

Diogo Sabino São Pedro

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS A TEMPERATURAS ELEVADAS DE AÇOS ENFORMADOS A FRIO

ASSESSMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF COLD-FORMED STEEL AT ELEVATED TEMPERATURES

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,
orientada pelo Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago e pelo Professor Doutor Hélder David da Silva Craveiro

Coimbra, Março, 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

Diogo Sabino São Pedro

Avaliação das propriedades mecânicas a temperaturas elevadas de aços enformados a frio

Assessment of mechanical properties of cold-formed steel at elevated temperatures

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,
orientada pelo Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago e pelo Professor Doutor Helder David da Silva Craveiro

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, Março de 2018

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, e com poucas palavras que existam para agradecer a total disponibilidade, aos meus orientadores Doutora Aldina Santiago e Doutor Hélder Craveiro. Um sincero agradecimento pelo tempo e pela paciência dispensados.

À Tertúlia Académica – Pipis de Cu-Entrada, pela fraternidade, amizade e espírito académico com que sempre me brindaram no decorrer de toda esta fase da minha vida.

Às meninas da minha vida, Inês Figueiredo e Raquel Louro, um eterno obrigado por toda a partilha ao longo destes anos.

À família mais genuína com que alguma vez tive oportunidade de me cruzar, Estudantina Académica de Castelo Branco. Se as há, não conheço palavras que transmitissem de forma genuína o sentimento de gratidão que tenho por todos vocês, sem exceção. O meu sincero obrigado por tudo.

Aos meus irmãos André e Gonçalo por me acompanharem desde que me lembro de ser homem. Lembrem-se, somos tão grandes quanto o tamanho dos nossos sonhos e ambições, não se deixem ficar por um pequeno conforto, quando podem ser do tamanho que vocês quiserem.

Por último, e mais importante, queria não só agradecer, como dedicar toda esta dissertação aos pais Ana Cristina e Eurico São Pedro. Os ensinamentos, valores e responsabilidade transmitidos na vossa educação foram imprescindíveis para ultrapassar esta fase da minha vida. Sem o vosso exemplo não seria sequer possível sonhar a minha vida.

Sem vocês todos, não teria sido possível. Um sincero obrigado.

RESUMO

A utilização de estruturas em aço enformado a frio na construção tem vindo a crescer de uma forma notável nos últimos anos. No entanto, o dimensionamento ao fogo deste tipo de aço ainda carece de informação a nível regulamentar. A EN 1993-1-1 (2010) classifica a esmagadora maioria das secções de aço enformado a frio como sendo de classe 4 e, conseqüentemente a EN 1993-1-2 (2006) sugere um dimensionamento ao fogo através da mesma metodologia de aços laminados a quente com esta classificação, propondo os mesmos coeficientes de redução para ambos os dois tipos de aço, aspeto que se revela pouco coerente (Outinen, 2004; Li, 2017).

Assim sendo, realizou-se uma investigação com vista a estudar a degradação das propriedades mecânicas de aços enformados a frio: S280GD+Z e S350GD+Z. Foram levados a cabo 54 ensaios, entre eles ensaios em regime estacionário e regime transiente. Os ensaios em regime transiente são considerados mais realistas e foram determinados como mais penalizadores nas propriedades mecânicas do aço.

Entre as duas classes de aço estudadas foi determinado que para os intervalos de temperaturas mais baixas (até aos 200°C) e para os mais altos (acima dos 600°C) os fatores de redução propostos são semelhantes, a diferença reside na temperatura para qual o aço começa a perder as suas propriedades mecânicas de forma mais acentuada. Neste aspeto, concluiu-se que o aço de menor classe tende a degradar as suas propriedades para temperaturas mais baixas.

Os fatores de redução obtidos foram comparados com diversas normas nomeadamente, a EN 1993-1-2 (2010), a BS 5950-8 (1990) e a AS 4100 (1998). Para alguns intervalos de temperatura, propõem fatores de redução divergentes daqueles que foram obtidos experimentalmente. Foram ainda comparadas as curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente com as propostas pelo modelo da EN 1993-1-2 (2010) e por modelos de outros autores (Chen e Young, 2007; Kankanamge, 2011). No final foram propostas novas formulações matemáticas para o S350GD+Z que permitem traduzir o comportamento do aço enformado a frio a temperaturas elevadas.

Palavras-chave: Aço enformado a frio; Análise experimental; Curvas tensão-extensão; Dimensionamento ao fogo; Propriedades mecânicas; Regime estacionário; Regime transiente

ABSTRACT

The use of cold-formed steel structures in construction has been growing past the years. However, the fire design of cold-formed steel has some limitations with the design standards. EN 1993-1-1 (2010) classifies the majority of this type of steel as being class 4 and, consequently EN 1993-1-2 (2010) suggests a fire design based on the same methodology of class 4 hot rolled steel, using the same reduction factors for both types, the proposal results prove to diverge in general (Outinen, 2004; Li, 2017).

Therefore, an investigation was carried out to study the reduction factors of the mechanical properties of cold-formed steels: S280GD+Z and S350GD+Z. Fifty-four tensile coupon tests were performed, both steady state and transient state tests were conducted. The transient tests were considered more realistic and were concluded that transient state test proposes greater reduction factors for the mechanical properties of the cold-formed steel.

Both grades of steel studied in the scope of this instigation it was determined that for the lower temperature ranges (up to 200°C) and for the higher ones (above 600°C) the proposed reduction factors are similar, the difference lies in the temperature that each class begins to lose their mechanical properties. Regarding the difference between grades, it was concluded that the lower grade steel loses their properties for lower temperatures.

The test results were compared with current standards, such as EN 1993-1-2 (2010), BS 5950-8 (1990) and AS 4100 (1998). In general, the results obtained does not fit with the propose reduction factors in the standards. The stress-strain curves were also confronted with the models proposed by EN 1993-1-2 (2010) and other researcher's models (Chen e Young, 2007; Kankanamge, 2011). New predictive equations were proposed to predict the behaviour of cold-formed steel at high temperatures.

Keywords: Cold-formed steel; Fire design; Experimental investigation; Mechanical properties; Steady state test; Stress–strain curves; Transient state test

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE GERAL	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABELAS	IX
SIMBOLOGIA	X
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E MOTIVAÇÃO	11
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	14
2 ESTADO DA ARTE	15
2.1 AÇO ENFORMADO A FRIO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL	15
2.2 PROCESSO DE FABRICO	16
2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS	18
2.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS DO AÇO ENFORMADO A FRIO	19
2.4.1 <i>Comportamento do aço enformado a frio à temperatura ambiente</i>	19
2.4.2 <i>Comportamento do aço enformado a frio a temperaturas elevadas</i>	20
2.5 EFEITOS DE FLUÊNCIA E ALONGAMENTO TÉRMICO	21
2.6 TENSÕES RESIDUAIS	24
2.7 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM AÇO ENFORMADO A FRIO, SUJEITAS A UMA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, PELA EN 1993-1-2	26
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
3 A NÁLISE EXPERIMENTAL	31
3.1 INTRODUÇÃO	31
3.2 PROTOCOLO EXPERIMENTAL	31

3.2.1	<i>Ensaio em regime transiente</i>	32
3.2.2	<i>Ensaio em regime estacionário</i>	34
3.3	PROVETES DE ENSAIO	35
3.4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	36
3.4.1	<i>Propriedades mecânicas do aço à temperatura ambiente</i>	36
3.4.2	<i>Propriedades mecânicas do aço a temperatura elevada</i>	37
3.4.3	<i>Comparação entre ensaios em regime transiente e estacionário</i>	46
3.4.4	<i>Comparação dos resultados entre classes de aço</i>	53
3.4.5	<i>Comparação dos resultados obtidos com as diversas normas</i>	55
3.4.6	<i>Comparação dos resultados obtidos com bibliografia existente</i>	58
3.4.7	<i>Comparação das curvas tensão-extensão com as propostas pelo método de Ramberg-Osgood</i>	62
3.4.8	<i>Comparação das curvas tensão-extensão com as propostas pela EN 1993-1-2</i>	65
3.4.9	<i>Equações propostas para determinação das curvas tensão-extensão</i>	68
4	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	71
4.1	CONCLUSÕES	71
4.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	73
	BIBLIOGRAFIA	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Diferentes valências de aço enformado a frio. a) Elementos treliçados em AEF (gpms-lsf Company@, 2017). b) Construção em AEF (pars-tirazis@, 2017). c) Elemento porticado em AEF (Shed Company@, 2017). d) Esquema laje mista (Outinen J., 2000).....	11
Figura 2-1 Secções comuns em AEF. a) Secção em U. b) Secção em C. c) Secção em Σ . d) Secção em Z. e) Secção em Ω . f) e g) Secção compostas abertas. h) e i) Secções compostas fechadas. (EN 1993-1-3, 2006)	15
Figura 2-2 Exemplos de painéis em aço enformado a frio (Yu e LaBoube, 2010).....	16
Figura 2-3 a) Perfiladora (DreiStern@, 2017). b) Rolos de chapa metálica (DreiStern@, 2017)	16
Figura 2-4 Fases do processo de perfilagem (adaptado de Rhodes, 1991).	17
Figura 2-5 a) Quinadeira (DFMT@, 2017). b) Fases de processo de quinagem (Dubina, 2005)	18
Figura 2-6 a) Curva tensão-extensão para aços laminados a quente. b) Curva tensão-extensão para aços enformados a frio (adaptado de Yu and LaBoube, 2010).	20
Figura 2-7 Curva típica de fluência térmica tipo (adaptado de Morovat, 2014)	22
Figura 2-8 Influência da fluência em relação ao estado de tensão imposto, a temperatura constante (Morovat, 2014)	23
Figura 2-9 Comparação do parâmetro de alongamento térmico entre vários autores e as principais normas em vigor (Craveiro, 2016)	24
Figura 2-10 Média das tensões residuais obtidas experimentalmente: a) fabrico por perfilagem b) fabrico por quinagem (Schafer e Peköz, 1998)	25
Figura 2-11 Esquema da metodologia proposta pela EN 1993-1-2 (2010) (adaptado de Outinen (2000))	27
Figura 2-12 Fatores de redução da tensão de cedência propostos por vários autores para aços de diferentes classes	29
Figura 2-13 Fatores de redução para o módulo de elasticidade propostos por vários autores para aços de diferentes classes	29
Figura 3-1 Vista global de todo o equipamento. b) Preparação do ensaio de alta temperatura	32

Figura 3-2 a) Pormenor do extensómetro de alta temperatura. b) Ensaio à temperatura ambiente.....	32
Figura 3-3 Gráfico tipo de resultados obtidos em regime transiente (adaptado de Outinen e Mäkeläinen, 2002)	33
Figura 3-4 Gráfico tensão/extensão tipo de um ensaio em regime transiente (adaptado de Outinen e Mäkeläinen, 2002).....	34
Figura 3-5 Medidas do provete usado no desenvolvimento da análise experimental.	35
Figura 3-6 a) Garras de aço refratário usadas no desenvolvimento dos ensaios de tração. b) Exemplo de um provete usado nos ensaios.	35
Figura 3-7 Curva Tensão-Extensão para o aço S350GD+Z.....	36
Figura 3-8 Curva Tensão-Extensão para o aço S280GD+Z.....	37
Figura 3-9 Ensaio de alongamento térmico.....	38
Figura 3-10 Ensaio regime estacionário - Aço S350GD+Z.....	39
Figura 3-11 Modos de rotura dos ensaios em regime estacionário - S350GD+Z. a) 25°C; b)150°C; c) 300°C; d) 450°C; e) 600°C; f) 700°C.	40
Figura 3-12 Gráfico Temperatura-Extensão fornecido por cada ensaio em regime transiente – S350GD+Z.	41
Figura 3-13 Curvas tensão-extensão obtidas nos ensaios em regime transiente - S350GD+Z	42
Figura 3-14 Modos de rotura dos ensaios em regime transiente - S350GD+Z. a) 0,10% f_y ; b)0,25% f_y ; c) 0,50% f_y ; d) 0,75% f_y ; e) 0,90% f_y	43
Figura 3-15 Gráfico temperatura-extensão fornecido por cada ensaio em regime transiente – S280GD+Z.	44
Figura 3-16 Curvas tensão-extensão obtidas nos ensaios em regime transiente - S280GD+Z	45
Figura 3-17 Modos de rotura dos ensaios em regime transiente – S280GD+Z. a) 25°C; b)0,10% f_y ; c)0,25% f_y ; d) 0,50% f_y ; e) 0,75% f_y ; f) 0,90% f_y	46
Figura 3-18 Fator de redução para o módulo de elasticidade - S350GD+Z.....	48
Figura 3-19 Fator de redução para a tensão de cedência - S350GD+Z.....	49
Figura 3-20 Fator de redução para o módulo de elasticidade – S280GD+Z.....	51
Figura 3-21 Fator de redução para a tensão de cedência – S280GD+Z.....	51

