamento, níveis de restrição axial nas extremidades das vigas e níveis de restrição rotacional nos apoios das mesmas – prevendo a resposta deste tipo de elementos em inúmeras condições sem recorrer a muitos recursos. Posteriormente, esses resultados foram confrontados com as limitações apresentadas pela EN 1993-1-2 (2005) para este tipo de secções.

Em suma, os principais objetivos deste estudo foram:

- Desenvolver modelos numéricos, recorrendo ao método de elementos finitos, capaz de estimar/prever o comportamento de elementos estruturais de aço enformado a frio à flexão em situação de incêndio;
- Calibrar os modelos numéricos desenvolvidos comparando com resultados experimentais;
- Realizar um estudo paramétrico com o objetivo de analisar o efeito do nível de carga inicialmente aplicado, bem como a variação dos níveis de restrição axial e rotacional à dilatação térmica para diferentes comprimentos das vigas em situação de incêndio.
- Contribuir para uma futura revisão da EN1993-1-2:2005, relativo ao dimensionamento ao fogo deste tipo de elementos, com o desenvolvimento dos modelos numéricos referidos anteriormente.



#### **1.4. Organização da dissertação**

A estrutura desta dissertação é composta por quatro capítulos. No primeiro capítulo pode-se encontrar a introdução ao tema de investigação, bem como, os principais motivos e objetivos associados ao desenvolvimento da mesma. O segundo capítulo exhibe aspetos importantes para a análise dos elementos estruturais de aço enformado a frio, como a história da utilização destes elementos, os seus processos de fabrico, o seu comportamento estrutural e fenómenos associados. Este inclui também análise de trabalhos e de artigos científicos que apresentam estudos/investigações que expõem, não só as matérias já referidas, como a análise de imperfeições e tensões residuais, o comportamento estrutural a temperaturas elevadas de vigas de aço enformado a frio (ao nível numérico e experimental). Ainda neste capítulo podem-se encontrar referências às propriedades térmicas e mecânicas do aço com o aumento da temperatura segundo a EN 1993-1-2 (2005) e que foram comparadas com sugestões de outros investigadores. No terceiro capítulo apresenta-se todo o processo da análise numérica, sendo que o principal foco desta análise foi o de calibrar os modelos numéricos, formulados no Abaqus, com os resultados experimentais (Ferrer, 2014). Esta calibração permitiu a realização de um estudo paramétrico, dando a possibilidade que no futuro haja continuidade do mesmo, e assim viabilizar o desenvolvimento de novos métodos de dimensionamento de maneira a contribuir para uma futura revisão da EN 1993-1-2 (2005). Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho de investigação efetuado, como também, propostas para desenvolvimentos futuros.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Considerações gerais

No campo da construção metálica podem ser utilizados três tipos de elementos estruturais, perfis laminados a quente, perfis soldados e perfis de chapa fina, sendo estes últimos designados por enformados a frio. Este tipo de tecnologia tem vindo a ser cada vez mais utilizada na construção civil por se tratar de perfis pré-fabricados que permitem uma construção mais rápida, económica e segura. Estas características devem-se essencialmente:

- À fiabilidade deste material por ser homogéneo, com tensões de cedência e de rotura e módulo de elasticidade bem definidos;
- Maior limpeza em obra, devido à ausência de escoramento, cofragens, etc.;
- Em função da maior resistência do material, as peças de aço são mais esbeltas, com razão resistência/peso mais elevada, o que facilita o transporte e manuseamento das mesmas;
- Maior facilidade de montagem ou de ampliação de uma estrutura;
- Facilidade de desmontagem e reaproveitamento.

Estas vantagens na construção metálica tornam-se ainda mais evidentes quando se trata de perfis de aço enformado a frio, pois estes apresentam espessuras muito inferiores quando comparados com os perfis de aço laminados ou soldados, resultando num peso inferior dos elementos estruturais.

As propriedades físicas e mecânicas do aço levam à conceção de estruturas com esbelteza considerável, cujo dimensionamento tende a ser condicionado pela verificação da estabilidade e/ou deformabilidade global da estrutura ou dos seus elementos (Simões, 2014). Quando se trata de verificação de elementos de aço enformado a frio é ainda mais notável os fenómenos de instabilidade, como local e/ou distorcional, devido às espessuras reduzidas que estes apresentam. Portanto, estes fenómenos e suas interações são determinantes no dimensionamento de elementos constituídas por aço enformado a frio.

Outro fenómeno também problemático para os elementos de aço enformado a frio é quando se encontram sujeitos ao fogo, existindo poucos estudos realizados sobre esta matéria (Laím, 2013a). A elevada condutividade térmica do aço e o facto de as secções serem constituídas por paredes finas pode conduzir a um rápido aumento da temperatura do aço em caso de incêndio (elevado fator de forma), e juntamente com a deterioração das propriedades mecânicas em

função da temperatura pode causar deformações elevadas dos elementos estruturais, provocando assim uma perda significativa da capacidade resistente (Laím *et al.*, 2014).

Portanto, estudar e prever o exato comportamento destes elementos sujeitos a qualquer ação é necessário um vasto e exaustivo estudo devido à versatilidade que estes podem apresentar, isto é, a variação das características geométricas da secção e do perfil, bem como, das condições de fronteira podem levar a modos de instabilidade distintos. Para um melhor conhecimento e avaliação do comportamento destes elementos, a modelação numérica por elementos finitos tem um papel cada vez mais preponderante, uma vez que através desta é possível obter previsões dos modos de encurvadura com boa correspondência, não havendo necessidade de recorrer a muitos recursos.

### **2.1.1. Aplicações de elementos estruturais de aço enformado a frio**

Os perfis de aço enformado a frio começaram a ser utilizados na construção no final do século XIX nos Estados Unidos da América e no Reino Unido. No entanto, a aplicação destes elementos estruturais em edifícios tornaram-se populares apenas a meados do século XX. O aumento significativo da aplicação destes elementos e de outras soluções estruturais em aço deu-se devido ao cenário de abundância deste recurso durante este período, que coincidiu com o final da II Guerra Mundial (Laím, 2013a). Este aumento da utilização de soluções estruturais com perfis de aço enformado a frio foi ainda mais significativo nos edifícios de pequenas dimensões, tornando-se numa solução competitiva quando comparada com a construção tradicional em madeira.

Os princípios construtivos da aplicação estrutural de elementos de aço enformado a frio em muito se aproxima da construção tradicional em madeira, e pode-se destacar a incombustibilidade e a não suscetibilidade de térmitas e fungos como vantagens quando comparadas com soluções estruturais em madeira. Nas últimas décadas, a utilização de aço enformado a frio já representa uma solução competitiva relativamente aos restantes materiais utilizados no sector da construção em países no norte da Europa e na América do Norte. Em Portugal a realidade ainda é diferente, no entanto verifica-se um crescimento desta solução desde do início do século XXI aliado também ao início da produção destes elementos estruturais pela Perfisa, S.A. em São Pedro do Sul, tornando assim uma solução mais competitiva.

Os elementos estruturais de aço enformado a frio são geralmente aplicados como suporte de fachadas e/ou coberturas, ou seja, como elementos secundários de um estrutura (Figura 2.1 - a)). Todavia, já existem soluções estruturais constituídas totalmente com elementos de aço enformado a frio para edifícios até 5 pisos (Figura 2.1 - b)). Também é de notar que devido à

forma de produção destes elementos estes podem assumir várias geometrias e dimensões, tanto a nível transversal como longitudinal (Figura 2.1 - c)), desde que sejam respeitadas as normas estabelecidas e existam os meios necessários de produção. Na fase de montagem de uma estrutura constituída por elementos de aço enformado a frio destaca-se, uma vez mais, a facilidade de manuseamento das peças, rapidez na execução e limpeza em obra (Figura 2.1 - d)).

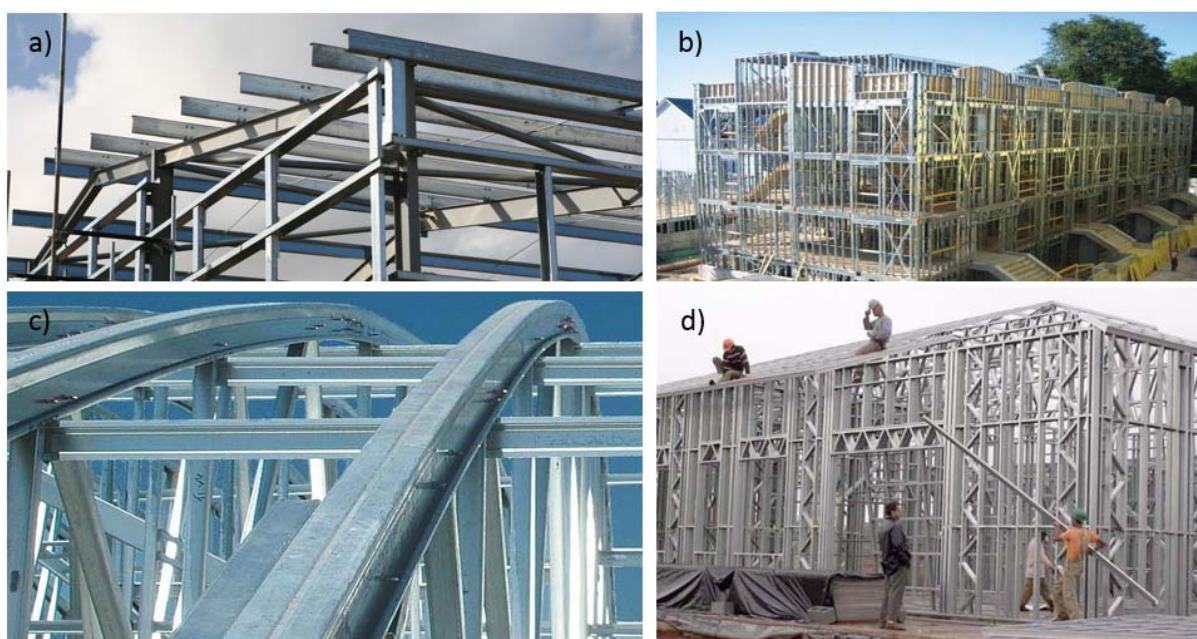


Figura 2.1 - Exemplos de aplicação de elementos estruturais de aço enformado a frio: (a) como elemento estrutural secundário (SwedSteel-metecno@); (b) edifício de vários pisos (arabianBusiness.com@); (c) flexibilidade dos elementos estruturais (Walls&Ceilings@); (d) aplicação e manuseamento (IBDA@).

## 2.2. Elementos estruturais

### 2.2.1. Tipos de elementos/secções

Relativamente à configuração de elementos estruturais de aço enformado a frio pode ser limitada a dois grupos, perfis e painéis, sendo que o primeiro pode ainda ser dividido em três tipos de secções, secções abertas simples, secções abertas compostas e secções fechadas compostas, sendo alguns exemplos apresentados na figura seguinte. Também nesta Figura 2.2 é possível observar a versatilidade do tipo secções transversais que podem constituir os perfis de aço enformados a frio.

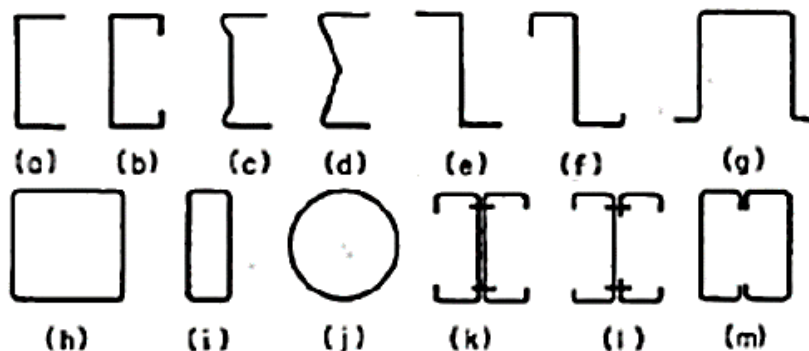


Figura 2.2 - Secções abertas simples: (a) perfil U; (b) perfil C; (c) e (d) perfis  $\Sigma$ ; (e) perfil Z enrijecido; (g) perfil  $\Omega$ . Secções fechadas: (h), (i) e (j) perfis tubulares. Secções compostas: (k), (l) e (m), (Yu & Laboube, 2010).

Os perfis são peças lineares fabricadas com chapas de aço de espessura entre 1,2 e 6,4 mm (Veríssimo, 2008), sendo que os mais correntemente utilizados na construção são os constituídos por secções transversais C, Z,  $\Sigma$ ,  $\Omega$  e tubulares, com e sem reforços intermédios e/ou de extremidade. Na produção destes perfis são correntemente utilizados perfis com aços das classes S280GD, S320GD e S350GD, no entanto podem ser fabricados perfis em que o aço constituinte apresente tensões de cedência desde os 220 até aos 550N/mm<sup>2</sup>.

Os painéis de chapa e chapas perfiladas (Figura 2.3) são peças laminares e são fabricados a partir de chapas de aço com espessuras entre 0,5 e 1,9mm, e são utilizados em lajes mistas de aço-betão ou em estruturas de suporte de paredes, pavimentos e coberturas (Veríssimo, 2008).

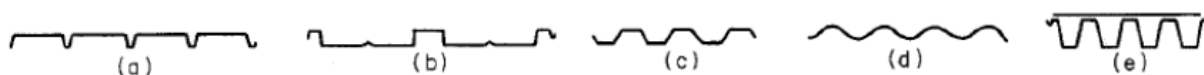


Figura 2.3 - Painéis de chapa e chapas perfiladas de aço enformado a frio (Yu & Laboube, 2010).

### 2.2.2. Processos de fabrico

O fabrico de perfis em aço enformado a frio começa com a produção de aço bruto, que é feito através da combinação de minério de ferro ou sucata de aço com pequenas quantidades de carbono num forno tradicional ou num forno de arco elétrico (Figura 2.4 – a)). O aço fundido por sua vez é transformado em placas de aço durante o processo de arrefecimento, as chamadas bandas quentes (Figura 2.4 – b)). Seguidamente no processo de acabamento, a banda quente é reduzida em aço laminado a frio, e por fim é aplicado um revestimento de proteção de zinco através do processo de galvanização (Figura 2.4 – c)), e é enrolado numa bobina (Figura 2.4 – d)).

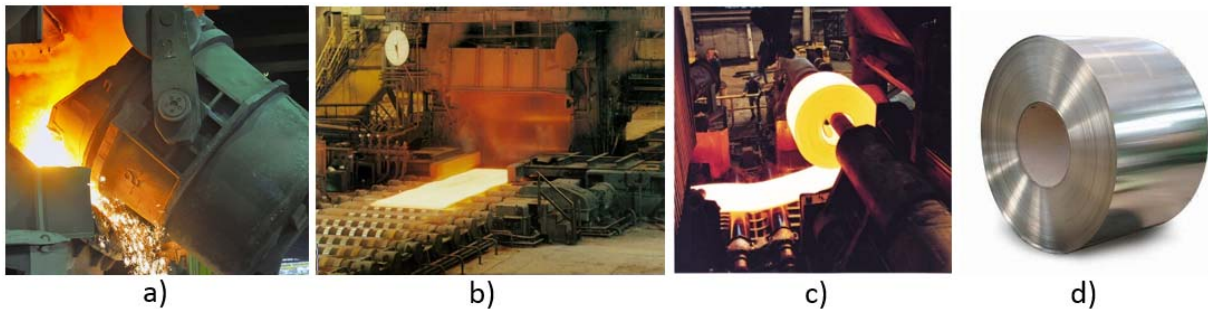


Figura 2.4 - Processo de fabrico do aço enformado a frio: a) aço derretido e d) bobina (SFIA@); b) bandas quentes e c) processo de galvanização (SteelConstruction.info@).

Para converter as bobinas em elementos estruturais de aço enformado frio, numa primeira fase, estas são cortadas em larguras que correspondem às dimensões pretendidas para o produto final. Posteriormente os perfis de aço enformado podem ser obtidos através de duas técnicas, por quinagem ou por laminagem a frio, sendo a última a mais utilizada, por produzir de forma sistematizada e eficiente para a produção em grande escala ou para obtenção de secções transversais mais complexas. A perfilhadora (Figura 2.5) é a máquina que realiza a operação de laminagem, e para tal é constituída por uma série de rolos compressores que vão moldando a chapa de acordo com a secção pretendida.

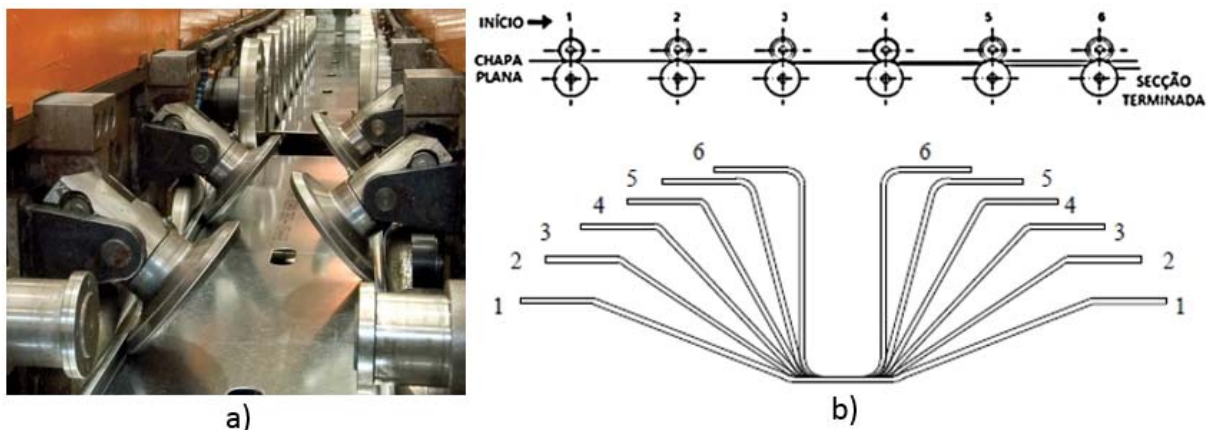


Figura 2.5 - a) Perfilhadora (SFIA@); b) Processo por laminagem a frio de um perfil  $\Omega$  (Rhodes, 1991).

Quanto ao primeiro processo referido, a quinagem, consiste na dobragem de uma fração de chapa, cujo comprimento é limitado pela dimensão da máquina que executa esta tarefa, designada por quinadora (Figura 2.6). Portanto, pode-se dizer que este processo tem uma aplicação limitada e consequentemente menos industrializado, servindo apenas para a execução de peças curtas e geometrias mais simples.

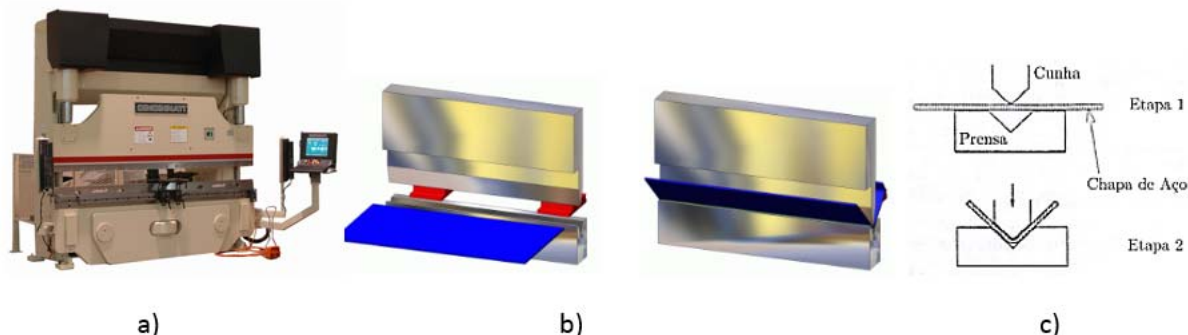


Figura 2.6 - a) Quinadora; b) Processo de quinagem (FUTURENG@); c) Etapas de quinagem (Veríssimo, 2008).

### 2.2.3. Comportamento estrutural à flexão/Modos de instabilidade

A maioria dos perfis de aço enformado a frio apresentam secções abertas de paredes (muito) finas, uma característica que os torna altamente propensos a fenómenos de encurvadura caracterizados pela ocorrência de deformação da secção transversal, ou seja, o eixo do elemento mantém-se indeformado (Dinis & Camotim, 2010).

Nas últimas décadas os estudos sobre o comportamento estrutural de vigas de aço enformado a frio têm aumentado, sendo que as matérias mais estudadas são os fenómenos de instabilidade (Figura 2.7), como (a) local, (b) distorcional, (c) lateral-torsional e as suas interações. Perceber e lidar com estes fenómenos tem sido o foco principal nas pesquisas mais recentes (Laím 2013b). O estudo destes fenómenos tem uma grande importância, pois estes ocorrem geralmente antes de ser atingida a resistência máxima da secção transversal quando comprimida, limitando assim a capacidade dos elementos estruturais. De seguida serão ilustrados os principais modos de instabilidade deste tipo de elementos quando sujeitos à flexão, sendo este o único esforço aplicado aos elementos em estudo neste projeto.

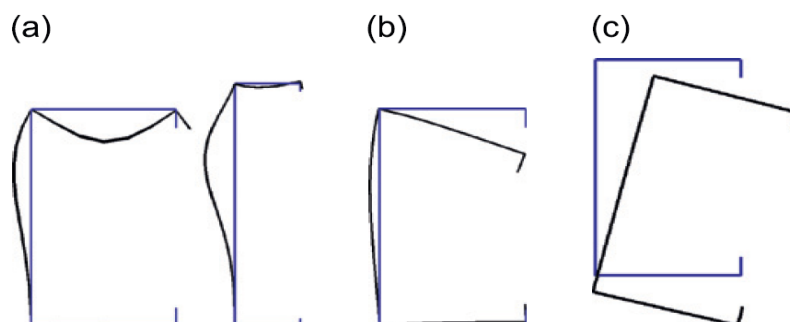


Figura 2.7 - a) Modos de encurvadura de elementos de aço enformado a frio de secção C submetidos à flexão: a) local (banzo e alma); b) distorcional; c) lateral-torsional (Dinis & Camotim, 2010).

O comportamento estrutural de um perfil de aço enformado a frio pode ser fortemente influenciado pelos vários modos de instabilidade (Figura 2.8 – a)), dependendo da sua geometria, como a forma e dimensões da secção transversal e comprimento da peça (Silvestre & Camotim, 2006). De modo a melhorar o comportamento estrutural das secções, limitando a sua suscetibilidade à deformação, Silvestre e Camotim representam graficamente (Figura 2.8 – b)) o aumento da resistência aquando da adoção de reforços/enrijecedores de extremidade e/ou intermédios.

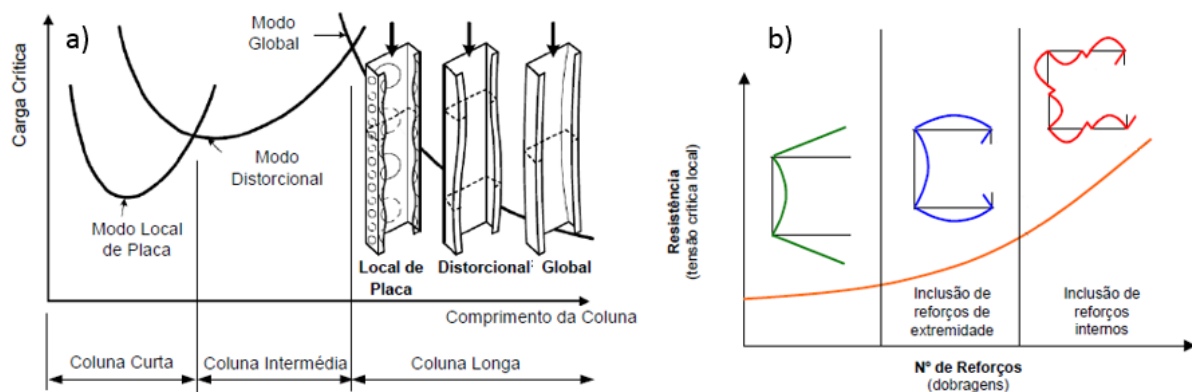


Figura 2.8 - a) Variação da configuração do modo de instabilidade com o comprimento da coluna; b) Influência dos reforços intermédios na resistência de secções enformadas a frio (Silvestre & Camotim, 2006).

#### 2.2.4. Imperfeições geométricas

As imperfeições geométricas iniciais podem ter duas naturezas, global e/ou local, a primeira consiste no empenamento da peça e conseqüente no desvio do eixo da mesma tirando linearidade ao elemento, a segunda, como o nome indica, refere-se a imperfeições localizadas na alma ou nos banzos que podem reduzir significativamente a capacidade resistente do elemento mesmo que não seja atingida a tensão última do material. Para quantificação destas imperfeições numa análise numérica diversos autores aconselham a adoção de valores na ordem  $L/200$  ou  $L/1000$  para as imperfeições globais e  $t$  para as imperfeições locais, sendo  $L$  o vão livre da viga e  $t$  a espessura da chapa.

Com o objetivo de estudar a influência destas imperfeições na capacidade resistente dos elementos estruturais à flexão, Laím realizou um estudo paramétrico em situação de incêndio (Figura 2.9), no qual determinou a temperatura crítica das vigas com a variação do nível de imperfeição inicial. Tendo concluído que é de extrema importância utilizar, no dimensionamento ao fogo das respetivas vigas, imperfeições e cargas de serviço tão próximas quanto as que se constatarem na realidade, uma vez que as imperfeições podem afetar a



temperatura crítica dos elementos à flexão em 20% e a carga de serviço em 70% (Laím *et al*, 2014).

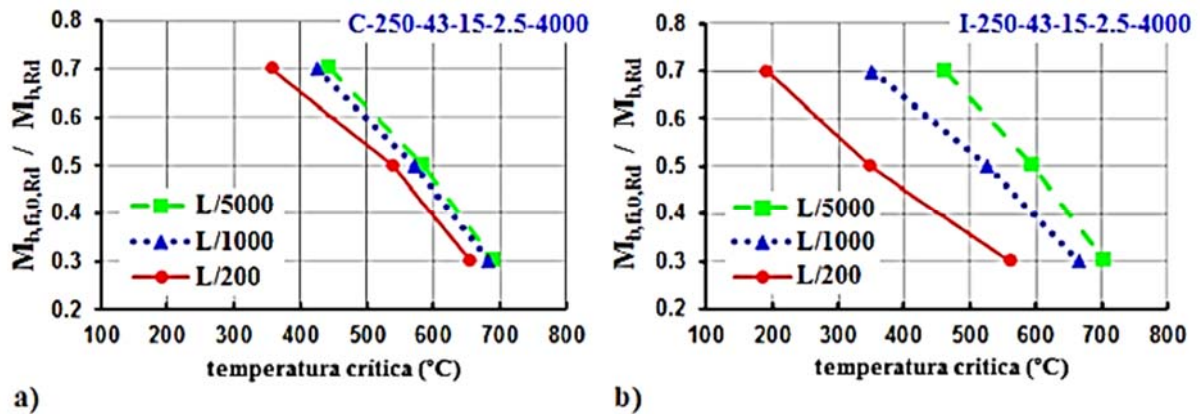


Figura 2.9 - Influência das imperfeições geométricas iniciais na temperatura crítica das vigas C (a) e I-enrijecido (b) (Laím *et al*, 2014).

