



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

Estudo das Propriedades Mecânicas e Térmicas a Altas Temperaturas do Aço Enformado a Frio S280GD+Z

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

Autor

Samuel José Crespo Pinheiro

Orientadores

Professor Doutor João Paulo Correia Rodrigues (UC)

Mestre Hélder David da Silva Craveiro (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, Janeiro, 2015

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Coimbra agradeço o apoio financeiro prestado para o desenvolvimento desta investigação científica.

Ao Professor Doutor João Paulo Rodrigues agradeço a orientação, disponibilidade e conselhos que me dispensou ao longo da realização deste trabalho.

Ao Mestre Hélder Craveiro muito agradeço todo o acompanhamento diário, a excelente orientação, disponibilidade, conselhos, ajuda e apoio que me dispensou ao longo da realização desta dissertação que, em muito elucidou e motivou o meu trabalho.

Ao Doutor Luís Laim e ao Engenheiro Hugo Caetano, agradeço toda a ajuda disponibilizada na realização desta dissertação.

A todos os funcionários do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, em especial ao Rafael Campos, agradeço a preciosa ajuda, imprescindível para a realização dos ensaios experimentais.

À minha família, o principal e mais importante agradecimento por toda a confiança e apoio demonstrado durante estes anos que frequentei o Mestrado Integrado em Engenharia Civil.

Aos meus amigos, colegas de curso e à Melissa agradeço terem estado sempre presentes e a importante ajuda em diferentes ocasiões.

RESUMO

A utilização de estruturas de aço enformado a frio aumentou consideravelmente, sendo usado para fins residenciais, comerciais e industriais, uma vez que, apresentam inúmeras vantagens devido ao seu reduzido peso, às suas reduzidas espessuras, a sua proteção contra corrosão e eficiência estrutural. O aumento da procura do aço enformado a frio como solução, leva à necessidade de garantir a segurança destes elementos durante a sua vida útil para as mais variadas ocorrências, em especial, em situação de incêndio. No entanto, até ao momento a investigação sobre o desempenho de estruturas de elementos de aço enformado a frio em situações de incêndio é ainda escassa, traduzindo-se na ausência de métodos específicos para a verificação de segurança deste tipo de estruturas na normalização atual, nomeadamente na NP EN 1993-1-2:2010 (2010). A NP EN 1993-1-2 (2010) prevê que os métodos existentes para elementos de aço laminado a quente sejam também aplicáveis a elementos de aço enformado a frio e que os fatores de redução para as propriedades mecânicas em função da temperatura sejam os mesmos para aços laminados a quente da Classe 4. Neste contexto, surge este trabalho de investigação para avaliação das propriedades mecânicas e térmicas do aço enformado a frio S280GD+Z a elevadas temperaturas. Pretende-se obter os fatores de redução para as propriedades mecânicas (Tensão de Cedência, Módulo de Elasticidade, Tensão de Proporcionalidade e Tensão Última) em função da temperatura, através da realização de ensaios de tração e ainda, avaliar experimentalmente as propriedades térmicas do aço S280GD+Z, também, em função da temperatura. Todos os resultados experimentais foram comparados com os modelos presentes na NP EN 1993-1-2:2010 (2010) e com modelos propostos por outros autores. Por fim, com base nos resultados experimentais foram propostos novos modelos para as propriedades mecânicas e térmicas em função da temperatura e realizada uma breve análise numérica da influência destas propriedades em colunas de aço enformado a frio com dilatação térmica restringida em situação de incêndio. Nestas simulações foram testados os modelos propostos neste estudo e os modelos presentes na NP EN 1993-1-2:2010 (2010).

PALAVRAS-CHAVE

Aço enformado a frio, temperatura, análise experimental, análise numérica, propriedades mecânicas, propriedades térmicas, fatores de redução, tensão de cedência e módulo elasticidade.

ABSTRACT

The use of CFS (Cold-Formed Steel) structures has increased considerably in the past few years especially for residential, commercial and industrial purposes since they present several advantages due to their light weight, their reduced thickness, its corrosion protection and structural efficiency. The increase demand of CFS leads to necessity to ensure the safety of these structures in any situation likely to occur during their lifetime, including a fire situation. However, to date research on the performance of structures of CFS elements in fire situations is still scarce, resulting in the absence of specific methods for the security check of such structures in the current standardization, particularly the EN 1993-1-2:2005 (2005). EN 1993-1-2:2005 (2005) stipulates that existing methods for the hot-rolled steel elements also apply to CFS elements and that the reduction factor for the mechanical properties as a function of temperature are the same for hot-rolled steel Class 4. In this context, this research work aims to assess the mechanical and thermal properties of CFS steel S280GD+Z at elevated temperatures. It is intended to determine the reduction factors for mechanical properties (yield strength, elastic modulus, proportional limit and ultimate strength) as a function of temperature, by conducting tensile tests and also to experimentally assess the thermal properties of steel S280GD+Z also a function of temperature. All experimental results were compared with models present in the EN 1993-1-2:2005 (2005), other design codes and with models proposed by other authors. New models based on the experimental results have been proposed for the mechanical and thermal properties as a function of temperature. Finally a brief numerical analysis was performed in order to assess the influence of these properties in the prediction of the structural behavior of a CFS column with restrained thermal elongation in case of fire. In this study the proposed models determined in the scope of this work and the models presented in the EN 1993-1-2: 2005 (2005) were tested.

KEY WORDS

Cold-formed steel, temperature, experimental analysis, numerical analysis, mechanical properties, thermal properties, reduction factors, yield strength and elastic modulus.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
SIMBOLOGIA	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estrutura do Documento	5
2 PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DO AÇO ENFORMADO A FRIO.....	6
2.1 Características Gerais	6
2.2 Tensões Residuais	9
2.3 Propriedades mecânicas do aço enformado a frio	11
2.3.1 Propriedades mecânicas do aço enformado a frio a elevadas temperaturas de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010	11
2.3.2 Estudos precedentes da influência da temperatura nas propriedades mecânicas do aço enformado a frio.....	14
2.4 Propriedades Térmicas.....	19
2.4.1 Propriedades térmicas do aço enformado a frio a temperaturas elevadas de acordo com a EN 1993-1.2:2010.....	20
2.4.2 Equipamento da <i>HOT DISK</i> para avaliação das propriedades térmicas.....	22
2.5 Considerações Finais	25
3 ESTUDOS EXPERIMENTAIS	27
3.1 Propriedades Mecânicas	27
3.1.1 Sistema Experimental.....	27
3.1.2 Provetes de ensaio	29
3.1.3 Metodologias de Ensaio	29
3.2 Propriedades térmicas do aço S280GD+Z.....	31
3.2.1 Determinação da condutividade térmica e calor específico com recurso ao TPS 2500S	31

3.2.1.5 Metodologias de Ensaio.....	36
3.2.2 Determinação da extensão térmica.....	37
3.3 Considerações Finais	37
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	38
4.1 Propriedades Mecânicas	38
4.1.1 Curvas Tensão-Extensão	39
4.1.2 Fatores de Redução da Tensão de Cedência (k_y, θ).....	40
4.1.3 Fatores de Redução do Módulo de Elasticidade (k_E).....	42
4.1.4 Fatores de Redução da Tensão Última ($k_{f_u, \theta}$) e da Tensão Limite de Proporcionalidade ($k_{f_p, \theta}$).....	42
4.1.5 Comparação com estudos precedentes	44
4.1.6 Comparação com as normas: NP EN 1993-1-2:2010; BS 5950:1990; AS 4100:1998	46
4.1.7 Comparação com aços laminados a quente	48
4.2 Propriedades Térmicas.....	50
4.2.1 Condutividade Térmica (λ_a).....	50
4.2.2 Difusividade Térmica (α)	50
4.2.3 Calor Específico (c_a).....	51
4.2.4 Extensão Térmica ($\Delta l/l$).....	52
4.2.5 Comparação com normas e estudos precedentes.....	53
4.3 Modelos Preditivos para as Propriedades Mecânicas	55
4.3.1 Tensão de Cedência	55
4.3.2 Módulo de Elasticidade	56
4.3.3 Modelos Ramberg-Osgood.....	57
4.3.4 Comparação com os modelos apresentados pela NP EN 1993-1-2:2010 para aços com e sem endurecimento	60
4.4 Modelos Preditivos para as Propriedades Térmicas	61
4.4.1 Condutividade Térmica	61
4.4.2 Calor Específico	62
4.4.3 Expansão Térmica	62
4.5 Caso de Estudo: Influência das Propriedades Mecânicas e Térmicas	63
5 CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXO A – RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	A-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: a) Perfiladora (Rezende, 2005); b) Fases do processo de laminagem a frio de uma secção Ómega (Rhodes, 1992).....	7
Figura 2.2: Influência das dobras na resistência de secções de aço enformado a frio (Silvestre e Camotim, 2006)	8
Figura 2.3: Influência da espessura da chapa e da tensão de cedência do aço nas tensões residuais dos perfis de aço enformado a frio (Moen et al, 2008).	10
Figura 2.4: Influência do processo de enformagem a frio nas propriedades mecânicas dos perfis de aço enformado a frio (Rondal e Dubina, 2005; Moen et al, 2008)	11
Figura 2.5: a) Relação tensão-extensão segundo a EN 1993-1-2:2010 (2010); b) Fatores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono a temperaturas elevadas.....	12
Figura 2.6: Fatores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono de classe 4 a temperaturas elevadas	13
Figura 2.7: a) Relação tensão-extensão alternativa para aço, tendo em conta o endurecimento; b) Relações tensões-extensões alternativas para o aço a temperaturas elevadas, tendo em conta o endurecimento	13
Figura 2.8: a) Fatores de redução da tensão de cedência do aço S350GD+Z em função da temperatura; b) Fatores redução do módulo de elasticidade do aço S350GD+Z em função da temperatura (Outinen et al., 2000).	15
Figura 2.9: Ensaio de tração do aço estrutural S350GD+Z antes e após ação térmica (Outinen e Mäkeläinen, 2002).....	15
Figura 2.10: a) Comparação relação tensão-extensão proposta pela NP EN 1993-1-2:2010 e os resultados obtidos para o aço G450; b) Comparação relação tensão-extensão proposta e os resultados obtidos para o aço G450. (Chen e Young, 2007).....	16
Figura 2.11: a) Fatores de redução da tensão de cedência do aço G550 e G250 em função da temperatura; b) Fatores redução do módulo de elasticidade do aço G550 e G250 em função da temperatura (Ranawaka e Mahendran, 2009).	17
Figura 2.12: a) Relação tensão-extensão a várias temperaturas; b) Fatores de redução da tensão de cedência do aço G250 em função da temperatura. (Kankanamge e Mahendran, 2011)	17

Figura 2.13: a) Fatores de redução da tensão de cedência do aço G450 e G550 em função da temperatura b) Fatores redução do módulo de elasticidade do aço G250, G450 e G550 em função da temperatura (Kankanamge e Mahendran, 2011).	18
Figura 2.14: Extensão térmica relativa do aço em função da temperatura.....	20
Figura 2.15: Calor específico do aço em função da temperatura.	21
Figura 2.16: Condutividade térmica do aço em função da temperatura.....	22
Figura 2.17: Gravação transitória do transporte das propriedades térmicas do material obtidas pelo sensor.... ..	23
Figura 2.18: curvas relativas ao aumento de temperatura no sensor (curva azul), e na amostra (curva vermelha).	24
Figura 2.19: Esquema ilustrativo do sistema de ensaio: a) sem amostra; b) com amostra (Zhang et al., 2014).	25
Figura 3.1: Sistema de ensaio de propriedades mecânicas de aço enformado a frio.....	28
Figura 3.2: Dimensões dos provetes de ensaio.....	29
Figura 3.3: Equipamento TPS 2500 S.....	31
Figura 3.4: a) Sensor com isolamento em <i>Kapton</i> ; b) Sensor com isolamento em <i>Mica</i>	32
Figura 3.5: Sonda de quatro pontos em <i>Macon</i>	33
Figura 3.6: a) Suporte de temperatura ambiente e capa; b) Suporte de altas temperaturas.....	33
Figura 3.7: Pormenorização da definição do <i>probing depth</i>	34
Figura 3.8: Sistema de ensaio das propriedades térmicas de aço enformado a frio.	35
Figura 4.1: calibração dos extensómetros FLA-6-11 e HI 3548 da Epsilon.	38
Figura 4.2: (a) Curvas tensão-extensão para cada patamar de temperatura; (b) provetes ensaiados para os vários patamares de temperatura.	40
Figura 4.3: Fatores de redução da tensão para os diferentes valores de extensão em função da temperatura.	41
Figura 4.4: Fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura.	42
Figura 4.5: Fatores de redução da tensão última e da tensão limite de proporcionalidade em função da temperatura.	43
Figura 4.6: fatores de redução da tensão de cedência e comparação com estudos precedentes.....	44
Figura 4.7: Fatores de redução do módulo de elasticidade e comparação com estudos precedentes....	45
Figura 4.8: Fatores de redução da tensão última e comparação com estudos precedentes.	46
Figura 4.9: fatores de redução da tensão de cedência e comparação com várias normas.	47
Figura 4.10: Fatores de redução do módulo elasticidade e comparação com outras normas.....	47
Figura 4.11: Fatores de redução tensão limite de proporcional e comparação com outras normas.	48
Figura 4.12: Fatores de redução da tensão de cedência e comparação com aços laminados a quente. .	49
Figura 4.13: Fatores de redução do módulo de elasticidade e comparação com aços laminados a quente.	49
Figura 4.14: Condutividade térmica do aço enformado a frio em função da temperatura.	50

Figura 4.15: Difusividade térmica do aço enformado a frio em função da temperatura.	51
Figura 4.16: Calor específico do aço enformado a frio em função da temperatura.	52
Figura 4.17: Expansão térmica do aço enformado a frio em função da temperatura.	52
Figura 4.18: Condutividade térmica do aço enformado a frio em função da temperatura e comparação com a NP EN 1993-1-2:2010 (2010).	53
Figura 4.19: Calor específico do aço enformado a frio em função da temperatura e comparação com a NP EN 1993-1-2:2010 (2010).	54
Figura 4.20: Extensão térmica do aço enformado a frio em função da temperatura e comparação com normas e estudos precedentes.	54
Figura 4.21: Proposta de equação para fatores de redução da tensão cedência e comparação com outros estudos..	56
Figura 4.22: Proposta de equação para fatores de redução do módulo de elasticidade do aço enformado a frio S280GD+Z e comparação com outros estudos.	57
Figura 4.23: Curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente em comparação com: a) as obtidas através do modelo proposto por Ramberg-Osgood (1943) (Equação 9); b) as obtidas através do modelo de Kankanamge e Mahendran (2011) (Equação 10); c) os modelos propostos por outros investigadores; d) o modelo proposto neste estudo.	59
Figura 4.24: Curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente em comparação com: a) as obtidas através do modelo proposto pela NP EN 1993-1-2 (2010) para aços laminados; b) as obtidas através do modelo proposto pela NP EN 1993-1-2 (2010) para aços laminados com endurecimento.	61
Figura 4.25: Proposta para a condutividade térmica em função da temperatura.	62
Figura 4.26: Proposta para a extensão térmica em função da temperatura.	63
Figura 4.27: Evolução da relação P/P_0 . Comparação entre ensaios experimentais e simulações numéricas.	65
Figura 4.28: Deformada final observada nos ensaios experimentais e através de simulação numérica.	65
Figura A-1: Secções do provete referidas no Quadro A-1.	A-1
Figura A-2: Curvas de relação tensão-extensão obtidas para cada patamar de temperatura: a) 20°C; b) 100°C; c) 200°C; d) 300°C; e) 400°C; f) 500°C; g) 600°C h) 700°C; i) 800°C.	A-3

SIMBOLOGIA

θ	temperatura
θ_a	temperatura do aço
E	módulo de elasticidade
$E_{,\theta}$	módulo de elasticidade a temperaturas elevadas
f_y	tensão de cedência a 20°C
$f_{y,\theta}$	tensão de cedência do aço a temperaturas elevadas
f_u	tensão última
$f_{u,\theta}$	tensão de última a temperaturas elevadas
f_p	tensão limite convencional de proporcionalidade
$f_{p,\theta}$	tensão limite convencional de proporcionalidade a temperaturas elevadas
ε_y	extensão de cedência a 20°C
$\varepsilon_{y,\theta}$	extensão de cedência efetiva do aço a temperaturas elevadas
ε_u	extensão última
$\varepsilon_{u,\theta}$	extensão de última a temperaturas elevadas
$\varepsilon_{,p}$	extensão limite convencional de proporcionalidade
$\varepsilon_{p,\theta}$	extensão limite convencional de proporcionalidade a temperaturas elevadas
$k_{E,\theta}$	fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a
$k_{y,\theta}$	fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a .
$k_{p,\theta}$	fator de redução para a tensão limite de proporcionalidade do aço à temperatura θ_a .
$k_{u,\theta}$	fator de redução para a tensão última do aço à temperatura θ_a
β	constante de Ramberg-Osgood
$\Delta l/l$	extensão térmica
λ_a	condutividade térmica
α	difusividade térmica
c_a	calor específico
k	difusividade térmica
t	tempo

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Aço enformado a frio (Cold - Formed Steel) é o termo utilizado para definir produtos fabricados por dobragem de chapa de aço de pequenas espessuras. Este material é aplicado em diferentes indústrias, com diferentes dimensões e formas, mas a sua utilização e aplicação centra-se na área da construção.

O historial do aço enformado a frio indica que a utilização deste material na indústria da construção iniciou-se na década de 50 do século XIX nos Estados Unidos e no Reino Unido, mas só na década de 40 do século XX começaram a ser utilizados regularmente como elementos de construção. Em 1946 são publicadas pelo AISI (*American Iron and Steel Institute*) as primeiras disposições regulamentares relativas ao comportamento estrutural deste tipo de elementos, que tiveram como base o trabalho de investigação desenvolvido pelo Professor George Winter na Universidade de Cornell, desde 1939. Estas disposições regulamentares têm sido atualizadas regularmente, com base em trabalhos de investigação desenvolvidos, até à edição mais recente, *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* (AISII, 2007), disponibilizada em 2007. Na Europa apenas em 1987 foram apresentadas as primeiras recomendações para o dimensionamento deste tipo de estruturas, pelo Comité TC7 da ECCS, *European Recommendations for the Design of Light Gauge Steel Members*. Este documento foi posteriormente desenvolvido, melhorado e publicado em 2006 como Norma Europeia, *Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General Rules, Supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting* (2006). No entanto, até ao momento não existem ainda regulamentos específicos relativos ao comportamento ao fogo de elementos estruturais de aço enformado a frio, sendo apenas fornecidas linhas gerais de verificação de segurança, *Eurocódigo 3: Projeto de estruturas de aço. Parte 1-2: Regras gerais, Verificação da resistência ao fogo* (NP EN 1993-1-2:2010, 2010), mas tendo em consideração as metodologias existentes para aço laminado a quente.

A Resistência ao Fogo caracteriza o comportamento, com ou sem função de compartimentação, de elementos estruturais quando sujeitos à ação acidental do fogo. A avaliação desta resistência

define-se pela duração de tempo, desde o início do processo térmico tradicionalmente representado pela curva normalizada ISO 834, até ao momento limite das exigências inicialmente estabelecidas para um elemento estrutural, isto é, quando o elemento estrutural deixa de garantir a segurança da estrutura. O incêndio é um dos problemas mais graves em edifícios principalmente quando não estão dimensionados e construídos considerando a sua ocorrência, podendo assim, causar grandes danos materiais ou mesmo a perda de vidas humanas. Desta forma, os sistemas estruturais devem resistir à ação do fogo o tempo suficiente para garantir a evacuação em segurança de todos os ocupantes do edifício e evitar a propagação rápida do mesmo. Sendo as estruturas constituídas por perfis de aço enformado a frio uma solução recente na indústria da construção civil, a investigação realizada para descrever o desempenho destas soluções é ainda escassa e torna-se necessário desenvolver mais trabalhos de investigação para verificação do desempenho deste tipo de solução estrutural quando sujeitas a elevadas temperaturas, uma vez que a ação acidental do fogo em edifícios é uma das situações mais desfavoráveis no dimensionamento de estruturas. (Craveiro, 2013)

Sidey e Teague (1998), afirmaram que a redução da resistência nos aços enformados a frio quando sujeitos à ação do fogo é entre 10% a 20% superior à dos aços laminados a quente, devido ao diferente modo de fabrico dos aços e dos efeitos moleculares na superfície dos elementos. Alguns estudos foram conduzidos para avaliar a redução das propriedades mecânicas dos aços enformados a frio de altas e baixas classes de resistência e de diferentes espessuras, a elevadas temperaturas (Outinen et al., 2000, Lee et al., 2003, Ranawaka e Mahendran, 2009, Kankanamge e Mahendran, 2011). A maioria destes autores observaram que os fatores de redução da tensão de cedência e do módulo de elasticidade apresentados nas normas de dimensionamento para aços laminados a quente, não são os mais indicados para a indústria de construção de edifícios com elementos de aço enformado a frio. Observaram ainda, que os fatores de redução da tensão de cedência são mais dependentes da classe do aço que os fatores de redução do módulo de elasticidade (Ranawaka e Mahendran, 2009, Kankanamge e Mahendran, 2011). Contudo, os fatores de redução obtidos experimentalmente e as equações propostas continuam a diferir, principalmente devido aos modelos de ensaio, velocidade de ensaio, taxa de aquecimento e classe do material estudado.

É de referir que o conhecimento do comportamento de estruturas de aço enformado a frio em condições de incêndio é de relevante importância para permitir um bom e eficiente dimensionamento destes elementos e, portanto, torna-se fulcral que existam documentos técnicos de dimensionamento ao fogo específicos para elementos de aço enformado a frio. Parte fundamental para o desenvolvimento de novas metodologias de dimensionamento prende-se com a rigorosa determinação da degradação das propriedades mecânicas em situação de

incêndio. Também o conhecimento da evolução das propriedades térmicas do aço enformado a frio S280GD+Z é de fulcral importância para prever deformações de origem térmica (alongamento térmico) e fenômenos de transferência de calor (condutividade térmica e calor específico).

1.2 Motivação

A garantia de segurança das estruturas metálicas sujeitas à ação do fogo é de extrema importância, uma vez que com o desenvolver da sociedade existe um aumento de ocorrências em incêndios urbanos. Como bombeiro voluntário, realizar um estudo que envolve o comportamento de estruturas sujeitas à ação acidental do fogo com o objetivo de proteger vidas humanas e prevenir catástrofes maiores, é um motivo acrescentado para este estudo.

Como referido anteriormente, as estruturas constituídas por elementos de aço enformado a frio têm sido cada vez mais utilizadas, principalmente na Europa, e é fundamental conhecer o comportamento destes elementos sujeitos à ação do fogo. Atualmente, a verificação da segurança destes elementos a elevadas temperaturas é feito através da NP EN 1993-1-2:2010 (2010). Esta norma considera que a degradação das propriedades mecânicas dos elementos enformados a frio, comportam-se do mesmo modo que os elementos de aço laminado a quente de classe 4. No entanto, os elementos de aço enformados a frio apresentam maior fator de massividade que os aços laminados a quente, que resulta num aumento mais rápido da temperatura nos elementos de aço enformado a frio. Consequentemente, a redução das propriedades mecânicas e da resistência do aço enformado a frio é mais rápida relativamente aos aços laminados a quente. O estudo das propriedades mecânicas e térmicas do aço enformado a frio, torna-se assim, extremamente relevante para um bom dimensionamento de elementos estruturais neste material. As investigações realizadas sobre as propriedades do aço enformado a frio centram-se nas propriedades mecânicas por força da sua influência no comportamento deste aço a elevadas temperaturas. Várias investigações foram realizadas para diferentes classes de aço enformado a frio, no entanto, o comportamento das propriedades mecânicas do aço enformado a frio S280GD+Z sujeito ao fogo não é conhecido e, torna-se importante conhecer as diferenças de comportamento entre as diferentes classes de aço enformado a frio.

Devido à dificuldade no estudo das propriedades térmicas do aço, muitos dos estudos numéricos realizados de previsão do comportamento do aço enformado a frio sujeito ao fogo consideram que a evolução destas propriedades ocorre de acordo com o estipulado pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010) para aços laminados a quente. O presente estudo inclui a obtenção das propriedades térmicas para o aço enformado a frio S280GD+Z através do equipamento

referenciado TPS 2500S da *Hot Disk* (2013), que acrescenta a esta dissertação, motivação e principalmente inovação.

1.3 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação de mestrado, inserida no âmbito do projeto de investigação “FIRE_COLDFSTEEL - Análise Experimental e Numérica de Elementos de Aço Enformado a Frio Sujeitos a Incêndio” com referência PTDC/ECM/116859/2010, é a análise e avaliação do comportamento das propriedades mecânicas e térmicas do aço enformado a frio S280GD+Z em função da temperatura. O presente trabalho de investigação, tem em vista a proposta de novas equações que definam o comportamento das propriedades mecânicas e térmicas do aço S280GD+Z em função da temperatura. Desta forma, alguns objetivos são detalhadamente apresentados de seguida:

- ❖ Analisar e avaliar o comportamento reológico do aço em estudo em função da temperatura, através de ensaios de tração axial, à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas (100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C e 800°C). Os ensaios a elevadas temperaturas serão realizados em regime estacionário, onde o provete é aquecido até à temperatura desejada e só depois tracionados até à rotura;
- ❖ Analisar e avaliar o comportamento das propriedades térmicas em função da temperatura através do equipamento avançado TPS 2500S da *Hot Disk*, sendo os ensaios a elevadas temperaturas realizados, também, em regime estacionário;
- ❖ Comparar os resultados obtidos nos ensaios experimentais com os modelos apresentados pelo NP EN 1993-1-2:2010 (2010);
- ❖ Comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados e propostas de outros investigadores;
- ❖ Propor novas equações que definam melhor o comportamento das propriedades mecânicas e térmicas do aço enformado a frio S280GD+Z em função da temperatura;
- ❖ Analisar o comportamento de um elemento estrutural de aço enformado a frio sujeito ao fogo através de simulações numéricas, utilizando os modelos propostos neste estudo e o programa de elementos finitos ABAQUS (2013). Comparar o comportamento do mesmo elemento com uso dos modelos apresentados pelo NP EN 1993-1-2:2010 (2010).

1.4 Estrutura do Documento

A dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos.

Capítulo 1 – Introdução, que apresenta um enquadramento geral do tema da dissertação, os objetivos a alcançar e as motivações associadas.

Capítulo 2 – Propriedades Mecânicas e Térmicas do Aço Enformado a Frio, efetua-se uma revisão bibliográfica que resume: os conceitos mais importantes a ter em consideração para o estudo desenvolvido (modo de fabrico, diferenças para o aço laminado a quente, vantagens, desvantagens e tensões residuais); os estudos científicos desenvolvidos por vários investigadores no domínio das propriedades do aço enformado a frio em função da temperatura; os modelos de comportamento destas propriedades apresentados pela NP EN 1993-1-2 (2010).

Capítulo 3 – Estudos Experimentais, são descritos os pormenores dos ensaios experimentais desenvolvidos no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra que engloba: sistema de ensaio; programa de ensaio; provetes de ensaio; metodologias efetuadas.

Capítulo 4 – Apresentação e Discussão dos Resultados, expõem-se os resultados obtidos experimentalmente neste estudo e discute-se os mesmos, quando comparados com outros estudos.

Capítulo 5 – Conclusão e Desenvolvimentos Futuros, apresentam-se as conclusões deste estudo e propõem-se desenvolvimentos futuros.