Figura 3-22 Fator de redução para o módulo de elasticidade (regime transiente) - S350GD+Z vs. S280GD+Z.....	53
Figura 3-23 Fator de redução para a tensão de cedência (regime estacionário) - S350GD+Z vs. S280GD+Z.....	54
Figura 3-24 Fator de redução para a tensão de última (regime estacionário) - S350GD+Z vs. S280GD+Z	55
Figura 3-25 Fatores de redução para módulo de elasticidade - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos pelas normas.	56
Figura 3-26 Fatores de redução para tensão de cedência- Valores obtidos experimentalmente vs. propostos pelas normas.	57
Figura 3-27 Fatores de redução para tensão limite de proporcionalidade - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos pelas normas.	58
Figura 3-28 Fatores de redução para módulo de elasticidade - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos por outros autores.	59
Figura 3-29 Fatores de redução para tensão de cedência - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos por outros autores.	60
Figura 3-30 Fatores de redução para tensão limite de proporcionalidade - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos por outros autores.	61
Figura 3-31 Fatores de redução para tensão última - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos por outros autores.....	61
Figura 3-32 Equação proposta pela metodologia de Ramberg-Osgood - MMPDS-01 (2003) vs. resultado experimental.....	63
Figura 3-33 Curva tensão-extensão obtida experimentalmente vs. proposta por modelos de outros autores	64
Figura 3-34 Comparação das curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente vs. propostas pela EN 1993-1-2 (2010) -Considerando o endurecimento do aço previsto na EN 1993-1-2 (2010).....	66
Figura 3-35 Comportamento inicial das curvas tensão-extensão - Propostas em EN 1993-1-2 vs. Experimental	67
Figura 3-36 Curvas tensão propostas vs. obtidas experimentalmente.....	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Valores médios das propriedades mecânicas - S350GD+Z – Regime estacionário.....	39
Tabela 2 Valores médios das propriedades mecânicas - S350GD+Z – Regime transiente.....	43
Tabela 3 Valores médios das propriedades mecânicas – S280GD+Z – Regime transiente.....	45
Tabela 4 Valores médios das propriedades mecânicas - S280GD+Z – Regime estacionário (adaptado de Craveiro et al. (2016)).....	46
Tabela 5 Fatores de redução S350GD+Z - Regime estacionário.....	47
Tabela 6 Fatores de redução S350GD+Z - Regime Transiente.....	47
Tabela 7 Fatores de redução S280GD+Z - Regime estacionário (adaptado de Craveiro et al. 2016)....	50
Tabela 8 Fatores de redução S280GD+Z - Regime Transiente.....	50

SIMBOLOGIA

Letras maiúsculas Latinas

$E_{fi,d}$	valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio, de acordo com a EN 1993-1-2
$R_{fi,d,t}$	correspondente valor de cálculo da resistência do elemento de aço, em situação de incêndio, no instante t
E_{25}	Módulo de elasticidade à temperatura ambiente de 25°C
E_{θ}	Módulo de elasticidade à temperatura θ

Letras minúsculas latinas

f_y	tensão de cedência do material à temperatura ambiente de 25°C
$f_{y,25}$	tensão de cedência à temperatura θ
$f_{y,\theta}$	tensão de cedência à temperatura θ
$f_{u,25}$	tensão de última à temperatura ambiente de 25°C
$f_{u,\theta}$	tensão última à temperatura θ
$f_{r,25}$	tensão de rotura à temperatura ambiente de 25°C
$f_{r,\theta}$	tensão de rotura à temperatura θ
$f_{p,25}$	tensão limite de proporcionalidade à temperatura ambiente de 25°C
$f_{p,\theta}$	tensão limite de proporcionalidade à temperatura θ
$f_{y0.2\%,\theta}$	tensão de cedência associada à paralela do módulo de elasticidade que passa a 0.2% de extensão
$f_{y0.5\%,\theta}$	tensão de cedência associada à extensão de 0.5%
$f_{y1.5\%,\theta}$	tensão de cedência associada à extensão de 1.5%
$f_{y2.0\%,\theta}$	tensão de cedência associada à extensão de 2.0%
$k_{E,\theta}$	fator de redução para módulo de elasticidade à temperatura θ
$k_{y,\theta}$	fator de redução para tensão de cedência à temperatura θ
$k_{u,\theta}$	fator de redução para tensão última à temperatura θ
$k_{r,\theta}$	fator de redução para tensão de rotura à temperatura θ
$k_{p,\theta}$	fator de redução para tensão limite de proporcionalidade à temperatura θ
n_{θ} e m_{θ}	parâmetros associados ao método de Ramberg-Osgood

Letras minúsculas gregas

β	parâmetro proposto associado ao método de Ramberg-Osgood
ϵ_{θ}	extensão à temperatura θ
$\epsilon_{y,\theta}$	extensão associada de cedência à temperatura θ
$\epsilon_{p,\theta}$	extensão associada à tensão limite de proporcionalidade à temperatura θ
$\epsilon_{u,\theta}$	extensão última à temperatura θ
$\epsilon_{r,\theta}$	extensão de rotura à temperatura θ
θ	temperatura
θ_{crit}	temperatura crítica
σ	tensão
σ_{θ}	tensão à temperatura θ

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais e Motivação

O aço estrutural pode ser dividido em três grupos de importância: aço laminado a quente, soluções constituídas por soldadura de chapas e aço enformado a frio. O início do estudo de elementos em aço enformado a frio na construção remonta ao séc. XIX, embora a sua utilização só tenha começado a ser mais evidente a partir de meados do século passado. Os perfis constituídos por aço enformado a frio eram maioritariamente usados como elementos secundários, por forma a auxiliar uma correta distribuição de carga nas estruturas. Recentemente, têm sido levados a cabo diversos estudos no que diz respeito à caracterização e à capacidade estrutural deste tipo de elementos, podendo hoje em dia ser usados como estruturas principais, sendo possível desenvolver estruturas treliçadas bem como pórticos utilizando unicamente perfis deste género. A polivalência do aço enformado a frio é também evidente na utilização deste material em elementos laminares como os painéis de cobertura e em lajes mistas, tornando possível tirar partido das vantagens estruturais do aço e do betão (Dubina, 2005) (Figura 1-1).

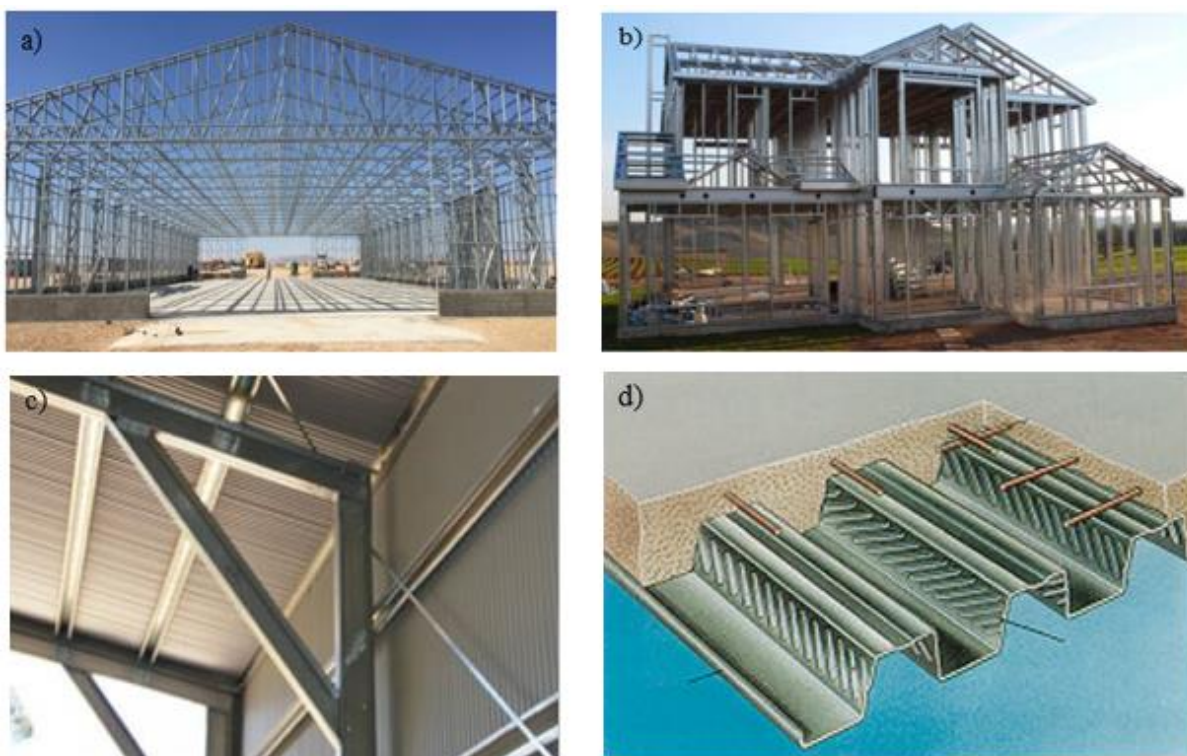


Figura 1-1 Diferentes valências de aço enformado a frio; a) Elementos treliçados em AEF (gpm-slsf Company@, 2017). b) Construção em AEF (pars-tirazis@, 2017); c) Elemento porticado em AEF (Shed Company@, 2017); d) Esquema laje mista (Outinen J., 2000)

Os elementos em aço enformado a frio são caracterizados por uma boa relação entre peso próprio e a sua capacidade resistente. Existe, portanto, variadas soluções construtivas onde este tipo de aço pode conduzir a melhores soluções do que materiais como o betão, a madeira ou mesmo perfis constituídos por aços laminados a quente. A resistência de elementos lineares em aço enformado a frio é dependente da forma que a secção transversal assume aquando o processo de fabrico, podendo possuir as mais variadas geometrias (C, Ω , Z, Σ , entre outros), secções tubulares ou mesmo serem compostas por duas ou mais secções associadas em conjunto.

O aço enformado a frio está associado a elementos que possuem espessuras reduzidas quando comparadas com o comprimento da peça. Desta forma, como existe a EN 1993-1-1 (2010) para o dimensionamento de aços laminados a quente surge, para estruturas desenvolvidas em aço enformado a frio, a EN 1993-1-3 (2006), para a temperatura ambiente. As secções com este tipo de classificação são afetadas de um fator de redução, determinado através da EN 1993-1-5 (2003), por forma a trabalhar com uma secção efetiva, menor que a secção real. Estas secções são caracterizadas por serem suscetíveis a fenómenos de encurvadura resultante da reduzida espessura da secção.

Regulamentarmente faltam determinar com rigor vários parâmetros para um correto dimensionamento de soluções em aço enformado a frio, nomeadamente o comportamento a temperaturas elevadas. O dimensionamento ao fogo deste tipo de aço é feito recorrendo à norma EN 1993-1-2 (2010) que visa um estudo do aço enformado a frio da mesma forma que peças laminadas a quente, no que respeito à degradação das propriedades do material. Esta degradação das propriedades do material será tão gravosa quanto maior a temperatura a que a estrutura estiver sujeita, como facilmente se compreende.

Para se estudar uma situação de incêndio em aços enformados a frio o código de dimensionamento europeu (EN 1993-1-2 (2010)) oferece diferentes metodologias para realizar a verificação da resistência ao fogo. Uma primeira referente à temperatura crítica onde se pode verificar a resistência no domínio da temperatura. E outra, mais interessante para esta dissertação, referente ao uso de fatores de redução das propriedades do material. Diversos autores se debruçaram sobre este tema e concluíram que a norma em vigor para a verificação da resistência ao fogo de estruturas em aço enformado a frio conduzem a resultados divergentes dos obtidos experimentalmente, dado que as considerações tomadas para as secções laminadas a quente de classe 4 não se adequam da melhor forma a secções de aço enformado a frio (Craveiro, 2016; Ranawaka e Mahendran, 2009).

Com este trabalho pretendeu-se estudar a degradação das propriedades mecânicas do aço enformado a frio quando sujeito a temperaturas elevadas por consequência de uma situação de

incêndio. Foram realizados ensaios em regime estacionário e transiente para um aço S350GD+Z e ensaios em regime transiente para um S280GD+Z. Foram realizados um total de 54 ensaios divididos entre as diferentes classes e ensaios à temperatura ambiente e elevada.

A larga maioria dos investigadores que trabalha em aço enformado a frio, por questões de simplicidade realiza ensaios em regime estacionário por forma a determinar os parâmetros mecânicos do material. Em investigações desenvolvidas em aços laminados a quente foi concluído que ensaios em regime transiente fornecem valores que traduzem com maior rigor o comportamento do aço devido às considerações mais realistas em que se baseia a metodologia de ensaio. Desta forma, comparar os resultados obtidos entre as duas metodologias de ensaio é uma das propostas desta dissertação. Foram utilizados os resultados obtidos por Craveiro *et al.* (2016) para comparar ambas as metodologias de ensaio, para o S280GD+Z.