As estruturas de aço enformado a frio de paredes finas são conhecidas por exigir avaliação da sua estabilidade estrutural. No entanto, a carga crítica é raramente determinada com precisão devido ao facto deste tipo de estruturas serem particularmente sensíveis às imperfeições geométricas. Estas imperfeições podem ser resultado do processo de fabrico, transporte, armazenamento e/ou processo construtivo. É reconhecido que as imperfeições geométricas iniciais, que os elementos podem apresentar, têm um papel significativo no comportamento não linear dos mesmos. Portanto, é necessário efetuar uma avaliação rigorosa destas imperfeições, de modo a prever o comportamento de encurvadura, bem como determinar as cargas de colapso dos elementos (Garifullin & Nackenhorst, 2015).

Quanto aos efeitos das imperfeições geométricas iniciais em vigas  $\Sigma$ , foi realizado um estudo paramétrico e os resultados indicaram que para vigas com valores de esbelteza baixos e intermédios, os momentos de flexão últimos são altamente sensíveis ao nível de imperfeição na encurvadura local do banzo comprimido. No entanto, para as vigas longas (esbelteza elevada) o modo de encurvadura global foi o mais sensível. Além disso, o modo de instabilidade das vigas curtas e intermédias é afetado pelo modo de imperfeição geométrica inicialmente assumido. E por último, as imperfeições locais com valores elevados influenciam as capacidades resistente das vigas simplesmente apoiadas (Figura 2.10) (Gendy & Hanna, 2015).

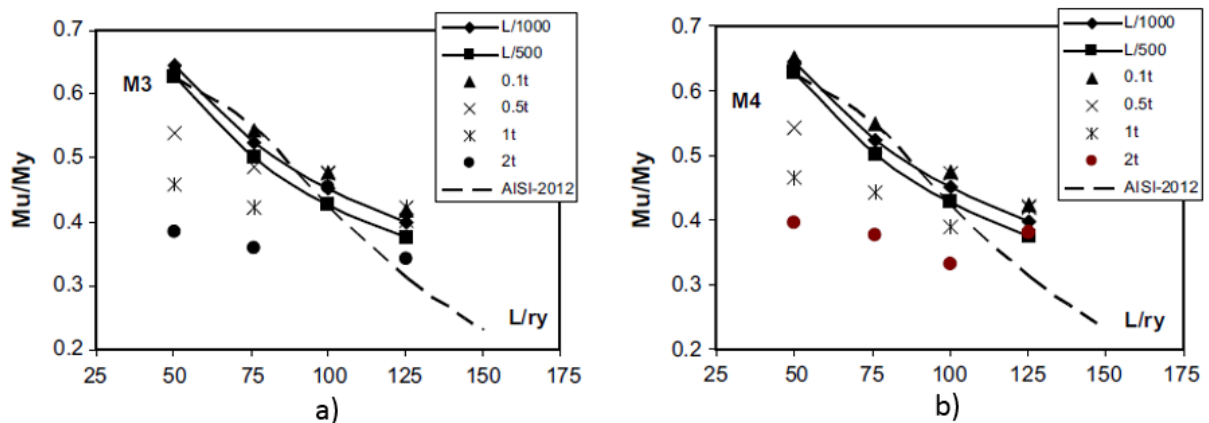


Figura 2.10 - Influência das imperfeições iniciais na capacidade resistente das vigas  $\Sigma$  para dois níveis de momento aplicado, a) M3 e b) M4 (Gendy & Hanna, 2015).

### 2.2.5. Imperfeições no material/Tensões residuais

As tensões residuais consistem na soma de dois grupos de tensões, de membrana e de flexão. As tensões de membrana caracterizam-se por uma distribuição de tensões constante ao longo da espessura da secção transversal e as tensões de flexão apresentam uma variação linear ao longo da espessura. De modo a entender melhor os efeitos destas tensões em elementos de aço enformado a frio Schafer e Peköz realizaram um estudo de modo a verificar os resultados das imperfeições em perfis C produzidos por laminagem ou quinagem, tendo concluído que o primeiro processo de produção possui tensões de membrana superiores e que leva a uma perda direta da resistência do elemento quando comprimido. Estes investigadores também concluíram que o maior efeito das tensões de membrana encontra-se na região das dobras, mas que devido ao endurecimento do aço e conseqüente aumento da tensão de cedência nessas zonas, poderão ser desprezados ambos os efeitos em modelos numéricos. Relativamente às tensões residuais de flexão, verificaram que estas podem atingir valores de grande magnitude, na ordem dos 50% da tensão de cedência, e que novamente variam consoante o processo de fabrico adotado. Portanto, para os perfis fabricados por laminagem a frio, 95% das tensões residuais por flexão nas dobras foram inferiores a  $0.67f_y$ , nos enrijecedores de extremidade menores que  $0.43f_y$  e nas restantes zonas da secção  $0.71f_y$ , já nos perfis fabricados por quinagem, estes mesmos valores foram  $0.56f_y$ ,  $0.40f_y$  e  $0.53f_y$ , respetivamente (Schafer & Peköz, 1998).

Nos elementos de aço enformado a frio, as tensões residuais não desempenham um papel tão importante como acontece nos elementos de aço laminado a quente. Nos elementos de aço laminado a quente as tensões residuais surgem durante o processo de arrefecimento e podem atingir 1/3 tensão de cedência, ou superior, e podem ocorrer em regiões importantes, tais como nas extremidades dos banzos de secções I e C. Geralmente a previsão da resistência à

compressão dos perfis de aço laminado a quente exige a inclusão das tensões residuais (Yu & Schafer, 2005).

Outro estudo também concluiu que a resistência à flexão das vigas de aço enformado a frio com ou sem tensões residuais é quase a mesma (Figura 2.11), sendo que nas vigas curtas com tensões residuais o momento de colapso foi ligeiramente inferior, enquanto que as vigas longas apresentaram valores ligeiramente superiores quando comparadas com as vigas sem tensões residuais (Kankanamge, 2010). Contudo, a temperaturas elevadas, os efeitos das tensões residuais são ainda mais reduzidos (Lee, 2004).

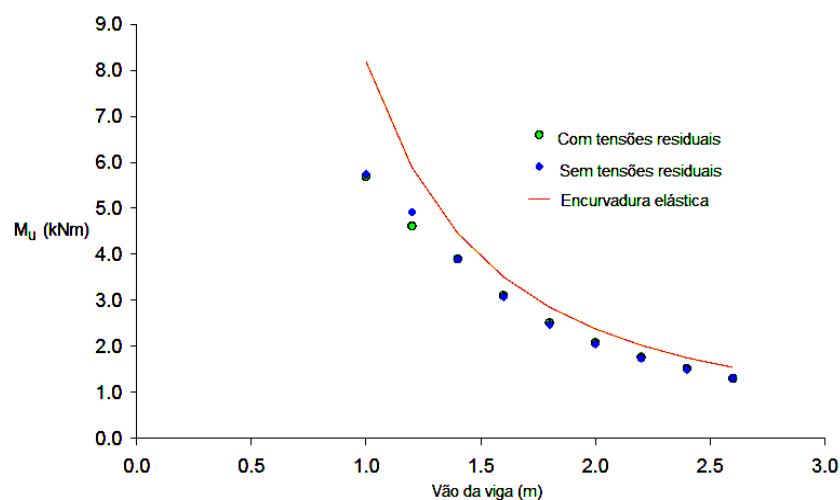


Figura 2.11 - Efeito das tensões residuais na capacidade resistente de vigas C de aço enformado a frio (Kankanamge, 2010), adaptado pelo autor.

### 2.3. Propriedades do aço enformado a frio a temperaturas elevadas

Para desenvolver um modelo numérico capaz de simular o comportamento estrutural das vigas em situação de incêndio é necessário definir como evoluem as propriedades que influenciam este comportamento com o aumento da temperatura. Sendo essas propriedades de origem térmica e mecânica. Neste trabalho serão analisadas as propriedades definidas pela EN 1993-1-2 (2005) e comparadas com propostas de correção, para algumas dessas propriedades, que resultaram de investigações realizadas por outros autores.

#### 2.3.1. Propriedades térmicas

Quando um corpo recebe energia calorífica através de condução, convecção e/ou radiação, o aumento da temperatura desse mesmo corpo também depende de outras propriedades térmicas, como o calor específico e a condutibilidade térmica, sendo que estas são responsáveis pela

resistência à transmissão de calor. O calor específico representa a quantidade de energia necessária para elevar uma unidade de temperatura de uma unidade de massa de uma substância e a condutibilidade térmica é a propriedade que permite quantificar o calor por unidade de tempo que atravessa uma camada de espessura e área unitária pela diferença de temperatura entre dois pontos. A evolução destas propriedades com o aumento da temperatura encontram-se dispostas na EN 1993-1-2 (2005) e representadas abaixo na Figura 2.12.

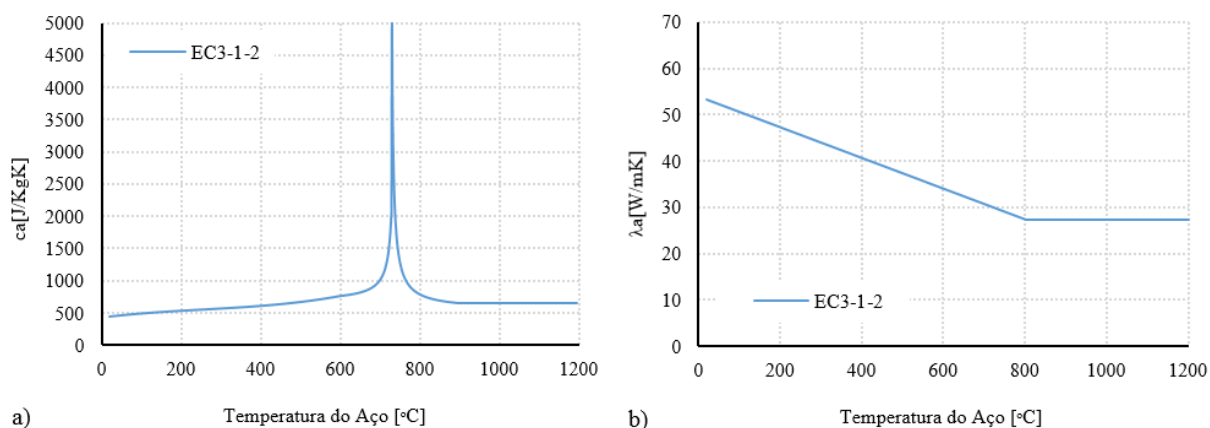


Figura 2.12 - Propriedades térmicas do aço carbono definidas na EN 1993-1-2: a) Calor específico; b) Condutibilidade térmica (adaptado pelo autor).

### 2.3.2. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do aço enformado a frio podem ser significativamente diferentes das propriedades das chapas de aço antes de enformar e das propriedades do aço laminado a quente, devido ao processo de enformação a frio. Durante este processo, a tensão de rotura e de cedência aumentam, enquanto a ductilidade diminui. Estas alterações nas propriedades mecânicas devem-se essencialmente a três fenómenos, o endurecimento, o envelhecimento e o efeito de Bauschinger, sendo que este último indica que a tensão de cedência à compressão é inferior à tensão de cedência à tração (Craveiro *et al*, 2016). Numa situação de incêndio as propriedades mecânicas do aço deterioram-se devido ao aumento da temperatura, reduzindo substancialmente a capacidade de carga dos elementos estruturais.

A EN 1993-1-2 (2005) apresenta uma relação tensão-extensões (Figura 2.13), a partir da qual se deve determinar as propriedades de resistência e de deformação do aço a temperaturas elevadas, para taxas de aquecimento entre 2 K/min e 50 K/min.

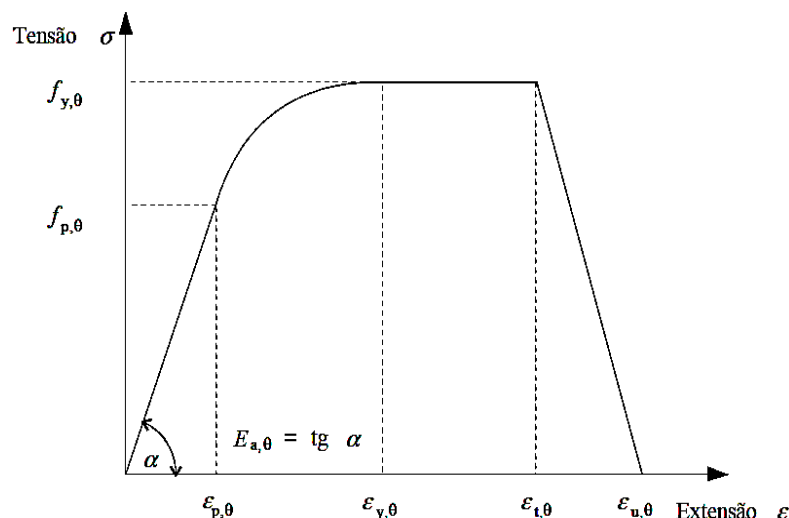


Figura 2.13 – Relação tensões-extensões para o aço carbono a temperaturas elevadas (EN 1993-1-2:2005).

Portanto, o quociente das propriedades de resistência e de deformação do aço a uma temperatura  $\Theta$  com o valor destas à temperatura normal ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ) resulta nos fatores de redução das propriedades mecânicas. A EN 1993-1-2 (2005) já apresenta os valores desses fatores, facilitando a determinação das propriedades mecânicas do aço a temperaturas elevadas. No entanto, esta mesma norma admite que a evolução dos fatores de redução com o aumento da temperatura para as secções da classe 4 enformadas a frio seja o mesmo para secções da classe 4 laminadas a quente ou soldadas. Diversos estudos experimentais sobre esta temática revelam que existe necessidade de definir novos fatores de redução específicos para as propriedades mecânicas do aço enformado a frio (Chen & Young 2007, Kankanamge & Mahendran 2011, Craveiro *et al.* 2016).

Para o cálculo de resistência de elementos estruturais de aço enformado a frio em situação de incêndio é necessário definir a evolução das suas propriedades com o aumento da temperatura, como a tensão de cedência e o módulo de elasticidade. Nas Figura 2.14 e Figura 2.15 pode-se observar a evolução dos fatores de redução para o cálculo da tensão de cedência e para o cálculo do módulo de elasticidade, respetivamente, a uma temperatura  $\Theta$ . Nestas mesmas figuras são apresentadas propostas de correção para as curvas indicadas pela EN 1993-1-2 (2005), que resultaram de uma investigação experimental, para a determinação das propriedades mecânicas do aço S280 GD+Z, levada a cabo por Craveiro *et al.* (2016). Estes investigadores determinaram que a propriedade resistente, como a tensão de cedência (Figura 2.14), definida pela EN 1993-1-2 (2005) está sobrestimada para qualquer nível de temperatura testado. No entanto, para a capacidade de deformação (Figura 2.5) os valores regulamentares são conservativos.

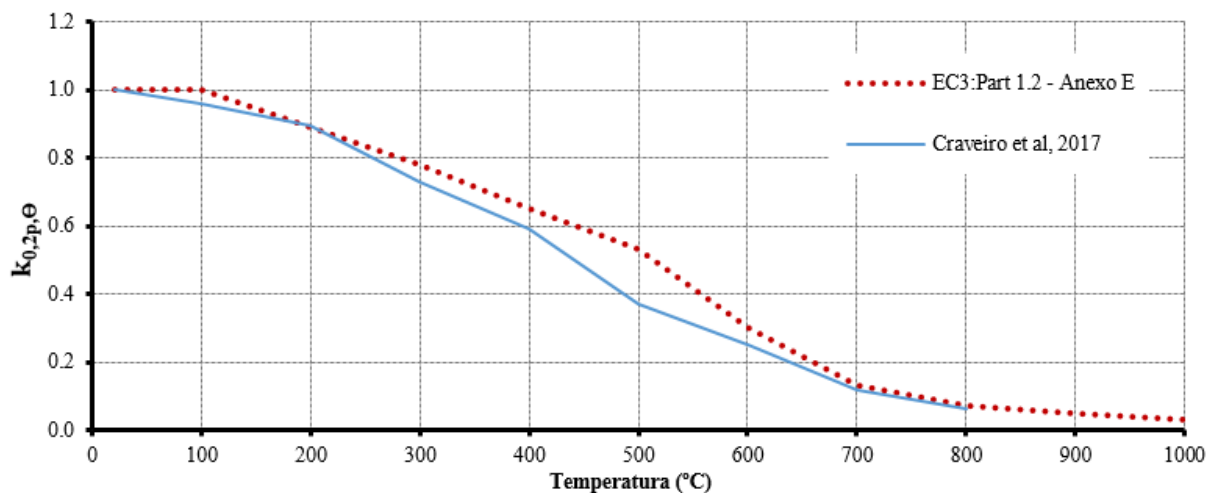


Figura 2.14 – Comparação de resultados referentes ao fator de redução para o valor de cálculo da tensão de cedência de seções Classe 4 enformadas a frio ( $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta} / f_y$ ).

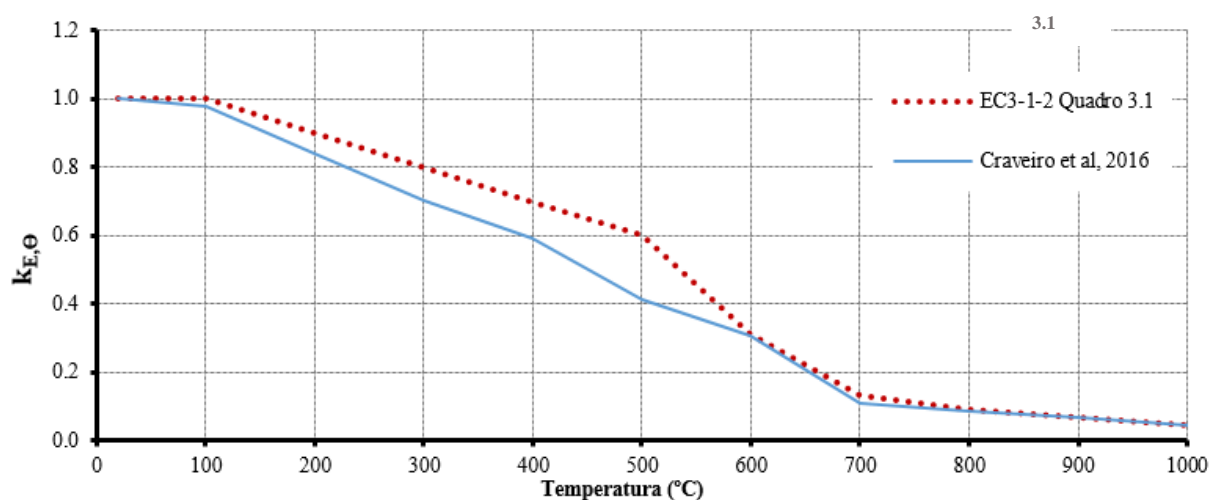


Figura 2.15 – Comparação de resultados referentes ao fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico ( $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$ ), regulamentar e experimental.

Por último, a extensão térmica é, também, uma propriedade relevante para a determinação da resistência dos elementos estruturais de aço enformado a frio. Esta propriedade é responsável pelo aumento de volume de um corpo quando a temperatura do mesmo aumenta. Nos elementos estruturais esse aumento de volume é responsável pela indução de esforços e que podem reduzir a capacidade resistente dos mesmos. A EN 1993-1-2 (2005) também apresenta a evolução da extensão térmica com o aumento da temperatura mas alguns autores, como Chen e Young (2007) e Craveiro *et al.* (2016), defendem que a curva apresentada pela mesma encontra-se desajustada e demasiado conservativa. Como se pode observar na Figura 2.16, os resultados obtidos através de investigações experimentais revelaram que o alongamento do aço, quando sujeito a temperaturas elevadas, é inferior ao proposto pela regulamentação. Portanto, a

utilização da curva regulamentar em estudos numéricos levará a extensões superiores e como consequência, forças de restrição à elongação térmica elevadas, reduzindo a resistência do elemento em análise.

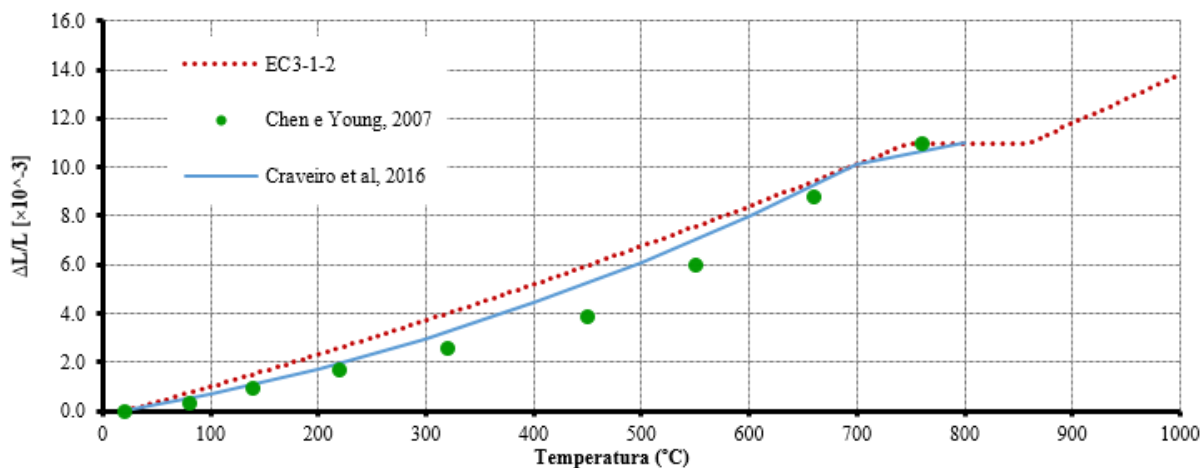


Figura 2.16 – Comparação de resultados referente à extensão térmica relativa do aço carbono ( $\Delta L/L$ ) em função da temperatura, regulamentar e experimentais.

## 2.4. Estudos realizados sobre vigas de aço enformado a frio

A investigação efetuada sobre o comportamento ao fogo de estruturas de aço enformado a frio não é extensa, no entanto nos anos mais recentes tem vindo a ser cada vez mais estudado (Kaitila 2002).

Uma análise experimental e numérica foi realizada por Laím *et al* (2013b) sobre o comportamento estrutural de vigas de aço enformado a frio. Este estudo consistiu na realização de ensaios experimentais à temperatura ambiente de vigas de secção transversal C, I, R e 2R (Figura 2.17 – a)). Posteriormente, com base nestes ensaios desenvolveram-se modelos numéricos capazes de simular o comportamento estrutural verificado nos ensaios experimentais, com o objetivo de realizar um estudo paramétrico. Deste estudo paramétrico (Figura 2.17 – b)), observou-se que as vigas R apresentaram uma relação resistência / peso pelo menos duas vezes superior às vigas C. Também observaram, que o aumento da espessura e da altura das secções transversais tem influência na relação resistência / peso até um certo valor. E por último, constataram que o parâmetro que maior influencia teve na relação resistência / peso foi o comprimento das vigas, sendo este ainda mais penalizador para as vigas R. Este mesmo autor afirma que a aproximação entre os ensaios experimentais e numéricos prova que a análise de elementos finitos é uma ferramenta confiável para obter resultados precisos.

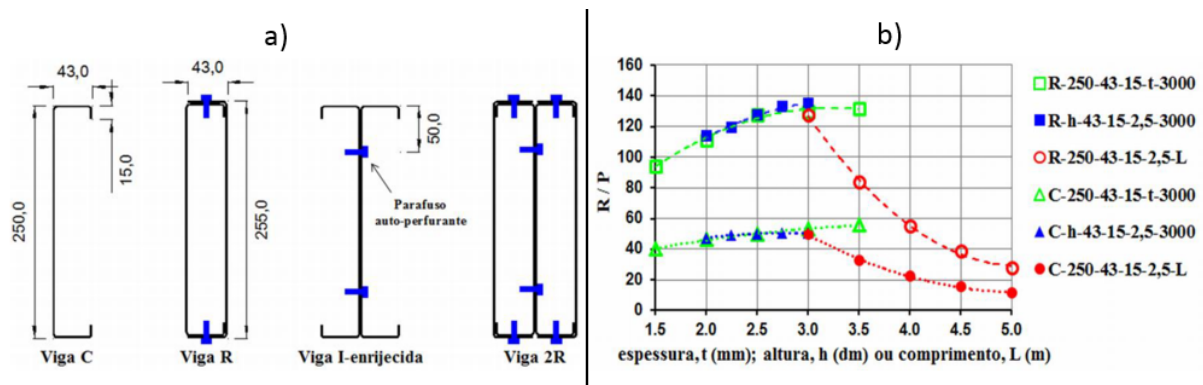


Figura 2.17 – a) esquema das secções transversais das vigas modeladas; b) relação entre a resistência das vigas e o seu peso próprio em função da espessura, altura e comprimentos das respectivas vigas (Laím *et al*, 2013b).

Na continuação deste último estudo apresentado, Laím *et al* (2014) avançaram com um estudo experimental para as mesmas vigas, mas desta vez em situação de incêndio. Uma das principais conclusões nesta investigação foi que a temperatura crítica das vigas é fortemente afetada pela restrição à elongação térmica da própria viga. Este estudo também mostrou que a temperatura crítica das vigas simplesmente apoiadas foi cerca de 700°C, enquanto que a temperatura crítica para as vigas com restrição à elongação térmica depende da forma da secção transversal e, em alguns casos diminui cerca de 30% para 15 kN/mm de restrição axial e em 20% para 3 kN/mm de restrição axial. Por outro lado, os resultados obtidos mostraram que a temperatura crítica pode aumentar significativamente para as vigas C, I e R com restrição rotacional parcial nos apoios, verificando aumentos de 20% da temperatura para 150 kNm/rad de restrição axial. Quanto aos modos de encurvadura que condicionaram o colapso das vigas nos ensaios experimentais, à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas, estes observaram que o modo de encurvadura lateral-torsional foi o principal responsável nas vigas de secção aberta, e para as vigas de secção fechada o principal modo foi o distorcional.

Ainda sobre o comportamento estrutural de vigas de aço enformado a frio em situação de incêndio, os mesmos investigadores (Laím *et al*, 2015) levaram a cabo um estudo experimental sobre vigas de secção transversal  $\Sigma$  e  $2\Sigma$ , sendo este o estudo base para a realização da análise numérica presente nesta dissertação. A principal conclusão deste estudo foi que as vigas  $\Sigma$  apresentaram temperaturas críticas similares às vigas C, anteriormente estudadas, independente das condições de apoio, enquanto que as vigas  $2\Sigma$  apresentaram um comportamento diferente das vigas I. Também mostraram que, quando as vigas não se encontram axialmente restringidas, as vigas sem enrijecedores na alma podem apresentar um melhor comportamento estrutural em condições de incêndio, o que não aconteceu para as vigas com restrição à dilatação térmica. Por outras palavras, as vigas  $\Sigma$  podem apresentar um melhor comportamento estrutural quando sujeitas à flexão composta, do que nas vigas sujeitas apenas à flexão. Quanto aos modos de



instabilidade verificados nas vigas  $2\Sigma$  sujeitas à flexão, a instabilidade deu-se pela alma, e quando sujeitas à flexão composta estas apresentaram o modo de instabilidade por encurvadura lateral-torsional. Este estudo permitiu também descobrir que a rigidez e resistência do aço nos enrijecedores da alma podem ser completamente comprometidas para temperaturas elevadas, uma vez que a mesma secção  $2\Sigma$ , com as mesmas condições de apoio e de carregamento sujeita à flexão composta, em situação de incêndio cedeu por corte.