2 PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DO AÇO ENFORMADO A FRIO

Com a presente dissertação pretende-se compreender o comportamento reológico do aço enformado a frio S2280GD+Z a elevadas temperaturas, através da obtenção dos fatores de redução das propriedades mecânicas, nomeadamente a tensão de cedência, módulo de elasticidade, limite de proporcionalidade e tensão última. Também o comportamento térmico do aço enformado a frio S280GD+Z foi estudado através da avaliação das suas propriedades térmicas, nomeadamente a condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico e expansão térmica. Desta forma, procedeu-se a uma pesquisa focada nos aspetos mais importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Características Gerais

Na construção metálica são utilizados três tipos de elementos estruturais de aço: perfis laminados a quente; perfis de chapa soldados, denominados de Perfis Pesados; perfis de chapa fina, enformados a frio, mais conhecidos por Perfis Leves. Este último tipo de elementos estruturais metálicos, com uma crescente utilização na indústria de construção, é obtido a partir de chapas de pequena espessura (0.4 mm a 6 mm) através da dobragem desta por meios mecânicos à temperatura ambiente. Atualmente os processos mecânicos com maior viabilidade são a quinagem e a laminagem a frio, que permitem obter peças com a forma desejada, definida por dobras principais que definem almas e banzos, e dobras intermédias ou de extremidade que definem reforços que aumentam a rigidez das suas paredes (Silvestre e Camotim, 2010).

O processo de laminagem a frio, ou perfilagem, é de entre os dois processos anteriormente referidos, o mais utilizado para fabricação a grandes escalas, pois trata-se de um método normalizado, sistematizado e eficiente. A máquina utilizada, nomeada de perfilhadora, Figura 2.1 a), é composta por uma série de rolos compressores, os quais vão dobrando a chapa progressivamente à medida que a mesma é puxada de enormes rolos com largura de 900 mm e 900 m de comprimento, deformando a chapa plasticamente até que seja atingida a forma geométrica pretendida, (Figura 2.1 b) (Silvestre e Camotim, 2006).

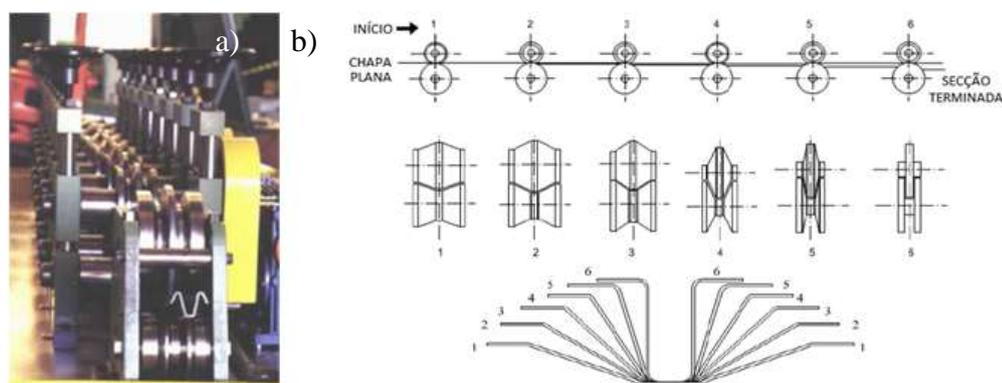


Figura 2.1: a) Perfiladora (Rezende, 2005); b) Fases do processo de laminagem a frio de uma secção Ômega (Rhodes, 1992)

A quinagem é um processo menos industrializado, geralmente utilizado para execução de peças de comprimento reduzido e geometria simples, associado a pequenas quantidades de produção. Neste processo a quinadora, máquina que realiza a quinagem, procede à dobragem da chapa com comprimentos limitados à mesma. Os processos de quinagem são: no ar; em V; em U; a fundo; de bordo saliente com cunho de arraste; em rotação (Pires, 2006).

Com o desenvolvimento dos estudos no aço enformado a frio surgiram novas possibilidades de aplicação deste aço, como por exemplo, a utilização deste em elementos estruturais principais, que promove o aumento da sua procura e utilização em estruturas comerciais, residenciais e industriais.

As vantagens do aço enformado a frio em comparação com o aço laminado a quente podem ser várias, sendo as mais significativas as seguintes:

- ❖ Elevada eficiência estrutural, expressa pela ótima relação entre a elevada resistência e o reduzido peso;
- ❖ Os elementos estruturais de aço enformado a frio podem ser fabricados para suportarem cargas reduzidas e, desta forma, otimizar o material empregue. Pelo contrário, os elementos de aço laminado a quente têm geometrias mínimas pré-definidas, o que obriga muitas vezes ao sobredimensionamento das peças para cargas pequenas;
- ❖ Grande versatilidade de fabrico, traduzida pela possibilidade de produzir economicamente elementos com uma gama variadíssima de geometrias e dimensões, que leva à possibilidade de construção de edifícios com variadas configurações;
- ❖ Possibilidade de pré-fabricação em larga escala;
- ❖ Algumas secções são produzidas com a possibilidade de encaixarem sucessivamente umas nas outras, permitindo uma maior economia no seu armazenamento e transporte;

- ❖ Como o fabrico é processado à temperatura ambiente, os perfis enformados a frio exibem menores tensões residuais que os perfis laminados a quente (Silvestre e Camotim, 2006);
- ❖ Aproveitamento da resistência das secções através da introdução de dobras, pois permite o aumento da tensão de cedência do aço, embora a chapa perda ductilidade (Figura 2.2) (Silvestre e Camotim, 2006).

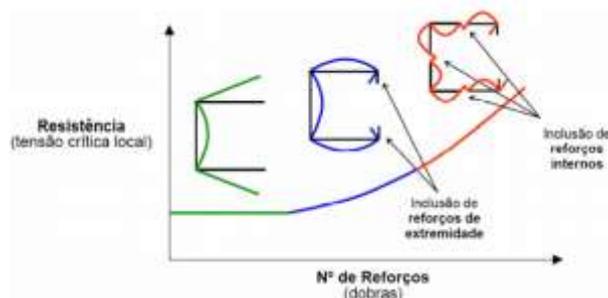


Figura 2.2: Influência das dobras na resistência de secções de aço enformado a frio (Silvestre e Camotim, 2006)

Por outro lado existem desvantagens na utilização do aço enformado a frio, sendo as mais significativas as seguintes:

- ❖ Comportamento estrutural que envolve vários fenómenos de instabilidade, alguns inexistentes ou pouco relevantes nos perfis de aço laminados a quente, como a instabilidade global por flexão, global por flexão-torção, local, distorcional e a interação entre os diferentes modos;
- ❖ Reduzida rigidez de torção, uma vez que esta rigidez está diretamente relacionada com a espessura ao cubo e a grande maioria das secções são abertas, e nomeadamente o centro de corte não coincide com o centro de gravidade, visto que geralmente os perfis são monossimétricos;
- ❖ Reduzido aproveitamento da capacidade resistente do aço, traduzida pela classificação das secções dos perfis enformados a frio (normalmente classe 4).
- ❖ Devido à menor capacidade de suporte de cargas, em comparação ao aço laminado a quente, é necessário a utilização de um maior número de perfis na construção.

Conforme foi referido nas desvantagens deste material, o comportamento estrutural dos elementos em aço enformado a frio é bastante complexo. As espessuras reduzidas e o processo de formação a frio característicos deste tipo de aço resultam em diversos fenómenos que afetam o dimensionamento de estruturas:

- ❖ Suscetibilidade a fenómenos de instabilidade local, distorcional e global e suas interações, devido à elevada esbelteza e à baixa rigidez de torção das secções transversais;
- ❖ Grande deformabilidade à torção, devido à reduzida espessura dos perfis e à maioria das secções serem abertas e monossimétricas, e consequentemente com centro de corte e de gravidade não coincidentes;
- ❖ Imperfeições geométricas da mesma ordem de grandeza ou superiores à espessura da chapa;
- ❖ Empenamento verificado em muitas secções abertas submetidas a torção. Segundo (Silveste e Camotim, 2010), as condições de fronteira dos perfis têm uma grande influência na sua resistência mecânica em relação a este modo de deformação;
- ❖ Possibilidade de melhorar o comportamento estrutural das secções limitando a sua suscetibilidade à deformação local com recurso a reforços de extremidade ou intermédios através da introdução de dobras na secção. Os reforços asseguram pontos de apoio elástico das paredes da secção, diminuindo o comprimento livre para elas fletirem, e simultaneamente aumentam o valor da tensão crítica de instabilidade local (Veríssimo, 2008);
- ❖ Endurecimento do aço verificado na zona das dobras. As dobras alteram significativamente as propriedades mecânicas do aço, nomeadamente provocam o aumento das tensões de cedência e última, causando simultaneamente uma diminuição da ductilidade. Na Figura 2.4 encontram-se representadas as curvas tensão-extensão do aço antes e após o processo de enformagem a frio, onde são visíveis os efeitos do endurecimento do aço nas suas propriedades mecânicas;
- ❖ Esmagamento da alma sob ação de cargas concentradas e nas zonas dos apoios, fenómeno que se deve à elevada esbelteza da alma dos elementos enformados a frio. Este comportamento pode ser evitado pela aplicação de reforços nessas zonas (Veríssimo, 2008).

2.2 Tensões Residuais

Por definição, as tensões residuais são as tensões elásticas existentes num corpo sem a existência de carregamentos externos ou gradientes de temperatura. As tensões residuais são produzidas no material e nos componentes mecânicos durante a sua fabricação em vários processos, e todos os processos de manufatura irão introduzir tensões residuais no componente fabricado, uma vez que as origens das tensões residuais são relacionadas a processos químicos, térmicos ou mecânicos.

No aço, as tensões residuais subdividem-se essencialmente em tensões de membrana e tensões de flexão. As tensões de membrana caracterizam-se por a magnitude das tensões serem constantes ao longo da espessura da secção transversal dos elementos, enquanto as tensões de flexão pelo facto de a distribuição dessas tensões ser não uniforme. Os perfis de aço enformado a frio são especialmente afetados por tensões residuais de flexão, sendo as tensões de membrana bastante inferiores, como demonstram os resultados obtidos por (Schafer e Peköz, 1998), e os elementos de aço enformado a frio, fabricados por laminagem, apresentam valores superiores de tensões residuais, quando comparados com elementos fabricados por quinagem.

Estudos mais recentes, desenvolvidos por (Quach et al., 2004, Moen et al., 2008), admitem que a distribuição das tensões residuais de flexão é não linear ao longo da espessura das secções transversais e que o seu valor varia em função do raio de enrolamento da chapa de aço na bobine, da espessura da chapa e da tensão de cedência do aço da chapa indeformada. O valor algébrico destas tensões residuais aumenta com a diminuição do raio de enrolamento da chapa, com a diminuição da tensão de cedência do aço dessa chapa e com o aumento da espessura da mesma, como é possível visualizar na Figura 2.3.

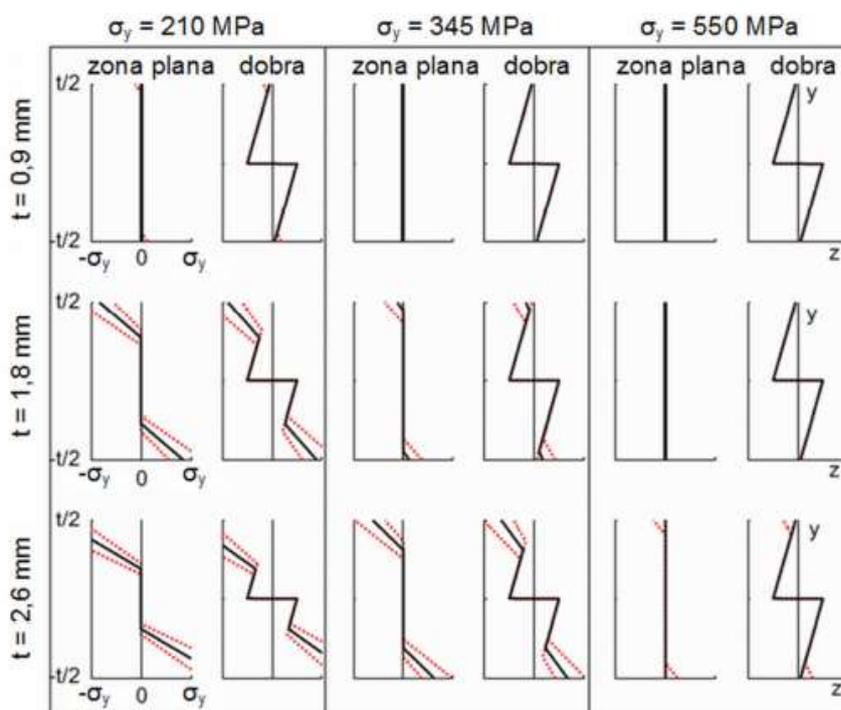


Figura 2.3: Influência da espessura da chapa e da tensão de cedência do aço nas tensões residuais dos perfis de aço enformado a frio. (Moen et al, 2008)

2.3 Propriedades mecânicas do aço enformado a frio

Os perfis de aço enformado a frio são fabricados à temperatura ambiente por quinagem ou perfilagem provocando um aumento da tensão de cedência e da tensão de rotura (Figura 2.4) e, portanto, com o aumento da temperatura, é de esperar que as propriedades mecânicas do aço enformado a frio variem de forma diferente das propriedades mecânicas do aço laminado a quente.

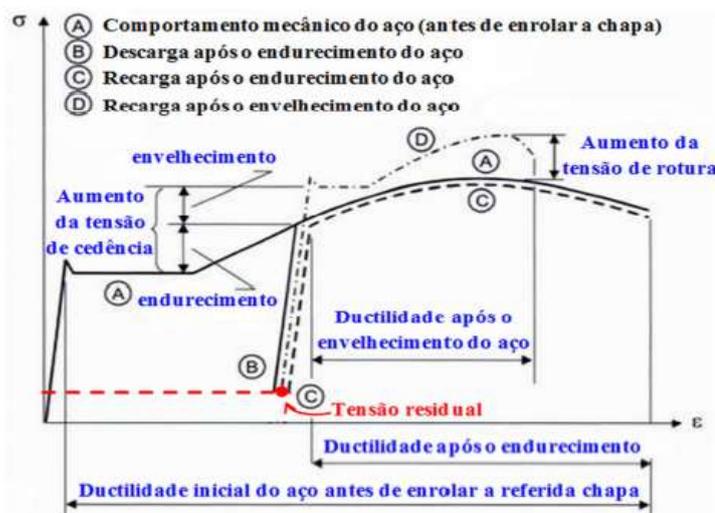


Figura 2.4: Influência do processo de enformagem a frio nas propriedades mecânicas dos perfis de aço enformado a frio (Rondal e Dubina, 2005; Moen et al., 2008)

(Moen et al., 2008) comprovou a ocorrência de um fenómeno relevante que ocorre no fabrico de perfis de aço enformado a frio, designado de encruamento do aço, particularmente nas das dobras da chapa. Nestas zonas a tensão de cedência e a tensão resistente última do aço são aumentadas, enquanto a ductilidade do aço é reduzida relativamente ao do aço das chapas antes de enroladas. A Figura 2.4 apresenta a relação tensão-extensão do aço enformado a frio, onde é visível o encruamento ou endurecimento do aço devido ao processo de fabrico.

2.3.1 Propriedades mecânicas do aço enformado a frio a elevadas temperaturas de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010

O conhecimento do comportamento das características do aço enformado a frio em situação de incêndio, nomeadamente a evolução das suas propriedades mecânicas quando submetidas a temperaturas elevadas, é importante para a obtenção de resultados fiáveis no dimensionamento ao fogo de elementos neste material. A NP EN 1993-1-2:2010 (2010) propõe modelos de cálculo simplificados para dimensionamento de elementos estruturais de aço laminado a quente sujeitos ao fogo. O comportamento reológico do aço laminado a quente, considerado na

presente norma, é apresentado na Figura 2.5 a), onde observa-se a relação tensão-extensão do material, sendo que, $f_{y,\theta}$ representa a tensão de cedência efetiva à temperatura θ , $f_{p,\theta}$ representa o limite de proporcionalidade à temperatura θ , $E_{a,\theta}$ a inclinação da reta que representa o domínio elástico, $\varepsilon_{p,\theta}$ a extensão limite de proporcionalidade, $\varepsilon_{y,\theta} = 0.02$ a extensão de cedência, $\varepsilon_{t,\theta} = 0.15$ a extensão limite para o patamar de cedência e $\varepsilon_{u,\theta} = 0.2$ a extensão última. É de referir que no Capítulo 3 da EN 1993-1-2:2010 (2010) para determinar a resistência à tração, compressão, flexão e corte de aços de carbono laminados a quente, a tensão de cedência corresponde a uma extensão total de 2%. A Figura 2.5 b) representa a redução das propriedades mecânicas, $f_{y,\theta}$, $E_{a,\theta}$ e $f_{p,\theta}$, em função da temperatura para aços carbono laminados a quente.

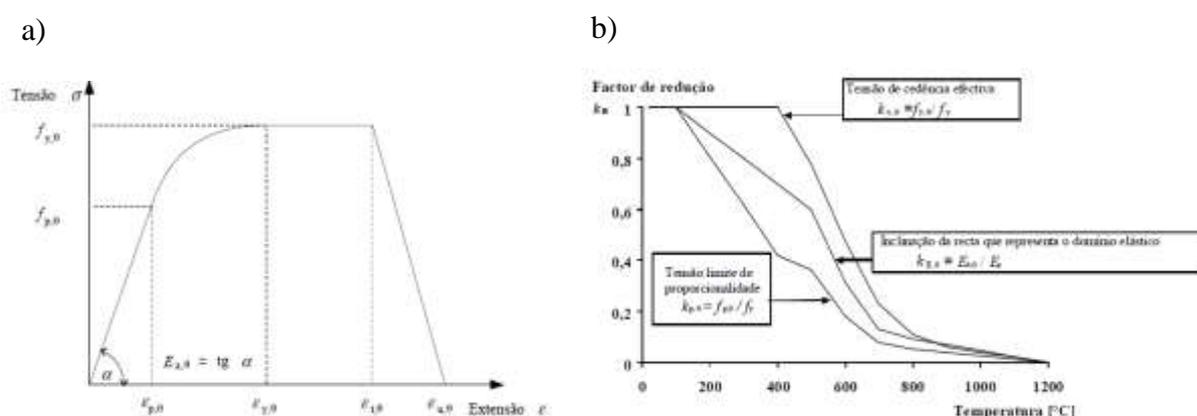


Figura 2.5: a) Relação tensão-extensão segundo a EN 1993-1-2:2010 (2010); b) Fatores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono a temperaturas elevadas.

O dimensionamento de elementos fabricados em aço enformado a frio segundo a EN 1993-1-2 (2010) é efetuado tendo em consideração que o comportamento destes a elevadas temperaturas é semelhante a aços laminados a quente de classe 4 e os seus modelos de cálculo estão representados no Anexo E da presente norma. Estes modelos de cálculo simplificados, indicam que em situação de incêndio, o valor de cálculo da tensão de cedência do aço deverá ser considerado igual à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%. No mesmo Anexo E são fornecidos os fatores de redução da tensão de cedência dos aços laminados a quente de classe 4 em relação à tensão de cedência a 20°C, valores que diferem dos propostos na norma para secções de aço das Classes 1, 2 e 3. Na Figura 2.6 apresenta-se o gráfico dos fatores de redução para a relação tensão-extensão de secções de aço laminados a quente da Classe 4 e secções de aço enformado a frio. Note-se que os fatores de redução da tensão de cedência propostos na EN 1993-1-2:2010 (2010) não têm em consideração se o aço é laminado a quente de Classe 4 ou enformado a frio, sendo comuns para ambos os materiais. Note-se ainda, que os fatores de redução do módulo de elasticidade são independentes da classe do aço, sendo iguais para aços laminados a quente de Classe 1,2,3 e 4 ou aços enformados a frio. Diversos estudos

experimentais sobre o efeito das temperaturas elevadas nas propriedades mecânicas do aço enformado a frio (Outinen et al., 2000, Chen e Young, 2007, Kankanamge e Mahendran, 2011) sustentam a necessidade de definir novos fatores de redução para a tensão de cedência e o módulo de elasticidade determinados especificamente para o aço enformado a frio.

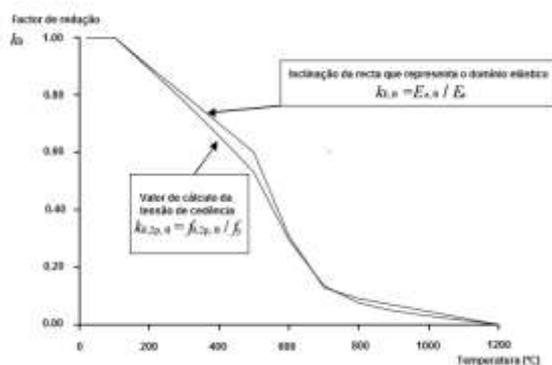


Figura 2.6: Fatores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono de classe 4 a temperaturas elevadas.

Para temperaturas inferiores a 400°C, a EN 1993-1-2:2010 (2010) indica uma alternativa ao comportamento reológico do aço laminado a quente ao considerar o endurecimento do mesmo desde que, a encurvadura local ou dos elementos não conduza ao colapso prematuro. Esta alteração ocorre no final do patamar de cedência, $f_{y,\theta}$, em que se verifica um aumento linear de resistência nas curvas tensão-extensão até ser atingida a tensão última, $f_{u,\theta}$. No Anexo A da presente norma estão apresentadas as equações que definem o modelo tensão-extensão com endurecimento do aço carbono e de cálculo da tensão de rotura. Na Figura 2.7 a), podemos observar a relação tensão-extensão do aço carbono laminado a quente endurecido, onde é visível patamar de endurecimento e na Figura 2.7 b) a relação tensão-extensão deste aço endurecido em função da temperatura.

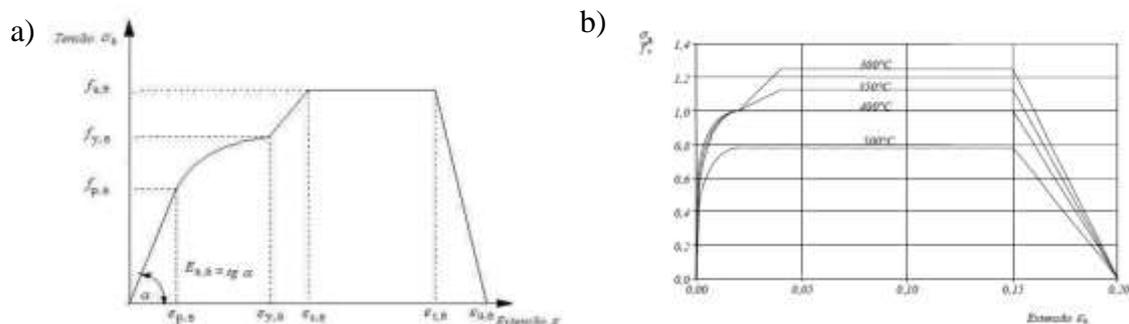


Figura 2.7: a) Relação tensão-extensão alternativa para aço, tendo em conta o endurecimento; b) Relações tensões-extensões alternativas para o aço a temperaturas elevadas, tendo em conta o endurecimento.

2.3.2 Estudos precedentes da influência da temperatura nas propriedades mecânicas do aço enformado a frio.

Diversos estudos experimentais sobre o efeito das temperaturas elevadas nas propriedades mecânicas do aço enformado a frio (Outinen et al., 2000, Outinen, 2006, Chen e Young, 2007, Ranawaka e Mahendran, 2009, Kankanamge e Mahendran, 2011, Mecozzi e Zhao, 2005, Lee et al., 2003) sustentam a necessidade de definir novos fatores de redução para a tensão de cedência e o módulo de elasticidade de determinados aços enformado a frio, especialmente para classes de resistência diferentes.

O estudo do comportamento deste material é maioritariamente desenvolvido através de ensaios de tração axial, existindo dois tipos de métodos de ensaios a altas temperaturas: sistema em estado transiente e sistema em estado estacionário (Chen e Young, 2007, Kankanamge e Mahendran, 2011). O sistema em regime transiente baseia-se em colocar o provete em tração com carga constante e aquecido a uma velocidade constante até à rotura, enquanto, o sistema em regime estacionário consiste em aquecer primeiramente o provete de ensaio até uma certa temperatura específica e só depois traciona-lo até à rotura. Estes métodos permitem obter várias características do aço, como por exemplo: tensão efetiva, f_y , a tensão de rotura, f_u , o módulo de elasticidade longitudinal, E , a extensão na tensão de rotura, ϵ_u , e a extensão após rotura ϵ_f . Vários autores (Outinen, 2006, Chen e Young, 2007, Kankanamge e Mahendran, 2011) têm sustentado que o método de ensaio em estado transiente transmite um comportamento mais realista que o método em estado estacionário, pois numa situação real de incêndio um elemento previamente em esforço sofre um aquecimento gradual ou espontâneo, e assim sendo, o método de ensaio em estado transiente revela-se mais adequado na previsão do comportamento do material ao fogo. Por outro lado, (Kankanamge e Mahendran, 2011) afirmam que os ensaios em estado estacionário são os mais comumente utilizados devido à metodologia associada e à obtenção direta das curvas tensão-extensão.

(Outinen et al, 2000), realizou ensaios experimentais de tração em provetes de aço enformado a frio e, em regime estacionário e transiente, para avaliar as propriedades mecânicas a elevadas temperaturas. Estes ensaios permitem observar que o comportamento do aço estrutural S350GD+Z a elevadas temperaturas é diferente do estabelecido pela NP EN 1993-1-2: 2010 (2010), (Figura 2.8 a)), isto é, os fatores de redução obtidos para a tensão de cedência são diferentes dos indicados tanto no Quadro 3.1 da NP EN 1993 -1-2: 2010 (2010) para aços laminados a quente, como também, segundo o Quadro E.1 do ANEXO E da NP EN 1993 -1-2:2010 (2010) para aços com uma secção da classe 4. No entanto, os fatores de redução obtidos para o módulo de elasticidade são bastante próximos dos indicados no Quadro 3.1 da NP EN 1993-1-2 (2010) para o aço laminado a quente (Figura 2.8 b)). Outinen e Mäkeläinen (2002) e

Outinen (2006) concluíram que as propriedades mecânicas residuais do aço estrutural S420M e S350GD+Z, respetivamente, são semelhantes às nominais do material, isto é, os perfis de aço enformado a frio depois de serem submetidos a altas temperaturas e à compressão (a um incêndio) apresentam propriedades mecânicas aproximadamente iguais às nominais que tinham antes do incêndio (Figura 2.9).

Outinen e Mäkeläinen (2002) observaram ainda que a relação tensão-extensão do aço S420M a elevadas temperaturas aplicando o modelo proposto pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010) e as curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente apresentam resultados diferentes, sendo que esta norma admite valores não conservativos, ou seja, o dimensionamento para o aço S420M não está do lado da segurança. Os modelos de cálculo de Ramberg-Osgood (1943) que relacionam a tensão com a extensão a elevadas temperaturas foram utilizados para modelar as curvas tensão-extensão com as propriedades obtidas, onde estes investigadores concluíram que os modelos de Ramberg-Osgood (1943) são os que mais se aproximam dos resultados obtidos experimentalmente.

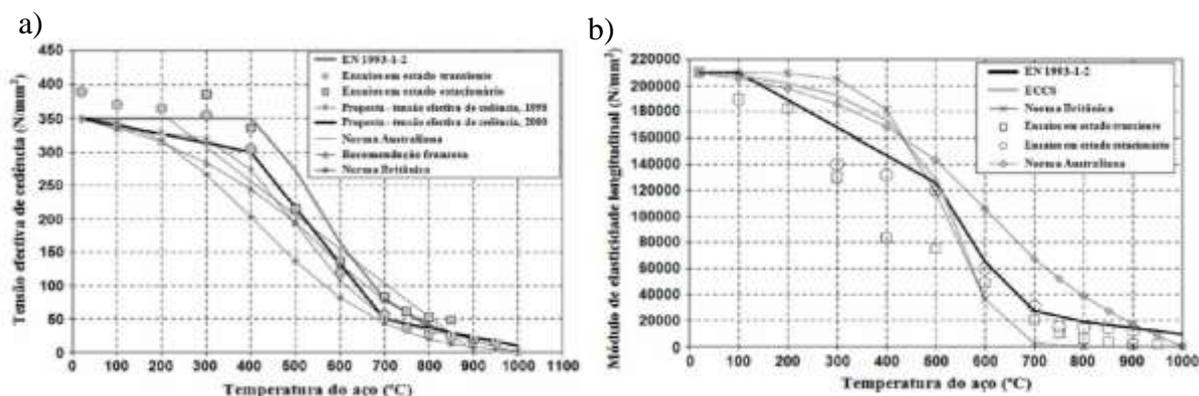


Figura 2.8: a) Fatores de redução da tensão de cedência do aço S350GD+Z em função da temperatura; b) Fatores redução do módulo de elasticidade do aço S350GD+Z em função da temperatura (Outinen et al., 2000).