Os resultados obtidos nesta investigação experimental para os fatores de redução foram comparados com os obtidos por diversos autores (Kankanamge e Mahendran, 2011; Chen e Young, 2007; Outinen e Makelainen, 2002; Li e Young, 2017) bem como diversas normas (EN 1993-1-2, 2006; BS 5950-8, 1990; AS 4100, 1998). As curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente foram comparadas com diversos modelos propostos baseados na metodologia de Ramberg-Osgood (1943) usando as considerações da *Metallic Materials Properties Development and Standardization* (MMPDS-01, 2003) para a determinação analítica das curvas tensão-extensão. Foram também determinadas as curvas tensão-extensão baseadas em modelos propostos por outros autores (Chen and Young, 2007; Kankanamge, 2011) e, por fim confrontadas com a proposta pela EN 1993-1-2 (2010).

1.2 Objetivos

É objetivo primário desta dissertação a avaliação da degradação das propriedades mecânicas do aço enformado a frio: S280GD+Z e S350GD+Z e desta forma contribuir para o estudo das propriedades mecânicas do aço enformado a frio expostos a uma situação de incêndio. Para além deste aspeto procurou-se estudar outros aspetos tais como:

- Estudar e comparar a equação proposta para a dilatação térmica do aço (também proposta para aços laminados a quente);
- Comparar a adequabilidade dos dois tipos de ensaio desenvolvidos;
- Comparar os resultados entre as diferentes classes de aço;
- Comparar os resultados com as normas referentes ao dimensionamento ao fogo (EN 1993-1-2 (2010), AS 4100 (1998) e BS5950-8 (1990));
- Comparar os resultados obtidos com alguns autores com bibliografia sobre o tema;
- Desenvolver curvas tensão-extensão para os aços estudados com base em vários modelos propostos;
- Desenvolver uma proposta matemática que descreva o comportamento do aço S350GD+Z.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está organizada em quatro capítulos principais. No Capítulo 1 são apresentados aspetos genéricos do aço enformado a frio, onde se procura explicar a motivação e se esclarecem os objetivos da dissertação. No Capítulo 2, apresenta-se o estado da arte onde se abordam diversos temas a cerca do aço enformado a frio, tais como o aço enformado a frio como elemento estrutural, processo de fabrico, vantagens e desvantagens do material e onde se apresentam algumas considerações gerais sobre o tema. No Capítulo 3, é apresentada detalhadamente todo o processo experimental levado a cabo, desde as considerações dos ensaios desenvolvidos, apresentação dos resultados e discussão dos mesmos bem como uma proposta matemática com vista à previsão do comportamento do aço enformado a frio a uma situação de incêndio. No quarto e último capítulo, são apresentadas as principais conclusões desta dissertação e propõem-se alguns trabalhos futuros no âmbito da degradação das propriedades mecânicas do aço enformado a frio.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Aço enformado a frio como elemento estrutural

Podemos encontrar aço enformado a frio no mercado da construção em dois grupos distintos: perfis e painéis. Todos estes elementos são fabricados a partir de uma chapa metálica galvanizada com recurso a uma camada de zinco no aço (275g/m^2 , valor mais comum), este elemento confere uma proteção adicional à corrosão que promove a durabilidade do material. Embora seja possível produzir uma panóplia de secções em aço enformado a frio é frequente o uso de secções em C, Z, U, Ω e Σ (bem como secções compostas por dois ou mais elementos de aço enformado a frio, compondo secções que podem ser abertas ou fechadas). Estes perfis são peças lineares onde a espessura normalmente varia entre 1,2 e 6,4 mm (Yu e LaBoube, 2010). O recurso a secções fechadas atenua um dos maiores problemas do uso deste tipo de elemento como soluções estruturais, os fenómenos de encurvadura.

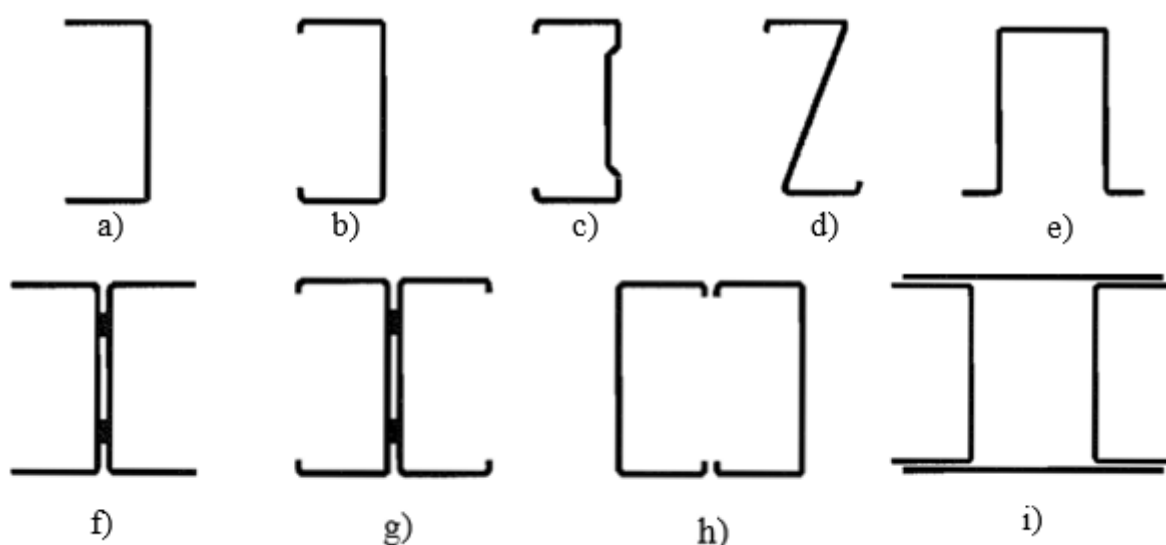


Figura 2-1 Secções comuns em AEF. a) Secção em U; b) Secção em C; c) Secção em Σ ; d) Secção em Z; e) Secção em Ω ; f) e g) Secção compostas abertas; h) e i) Secções compostas fechadas. (EN 1993-1-3, 2006)

No que diz respeito aos painéis estes encontram-se com espessuras compreendidas entre 0,5 e 1,9 mm e podem ser encontrados em paredes, pavimentos, coberturas e em lajes mistas (aço-betão) neste caso este elemento apresenta uma contribuição dupla, servindo de cofragem e elemento resistente à tração.

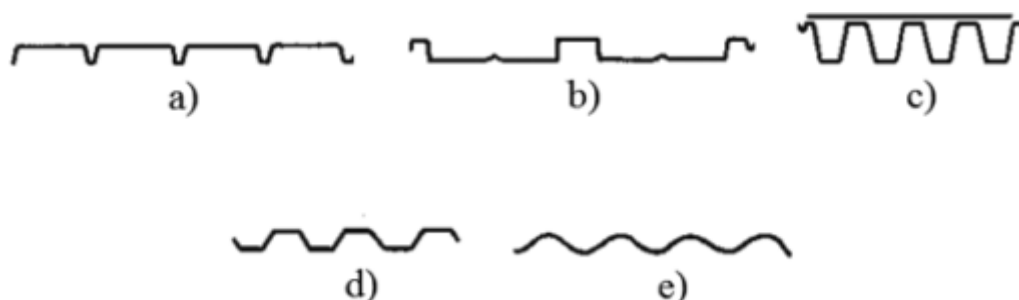


Figura 2-2 Exemplos de painéis em aço enformado a frio (Yu e LaBoube, 2010).

2.2 Processo de fabrico

Existem dois métodos para a obtenção das mais variadas secções. Um método usado quando se pretende maior produção de uma dada secção, a perfilagem (*cold-roll forming*) que requer um maior investimento em equipamento, e a quinagem (*brake pressing*) que não necessita de tanto investimento, mas possui algumas limitações. É durante o processo de fabrico que se adulteram as propriedades do aço por consequência das deformações induzidas, ambos os processos de fabrico resultam em deformações plásticas sobre a chapa metálica até se atingir a secção desejada (Yu e LaBoube, 2010).

O processo de perfilagem é usado quando se pretende uma grande quantidade de uma dada secção em aço enformado a frio. Neste processo a chapa metálica é fornecida em forma de rolo (Figura 2-3 a) a uma perfiladora (Figura 2-3 b)). A máquina é munida de uma quantidade de rolos compressores adequada que, por via de dobragens sucessivas confere a secção pretendida.



Figura 2-3 a) Perfiladora (DreiStern@, 2017); b) Rolos de chapa metálica (DreiStern@, 2017)

A complexidade da secção desejada é proporcional à quantidade de rolos necessários para a desenvolver.

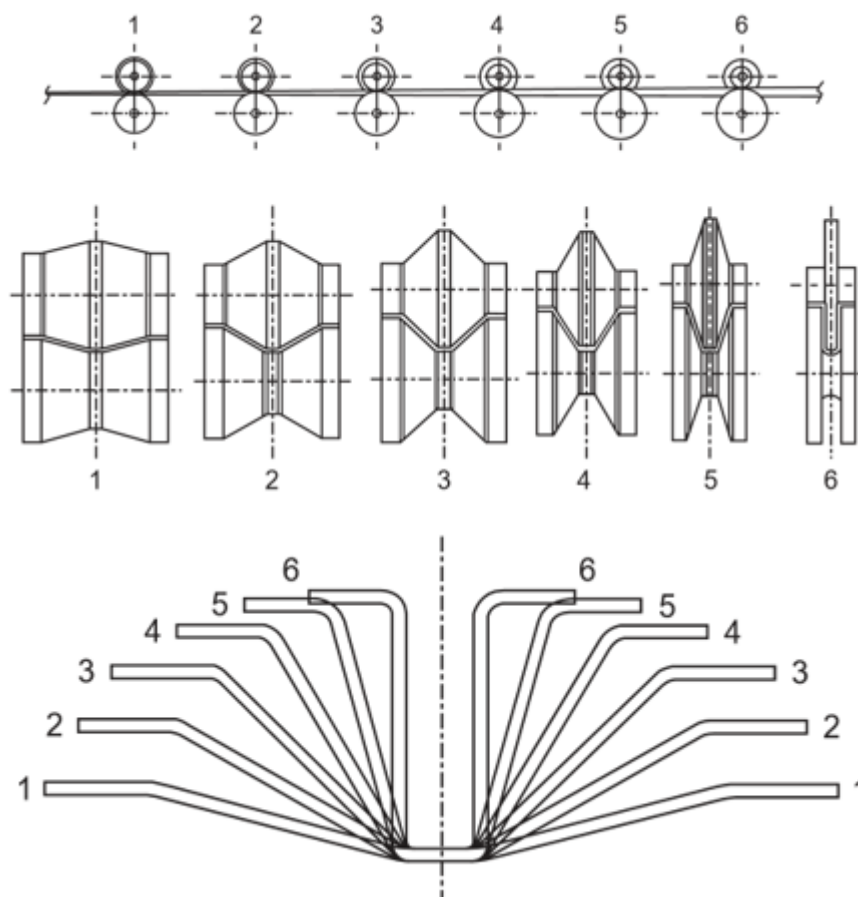


Figura 2-4 Fases do processo de perfilagem (adaptado de Rhodes, 1991).

Em situações em que não se pretenda executar uma grande quantidade de uma secção específica é de maior interesse recorrer-se ao processo de quinagem, escusando o investimento maior de uma perfiladora. Este processo é levado a cabo através de uma quinadeira (Figura 2-5 a)) onde a chapa metálica é pressionada em moldes com a secção transversal que se pretende (Figura 2-5 b)). As dimensões bem como as secções estão limitadas à capacidade da quinadeira usada no processo de fabrico.

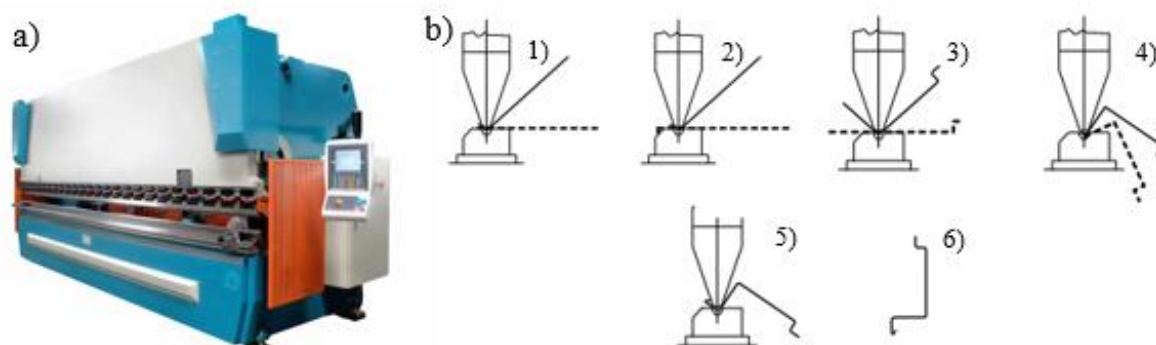


Figura 2-5 a) Quinadeira (DFMT@, 2017). b) Fases do processo de quinagem (Dubina, 2005)

2.3 Vantagens e desvantagens

O processo de fabrico dos perfis em aço enformado a frio permite o desenvolvimento das mais diversas secções, sendo possível produzir uma secção otimizada para uma dada solução estrutural. A forma mecanizada como decorre o fabrico destes elementos permite uma produção em larga escala.