Em jeito de conclusão, pode-se afirmar que os métodos de dimensionamento de elementos de aço enformado a frio em situação de incêndio atualmente utilizados (EN 1993-1-2:2005) podem ser conservativos, como se pode verificar nos resultados apresentados na Figura 2.18, que correspondem aos ensaios experimentais das vigas  $\Sigma$ . Para além disso, esses métodos de cálculo apresentados no Eurocódigo 3 admitem que condições de fronteira nos apoios e nas extremidades se mantêm inalteradas durante toda a exposição ao fogo, o que não se verificou para as diferentes variações de restrição nos ensaios experimentais a temperaturas elevadas. Este aspeto relevante no dimensionamento de elementos de aço enformado a frio em situação de incêndio é um dos principais focos do estudo paramétrico a realizar nesta dissertação, de modo a contribuir para uma futura revisão da EN 1993-1-2 (2005).

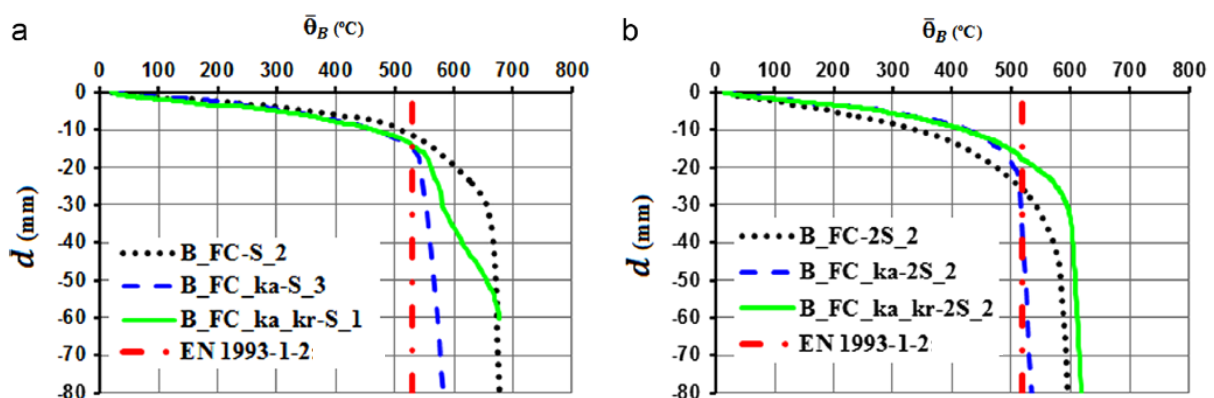


Figura 2.18 – Comparação dos resultados experimentais com as previsões da EN 1993-1-2 para as vigas de secção transversal  $\Sigma$  (a) e  $2\Sigma$  (b) (Laím *et al*, 2015).

## 2.5. Consideração finais

Nesta revisão bibliográfica foi possível observar todas as características que influenciam a capacidade dos elementos estruturais de aço enformado a frio, desde o seu fabrico até à alteração das suas propriedades com o aumento da temperatura.

A facilidade de transporte, manutenção e manuseamento de elementos de aço enformado a frio na execução de estruturas pode resultar em erros que alteram o seu comportamento estrutural,

ou seja, a necessidade de mão-de-obra qualificada neste tipo de estruturas é indispensável. Estes erros podem gerar imperfeições geométricas, além das imperfeições que resultam do processo de fabrico, que reduzem as capacidades resistentes dos elementos. Portanto, a consideração destas imperfeições na determinação da capacidade resistente de um elemento estrutural de aço enformado a frio é estritamente necessária. A simulação destas imperfeições num modelo numérico é efetuada com a introdução de deformações iniciais nos elementos.

Neste capítulo foi, também, possível observar a sensibilidade destes elementos quando comprimidos, devido às características das suas secções transversais. Estas secções por serem abertas de paredes finas tornam os elementos de aço enformado a frio altamente propensos a fenómenos de encurvadura, sendo estes os principais responsáveis pela diminuição das capacidades resistentes. Estes modos de instabilidade podem ser de origem local, distorcional, lateral-torsional ou até mesmo, interações entre os mesmos. Portanto, esta temática tem sido um dos principais focos nas investigações sobre o comportamento estrutural destes elementos.

Quanto às imperfeições no material, mais concretamente as tensões residuais associadas aos processos de fabrico dos elementos de aço, as investigações científicas apresentadas demonstraram que estas não alteram significativamente o comportamento estrutural dos elementos de aço enformado a frio, sendo quase nulas para temperaturas elevadas. Ou seja, visto que a análise numérica presente nesta dissertação consiste no estudo de vigas de aço enformado a frio em situação de incêndio, estas tensões não foram contabilizadas nos modelos numéricos desenvolvidos.

A deterioração das propriedades mecânicas e a alteração das propriedades térmicas que serão utilizadas durante a análise numérica presente nesta dissertação. Sendo este, um dos principais objetivos na fase de calibração dos modelos numéricos, verificando quais as curvas que se aproximam melhor do comportamento estrutural das vigas em situação de incêndio. Foram analisadas, não só, a evolução destas propriedades com o aumento da temperatura definidas na EN 1993-1-2 (2005), bem como, propostas de correção para as mesmas. Estas propostas de correção resultaram de investigações experimentais sobre os aços que normalmente constituem os perfis de aço enformado a frio.

Para as investigações, já efetuadas, no âmbito do comportamento ao fogo de elementos viga de aço enformado a frio, estas concluíram, na sua generalidade, que os regulamentos para o dimensionamento destes elementos em situação de incêndio (EN 1992-1-2:2005) encontram-se desajustadas e muito conservativo em algumas limitações impostas. Uma dessas imposições é a limitação de 350°C para determinação da capacidade resistente destes elementos, que não se verifica nos casos apresentados.

### 3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

#### 3.1. Considerações iniciais




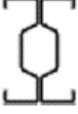


Neste trabalho foram desenvolvidos os modelos numéricos, recorrendo ao método de elementos finitos do *software* Abaqus, para simulação do comportamento de vigas de aço enformado a frio com reforços longitudinais para a situação de incêndio. Para desenvolver estes modelos, em primeiro lugar, foi necessário calibrá-los com base em ensaios experimentais anteriormente realizados no Laboratório de Ensaios e Materiais da Universidade de Coimbra (Ferrer, 2014). Numa parte inicial deste capítulo foram expostas as características dos ensaios referidos anteriormente, sendo o restante dedicado a todo o processo de calibração, tanto a nível das condições de fronteira de origem térmica, como para as propriedades estruturais.

Como os elementos estruturais de aço enformado a frio apresentam uma análise estrutural altamente complexa, conseqüente de um comportamento não-linear, geométrico e material, o programa de elementos finitos do Abaqus é uma ferramenta computacional poderosa para modelação deste tipo de estruturas, de modo a prever a resposta destas quando solicitadas. No meio científico, a adoção de simulações numéricas tem vindo a assumir um papel cada vez mais relevante, dando a possibilidade de obter um conjunto de resultados para a resposta de elementos estruturais para as mais variadas situações de forma mais rápida e económica, o que não seria possível através de uma análise experimental.

##### 3.1.1. Programa experimental

A investigação experimental, anteriormente realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do DEC-FCTUC (Ferrer, 2014), e que foi a base para o desenvolvimento numérico aqui apresentado, consistiu em vários ensaios de resistência ao fogo em vigas de aço galvanizado enformado a frio. As vigas ensaiadas foram constituídas pelas mesmas secções aqui tratadas,  $\Sigma$  simples e  $\Sigma$  composta. Nestes ensaios as vigas foram sujeitas a diferentes condições de restrição nos apoios, incluindo sem restrições (SS), com restrição axial à dilatação térmica das vigas (AR) e com restrição rotacional nos apoios associada à restrição axial à elongação térmica (RR). No Quadro 3.1 está apresentado o programa de ensaios experimentais realizados por Ferrer (2014) e que foram reproduzidos nos modelos numéricos efetuados nesta dissertação, recorrendo ao *software* Abaqus.

Quadro 3.1 – Programa experimental a modelar

Designação	Secção transversal	Condições de apoio	Nível de carregamento
$\Sigma_{SS}$		Simplesmente apoiada	50% de $M_{b,Rd}$ calculado de acordo com a EN 1993
$\Sigma_{AR}$		C/ restrição axial ( $k_a = 11 \text{ kN/mm}$ )	
$\Sigma_{RR}$		C/ restrição axial ( $k_a = 11 \text{ kN/mm}$ ) e rotacional ( $k_r = 150 \text{ kNm/rad}$ )	
$2\Sigma_{SS}$		Simplesmente apoiada	
$2\Sigma_{AR}$		C/ restrição axial ( $k_a = 11 \text{ kN/mm}$ )	
$2\Sigma_{RR}$		C/ restrição axial ( $k_a = 11 \text{ kN/mm}$ ) e rotacional ( $k_r = 150 \text{ kNm/rad}$ )	

### 3.1.2. Dimensões dos provetes

Em seguida, encontram-se apresentadas as dimensões geométricas das vigas a desenvolver nos modelos numéricos – secções transversais e perfis longitudinais – a fim de poder realizar a calibração das mesmas e o estudo paramétrico. Quanto às dimensões geométricas das secções transversais (Figura 3.1), estas foram constantes durante toda a análise numérica desenvolvida. Na investigação experimental efetuada (Ferrer, 2014), todas as vigas ensaiadas tinham um vão livre de 3m. Portanto, as dimensões longitudinais dos modelos numéricos de calibração, para simular os ensaios experimentais, numericamente, foram produzidos com esta mesma dimensão (Figura 3.2 – a)). Posteriormente, no estudo paramétrico realizado, foram testados outros níveis de carregamento e níveis de restrição para as vigas com vão livre de 3m. Para além disso, foram desenvolvidos modelos que simulam o comportamento das vigas com outras dimensões, 4 e 5m (Figura 3.2 b) e c)), e que também constituíram parte do estudo paramétrico apresentado no quarto capítulo.

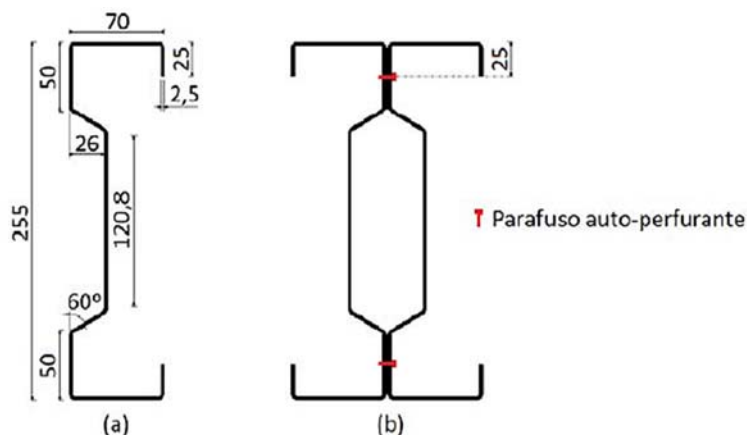


Figura 3.1 – Dimensões das secções de aço enformado a frio em estudo (unidades em mm): a) secção  $\Sigma$  simples; b) secção composta  $2\Sigma$  (Ferrer, 2014).

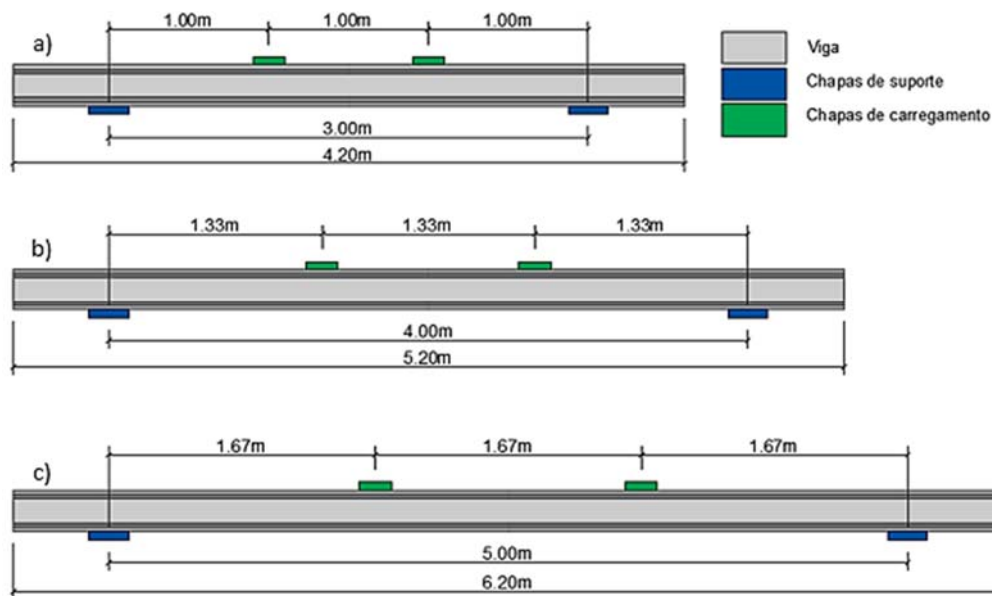


Figura 3.2 – Vista esquemática das vigas  $\Sigma$  modeladas para a análise numérica de vão livre: a) 3m; b) 4m; c) 5m.

### 3.1.3. Condições fronteira

Na execução dos modelos numéricos é necessário garantir que as condições fronteira, como condições de apoio e de carregamento das vigas, estejam de acordo com as adotadas aquando dos ensaios experimentais (Ferrer, 2014).

Na Figura 3.3 é apresentado o pormenor do sistema de restrição axial e rotacional das vigas nos mesmos ensaios. Este sistema experimental é composto por quatro vigas, tendo duas delas a função de simular a restrição axial à dilatação térmica das vigas (Figura 3.3 – 4) e 5)) e outras

duas dedicadas à restrição rotacional dos apoios das mesmas (Figura 3.3 – 6) e 7). Estas vigas conferiram ao provete ensaiado uma restrição axial e uma restrição rotacional de 11 kN/mm e 150 kNm/rad, respetivamente. Nos modelos numéricos recorreu-se a um sistema de molas para a simulação destas restrições impostas às vigas. A rigidez adotada nas molas, que se encontram apresentadas na Figura 3.4 ( $k_a$  e  $k_r$ ), foram equivalentes às produzidas pelas vigas no sistema experimental. A quantificação das forças de restrição nos ensaios efetuou-se através de células de carga (Figura 3.3 – 8), 9) e 10)) e numericamente, através de leituras das reações nos apoios das molas. Estas reações são produzidas, apenas, quando as molas são solicitadas devido às ações de dilatação térmica das vigas.

Quanto ao sistema de carregamento, este consistiu na aplicação de duas cargas pontuais, a 1/3 e 2/3 de vão, produzindo flexão pura entre estas cargas. Deste modo, o surgimento de novos esforços nos elementos (esforço axial), que resultam da dilatação térmica das vigas, foi provocado apenas pelo aumento da temperatura. Para aplicação das cargas no modelo numérico foram utilizadas chapas com rigidez elevada para distribuir as cargas em superfícies localizadas nos banzos superiores dos perfis. Assim, são evitados os excessos de tensões provocados pela aplicação de cargas pontuais.

Para as condições de apoio, as vigas encontram-se simplesmente apoiadas, com apoio simples (Figura 3.3 – 2)) e apoio duplo (Figura 3.3 – 3)), e restringidas lateralmente nestes pontos. Estas mesmas condições foram respeitadas na modelação numérica (Figura 3.4), sendo que a restrição lateral nas zonas dos apoios foi efetuada com a adição de apoios na direção perpendicular ao eixo do elemento.

Portanto ao compararmos os dois sistemas apresentados nesta secção, experimental e numérico, é possível perceber a elevada complexidade na execução do primeiro. A nível da simulação numérica, a modelação do sistema experimental é mais simples mas outros problemas levantam-se, como definição das propriedades termomecânicas que se encontra apresentado mais à frente neste capítulo 3. Vale a pena referir, também, que sem a execução dos ensaios experimentais (Ferrer, 2014) não seria possível, ou seria pouco fiável, criar estes modelos numéricos capazes de prever o comportamento das vigas  $\Sigma$  em situação de incêndio. Isto é, a modelação numérica para o estudo de elementos estruturais deverá ser sempre acompanhada de uma análise experimental.

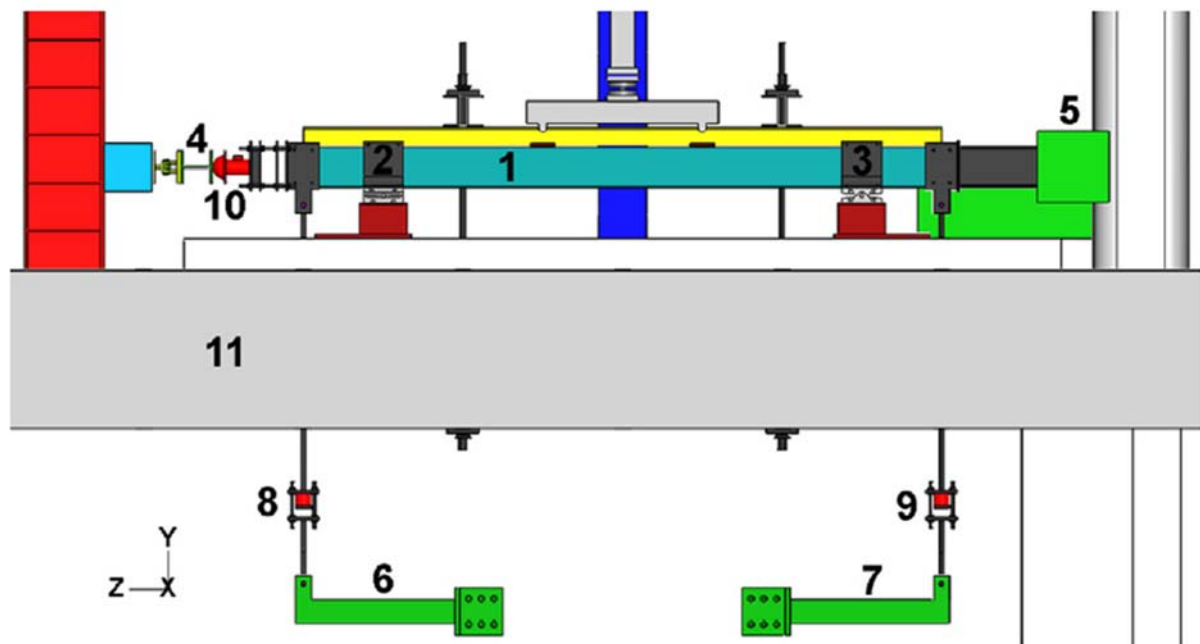


Figura 3.3 – Pormenor do sistema de restrição axial e rotacional dos ensaios experimentais: 1 – provete; 2 – apoio simples; 3 – apoio duplo; 4 e 5 – restrição axial da viga; 6 e 7 – restrição rotacional da viga; 8, 9 e 10 – célula de carga; 11 – laje de betão (Láim *et al.* 2015).

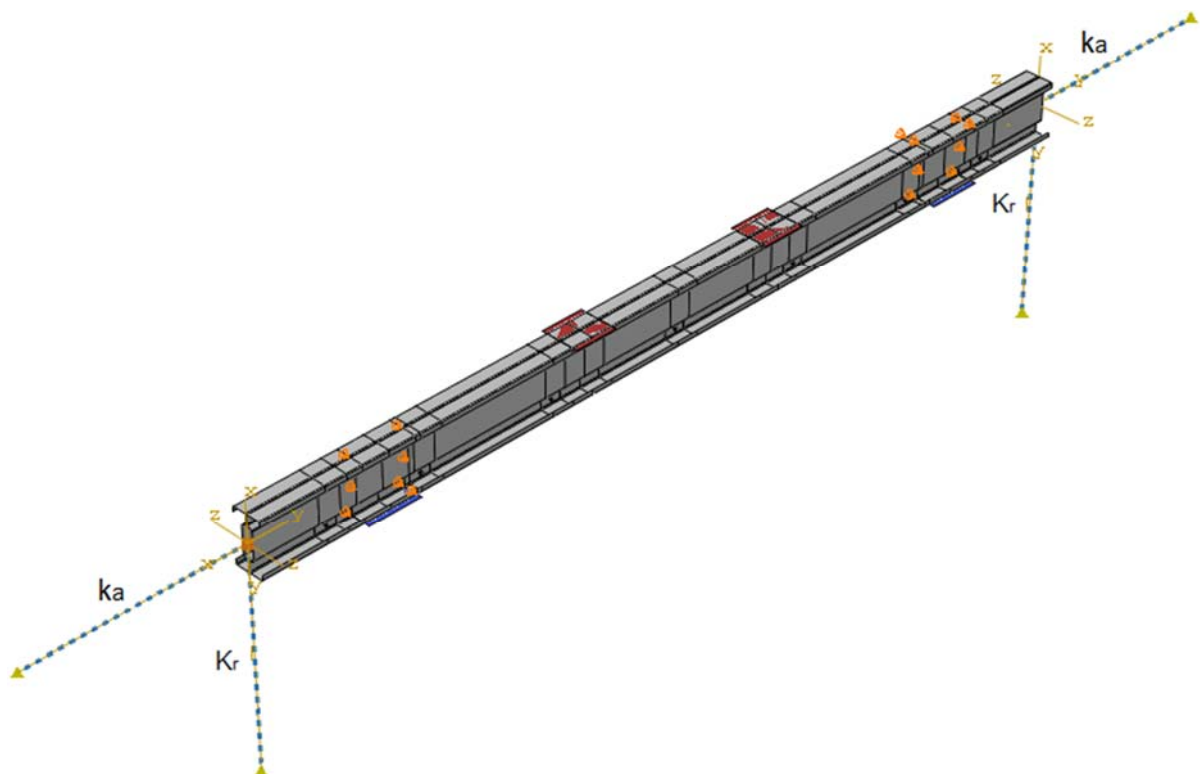


Figura 3.4 – Sistema de restrição axial e rotacional introduzido no modelo numérico com o auxílio de molas axiais lineares ( $k_r=0.6\text{kN/mm} \Rightarrow K_r=150\text{kN.m/rad}$  e  $k_a=11\text{kN/mm}$ ).

### 3.2. Malha de elementos finitos

Nos modelos numéricos para determinação da evolução da temperatura nas secções transversais em estudo (Figura 3.5) foi adotado um modelo bidimensional com uma malha fina de aproximadamente 1x1mm. Por se tratar de uma análise bidimensional, a adoção desta malha não aumenta significativamente o esforço de cálculo no Abaqus e deste modo, dividiu-se a espessura dos perfis em três elementos finitos e usou-se uma malha equilibrada, conseguindo-se obter resultados precisos. O elemento finito escolhido e que se adequa mais para esta análise no programa de cálculo foi o DC2D4, sendo DC correspondente a transferência de calor ou de difusão de massa, 2D, a um elemento bidimensional e 4, ao número de nós do próprio elemento.

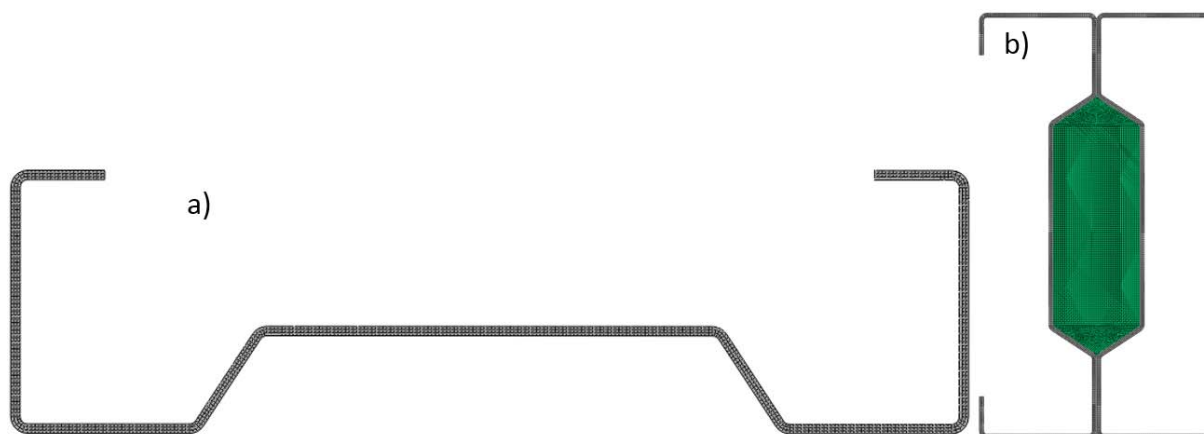


Figura 3.5 – Malha de elementos finitos adotada nas secções transversais para a análise térmica: a)  $\Sigma$  simples; b) composta  $2\Sigma$ .

A influência do tamanho dos elementos finitos no comportamento estrutural das vigas de aço enformado a frio foi estudada por Luís (2013a). Neste estudo, o autor escolheu elementos finitos do tipo S4R, sendo este um elemento de quatro nós (4) para o cálculo de tensões/deslocamentos em elementos casca (S) com integração reduzida (R), apresentando apenas um local de integração por elemento finito, e assim, reduz significativamente o tempo de processamento. Para estudar a influência das dimensões da malha de elementos finitos, este considerou quatro densidades de malha com elementos quadrados de 5, 10, 20 e 40mm de lado. Este concluiu que a densidade da malha tem um impacto significativo na determinação da carga crítica das vigas e que podem ser obtidos resultados precisos com malhas de 10mm ou que cada placa da secção transversal seja dividida em pelo menos quatro elementos finitos.

Portanto, (Figura 3.6) neste trabalho, a malha de elementos finitos desenvolvida no modelo estrutural foi criada com base no estudo anteriormente referido. Logo, para obter bons resultados e em menos tempo possível optou-se por uma malha de elementos finitos de



aproximadamente 10x25mm. Isto significa que na direção da secção transversal os elementos finitos tinham aproximadamente 10mm e na direção longitudinal da viga tinham aproximadamente 25mm. Aqui, foi adotada uma malha de elementos retangulares para reduzir, ainda mais, o esforço de cálculo presente nos modelos numéricos, visto que, a relação entre o comprimento e a largura dos elementos finitos deve ser idealmente inferior a 3 e nunca superior a 8 (Abaqus Analysis – User’s Manual).

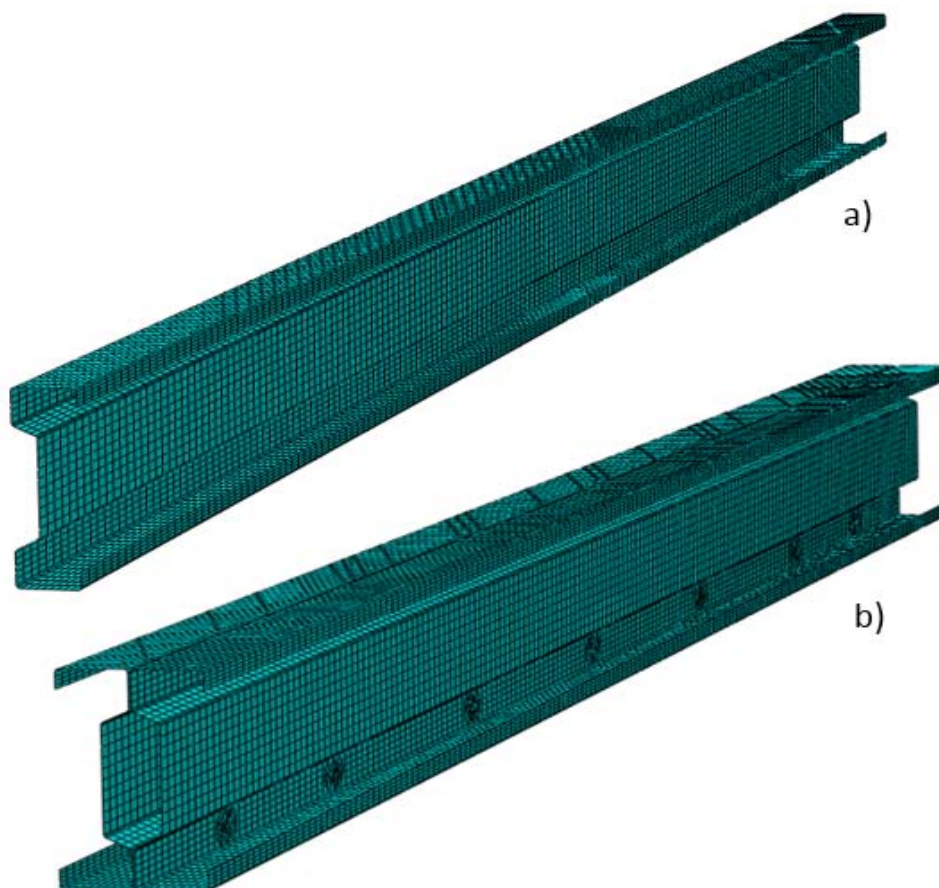


Figura 3.6 - Malha de elementos finitos utilizada nas vigas para análise estrutural: a)  $\Sigma$  simples; b) composta  $2\Sigma$ .