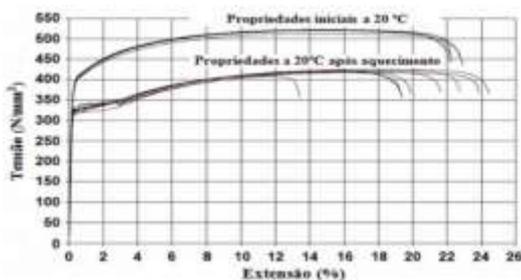


Figura 2.9: Ensaio de tração do aço estrutural S350GD+Z antes e após ação térmica (Outinen e Mäkeläinen, 2002)

Chen e Young (Chen e Young, 2007) também estudaram a evolução das propriedades mecânicas do aço enformado a frio G450 a elevadas temperaturas e concluíram que a NP EN 1993-1-2:2010 (2010) também estabelece valores não conservativos para os fatores de redução da tensão efetiva de cedência do aço. Estes investigadores compararam os modelos de curva tensão-extensão obtidos experimentalmente com os propostos pela NP EN 1993-1-2 (2010) para aços laminados a quente a elevadas temperaturas (Figura 2.10 a)). Através das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios, estes investigadores utilizaram as equações que relacionam a tensão com a extensão apresentadas na norma, e observaram que as curvas tensão-extensão obtidas por estes modelos não coincidem com as curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente e propõem novos modelos, baseados na equação de Ramberg-Osgood (1943) utilizada por vários autores para definir a relação tensão-extensão de aços inoxidáveis a elevadas temperaturas. (Figura 2.10 b))

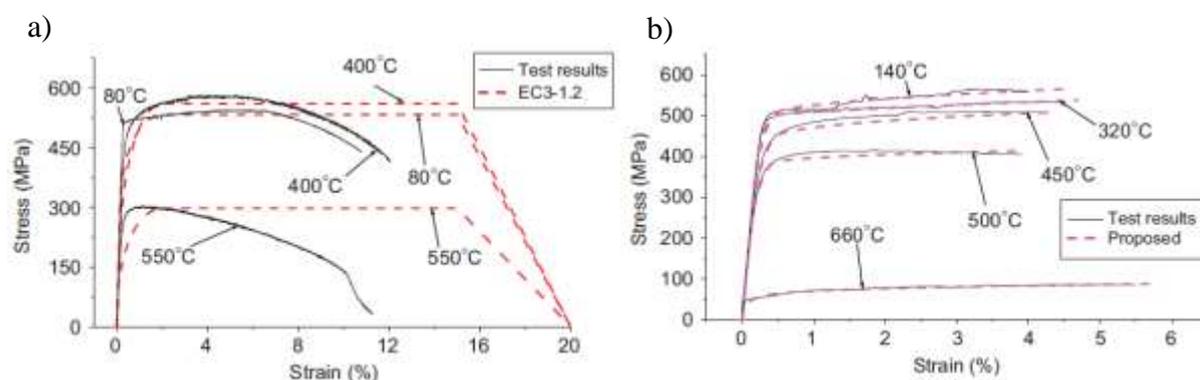


Figura 2.10: a) Comparação relação tensão-extensão proposta pela NP EN 1993-1-2:2010 e os resultados obtidos para o aço G450; b) Comparação relação tensão-extensão proposta e os resultados obtidos para o aço G450. (Chen e Young, 2007).

Ranawaka e Mahendran (2009) e Kankanamge e Mahendran (2011), estudaram a influência da classe estrutural e da espessura das chapas na evolução das propriedades mecânicas do aço enformado a frio a temperaturas elevadas. Os autores realizaram ainda uma comparação dos valores obtidos nos seus ensaios com os valores previstos nas normas de dimensionamento da NP EN 1993-1-2 (2010) e BS 5950-5 (1998) e em investigações experimentais efetuadas até à data, tendo concluído que nem as normas nem as propostas dos investigadores anteriores são capazes de prever com exatidão o comportamento a altas temperaturas dos aços enformados a frio, tendo sido propostas um conjunto de novas equações para a determinação dos fatores de redução da tensão de cedência (diferentes para aços de alta e de baixa resistência), e para o módulo de elasticidade em função da temperatura. Ranawaka e Mahendran (Ranawaka e Mahendran, 2009) realizaram diversos ensaios de tração em estado estacionário com temperaturas variando entre os 20 e os 800°C, em provetes de aço das classes G550 e G250 com espessuras 0.60, 0.80 e 0.95 mm (Figura 2.11). As equações propostas por este autor têm

em consideração uma tensão de cedência correspondente a uma extensão residual de 0,2%. Kankanamge e Mahendran (Kankanamge e Mahendran, 2011), realizaram, também, ensaios de tração em estado estacionário com temperaturas entre os 20 e os 700°C, em provetes de aço G250 com 1.55 e 1.95 mm de espessura e G450 com 1.50 e 1.90 mm.

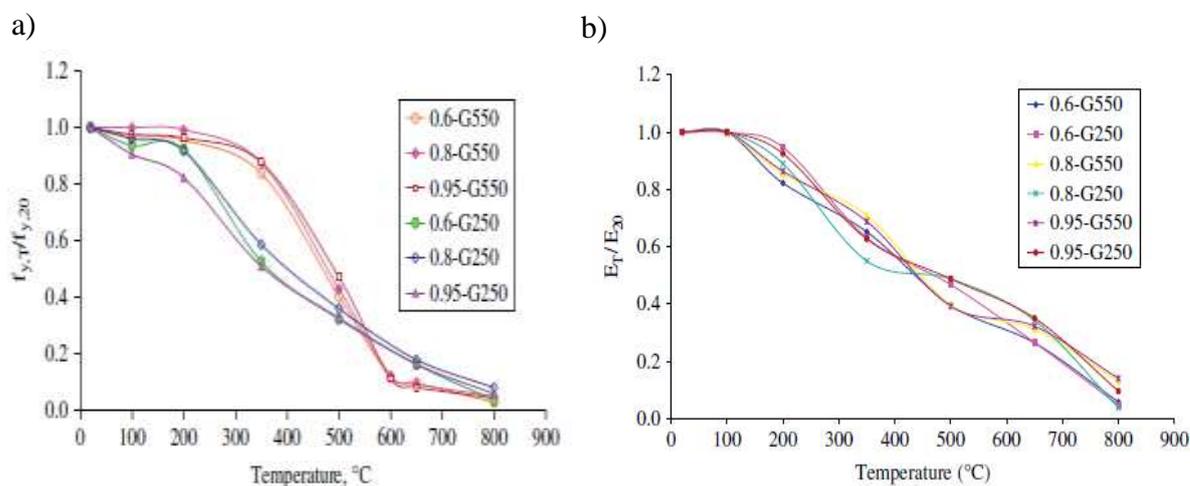


Figura 2.11: a) Fatores de redução da tensão de cedência do aço G550 e G250 em função da temperatura; b) Fatores redução do módulo de elasticidade do aço G550 e G250 em função da temperatura (Ranawaka e Mahendran, 2009).

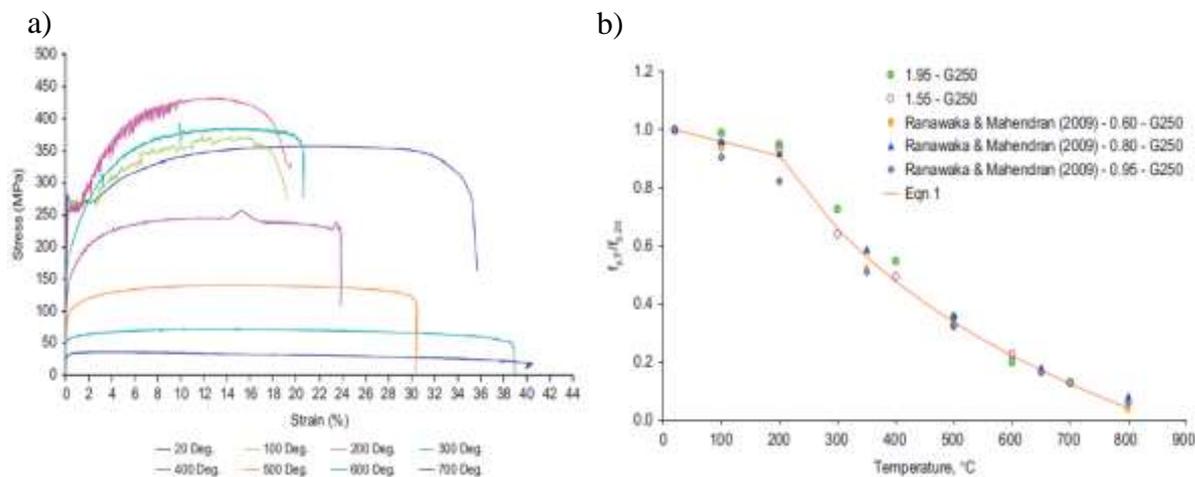


Figura 2.12: a) Relação tensão-extensão a várias temperaturas; b) Fatores de redução da tensão de cedência do aço G250 em função da temperatura. (Kankanamge e Mahendran, 2011)

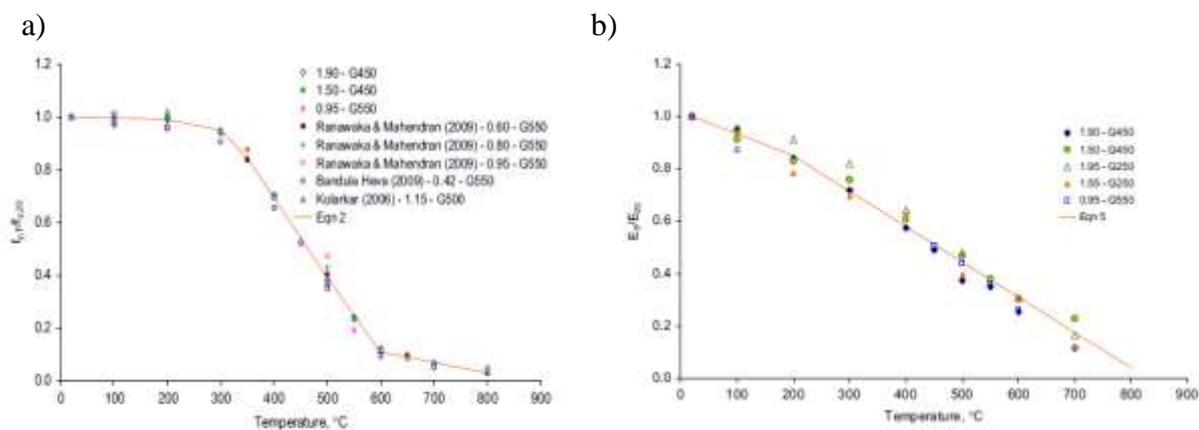


Figura 2.13: a) Fatores de redução da tensão de cedência do aço G450 e G550 em função da temperatura b) Fatores redução do módulo de elasticidade do aço G250, G450 e G550 em função da temperatura. (Kankanamge e Mahendran, 2011)

Os resultados obtidos dos ensaios de Ranawaka e Mahendran (2009) e Kankanamge e Mahendran (2011) (Figura 2.11, 2.12 e 2.13), permitem concluir que os fatores de redução da tensão de cedência em função da temperatura variam com base na classe estrutural do aço, mas que a espessura da chapa não influencia significativamente esses valores (Figura 2.11 a), Figura 2.13 a) e b)). Estes autores puderam verificar que os aços de baixa resistência perdem a sua resistência mais rapidamente que os de alta resistência, para baixas temperaturas, no entanto, aproximadamente a partir dos 400°C, a situação inverte-se e são os aços de alta resistência que registam um decréscimo mais acentuado da tensão de cedência. Como consequência, ambos os aços de alta e de baixa resistência apresentam valores similares da tensão de cedência a temperaturas mais elevadas. Os autores justificam esta diferença nas taxas de degradação da resistência dos dois tipos de aço pelo processo de enformagem a frio, indicando que quando submetidos a altas temperaturas, os aços enformados a frio tendem a perder a resistência que ganharam durante o processo de enformagem e que, portanto, os aços de alta resistência tendo ganho maior resistência durante esse processo, sofrerão maiores perdas a temperaturas mais elevadas. Por outro lado, não foi constatada qualquer influência relevante da classe do aço nem da espessura da chapa nos valores obtidos para os fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura. (Kankanamge e Mahendran, 2011)

Kankanamge e Mahendran (2011), compararam as curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente (Figura 2.12 a)), não só, com os modelos tensão-extensão propostos por Ranawaka e Mahendran (2009) para aços de alta e baixa resistência, mas também, com os modelos tensão-extensão propostos por Chen e Young (2007) para aços de alta resistência. Estes, observaram que os modelos propostos por (Ranawaka e Mahendran, 2009) apresentam

boa concordância com os resultados obtidos tanto para alta como para baixa resistência do aço e que os modelos apresentados por (Chen e Young, 2007) estão de acordo com os obtidos apenas até 0.5% da extensão. De um modo geral, os resultados obtidos experimentalmente apresentam bom entendimento com os modelos apresentados na região elástica da curva tensão-extensão, mas na região plástica estes modelos não preveem com rigor o comportamento do aço estudado. Desta forma, (Kankanamge e Mahendran, 2011) propõem um modelo tensão-extensão baseado nas equações propostas pelo modelo de Ramberg-Osgood (1943), onde apresentam um valor de β diferente, que melhor representam as curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente por estes autores.

2.4 Propriedades Térmicas

O conhecimento da evolução das propriedades mecânicas do aço enformado a frio a elevadas temperaturas é importante para obtenção de bons resultados no dimensionamento de elementos deste material. Também as propriedades térmicas influenciam o comportamento do aço enformado a frio quando sujeito a temperaturas elevadas, de tal forma que, um bom dimensionamento de elementos estruturais neste material deve considerar as propriedades térmicas. As propriedades térmicas consideradas no dimensionamento de elementos de aço são: condutividade térmica; calor específico e expansão térmica. Estas, possibilitam o conhecimento da evolução da temperatura nos elementos de aço quando sujeitos à ação do fogo e consequentemente, prever a degradação das propriedades resistentes destes elementos com o aumento de temperatura. Os estudos numéricos através do programa ABAQUS (2013) têm o objetivo de prever o comportamento dos elementos metálicos de aço enformado a frio quando sujeitos a altas temperaturas e para que este programa devolva resultados os mais próximos possíveis da realidade, deve ser considerado o comportamento das propriedades térmicas desse material através de equações que definem o comportamento destas em função da temperatura.

Os estudos da evolução das propriedades térmicas do aço enformado a frio a elevadas temperaturas não têm sido objeto de estudo pela comunidade científica. Uma vez que o estudo do comportamento das propriedades térmicas do aço enformado a frio sujeito ao fogo não é conhecido, outros autores como, (Craveiro, 2013) e (Outinen et al., 2000), consideram que a evolução das propriedades térmicas a elevadas temperaturas para o aço enformado a frio vai de encontro ao estipulado pela NP EN 1993-1-2 (2010), para aços laminados a quente.

2.4.1 Propriedades térmicas do aço enformado a frio a temperaturas elevadas de acordo com a EN 1993-1.2:2010

A NP EN1993-1-2:2010 apresenta a variação das propriedades térmicas para aços carbono a elevadas temperaturas, nomeadamente, a extensão térmica, o calor específico, e a condutividade térmica. No entanto, não existe nesta norma, uma consideração da evolução das propriedades térmicas a elevadas temperaturas para aços enformados a frio ou aços laminados a quente, sendo comuns para ambos. A extensão térmica do aço ($\Delta l / l$) deverá ser considerada a partir das seguintes equações:

$$20 \leq \theta_a \leq 750^\circ\text{C}:$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 0.4 \times 10^{-8} \times \theta_a^2 + 1.2 \times 10^{-5} \times \theta_a - 2.416 \times 10^{-4} \quad (1a)$$

$$750 \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C}:$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 1.1 \times 10^{-2} \quad (1b)$$

$$860 \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}:$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \times 10^{-5} \times \theta_a - 6.2 \times 10^{-3} \quad (1c)$$

Em que:

l – comprimento a 20°C;

Δl – alongamento induzido pela temperatura;

θ_a – temperatura do aço (°C).

A Figura 2.14, mostra a evolução da extensão térmica do aço com o aumento de temperatura, sendo possível observar que entre os 750°C e os 850°C a extensão térmica do aço não sofre variação.

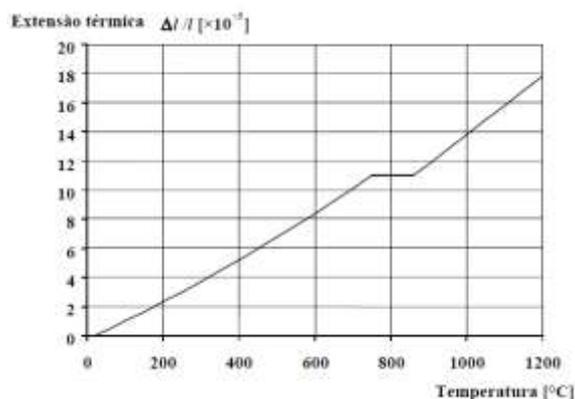


Figura 2.14: Extensão térmica relativa do aço em função da temperatura.

O calor específico do aço deverá ser determinado a partir das seguintes equações:

$20 \leq \theta_a \leq 600^\circ\text{C}$:

$$c_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad \text{J/kg K} \quad (2a)$$

$600 \leq \theta_a \leq 735^\circ\text{C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad \text{J/kg K} \quad (2b)$$

$735 \leq \theta_a \leq 900^\circ\text{C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad \text{J/kg K} \quad (2c)$$

$900 \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$c_a = 650 \quad \text{J/kg K} \quad (2d)$$

Em que:

θ_a – temperatura do aço ($^\circ\text{C}$).

A Figura 2.15 representa a evolução do calor específico do aço a elevadas temperaturas, onde é possível observar que entre os 750° e 800° existe uma descontinuidade da função.

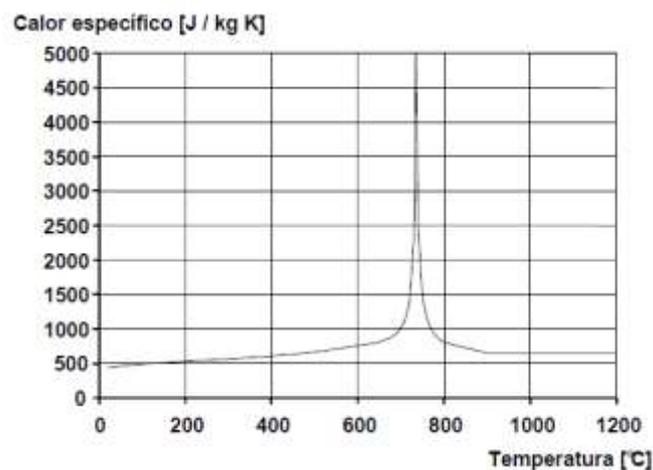


Figura 2.15: Calor específico do aço em função da temperatura.

A condutividade térmica do aço (λ_a) deverá ser determinada a partir das seguintes equações:

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

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK} \quad (3a)$$

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

$$\lambda_a = 27.3 \text{ W/mK} \quad (3b)$$

Em que:

θ_a – temperatura do aço ($^\circ\text{C}$).

A Figura 2.16 mostra a evolução da condutividade térmica do aço a elevadas temperaturas. Observa-se que a partir dos 800° a condutividade térmica passa a ser constante.

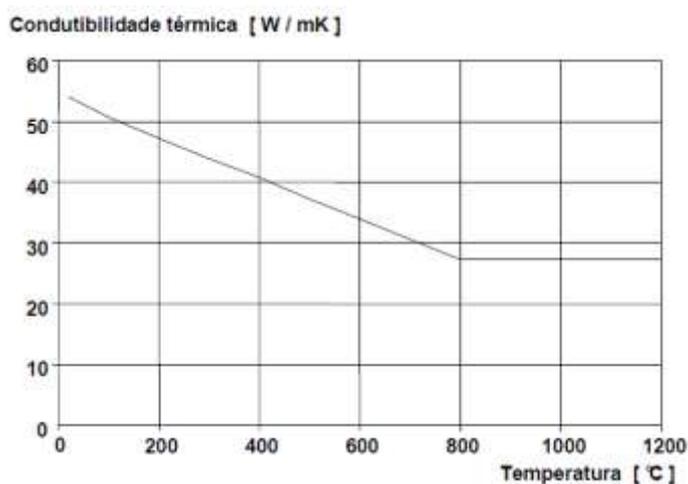


Figura 2.16: Condutividade térmica do aço em função da temperatura.

2.4.2 Equipamento da *HOT DISK* para avaliação das propriedades térmicas

Recentemente foram realizados estudos para obtenção das propriedades térmicas de metais e outros materiais, através de um sistema inovador de medição do transporte de propriedades térmicas. *The Hot Disk Thermal Constants Analyser* (Hot Disk, 2013) é um sistema de fácil e flexível utilização depois de compreender o seu funcionamento. De acordo com o manual da *Hot Disk* (Hot Disk, 2013), será apresentado de seguida o funcionamento teórico deste sistema.

O *Hot Disk Thermal Constants Analyser* baseia-se teoricamente na técnica do TPS (*Transient Plane Source*), reconhecida na ISO-22007-2 (ISO-22007-2:2008, 2008), que descreve um método para determinação das propriedades térmicas por unidade de volume do material em estudo. No método do TPS é utilizado um sensor plano que produz energia transitoriamente. Este sensor consiste num padrão condutor eléctrico (em forma de espiral dupla) gravado num metal fino (Níquel) e revestido com um material isolante (Kapton ou Mica). Este sensor atua, não só, como fonte de calor que produz um aumento de temperatura na amostra, mas também, como resistência que grava o tempo à medida que a temperatura da amostra aumenta. O metal escolhido para o padrão em espiral dupla foi o Níquel devido à sua resistência térmica a elevadas temperaturas. O material utilizado para o revestimento (Kapton para ensaio à temperatura ambiente e Mica para ensaio a elevadas temperaturas), garante a forma do sensor e ainda mantém o mesmo eléctricamente isolado. O sensor em Kapton é recomendado para ensaios à temperatura ambiente pois apresenta uma espessura de aproximadamente 25 μm (muito menor que o sensor em Mica, com 0.25 mm) que proporciona resultados mais exatos. O sensor é colocado entre duas metades da amostra do material a testar se esta for sólida ou embebida na amostra, se se encontrar no estado líquido, gasoso, espuma ou em pó. O processamento dos ensaios é efetuado recorrendo ao software da *Hot Disk* (Hot Disk, 2013) que, após introduzir alguns parâmetros essenciais, como: o tipo de material a testar (metal, cerâmica ou outro); o intervalo de tempo do ensaio; a temperatura do provete; a potência de aquecimento; o tipo de material do sensor (Kapton ou Mica); o tamanho do sensor; o tipo de cabos conectores (de temperatura ambiente ou de altas temperaturas), são utilizados 200 valores da resistência da amostra gravada pelo sistema e traduzidos numa curva Tempo-Temperatura da amostra. A Figura 2.17 apresentada de seguida, exemplifica o funcionamento teórico deste sistema. (Hot Disk, 2013)

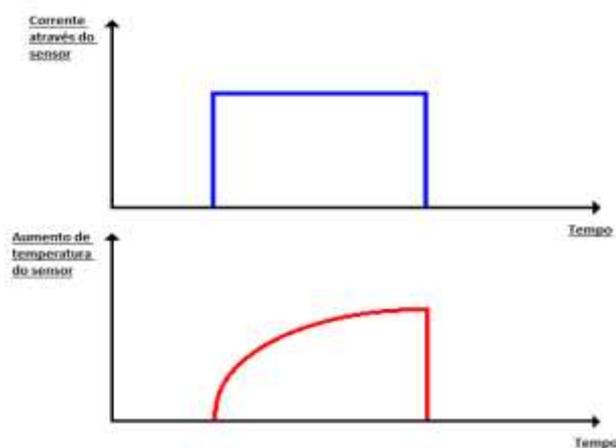


Figura 2.17: Gravação transitória do transporte das propriedades térmicas do material obtidas pelo sensor.

O aumento da resistência em função do tempo pode ser obtido através da equação (4).

$$R(t) = R_0 \left\{ 1 + \alpha \times [\Delta T_i + \Delta T_{ave}(\tau)] \right\} \quad (4)$$

Em que:

$R(t)$, é a resistência do disco;

R_0 , é a resistência do disco para $t = 0$;

α , é o coeficiente de resistência da temperatura (TCR);

ΔT_i , é uma constante dada pela diferença de temperatura que é produzida quase momentaneamente sobre as camadas finas isolantes do sensor;

$\Delta T_{ave}(\tau)$, é o aumento de temperatura da superfície da amostra do outro lado da camada de isolamento do sensor.

Na Figura 2.18 a curva azul indica o aumento de temperatura do sensor isolado e a curva vermelha mostra o aumento de temperatura do provete de ensaio, onde se verifica que a diferença entre as curvas torna-se numa constante nos instantes iniciais (Hot Disk, 2013).

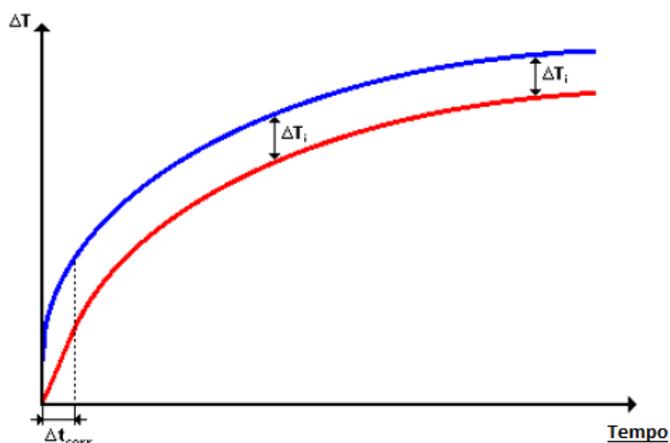


Figura 2.18: curvas relativas ao aumento de temperatura no sensor (curva azul), e na amostra (curva vermelha).

Zhang et al. (Zhang et al., 2014) desenvolveram um estudo numérico para obtenção da precisão da condutividade térmica em amostras muito finas de materiais como o polietileno, utilizando o TPS da Hot Disk. Os estudos numéricos realizados por estes autores envolveram provetes de diferentes espessuras e diferentes condutividades térmicas para perceber os efeitos destes na precisão teórica dos resultados. Estes autores simularam a exatidão da condutividade térmica através da resposta do sensor de temperatura, com e sem provete, e comparar a curva de

aumento de temperatura do sensor obtida pelo software da *Hot Disk* para ambas as situações. As simulações desenvolvidas por estes autores estão representadas pelo esquema da Figura 2.19, onde a zona 1 é a fonte de calor (Nickel), a zona 2 representa o isolamento do sensor (Kapton), a zona 3 representa o isolamento exterior (aço inoxidável) e a zona 4 é a amostra. Outras condições de simulação foram consideradas por estes autores, entre elas, a largura da fonte de calor (Nickel) de 0.8 mm, o raio do isolamento exterior (aço inoxidável) e da amostra (polietileno), de 30 mm.