A vantagem que mais se destaca em estruturas de aço enformado a frio é a leveza que estes elementos possuem, evidenciando uma excelente relação entre o seu peso e a resistência do perfil. O baixo peso do material permite uma facilidade de manuseio e aplicação em obra levando a prazos mais competitivos quando comparados com outros materiais como, por exemplo betão armado, alvenarias, madeira, ou mesmo elementos em aço laminado a quente, colmatando um eventual preço mais elevado do material com o baixo custo na mão de obra (Yu e LaBoube, 2010).

Verifica-se ainda uma ótima relação com o uso de materiais de isolamento térmico e acústico, contribuindo também para a sustentabilidade das estruturas que usem aço enformado a frio como elemento estrutural.

Embora as enumeradas vantagens deste tipo de aço, o aço enformado a frio possui desvantagens que podem ser cruciais no dimensionamento estrutural deste tipo de soluções. A geometria da maior parte das secções que encontramos no mercado conduz a uma baixa rigidez torsional. A pequena espessura usada nas secções de aço enformado a frio leva à ocorrência de fenómenos de encurvadura, não podendo usufruir da capacidade resistente da secção, uma vez que não se atinge a plastificação total da secção transversal. Outro aspeto negativo a apontar são as imperfeições geométricas e tensões residuais derivadas do processo de fabrico a frio destes

elementos, reduzindo a ductilidade do aço. No que diz respeito a situações em que a estrutura esteja sujeita a altas temperaturas, a elevada condutibilidade térmica que o aço possui, conjugada à reduzida espessura das secções, leva a um aumento de temperatura bastante rápido. Uma vez atingida uma elevada temperatura o aço é sujeito a uma severa degradação das suas propriedades mecânicas, o que conduz a um baixo desempenho em situações de incêndio.

2.4 Propriedades térmicas e mecânicas do aço enformado a frio

2.4.1 Comportamento do aço enformado a frio à temperatura ambiente

Conhecer com rigor os parâmetros do material é essencial para se conseguir reproduzir o comportamento do aço, quanto mais rigorosos forem os dados extraídos dos ensaios melhores resultados obteremos na análise numérica (Craveiro *et al.*, 2016).

Ao contrário do que acontece em perfis de aço laminado a quente, onde as características do aço são facilmente conhecidas, sabendo a classe do aço, podendo apontar com precisão valores para os parâmetros do material, no aço enformado a frio o processo de fabrico a frio induz deformações de cariz plástico nos cantos o que leva à alteração das características do aço, nomeadamente ao aumento da tensão de cedência e da tensão última e, por consequência a diminuição da ductilidade do aço (Chen e Young, 2006).

Verifica-se uma diferença entre as curvas tensão-extensão entre os aços laminados a quente e os enformados a frio. O aço laminado a quente apresenta um patamar de cedência bem definido (Figura 2-6 a)), ao contrário do aço enformado a frio onde se observa uma cedência gradual do material (Figura 2-6 b)). Como não se consegue observar um valor bem definido para a tensão de cedência no aço enformado a frio foi necessário determinar um intervalo de valores que fosse representativo deste parâmetro. Desta forma, considera-se que o material entra em cedência para uma extensão residual de 0,2% ou total de 0,5%. Se recorrermos ao parâmetro da tensão residual, a tensão é determinada traçando uma reta paralela ao declive da fase elástica da curva tensão-extensão. Ambas as metodologias conduzem a valores muito próximos da tensão de cedência (Yu and LaBoube, 2010).

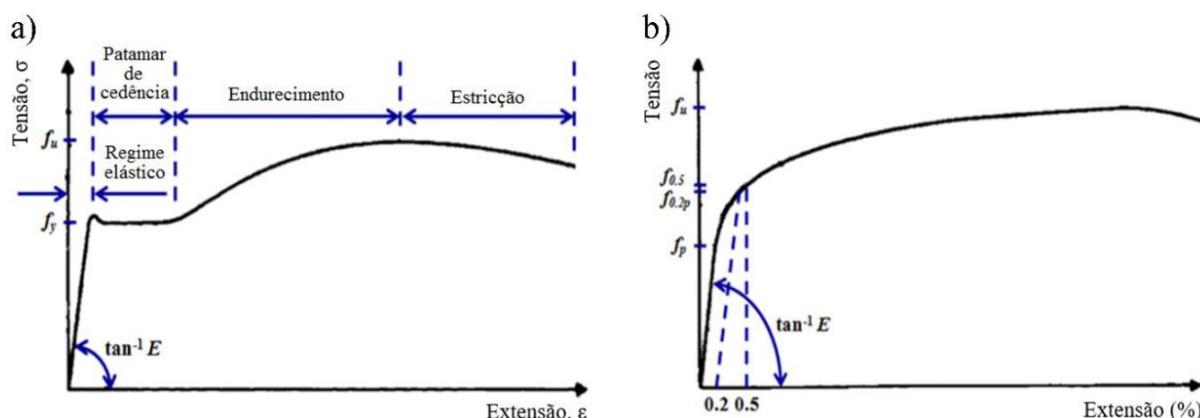


Figura 2-6 a) Curva tensão-extensão para aços laminados a quente; b) Curva tensão-extensão para aços enformados a frio (adaptado de Yu and LaBoube, 2010).

São três os aspectos que originam uma mudança nas propriedades do aço enformado a frio, nomeadamente o endurecimento por deformação (devido às deformações plásticas induzidas no processo de fabrico), o envelhecimento (resistência do material aumenta enquanto a ductilidade diminui ao longo do tempo) e o denominado “efeito de Bauschinger” este fenómeno refere que ao sujeitarmos uma peça a um dado estado de tensão (tração por exemplo) até atingirmos um regime plástico e, seguidamente sujeitos a um estado de tensão contrário (compressão) este terá menor resistência, i.e., quando voltamos a carregar no sentido contrário este atingirá a cedência em valores de mais baixos.

2.4.2 Comportamento do aço enformado a frio a temperaturas elevadas

A crescente procura por soluções estruturais em aço enformado a frio obriga a um desenvolvimento do tema para além do comportamento à temperatura ambiente, o conhecimento a cerca do comportamento estrutural numa situação de incêndio torna-se essencial no dimensionamento de uma estrutura deste tipo. Embora haja alguma investigação neste sentido, existem ainda algumas divergências quando se confronta os resultados obtidos através de trabalhos experimentais e as normas em vigor em diversos países, nomeadamente a EN 1993-1-2 (2010) e a BS 5950 Parte 8 (1990).

Outinen *et al.* (2000) executou uma análise exaustiva onde procurou estudar as propriedades mecânicas de diferentes tipos de aço quando sujeitos a temperaturas elevadas, sob alçada deste estudo foram realizados ensaios em regime transiente e em regime estacionário. Os autores observaram que os ensaios em regime transiente traduziam resultados mais realistas e próximos dos valores propostos na EN 1993-1-2 (2010). No que diz respeito à comparação entre as duas metodologias de ensaio, os autores verificaram que as características apresentavam valores diferentes para alguns parâmetros mecânicos, nomeadamente a tensão de cedência. Concluiu

também que os fatores de redução propostos pela EN 1993-1-2 (2010) são algo dispares, principalmente para os ensaios em regime estacionário.

Ranawaka e Mahendran (2009b) desenvolveram uma análise experimental com o objetivo de estudar a degradação das propriedades mecânicas do aço enformado a frio quando sujeito a temperaturas elevadas. O estudo foi levado a cabo com aços de baixa e alta resistência (G250 e G550, respetivamente), com perfis de várias espessuras (0,60, 0,80 e 0,95 mm) e com intervalos de temperatura entre 20 e 800°C. Neste processo experimental o autor concluiu que os aços de menor classe tendem a degradar as suas propriedades mecânicas para valores mais baixos da temperatura. Desta análise experimental pode-se ainda concluir que a espessura é um parâmetro que não influencia significativamente os resultados obtidos para os fatores de redução.

Recentemente, Li e Young (2017) aprofundaram o estudo da degradação das propriedades mecânicas do aço enformado a frio para classes de aço de alta resistência. Estes autores realizaram ensaios, tanto em regime transiente como em regime estacionário, em aços enformados a frio com tensões de cedência nominais de 700 MPa e 900 MPa. Os autores concluíram que os aços de alta resistência, embora se note ainda alguma divergência, se aproximam melhor dos valores propostos na EN 1993-1-2 (2010) para os fatores de redução e que estes aços tendem a perder as suas características mecânicas para temperaturas mais altas.

É do consenso geral dos autores estudados para esta investigação que os valores propostos para a degradação das propriedades mecânicas do material para o aço enformado a frio não se enquadram com rigor com os valores propostos nas diversas normas, como a EN 1993-1-2 (2010), a AS 4100 (1998) e a BS 5950-8 (1990).

2.5 Efeitos de fluência e alongamento térmico

No que diz respeito a efeitos de fluência, não existem estudos concretos para aço enformado a frio. Para efeitos de dimensionamento podemos dividir a extensão plástica total de um aço em duas componentes distintas, uma independente do tempo a que a peça está sujeita e outra que pode assumir deformações quando exposta a uma carga constante sujeita a um período de tempo. O fenómeno de fluência é função do tempo a que o provete está sujeito a uma dada carga, que toma importância acrescida nas estruturas expostas a uma situação de incêndio, dando origem a uma nomenclatura específica, fluência térmica. Este é um parâmetro bastante específico, isto é, para diferentes tipos de aço podemos encontrar diferenças relevantes no estudo da fluência. Cowan e Khandelwal (2014) conduziram um estudo em aço ASTM A992 onde verificaram que, para temperaturas abaixo dos 600°C, para um estado de tensão imposto de $0,9f_y$ e para um tempo de exposição de uma hora, a extensão é de 0,25% devido a efeitos de fluência térmica. Para temperaturas superiores a 600°C e tempos de exposição superiores a 30

minutos este efeito é mais significativo (chegando a valores de 1,5% e 6% para temperaturas de 700°C e 800°C respetivamente, para tempos de exposição de cerca de 60 minutos).

Para avaliar o efeito deste fenómeno é comum determinar-se uma curva de fluência, onde se confronta a extensão obtida no ensaio com o tempo do mesmo. Uma curva típica de fluência é decomposta em três fases que evidenciam comportamentos distintos, fase primária, secundária e terciária. Como se mostra na Figura 2-7, na primeira fase o provete tem um comportamento não-linear onde se nota que nos primeiros instantes a extensão tem uma expressão relevante, numa segunda fase a extensão assume um comportamento linear ao longo do tempo e na terceira fase a extensão evidencia grande expressão num curto espaço de tempo, podendo mesmo ocorrer uma rotura por fluência.

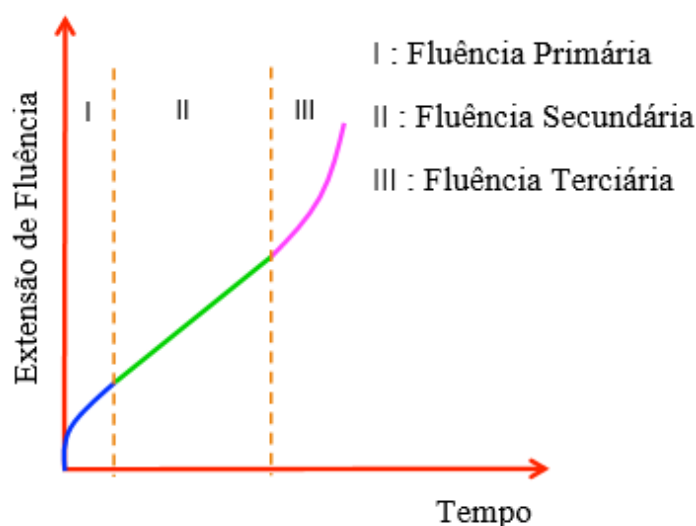


Figura 2-7 Curva típica de fluência térmica tipo (adaptado de Morovat, 2014)

Na generalidade, o aço estrutural tem um comportamento idêntico relativamente a este fenómeno. A intensidade com que a fluência térmica se faz sentir em elementos deste tipo é função do estado de tensão e da temperatura a que este fica exposto. Quanto maior o estado de tensão, maior o efeito da fluência (Figura 2-8). Para estados de tensão relativamente baixos, pode-se notar que o efeito de fluência perde expressão (Morovat, 2014).