### 3.3. Calibração do modelo numérico para a análise térmica

O principal objetivo desta secção foi verificar a adaptabilidade de um modelo térmico disponível no Abaqus utilizando a opção de transferência de calor, determinando os parâmetros que permitam uma modelação adequada. Estes parâmetros consistem nas condições fronteira de origem térmica e nas propriedades térmicas do material, de modo a que os ensaios de resistência ao fogo das vigas de aço enformado a frio em estudo possam ser corretamente simulados por via numérica.

Esta análise térmica passou pela criação de um modelo numérico que simula a evolução da temperatura ao longo das secções transversais, quando a superfície externa destas se encontra exposta ao fogo. Para efetuar a calibração destes modelos existem algumas variáveis, sendo estas, os parâmetros já referidos anteriormente. Portanto, quanto às propriedades térmicas adotadas nos modelos são as disponibilizadas pela EN 1993-1-2 (2005), nomeadamente o calor específico e a condutibilidade térmica, que se encontram representadas na Figura 2.12 da secção 2.3. Ainda, relativamente à calibração dos modelos térmicos, estas propriedades térmicas mantiveram-se inalteradas, ou seja, o processo iterativo consistiu apenas na variação dos fenómenos de transferência de calor por convecção e radiação nas superfícies afetadas pela exposição ao fogo, até obter uma boa aproximação de todas as leituras experimentais.

Para atingir este objetivo, as temperaturas utilizadas nas simulações numéricas para calibração do modelo numérico foram as temperaturas registadas nos fornos aquando dos ensaios experimentais (Ferrer, 2014). Como foi referido anteriormente, este processo de calibração, que será descrito de seguida, consistiu na variação das condições térmicas na interface ar-material onde ocorrem os fenómenos de transferência de calor por convecção e radiação. Quanto à convecção, foi considerado um coeficiente de transferência de calor igual a  $15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  para as curvas de incêndio dos ensaios e  $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  para a curva de incêndio padrão ISO 834 (Figura 3.7), como recomenda a EN 1991-1-2 (2002). Nesta mesma figura pode-se observar a dificuldade do forno elétrico reproduzir as temperaturas de incêndio padrão nos minutos iniciais. No entanto, a aproximação entre as curvas de incêndio dos ensaios experimentais (Ferrer, 2014) permite uma comparação direta entre os resultados. Para o fluxo de calor por radiação, este foi obtido a partir do produto dos valores de emissividade do aço e das resistências elétricas do forno, 0.3 e 0.7, respetivamente (Laím, 2013a).

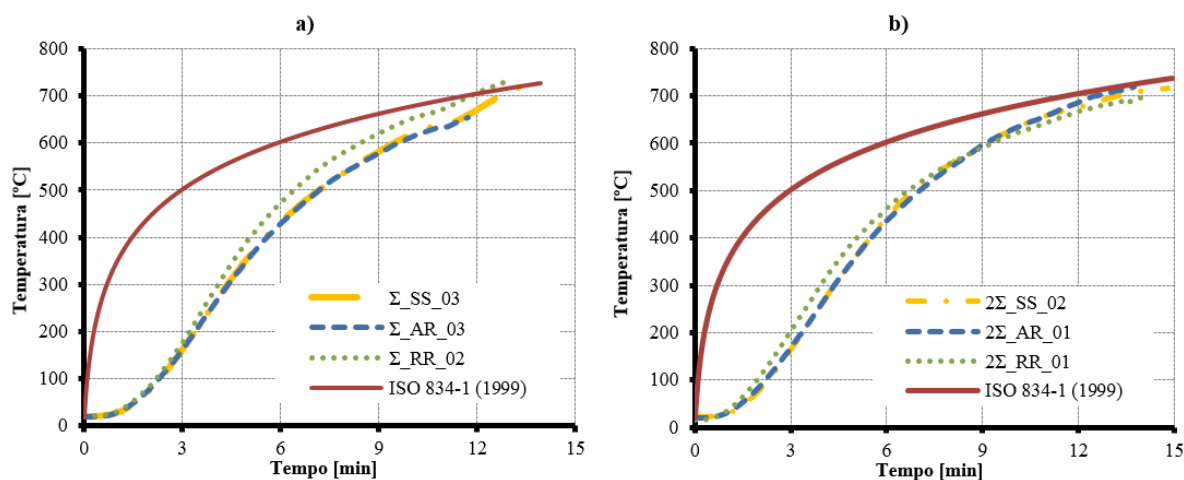


Figura 3.7 – Comparação da evolução da temperatura média da secção no forno nos ensaios de resistência ao fogo com a curva regulamentar ISO 834: a) secção  $\Sigma$  simples; b) secção  $\Sigma$  composta.

Inicialmente, pretendeu-se averiguar a influência do efeito de sombra na secção. Desta forma, numa primeira iteração, para a secção  $\Sigma$  simples, considerou-se que todas as superfícies exteriores do perfil e apenas a superfícies interior da alma (Superfície i. da Figura 3.9 – a)) foram sujeitas ao fluxo de calor definidos anteriormente. Com estas condições fronteira definidas foi executada a primeira simulação térmica no Abaqus, obtendo assim, resultados numéricos da evolução da temperatura ao longo da secção. Seguidamente, estes resultados foram comparados com as leituras experimentais, sendo que esta comparação consiste numa análise gráfica. Nesta análise é possível observar a evolução da temperatura para cada termopar (Figura 3.8 – a)), que se encontram distribuídos ao longo das vigas em diferentes secções (Figura 3.8 – b)), e para as várias condições de apoio ensaiadas experimentalmente (Ferrer, 2014). Nesta secção, apenas serão apresentados alguns resultados da calibração térmica, sendo os restantes expostos no Anexo A-1.

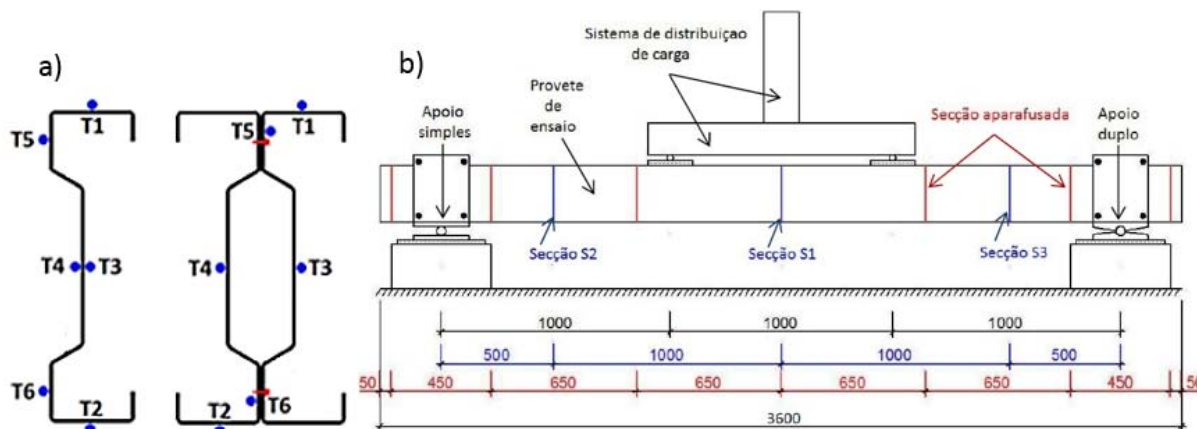


Figura 3.8 – a) Localização dos termopares nas secções transversais; b) Localização das diferentes secções onde foram efetuadas as leituras da temperatura nos ensaios experimentais (Ferrer, 2014).

Após efetuar a comparação gráfica para a primeira simulação, foi possível observar na Figura 3.10 – a) que a aproximação obtida não foi a pretendida, ou seja, com menor erro possível. Para tal, aumentou-se a superfície afetada numa segunda iteração, visto que, a evolução da temperatura apresentou valores inferiores à leitura experimental. No entanto, é possível observar na Figura 3.11 - a) que a evolução da temperatura já apresenta alguns valores superiores relativamente aos ensaios experimentais, logo, a superfície afetada foi aumentada gradualmente, de modo a controlar a aproximação da temperatura para todas as curvas experimentais. Nesta segunda iteração foi aumentada a superfície afetada (Superfície ii. da Figura 3.9 – c)), na qual foram aplicados 50% dos coeficientes de transferência de calor quantificados anteriormente. Esta redução dos coeficientes nestas superfícies vai de encontro com a EN 1993-1-2 (2005), devido ao efeito de sombra como referido anteriormente.

Novamente, foi efetuada a mesma análise para os resultados da segunda iteração e concluiu-se que havia necessidade de aumentar a percentagem de afetação das zonas sombreadas, o que levou a uma terceira simulação, onde foram aplicados 70% dos coeficientes de transferência de calor nessas superfícies. Com esta terceira iteração, foram obtidos resultados que melhor se aproximavam às leituras experimentais. Quanto a secção composta  $2\Sigma$ , foi adotado o mesmo processo, sendo que as propriedades definidas inicialmente foram as equivalentes à terceira iteração da secção  $\Sigma$  simples (Figura 3.9 – d), obtendo-se igualmente resultados concordantes com as leituras experimentais, como se pode observar nas Figura 3.10 – b) e Figura 3.11 – b).

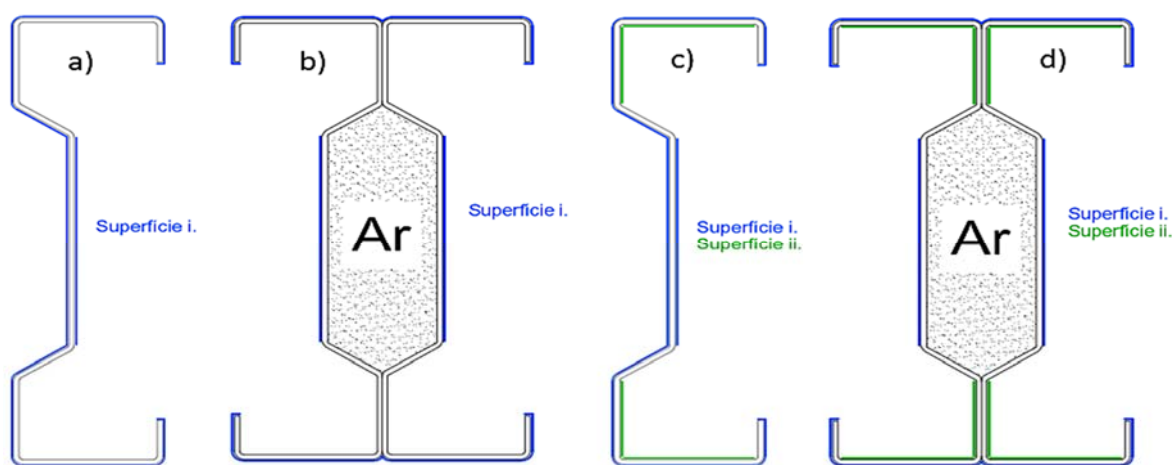


Figura 3.9 - Condições fronteira de origem térmica: a) e b) consideração inicial; c) e d) solução adotada.

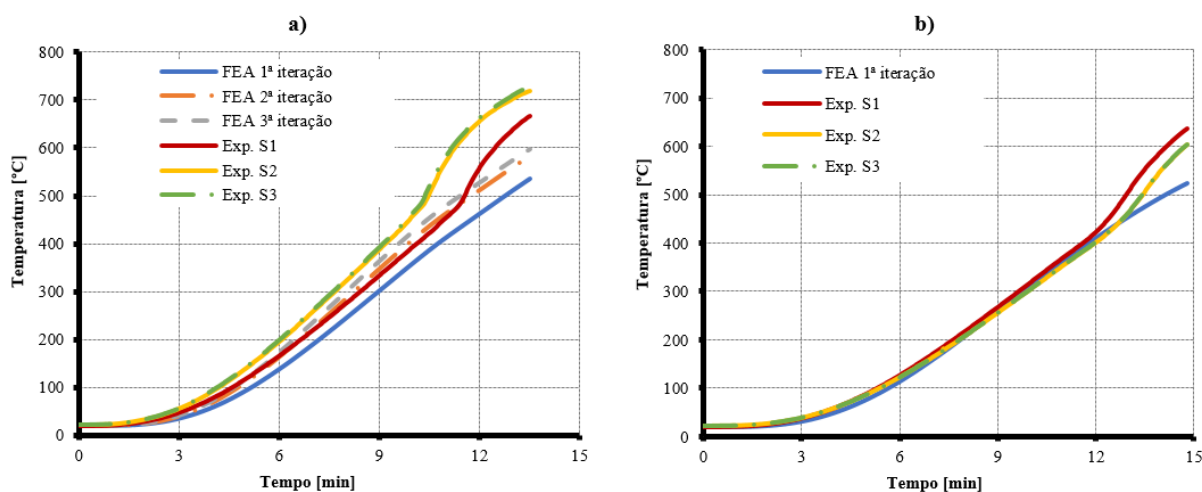


Figura 3.10 - Calibração da evolução da temperatura no termopar T5 das vigas simplesmente apoiadas: a)  $\Sigma$  simples, b)  $\Sigma$  composto.

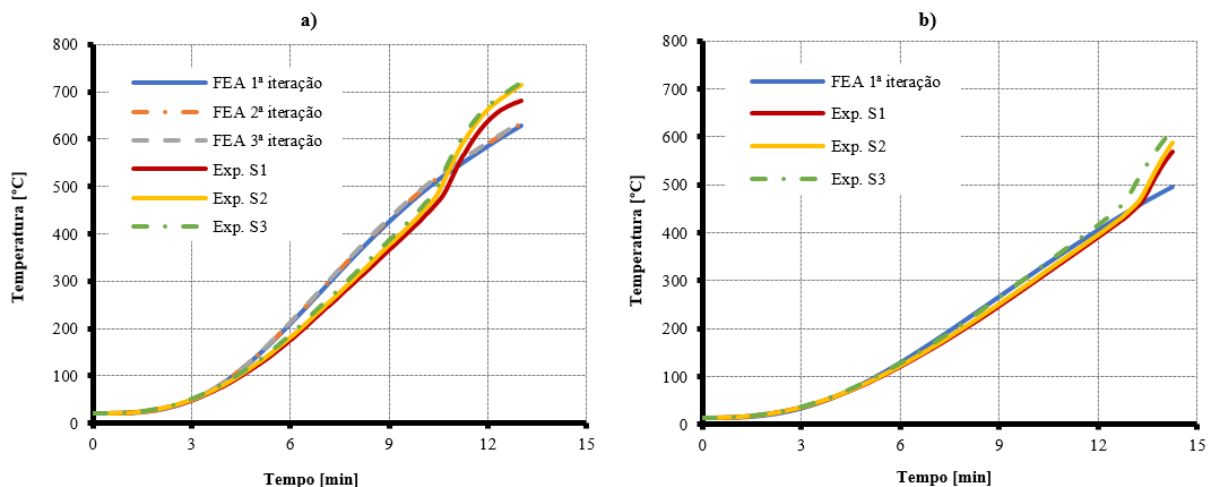


Figura 3.11 - Calibração da evolução da temperatura no termopar T3 das vigas com restrição axial e rotacional: a)  $\Sigma$  simples, b)  $\Sigma$  composto.

Ao finalizar a calibração das condições fronteira de origem térmica foi efetuada uma nova simulação para obter a evolução da temperatura nas secções ao longo do tempo quando exposta exatamente à curva de incêndio padrão ISO 834 (Figura 3.12). Esta solução vai de encontro ao desenvolvimento futuro de métodos simplificados de cálculo, para o dimensionamento ao fogo de vigas de aço enformado a frio, que estejam em concordância com os atuais presentes na EN 1993-1-2 (2005). Também vale a pena referir, que esta evolução de temperaturas nas secções (Figura 3.12) foi considerada uniforme ao longo de todo o comprimento das vigas em análise para a realização do estudo paramétrico.

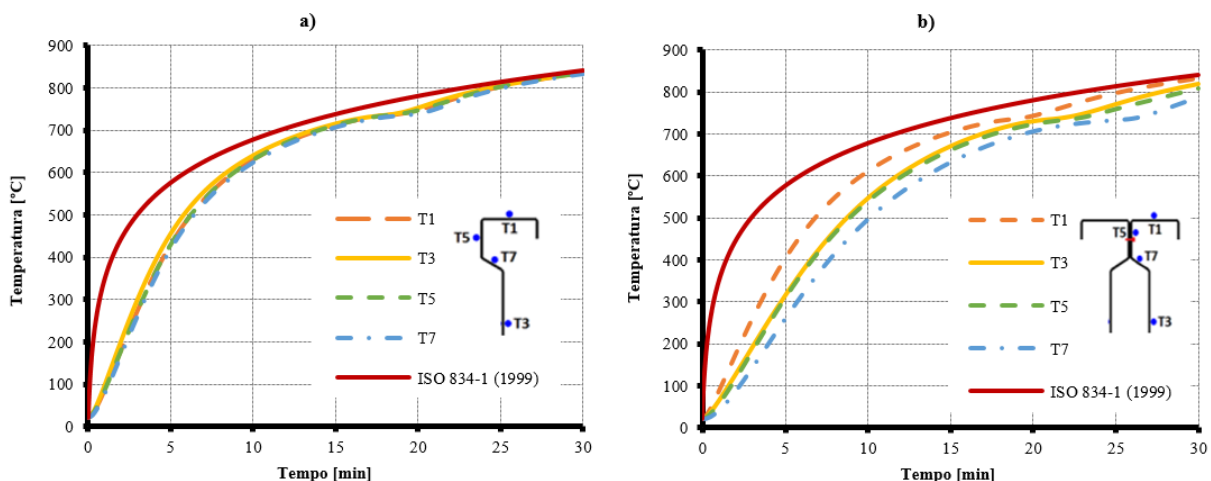


Figura 3.12 - Evolução das temperaturas nas secções transversais das vigas em estudo: a)  $\Sigma$  simples, b)  $\Sigma$  composto.

### 3.4. Calibração do modelo numérico para a análise mecânica

Para a calibração dos modelos estruturais no *software* Abaqus foi necessário definir a evolução das propriedades mecânicas do aço enformado a frio com o aumento da temperatura. O aço que constitui as vigas  $\Sigma$  em estudo é da classe S320GD+Z275. Segundo a NP-EN 10147:2002, este aço apresenta uma camada de revestimento em zinco com 0.04 mm de espessura, uma tensão de cedência de 320MPa e uma tensão de rotura de 390MPa. Todas as condições de apoio e de fronteira, como a situação de carregamento dos ensaios experimentais foram replicadas nos modelos numéricos, de modo a obter simulações computacionais muito próximas da realidade.

Esta calibração estrutural, a par da calibração das condições fronteira de origem térmica apresentada na secção anterior, passa novamente por um processo iterativo, onde foram adotadas as propriedades térmicas e mecânicas apresentadas na secção 2.3.

Portanto, numa primeira iteração, para a viga  $\Sigma$  simples, foi adotada a evolução para o coeficiente de expansão térmica presente na EN 1993-1-2 (2005), enquanto as propriedades mecânicas foram aplicadas segundo os investigadores Craveiro *et al* (2016). Vale a pena referir que as imperfeições consideradas foram  $L/1000$  para a imperfeição global e  $t$  (espessura da secção transversal) para as imperfeições locais no banzo comprimido e na alma.

Como se pode observar nas Figura 3.13 e Figura 3.14, os resultados obtidos com a utilização destas propriedades não foram satisfatórios, ou seja, estas propriedades definidas inicialmente para a primeira simulação numérica não se aproximaram dos resultados experimentais. Na Figura 3.14 é possível verificar, que a força máxima de restrição axial à dilatação térmica das vigas deu-se a uma temperatura inferior quando comparado com o resultado experimental, e segundo Craveiro *et al* (2016) a utilização dos coeficientes de expansão térmica regulamentares podem reduzir a resistência do elemento, o que aconteceu nesta primeira iteração. Por outras palavras, o facto da força máxima de restrição axial acontecer a temperaturas mais baixas leva a uma redução da temperatura crítica da viga, devido ao aumento do esforço axial também acontecer a temperaturas mais baixas, sendo possível observar isso mesmo na Figura 3.13 – b), onde na primeira simulação a temperatura crítica foi muito inferior à registada no ensaio experimental.

Portanto, houve necessidade de recorrer a uma segunda simulação numérica para a correção deste comportamento das vigas, substituindo a evolução dos coeficientes para a expansão térmica, utilizando a proposta de Craveiro *et al* (2016). Novamente, foram analisados os resultados destas simulações, e perante os deslocamentos finais observados, em ambos os casos representados na Figura 3.13, verificou-se uma boa aproximação dos resultados experimentais

mas uma vez mais, a força máxima de restrição axial deu-se a temperaturas inferiores (Figura 3.14), levando a um afastamento do comportamento estrutural da viga registado ao longo do ensaio experimental, como se pode observar na Figura 3.13 – b). Isto é, apesar dos resultados de deformação máxima serem próximos do ensaio experimental, a adoção destas propriedades, definidas na segunda simulação, estão longe de refletir o comportamento estrutural das vigas.

Novamente, houve necessidade de alterar o comportamento térmico da viga, recorrendo à proposta de Chen e Young (2007) quanto a evolução dos fatores de redução para a expansão térmica do aço, para obter uma melhor precisão no comportamento estrutural das vigas aquando dos ensaios experimentais. Para tal, foi efetuada uma terceira simulação com estas condições, e os resultados obtidos foram satisfatórios, e como tal, mais próximos do comportamento registado nos ensaios experimentais (Figura 3.13).

No entanto, com o objetivo de obter uma maior precisão dos resultados numéricos alteraram-se os fatores de redução para o módulo de elasticidade. Como se pode verificar na Figura 3.14 – a), a perda total da resistência ao esforço axial da viga dá-se a uma temperatura inferior, ou seja, a capacidade de deformação da viga definida segundo os investigadores Craveiro *et al* (2016) foi alterada numa quarta simulação.

Nesta quarta simulação substituiu-se a evolução dos fatores de redução para módulo de elasticidade, adotando assim, os definidos pela EN 1993-1-2 (2005). Estes fatores diminuem a capacidade de deformação das vigas quando comparados com a proposta de Craveiro *et al* (2016), ou seja, a deterioração da resistência elástica não é tão acentuada, aumentando, assim, a temperatura crítica das vigas.

Após efetuar a quarta simulação, os resultados indicaram que a utilização dos fatores de redução para o comportamento elástico segundo a EN 1993-1-2 (2005) não apresenta grandes diferenças aquando da terceira simulação. No entanto, essas diferenças pontais ditaram uma melhor aproximação dos ensaios experimentais, como é possível observar no Quadro 3.2.

De notar, que a calibração dos modelos numéricos, tanto a nível das deformações últimas, como para a perda de capacidade resistente axial, encontrou-se do lado da segurança, exceto para a perda de capacidade resistente ao esforço axial na viga sujeita a restrição axial e rotacional (Figura 3.14 – b)), onde a aproximação obtida foi cerca de 3% superior ao registado experimentalmente.

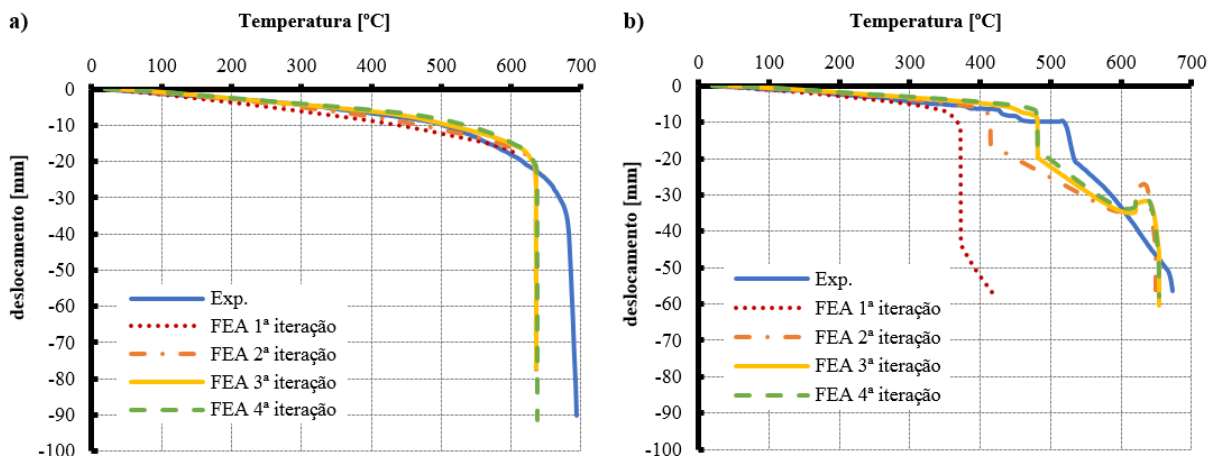


Figura 3.13 - Evolução do deslocamento a meio vão da viga  $\Sigma$  em função da temperatura: a) simplesmente apoiada; b) com restrição axial e rotacional.

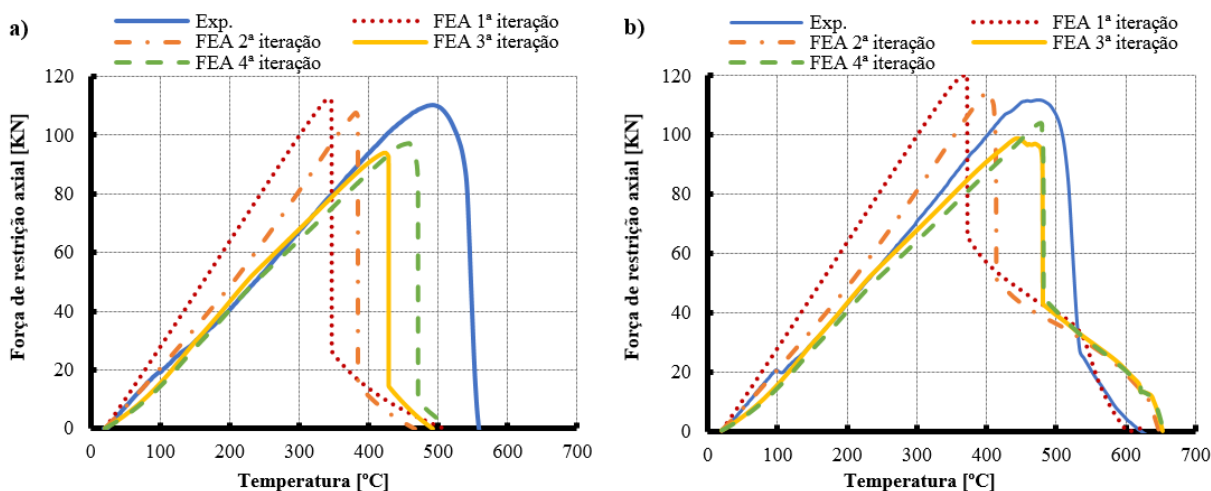


Figura 3.14 - Evolução da força de restrição axial em função da temperatura para a viga  $\Sigma$  com restrição: a) axial; b) axial e rotacional.