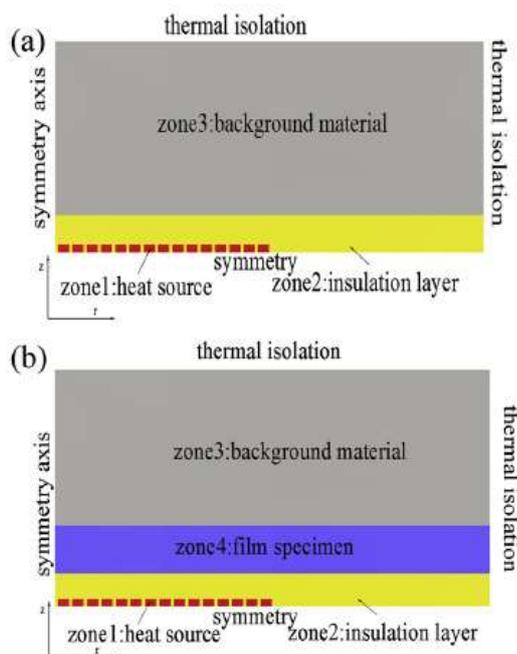


Figura 2.19: Esquema ilustrativo do sistema de ensaio: a) sem amostra; b) com amostra (Zhang et al., 2014).

Através dos ensaios realizados, estes investigadores observaram que os valores da condutividade térmica obtidas pelo TPS 2500S apresentam maior exatidão para materiais com maior resistência térmica, ou seja, baixa condutividade térmica, mas de um modo geral, a precisão dos resultados obtidos por estes equipamentos são aceitáveis uma vez que apresentam um erro inferior a 1%.

2.5 Considerações Finais

O comportamento de elementos estruturais de aço enformado a frio em situação de incêndio depende, fundamentalmente, das propriedades mecânicas e térmicas do material. As revisões bibliográficas apresentadas neste capítulo sobre as propriedades do aço enformado a frio, permitem concluir que vários autores realizaram ensaios para obtenção dos fatores de redução

das propriedades mecânicas de algumas classes de aços enformados a frio mas, para as propriedades térmicas, os estudos são escassos, o que proporciona a necessidade de realizar ensaios experimentais para obtenção e compreensão da evolução destas propriedades. Note-se que os estudos efetuados pelos investigadores para as propriedades mecânicas do aço enformado a frio a elevadas temperaturas revelam a necessidade de distinção dos aços laminados a quente, uma vez que, a degradação das propriedades mecânicas dos aços enformados a frio apresentam comportamentos diferentes em relação aos aços laminados a quente. Por conseguinte, a redução das propriedades mecânicas apresentada pela NP EN 1993-1-2 (NP EN 1993-1-2:2010) para aços laminados a quente de Classe 4, não é adequada para o dimensionamento de elementos estruturais de aço enformado a frio.

É importante referir ainda que estes investigadores observaram que os fatores de redução da tensão de cedência em função da temperatura, para diferentes classes de resistência dos aços enformados a frio comportam-se de modo desigual, onde os aços de baixas resistências apresentam fatores de redução da tensão de cedência inferiores até aos 600°C e, acima deste patamar de temperatura, apresentam valores superiores aos aços de alta resistência. Ao comparar estes resultados com o estipulado na EN 1993-1-2:2010 (2010), observa-se que os aços enformados a frio de alta resistência apresentam fatores de redução da tensão de cedência conservativos em relação aos aços laminados a quente de classe 4 e que os aços enformados a frio de baixa resistência apresentam fatores de redução da tensão de cedência não conservativos em relação aos aços laminados a quente de classe 4. Os fatores de redução do módulo de elasticidade do aço enformado a frio, segundo estes autores, não são influenciados pela classe de resistência e em relação aos aços laminados a quente, os resultados destes autores apresentam fatores de redução no máximo 10% inferiores aos estipulados na EN 1993-1-2:2010 (2010).

Pretende-se com a presente dissertação esclarecer e compreender a evolução das propriedades mecânicas e térmicas do aço enformado a frio S280GD+Z, quando sujeito a altas temperaturas. Para tal, foram realizados ensaios experimentais à temperatura ambiente e a altas temperaturas, utilizando mecanismos adequados para obtenção destas propriedades. Estes ensaios são de extrema importância para calibração dos modelos numéricos a desenvolver e aplicação no desenvolvimento de métodos simplificados de cálculo de elementos estruturais de aço enformado a frio em situação de incêndio.

3 ESTUDOS EXPERIMENTAIS

3.1 Propriedades Mecânicas

No Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, decorreu um conjunto de ensaios à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas com o objetivo de obter as propriedades mecânicas do aço galvanizado enformado a frio S280GD+Z com 2.5 mm de espessura.

O programa experimental desta dissertação para as propriedades mecânicas englobou a realização de ensaios de tração axial em regime estacionário de provetes de aço galvanizado enformado a frio S280GD+Z, para determinação da curva tensão-extensão do material, tensão de cedência, tensão de rotura, o módulo de elasticidade e a tensão de proporcionalidade em função da temperatura. Foram ensaiados no mínimo três provetes para diferentes patamares de temperatura desde a temperatura ambiente até aos 800°C, de acordo com o seguinte regime: 20°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C e 800°C.

3.1.1 Sistema Experimental

O sistema experimental utilizado nas propriedades mecânicas engloba, um sistema para aplicação do carregamento mecânico (máquina universal de ensaios SERVOIS), um sistema para aplicação da ação térmica (forno elétrico tubular do tipo split) e um sistema para monitorização das extensões (extensómetro de elevadas temperaturas Epsilon HI3548 conectado a um sistema de aquisição de dados Datalogger TDS 530) do provete.

O sistema para aplicação do carregamento mecânico é constituído por uma prensa da SERVOSIS modelo ME402/20 com capacidade 200 kN (1), como indica a Figura 3.1 (a). Esta possui um sistema de carga constituído por uma célula de carga, um suporte de esforços, um redutor e um servomotor; duas colunas que suportam duas pontes (ponte superior e ponte inferior); um conjunto de mordças de tração, modelo 4012 ACM, fixas em cada uma das pontes. As mordças de tração firmam as amarras, desenvolvidas com o objetivo de fixar os provetes de ensaio.

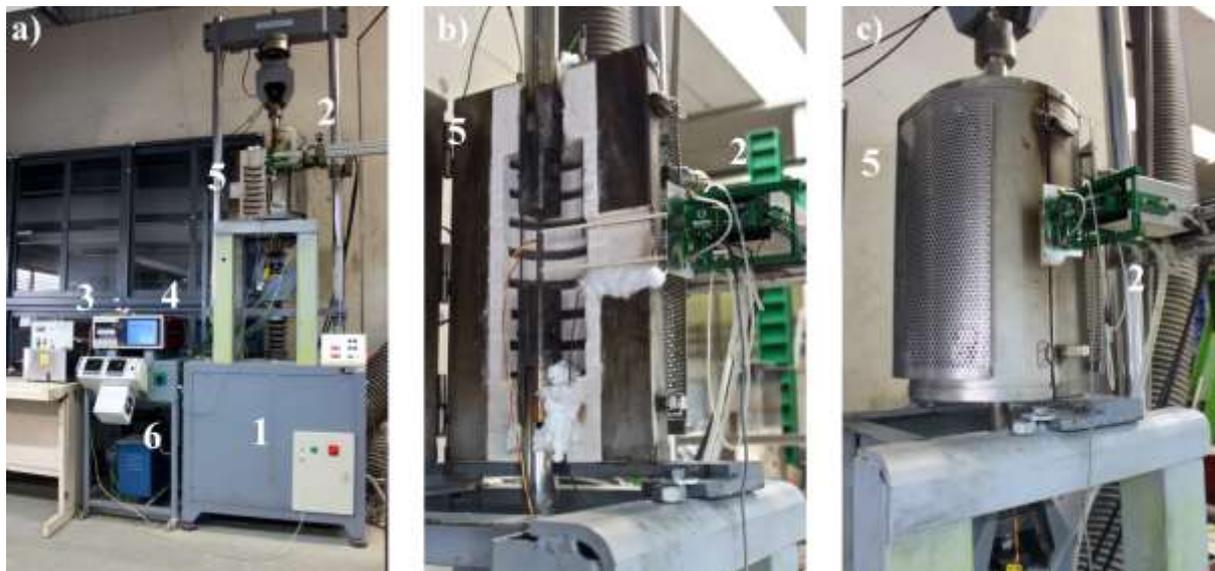


Figura 3.1: Sistema de ensaio de propriedades mecânicas de aço enformado a frio

A medição das extensões será efetuada com recurso a dois extensómetros, o de elevadas temperaturas, modelo 3548 HI da Épsilon (2) e o extensómetro elétrico modelo FLA-6-11 para os ensaios à temperatura ambiente. O extensómetro de elevadas temperaturas, indicado Figura 3.1 (b) e (c), foi equipado com hastes de alumina de alta pureza e um sistema de refrigeração Caron 2050 (3), que possibilita ensaios à temperatura padrão de 1200°C. Os extensómetros Modelo 3548 HI da Épsilon são dispositivos de medição de extensões com grande precisão, com 50.8 mm de comprimento padrão (distancia entre as hastes) e com leituras máximas de 25.4 mm sobre tensão.

O sistema de aplicação da ação térmica consiste num forno tubular elétrico (5), (Figura 3.1 (b) e (c)), e num instrumento de programação da potência com controladores EURO THERM (6) (Figura 3.1.1 (a)). O forno tubular tem uma dimensão aproximada de 0.31 m de diâmetro e 0.50 m de altura. O instrumento de programação da potência é constituído por dois monitores da EURO THERM, um para as resistências superiores e outro para as resistências inferiores no interior do forno, que permitem o controlo da temperatura de ensaio desejada. O forno é suportado por uma estrutura contruída em laboratório e aplicada na prensa SERVOSIS, com medidas exatas para que o forno fique devidamente posicionado com restantes equipamentos, (Figura 3.1 (a)).

Em todos os ensaios foram monitorizadas temperaturas, deslocamentos e força de tração através dos Dataloggers, modelos TDS-530 ou TDS-602 da TML (4), dependendo da disponibilidade destes no Laboratório de Estruturas.

3.1.2 Provetes de ensaio

No estudo experimental foram ensaiados provetes de aço enformado a frio S280GD+Z galvanizado com Zinco (275g/m^2) dos dois lados e com 2.5 mm de espessura, cortados da alma de perfis C na direção longitudinal da perfilagem do perfil, segundo as disposições presentes na NP EN 10002-5:1991 (1991) para ensaios à tração a altas temperaturas e apresentam uma secção transversal de 357 mm x 40 mm x 2.5 mm. Para todos os provetes ensaiados realizaram-se medições para as secções indicadas na Figura 3.2, em duas situações independentes e não menos importantes, antes da preparação do provete para o ensaio e antes da sua colocação no sistema de ensaio. Esta dupla medição, efetuada de preferência num intervalo de um dia, atenua eventuais erros de medição. Também se efetuaram três medições da espessura do provete, em três regiões do seu comprimento de referência pois, observou-se inicialmente não serem todos iguais. Aos valores registados nestas situações foi calculada uma média e respetivo desvio padrão como e possível ver no Quadro A-1 no Anexo A1.1. A composição química do aço enformado a frio S280GD+Z pode ser visível no Quadro 3.1.

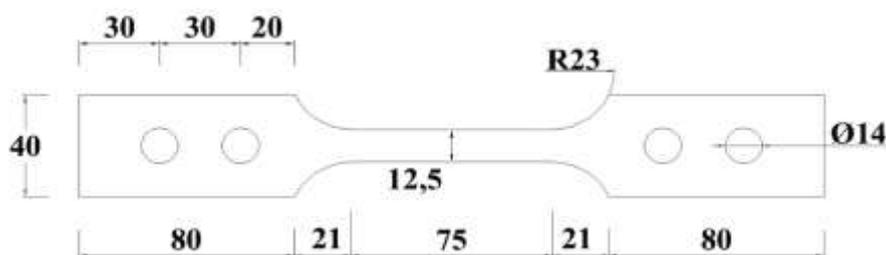


Figura 3.2: Dimensões dos provetes de ensaio

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	P (%)
S280GD+Z	0.06	0.43	0.026	0.007	0.012

Quadro 3.1: Composição química do aço enformado a frio S280GD+Z

3.1.3 Metodologias de Ensaio

Os procedimentos efetuados nos ensaios para as propriedades mecânicas à temperatura ambiente regem a norma EN 10002-1:1990 (1990), onde são referidas algumas condições de teste, como por exemplo: os provetes de ensaio devem ser suportados por meios adequados tais como cunhas, apertos aparafusados e apertos através de uma mandíbula; durante a montagem

de todos os equipamentos, principalmente do provete de ensaio, deve-se garantir que este seja submetido apenas a esforço axial, evitando a flexão; deve-se aplicar uma pequena força de tração (aproximadamente 5% da tensão de cedência esperada), antes de iniciar o ensaio, para garantir que a peça se mantenha direita e alinhada com o mecanismo que a suporta.

Nos ensaios à temperatura ambiente foi aplicada uma pequena força inicial de tração de 0.5 kN para garantir a verticalidade do provete. O ensaio foi programado em controlo de deslocamento com um valor máximo de 30 mm, sendo este valor arbitrado por motivos de segurança uma vez que, o sistema hidráulico da prensa encerra quando ocorre a rotura do provete, normalmente para valores de deslocamentos inferiores, ou quando chega ao deslocamento programado.

Para estes ensaios foi programada uma velocidade de 0.0025 mm/s, que equivale a 0.15 mm/min e consequentemente 0.003 min^{-1} . A norma EN 10002-1:1990 (1990) recomenda uma velocidade superior de 0.015 min^{-1} para ensaios a temperatura ambiente, mas optou-se por utilizar a velocidade recomendada pela norma EN 10002-5:1991 (1991) para os ensaios a elevadas temperaturas, devido, não só, garantir que todos os ensaios seriam efetuados à mesma velocidade, mas também, evitar ao máximo as folgas apresentadas pelo sistema de ensaio.

As condições de teste apresentadas pela norma EN 10002-5:1991 (1991) a elevadas temperaturas sugerem o seguinte: o provete de ensaio deve ser aquecido até à temperatura desejada e mantida nesse patamar durante pelo menos 10 min até se verificar que a extensão atinge a estabilidade; o provete não deve exceder a temperatura requerida durante o seu aquecimento; o extensómetro deve ser zerado antes do início do ensaio; o provete deve ser submetido a uma força que garanta uma extensão crescente, sem vibrações nem choques repentinos; a força aplicada durante o ensaio deve garantir que o comprimento de medida do provete se mantenha submetido apenas a esforço axial para prevenir a flexão e a torção; a velocidade de ensaio para o cálculo da tensão de cedência deve encontrar-se no intervalo de 0.001 e 0.005 min^{-1} ; os provetes de ensaio devem ser suportados por meios adequados tais como cunhas, apertos aparafusados e apertos através de uma mandíbula.

Todos os ensaios a elevadas temperaturas foram realizados em regime estacionário, onde os provetes são aquecidos até à temperatura desejada e depois tracionados quando se verifica que a temperatura e deslocamento do mesmo estabilizam, de acordo com a norma acima referida. Também estes, programados em controlo de deslocamento com 30 mm de valor máximo e velocidade de 0.003 min^{-1} .

3.2 Propriedades térmicas do aço S280GD+Z

3.2.1 Determinação da condutividade térmica e calor específico com recurso ao TPS 2500S

A presente dissertação, tem como um dos objetivos, avaliar as propriedades térmicas do aço enformado a frio da classe S280GD+Z sujeito a elevadas temperaturas, com recurso ao equipamento TPS 2500S, referenciado por vários laboratórios em todo o mundo. Uma vez que este é um equipamento recente e inovador no LEMEDEC da Universidade de Coimbra, o objetivo desta secção é resumir as características e funcionamento do *Transient Plane Source* (TPS) 2500 S da *Hot Disk Thermal Constants Analyser* (Figura 3.3) (Hot Disk, 2013).



Figura 3.3: Equipamento TPS 2500 S

A *Hot Disk* (Hot Disk, 2013), é a empresa que promove equipamentos para análise de precisão das propriedades térmicas de diversos materiais em vários estados físicos. O TPS 2500 S, um dos principais instrumentos promovidos pela *Hot Disk*, é utilizado em muitos laboratórios em todo o mundo devido à sua capacidade de determinar simultaneamente a condutividade térmica, a difusividade térmica e calor específico a partir de uma medição. O rigor deste sistema de medição de propriedades térmicas foi já por diversas vezes comprovado, existindo já normalização específica para a realização de ensaios com recurso a este equipamento, nomeadamente a norma ISO 22007-2 (2008) para plásticos. A simplicidade operativa e de preparação do TPS 2500 S e o desempenho alcançado pelo uso de sensores de disco projetados para impor uma pequena variação da temperatura da amostra, torna este sistema ideal e confiável para testes em materiais em diferentes estados físicos, como por exemplo: sólidos, líquidos, pós, pastas e espumas. Os sensores da *Hot Disk* servem, não só, como fonte de calor, como também, sensor de temperatura dinâmico. Durante o ensaio experimental, um sensor plano é colocado entre duas peças da amostra em estudo, cada uma com uma superfície plana, submetendo a amostra a uma corrente elétrica, suficientemente forte, para aumentar a temperatura da amostra entre uma fração de grau a vários graus (para materiais com boa

condução térmica é aconselhado um aumento de temperatura no máximo de 5 Kelvin), enquanto que, ao mesmo tempo, é gravado o aumento da resistência (temperatura), em função do tempo. A solução da equação da condutividade térmica é obtida tendo em conta que o sensor encontra-se num meio infinito, isolado de qualquer influência do exterior e, portanto, caso se registre qualquer tipo de influência externa deve-se interromper os registos do sensor.

3.2.1.1 Hardware

Os sensores da *Hot Disk* consistem num modelo padrão de condutor eléctrico com formato em espiral gravado numa folha fina de níquel. Os sensores em níquel não são indicados para ensaios a temperaturas até 300°C devido ao material de revestimento do níquel não aguentar temperaturas altas, de tal modo que, para ensaios com temperaturas entre um intervalo de -243°C até 300°C são utilizados sensores em *Kapton* (Figura 3.4: a)) com espessuras entre os 60 e 80 µm, pois estes sensores têm a vantagem de obter resultados mais precisos e poderem ser utilizados um maior número de vezes se manuseados cuidadosamente. Para temperaturas superiores a 300°C são recomendados os sensores em *Mica* (Figura 3.4: b)). Estes por outro lado devem ter uma especial atenção no seu manuseamento para que se possa utilizar estes sensores mais que uma vez, se não podem ser considerados descartáveis. Deve-se deixar o sensor de *Mica* no suporte o máximo de vezes possível, tendo o máximo cuidado durante o processo de substituição de amostras e em ensaios com temperaturas superiores a 500°C deve-se manter o sensor num ambiente inerte para minimizar a oxidação e degradação deste. É possível determinar se o sensor está operacional ou não, medindo a sua resistência eléctrica, sabendo que em boas condições o sensor mede 12 Ω (Hot Disk, 2013).

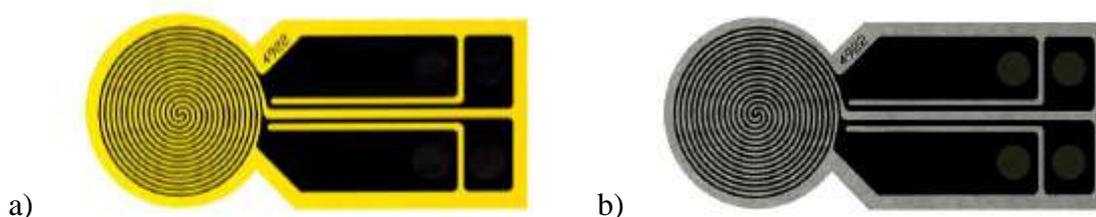


Figura 3.4: a) Sensor com isolamento em *Kapton*; b) Sensor com isolamento em *Mica*

Os sensores em *Kapton*, utilizados nos ensaios à temperaturas ambiente, como referido anteriormente, são ligados ao TPS 2500 S através de uma extensão de cabo (Figura 3.3). Este cabo suporta temperaturas até aos 50°C. Para os ensaios a elevadas temperaturas, foi utilizado um conjunto de quatro fios eléctricos, de elevada resistência térmica (*Kanthal-Nikrothal 80*), isolados com pastilhas cerâmicas ocas. Estes foram ligados numa extremidade a um cabo de temperatura ambiente que liga ao TPS e ligados, na outra extremidade, a uma sonda de quatro pontos, em *Macon*, que suporta o sensor de *Mica* (Figura 3.5).

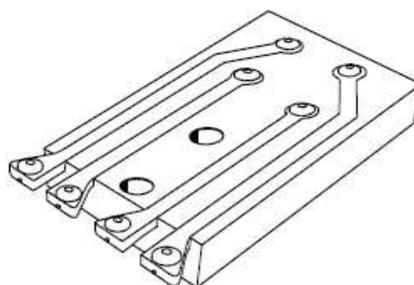


Figura 3.5: Sonda de quatro pontos em *Macon*

As amostras ensaiadas foram colocadas em dois tipos de suporte, um para temperaturas ambiente, outro para altas temperaturas. O suporte utilizado nos ensaios à temperatura ambiente é produzido em aço inoxidável (Figura 3.6 a)), especialmente desenhado para utilização de sensores em *Kapton*. Este suporte inclui uma capa cilíndrica, removível, em aço inoxidável com 150 mm de altura e um diâmetro de 170 mm, que protege a amostra de correntes de ar durante o ensaio, que poderiam afetar os resultados da experiência. O suporte para altas temperaturas utilizado foi escolhido tendo em consideração o tipo de forno utilizado. Este, também em aço inoxidável resistente a temperaturas elevadas, suporta a amostra, a sonda de quatro pontos de *Macon* e o sensor de *Mica* (Figura 3.6 b)). As instruções de manuseamento dos suportes estão descritas no manual da *Hot Disk* (Hot Disk, 2013).

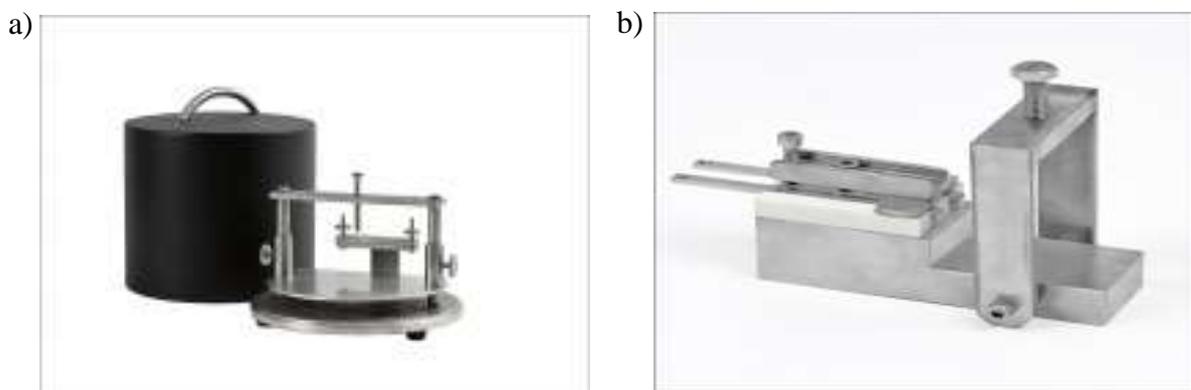


Figura 3.6: a) Suporte de temperatura ambiente e capa; b) Suporte de altas temperaturas

3.2.1.2 Preparação da Amostra

Para obter resultados com uma boa precisão, teve-se em conta vários fatores importantes. O primeiro refere-se à espessura da amostra que deve ser superior ao raio do sensor utilizado, o segundo tem em conta a rugosidade das amostras que deve ter uma magnitude menor que o diâmetro do disco, e o terceiro trata-se da consideração de uma profundidade de sondagem, “*probing depth*”, esta, assume-se como a onda térmica, que é gerada pelo sistema e tem de se

encontrar dentro dos limites da amostra ensaiada durante a gravação do ensaio, para que se possa assumir que o ensaio se encontra num meio infinito e que os resultados obtidos não são afetados por qualquer condição externa. Uma estimativa do “*probing depth*” é dada por:

$$\Delta_p = 2 \times \sqrt{\alpha \times t} \quad (\text{mm}) \quad (5)$$

Em que:

Δ_p = *probing depth* (mm);

α = difusividade térmica do material (mm²/s);

t = tempo de medição do ensaio (s).

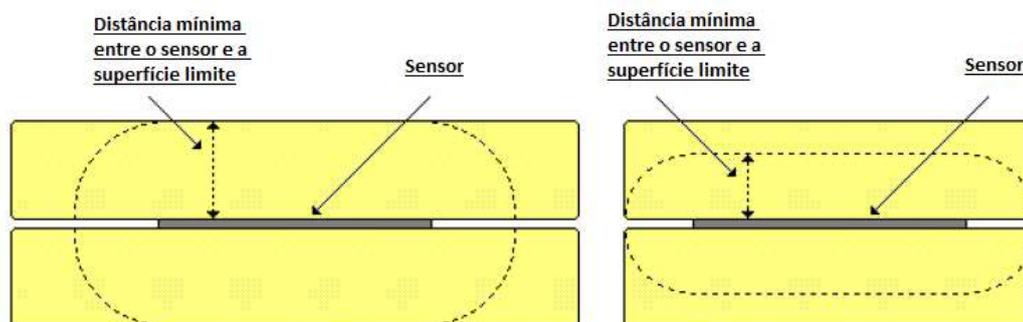


Figura 3.7: Pormenorização da definição do *probing depth*.

3.2.1.3 Software

O *software* do TPS 2500 S é de extrema importância nos ensaios efetuados para as propriedades térmicas do aço. Os objetivos deste programa são: introduzir parâmetros relativos às características do material ensaiado; correr no máximo 200 pontos da gravação transitória obtida pelo sensor; calcular automaticamente as propriedades térmicas do material de acordo com os resultados obtidos.

Este *software* é dotado de uma ferramenta de grande utilidade, o “*Schedule*”, esta permite, não só, correr automaticamente uma sequência de ensaios previamente definidos, como também, possibilita controlar um forno, ajustar os cálculos ao critério do operador e exportar os dados automaticamente. Todos os ensaios foram realizados no módulo “*slab*”, de tal modo que, resumidamente, o *software* para o módulo “*slab*” difere do *software* padrão em certos parâmetros que influenciam os resultados como por exemplo, a espessura do provete, que por ser muito fina tem influência direta nos resultados, a energia imposta necessária para as medições deve ser um pouco menor à necessária para o módulo padrão devido à fineza do provete, outro aspeto a ter em conta é o tempo entre cada ensaio para a mesma amostra, uma

vez que, os isolamentos impedem o calor de dissipar com a mesma velocidade de outros ensaios padrão e portanto, aumentou-se o tempo de espera entre cada ensaio (Hot Disk, 2013).

3.2.1.4 Sistema Experimental

No Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, foi realizado um conjunto de ensaios para determinação das propriedades térmicas do aço galvanizado enformado a frio S280GD+Z à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas.

Realizaram-se ensaios, em função da temperatura e com auxílio do TPS 2500 S. O conjunto de ensaios das propriedades térmicas (Figura 3.8), abrange um sistema para obtenção das constantes térmicas TPS 2500S da *Hot Disk Thermal Constants Analyser* (3), um sistema para a ação térmica, forno retangular do tipo *Muffle* (1), o *software* da *Hot Disk* auxiliado por um computador (2) e um sistema de controlo da temperatura do forno (4). A extensão térmica foi experimentada com auxílio do sistema experimental das propriedades mecânicas.



Figura 3.8: Sistema de ensaio das propriedades térmicas de aço enformado a frio.

Para melhor perceber as características e funcionamento do TPS 2500 S, uma vez que é um sistema inovador no cálculo das propriedades térmicas de um qualquer material, é descrito no subcapítulo seguinte o *hardware* e *software* deste aparelho, utilizado nos ensaios das propriedades térmicas.

Os ensaios para as propriedades térmicas foram realizados, também, em regime estacionário onde os provetes de aço galvanizado enformado a frio S280GD+Z foram aquecidos até à temperatura desejada e só depois ensaiados. Com estes ensaios foram determinadas características térmicas do aço como a condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico em função da temperatura. O provete de ensaio foi utilizado para os diferentes

patamares de temperatura, desde a temperatura ambiente até aos 800°C, de acordo com o seguinte regime: 20°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C e 800°C.