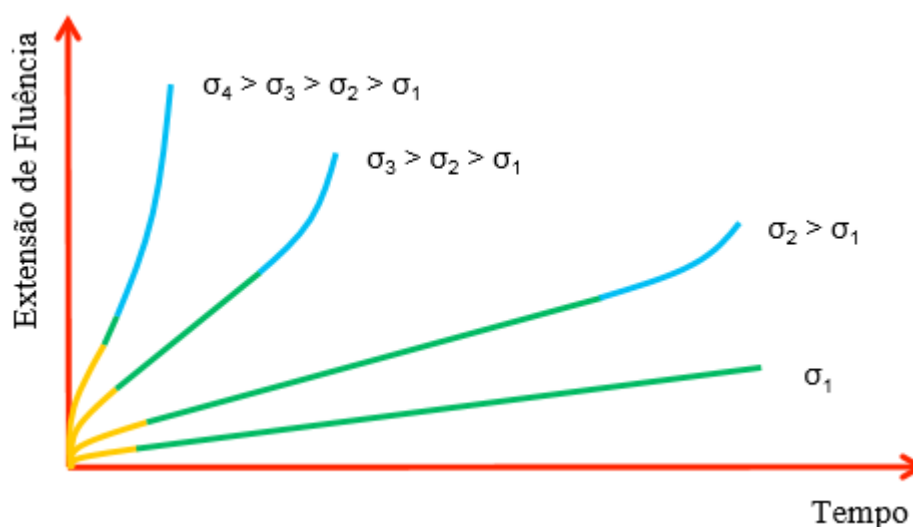


Figura 2-8 Influência da fluência em relação ao estado de tensão imposto, a temperatura constante (Morovat, 2014)

O alongamento térmico traduz a dilatação do material quando exposto a altas temperaturas. Vários autores levaram a cabo investigações sobre este tema e concluíram que as normas que permitem prever o comportamento do aço no que diz respeito a este alongamento são conservativas (BS 5950-8, 1990; EN 1993-1-2, 2010). Craveiro *et al.* (2016) realizou um trabalho neste âmbito recorrendo a um aço S280GD+Z, propondo novas equações para a determinação deste fenómeno. Os resultados mostraram um alongamento que pode chegar até 1% da extensão aos 700°C. Na Figura 2-9, pode-se observar a comparação dos valores obtidos por Outinen *et al.* (2002) e Chen e Young (2007) com as principais normas, notando que estas preveem valores acima dos obtidos experimentalmente. Normas como a AS 4100 (1998) e AISC-Appendix 4 (2010) não têm em consideração este fenómeno no dimensionamento.

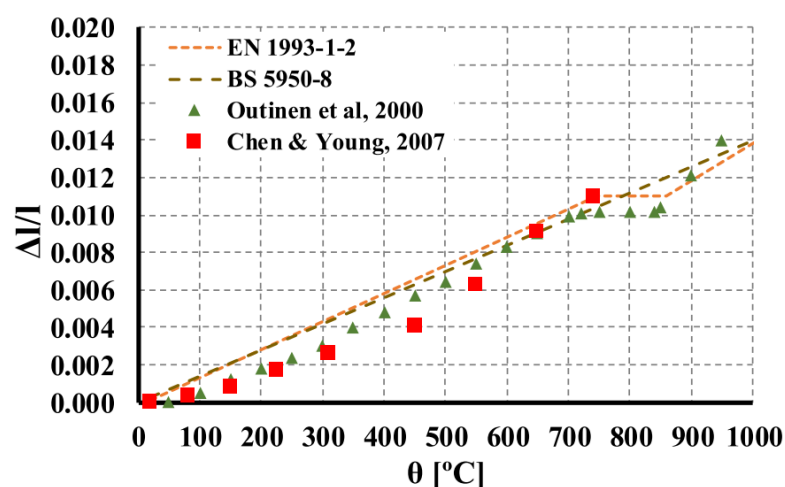


Figura 2-9 Comparação do parâmetro de alongamento térmico entre vários autores e as principais normas em vigor (Craveiro, 2016)

2.6 Tensões Residuais

O processo de fabrico a frio da chapa metálica tem como consequência o aparecimento de tensões residuais ao longo da espessura do elemento. A quantificação destas tensões levanta algumas dificuldades e, por consequência já foram feitos diversos estudos a cerca deste assunto. Estas tensões podem ser tidas em conta pela soma das tensões de flexão com as tensões de membrana. As primeiras são caracterizadas por possuírem uma variação não linear ao longo da espessura, enquanto as segundas apresentam um distribuição linear (Moen *et al.*, 2008). Derivado aos diferentes processos de fabrico, nos aços laminados a quente são as tensões de membrana que têm maior influência, já nos enformados a frio são as tensões de flexão. (Yu e LaBoube, 2010).

Schafer e Peköz (1998) foram os primeiros autores a realizar uma campanha experimental com vista a estudar as tensões residuais em aço enformado a frio. Os autores observaram que as tensões de membrana são inferiores às de flexão podendo ser ignoradas no estudo de aço enformado a frio, principalmente para os aços fabricados por quinagem. No entanto, como não foi possível medir as tensões ao longo da espessura do perfil, admitiram uma distribuição linear das tensões. Os autores concluíram que associado ao processo de quinagem, os cantos das secções possuem maiores tensões residuais enquanto que, para o processo de perfilagem, se verificam maiores tensões ao longo das placas (Figura 2-10).

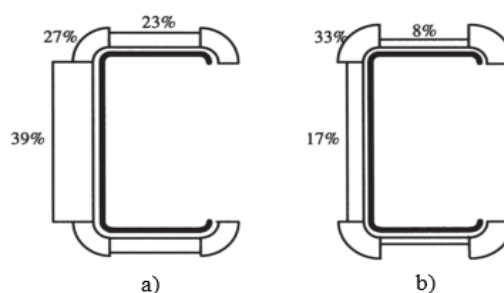


Figura 2-10 Média das tensões residuais obtidas experimentalmente. À esquerda: fabrico por perfilagem; À direita: fabrico por quinagem (Schafer e Peköz, 1998)

Quach *et al* (2004, 2006) desenvolveram um estudo numérico que veio refutar em parte os resultados obtidos por Schafer e Peköz (1998). Neste estudo pretendia-se analisar a distribuição das tensões residuais numa dada secção em função do seu processo de fabrico. Primeiramente, os autores verificaram que as tensões de flexão assumiam uma distribuição não linear ao longo da espessura, indo contra a metodologia adotada por Schafer e Peköz (1998). A ideia de as tensões residuais se concentrarem nos cantos no processo de quinagem e ao longo das placas no processo de perfilagem foi validada com esta análise numérica.

Anis *et al.* (2012) levaram a cabo um estudo paramétrico onde se pretendia avaliar os diferentes parâmetros que influenciavam as tensões residuais em aço enformado a frio nomeadamente, a espessura da chapa, o raio de curvatura dos cantos e o ângulo de dobragem. Os autores verificaram que as tensões residuais eram maiores para secções com menores ângulos de dobragem e raios de curvatura e para chapas de maiores espessuras. Ainda sobre parâmetros que têm relevância nas tensões residuais (Moen *et al.*, 2008) realizou um estudo numérico onde concluiu que a classe do aço tem uma influência significativa nas tensões residuais, sendo que para classes do aço mais baixas a influência das tensões residuais é maior.

2.7 Dimensionamento de estruturas em aço enformado a frio, sujeitas a uma situação de incêndio, pela EN 1993-1-2

O desenvolvimento de estruturas em aço enformado a frio é uma realidade crescente no seio da construção. A importância do estudo do aço enformado a frio tomou maiores proporções quando esta qualidade de aço deixou de estar associada unicamente a estruturas secundárias como de suporte de painéis e coberturas. O uso deste tipo de aço em lajes mistas e mesmo no desenvolvimento da estrutura primária do edifício levou a uma crescente preocupação com o seu comportamento quando exposto a uma situação de incêndio.

O dimensionamento de uma estrutura sujeita a uma situação de incêndio é parte fulcral no dimensionamento estrutural. O dimensionamento ao fogo predispõe que a estrutura suporte as cargas durante o seu tempo de vida à temperatura ambiente como garanta o não colapso para um determinado intervalo de tempo quando sujeita a um incêndio. As estruturas podem ser classificadas como R30, R60, R90 e R120 conforme a importância a que o edifício se propõe, esta classificação impõe o tempo a que uma estrutura consegue resistir a uma situação de incêndio sem que ocorra colapso da mesma.

Embora a EN 1993-1-2 (2010) seja dirigida para elementos laminados a quente, a norma permite a sua aplicação a elementos de classe 4, sendo esta a única metodologia para a consideração de uma situação de incêndio para aços enformados a frio. Esta norma permite que se realizem as verificações regulamentares recorrendo a duas metodologias: recorrendo a uma verificação da capacidade resistente dos elementos ou um estudo no domínio da temperatura.

A análise no domínio da temperatura é feita pressupondo que, em todas as secções transversais, não seja ultrapassada uma temperatura crítica (θ_{crit}), temperatura para qual a estrutura deixa de suportar o carregamento para que foi dimensionado.

A segunda proposta é aquela que revela maior interesse para esta investigação, passa por um dimensionamento onde a capacidade resistente do material não é ultrapassada pelos esforços externos induzidos na estrutura, afetando a resistência do aço como consequência do aumento de temperatura, recorrendo a fatores de redução. A condição imposta pela EN 1993-1-2 (2010) para que existe segurança é dada pela seguinte expressão:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (2.1)$$

Onde,

$E_{fi,d}$ valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio, de acordo com a EN 1993-1-2;

$R_{fi,d,t}$ valor de cálculo da resistência do elemento de aço, em situação de incêndio, no instante t, calculado de acordo com a EN 1993-1-2 (2010)

Como se pode ver esquematicamente na Figura 2-11, no processo de dimensionamento sugerido pela EN 1993-1-2 (2010), após se conhecer a temperatura máxima a que o aço estará sujeito para um dado intervalo de tempo (função da classe do edifício) reduz-se as propriedades mecânicas do material. O dimensionamento está finalizado assim que a condição proposta na (Equação 2.1) estiver satisfeita.

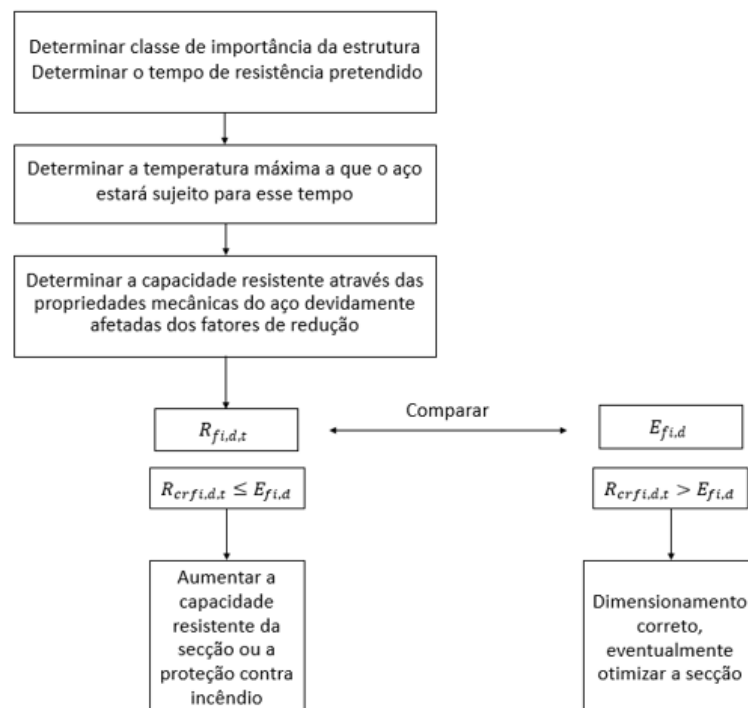


Figura 2-11 Esquema da metodologia proposta pela EN 1993-1-2 (2010) (adaptado de Outinen (2000))

2.8 Considerações Finais

Apresentou-se no presente capítulo uma revisão bibliográfica sobre o tema da degradação das propriedades mecânicas do aço enformado a frio quando expostos a temperaturas elevadas. Fez-se referência a diversos autores com investigações relevantes para o processo de investigação em causa nomeadamente, processo de fabrico, comportamento estrutural do aço enformado a frio à temperatura ambiente e elevada, efeitos de fluência, efeitos de alongamento térmico e tensões residuais.