Neste processo de calibração estrutural dos modelos numéricos, as propriedades térmicas e mecânicas que ditaram uma melhor aproximação dos ensaios experimentais foram, para as propriedades térmicas, a evolução do coeficiente de expansão térmica com o aumento da temperatura proposto por Chen e Young (2007), e para as propriedades mecânicas, os fatores de redução definidos pela EN 1993-1-2 (2005).

Quanto à calibração dos modelos numéricos das vigas de secção composta  $2\Sigma$  foram adotadas as propriedades térmicas e mecânicas correspondentes à última iteração para as vigas de secção  $\Sigma$  simples. No entanto, os valores adotados para as imperfeições foram superiores, sendo  $L/250$  para a imperfeição global, 1,5 t para a imperfeição local no banzo comprimido e t para a imperfeição na alma. Com estas condições todas definidas foi efetuada uma simulação



numérica. Os resultados obtidos a partir desta simulação, e apresentados nas Figura 3.15 e Figura 3.16, ditam uma excelente aproximação das leituras experimentais.

A evolução da força de restrição axial apresentada na Figura 3.16 – b), que diz respeito à viga sujeita a restrição axial e rotacional, não foi igualmente próxima da registada nos ensaios experimentais. No entanto, os resultados obtidos a nível numérico para a evolução das deformações com o aumento da temperatura (Figura 3.15), bem como a temperatura registada para a perda total da capacidade resistente axial das vigas (Figura 3.16), tiveram uma precisão superior quando comparados com os resultados numéricos das vigas de secção transversal  $\Sigma$  simples. No Anexo A-2 encontram-se apresentados os restantes resultados deste estudo de calibração.

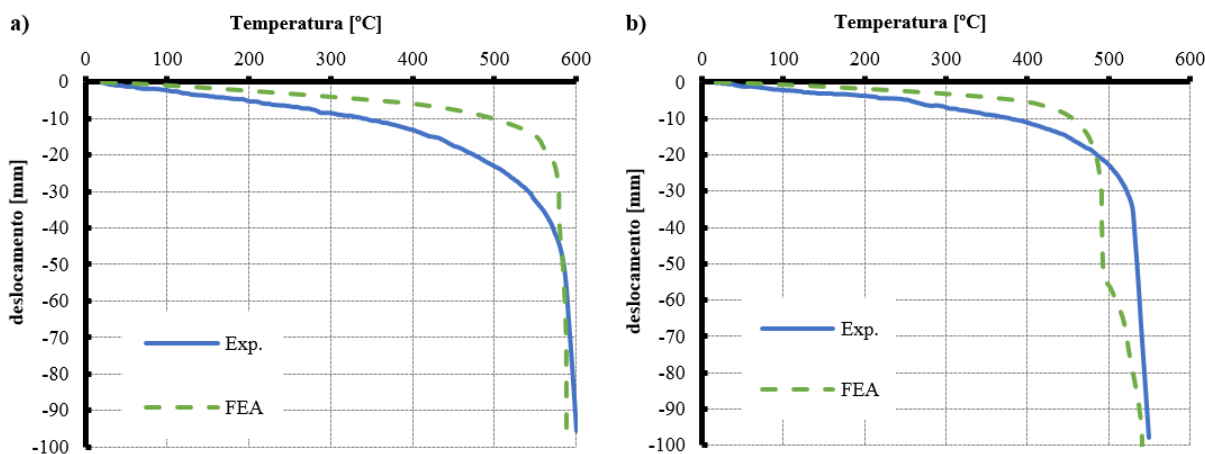


Figura 3.15 - Evolução do deslocamento a meio vão da viga  $2\Sigma$  em função da temperatura: a) simplesmente apoiada; b) com restrição axial.

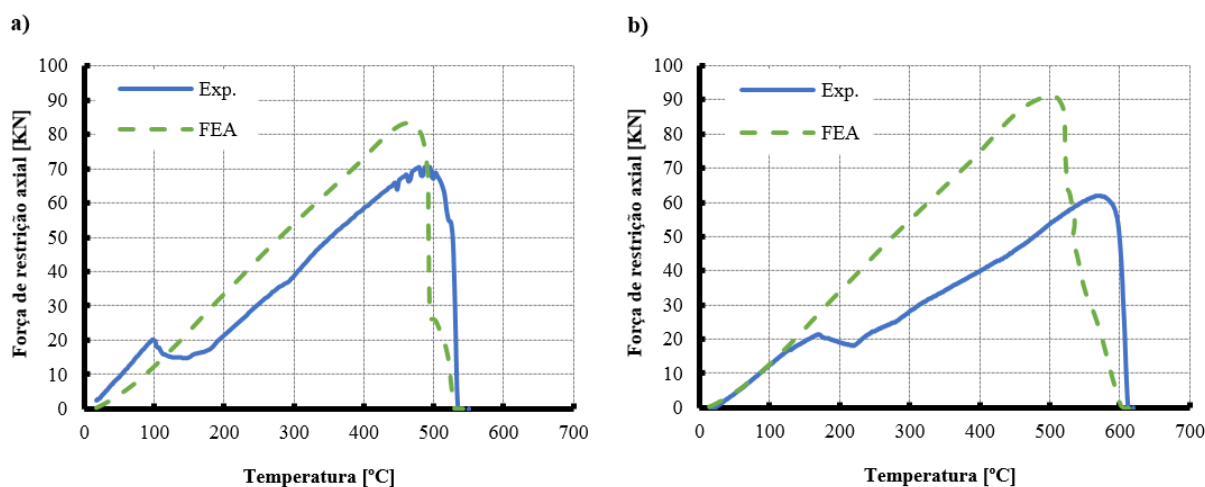


Figura 3.16 - Evolução da força de restrição axial em função da temperatura para a viga  $2\Sigma$  com restrição: a) axial; b) axial e rotacional.

Finalizado o processo de calibração dos modelos estruturais, é ainda apresentado no Quadro 3.2 as aproximações obtidas para a temperatura crítica, temperatura para a qual o elemento perde a capacidade resistente. Neste quadro é possível constatar que os erros cometidos nos modelos numéricos foram inferiores a 10% e sempre do lado da segurança, exceto para a calibração das vigas de secção transversal  $\Sigma$ . Apesar desta última apresentar um erro na ordem dos 20%, esse erro também está do lado da segurança. Ou seja, os resultados obtidos no estudo paramétrico, apresentado no capítulo 4, são conservativos.

Quadro 3.2 – Aproximações obtidas para a temperatura crítica.

Referência	FEA iteração	$\Theta_{crit. FEA}$ [°C]	$\Theta_{crit. Exp.}$ [°C]	Aproximação [%]
$\Sigma_{SS}$	1ª	s/ registo	692.88	-
	2ª	s/ registo		-
	3ª	635.60		5.5%
	4ª	637.74		8.0%
$\Sigma_{AR}$	1ª	509.40	595.73	24.3%
	2ª	467.29		30.6%
	3ª	492.81		26.8%
	4ª	516.93		23.2%
$\Sigma_{RR}$	1ª	416.40	672.87	38.1%
	2ª	648.82		3.6%
	3ª	653.28		2.9%
	4ª	653.87		2.8%
$2\Sigma_{SS}$	1ª	588.94	600.66	2.0%
$2\Sigma_{AR}$	1ª	541.56	550.07	1.5%
$2\Sigma_{RR}$	1ª	584.12	619.83	5.8%

### 3.5. Comparação entre os modos de instabilidade numéricos e experimentais

De modo a constatar a eficácia dos modelos de elementos finitos desenvolvidos, seguidamente são apresentadas figuras a comparar os modos de instabilidade das vigas sujeitas a temperaturas elevadas aquando dos ensaios experimentais (Ferrer, 2014) e os obtidos através da análise numérica. As Figura 3.17 - b) e Figura 3.20 – b) representam os modos de instabilidade numéricos para as vigas  $\Sigma$  e  $2\Sigma$  simplesmente apoiadas em situação de incêndio, e estes são idênticos aos modos de instabilidade que as vigas apresentaram nos ensaios experimentais, como se pode observar nas Figura 3.17 – a) e Figura 3.20 – a). O mesmo acontece nas figuras Figura 3.18, Figura 3.19, Figura 3.21 e Figura 3.22. Nestas últimas pode-se observar diferentes modos de encurvadura e mais complexos, isto é, devido às diferentes restrições a que as vigas foram submetidas, estas apresentam interação entre os diferentes modos de encurvadura. Em

ambas as vigas,  $\Sigma$  e  $2\Sigma$  sem qualquer restrição nos apoios e nas extremidades, notou-se que o modo de encurvadura distorcional foi o principal modo de instabilidade das mesmas (Figura 3.17 e Figura 3.20). Para as vigas submetidas apenas a restrição axial é possível observar a iteração de dois modos de encurvadura, sendo estes, local e lateral-torsional. No entanto, para a viga  $\Sigma$  o global torna-se mais significativo na instabilidade do elemento (Figura 3.18), o que não sucedeu na viga  $2\Sigma$ . Esta última por apresentar uma rigidez à torção superior, os modos encurvadura local foram mais significativos (Figura 3.21). Nas vigas submetidas a restrição axial e rotacional (Figura 3.19 e Figura 3.22) são identificados os mesmos fenómenos aquando das vigas com restrição axial. No entanto, devido à restrição rotacional nos apoios estas apresentaram uma menor suscetibilidade à encurvadura lateral-torsional, sendo quase nulo no caso da viga  $2\Sigma$ , ou seja, os fenómenos de encurvadura local foram mais significativos para estas condições de apoio. Perante os resultados numéricos obtidos, para os modos de instabilidade das vigas para qualquer condição de fronteira, é possível concluir que o modelo de elementos finitos desenvolvido garante uma boa aproximação para a previsão do comportamento das vigas de aço enformado a frio em estudo.

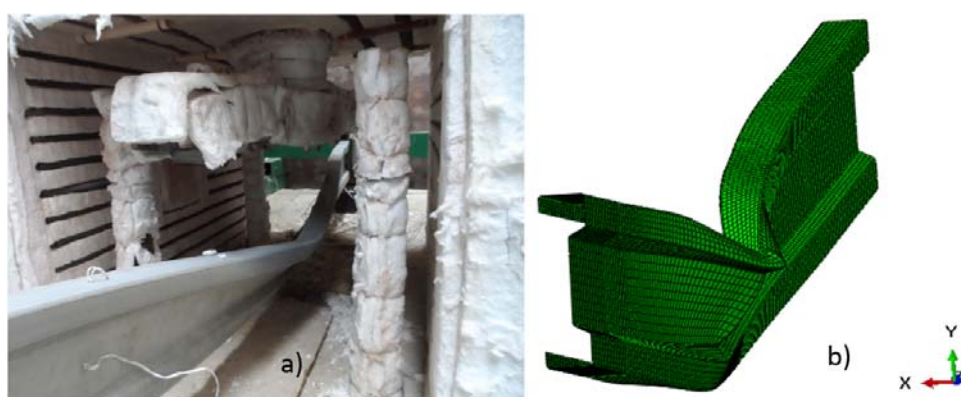


Figura 3.17 - Configuração deformada da viga  $\Sigma$  sem restrições após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b).

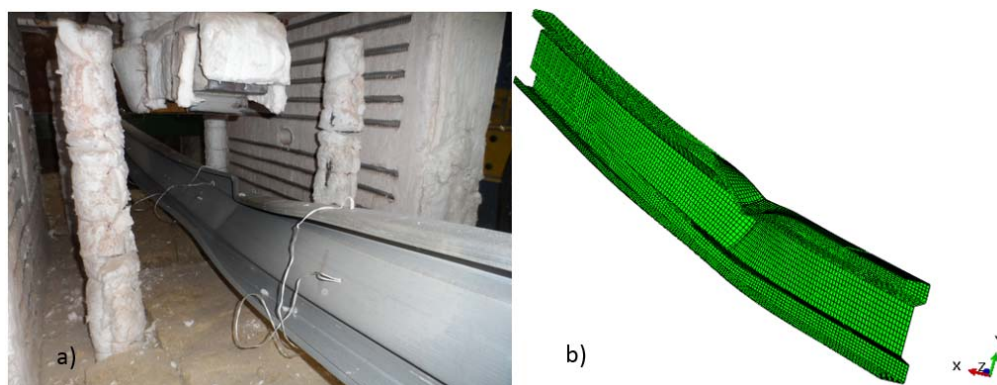


Figura 3.18 - Configuração deformada da viga  $\Sigma$  com restrição axial após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b).

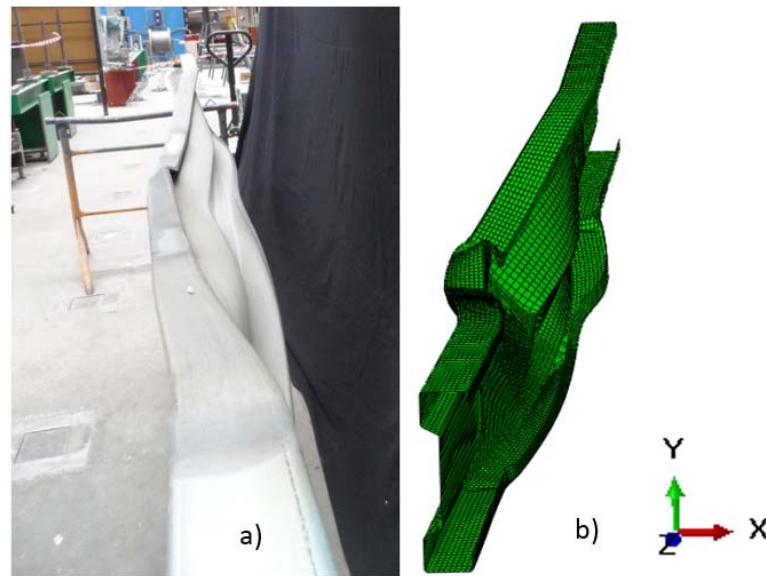


Figura 3.19 - Configuração deformada da viga  $\Sigma$  com restrição axial e rotacional após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b).

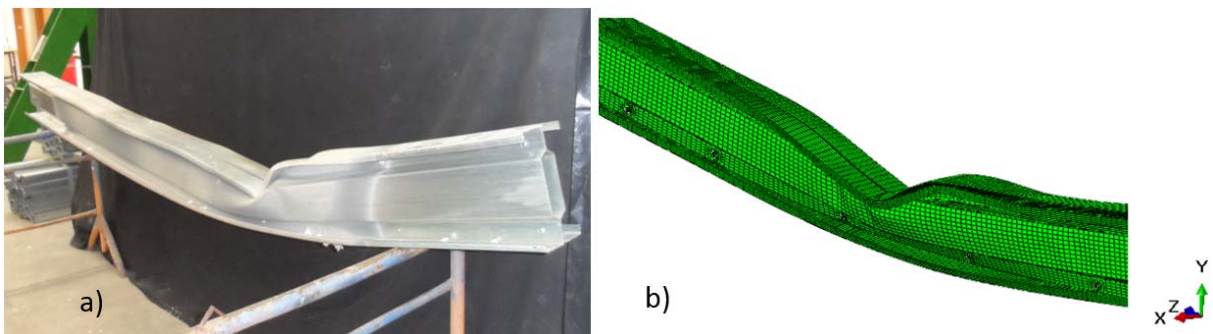


Figura 3.20 - Configuração deformada da viga  $2\Sigma$  sem restrições após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b).

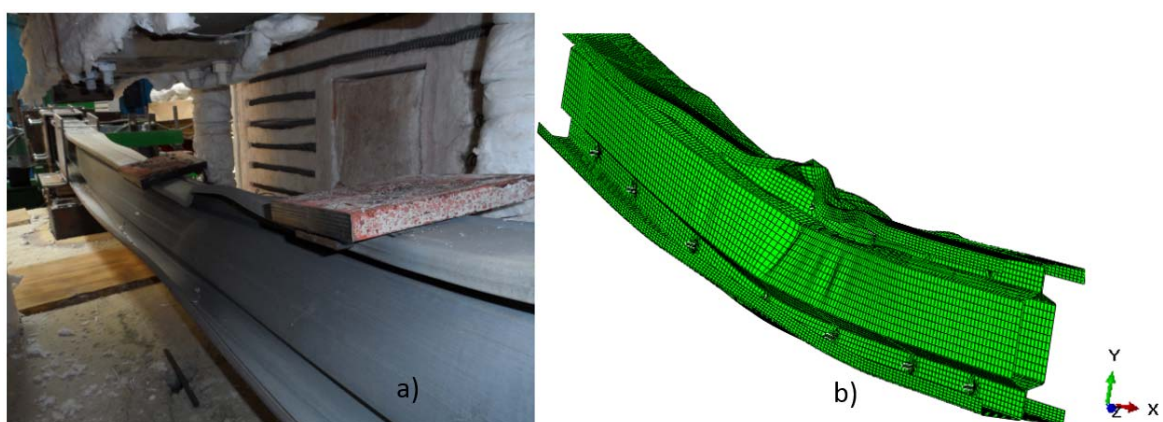


Figura 3.21 - Configuração deformada da viga  $2\Sigma$  com restrição axial após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b).

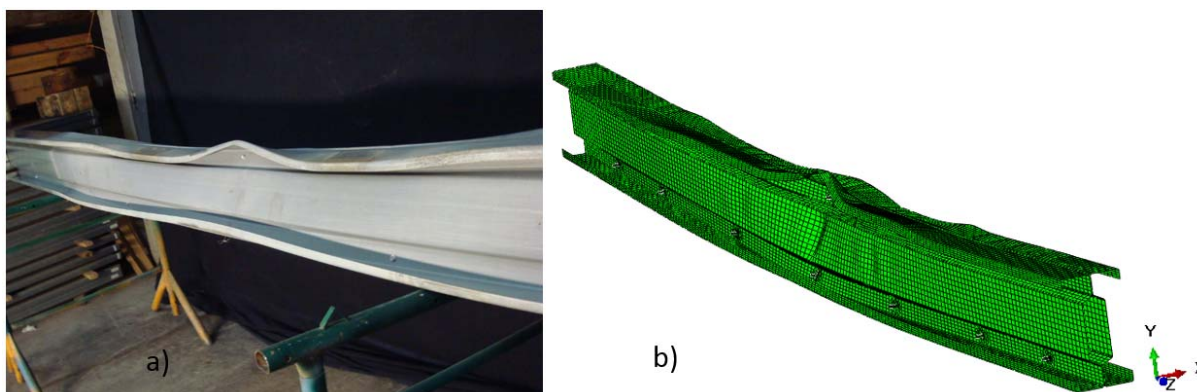


Figura 3.22 - Configuração deformada da viga  $2\Sigma$  com restrição axial e rotacional após ensaio ao fogo: experimental (a) e numérico (b).

### 3.6. Considerações finais

Neste capítulo foi demonstrado todo o processo necessário à modelação e calibração do comportamento à flexão de vigas de aço enformado a frio com reforços longitudinais em situação de incêndio.

Para uma correta simulação numérica é necessário recrear todas as condições adotadas a nível experimental. Ou seja, a definição das condições fronteira, como carregamento e apoios, deve ser modelada com os valores igualmente impostos nos ensaios experimentais. Este é o único modo de validar uma análise numérica, e consequente análise dos resultados que desta resultam.

A definição das condições fronteira de origem térmica e das propriedades térmicas e mecânicas requereram um estudo extensivo, devido às propostas de correção da EN 1993-1-2 (2005) apresentadas por diferentes investigadores. Para a definição das propriedades térmicas das vigas em estudo, prevaleceram as propriedades estabelecidas pela EN 1993-1-2 (2005). Para a evolução da extensão térmica, a proposta apresentada por Chen e Young (2007) se adequou melhor para modelar o comportamento estrutural das vigas. Quanto às propriedades mecânicas, os fatores de redução apresentados pela EN 1993-1-2 (2005) também se ajustaram melhor ao comportamento estrutural das vigas  $\Sigma$ , de secção simples e composta.

Os modelos numéricos desenvolvidos, para a simulação dos ensaios experimentais (Ferrer, 2014), ditaram aproximações inferiores a 10%, à exceção das vigas de secção transversal  $\Sigma$  simples com restrição axial à dilatação térmica. No entanto, como as aproximações encontram-se todas do lado da segurança, ou seja, apresentando temperaturas críticas inferiores às registadas nos ensaios experimentais, é possível afirmar que os modelos numéricos são conservativos para a determinação desta temperatura.

A corroboração dos resultados numéricos foi ainda testada através da comparação dos modos de instabilidade verificados a nível experimental, suportando a capacidade computacional do *software* Abaqus para a resolução de problemas deste tipo. Portanto, a capacidade de simulação estrutural deste programa de cálculo, através do método dos elementos finitos, ofereceu a possibilidade de estudar o comportamento de elementos estruturais, para as mais variadas situações, sem recorrer a estudos extensivos, dispendiosos e morosos a nível experimental.

Relativamente aos modos de instabilidade que as vigas apresentaram, pode-se dizer que as diferentes restrições, incluindo sem restrição, submetidas às vigas provocam alterações significativas na resposta estrutural. Para as vigas simplesmente apoiadas e em ambas secções em estudo, o principal modo de instabilidade foi o distorcional. Por outro lado, a adoção de restrição axial à dilatação térmica das vigas, bem como, restrição rotacional nos apoios provoca alterações significativas na resposta estrutural. Nestes casos, as vigas em estudo apresentaram interação entre modos de instabilidade, local e lateral-torsional, sendo mais significativo o primeiro.

Portanto, é possível afirmar que as aproximações obtidas, a nível da temperatura crítica, como a nível da identificação dos modos de instabilidade, entre os modelos numéricos e os ensaios experimentais (Ferrer, 2014) foram, assim, suficientes para a realização de um estudo paramétrico preciso.

## 4. ESTUDO PARAMÉTRICO

### 4.1. Considerações iniciais

Após a validação do modelo de elementos finitos desenvolvido para simulação do comportamento estrutural das vigas  $\Sigma$  de aço enformado a frio em situação de incêndio, seguiu-se um estudo paramétrico, com cerca de trezentas simulações, de modo a investigar o comportamento termomecânico das vigas em estudo,  $\Sigma$  simples e composta  $2\Sigma$ . Neste estudo as dimensões geométricas da secção transversal mantiveram-se inalteradas, apresentando-se de seguida os parâmetros analisados:

- O comprimento das vigas (esbelteza): 3, 4 e 5m;
- O nível de carregamento inicial: 30, 50 e 70% do valor de cálculo da resistência à flexão das vigas à temperatura ambiente, segundo a EN 1993-1-1 (2005);
- O nível de restrição axial à dilatação térmica da viga: 0, 5, 15, 30, 60 e 100% da rigidez axial da própria viga ( $k_{a,b}$ ) (Quadro 4.1);
- O nível de restrição rotacional nos apoios das vigas: 0, 5, 15, 30, 60 e 100% da rigidez rotacional da viga ( $k_{r,b}$ ) (Quadro 4.1) para dois níveis de restrição axial à dilatação térmica.

Quadro 4.1 – Rigidez axial, rigidez rotacional e esbelteza adimensional das vigas em estudo.

Vigas	Composta $2\Sigma$			$\Sigma$ Simples		
	3	4	5	3	4	5
L [m]	3	4	5	3	4	5
$k_{a,b}$ [kN/mm]	161	121	97	80	60	48
$k_{r,b}$ [kN.m/rad]	5924	4443	3554	2930	2198	1758
$\bar{\lambda}_{LT}$	0.7	0.93	1.15	1.08	1.42	1.75

### 4.2. Efeito do nível de carregamento

Para analisar o efeito da variação do nível de carregamento na temperatura crítica das vigas, estas foram submetidas ao esforço de flexão correspondente a 30, 50 e 70% do valor de cálculo

da resistência à flexão das vigas à temperatura ambiente, segundo a EN 1993-1-1 (2005). A escolha destes níveis de carregamento deveu-se ao facto de as referidas normas usarem estes valores como referências em métodos simples de cálculo da resistência de elementos estruturais em situação de incêndio.

Ao observar a Figura 4.1, pode-se constatar que os resultados obtidos para as vigas simplesmente apoiada apresentaram, na sua maioria, temperaturas críticas muito superiores ao limite sugerido pela EN 1993-1-2 (2005) para as secções transversais de classe 4 (350°C), à exceção da viga de secção transversal  $2\Sigma$  com vão livre de 5m sujeita a 70% do valor de cálculo à flexão.

Como era expectável e analisando os resultados obtidos para as vigas de secção transversal  $2\Sigma$  (Figura 4.1 – a)), pode-se afirmar que quanto maior o comprimento de vão livre das vigas, menor será a sua capacidade resistente em situação de incêndio, logo, temperaturas críticas mais baixas, sendo essa diferença mais acentuada entre as vigas de 4 e 5m. O que já não sucedeu nas vigas de secção transversal  $\Sigma$  simples, onde os valores de temperatura crítica foram superiores para vão livres superiores (Figura 4.1 – b)). Este resultado inesperado pode resultar do dimensionamento à flexão de elementos estruturais à temperatura ambiente proposto pela EN 1993-1-1 (2005), ou seja, o valor de cálculo regulamentar para a resistência à flexão pode ser demasiado conservativo para as secções  $\Sigma$  simples.

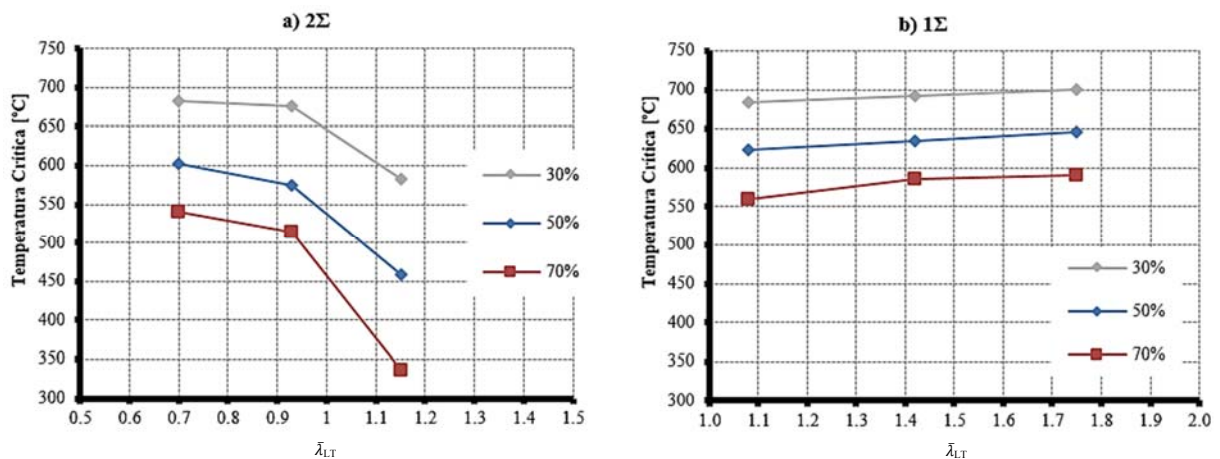


Figura 4.1 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de carregamento das vigas  $2\Sigma$  (a) e  $\Sigma$  (b) simplesmente apoiadas.