Para os ensaios à temperatura ambiente e altas temperaturas, foram utilizadas duas chapas do aço enformado a frio de classe S280GD+Z com dimensões recomendadas nas normas do TPS 2500 S de cerca 7 x 7 cm. A espessura considerada do provete foi de 2.5 mm, compatível com a espessura dos provetes dos ensaios das propriedades mecânicas.

3.2.1.5 Metodologias de Ensaio

Os procedimentos efetuados nos ensaios das propriedades térmicas estão de acordo com o estipulado no Manual da *Hot Disk*. Em todos os ensaios foram consideradas características de teste essenciais para garantir bons resultados dos mesmos, tais como; garantir que todas as ligações se encontram bem colocadas para que sejam efetuadas todas as leituras dos dados; o sensor deve encontrar-se o mais centrado possível da amostra para que a energia transmitida do sensor para a amostra se propague uniformemente pela mesma; não exercer demasiada força no parafuso que serve para premir o conjunto amostra, sensor e isolamento pois, o objetivo é simplesmente garantir que todo o sensor esteja em contato com a amostra; a sala de ensaio deve garantir pouca ou mesmo nenhuma movimentação devido à sensibilidade do equipamento a correntes de ar e pequenas vibrações. Para todos os patamares de temperatura foram realizados ensaios no modo *slab* do *software* da *Hot Disk*. Nesta opção do programa, são pedidos alguns parâmetros iniciais de ensaio como a temperatura, a espessura do provete, a potência, o tempo de medição e o “*probing depth*”. No Quadro 3.2 estão explícitos os parâmetros utilizados para os vários patamares de temperatura

Temperatura (°C)	Espessura Provete (mm)	Sensor	Potência (W)	Tempo (s)	<i>Probing Depth</i> (mm)
20	2,5	4922	1,5	10	22
100			1,5	10	22
200			1,5	10	22
300			1,5	10	22
400			4	20	30
500			5	20	30
600			5	40	30
700			5	40	30
750			5	40	30
800			5	40	30

Quadro 3.2: Parâmetros de ensaio das propriedades térmicas.

3.2.2 Determinação da extensão térmica

Os procedimentos dos ensaios para a extensão térmica são semelhantes aos ensaios das propriedades mecânicas mas, com a diferença de este não ser submetido a qualquer esforço axial. Nesta situação, o provete apenas é fixo na parte superior para que o alongamento ocorra naturalmente durante o seu aquecimento e o extensómetro de varetas da Epsilon leia este alongamento.

O ensaio para o cálculo da extensão térmica foi realizado em regime transiente, isto é, a extensão do provete foi medida enquanto o provete era aquecido até à temperatura desejada de 1000°C.

3.3 Considerações Finais

Os ensaios à temperatura ambiente são de extrema importância para a realização de todos os ensaios das propriedades mecânicas especialmente a altas temperaturas. Uma correta calibração entre os extensómetros elétricos (FLA-6-11) e de altas temperaturas (3548 HI da Epsilon) é essencial para obtenção de bons resultados a altas temperaturas, onde é usado apenas o extensómetro 3548 HI da Epsilon. Os dois conjuntos de extensómetros foram colocados com o maior rigor possível para garantir boas leituras durante o ensaio. No entanto, é de referir que os resultados dos ensaios experimentais de tração poderão estar afetados de pequenos erros, como por exemplo, a não linearidade do provete ou eventuais pequenos desvios em relação ao sistema de amarração.

Para os ensaios experimentais das propriedades térmicas (condutividade térmica e calor específico) através do TPS 2500 S, o modelo (raio) do sensor utilizado e os parâmetros de ensaio escolhidos tiveram a condescendência dos técnicos responsáveis pelo sistema da Hot Disk.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Propriedades Mecânicas

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos experimentalmente para as propriedades mecânicas do aço enformado a frio S280GD+Z sujeito a elevadas temperaturas. Os resultados obtidos experimentalmente serão comparados com estudos apresentados por vários investigadores e com os previstos na atual normalização nacional e internacional.

A calibração dos extensómetros foi realizada através dos ensaios à temperatura ambiente. Os gráficos tensão-extensão obtidos para cada um dos extensómetros foram comparados e estão representados na Figura 4.1, sendo possível constatar a semelhança das curvas. Foram realizados vários ensaios à temperatura ambiente de modo a melhorar o comportamento do extensómetro HI 3548 devido à importância deste para os ensaios a elevadas temperaturas. Uma vez que os extensómetros eléctricos FLA-6-11 apresentam uma boa fidelidade nos resultados à temperatura ambiente, foram reunidos todos os esforços para garantir que também o extensómetro de elevadas temperaturas apresentasse resultados semelhantes.

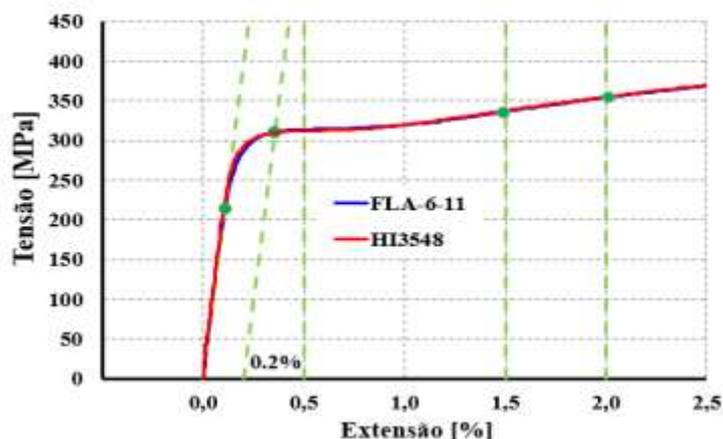


Figura 4.1: calibração dos extensómetros FLA-6-11 e HI 3548 da Epsilon.

Através dos resultados obtidos, representados na Figura 4.1 podemos observar que os extensômetros apresentam curvas coincidentes, que definem uma boa calibração entre os mesmos. A garantia desta calibração é sustentada através da comparação dos valores da tensão de cedência e do módulo de elasticidade obtidos através de cada um destes. É de referir que o comprimento inicial entre referências (L0) utilizado nos cálculos da extensão foi de 50.8 mm, que corresponde ao “*gage length*” do extensómetro de altas temperaturas HI 3548 da Epsilon, sendo que este extensómetro permite uma leitura de deslocamentos nos ensaios à tração até 25.4 mm.

Devido à dificuldade em achar o limite de proporcionalidade das curvas tensão-extensão para o cálculo da tensão de cedência, foi utilizada uma convenção utilizada por vários investigadores. Assim, para cada curva tensão-extensão obtida nos ensaios, foi construída uma linha reta paralela à porção elástica, que passa pela deformação de 0.2% da extensão total. O declive da porção elástica foi obtido considerando a Lei de Hooke, $\sigma = \epsilon E$, a mesma considerada pela NP EN 1993-1-2:2010 para extensões inferiores à extensão de proporcionalidade, em que a tensão é proporcional à extensão. A constante de proporcionalidade entre estas duas grandezas é o módulo de elasticidade ou módulo de Young.

4.1.1 Curvas Tensão-Extensão

Para cada patamar de temperatura foram realizados pelo menos três ensaios de tração dos provetes de aço enformado a frio S280GD+Z até à sua rotura e obtenção das respetivas curvas tensão-extensão. Na Figura 4.2 a) estão representadas as curvas tensão-extensão de um dos ensaios realizados por patamar de temperatura e observa-se que com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição da resistência dos provetes e um aumento da extensão dos mesmos. Para o patamar de 200°C verificou-se um aumento da resistência em relação à temperatura ambiente, sendo um comportamento pouco espetável uma vez que com o aumento da temperatura é de esperar que a resistência diminua. No Anexo A1.2 é possível observar as curvas tensão-extensão dos três ensaios realizados para cada patamar de temperatura (Figura A-2).

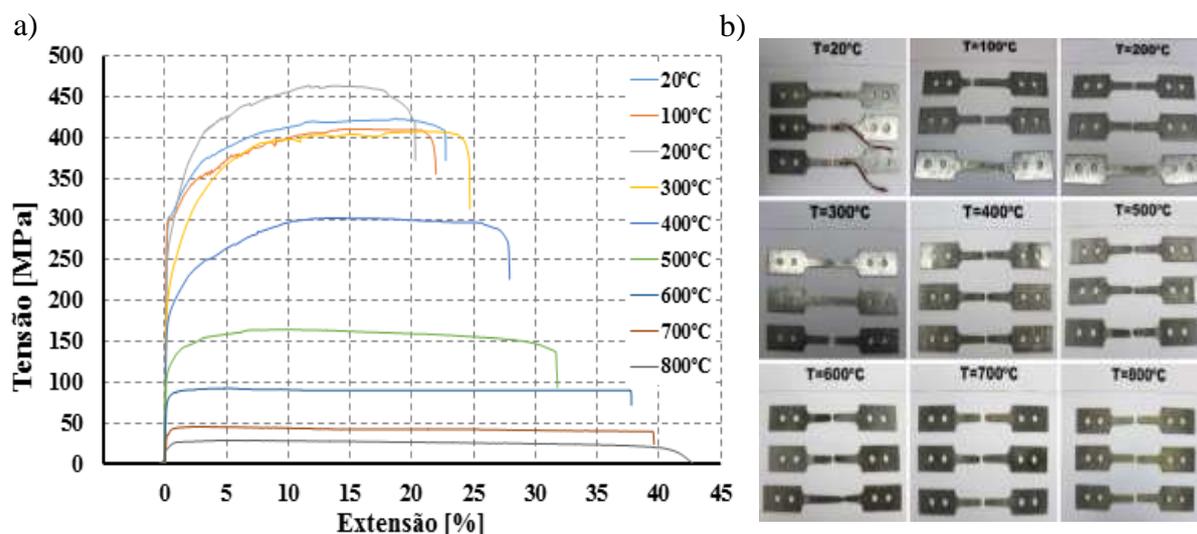


Figura 4.2: (a) Curvas tensão-extensão para cada patamar de temperatura; (b) provetes ensaiados para os vários patamares de temperatura.

Observa-se da Figura 4.2 a) que a deformação do aço em estudo aumenta com o aumento da temperatura e por conseguinte, a ductilidade do aço enformado a frio S280GD+Z aumenta com o aumento de temperatura. Desta observação e, considerando que o aço em estudo apresenta pouca percentagem de carbono na sua composição química, podemos afirmar que o aço em estudo é dúctil. Na Figura 4.2 b) visualiza-se os conjuntos de três provetes de ensaio, utilizados para os vários patamares de temperatura nos ensaios das propriedades mecânicas.

4.1.2 Fatores de Redução da Tensão de Cedência ($k_{y,\theta}$)

Segundo a NP EN 1993-1-2 - Anexo E (2010), a tensão de cedência do aço enformado a frio é considerada igual a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2%, em que esta se obtém através de uma reta com inclinação de valor igual ao módulo de elasticidade que passa pelo ponto referente a 0.2% da extensão. Para elevadas temperaturas alguns investigadores também consideram as tensões obtidas através de uma reta não proporcional para 0.5%, 1.5% e 2.0% da extensão total. No presente estudo, as tensões foram determinadas de acordo com o descrito anteriormente para 0.2%, 0.5%, 1.5% e 2.0% da extensão, visíveis na Figura 4.1. No Quadro 4.1 encontram-se representados os valores à temperatura ambiente para cada uma das tensões referidas anteriormente, onde podemos observar que a tensão aumenta para valores superiores de extensão. No Anexo A1.3, o Quadro A-2 apresenta o valor das tensões de cedência obtidas para as várias extensões em função da temperatura, com a respetiva média e desvio padrão.

Ensaio	Temperatura [°C]	$f_{y,0.2\%}$ [MPa]	Média	$f_{y,0.5\%}$ [MPa]	Média	$f_{y,1.5\%}$ [MPa]	Média	$f_{y,2\%}$ [MPa]	Média
ET_20-1	20	302,54	306,81	304,98	309,06	336,47	331,26	348,74	342,41
ET_20-2		308,92		313,76		319,09		327,16	
ET_20-3		308,98		308,44		338,21		351,34	

Quadro 4.1: Valor de tensão de cedência à temperatura ambiente para cada valor de extensão

Os fatores de redução da tensão de cedência a elevadas temperaturas, $k_{y,\theta}$, foram calculados através da relação entre a tensão de cedência a elevadas temperaturas, $f_{y,\theta}$, e a tensão de cedência à temperatura ambiente, $f_{y,20}$. O Quadro 4.2 mostra os valores obtidos dos fatores de redução da tensão para os valores de extensão definidos para diferentes patamares de temperatura.

Na Figura 4.3 podemos visualizar as curvas que representam a redução das tensões obtidas para os vários níveis de extensões à medida que a temperatura aumenta. É interessante visualizar que os fatores de redução da tensão de cedência para 0.5% da extensão total estão bastante próximos dos obtidos para 0.2% da tensão limite convencional de proporcionalidade.

Fatores de Redução Tensão de Cedência - $k_{y,\theta}$				
$\theta(^{\circ}\text{C})$	0,20%	0,50%	1,50%	2,00%
	$f_{y,\theta}/f_{y,20}$	$f_{y,\theta}/f_{y,20}$	$f_{y,\theta}/f_{y,20}$	$f_{y,\theta}/f_{y,20}$
20	1	1	1	1
100	0,96227	0,96152	0,96676	1,000337
200	0,89876	0,94581	1,04773	1,086081
300	0,72867	0,76881	0,84601	0,870825
400	0,59216	0,61537	0,65452	0,656845
500	0,37047	0,39634	0,42421	0,427678
600	0,25368	0,25835	0,24659	0,248534
700	0,11843	0,13047	0,14592	0,145516
800	0,06488	0,07418	0,08606	0,087029

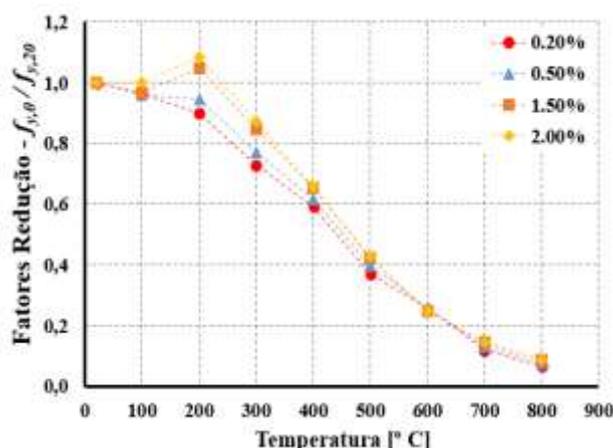


Figura 4.3: Fatores de redução da tensão para os diferentes valores de extensão em função da temperatura.

Nesta figura é possível visualizar que à temperatura de 200°C as extensões de 1.5% e 2.0% apresentam fatores de redução superiores a um, que correspondem a valores de resistência superiores aos obtidos à temperatura ambiente. Este comportamento pode ser explicado pela composição química do aço em estudo S280GD+Z, sendo que, aos 200°C ocorrem algumas reações e transformações químicas no aço que podem levar a um pequeno aumento da sua resistência. Note-se que este aumento de resistência aos 200°C, nos resultados obtidos, traduz-se em 4.7 % para 1.5 % de extensão e 8.6 % para 2.0% de extensão.

4.1.3 Fatores de Redução do Módulo de Elasticidade (k_E)

Os fatores de redução do módulo de elasticidade foram obtidos pela relação entre o módulo de elasticidade obtido a diferentes patamares de temperatura, E_θ , e o módulo de elasticidade obtido à temperatura ambiente, E_{20} . Os valores obtidos estão representados na Figura 4.4. No Anexo A1.3, Quadro A-3, apresentam-se os valores dos resultados obtidos dos ensaios realizados para cada patamar de temperatura com respectiva média e desvio padrão.

Fatores Redução- $k_{E,\theta}$	
$\theta(^{\circ}\text{C})$	E_{θ}/E_{20}
20	1,00000
100	0,98005
200	0,84142
300	0,70322
400	0,59366
500	0,41404
600	0,30592
700	0,10880
800	0,08548

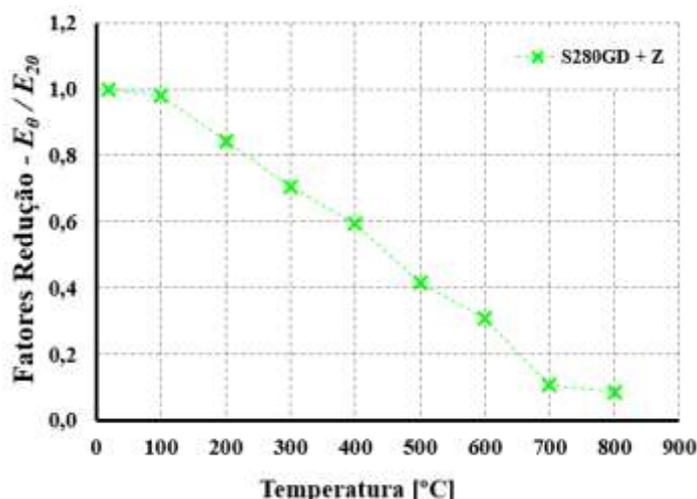


Figura 4.4: Fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura.

A Figura 4.4 apresenta também o comportamento do módulo de elasticidade em função da temperatura, onde podemos observar que esta propriedade decresce com o aumento de temperatura. Note-se que os fatores de redução do módulo de elasticidade entre os 100°C e os 700°C apresentam um comportamento praticamente linear.

4.1.4 Fatores de Redução da Tensão Última ($k_{f_{u,\theta}}$) e da Tensão Limite de Proporcionalidade ($k_{f_{p,\theta}}$)

A tensão última foi obtida através dos gráficos tensão-extensão, considerando apenas o valor máximo registado para cada uma destas curvas, independentemente da extensão associada a esta tensão. Os valores das tensões obtidas estão apresentados no Anexo A1.3, Quadro A-3. Na Figura 4.5 estão representados os valores dos fatores de redução da tensão última calculados no presente estudo. Na mesma Figura 4.5 podemos observar a curva relativa a estes fatores de redução, calculados, considerando a relação entre a tensão última obtida para cada patamar de temperatura, $f_{u,\theta}$, e a tensão última obtida à temperatura ambiente, $f_{u,20}$.

A tensão limite de proporcionalidade também obtida a partir das curvas tensão-extensão, onde é considerado o ponto de transição entre a fase elástica e plástica, muitas das vezes de difícil identificação, foi obtido considerando aproximadamente 50% da extensão de cedência definida pelo EN1993-1-2 2010. Os valores destas tensões estão apresentados no Anexo A1.3, Quadro A-3. Na Figura 4.5 apresentam-se os valores dos fatores de redução da tensão limite de proporcionalidade calculados no presente estudo, bem como, a curva característica destes fatores de redução, calculados considerando a relação entre a tensão limite de proporcionalidade obtida para cada patamar de temperatura, $f_{p,\theta}$, e a tensão de cedência obtida à temperatura ambiente, $f_{y,20}$.

Fatores Redução- $k_{u,\theta}$, $k_{p,\theta}$			
$\theta(^{\circ}\text{C})$	$f_{u\theta}/f_{u20}$	$\theta(^{\circ}\text{C})$	$f_{p\theta}/f_{y20}$
20	1	20	0,6926
100	0,97984	100	0,68202
200	1,11191	200	0,55629
300	0,93721	300	0,44447
400	0,68798	400	0,32171
500	0,39113	500	0,26157
600	0,20518	600	0,17786
700	0,04542	700	0,06277
800	0,03889	800	0,05375

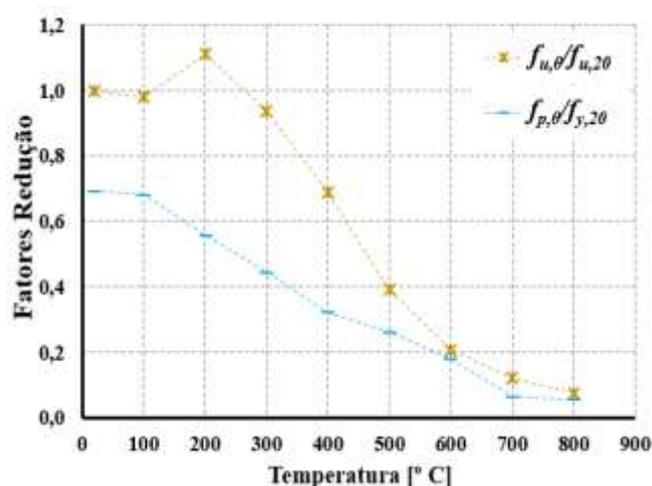


Figura 4.5: Fatores de redução da tensão última e da tensão limite de proporcionalidade em função da temperatura.

Na Figura 4.5 observa-se que também os fatores de redução para a tensão última apresentam um comportamento singular aos 200°C, associado a um aumento da tensão última em relação à temperatura ambiente. Aparentemente para patamares de temperaturas acima dos 200°C as reações e transformações químicas do aço são atrasadas e como consequência a tensão última também reduz. Note-se que estes fatores de redução apresentam um comportamento muito semelhante aos fatores de redução da tensão de cedência para elevadas extensões (1.5% e 2.0%). Observa-se ainda que os valores das tensões cedência para 1.5% e 2.0% de extensão total e os valores da tensão última obtidos experimentalmente para os vários patamares de temperatura são bastante semelhantes. Desta observação é possível afirmar que as tensões de cedência de 1.5% e 2.0% de extensão total não devem ser utilizadas para dimensionamento de elementos estruturais em aço enformado a frio. Da Figura 4.5 observa-se ainda que a tensão de proporcionalidade apresenta uma região linear dos 100°C aos 700°C.

4.1.5 Comparação com estudos precedentes

A Figura 4.6 apresenta os resultados obtidos dos fatores de redução da tensão de cedência em comparação com outros estudos realizados com aço enformado a frio de diferentes classes e espessuras. Da análise desta figura, verificou-se que os fatores de redução da tensão de cedência do aço em estudo apresentam um comportamento semelhante aos aços enformados a frio de baixa resistência (Kankanamge e Mahendran, 2011, Ranawaka e Mahendran, 2009)), especialmente daqueles que apresentam maior espessura (Kankanamge e Mahendran, 2011).

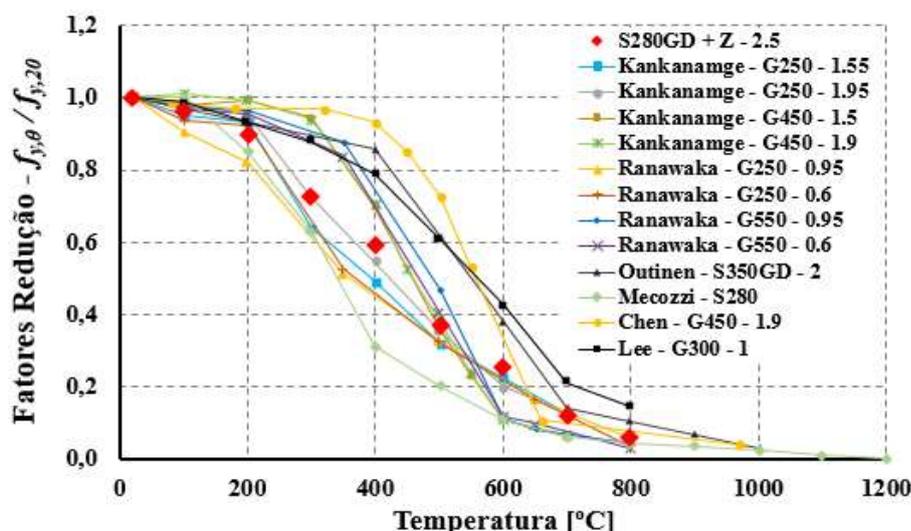


Figura 4.6: Fatores de redução da tensão de cedência e comparação com estudos precedentes

Em comparação ao estudo feito por Mecozzi e Zhao (2005) para um aço da mesma classe do aço em estudo, mas com diferenças na composição, verificou-se uma semelhança nas curvas até aos 300°C e uma redução significativa da resistência do aço estudado por estes autores a partir dos 400°C.

Da comparação com os restantes autores (Outinen et al., 2000, Chen e Young, 2007, Lee et al., 2003), observa-se que estes não definem bem o comportamento do aço S280GD+Z uma vez que os estudos realizados por estes investigadores são em aços enformados a frio com uma classe de resistência alta.

Note-se que após atingir os 800°C, os valores dos fatores de redução da tensão de cedência de todos os aços estudados encontram-se bastante próximos e com valores muito reduzidos, aproximadamente inferiores a 10% da resistência obtida à temperatura ambiente.

Relativamente aos fatores de redução do módulo de elasticidade, podemos observar na Figura 4.7, a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente para o aço enformado a frio

S280GD+Z e os estudos já desenvolvidos também para aços enformados a frio mas de diferentes classes e espessuras.

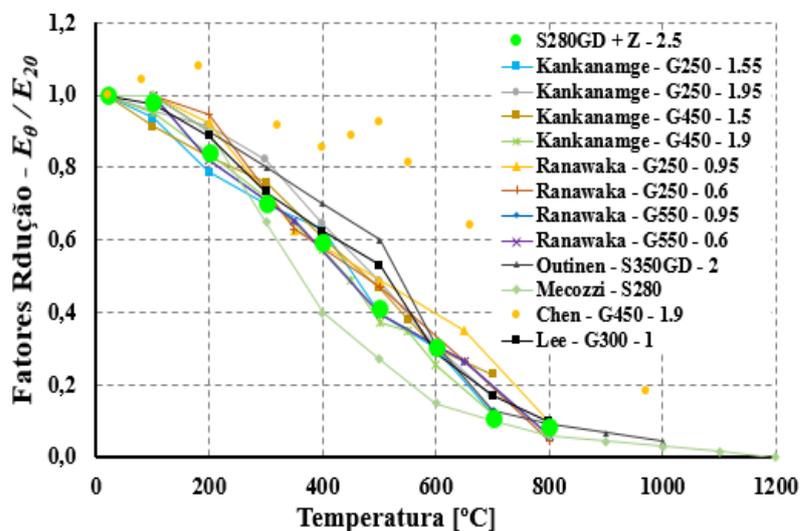


Figura 4.7: Fatores de redução do módulo de elasticidade e comparação com estudos precedentes.

É possível constatar que o módulo de elasticidade do aço enformado a frio decresce de uma forma similar independentemente da classe ou espessura do aço em estudo, de facto, observa-se que, em geral, a discrepância entre os fatores de redução do módulo de elasticidade para um qualquer patamar de temperatura é inferior a 10% (Outinen et al., 2000, Ranawaka e Mahendran, 2009, Kankanamge e Mahendran, 2011, Lee et al., 2003), com exceção aos resultados obtidos por Mecozzi e Zhao (2005) e por Chen e Young (2007) que apresentam resultados invulgares, o primeiro com valores mais conservativos que os obtidos neste estudo, e o segundo com valores muito irregulares e não conservativos.

Da observação da Figura 4.8 podemos constatar um aumento do fator de redução de aproximadamente 20% para os aços de baixa resistência à temperatura de 200°C em comparação com os aços de alta resistência. Podemos observar, também, que para quase todos os patamares de temperatura, à exceção de 200°C e 300°C, os fatores de redução se encontram bastante próximos para todos os estudos apresentados independentemente da classe e da espessura. Não deixa de ser interessante constatar a semelhança entre as curvas relativas aos fatores de redução da tensão última e as curvas dos fatores de redução da tensão de cedência para 1.5% e 2.0% da extensão total.