Ao longo desta revisão bibliográfica verificaram-se alguns pontos comuns entre os diversos autores. A primeira, e mais importante, é do consenso geral que os fatores de redução para os parâmetros mecânicos do aço enformado a frio previstos nas diversas normas não se encontram adequados, sendo até, em algumas circunstâncias, pouco conservativos. Os autores que estudaram e compararam com as normas em vigor, ensaios em regime transiente e estacionário, verificaram que os primeiros se encontram mais próximos de uma situação real de incêndio e mais próximos das previsões das normas. A norma europeia (EN 1993-1-2, 2010) que propõe os mesmos fatores de redução para os aços enformados a frio e para secções laminadas a quente de classe 4, verifica-se algo divergente. Os efeitos de fluência térmica são relevantes para temperaturas e estados de tensão impostos relativamente altos, podendo ser este efeito desprezado para temperaturas inferiores a 600°C, desde que o ensaio tenha uma duração inferior a uma hora. Para temperaturas superiores a 600°C e estados de tensão superiores a 75% da tensão de cedência só não devemos contabilizar o efeito da fluência como esta pode assumir um efeito bastante relevante, até 6% da extensão total. A equação proposta pela norma (EN 1993-1-2, 2010) para o alongamento térmico é, no geral, penalizadora.

O comportamento de estruturas de aço enformado a frio quando expostas a uma situação de incêndio carece ainda de revisões a nível regulamentar, notando-se divergências em vários pontos das diversas normas. Este é um campo que merece ser aprofundado e previsto com o maior rigor possível uma vez que a construção metálica recorrendo a aços enformados a frio, utilizando-os como elementos estruturais principais, é uma realidade em ascensão. Da análise da Figura 2-12 e Figura 2-13 pode-se verificar que tanto para a tensão de cedência como para o módulo de elasticidade existem valores divergentes propostos por vários autores, mesmo para classes de aço idênticas.

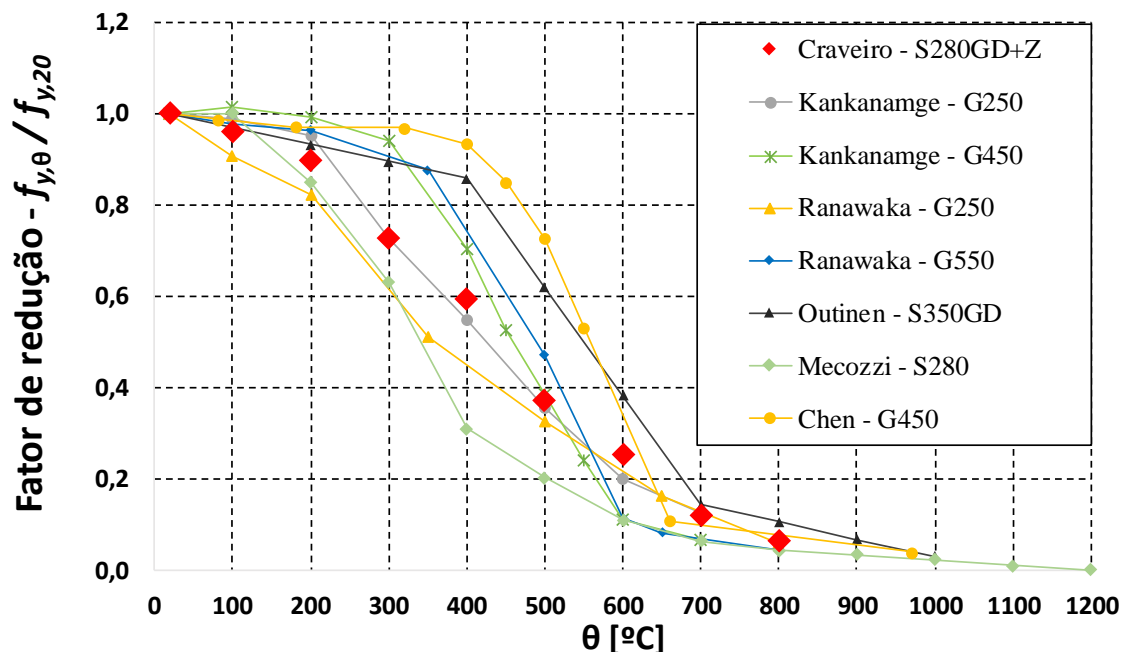


Figura 2-12 Fatores de redução da tensão de cedência propostos por vários autores para aços de diferentes classes

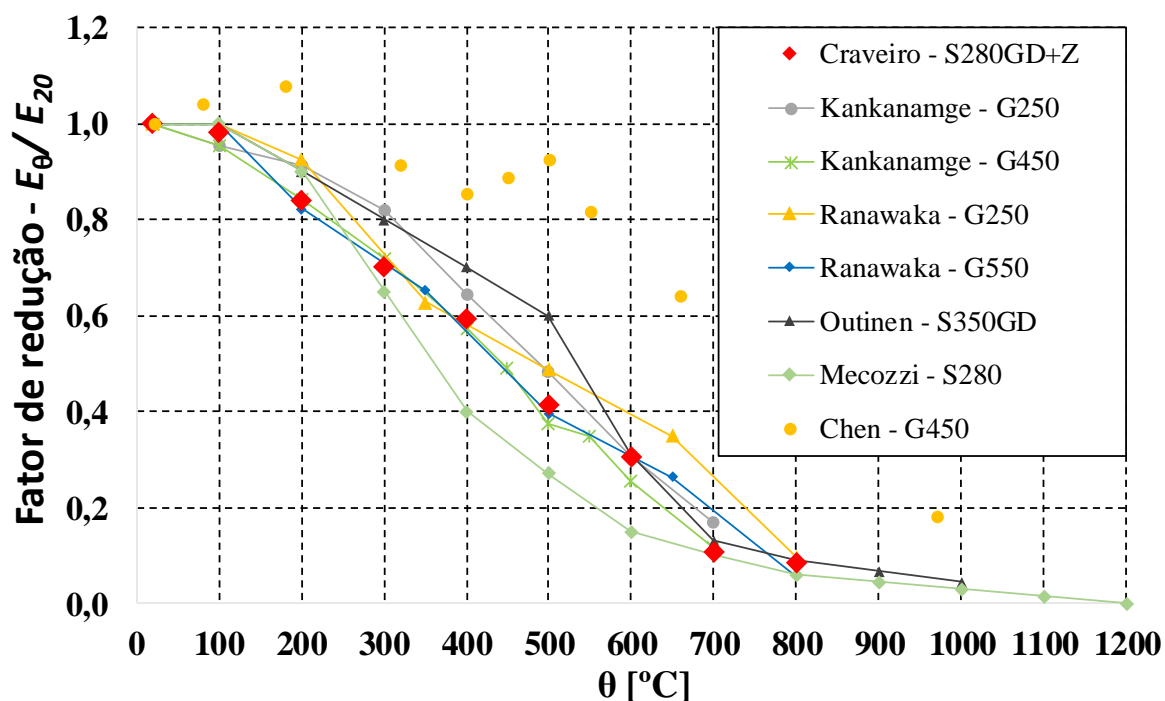


Figura 2-13 Fatores de redução para o módulo de elasticidade propostos por vários autores para aços de diferentes classes

Importa separar a previsão do comportamento do aço quando sujeito a altas temperaturas em secções diferentes para laminados a quente e enformados a frio, uma vez que é diferente o seu comportamento. Reforçar esta convicção é um dos objetivos deste trabalho experimental, levando a cabo ensaios em regime transiente e estacionário e entre duas classes de aço determinando os fatores de redução.

3 A NÁLISE EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

No presente capítulo é apresentada detalhadamente a análise experimental levada a cabo, com o objetivo de estudar a degradação das propriedades mecânicas de aço enformado a frio quando exposto a temperaturas elevadas. Como referido anteriormente, é objetivo deste documento realizar dois tipos de ensaios experimentais, comparando-os entre si e com resultados obtidos por outros autores. Assim sendo, foram realizados ensaios em regime estacionário com um intervalo de valores entre os 25°C e os 750°C (com incrementos de 150°C) e ensaios em regime transiente com os provetes submetidos a tensões de $0,10f_y$, $0,25f_y$, $0,5f_y$, $0,75f_y$ e $0,90f_y$, com uma taxa de aquecimento de 20°C/min.

No que diz respeito à tipologia do aço, para o S350GD+Z foram feitos ensaios tanto em regime transiente como estacionário. Para o aço S280GD+Z foram realizados ensaios unicamente em regime transiente, uma vez já existiam resultados dos ensaios em regime estacionário neste tipo de aço da tese de Doutoramento de Craveiro *et al.* (2016).

3.2 Protocolo Experimental

Por forma a obter as propriedades mecânicas do material foram realizados ensaios à temperatura ambiente (Figura 3-2 b) e temperatura elevada (Figura 3-1 b). Os provetes a ensaiar foram extraídos de perfis C200 com 2,55 mm de espessura do aço S350GD+Z, fornecidos pela empresa “O Feliz”. Os ensaios foram levados a cabo numa prensa “Servosis – MCH 2000” (Figura 3-1 (1)). Para medir a extensão do provete ao longo do ensaio foi usado um extensómetro de altas temperaturas “Epsilon model HI3548” (Figura 3-2 a) (Figura 3-1 (2)), este aparelho é munido de duas ponteiras cónicas, recomendadas para o uso em provetes de superfícies planas, as duas ponteiras distam 50,8 mm entre si. O extensómetro tem a capacidade de medir deformações até 25,4 mm (em tração). No decorrer dos ensaios a temperaturas elevadas foi usado um sistema de refrigeração Epsilon Caron 2050 model (Figura 3-1 (3)), por forma a proteger o extensómetro. Os dados foram registados recorrendo a um data logger TDS 530 (Figura 3-1 (4)). O incremento da temperatura foi feito através de um forno elétrico cilíndrico (Figura 3-1 (6)) regulando todo o processo de aquecimento com um controlador Eurotherm Controller (Figura 3-1 (5)).



Figura 3-1 Vista global de todo o equipamento. b) Preparação do ensaio de alta temperatura

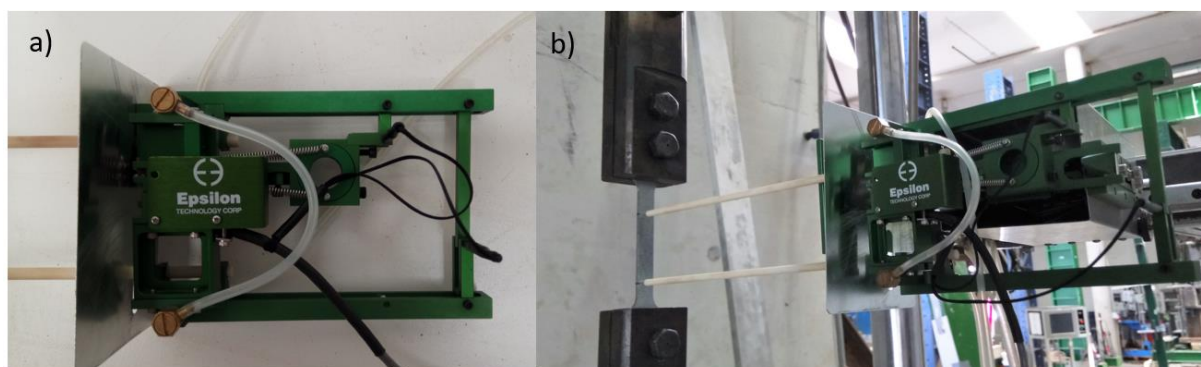


Figura 3-2 a) Pormenor do extensómetro de alta temperatura. b) Ensaio à temperatura ambiente

Numa fase inicial, foi necessário calibrar o extensómetro de altas temperaturas; utilizou-se um extensómetro mecânico FLA-6-11 em simultâneo nos ensaios à temperatura ambiente e compararam-se os resultados com os do extensómetro de temperaturas elevadas (Figura 3-7 e Figura 3-8). Depois do provete estar devidamente instrumentado é permitido o deslocamento das varetas por forma a acompanhar a deformação do provete durante o ensaio. A temperatura é um parâmetro fundamental no desenvolvimento destes ensaios, assim sendo, foram instrumentados dois termopares em cada provete, por forma a garantir que a leitura era feita de forma precisa. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ISO 6892.

3.2.1 Ensaios em regime transiente

Nos ensaios em regime transiente o provete é previamente sujeito a uma carga de serviço (percentagem da tensão de cedência), sendo depois submetido a uma dada taxa de aquecimento constante até à rotura do provete. A cada instante são determinadas a deformação e temperatura,

sendo possível relacionar a temperatura com extensão (Figura 3-3 b) e tensão com extensão (Figura 3-3 a).