### 4.3. Efeito do nível de restrição axial

Nesta secção foi estudada a influência da variação das condições fronteira de um elemento estrutural sujeito à ação do fogo, mais concretamente, a variação do nível de restrição axial à



dilatação térmica das vigas. Segundo a EN 1993-1-2 (2005), estas condições de fronteira nos apoios e nas extremidades dos elementos mantêm-se inalteradas durante toda a exposição ao fogo.

Ao observar os resultados apresentados na Figura 4.2 é possível afirmar que a restrição axial à dilatação térmica das vigas terá um efeito negativo no comportamento estrutural das mesmas, diminuindo a temperatura crítica para qualquer nível de restrição. Portanto, quanto maior o nível de restrição axial à dilatação térmica das vigas, menor será a resistência desse elemento em situação de incêndio. Neste ponto encontram-se, apenas, os resultados para as duas vigas em estudo quando sujeitas a 70% do nível de carregamento regulamentar. No entanto, os mesmos efeitos negativos desta variável foram observados para restantes níveis, 30 e 50% (ver Anexo A-3). É possível verificar também, que foram registadas temperaturas críticas inferiores ao limite 350°C imposto pela EN 1993-1-2 (2005), ou seja, para a maioria dos casos apresentados, este limite é muito conservativo mas perante algumas condições pode apresentar alguma insegurança na resistência dos elementos.

Para as vigas de secção composta  $2\Sigma$  (Figura 4.2 – a)), os efeitos da variação do nível de restrição axial à dilatação térmica não foram tão acentuados como nas vigas de secção  $\Sigma$  simples (Figura 4.2 – b)), em valor absoluto para o mesmo nível de carregamento. No entanto, na maioria dos casos as temperaturas críticas das vigas de secção composta foram inferiores às registadas para as vigas de secção simples, para qualquer nível de carregamento.

Quanto à variação de comprimento de vão livre dos elementos (esbelteza), para o mesmo nível de restrição axial à dilatação térmica das vigas, destaca-se a diminuição acentuada para os valores de temperatura crítica entre as vigas de secção transversal  $2\Sigma$ . Esta diminuição de temperatura crítica é facilmente justificada com os diferentes modos de instabilidade para os diferentes comprimentos de viga. Para a viga de 3m, que corresponde ao valor mais baixo de esbelteza adimensional à encurvadura lateral, esta apresenta um menor grau de rotação lateral (Figura 4.3 – a) e Figura 4.4 – a)), o que não acontece para a viga de maior esbelteza. Esta última sofreu rotação imediata no colapso (Figura 4.3 – b) e Figura 4.4 – b)). Este modo de instabilidade das vigas de 5m e de secção transversal  $2\Sigma$  fez com que as temperaturas críticas registadas fossem inferiores ao limite de 350°C para os níveis de carregamento de 50 e 70%. Portanto, no caso destas vigas com vão livre de 5m sujeitas a qualquer nível de restrição axial, o mínimo que este seja, o limite de temperatura máxima sugerido pela EN 1993-1-2 (2005) é inseguro. Enquanto que, para as vigas de secção transversal  $\Sigma$  simples, apenas nos níveis de 30, 60 e 100% da restrição axial e para 70% do carregamento se verificaram temperaturas críticas muito próximas ou inferiores ao limite imposto, representando cerca de 17% dos resultados obtidos para estas vigas.

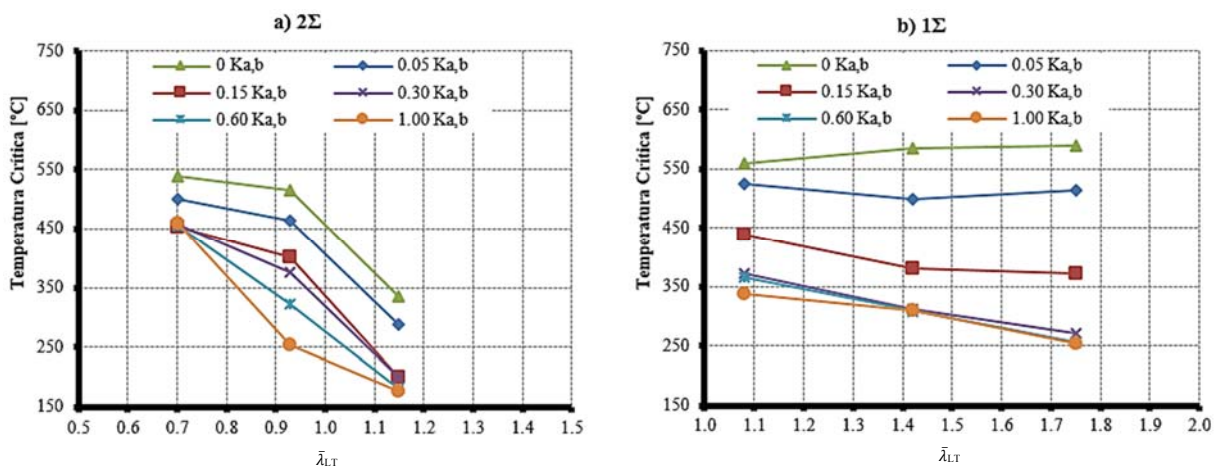


Figura 4.2 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição axial das vigas  $2\Sigma$  (a) e  $\Sigma$  (b) para 70% do nível de carregamento.

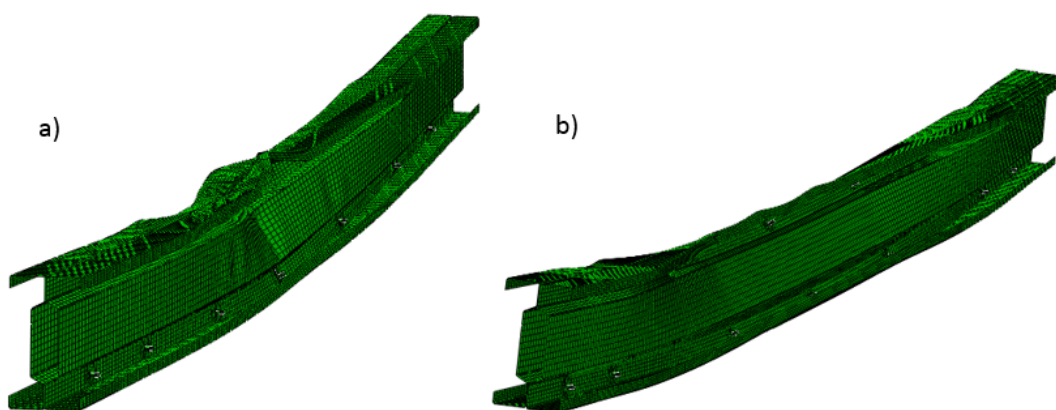


Figura 4.3 – Modos de colapso das vigas de secção composta  $2\Sigma$  com 100% de restrição axial: a) 3m de vão livre; b) 5m de vão livre.

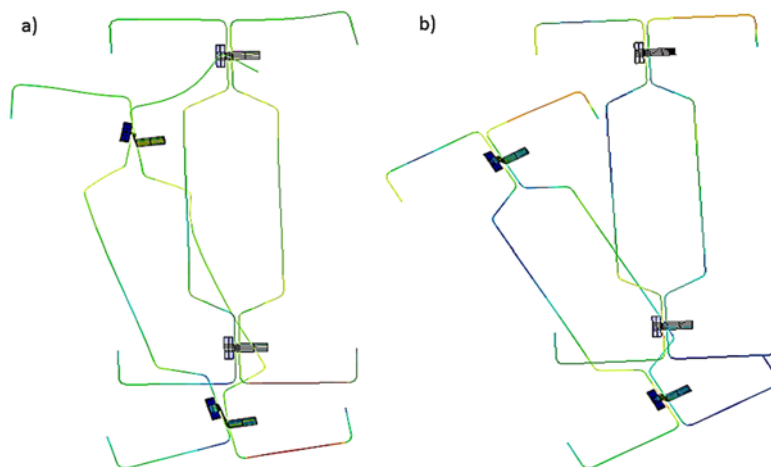


Figura 4.4 – Deformadas a meio vão relativas aos modos de colapso das vigas de secção composta  $2\Sigma$  com 100% de restrição axial: a) 3m de vão livre; b) 5m de vão livre.

#### 4.4. Efeito do nível da restrição rotacional

Seguidamente, encontram-se analisados os efeitos da variação do nível de restrição rotacional nos apoios das vigas, com o objetivo de reforçar que a alteração das condições de fronteira nos apoios e nas extremidades tem uma influência significativa na capacidade resistente das vigas em situação de incêndio.

Com a análise dos resultados obtidos, pode-se afirmar que, de um modo geral, que a restrição rotacional nos apoios das vigas tem um efeito positivo na determinação da temperatura crítica das vigas. Neste estudo da variação do nível de restrição rotacional nos apoios foram considerados dois níveis de restrição axial à elongação térmica das vigas, 15 e 60% de restrição axial e o mesmo carregamento vertical que as vigas simplesmente apoiadas, uma vez que neste tipo de estruturas despreza-se a resistência à flexão nas ligações. Com esta solução adotada é possível observar, na maioria dos resultados das Figura 4.5 e Figura 4.6, que mesmo com o efeito negativo provocado pela restrição axial das vigas, a restrição rotacional nos apoios destas anula esse efeito e ainda provoca um aumento da temperatura crítica das vigas.

Nas vigas de secção transversal composta  $2\Sigma$ , a imposição da restrição rotacional nos apoios é positiva, no entanto a variação do nível de restrição não provoca alterações na capacidade resistente dos elementos, sendo possível verificar nas Figura 4.5 – a) e Figura 4.6 – a), como também nos restantes resultados apresentados no Anexo A-4. Efeito da variação do nível de restrição rotacional. O que já não se verificou para alguns casos das vigas de secção  $\Sigma$  simples.

Os resultados referentes às vigas de secção transversal  $\Sigma$  simples mostram que, para 3m de vão livre (esbelteza adimensional inferior das Figura 4.5 – b) e Figura 4.6 – b)), os efeitos da variação do nível de restrição rotacional foram idênticos aos das vigas de secção composta  $2\Sigma$ . O oposto verificou-se para os restantes comprimentos, sendo que, para as vigas de maior esbelteza, o efeito negativo da restrição axial a elongação térmica foi de tal forma penalizador, na capacidade resistente das vigas em situação de incêndio, que a imposição de restrição rotacional não teve qualquer efeito.

Ainda no que diz respeito à secção transversal  $\Sigma$  simples, para vãos de 4 metros, foi possível observar comportamentos distintos para diferentes níveis de restrição rotacional, apresentando não linearidade nos resultados. Por outras palavras, o aumento do nível de restrição rotacional nos apoios das vigas não fez com que a temperatura crítica aumentasse de maneira proporcional. Isso mesmo foi possível observar através da análise dos modos apresentados na Figura 4.7, e que correspondem aos resultados apresentados para as vigas de 4m de secção transversal  $\Sigma$  simples na Figura 4.6 – b). Portanto, os modos de instabilidade apresentados para os níveis de

30 e 100% de restrição rotacional nos apoios por serem idênticos, demonstram uma capacidade resistente superior à encurvadura lateral quando comparado com modo de instabilidade correspondente a 60% da restrição rotacional da viga.

De um modo geral, com a análise dos resultados para a variação do nível de restrição axial, é possível afirmar que, novamente, as normas em vigor encontram-se desajustadas (demasiado conservativas) e por vezes inseguras para o cálculo de resistência à flexão em situação de incêndio de elementos de secção transversal da classe 4. Isto é, o limite da temperatura crítica de 350°C, imposto pela EN 1993-1-2 (2005), não se verificou em 97% dos casos apresentados, mas também existiram condições onde essa temperatura foi muito inferior a esse limite.

Quanto à variação das condições fronteira que restringem a rotação dos apoios das vigas, os resultados desta secção, em geral, corroboram com uma das premissas presentes na EN 1993-1-2 (2005), isto é, na maioria das situações estudadas, a variação do nível de restrição rotacional (para valores superiores a 5% da rigidez rotacional da viga) não teve qualquer influência na temperatura crítica das vigas.

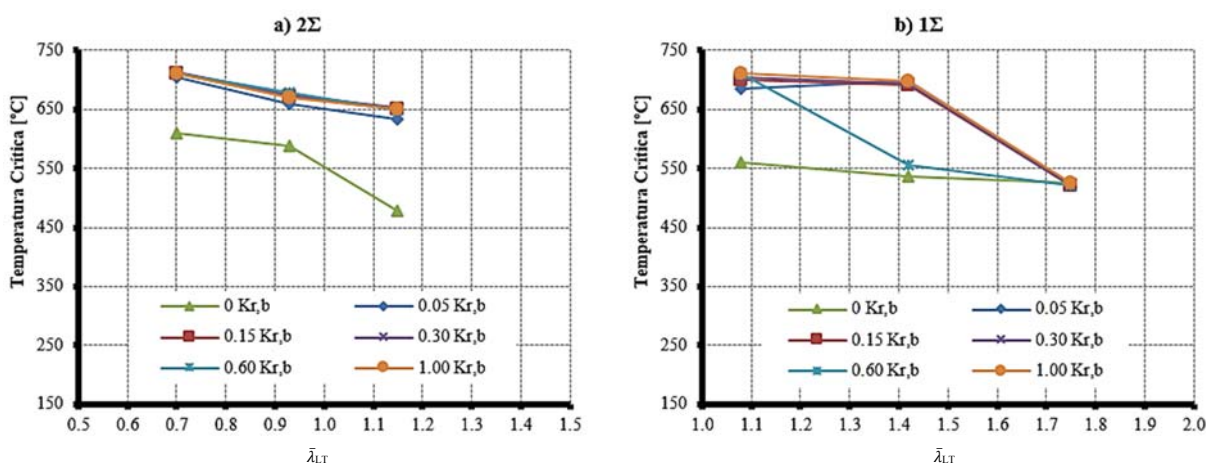


Figura 4.5 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional das vigas 2Σ (a) e Σ (b) para 15% de restrição axial e 30% do nível carregamento.

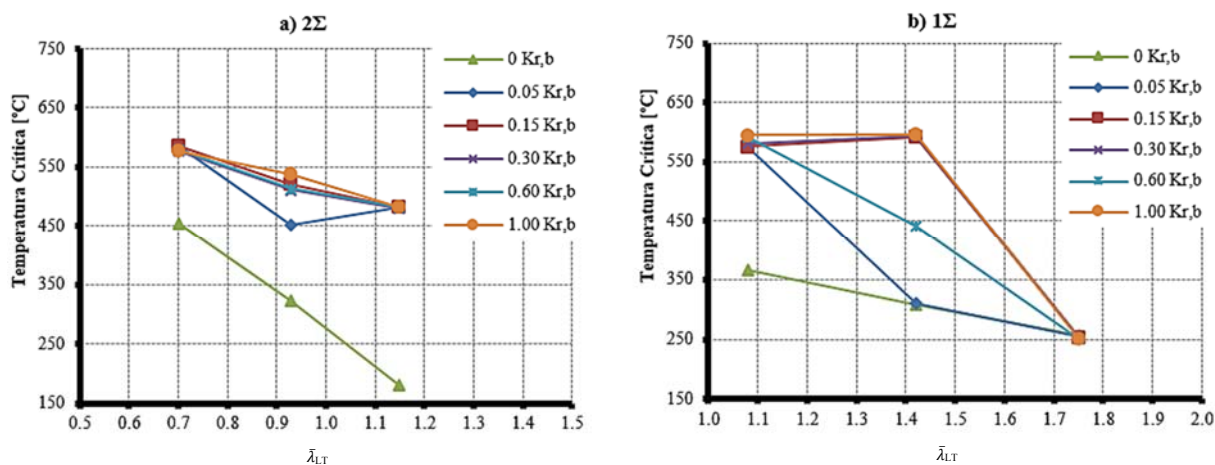


Figura 4.6 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional das vigas 2Σ (a) e Σ (b) para 60% de restrição axial e 70% do nível de carregamento.

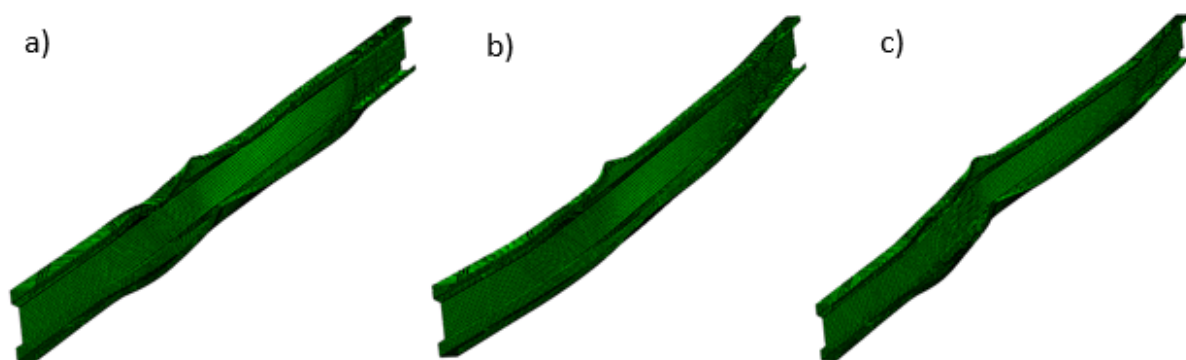


Figura 4.7 – Modos de colapso das vigas de secção Σ simples com 4m de vão livre sujeitos a 70% do carregamento, 60% de restrição axial e a a)30%, b)60% e c)100% de restrição rotacional.

#### 4.5. Efeito da esbelteza

Nesta secção foram estudados os efeitos da variação da esbelteza adimensional à encurvadura lateral dos elementos em estudo ao fogo. Os valores de esbelteza adimensional já foram apresentados no início deste capítulo mas vale a pena lembrar que estes valores de esbelteza correspondem à variação de comprimento dos elementos e a variação da secção transversal (Σ ou 2Σ), mantendo-se as características geométricas das secções transversais, como a altura e espessura.

Na Figura 4.8 são apresentados os resultados correspondentes à temperatura crítica das vigas, para os três níveis de carregamento, com a variação do valor de esbelteza. Nessa mesma figura é possível verificar a proximidade entre os valores de esbelteza intermédios, que correspondem

à viga de 5m com secção transversal  $2\Sigma$  e à viga de 3m com secção transversal  $\Sigma$  simples. Apesar destes valores de esbelteza serem muito próximos não apresentam qualquer relação entre os valores de temperatura crítica.

Ainda, era esperado que as temperaturas críticas fossem inferiores para os valores mais altos de esbelteza, quando comparados com os valores mais baixos. Isto pode criar a ilusão que os elementos de secção simples apresentam um melhor comportamento ao fogo que as secções compostas, o que pode não ser verdade. Ou seja, estes níveis de carregamento, que resultam do dimensionamento à flexão de elementos à temperatura ambiente (EN 1993-1-1:2005), podem ser demasiado conservativos para as vigas constituídas por secções simples ou demasiado penalizadores para elementos constituídos por secções compostas.

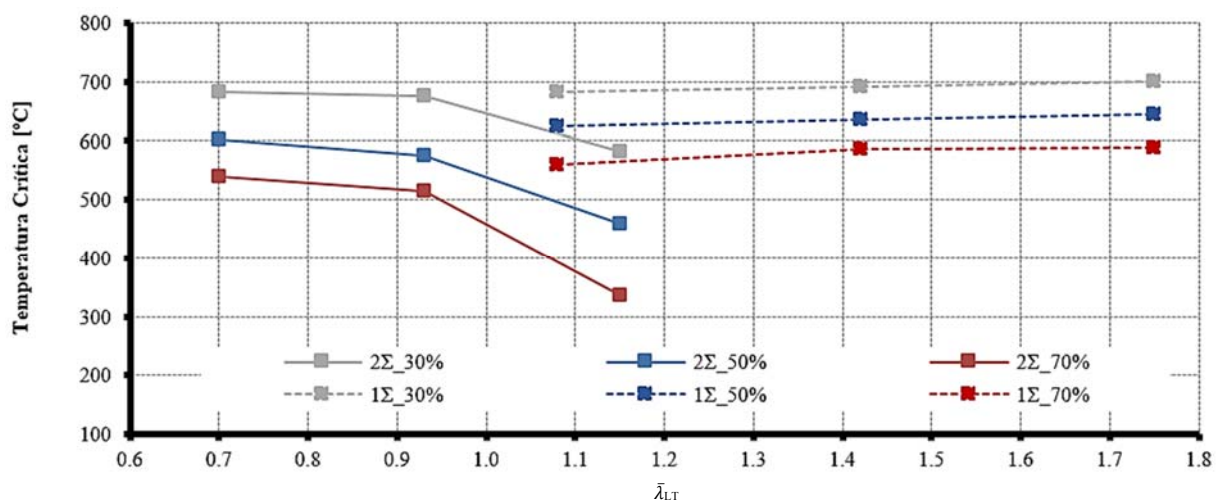


Figura 4.8 - Efeito da esbelteza na temperatura crítica das vigas simplesmente apoiadas.

Para as vigas sujeitas à totalidade da restrição axial (100%  $k_{a,b}$ ) à dilatação térmica (Figura 4.9), os resultados ditam uma tendência, mesmo que ligeira para as vigas de secção  $\Sigma$  simples. A temperatura crítica das vigas diminuiu ligeiramente com o aumento da esbelteza adimensional. Para esta mesma figura é possível verificar também, que a variação do nível de carregamento para estas condições de restrição axial foi o principal responsável para a diminuição dos valores registados de temperatura crítica em todos os valores de esbelteza, como aconteceu para as vigas simplesmente apoiadas. No entanto, devido ao efeito também negativo que resulta da restrição axial das vigas, as temperaturas críticas foram inferiores quando comparadas com as vigas simplesmente apoiadas.

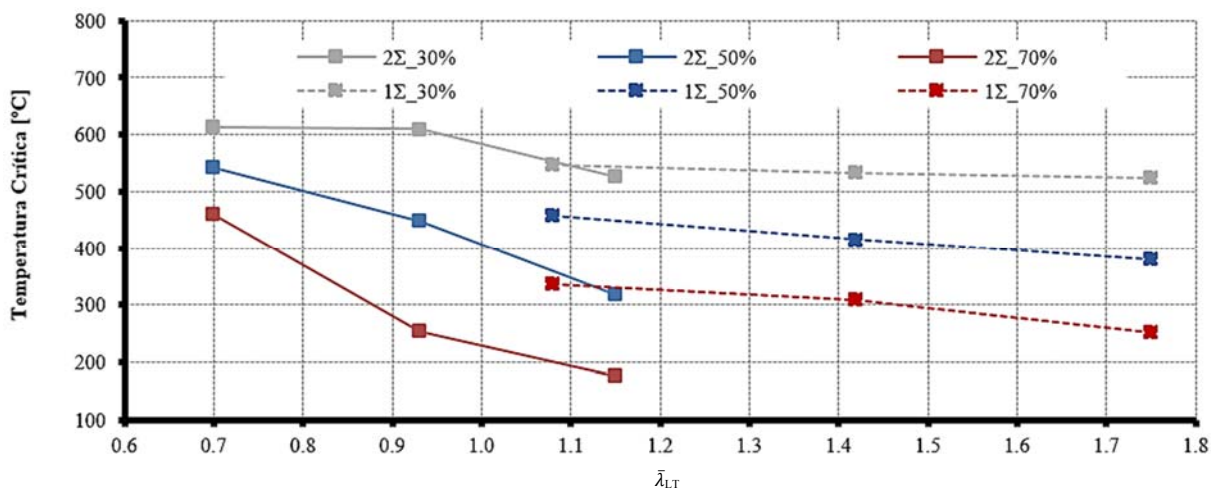


Figura 4.9 - Efeito da esbelteza na temperatura crítica das vigas com 100% de restrição axial.

No que diz respeito aos elementos sujeitos à restrição rotacional máxima nos apoios e com 60% da restrição axial à dilatação térmica (Figura 4.10), foi possível observar que a restrição rotacional trouxe efeitos muito positivos, quanto à temperatura de colapso. Para a maioria dos valores de esbelteza adimensional estudados a temperatura crítica permaneceu quase constante, exceto para a viga mais esbelta. Esta ausência de aumento dos valores de temperatura crítica, para o valor mais esbelto, resulta dos efeitos negativos provocados pela restrição axial à dilatação térmica da viga. Portanto, os benefícios da imposição de restrição rotacional nos apoios das vigas resultaram, em 70% das condições estudadas, em temperaturas críticas muito superiores ao limite regulamentar de 350°C, mais concretamente, diferenças superiores a 200°C. No entanto, vale a pena referir, uma vez mais, que este limite pode ser inseguro para algumas condições fronteira ou de carregamento em serviço.

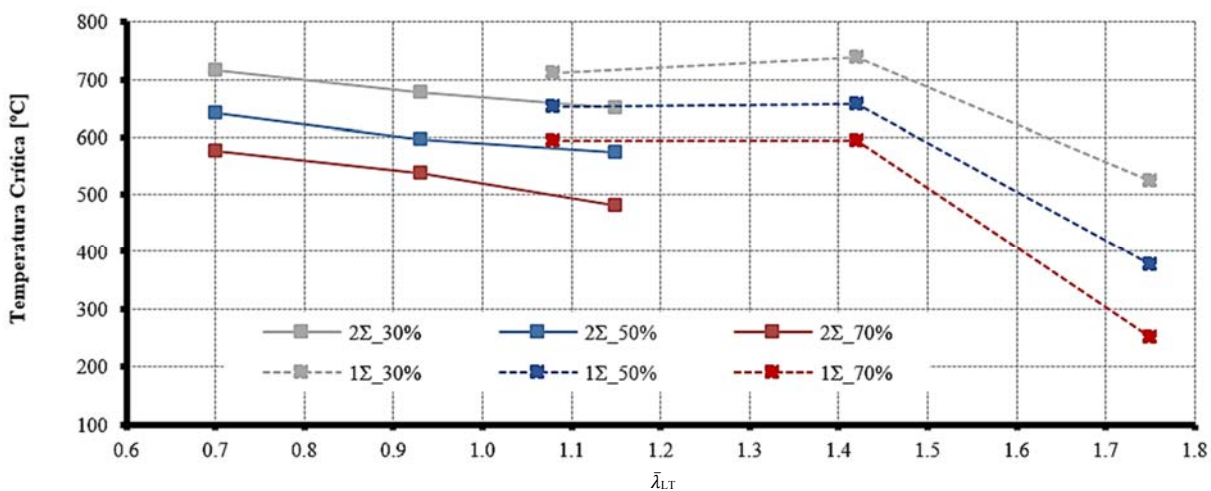


Figura 4.10 - Efeito da esbelteza na temperatura crítica das vigas com 60% de restrição axial e 100% de restrição rotacional.

Na Figura 4.11 são apresentados alguns resultados quando as vigas estão sujeitas a metade do valor de cálculo da resistência à flexão das vigas à temperatura ambiente (EN 1993-1-1:2005), sendo este o nível de carregamento com maior probabilidade de suceder durante a vida útil dos elementos. Nesta mesma figura, verifica-se mais facilmente as diferenças entre as várias restrições, incluindo sem restrições. Portanto, para este nível de carregamento, a restrição axial à dilatação térmica das vigas mostrou-se, uma vez mais, como condição que mais afeta a capacidade resistente dos elementos. Já a restrição rotacional nos apoios das vigas, para este nível de carregamento, fez com que aumentasse os valores de temperatura crítica mas não de forma significativa, e mesmo sem efeito para o valor mais alto de esbelteza.