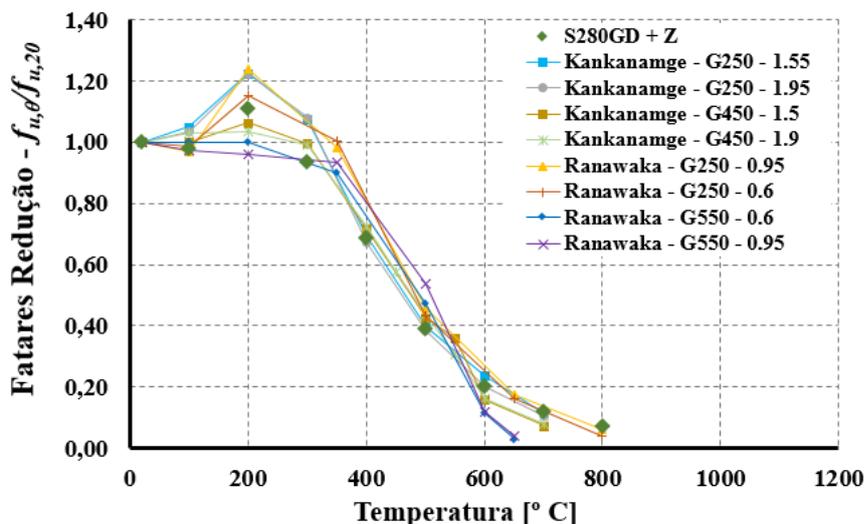


Figura 4.8: Fatores de redução da tensão última e comparação com estudos precedentes.

4.1.6 Comparação com as normas: NP EN 1993-1-2:2010; BS 5950:1990; AS 4100:1998

Da análise da Figura 4.9 podemos constatar a semelhança entre a curva dos fatores de redução da tensão de cedência relativa ao aço em estudo e a curva preconizada pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010) para aços laminados a quente da classe 4 utilizada, atualmente, para dimensionamento de elementos estruturais e de revestimento de aço enformado a frio sujeito ao fogo. Verifica-se que os fatores de redução calculados são inferiores aos preconizados pelas várias normas apresentadas, mais detalhadamente, observa-se que para a temperatura de 500°C existe um decréscimo acentuado do fator de redução para o aço S280 GD+Z em relação ao estipulado pela norma europeia, de aproximadamente 20% da resistência total. Também no patamar dos 500°C observa-se que a curva relativa à norma britânica BS 5950 (1990) para 0.5% aproxima-se da curva obtida experimentalmente e que estas coincidem nos 600°C. Ao comparar os resultados obtidos para as tensões de cedência de 0.5%, 1.5% e 2.0% da extensão total e os resultados apresentados pela norma britânica BS 5950 para as mesmas extensões, verifica-se uma proximidade das curvas relativas a 0.5% da extensão com valores mais conservativos para os resultados obtidos no presente estudo. Também podemos visualizar que para as outras extensões, os fatores de redução obtidos experimentalmente apresentam valores inferiores aos preconizados pela norma acima referida.

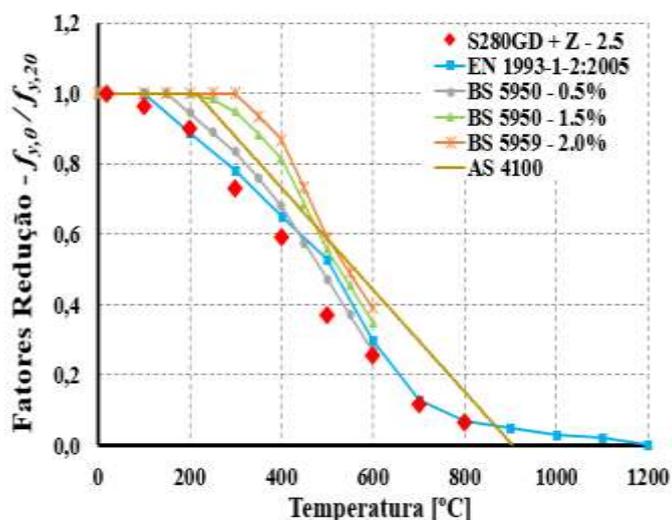


Figura 4.9: Fatores de redução da tensão de cedência e comparação com várias normas.

Na Figura 4.10 são comparados os fatores de redução do módulo de elasticidade obtidos para este estudo com os preconizados pela NP EN 1993-1-2 (2010) e AS 4100 (1998), onde se observa que estas normas sobrestimam os fatores de redução do módulo de elasticidade para aços enformados a frio, com maior discrepância para a norma australiana. Observa-se, também, que a maior diferença dos fatores de redução entre os resultados obtidos e a norma portuguesa ocorre aos 500°C, mas que a partir dos 600°C estes fatores são coincidentes.

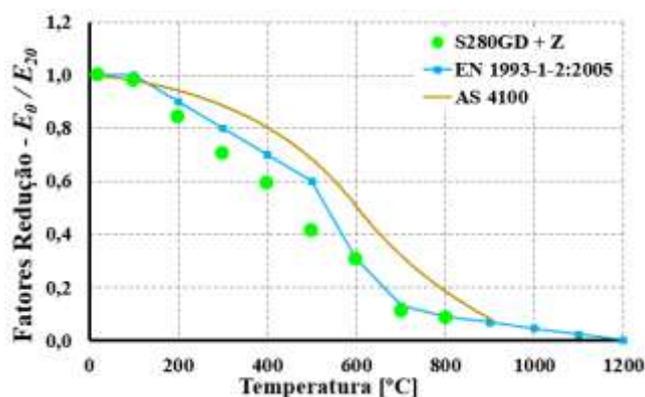


Figura 4.10: Fatores de redução do módulo de elasticidade e comparação com outras normas.

A Figura 4.11 apresenta a comparação entre os fatores de redução da tensão limite proporcionalidade obtida experimentalmente e a apresentada pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010), da qual podemos constatar a grande diferença entre os fatores de redução principalmente para a temperatura ambiente. Esta diferença pode ser explicada pela consideração feita pela NP EN 1993-1-2 (2010) que à temperatura ambiente a tensão de

cedência do aço laminado é igual à tensão limite de proporcionalidade, enquanto, através do método de cálculo utilizado no presente estudo para determinar a tensão de cedência, obtiveram-se valores da tensão de cedência superiores à tensão limite de proporcionalidade.

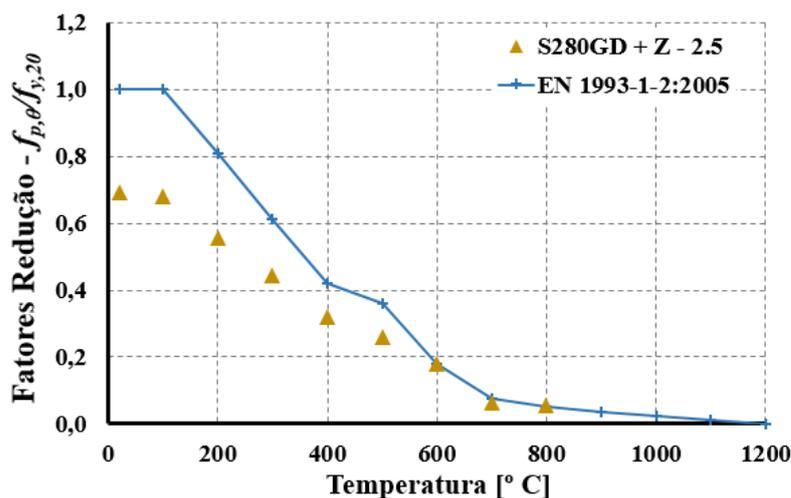


Figura 4.11: Fatores de redução tensão limite de proporcional e comparação com outras normas.

4.1.7 Comparação com aços laminados a quente

A Figura 4.12 apresenta a comparação dos fatores de redução da tensão de cedência obtidos experimentalmente com os fatores de redução de outros aços laminados a quente estudados. Observa-se que a redução da tensão de cedência do aço enformado a frio ocorre mais acentuadamente com o aumento da temperatura em relação aos aços laminados a quente apresentados. Note-se que em comparação com os estudos desenvolvidos no LEMEDEC da Universidade de Coimbra (Martins, 2012) para aços laminados a quente, os fatores de redução obtidos experimentalmente neste estudo apresentam uma degradação muito maior, principalmente entre os 100°C e os 800°C.

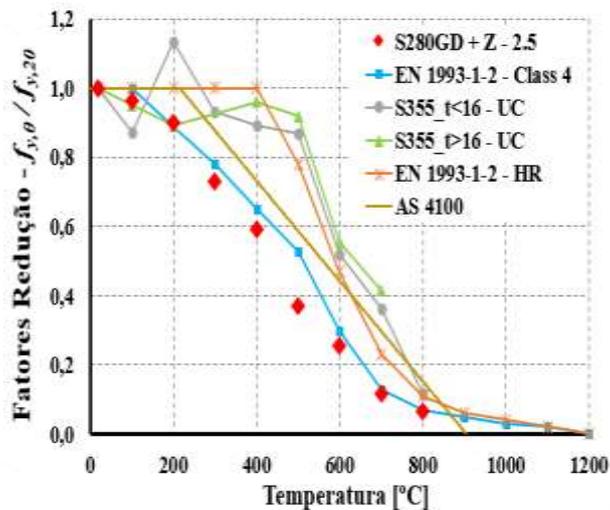


Figura 4.12: Fatores de redução da tensão de cedência e comparação com aços laminados a quente.

Na Figura 4.13 é possível observar que os fatores de redução do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente, apresentam valores semelhantes aos obtidos por (Martins, 2012) com o aumento de temperatura e mesmo em alguns patamares de temperatura estes valores são coincidentes.

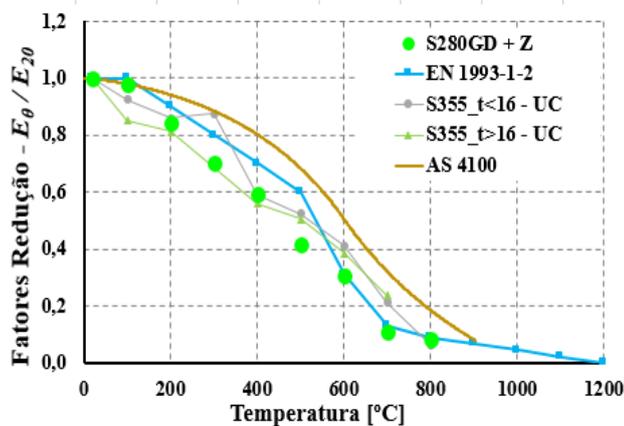


Figura 4.13: Fatores de redução do módulo de elasticidade e comparação com aços laminados a quente.

4.2 Propriedades Térmicas

4.2.1 Condutividade Térmica (λ_a)

A condutividade térmica do aço enformado a frio S280GD+Z foi obtida nos ensaios experimentais através do TPS 2500S para os vários patamares de temperatura até aos 800°C. Os resultados obtidos experimentalmente estão representados na Figura 4.14, onde verifica-se que a obtenção da condutividade térmica para temperaturas superiores a 800°C não foi possível devido à degradação do sensor, que acima deste patamar de temperatura não transmitia corretamente os dados. Os valores obtidos para a condutividade térmica estão apresentados no Quadro A-4, Anexo A2.1.

Através da Figura 4.14 observa-se que a condutividade térmica diminui de forma aproximadamente linear com o aumento de temperatura.

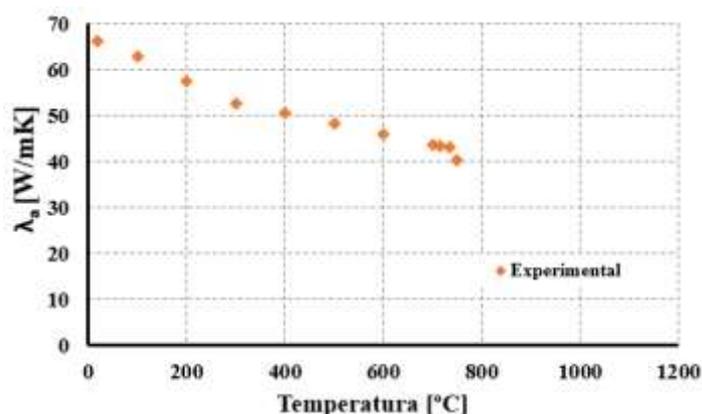


Figura 4.14: Condutividade térmica do aço enformado a frio em função da temperatura.

4.2.2 Difusividade Térmica (α)

A difusividade térmica foi obtida, também, através do TPS 2500S para os vários patamares de temperatura e os seus valores podem ser visíveis no Quadro A-4, Anexo A2.1. A Figura 4.15 representa a redução da difusividade térmica com a evolução da temperatura obtida experimentalmente.

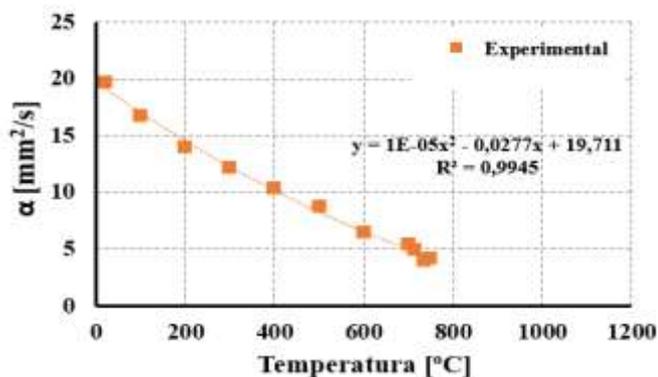


Figura 4.15: Difusividade térmica do aço enformado a frio em função da temperatura.

A difusividade térmica é uma propriedade térmica do aço que não é apresentada pela norma de dimensionamento NP EN 1993-1-2:2010 (2010). No entanto esta propriedade é utilizada para determinação do calor específico. O conhecimento do comportamento da difusividade térmica quando sujeita a elevadas temperaturas pode ter interesses futuros, sendo apresentada neste estudo a equação que corresponde a esse comportamento (6).

$20 \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$:

$$\alpha = 1 \times 10^{-5} \times \theta^2 - 0.0277 \times \theta + 19.711 \text{ (mm}^2\text{/s)} \quad (6)$$

Note-se que esta equação é definida por um polinómio de 2º grau que abrange uma região dos 20-800°C.

4.2.3 Calor Específico (c_a)

O calor específico do aço enformado a frio em estudo foi obtido nos ensaios experimentais através do TPS 2500S para os vários patamares de temperatura até aos 800°C. Os valores obtidos para o calor específico estão apresentados no Quadro A-4, Anexo A2.1. Uma vez mais, os ensaios foram realizados até aos 800°C e portanto o comportamento do calor específico para temperaturas superiores não foi obtido.

A Figura 4.16 apresenta a evolução do calor específico em função da temperatura, onde podemos observar que este aumenta com o aumento da temperatura.

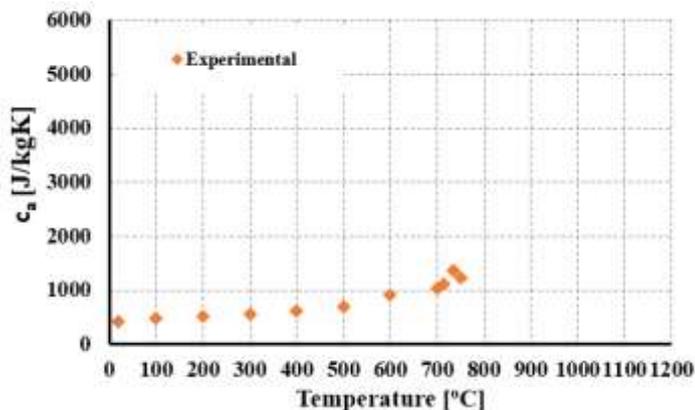


Figura 4.16: Calor específico do aço enformado a frio em função da temperatura.

4.2.4 Extensão Térmica ($\Delta l/l$)

A extensão térmica foi obtida através de um ensaio em estado transiente e com os equipamentos de ensaio das propriedades mecânicas, sem restrições ou cargas até aos 1000°C. Os valores obtidos podem ser visíveis no Quadro A-4, Anexo A2.1. Da Figura 4.17 observa-se que a extensão térmica em função da temperatura apresenta três regiões distintas, a primeira com um comportamento linear crescente entre a temperatura ambiente e os 740°C, a segunda apresenta um comportamento linear constante igual a 0.0011 ($\Delta l/l$) entre os 740°C e os 870°C e a terceira, também, com comportamento linear crescente a partir dos 870°C.

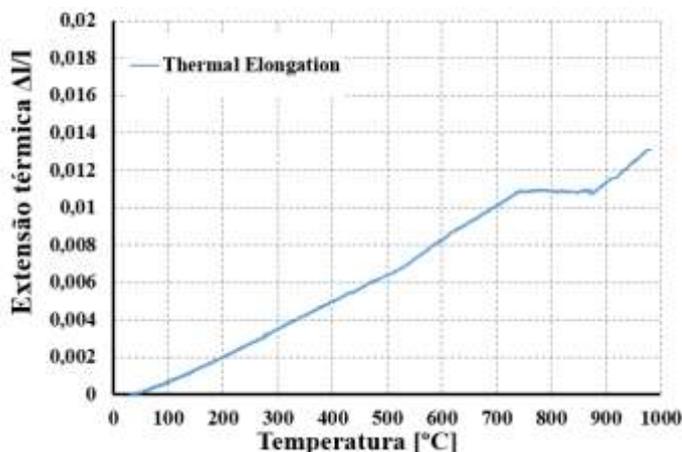


Figura 4.17: Expansão térmica do aço enformado a frio em função da temperatura.

4.2.5 Comparação com normas e estudos precedentes

Da Figura 4.18 podemos comparar os resultados obtidos experimentalmente com o proposto pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010) onde verifica-se que o aço enformado a frio apresenta valores da condutividade térmica aproximadamente 12 % superiores aos apresentados na NP EN 1993-1-2 (2010). Observa-se ainda que redução da condutividade térmica definida pela norma portuguesa apresenta duas regiões lineares: 20-800°C e 800-1000°C, e os resultados obtidos neste estudo apresentam apenas uma região aproximadamente linear dos 20°C aos 750°C. Como referido anteriormente, não foi possível obter resultados acima dos 800°C de tal forma que, não é possível comparar os resultados obtidos com a norma acima dos 800°C.

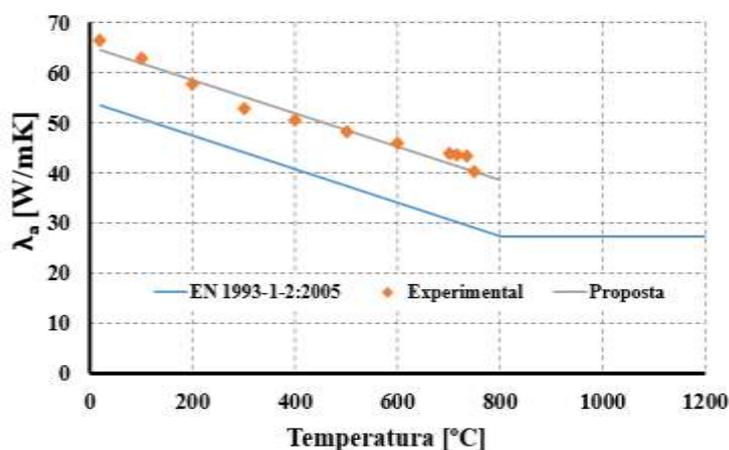


Figura 4.18: Condutividade térmica do aço enformado a frio em função da temperatura e comparação com a NP EN 1993-1-2:2010 (2010).

Na Figura 4.19 observa-se as curvas obtidas experimentalmente e as propostas pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010), onde podemos constatar uma boa concordância entre ambas até aos 700°C. Note-se que dos ensaios realizados entre os patamares dos 700°C e 800°C não foram obtidos valores que correspondessem exatamente à irregularidade apresentada pela norma aos 725°C, mas verificou-se um entendimento dos valores antes e depois deste patamar.

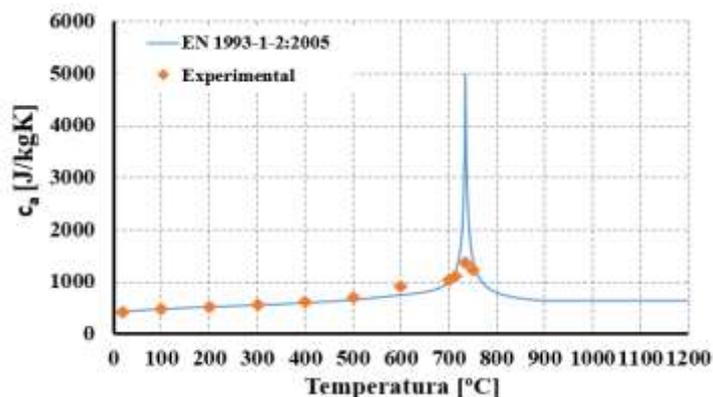


Figura 4.19: Calor específico do aço enformado a frio em função da temperatura e comparação com a NP EN 1993-1-2:2010 (2010).

A Figura 4.20 apresenta os resultados obtidos experimentalmente para a extensão térmica em função da temperatura e comparação com a NP EN 1993-1-2:2010 (2010), BS 5950-8:1990 (1990) e outros investigadores. Da comparação entre os resultados obtidos a EN 1993-1-2 (2010) e a BS 5950-8:1990 (1990) observa-se que os resultados obtidos experimentalmente são mais conservadores para quase todos os patamares de temperatura, exceto para a NP EN 1993-1-2:2010 (2010) entre os 740°C e os 880°C. Chen e Young (Chen e Young, 2007) apresentam resultados até aos 740°C onde os valores destes são inferiores aos obtidos ao longo da evolução da temperatura. Observa-se que os resultados apresentados por Outinen et al. (2000) são os que melhor coincidem com os resultados obtidos no presente estudo entre os patamares de 20°C e 700°C, com exceção a partir dos 700°C onde estes valores sofrem alterações apresentando valores inferiores até aos 900°C e superiores até aos 1000°C.

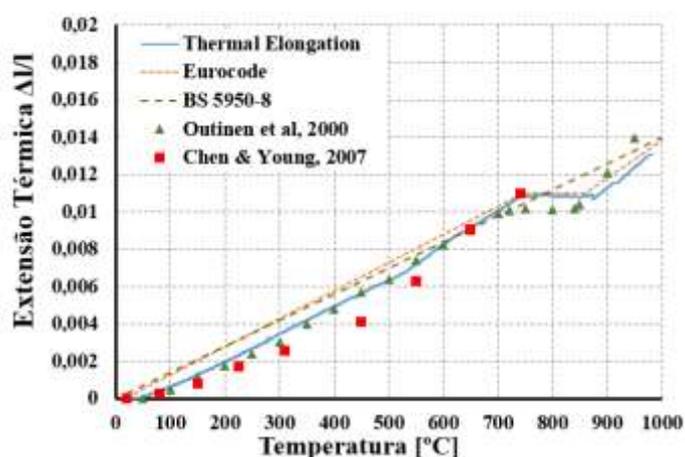


Figura 4.20: Extensão térmica do aço enformado a frio em função da temperatura e comparação com normas e estudos precedentes.

4.3 Modelos Preditivos para as Propriedades Mecânicas

4.3.1 Tensão de Cedência

Das comparações realizadas anteriormente entre os resultados do presente estudo e as normas de dimensionamento de estruturas de aço enformado a frio utilizada, observa-se que os valores apresentados pelas normas não exprimem o verdadeiro comportamento dos aços enformados a frio quando sujeitos a elevadas temperaturas, de tal forma que torna-se necessário calcular equações com base nos resultados obtidos que melhor expressem o comportamento destes aços. Vários investigadores apresentaram equações para os fatores de redução da tensão de cedência de aços enformados a frio, tanto para classes baixas como para classes altas, onde se observa uma diferença considerável. Portanto, é importante desenvolver equações adequadas para cada classe. As equações (7a) e (7b) apresentam as equações propostas para os fatores de redução da tensão de cedência do aço S280GD+Z em que $f_{y,\theta}$, é a tensão de cedência a elevadas temperaturas, $f_{y,20}$, a tensão de cedência à temperatura ambiente e θ a temperatura.

$20 \leq \theta \leq 200^\circ\text{C}$:

$$\frac{f_{y,\theta}}{f_{y,20}} = - 5.5 \times 10^{-4} \times \theta + 1.011 \quad (7a)$$

$201 \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$:

$$\frac{f_{y,\theta}}{f_{y,20}} = 0.07086 \times (25.55 - \theta^{0.482}) \quad (7b)$$

A Figura 4.21 representa as equações propostas por este estudo em comparação às propostas por Kankanamge (2011) e Ranawaka (2009) para aços de baixa resistência. De certa forma existe uma boa relação entre as equações apresentadas, mas recomenda-se a utilização das equações (7a) e (7b) para determinar os fatores de redução da tensão de cedência para aços enformados a frio de classe S280GD+Z.

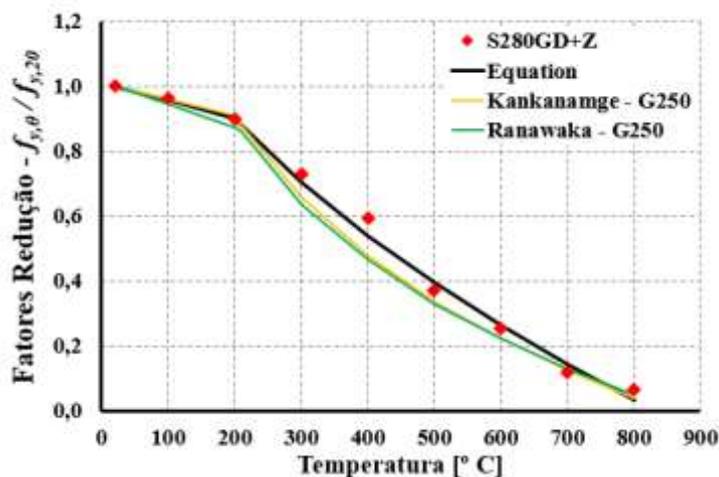


Figura 4.21: Proposta de equação para fatores de redução da tensão cedência e comparação com outros estudos.

4.3.2 Módulo de Elasticidade

Também para os fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura foram desenvolvidas equações por vários investigadores mas, uma vez que nenhuma destas corresponde com exatidão ao comportamento dos fatores de redução do módulo de elasticidade obtidos neste estudo, foram calculadas novas equações. Os resultados mostram que não existe influência da espessura nem da classe do aço na redução de fatores do módulo de elasticidade de tal forma que estes fatores não foram considerados no desenvolvimento das equações propostas. As equações (8a), (8b) e (8c) apresentam as equações propostas para os fatores de redução do módulo de elasticidade do aço S280GD+Z em que E_{θ} , é o módulo de elasticidade a elevadas temperaturas, E_{20} , o módulo de elasticidade à temperatura ambiente e θ a temperatura.

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

$$\frac{E_{\theta}}{E_{20}} = - 2.5 \times 10^{-4} \times \theta + 1.005 \quad (8a)$$

$101 \leq \theta \leq 700^{\circ}\text{C}$:

$$\frac{E_{\theta}}{E_{20}} = - 1.4 \times 10^{-3} \times \theta + 1.118 \quad (8b)$$

$701 \leq \theta \leq 800^{\circ}\text{C}$:

$$\frac{E_{\theta}}{E_{20}} = - 5.3 \times 10^{-4} \times \theta + 0.509 \quad (8c)$$

Da Figura 4.22 podemos observar a comparação entre a equação calculada no presente estudo e as equações desenvolvidas por Kankanamge (2011) e Ranawaka (2009). Verifica-se que as equações desenvolvidas por estes autores apresentam duas regiões lineares: 20-200 e 201-800°C e que a proposta de equação calculada no presente estudo apresenta três regiões lineares: 20-100; 101-700 e 701-800°C. É possível observar ainda, que em comparação aos outros investigadores, as equações calculadas apresentam um comportamento dos fatores de redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura para o aço enformado a frio S280GD+Z mais conservador em quase todos os patamares de temperatura, exceto para os 100°C. De um modo geral, a diferença entre estas equações não excede os 10% o que demonstra a concordância entre os estudos realizados para o aço enformado a frio de classe reduzida.