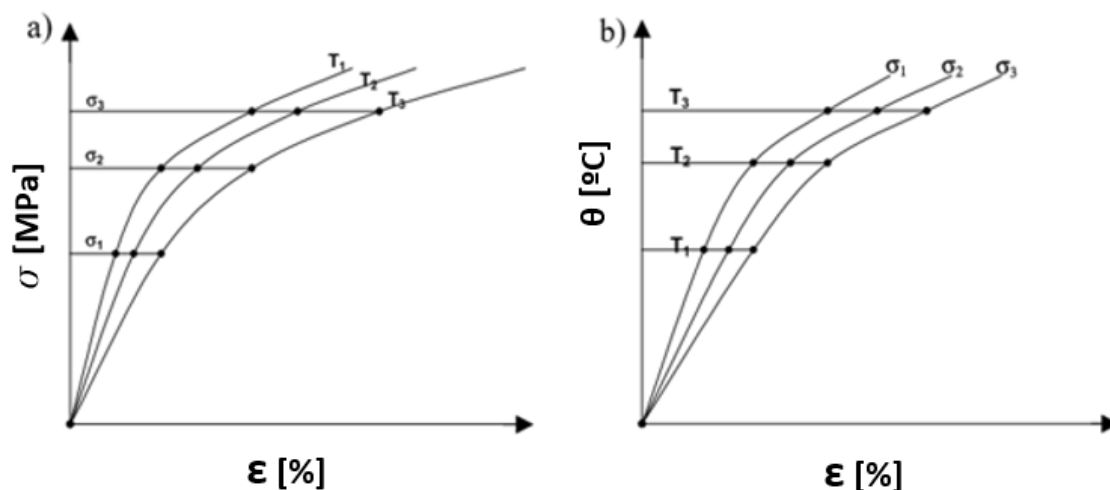


Figura 3-3 Gráfico tipo de resultados obtidos em regime transiente (adaptado de Outinen e Mäkeläinen, 2002)

A precisão do gráfico é diretamente proporcional ao número de ensaios realizados, sendo cada gráfico tensão-extensão composto por tantos pontos quanto os patamares de carga de serviço ensaiados. Esta metodologia de ensaio é considerada pela maioria dos investigadores como sendo a mais rigorosa quanto à reprodução do comportamento real do material. No entanto, a complexidade e o elevado número de ensaios necessário para a determinação das curvas de tensão-extensão levam a que se realizem ensaios em regime estacionário para caracterização do material.

Na análise dos ensaios foi retirada uma parcela à extensão registada, associada à dilatação térmica do material. Com a assemblagem dos diversos pontos dos gráficos extraídos dos ensaios em regime transiente é composta uma curva tensão-extensão (Figura 3-4) para cada temperatura.

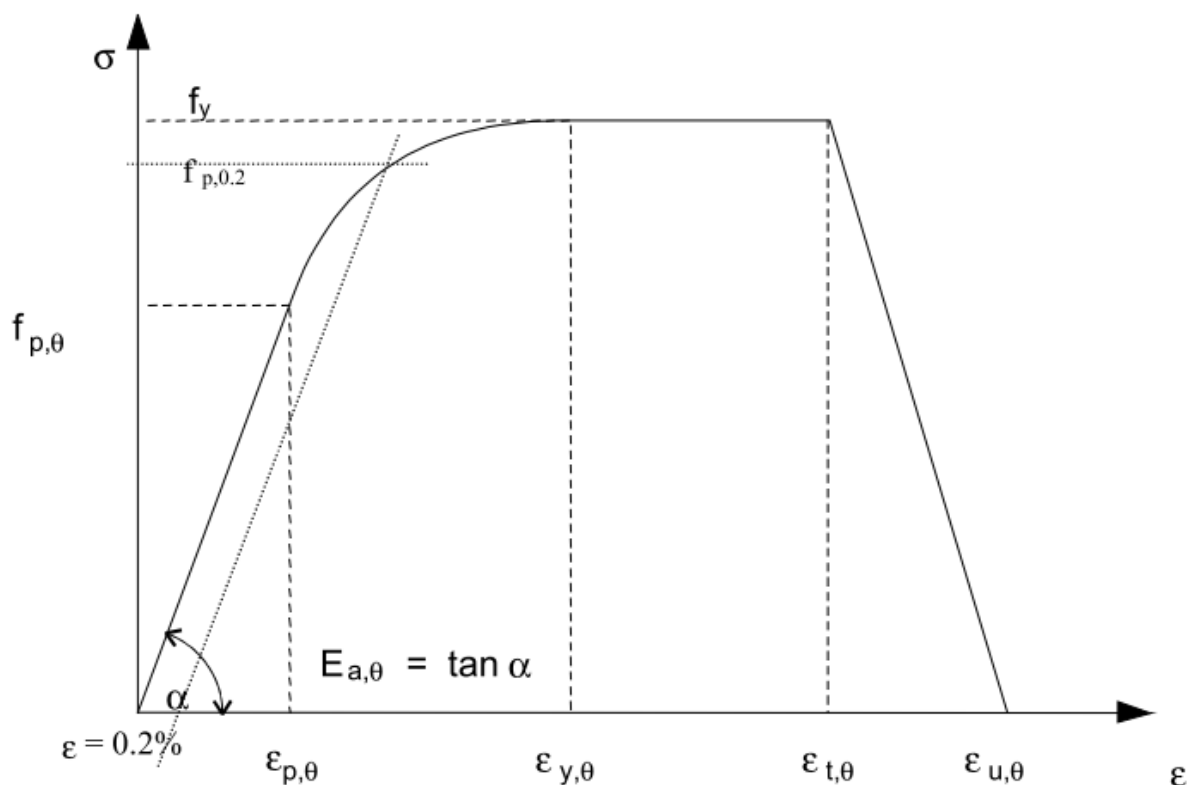


Figura 3-4 Gráfico tensão-extensão tipo de um ensaio em regime transiente (adaptado de Outinen e Mäkeläinen, 2002)

Os ensaios em regime transiente são executados em controlo de força e, recorrendo ao controlador do forno aumenta-se a temperatura até à rotura do provete.

3.2.2 Ensaios em regime estacionário

Os ensaios em regime estacionário exigem menos complexidade, na medida em que o provete é aquecido à temperatura que se pretende estudar e, de seguida é levado à rotura através de um ensaio de tração convencional. Em cada ensaio é determinada uma curva tensão-extensão associada à temperatura aplicada. Estes ensaios, ao contrário dos transientes, foram desenvolvidos em controlo de deslocamento com uma velocidade de ensaio de 0,3 mm/min. O procedimento em controlo de deslocamento prende-se unicamente pela facilidade que este apresenta em relação ao controlo de força, uma vez que o equipamento utilizado consegue finalizar automaticamente o ensaio.

3.3 Provetes de ensaio

Como referido anteriormente, os provetes foram extraídos de perfis C200 (S350GD+Z) que possuíam uma camada de galvanização de 0,04 mm. A preparação do provete foi feita com base na norma ISO-6892-1 (2009), a geometria pode ser consultada na Figura 3-5. Os provetes foram extraídos unicamente da alma dos perfis, esta opção foi tomada para que os provetes estejam sujeitos a tensões residuais idênticas.

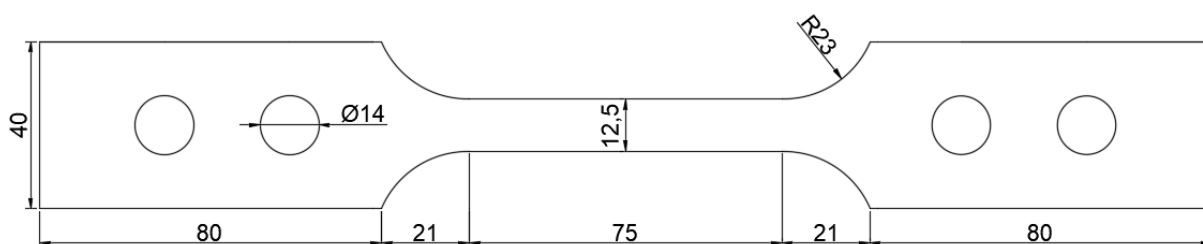


Figura 3-5 Medidas do provete usado no desenvolvimento da análise experimental.

Devido às altas temperaturas a que o provete precisava de estar sujeito, foram usadas garras em aço refratário (Figura 3-6 a) que permite oscilações de temperaturas sem danos no material. Para conseguir acoplar o provete às garras, foram feitos dois furos nas duas extremidades do provete com 14 mm de diâmetro. O recurso a dois furos em cada extremidade deve-se à prevenção de fenómenos de rotura localizada.

Por forma a determinar o valor médio da área do provete, foram feitas medições em três pontos ao longo do comprimento do provete determinando a espessura e altura. Para mitigar efeitos de escorregamento entre as varetas e o provete durante o ensaio, foi colocada pasta térmica nas zonas de contacto entre as varetas e o provete (Figura 3-6 b).



Figura 3-6 a) Garras de aço refratário usadas no desenvolvimento dos ensaios de tração. b) Exemplo de um provete usado nos ensaios.

3.4 Apresentação e discussão de resultados

3.4.1 Propriedades mecânicas do aço à temperatura ambiente

Da análise das curvas tensão-extensão dos ensaios à temperatura ambiente (Figura 3-7 e Figura 3-8) foi determinada a tensão de cedência. O método que reúne maior consenso entre os diversos autores para determinar este parâmetro é estudar a interceção entre uma reta paralela ao módulo de elasticidade com ponto inicial na abcissa correspondente a 0.2% de extensão. Vários autores (Kankanamge e Mahendran, 2011; Chen e Young, 2007) estudam também outros métodos para determinação da tensão de cedência nomeadamente tensões associadas à extensão de 0.5%, 1.5% e 2.0%, desta forma foi também determinada a tensão de cedência associada a estas extensões. O módulo de elasticidade foi determinado recorrendo à tangente associada ao comportamento elástico linear do material.

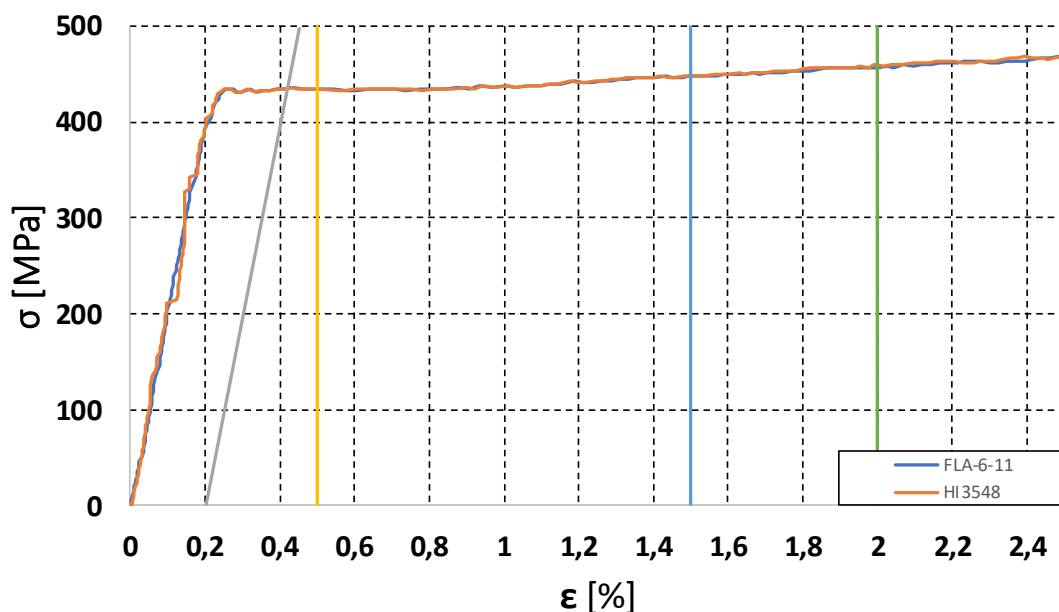


Figura 3-7 Curva Tensão-Extensão para o aço S350GD+Z

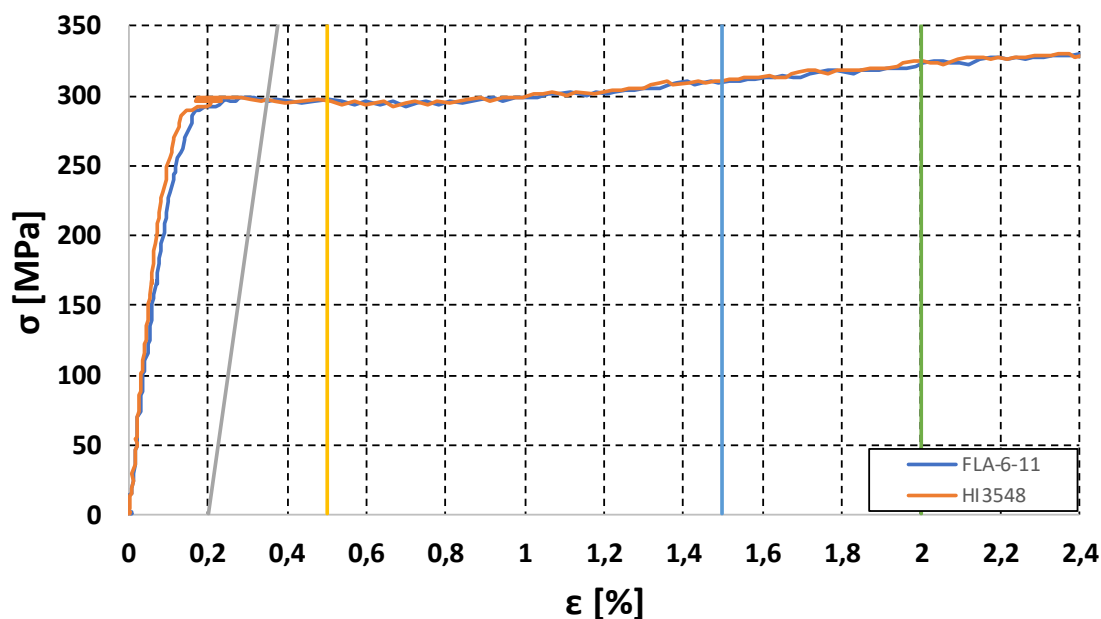


Figura 3-8 Curva Tensão-Extensão para o aço S280GD+Z

Para além destes parâmetros, foi determinada a tensão última ($f_{u,\theta}$) que se considera ser o valor máximo extraído das curvas tensão-extensão, a tensão de rotura ($f_{r,\theta}$), bem como as respetivas extensões e o valor para a tensão limite de proporcionalidade ($f_{p,\theta}$).