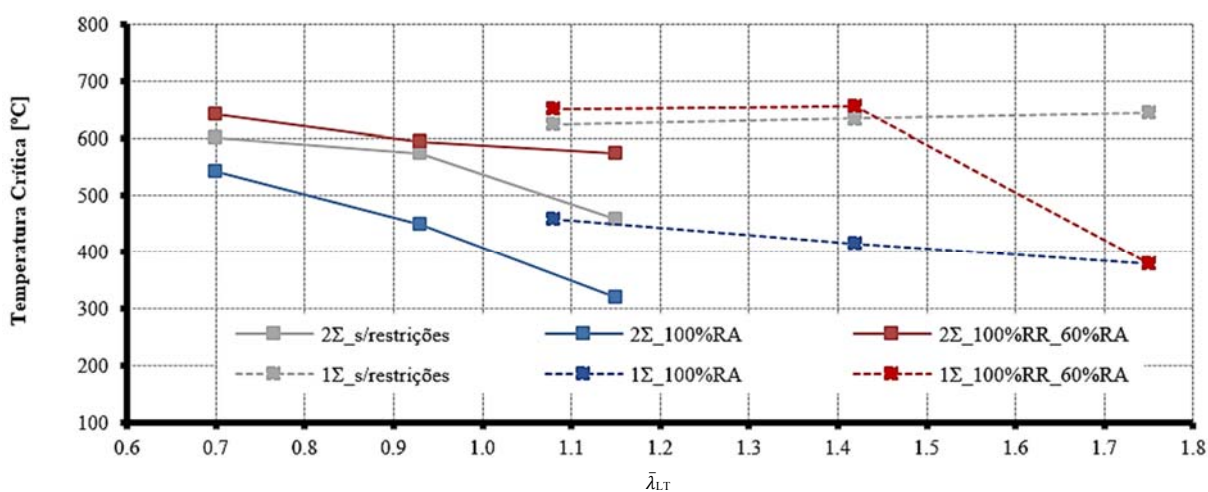


Figura 4.11 - Efeito da esbelteza na temperatura crítica das vigas com diferentes condições de apoio e para 50% do nível de carregamento.

#### 4.6. Considerações finais

Com a realização deste estudo paramétrico, que envolveu cerca de trezentas simulações numéricas, onde foram variados os comprimentos das vigas (esbelteza), os níveis de carregamento e os níveis de restrição nos apoios, foi possível verificar algumas discrepâncias presentes na EN1993-1-2 (2005), como a limitação à temperatura crítica e a não consideração de alterações nas condições fronteira no dimensionamento destes elementos em situação de incêndio.

Quanto à limitação de 350°C, indicada pela EN 1993-1-2 (2005) para os elementos estruturais não tracionados com secções da classe 4, pode-se dizer que este limite é conservativo para 90% das situações estudadas nesta dissertação. No entanto, também existem condições específicas, como a rigidez axial das ligações nas extremidades das vigas, que podem resultar no colapso prematuro, ou seja, temperaturas críticas mais baixas, ou até mesmo inferiores ao limite



indicado pela mesma norma, dependendo do nível de carregamento. Posto isto, apesar de a EN 1993-1-2 (2005) demonstrar segurança na maioria dos casos estudados, existe uma pequena possibilidade desta limitação ser insegura para algumas condições de apoio ou de extremidade dos elementos.

Assim, como foi indicado anteriormente, as condições fronteira das vigas podem representar uma alteração significativa na temperatura crítica dos elementos estruturais de aço enformado a frio, contrariando outra das indicações presentes na EN 1993-1-2 (2005). Esta permite que sejam desprezados os efeitos das dilatações térmicas axiais dos elementos, e conseqüentemente, admite que as condições fronteira nos apoios dos mesmos seja constante ao longo de toda a exposição ao fogo. Este estudo mostrou, claramente, que a alteração da rigidez nas ligações das vigas em situação de incêndio pode afetar, fortemente, o comportamento dos elementos.

Também, provou-se que os modos de instabilidade têm grande influência na resposta estrutural destes elementos. Isto foi possível observar nos resultados para as vigas com restrição rotacional, onde os modos de instabilidade foram os principais responsáveis pela variação da temperatura crítica nos resultados. Ou seja, a temperatura crítica para os elementos que apresentaram os mesmos modos de instabilidade foi igual ou muito próxima.

Com estes resultados, pode-se afirmar que a restrição axial à elongação térmica das vigas é altamente prejudicial para a capacidade resistente dos elementos em situação de incêndio, e pelo contrário quando a rotação dos apoios é restringida a resistência das vigas é beneficiada, exceto para as vigas de maior esbelteza. Nestas últimas, os efeitos negativos provocados pela restrição axial são tão severos, que a restrição rotacional nos apoios das vigas não trouxe qualquer melhoria no comportamento estrutural ao fogo.

Para 70% do nível de carregamento nas vigas, ao aumentar a restrição axial à dilatação térmica, de 0%  $k_{a,b}$  para 100%  $k_{a,b}$ , a temperatura crítica diminuiu cerca de 50% para as vigas em estudo, à exceção viga de secção transversal  $\Sigma$  simples com vão livre de 3m. Esta última corresponde ao valor mais baixo de esbelteza estudada, onde a diferença de temperatura não ultrapassou os 15%. No entanto, se os elementos estiverem sujeitos a 30% do nível de carregamento, esta variação da restrição à dilatação térmica das vigas apresentaram diferenças de temperatura crítica inferiores a 25% para secção simples e inferiores a 10% para a secção composta.

## 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 5.1. Conclusões

Nesta dissertação foram desenvolvidos modelos de elementos finitos capazes de simular o comportamento estrutural em situação de incêndio de vigas de aço enformado a frio com reforços longitudinais simplesmente apoiadas, sujeitas a diferentes condições de restrição, incluindo sem restrição, axialmente restringidas à dilatação térmica, com restrição rotacional nos apoios e ainda, a interação destas restrições. Esta análise englobou cerca de trezentas simulações numéricas e foram realizadas através do *software* Abaqus.

Na calibração dos modelos numéricos ficou demonstrado que a definição da evolução das propriedades termomecânicas com o aumento da temperatura é de extrema importância para recrear o comportamento estrutural dos elementos em simulações numéricas. Aquando da calibração dos modelos desenvolvidos, os fatores de redução das propriedades mecânicas que ditaram uma melhor aproximação dos ensaios experimentais a temperaturas elevadas dos elementos em estudo (Ferrer, 2014) foram as preconizadas pela EN 1993-1-2 (2005). Quanto à evolução da extensão térmica relativa das vigas com o aumento da temperatura, a proposta de Chen e Youn (2007) foi a que apresentou maior correspondência.

A concordância demonstrada entre os modelos numéricos e os ensaios experimentais (Ferrer, 2014), e ainda a boa correspondência dos modos de instabilidade das vigas em estudo, provaram que a análise por elementos finitos é uma ferramenta confiável para obter resultados com muita precisão. De um modo geral, as temperaturas críticas registadas para as vigas constituídas por secção composta  $2\Sigma$  foram inferiores às registadas para as vigas de secção transversal  $\Sigma$  simples, como acontecera aquando dos ensaios experimentais.

Também ficou demonstrado que a variação das condições de fronteira das vigas, como a restrição axial à elongação térmica e restrição rotacional nos apoios, podem ter uma influência significativa na capacidade resistente dos elementos quando sujeitos a uma situação de incêndio. Ficou claramente provado que quanto maior for o nível de restrição axial nas vigas, menor é a temperatura crítica das mesmas, sendo este, um efeito negativo no comportamento ao fogo das vigas. Ao contrário, acontece para os níveis de restrição rotacional, ou seja, apesar da variação dos níveis de restrição rotacional não demonstrarem muita influência no comportamento estrutural das vigas em situação de incêndio, a restrição rotacional imposta nas

---

vigas aumenta significativamente os valores de temperatura crítica, à exceção da viga  $\Sigma$  simples com 5m de vão livre (viga de maior esbelteza presente neste estudo).

Outro aspeto importante, que resultou do estudo realizado nesta dissertação, foi que a limitação de 350°C para a temperatura máxima das vigas de aço enformado a frio imposta pela EN 1993-1-2 (2005) pode ser demasiado conservativa, especialmente quando a carga em serviço das vigas é muito baixa, menor que 30% do valor de cálculo para a capacidade máxima das vigas à flexão e à temperatura ambiente. Por outro lado, quando o nível de carga em serviço das vigas for próximo ou superior a 70% do valor de cálculo da resistência à flexão, estas podem apresentar temperaturas críticas inferiores aos 350°C, ou seja, insegurança por parte da EN 1993-1-2 (2005). Neste trabalho numérico, os valores registados de temperatura crítica variaram entre os 177°C e os 738°C, sendo que, apenas 10% dos casos estudados apresentaram temperaturas inferiores aos 350°C.

Na análise dos resultados, que derivaram do estudo paramétrico, também levantou-se uma questão quanto ao dimensionamento à flexão dos elementos em estudo à temperatura ambiente. Este pode estar desajustado, visto que, no caso das vigas simplesmente apoiadas sem restrições, era esperado que as vigas com valores mais altos de esbelteza apresentassem temperaturas críticas inferiores às registadas para os valores mais altos de esbelteza. Uma possível justificação deste efeito é que os valores de cálculo obtidos para a resistência à flexão destes elementos poderá estar demasiado conservativo para as vigas de secção simples e demasiado penalizadores para elementos constituídos por secções compostas. Para as restantes condições fronteira destaca-se a diminuição acentuada da temperatura crítica com o aumento do valor de esbelteza nas vigas de secção  $2\Sigma$  quando restringidas axialmente. Este mesmo efeito observa-se nas vigas de secção  $\Sigma$  simples mas quando sujeitas à restrição axial e rotacional.

## 5.2. Trabalhos futuros

As investigações já realizadas, a nível experimental e numérico, no âmbito dos elementos estruturais de aço enformado a frio, demonstraram que o comportamento estrutural destes pode apresentar diferentes características consoante a forma da sua secção transversal. Portanto, o estudo de outro tipo de secções, bem como, o agrupamento de secções transversais, é necessário para uma melhor compreensão e definição da resistência destes elementos.

Na análise numérica apresentada, as vigas estavam submetidas a flexão pura em 1/3 do seu comprimento mas outros tipos de distribuição de carregamento e outras combinações de esforços (flexão, compressão e/ou torção) poderão ser estudados para uma análise mais completa da resposta estrutural destes elementos em situação de incêndio. Como os modos de

instabilidade mostraram ter uma grande influência na resistência das vigas, e sendo que estes ocorrem, geralmente, nas zonas comprimidas da secção transversal, seria interessante, alargar o estudo destes elementos, de aço enformado a frio com reforços longitudinais, enquanto colunas.

Também, aqui, foi considerado uma variação uniforme da temperatura, o que numa real situação de incêndio poderá não suceder. Portanto, seria interessante analisar a resposta destes elementos quando sujeitos a um aquecimento não uniforme.

Com os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho de investigação será possível refinar e alargar o estudo da influência de outros parâmetros no comportamento estrutural de vigas de aço enformado a frio com reforços longitudinais, como, por exemplo, a espessura, a altura e a largura. Neste presente trabalho de investigação foram estudadas as influências do nível de carregamento e do comprimento das vigas, bem como, os níveis de restrição axial e rotacional que os elementos podem estar sujeitos durante a exposição ao fogo. Mas perante a análise de algumas investigações já realizadas é possível prever que outros parâmetros poderão ditar diferentes comportamentos estruturais das vigas. A continuação do estudo paramétrico realizado nesta dissertação, e conseqüente alargamento de resultados, possibilitará o desenvolvimento de métodos simplificados para dimensionamento ao fogo deste tipo de elementos. O desenvolvimento destes métodos contribuirá, então, para uma proposta de alteração de algumas disposições apresentadas pela EN 1993-1-2 (2005).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abaqus Analysis - User's Manual, version 6.10-1, USA.

arabianBusiness.com@. (s.d.). In the frame. Obtido em 15 de Março de 2016, de <http://www.arabianbusiness.com/in-frame-378495.html#.V3BwZbsrLb0>

Chen, J., & Young, B. (2007). Experimental investigation of cold-formed steel material at elevated temperatures. *ELSEVIER- Thin-Walled Structures* 45, 96-110.

Craveiro, H. D., Rodrigues, J. P., Santiago, A., & Laim, L. (2016). Review of the high temperature mechanical and thermal properties of the steels used in cold-formed steel structures - The case of S280GD+Z steel. *ELSEVIER - Thin-Walled Structures* 98, 154-168.

Dinis, P. B., & Camotim, D. (2010). Local/distorcional mode interaction in cold-formed steel lipped channel beams. *Thin-Walled Structures*.

EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-2: General actions, Actions on structures exposed to fire. Brussels: ECS, 2002. 60 p.

EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: ECS, 2005. 91 p.

EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-2: General rules, Structural fire design. Brussels: ECS, 2005. 78 p.

EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules, Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels: ECS, 2006. 125 p.

EN 1993-1-5:2006. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-5: Plated Structural Elements. Brussels: ECS, 2006. 55 p.

Ferrer, B. (2014). *Comportamento ao fogo de vigas sigma em aço enformado a frio*. Coimbra: Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

- FUTURENG@. (s.d.). Quinadeiras. Lisboa, Portugal. Obtido em 20 de Março de 2016, de <http://www.futureng.pt/quinagem>
- Garifullin, M., & Nackenhorst, U. (2015). Computational Analysis of Cold-Formed Steel Columns with Initial Imperfections. *ELSEVIER - Procedia Engineering 117*, 1073-1079.
- Gendy, B. L., & Hanna, M. T. (2015). Effect of geometric imperfections on the ultimate moment capacity of cold-formed sigma-shape sections. *HBRC Journal*.
- IBDA@. (s.d.). Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Arquitetura - Fórum da construção. *Light Steel Framing traz novas possibilidades para a arquitetura*. Obtido em 15 de Março de 2016, de <http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=29&Cod=84>
- ISO 834-1 (1999): Fire resistance tests - elements of building construction, Part 1: general requirements, International Organization for Standardization ISO 834, Geneva, Switzerland.
- Kaitila, O. (Kaitila 2002). *Finite Element Modelling of Cold-formed Steel Members at High Temperatures*. Helsinki University of Technology of Steel Structures Publications.
- Kankanamge, N. D. (2010). *Structural Behaviour and Design of Cold-formed Steel Beams at Elevated Temperatures*. School of Urban Developments Queensland University of Technology.
- Kankanamge, N. D., & Mahendran, M. (2011). Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures. *ELSEVIER, Thin-Walled Structures*, 26-44.
- Laím, L. (2013a). *Experimental and Numerical Analysis on the Structural Behaviour of Cold-formed Steel Beams Subjected to Fire*. Coimbra: Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Laím, L., C. Rodrigues, J. P., & Craveiro, H. D. (2015). Flexural behaviour of beams made of cold-formed steel sigma-shaped sections at ambient and fire conditions. *ELSEVIER: Thin-Walled Structures*, 53-65.
-

- Laím, L., C. Rodrigues, J., & Simões da Silva, L. (2014). Experimental analysis on cold-formed steel beams subjected to fire. *Thin-Walled Structures* 74, 104-117.
- Laím, L., Rodrigues, J. C., & Simões da Silva, L. (2013 b). Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures* 72, 1-13.
- Lee, J. H. (2004). *Local Buckling Behaviour and Design of Cold-formed Steel Compression Members at Elevated Temperatures*. School of Civil Engineering Queensland University of Technology.
- NP-EN 10147:2002. Bandas e chapas de aço de construção galvanizadas a quente em contínuo. Condições técnicas de fornecimento. Caparica: IPQ, 2002.
- Rhodes, J. (1991). *Design of cold-formed steel members*. New York: Elsevier Applied Science, 1991. 409p.
- Schafer, B. W., & Peköz, T. (1998). Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research* 47, 193-210.
- SFIA@. (s.d.). Steel Framing Industry Association. *How Cold-formed Steel is Made*. Virgínia, USA. Obtido em 16 de Março de 2016, de <https://sfia.memberclicks.net/>
- Silvestre, N., & Camotim, D. (2006). *Análise e Dimensionamento de Estruturas de Aço Enformadas a Frio*. Lisboa: Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.
- Simões, R. A. (2014). *manual de DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS 3ª EDIÇÃO*. Coimbra: CMM.
- SteelConstruction.info@. (s.d.). The free encyclopedia for UK steel construction information. *Steel construction products*. Obtido em 15 de Março de 2016, de [http://www.steelconstruction.info/Steel\\_construction\\_products](http://www.steelconstruction.info/Steel_construction_products)
- SwedSteel-metecno@. (s.d.). Z-C beams Light gauge profiles. Biatorbágy, Budapeste, Hungria . Obtido em 15 de Março de 2016, de <http://swedsteel-metecno.com/en/products/z-c-beams/>
-

- Veríssimo, H. (2008). *Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço Enformado a Frio de Acordo Com o Eurocódigo*. Universidade Técnica de Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Walls&Ceilings@. (s.d.). How Steel Trusses Perform. Detroit, Michigan, USA. Obtido em 15 de Março de 2016, de <http://www.wconline.com/ext/resources/issues/2015-October/WC1015-FT2-truss-p4.jpg>
- Yu, C., & Schafer, B. W. (2005). *Distortional Buckling of Cold-formed Steel Members in Bending*. Baltimore, Maryland: American Iron and Steel Institute.
- Yu, W.-W., & Laboube, R. A. (2010). *Cold-formed steel design, 4th ed.* New York: John Wiley and Sons, Inc.



## ANEXO A

### Anexo A-1. Condições fronteira de origem térmica

Série  $\Sigma$ \_SS\_03

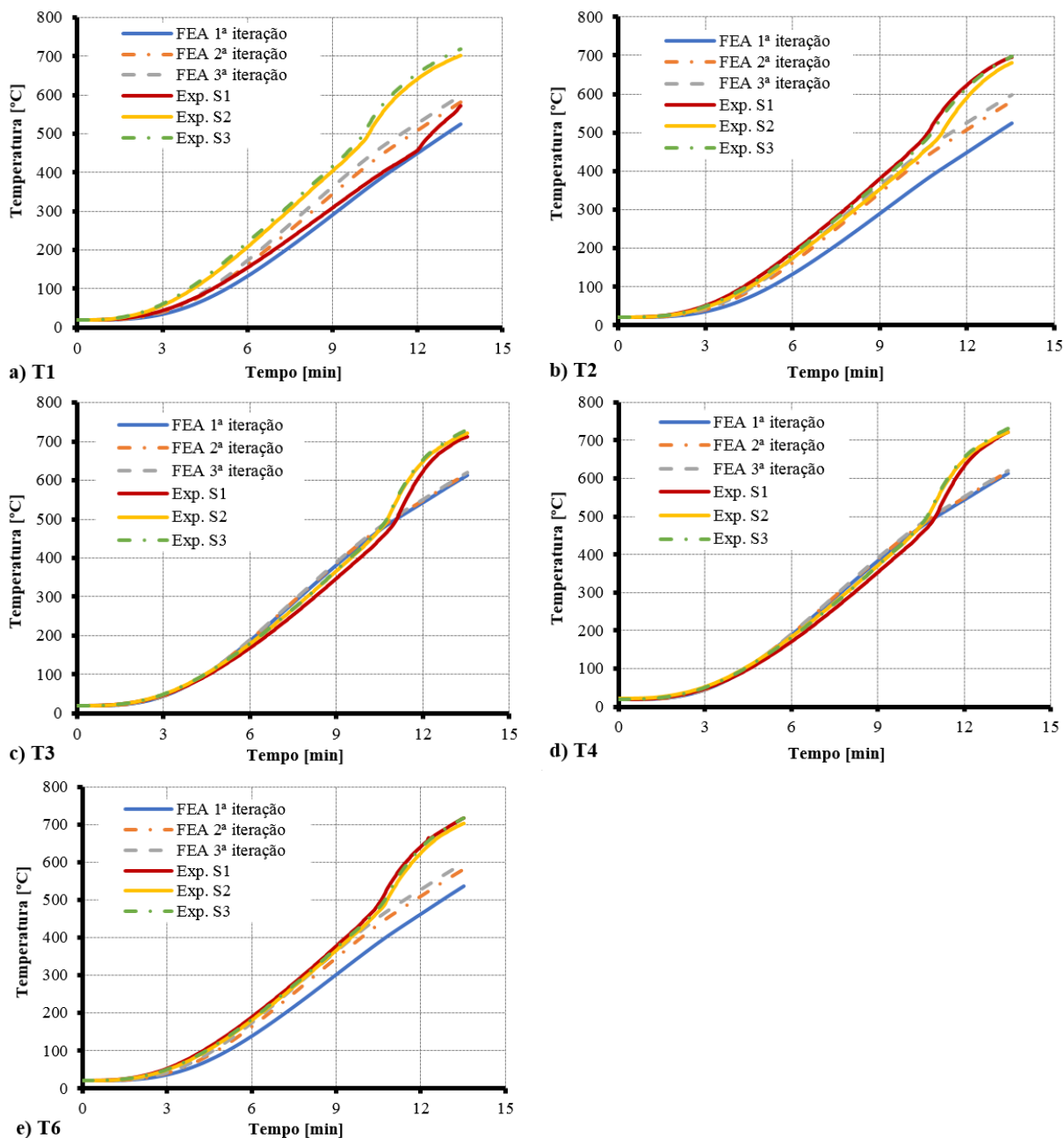


Figura A-1 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga  $\Sigma$  simplesmente apoiada para os restantes termopares.

Série  $\Sigma$ \_AR\_03

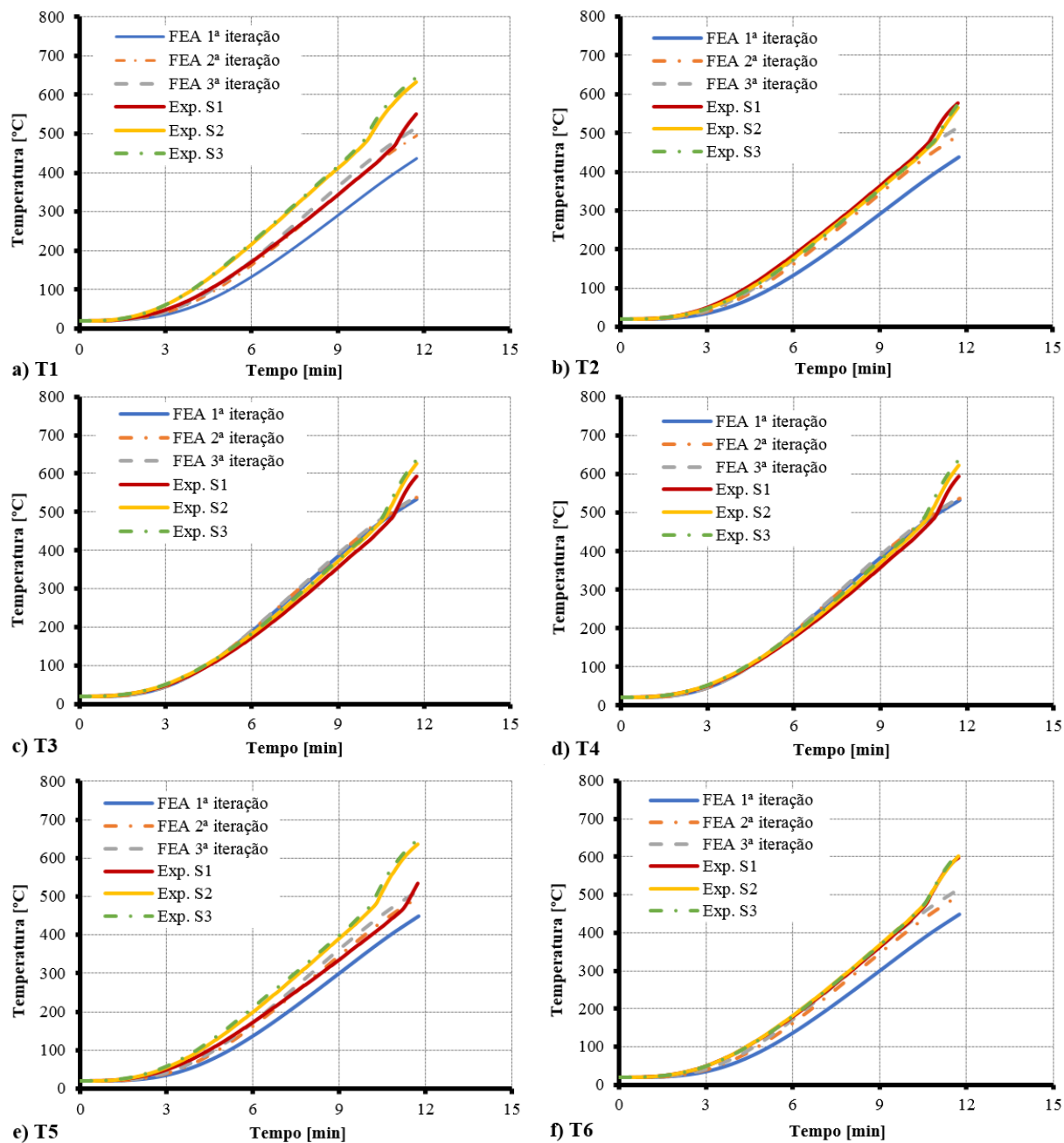


Figura A-2 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga  $\Sigma$  com restrição axial para os restantes termopares.