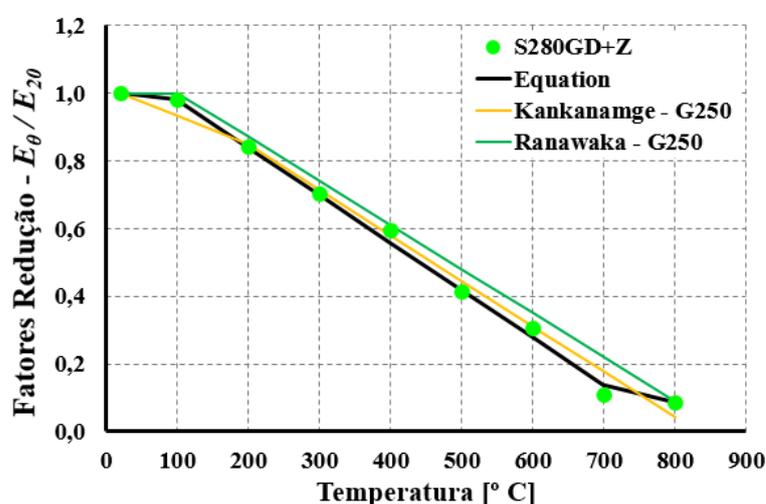


Figura 4.22: Proposta de equação para fatores de redução do módulo de elasticidade do aço enformado a frio S280GD+Z e comparação com outros estudos.

4.3.3 Modelos Ramberg-Osgood

Existem vários modelos para obtenção das curvas tensão-extensão utilizadas para compreender melhor a evolução das propriedades mecânicas dos materiais com a temperatura. Em muitos estudos realizados por outros investigadores são utilizados os modelos de Ramberg-Osgood que diferem dos modelos apresentados pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010). No presente estudo foram obtidas as curvas tensão-extensão com os modelos propostos por Ramberg-Osgood para aços laminados a quente e aços inoxidáveis e os modelos apresentados pela NP EN 1993-1-2 (2010) para aços laminados a quente com e sem endurecimento a elevadas temperaturas.

A equação (9) utilizada neste estudo no cálculo da relação tensão-extensão com as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente, definem o modelo de cálculo de Ramberg-Osgood (1943) para aços.

$$\varepsilon_T = \frac{f_T}{E_T} + 0.002 \left(\frac{f_T}{f_{y,T}} \right)^{n_T} \quad (9)$$

A equação (10) representa o modelo de cálculo de Ramberg-Osgood (1943) usado por Kankanamge e Mahendran (2011) considerando um fator $\beta = 0.86$.

$$\varepsilon_T = \frac{f_T}{E_T} + \beta \left(\frac{f_{y,T}}{E_T} \right) \left(\frac{f_T}{f_{y,T}} \right)^{n_T} \quad (10)$$

Para a equação (9) foi utilizada a equação (11) e os seus valores podem ser visíveis no Quadro 4.3.

$$n_T = \frac{\log 0,002/\varepsilon_u}{\log f_{0,2}/f_t} \quad (11)$$

	Temperatura (°C)								
	20	100	200	300	400	500	600	700	800
n_T	14,602	13,724	8,586	8,354	10,411	13,398	47,024	16,114	11,706

Quadro 4.3: Valor do parâmetro n_T considerado para cada patamar de temperatura

A Figura 4.23 apresenta as curvas de relação tensão-extensão obtidas neste estudo segundo o modelo de Ramberg-Osgood (1943) e comparação com os modelos apresentados por vários investigadores, também estes, obtidos segundo o modelo de Ramberg-Osgood (1943). Também o modelo proposto no presente estudo para as curvas de relação tensão-extensão encontra-se representado na Figura 4.23.

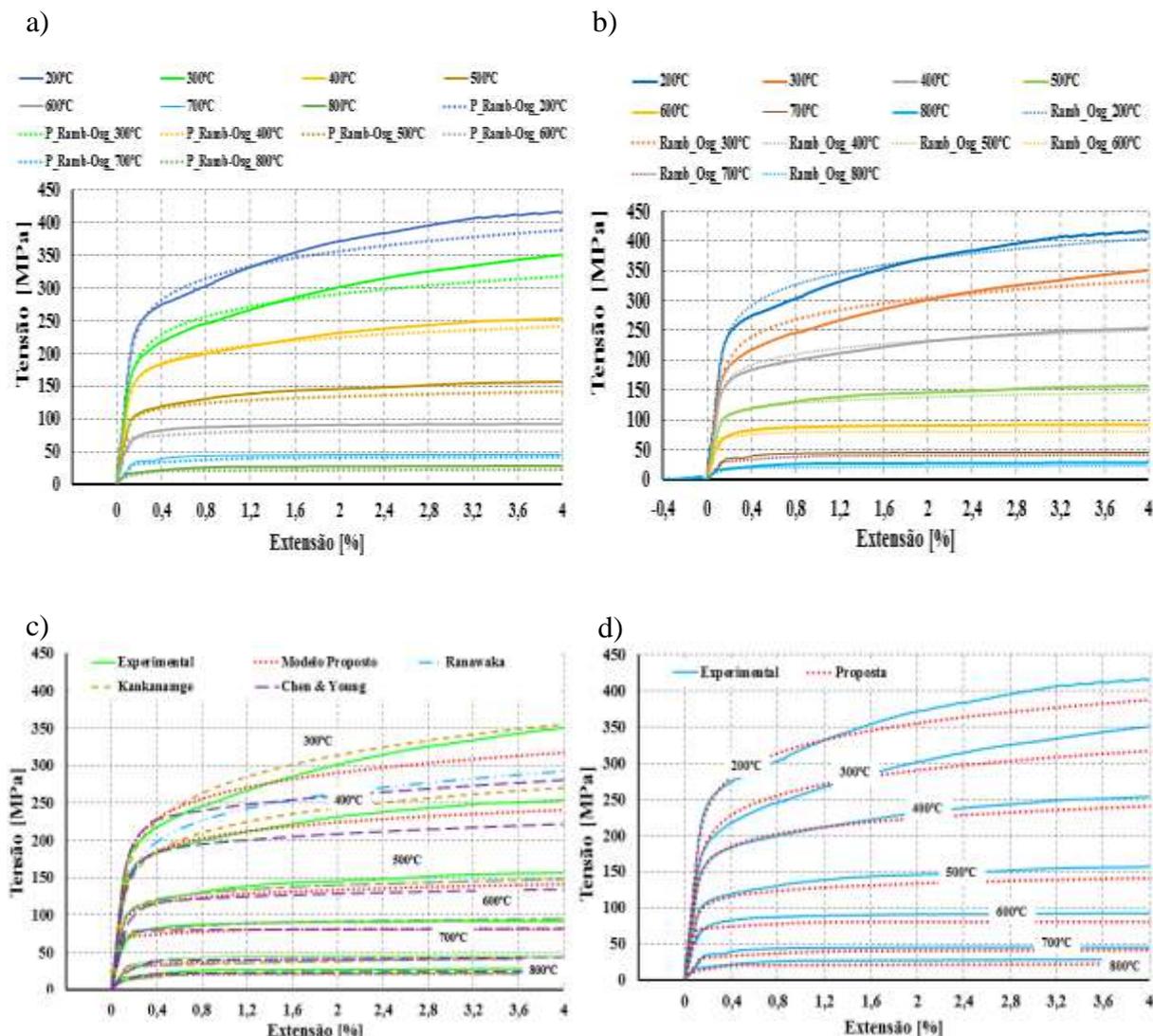


Figura 4.23: Curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente em comparação com: a) as obtidas através do modelo proposto por Ramberg-Osgood (1943) (Equação 9); b) as obtidas através do modelo de Kankanamge e Mahendran (2011) (Equação 10); c) os modelos propostos por outros investigadores; d) o modelo proposto neste estudo.

Na Figura 4.23 a) observa-se que as curvas obtidas através dos modelos de Ramberg-Osgood (1943) apresentam grande coincidência com os resultados obtidos experimentalmente para extensões iniciais, mas que ao longo da extensão o modelo de Ramberg-Osgood (1943) apresenta valores um pouco menores. Note-se que para os patamares de 200°C e 300°C até uma extensão de 1.2%, o modelo de Ramberg-Osgood (1943) apresenta valores um pouco superiores às obtidas experimentalmente e que, para extensões maiores ocorre uma troca onde se visualiza a maior diferença entre estas curvas.

Da comparação dos resultados obtidos experimentalmente, o modelo proposto neste estudo e os modelos apresentados noutros estudos (Figura 4.23 c)), podemos observar que todos estes estudos apresentam resultados bastante próximos ou mesmo coincidentes para elevadas temperaturas. É visível que os modelos propostos por Kankanage e Mahendran (Kankanage e Mahendran, 2011), para os patamares de 300°C e 400°C apresentam curvas com valores um pouco superiores às curvas do modelo proposto e valores inferiores para patamares de temperatura mais elevados. O modelo apresentado por Chen e Young (Chen e Young, 2007) é o que maior diferença apresenta em relação aos resultados obtidos experimentalmente, principalmente para temperaturas menos elevadas. Da Figura 4.23 c) visualiza-se também que o modelo proposto por Ranawaka e Mahendran (2009) apresenta valores bastante superiores para o patamar de 400°C mas, a partir do patamar de 500°C e para os restantes patamares, apresenta valores ligeiramente inferiores.

A Figura 4.23 d) apresenta o modelo proposto neste estudo, obtido através dos modelos de cálculo de Ramberg-Osgood (1943). Em comparação aos resultados obtidos experimentalmente, podemos observar que o modelo proposto apresenta com boa exatidão o comportamento das propriedades mecânicas do aço enformado a frio S280GD+Z a elevadas temperaturas, principalmente para valores de extensão reduzidos que são os mais importantes para o dimensionamento de elementos estruturais neste material.

4.3.4 Comparação com os modelos apresentados pela NP EN 1993-1-2:2010 para aços com e sem endurecimento

Da Figura 4.24 a) e b) observa-se que dos dois modelos propostos pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010) para o cálculo das curvas tensão-extensão, é o modelo apresentado para aços de carbono endurecido (Figura 4.24 b)) que melhor define o comportamento das propriedades mecânicas do aço enformado a frio a elevadas temperaturas obtido experimentalmente. Observa-se da Figura 4.24 b) que este modelo apresenta curvas tensão-extensão muito conservativas em relação às curvas obtidas experimentalmente. Como podemos comparar, a curva preconizada pelo modelo da EN 1993-1-2:2010 (2010) para o patamar de 300°C apresenta valores mais reduzidos que a curva obtida experimentalmente para o patamar de 400°C, observa-se ainda que os pontos de limite de proporcionalidade entre a fase elástica e plástica encontram-se aproximadamente no mesmo patamar de tensão, tanto para o modelo da norma como para os resultados obtidos experimentalmente, com a diferença de os primeiros apresentarem extensões um pouco superiores.

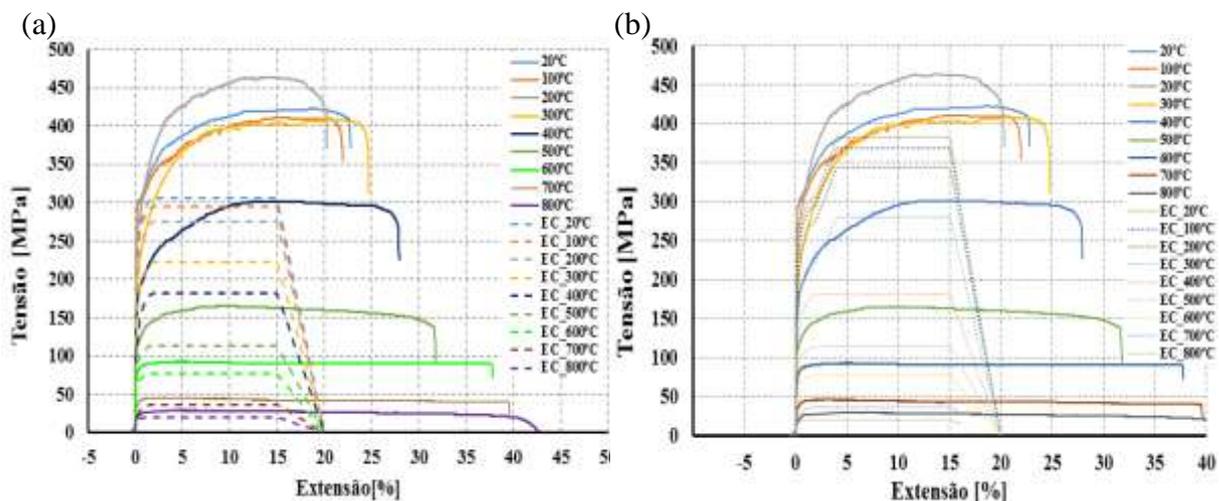


Figura 4.24: Curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente em comparação com: a) as obtidas através do modelo proposto pela NP EN 1993-1-2 (2010) para aços laminados; b) as obtidas através do modelo proposto pela NP EN 1993-1-2 (2010) para aços laminados com endurecimento.

4.4 Modelos Preditivos para as Propriedades Térmicas

4.4.1 Condutividade Térmica

Uma vez que os resultados obtidos apresentam características diferentes para os aços enformados a frio em relação ao NP EN 1993-1-2:2010 (2010), é proposto neste estudo uma nova equação (12) que define a redução da condutividade térmica com a evolução da temperatura para o aço enformado a frio S280GD+Z. Note-se que esta equação é definida apenas por uma região linear dos 20-800°C como é visível na Figura 4.25.

$20 \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$:

$$\lambda_a = - 3.33222 \times 10^{-2} \times \theta + 65.2062 \text{ (W/mK)} \quad (12)$$

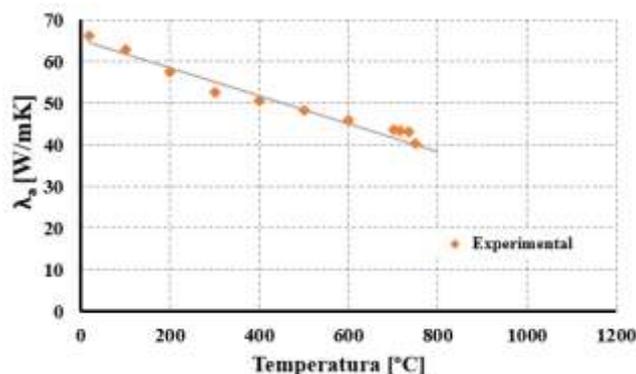


Figura 4.25: Proposta para a condutividade térmica em função da temperatura.

4.4.2 Calor Específico

Da comparação realizada através de Figura 4.19, verifica-se que as equações propostas pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010) para o calor específico em função da temperatura de aços laminados a quente definem bem o comportamento do calor específico do aço enformado a frio a elevadas temperaturas, de tal forma que, neste estudo não são propostas novas equações para esta propriedade térmica.

4.4.3 Expansão Térmica

Também para a expansão térmica são propostas novas equações que melhor definem o seu comportamento (13a), (13b) e (13c). Na Figura 4.26 podemos observar o modelo proposto nesta dissertação para a extensão térmica em comparação com os apresentados nas normas e propostos por outros investigadores.

$20 \leq \theta \leq 740^\circ\text{C}$:

$$\frac{\Delta l}{l} = 5 \times 10^{-9} \times \theta^2 + 1 \times 10^{-5} \times \theta - 0.0005 \quad (13a)$$

$741 \leq \theta \leq 870^\circ\text{C}$:

$$\frac{\Delta l}{l} = 1.10228 \times 10^{-2} \quad (13b)$$

$871 \leq \theta \leq 950^\circ\text{C}$:

$$\frac{\Delta l}{l} = 2.259 \times 10^{-5} \times \theta - 9.05627 \times 10^{-3} \quad (13c)$$

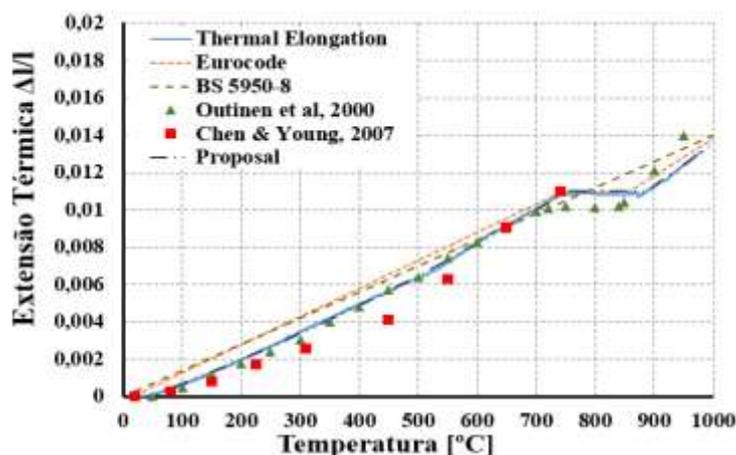


Figura 4.26: Proposta para a extensão térmica em função da temperatura.

4.5 Caso de Estudo: Influência das Propriedades Mecânicas e Térmicas

No âmbito do projeto de investigação “FIRE_COLDFSTEEL - Análise Experimental e Numérica de Elementos de Aço Enformado a Frio Sujeitos a Incêndio”, com referência PTDC/ECM/116859/2010, a presente dissertação inclui a análise do comportamento de elementos estruturais (colunas com secção em C) de aço enformado a frio S280GD+Z sujeito a elevadas temperaturas, através de simulações numéricas com o programa de elementos finitos ABAQUS (2013). Estas simulações têm como objetivo a comparação da influência das propriedades mecânicas e térmicas do aço S280GD+Z obtidas experimentalmente e os modelos apresentados pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010) em função da temperatura.

Neste trabalho de investigação, a modelação numérica de colunas de aço enformado a frio S280GD+Z à compressão foi realizada com o programa de elementos finitos ABAQUS (versão 6.10-1) através da técnica de integração implícita (ABAQUS/Standard). O proverte a modelar consiste numa coluna com secção transversal em C (150 mm de altura, 43 mm de banzo e 15 mm de enrijecedor), com 2950 mm de comprimento e 2.5 mm de espessura. O tipo de elemento finito considerado no comportamento estrutural de colunas foi o S4R, uma vez que este pode ser utilizado tanto para análise de cascas espessas como finas e é um elemento corretamente referenciado na literatura para análise estrutural de elementos de aço enformado a frio. O elemento S4R é, assim, do tipo casca de quatro nós com interpolação de primeira ordem ou linear, com deformação finita de membrana e integração reduzida. A integração reduzida, em algumas análises, tem a vantagem de reduzir o tempo de cálculo porque é um elemento com um único ponto de integração no centro do elemento. Este possui ainda seis graus de liberdade em cada nó (três componentes de translação e três componentes de rotação), é um elemento que permite variações da espessura e considera o efeito de deformabilidade por esforço transversal.

As colunas de aço enformado a frio foram discretizadas numa malha de elementos finitos com uma dimensão aproximada de 10x10 mm.

Na modelação do material das colunas de aço enformado a frio S280GD+Z foram consideradas duas situações distintas. Na primeira situação utilizou-se as propriedades mecânicas e térmicas obtidas experimentalmente no presente estudo em função da temperatura (modelos propostos para as curvas de relação tensão-extensão, fatores de redução da tensão de cedência e fatores de redução do módulo de elasticidade). Na segunda situação foram utilizados os modelos propostos pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010) para as propriedades mecânicas (curvas de relação tensão-extensão, fatores de redução da tensão de cedência e fatores de redução do módulo de elasticidade) e propriedades térmicas em função da temperatura, sendo que, para modelação das propriedades mecânicas foram usados os valores da tensão de cedência e módulo de elasticidade obtidos experimentalmente à temperatura ambiente. É importante referir que em ambas as situações foi introduzido no modelo o comportamento reológico real do material, ou seja, tensões e extensões reais e que a massa volúmica e coeficiente de Poisson do aço foram contabilizados com os respetivos valores de 7850 kg/m³ e 0.3. Note-se ainda que o carregamento mecânico foi efetuado por meio de uma restrição axial à dilatação térmica de 3 kN/mm, localizada no centro de gravidade do perfil transversal C da coluna de aço enformado a frio S280GD+Z.

Os métodos considerados na análise de elementos finitos abrangem a análise de cargas elásticas de instabilidade para determinar os modos de instabilidade e as imperfeições geométricas. Por conseguinte, foi realizada uma análise estática nas colunas de aço enformado a frio considerando a não-linearidade geométrica do material e introduzindo as temperaturas monitorizadas nos ensaios experimentais, ao longo do comprimento da coluna e em diferentes pontos da secção transversal da mesma.

Da Figura 4.27 podemos observar os resultados obtidos da análise numérica à coluna de aço enformado a frio S280GD+Z. Da comparação dos resultados obtidos podemos visualizar que o modelo numérico com base nas propriedades da NP EN 1993-1-2:2010 (2010) é demasiado conservativo em relação aos resultados experimentais e ao modelo numérico usado com base nas propriedades determinadas experimentalmente. Da análise destes resultados podemos concluir que um dos fatores mais relevantes para o comportamento de estruturas de aço enformado a frio em situação de incêndio com dilatação térmica restringida é a extensão térmica. Os valores mais elevados da extensão térmica de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010 (2010) em relação aos obtidos experimentalmente (Figura 4.20), leva a que as forças de restrição geradas pelo aumento de temperatura para o modelo numérico de acordo com a norma, sejam significativamente superiores aos resultados experimentais, para o mesmo patamar de

temperatura ($T=200^{\circ}\text{C}$: P/P_0 (NP EN 1993-1-2) = 2.0%; P/P_0 (S280GD+Z) = 2.4%), que traduz num aumento de 20%. A relação P/P_0 representa a relação entre a carga inicialmente aplicada (P_0) e as forças de restrição geradas ao longo do ensaio por dilatação térmica da coluna de aço enformado a frio (P).

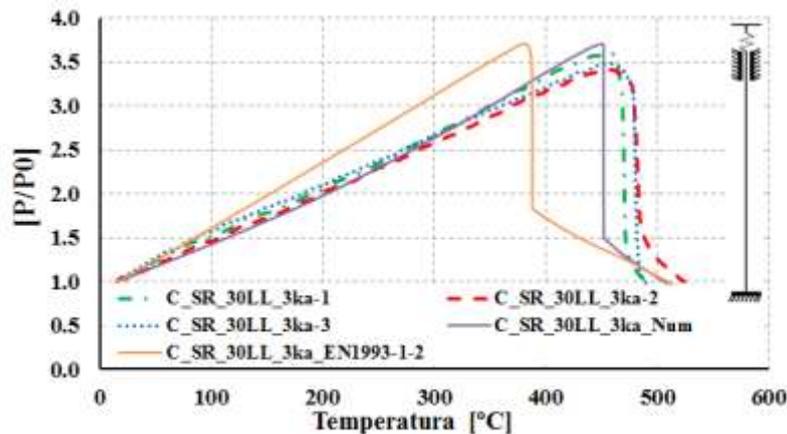


Figura 4.27: Evolução da relação P/P_0 . Comparação entre ensaios experimentais e simulações numéricas.

Na Figura 4.28 observam-se os modos de instabilidade obtidos nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas. O modo de instabilidade predominante nos dois casos é a interação entre a encurvadura global em torno do eixo de menor inércia a instabilidade distorcional a meia altura da coluna de aço enformado a frio. Facilmente se observa a concordância entre as deformadas obtidas experimentalmente e através de simulação numérica.

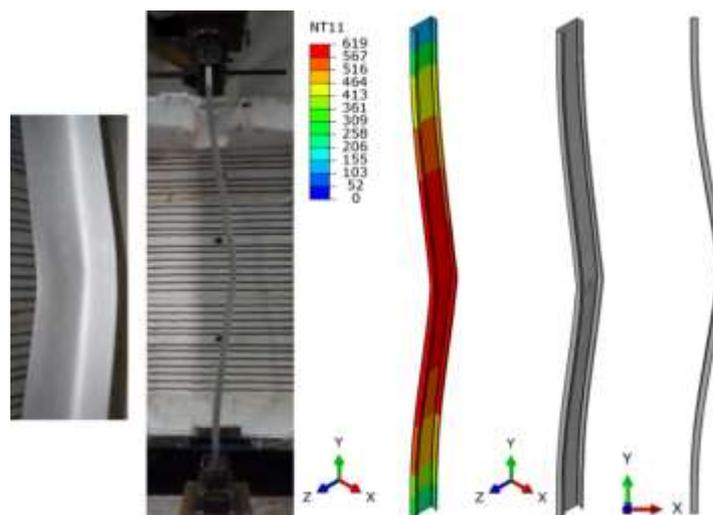


Figura 4.28: Deformada final observada nos ensaios experimentais e através de simulação numérica.

5 CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Nesta dissertação foram apresentados os detalhes da investigação experimental realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra sobre a avaliação das propriedades mecânicas e térmicas do aço enformado a frio S280GD+Z a temperaturas elevadas. A investigação experimental realizada abarcou, também, a comparação dos resultados obtidos com estudos desenvolvidos por outros investigadores e com os modelos propostos atualmente pelas normas de dimensionamento. A análise experimental englobou vários ensaios à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas, que permitiram avaliar a evolução das propriedades mecânicas e das propriedades térmicas do aço enformado a frio em estudo.

A avaliação das propriedades mecânicas do aço enformado a frio S180GD+Z com 2.5 mm de espessura, foi realizada através de ensaios de tração para temperaturas dos 20°C aos 800°C em regime estacionário. Com base na relação tensão-extensão obtida dos ensaios para cada patamar de temperatura foi determinada, a tensão de cedência, o módulo de elasticidade, a tensão última, a tensão limite de proporcionalidade e calculados os fatores de redução destas propriedades para os vários níveis de temperatura.

Os resultados obtidos experimentalmente dos fatores de redução das propriedades mecânicas foram comparados às normas de dimensionamento, NP EN 1993-1-2:2010 (2010), BS 5950-8:1990 (1990) e AS4100:1998 (1998). Desta comparação concluiu-se que para aços enformados a frio com classe de resistência baixa, como o S280GD+Z, a NP EN 1993-1-2 (2010) apresenta fatores de redução da tensão de cedência não conservativos para todos os patamares de temperatura. A mesma conclusão foi obtida para os fatores de redução do módulo de elasticidade e da tensão limite de proporcionalidade. Este estudo mostrou que a BS 5950-8 (1990) não apresenta modelos para os fatores de redução do módulo de elasticidade nem da tensão limite de proporcionalidade e a AS 4100 (1998) não apresenta modelos para a tensão. É importante referir que, os fatores de redução propostos pela NP EN 1993-1-2 (2010), entre as três normas apresentadas, são os que apresentam um comportamento mais próximo dos fatores de redução obtidos experimentalmente. Concluiu-se ainda que as normas de dimensionamento que propõe a utilização da tensão de cedência para 1.5% e 2.0% da extensão total não são

recomendadas, uma vez que, de acordo com os resultados obtidos experimentalmente a tensão de cedência relativa a estas extensões aproxima-se da tensão última e o comportamento de ambas a elevadas temperaturas é bastante semelhante.

A degradação das propriedades mecânicas em função da temperatura foi comparada com os estudos desenvolvidos por vários investigadores, (Outinen et al., 2000, Chen e Young, 2007, Ranawaka e Mahendran, 2009, Kankanamge e Mahendran, 2011, Mecozzi e Zhao, 2005 e Lee et al., 2003). Desta comparação concluiu-se que os estudos desenvolvidos por Ranawaka e Mahendran (2009) e Kankanamge e Mahendran (2011) para aços enformados a frio de baixa classe de resistência, são os que se enquadram melhor no comportamento da tensão de cedência do aço enformado a frio S280GD+Z a elevadas temperaturas, mas com valores conservativos entre os 300°C e os 500°C. Foi possível ainda concluir que os fatores de redução do módulo de elasticidade do presente estudo apresentam comportamentos semelhantes aos aços enformados a frio investigados por estes autores, independentemente da classe de resistência ou espessura do provete, com exceção aos estudos de Mecozzi e Zhao (2005) e Chen e Young (2007). Os resultados obtidos experimentalmente corroboram as conclusões de Kankanamge e Mahendran (2011) onde afirmam que os modelos apresentados por Mecozzi e Zhao (2005) são demasiado conservativos, tanto para os fatores de redução da tensão de cedência, como para os fatores de redução do módulo de elasticidade. É importante referir que observou-se a existência de uma singularidade da tensão última no patamar dos 200°C, com o aumento da resistência do aço de 10% como observou também Kankanamge e Mahendran (2011), para aços enformados a frio de baixa resistência e Martins (2012), para aços laminados a quente de alta resistência. Concluiu-se que este fenómeno que ocorre para patamares de temperatura próximos de 200°C, é efeito da interação entre os deslocamentos efetuados pelos átomos e que tem como nome *dynamic strain ageing* (Martins, 2012).

De um modo geral, concluiu-se que, nem os modelos apresentados pelas normas de dimensionamento, nem as propostas dos estudos precedentes apresentam fatores de redução das propriedades mecânicas exatos com os obtidos experimentalmente neste estudo, de modo que, novas equações preditivas foram desenvolvidas e propostas nesta dissertação para os fatores de redução da tensão de cedência e do módulo de elasticidade em função da temperatura. Também neste estudo, foram propostas novas equações para as curvas tensão-extensão fundamentadas pelos modelos de Ramberg-Osgood (1943) e comparadas com os modelos propostos por outros investigadores. Observou-se que os modelos propostos por Kankanamge e Mahendran (2011) e Ranawaka e Mahendran (2009) apresentam boa concordância com as curvas tensão-extensão obtidas para o aço S280GD+Z a elevadas temperaturas. Os modelos de curvas tensão-extensão em função da temperatura apresentados pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010), não apresentam

boa concordância com as curvas obtidas experimentalmente, nem mesmo quando é considerado o endurecimento do aço na formulação original (Anexo A, NP EN 1993-1-2:2010, 2010)).

Relativamente às propriedades térmicas do aço enformado a frio S280GD+Z, concluiu-se que os modelos propostos pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010), são conservativos para a extensão térmica e para a condutividade térmica mas, para o calor específico os resultados obtidos experimentalmente apresentam um comportamento a elevadas temperaturas muito semelhante com o estipulado na norma portuguesa. Desta forma, foram propostas novas equações para a extensão térmica e para a condutividade térmica do aço em estudo em função da temperatura.

Em suma, da análise numérica realizada com recurso ao método dos elementos finitos e ao *software* ABAQUS (2013), constata-se que a utilização dos modelos propostos no âmbito deste estudo garantem resultados numéricos mais aproximados aos registados experimentalmente.

Finalmente, a investigação experimental levada a cabo no âmbito desta dissertação de mestrado representa um avanço considerável na compreensão do comportamento das propriedades mecânicas e térmicas do aço enformado a frio S280GD+Z sujeito à ação do fogo, mas novos estudos experimentais e numéricos são necessários para responder às muitas questões que o complexo comportamento dos elementos estruturais enformados a frio a temperaturas elevadas suscita. Neste sentido, os resultados obtidos para as propriedades do aço S280GD+Z em função da temperatura, irão ser usados na calibração e validação de modelos numéricos no programa de elementos finitos ABAQUS para a análise estrutural e térmica de elementos estruturais em aço enformado a frio S280GD+Z, inseridos no âmbito do projeto de investigação “FIRE_COLDFSTEEL - Análise Experimental e Numérica de Elementos de Aço Enformado a Frio Sujeitos a Incêndio” com referência PTDC/ECM/116859/2010. Adicionalmente os resultados obtidos neste estudo serão utilizados para avaliar a segurança dos fatores de redução para a tensão de cedência, módulo de elasticidade e tensão de proporcionalidade propostos pela NP EN 1993-1-2:2010, assim como, avaliar uma proposta de novas curvas tensão-extensão para o aço enformado a frio em função da temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AS 4100:1998. “*Steel Structures. Standard Australian Limited*”. Sydney, Australia, 1998

BS 5950-8:1990. “*Structural use of steelwork in building, Part 8: Code of practice for fire resistant design*”. London: BSI, 1990

CHEN, J. e YOUNG, B. (Chen e Young 2007). “Experimental investigation of cold-formed steel material at elevated temperatures”. *Thin-Walled Structures*. 45 (2007) pp. 96-110

CRAVEIRO, H., (Craveiro, 2013). “*Comportamento ao Fogo de Elementos Comprimidos de Aço Enformado a Frio*”. Coimbra: 2013, Projeto de Tese apresentado no âmbito do Doutoramento em Engenharia de Segurança ao Incêndio, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

EN 10002-1:2001. “*Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at ambient temperature*”. Brussels, 2001

EN 10002-5:1991. “*Metallic materials – Tensile testing – Part 5: Method of test at elevated temperature*”. Brussels, 1991

HOT DISK AB. (2014), <http://www.hotdiskinstruments.com/>, Thermal Conductivity Measurements, Sweden

HOT DISK, (Hot Disk, 2013). “Hot Disk Thermal Constants Analyser – Instruction Manual”. Revision date 2013-06-26, 2013

ISO 22007-2:2008, “*Plastics-Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity-Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method*”, 2008

KANKANAMGE, D. e MAHENDRAN, M. (Kankanamge e Mahendran 2011). “Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures”. *Thin-Walled Structures*. 49 (2011). pp. 26-44

MARTINS, D. (Matins, 2012). “*Variação das Propriedades Mecânicas e Térmicas do aço com a Temperatura*”, Coimbra, 2012. Documento apresentado para obtenção do grau Mestre em

Engenharia Civil na Especialidade de Mecânica Estrutural, Faculdade Ciências e Tecnologia,
Universidade de Coimbra

MECOZZI, E. e ZHAO, B. (Mecozzi e Zhao 2005). “Development of stress-strain relationships of cold-formed lightweight steel at elevated temperatures”. In *Proceedings of Eurosteel 2005, 4th European Conference on Steel and Composite Structures*. Maastricht (Netherlands), 2005. pp. 5.1-41-5.1-49

MOEN, C.D., IGUSA T. e SCHAFER, B.W. (Moen et al. 2008). “Prediction of residual stresses and strains in cold-formed steel members”. *Thin-Walled Structures*, 46 (2008) pp. 1274-1289

NP EN 1993-1-2:2010. *Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço, Parte 1-2: Regras gerais verificação da resistência ao fogo*. ECS - Versão Portuguesa, Março 2010.

OUTINEN, J. (Outinen 2006). “Mechanical properties of structural steels at elevated temperatures and after cooling down”. In *Proceedings of the Fire and Materials Conference*. San Francisco, USA, 2006. 15 p.

OUTINEN, J. e MÄKELÄINEN, P. (Outinen e Mäkeläinen 2002). “Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down”. In *Proceedings of the 2nd International Workshop of Structures in Fire*, Christchurch, New Zealand, 2002. pp. 273- 290

OUTINEN, J., KAITILA, O. e MÄKELÄINEN, P. (Outinen et al. 2000). “A study for the development of the design of steel structures in fire conditions”. In *Proceedings of the 1st International Workshop of Structures in Fire*, Copenhagen, Denmark, 2000. pp. 267-281

PIRES, J. (Pires 2006). *Material didático, Tecnologias da Produção*. Castelo Branco: Instituto Politécnico de Castelo Branco, Escola Superior de Tecnologia, 2006. 19 p.

QUACH, W.M., TENG, J.G., e CHUNG, K.F. (Quach et al. 2004). “Residual stresses in steel sheets due to coiling and uncoiling: a closed-form analytical solution”. *Engineering Structures*. 26 (2004) pp. 1249-1259

RANAWAKA, T. e MAHENDRAN, M. (Ranawaka e Mahendran 2009). “Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures”. *Fire Safety Journal*. 44 (2009) pp. 219-229

REZENDE, P.G. (Rezende 2005). *Análise da resposta numérica de ligações aparafusadas de chapas finas e perfis formados a frio*. S. Carlos (Brasil), 2005. 133 p. Tese para o grau de Mestre em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de S. Paulo

RHODES, J. (Rhodes 1991). *Design of cold-formed steel members*. New York: Elsevier Applied Science, 1991. 409 p.

RONDAL, J. e DUBINA, D. (Rondal e Dubina 2005). *Light gauge metal structures: recent advances*. Udine: International Centre for Mechanical Sciences, 2005. 259 p.

SCHAFFER, B.W. e PEKÖZ, T. (Schafer e Peköz 1998). “Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses”. *Journal of Constructional Steel Research*. 47 (1998) pp. 193-210

SILVESTRE, N. e CAMOTIM, D. (Silvestre e Camotim 2006). “Comportamento de estruturas de aço enformado a frio e dimensionamento de acordo com o EC3-1-3”. In *Utilização de produtos em aço enformado a frio na construção: LKS Jornada Técnica, Porto*. Bruxelles: LKS, 2006. pp. 33-54

SILVESTRE, N. e CAMOTIM, D. (Silvestre e Camotim 2010). “Construção em aço leve”. *Revista da Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista*. 20 (2010). pp.10-12

VERÍSSIMO, H. (Veríssimo 2008). *Dimensionamento de elementos estruturais de aço enformados a frio de acordo com o Eurocódigo 3*. Lisboa, 2008. 252 p. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

RAMBERG, W. e OSGOOD, WR. (Ramberg-Osgood, 1943). “*Description of stress-strain curves by three parameters.*” NACA Technical Note 902, 1943

YU, W. (Yu 2000). *Cold-formed steel design*. 3th ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2000. xi, 756 p.

ZHANG, H., LI M., FANG, W., DAN, D., LI, Z., TAO, W., (Zhang et al. 2014). “A numerical study on the theoretical accuracy of film thermal conductivity using transient plane source method”. *Applied Thermal Engineering*, (2014) pp. 1-8

ANEXO A – RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A1.1 PROVETES DE ENSAIO

Ensaio	Temperatura (°C)	Espessura - e (mm)	b - 1 (mm)	b - 2 (mm)	b - 3 (mm)	b - média (mm)	Lc - 6 (mm)	LO - 5 (mm)
ET_20-1	20	2,5	12,4	12,5	12,5	12,5	106,0	50,8
ET_20-2		2,5	12,7	12,6	12,6	12,6	97,7	50,8
ET_20-3		2,5	12,7	12,6	12,6	12,6	97,5	50,8
ET_100-1	100	2,5	12,5	12,5	12,6	12,5	100,1	50,8
ET_100-2		2,5	12,7	12,6	12,6	12,6	98,6	50,8
ET_100-3		2,5	12,7	12,6	12,5	12,6	100,4	50,8
ET_200-1	200	2,5	12,6	12,6	12,6	12,6	100	50,8
ET_200-2		2,5	12,6	12,6	12,5	12,6	100,1	50,8
ET_200-3		2,5	12,6	12,6	12,5	12,6	100,1	50,8
ET_300-1	300	2,5	12,7	12,5	12,5	12,6	97,9	50,8
ET_300-2		2,5	12,5	12,5	12,5	12,5	98,1	50,8
ET_300-3		2,5	12,6	12,6	12,6	12,6	100	50,8
ET_400-1	400	2,5	12,5	12,3	12,4	12,4	97,9	50,8
ET_400-2		2,5	12,5	12,6	12,6	12,6	98	50,8
ET_400-3		2,5	12,5	12,5	12,5	12,5	99,8	50,8
ET_500-1	500	2,5	12,6	12,6	12,5	12,6	100,3	50,8
ET_500-2		2,5	12,6	12,7	12,5	12,6	100,1	50,8
ET_500-3		2,5	12,6	12,6	12,5	12,6	100	50,8
ET_600-1	600	2,5	12,5	12,5	12,5	12,5	100	50,8
ET_600-2		2,5	12,5	12,5	12,5	12,7	100	50,8
ET_600-3		2,5	12,3	12,4	12,4	12,6	98	50,8
ET_700-1	700	2,5	12,3	12,4	12,4	12,4	98	50,8
ET_700-2		2,5	12,4	12,4	12,4	12,4	98	50,8
ET_700-3		2,5	12,4	12,4	12,4	12,4	100,7	50,8
ET_800-1	800	2,5	12,4	12,4	12,3	12,4	100,4	50,8
ET_800-2		2,5	12,4	12,4	12,4	12,4	100,3	50,8
ET_800-3		2,5	12,4	12,4	12,4	12,4	99	50,8

Quadro A-1: Medições relevantes dos provetes de ensaio

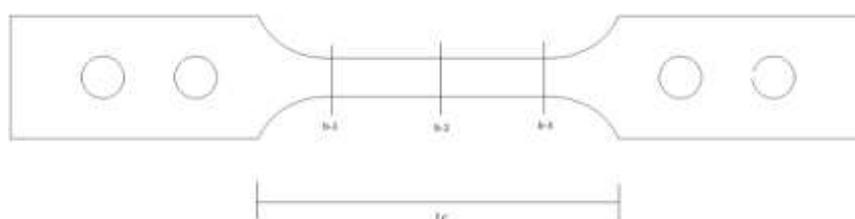
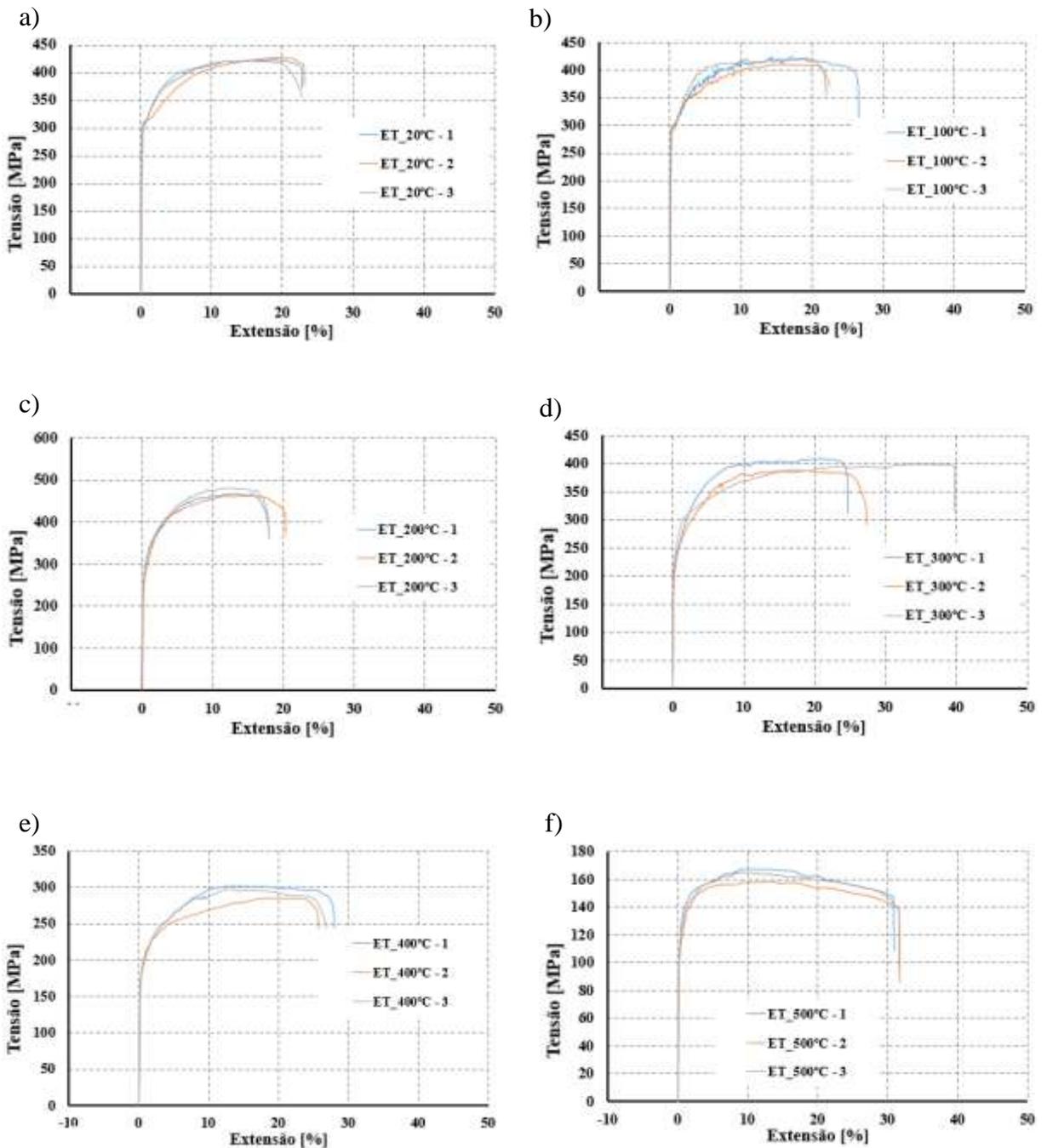


Figura A-1: Seções do provete referidas no Quadro A-1.

A1.2 CURVAS RELAÇÃO TENSÃO-EXTENSÃO



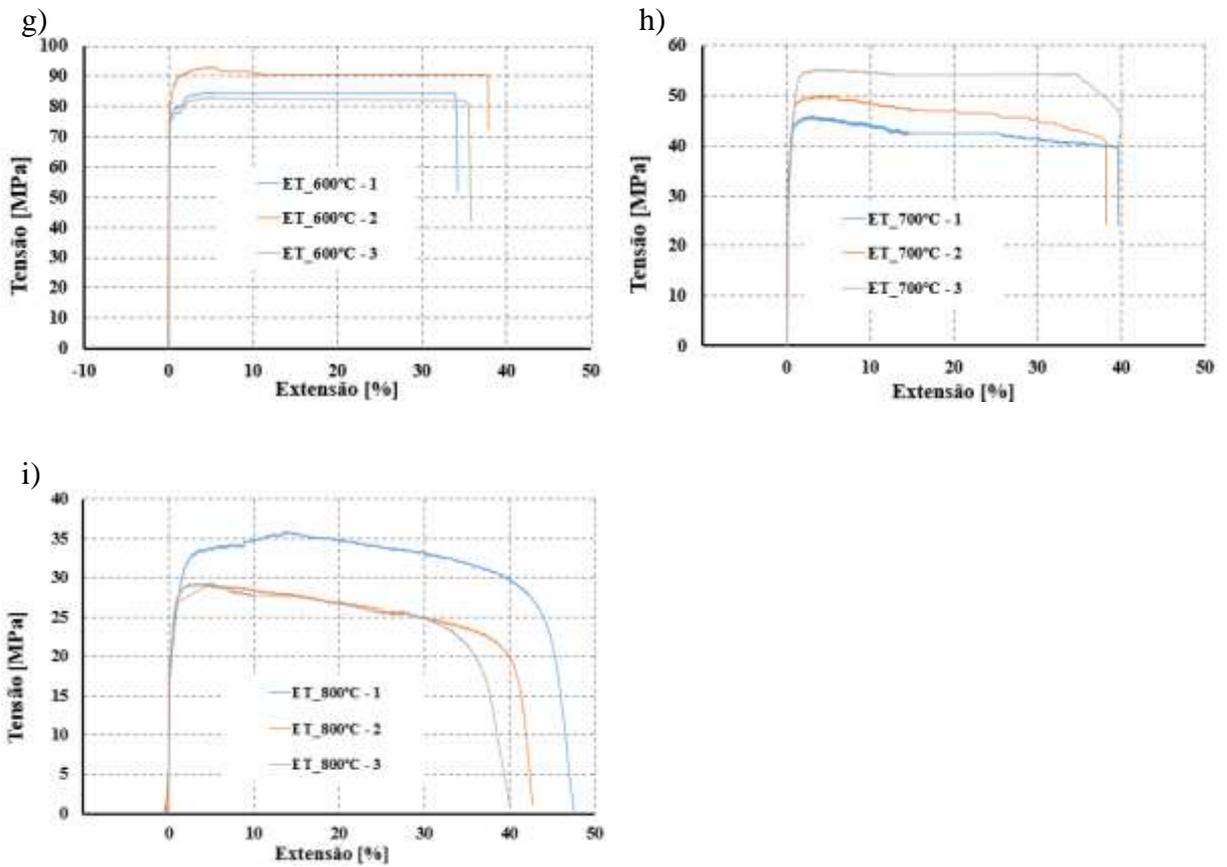


Figura A-2: Curvas de relação tensão-extensão dos três ensaios realizados para cada patamar de temperatura: a) 20°C; b) 100°C; c) 200°C; d) 300°C; e) 400°C; f) 500°C; g) 600°C h) 700°C; i) 800°C

A1.3 RESULTADOS OBTIDOS

Ensaio	Temperatura [°C]	$f_{y,0.2\%}$ [MPa]	Média	Desvio Padrão	$f_{y,0.5\%}$ [MPa]	Média	Desvio Padrão	$f_{y,1.5\%}$ [MPa]	Média	Desvio Padrão	$f_{y,2.0\%}$ [MPa]	Média	Desvio Padrão	
ET_20-1	20	302,54	306,81	3,70	304,98	309,06	4,42	336,47	331,26	10,57	348,74	342,41	13,27	
ET_20-2		308,92			313,76			319,09			327,16			372,66
ET_20-3		308,98			308,44			338,21			351,34			385,90
ET_100-1	100	296,83	295,24	5,20	299,74	297,17	4,15	324,39	325,29	1,66	339,90	342,33	3,07	
ET_100-2		299,46			299,38			324,27			341,79			372,66
ET_100-3		289,43			292,38			327,20			345,90			375,10
ET_200-1	200	275,71	275,75	3,05	295,67	292,31	9,24	351,91	352,53	3,72	367,91	371,89	3,66	
ET_200-2		272,73			281,86			349,16			372,66			
ET_200-3		278,82			299,40			356,52			375,10			
ET_300-1	300	212,57	223,57	9,52	226,02	237,61	11,07	281,52	284,66	16,70	301,60	298,18	12,67	
ET_300-2		229,23			238,73			269,75			284,16			308,79
ET_300-3		228,90			248,07			302,70			308,79			
ET_400-1	400	181,05	181,68	1,64	188,97	190,19	1,96	219,95	220,23	0,51	231,99	224,91	9,85	
ET_400-2		183,55			192,45			220,82			229,09			213,66
ET_400-3		180,45			189,14			219,91			213,66			
ET_500-1	500	113,64	113,67	3,15	128,54	122,49	6,19	146,61	142,73	3,81	150,52	146,44	3,80	
ET_500-2		110,53			116,18			139,00			142,99			145,82
ET_500-3		116,83			122,76			142,59			145,82			
ET_600-1	600	77,36	77,83	2,58	78,33	79,85	4,31	80,24	82,97	6,20	83,09	85,10	5,21	
ET_600-2		80,62			84,71			90,07			91,02			81,20
ET_600-3		75,52			76,50			78,60			81,20			
ET_700-1	700	38,31	36,34	1,95	41,48	40,32	1,07	44,83	49,10	4,39	45,60	49,83	4,51	
ET_700-2		36,28			40,13			48,86			49,31			54,57
ET_700-3		34,42			39,36			53,60			54,57			
ET_800-1	800	19,45	19,91	0,41	23,83	22,93	1,17	28,29	28,96	0,66	28,83	29,80	1,55	
ET_800-2		20,03			23,35			28,96			28,98			31,59
ET_800-3		20,24			21,60			29,62			31,59			

Quadro A-2: Resultados obtidos da tensão de cedência para os níveis de extensão de 0.2%, 0.5%, 1.5% e 2.0% em função da temperatura.

Ensaio	Temperatura [°C]	E [GPa]	Média	Desvio Padrão	fy [MPa]	Média	Desvio Padrão	fu [MPa]	Média	Desvio Padrão	fp [MPa]	Média	Desvio Padrão
ET_20-1	20	205,23	204,18	0,94	302,54	306,81	3,70	422,47	424,04	2,25	208,28	212,50	5,15
ET_20-2		203,90			426,61			210,97					
ET_20-3		203,42			423,04			218,24					
ET_100-1	100	195,52	200,11	4,14	296,83	295,24	5,20	416,10	415,49	4,88	204,93	209,25	5,23
ET_100-2		201,24			299,46			207,77					
ET_100-3		203,57			289,43			215,06					
ET_200-1	200	176,90	171,80	4,48	275,71	275,75	3,05	469,11	471,50	8,95	170,91	170,68	2,26
ET_200-2		168,48			272,73			172,81					
ET_200-3		170,03			278,82			168,31					
ET_300-1	300	144,73	143,59	6,41	212,57	223,57	9,52	407,70	397,41	10,58	132,10	136,37	3,86
ET_300-2		149,35			229,23			139,62					
ET_300-3		136,68			228,90			137,39					
ET_400-1	400	120,49	121,21	1,39	181,05	181,68	1,64	301,32	291,73	8,56	98,41	98,71	0,53
ET_400-2		120,34			183,55			99,32					
ET_400-3		122,81			180,45			98,39					
ET_500-1	500	84,07	84,54	0,95	113,64	113,67	3,15	170,97	165,85	4,81	78,50	80,25	1,62
ET_500-2		85,63			110,53			80,57					
ET_500-3		83,92			116,83			81,69					
ET_600-1	600	62,58	62,46	0,32	77,36	77,83	2,58	84,86	87,00	5,18	52,28	54,57	2,95
ET_600-2		62,71			80,62			53,53					
ET_600-3		62,10			75,52			57,90					
ET_700-1	700	22,11	22,21	0,33	38,31	36,34	1,95	46,09	50,48	4,61	18,15	19,26	1,06
ET_700-2		22,58			36,28			20,25					
ET_700-3		21,95			34,42			19,38					
ET_800-1	800	17,47	17,45	0,33	19,45	19,91	0,41	35,89	31,47	3,83	16,81	16,49	0,35
ET_800-2		17,12			20,03			16,12					
ET_800-3		17,77			20,24			16,54					

Quadro A-3: Resultados obtidos da tensão de cedência, módulo de elasticidade, tensão limite de proporcionalidade e tensão última em função da temperatura.

A2 PROPRIEDADES TÉRMICAS

A2.1 RESULTADOS OBTIDOS

Ensaio	Temperatura [°C]	Classe	Espessura [mm]	Condutividade Térmica	Média	Desvio Padrão	Difusividade Térmica	Média	Desvio Padrão	Calor Específico (MJ/m ³ .K)	Calor Específico (J/Kg.K)	Média	Média	Desvio Padrão
PT 20-1	20	S280GD+Z	2,5	66,276	66,380	0,164	19,703	19,709	0,058	3,354	428,50	3,368	429,041	0,004
PT 20-2				66,569			19,750			3,371	429,37			
PT 20-3				66,294			19,674			3,370	429,25			
PT 100-1	100			62,716	17,016	3,686	469,503	3,764	479,506	0,095				
PT 100-2				63,231	16,912	3,740	476,448							
PT 100-3				62,560	16,179	3,667	492,568							
PT 200-1	200			56,791	13,801	4,115	524,198	4,127	525,190	0,012				
PT 200-2				57,594	13,953	4,128	525,842							
PT 200-3				58,301	14,089	4,138	527,150							
PT 300-1	300			53,253	12,712	4,189	538,675	4,332	551,652	0,169				
PT 300-2				53,865	12,565	4,288	546,189							
PT 300-3				50,914	11,266	4,519	575,691							
PT 400-1	400			50,159	10,284	4,877	621,327	4,887	622,487	0,019				
PT 400-2				50,640	10,391	4,873	620,824							
PT 400-3				51,063	10,390	4,909	625,310							
PT 500-1	500	48,130	8,770	5,488	699,084	5,503	700,995	0,032						
PT 500-2		47,248	8,528	5,540	705,741									
PT 500-3		49,415	9,016	5,481	698,159									
PT 600-1	600	45,902	6,205	7,397	942,318	7,152	911,033	0,534						
PT 600-2		45,981	7,034	6,539	832,968									
PT 600-3		45,946	6,111	7,519	967,814									
PT 700-1	700	43,370	5,680	7,376	939,574	8,088	1050,257	0,697						
PT 700-2		43,772	5,392	8,118	1034,112									
PT 700-3		43,985	5,017	8,769	1117,088									
PT 750-1	750	40,433	3,666	10,485	1335,690	9,658	1250,341	0,734						
PT 750-2		40,327	4,439	9,084	1167,251									
PT 750-3		40,246	4,279	9,405	1198,081									

Quadro A-4: Resultados obtidos da condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico em função da temperatura.