Série  $\Sigma$ \_RR\_02

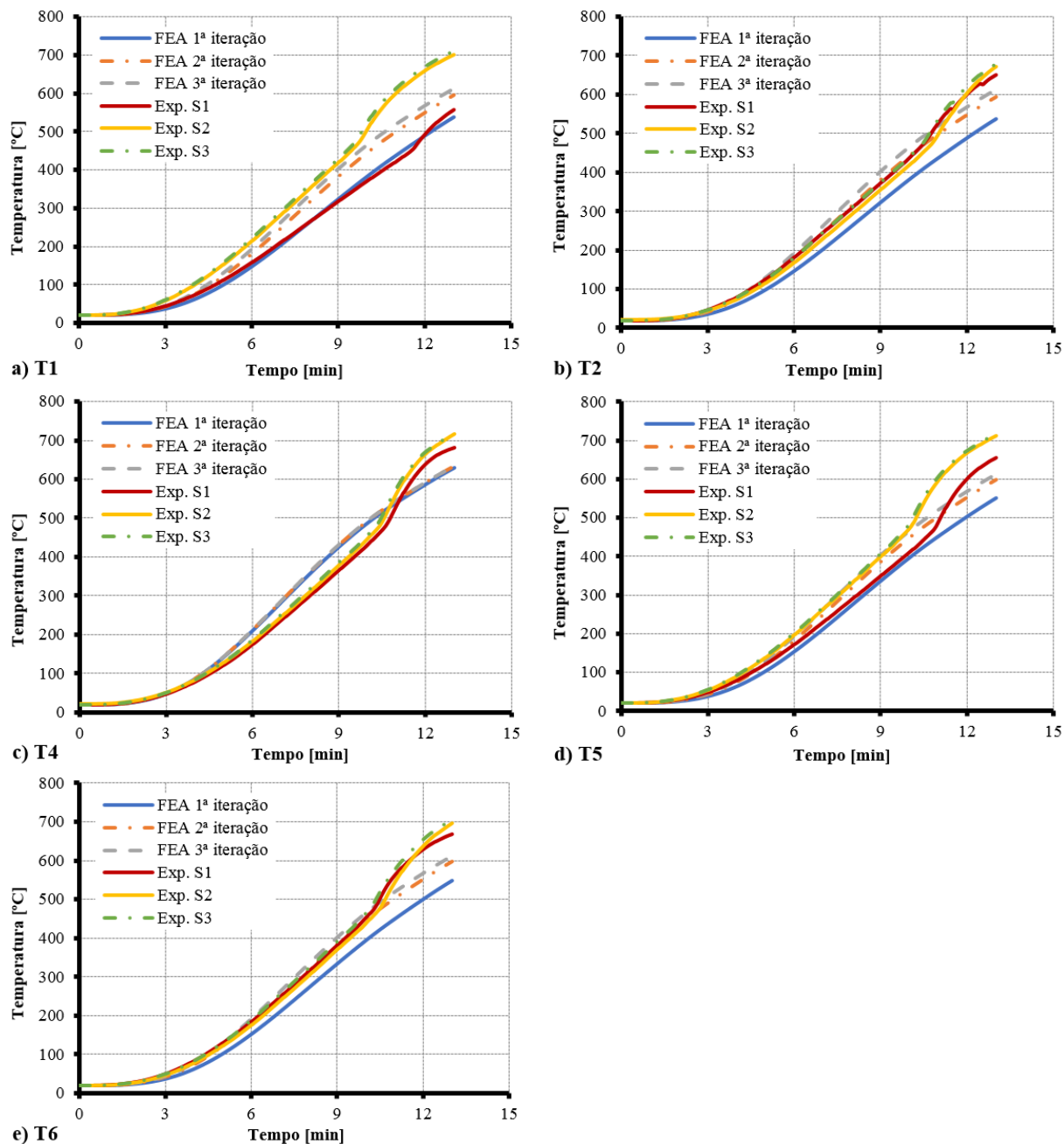


Figura A-3 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga  $\Sigma$  com restrição axial e rotacional para os restantes termopares.

Série 2Σ\_SS\_02

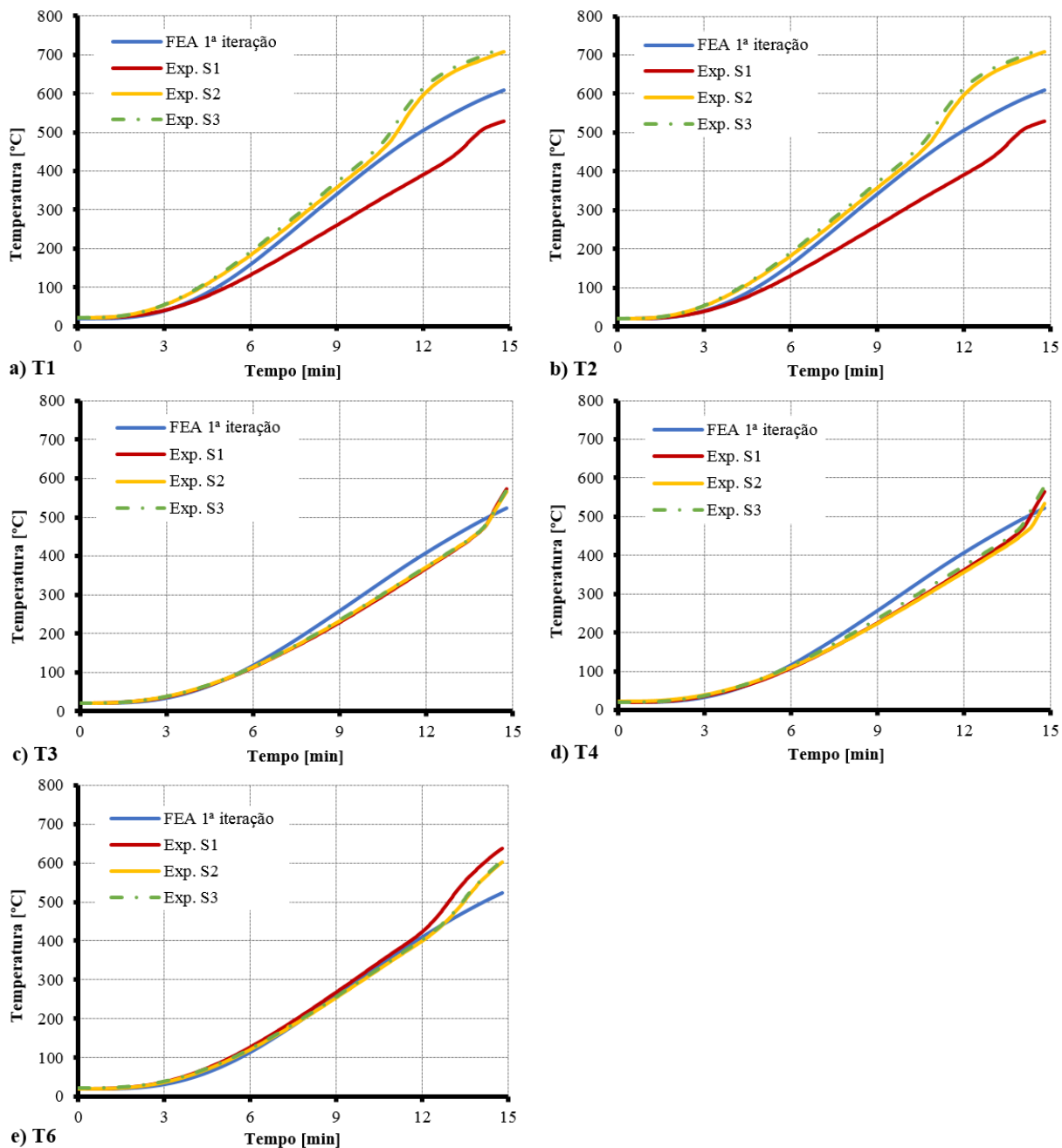


Figura A-4 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga 2Σ simplesmente apoiada para os restantes termopares.

Série 2Σ\_AR\_01

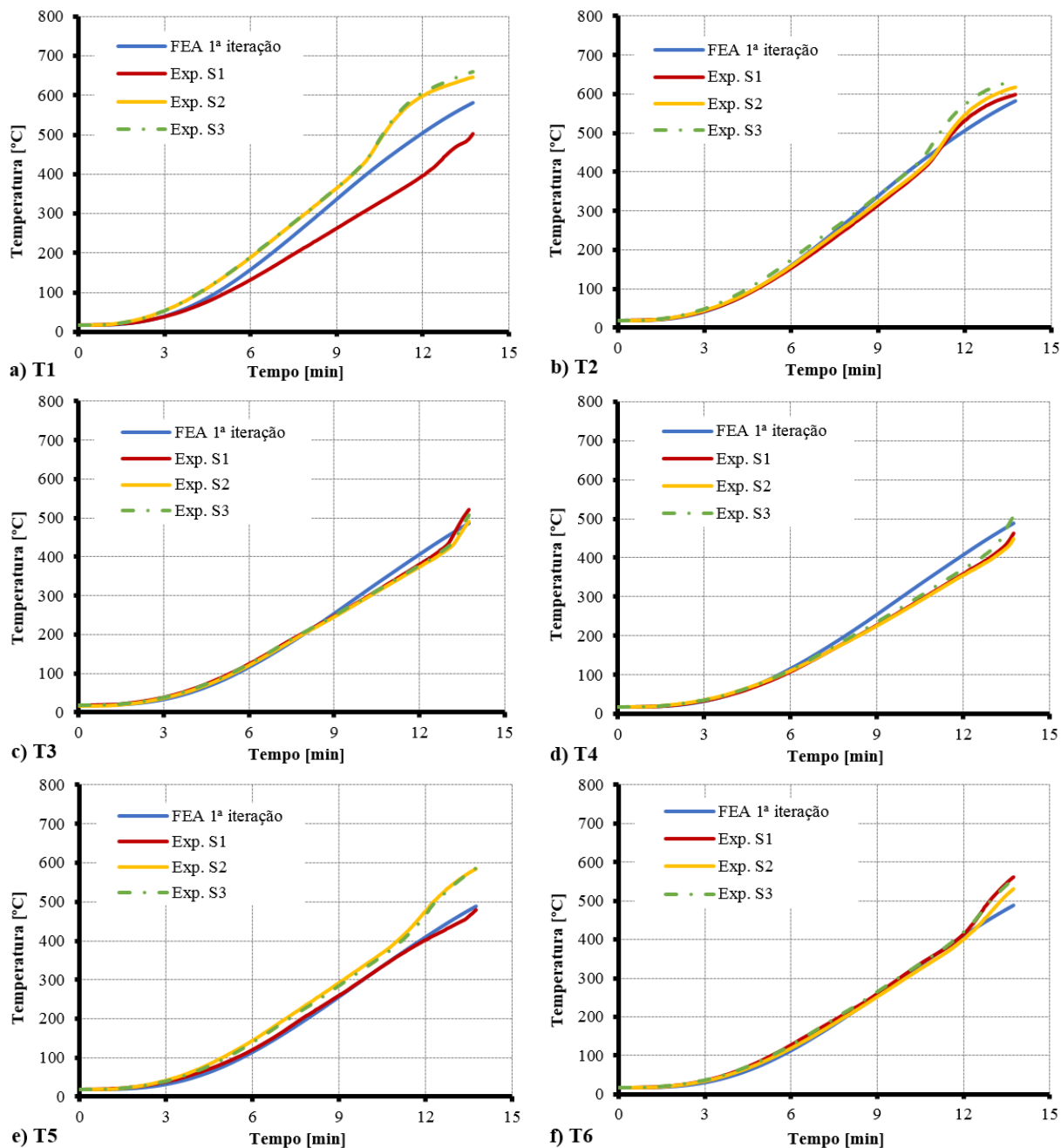


Figura A-7 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga 2Σ com restrição axial para os restantes termopares.

Série 2Σ\_RR\_01

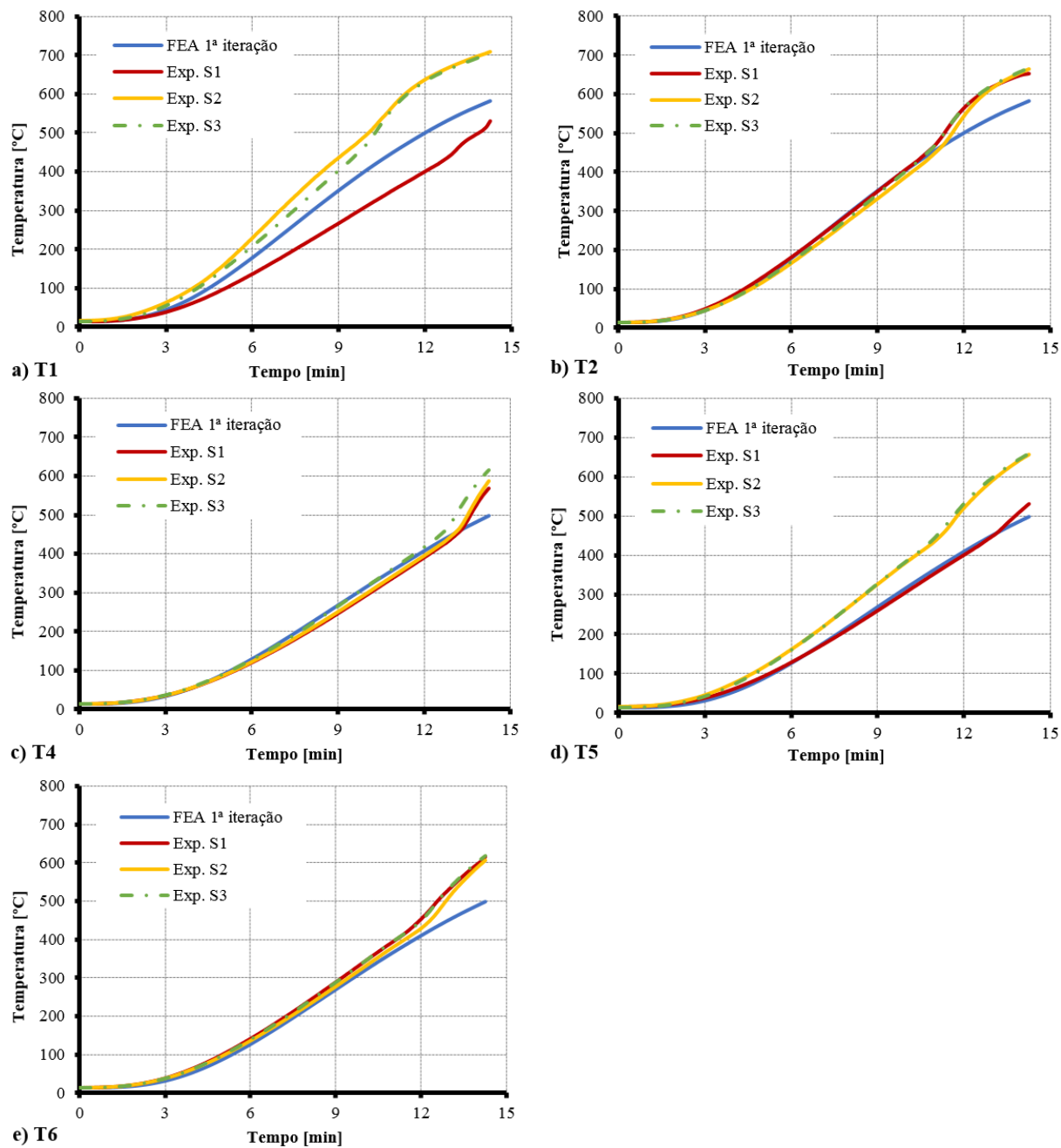


Figura A-8 - Calibração da evolução da temperatura na secção transversal da viga 2Σ com restrição axial e rotacional para os restantes termopares.

## Anexo A-2. Calibração mecânica

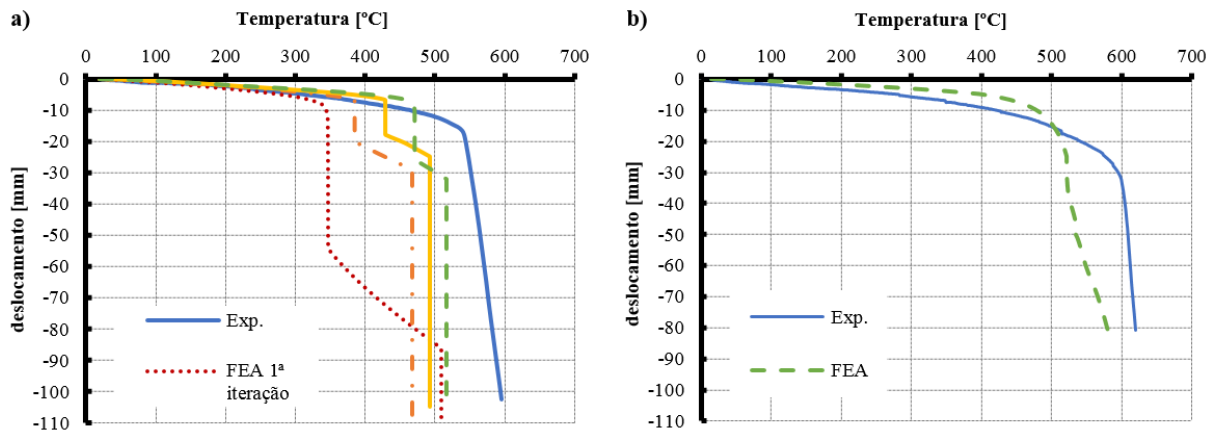


Figura A-9 - Evolução do deslocamento a meio vão em função da temperatura: a) viga  $\Sigma$  com restrição axial; b) viga  $2\Sigma$  com restrição axial e rotacional.

**Anexo A-3. Efeito do nível de restrição axial**

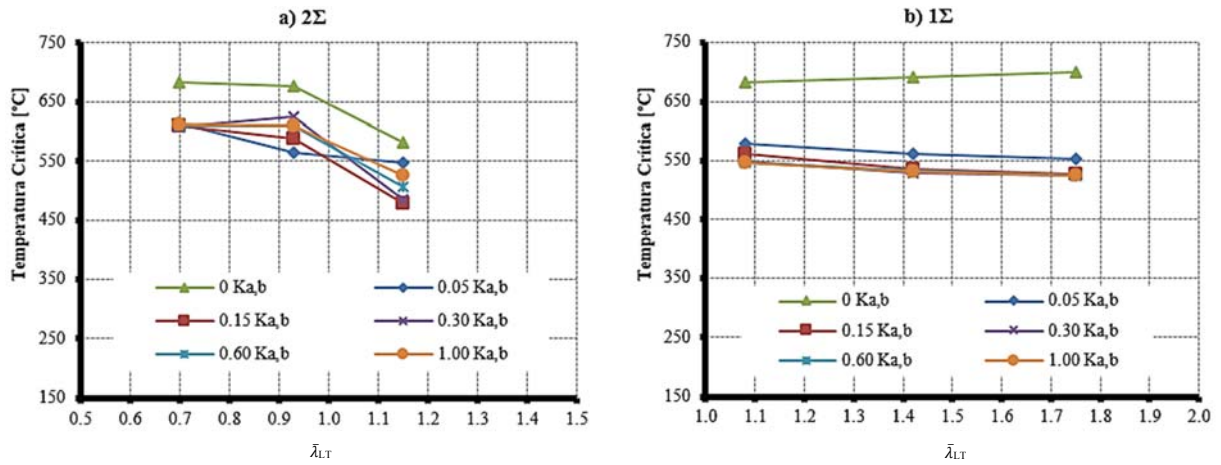


Figura A-10 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição axial das vigas 2Σ (a) e Σ (b) para 30% do nível de carga.

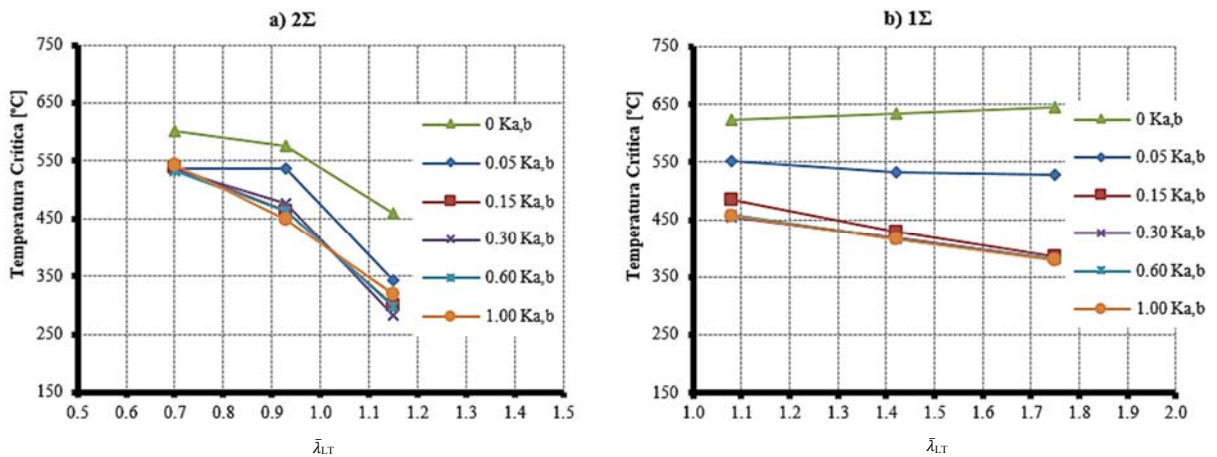


Figura A-11 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição axial 2Σ (a) e Σ (b) para 50% do nível carga.



### Anexo A-4. Efeito do nível de restrição rotacional

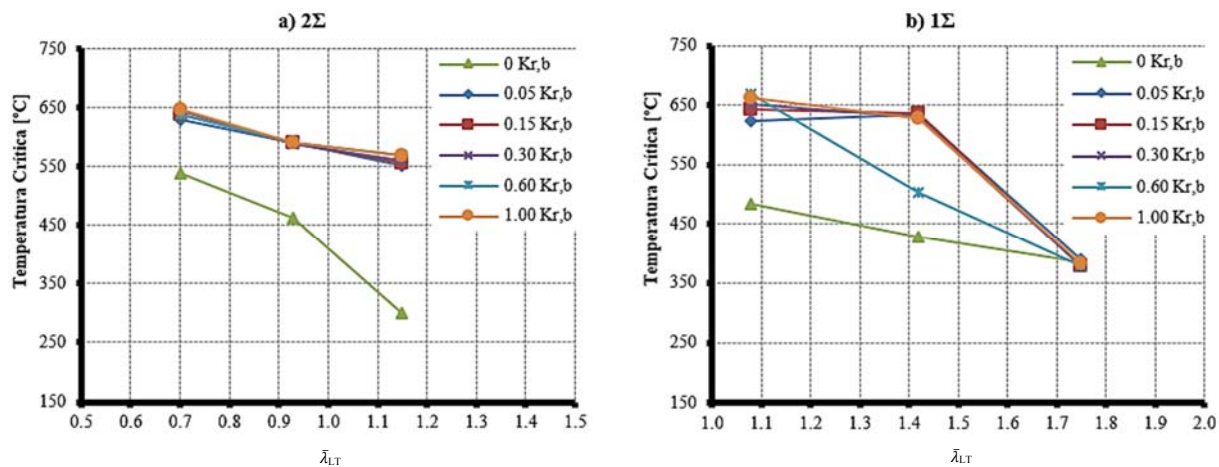


Figura A-12 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional das vigas 2Σ (a) e Σ (b) para 15% de restrição axial e 50% do nível de carga.

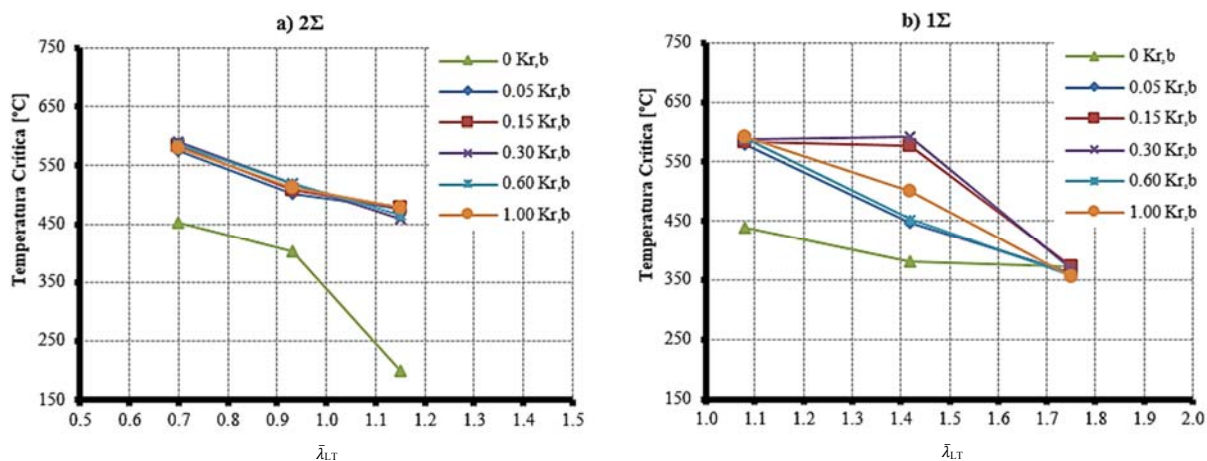


Figura A-13 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional 2Σ (a) e Σ (b) para 15% de restrição axial e 70% do nível de carga.

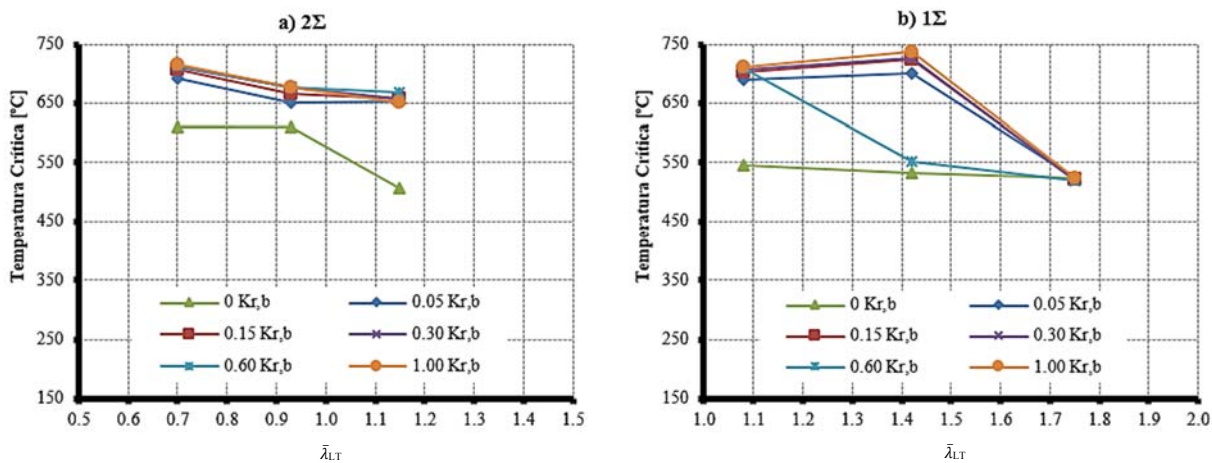


Figura A-14 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional  $2\Sigma$  (a) e  $\Sigma$  (b) para 60% de restrição axial e 30% do nível de carga.

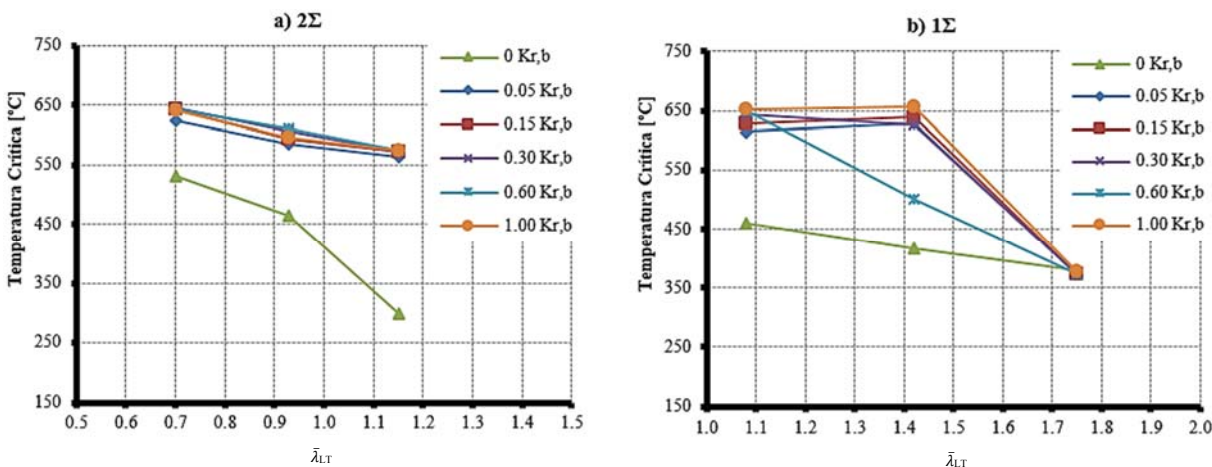


Figura A-15 - Análise da temperatura crítica com a variação do nível de restrição rotacional  $2\Sigma$  (a) e  $\Sigma$  (b) para 60% de restrição axial e 50% do nível de carga.