3.4.2 Propriedades mecânicas do aço a temperatura elevada

3.4.2.1 Ensaio de dilatação térmica

A análise das curvas tensão-extensão precisa de ter em consideração os fenómenos de dilatação térmica. Desta forma, foi realizado um ensaio de alongamento térmico. A extensão associada a este parâmetro será retirada à extensão total medida experimentalmente.

Analisando o ensaio de dilatação térmica (Figura 3-9) verifica-se que a curva descrita pelo ensaio experimental é bastante próxima da curva proposta pela EN 1993-1-2 (2010) até aos 600°C. Perto dos 700°C surge um patamar onde se mantém a extensão até perto dos 830°C, nesta zona os valores obtidos entre o experimental e a norma em causa têm uma diferença de cerca de 15%. Craveiro *et al.* (2016) propõe uma equação para o alongamento térmico muito próxima da obtida experimentalmente até aos 600°C atingindo mesmo a zona de patamar para extensões mais elevadas que as propostas na norma.

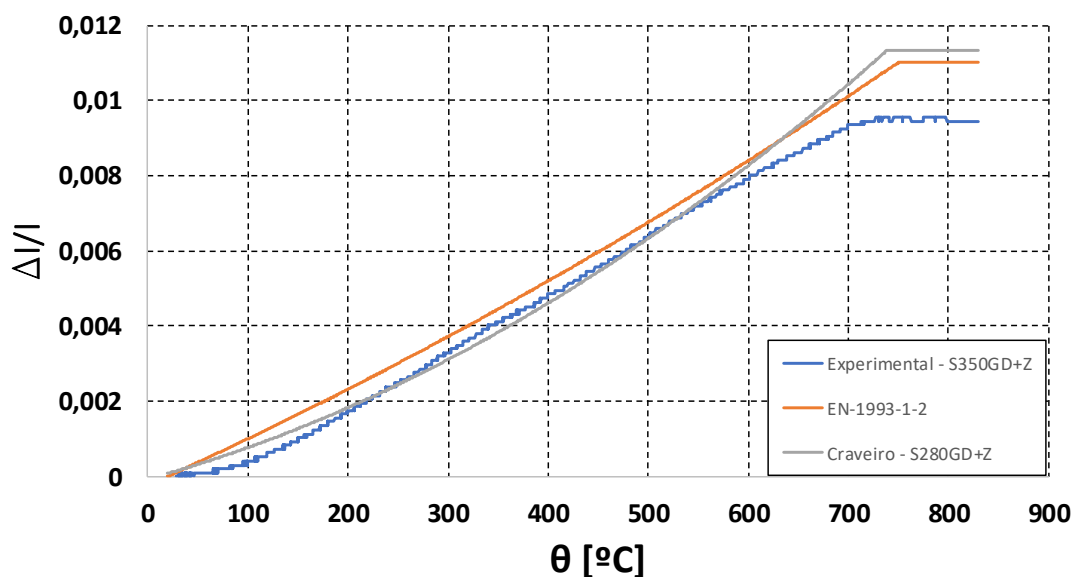


Figura 3-9 Ensaio de alongamento térmico

No âmbito desta análise só foi realizado o ensaio de alongamento térmico para o aço S350GD+Z, curva denominada experimental (Figura 3-9). Os dados fornecidos por Craveiro *et al.* (2016) relativos ao ensaio de dilatação são referentes ao aço S280GD+Z

3.4.2.2 Ensaios em regime estacionário – S350GD+Z

Os ensaios em regime estacionário foram realizados para temperaturas entre os 25 e os 750°C, com incrementos de 150°C. Importa referir que foram levados a cabo três ensaios para cada temperatura de modo a despistar eventuais erros que possam surgir em ensaios isolados. Apresentam-se as curvas tensão-extensão para temperatura ambiente (25°C) e para temperaturas (150, 300, 450, 600 e 750°C) na Figura 3-10.

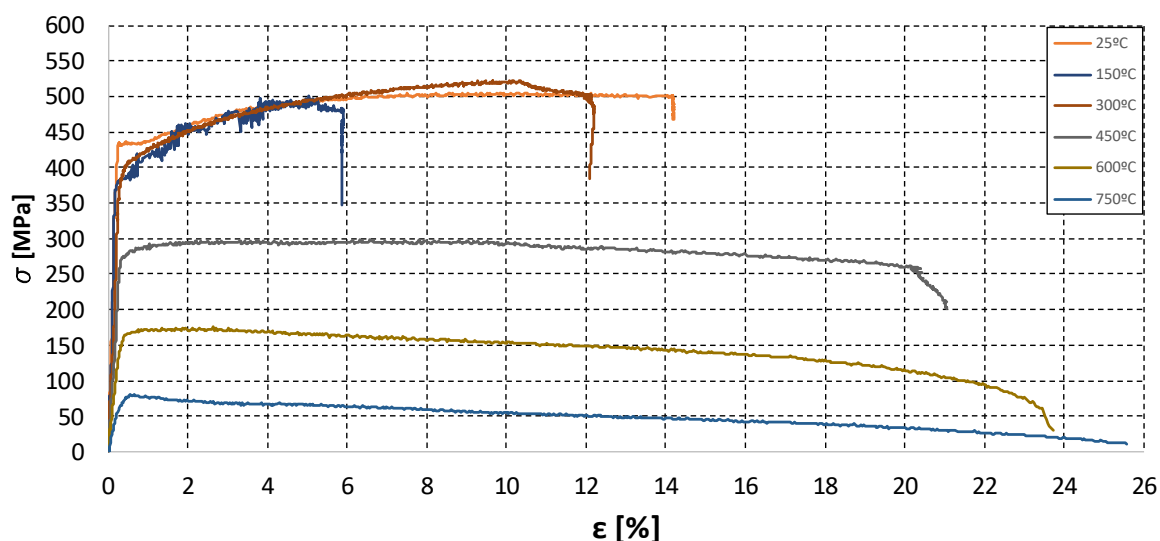


Figura 3-10 Ensaios regime estacionário - Aço S350GD+Z

Das curvas em análise pode-se verificar um patamar de cedência para o aço ensaiado à temperatura ambiente e para o de 150°C, embora menos definido neste último. A partir dos 300°C o material não define este patamar característico do comportamento do aço. A zona de endurecimento do aço é visível para os ensaios entre as temperaturas ambiente e 300°C, onde claramente se nota um crescente de tensão após o patamar de cedência. Aos 450°C e superiores, os ensaios não evidenciam este ganho de tensão. Na Tabela 1 são apresentados os valores médios obtidos nestes ensaios para a tensão de cedência ($f_{y,\theta}$), tensão limite de proporcionalidade ($f_{p,\theta}$), módulo de elasticidade (E_θ), tensão última ($f_{u,\theta}$) e tensão de rotura ($f_{r,\theta}$).

Tabela 1 Valores médios das propriedades mecânicas - S350GD+Z – Regime estacionário

Ensaio	Temperatura [°C]	\bar{E}_θ [GPa]	$\bar{f}_{y0.2\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{y0.5\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{y1.5\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{y2.0\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{p,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{u,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{r,\theta}$ [MPa]
A_25	25°C	195,09	434,55	437,40	458,30	465,13	404,69	507,21	490,76
A_150	150°C	195,07	402,08	414,26	451,91	469,91	370,93	520,89	497,21
A_300	300°C	143,27	396,13	398,95	442,37	464,60	357,25	513,58	503,48
A_450	450°C	98,30	286,28	289,02	300,42	300,32	257,57	305,90	266,54
A_600	650°C	51,57	168,92	167,89	172,03	170,65	142,72	175,16	110,64
A_750	750°C	19,10	72,67	77,47	73,70	70,61	60,29	77,21	23,06

Os modos de rotura dos ensaios em regime estacionário relativos ao aço S350GD+Z encontram-se na Figura 3-11.

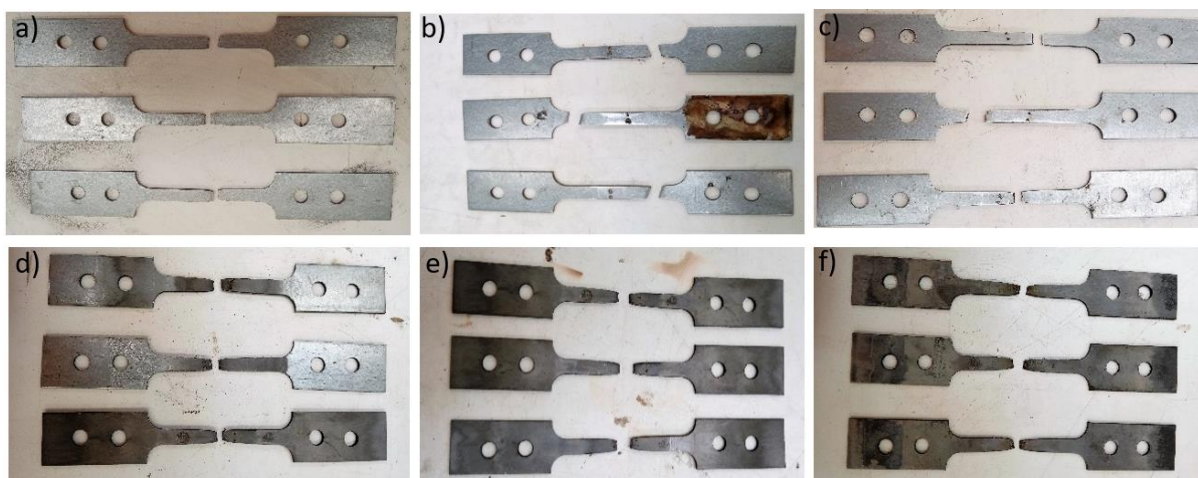


Figura 3-11 Modos de ruptura dos ensaios em regime estacionário - S350GD+Z. a) 25°C; b) 150°C; c) 300°C; d) 450°C; e) 600°C; f) 700°C.

3.4.2.3 Ensaios em regime transiente – S350GD+Z

Foram realizados ensaios em regime transiente para cinco patamares de tensões instaladas. Os patamares de tensão instalados no provete no começo do ensaio são percentagem da tensão de cedência. Esta decisão não é exigida para este tipo de ensaio; foi adotada esta metodologia por ser a mais utilizada pelos autores consultados no desenvolvimento deste trabalho: $0.10\%f_y$, $0.25\%f_y$, $0.5\%f_y$, $0.75\%f_y$, $0.9\%f_y$.

Ensaios em regime transiente são substancialmente mais complexos que os anteriores, uma vez que não se faz a análise de parâmetros para cada ensaio individualmente. Os dados extraídos de cada ensaio permitem formular um gráfico que relaciona a temperatura e a extensão do provete. Para a construção da curva tensão-extensão é necessário efetuar uma assemblagem dos dados de todos os ensaios num só gráfico. A tensão de cedência escolhida para definir as tensões pré-instaladas foi a tensão $f_{y,0.2\%}$ do ensaio à temperatura ambiente – 404,55 MPa. Assim sendo para o aço S350GD+Z, tensões de 40.4, 101, 202, 303 e 363.5 MPa.

Os gráficos dos dados recolhidos nos ensaios em regime transiente são fornecidos na Figura 3-12. Deste gráfico pode-se verificar que existe um patamar inicial onde se submete o provete à carga pretendida, a temperatura ambiente. De seguida, existe um regime próximo da linearidade onde a extensão aumenta com o aumento da temperatura. Posteriormente, existe uma fase onde se verifica uma acentuada quebra das propriedades mecânicas do aço, onde a extensão tem um aumento substancial para um intervalo relativamente baixa de temperatura. A ruptura do material dá-se para extensões relativamente baixas, evidenciando um aço com comportamento frágil, não assumindo grandes deformações antes da ruptura.

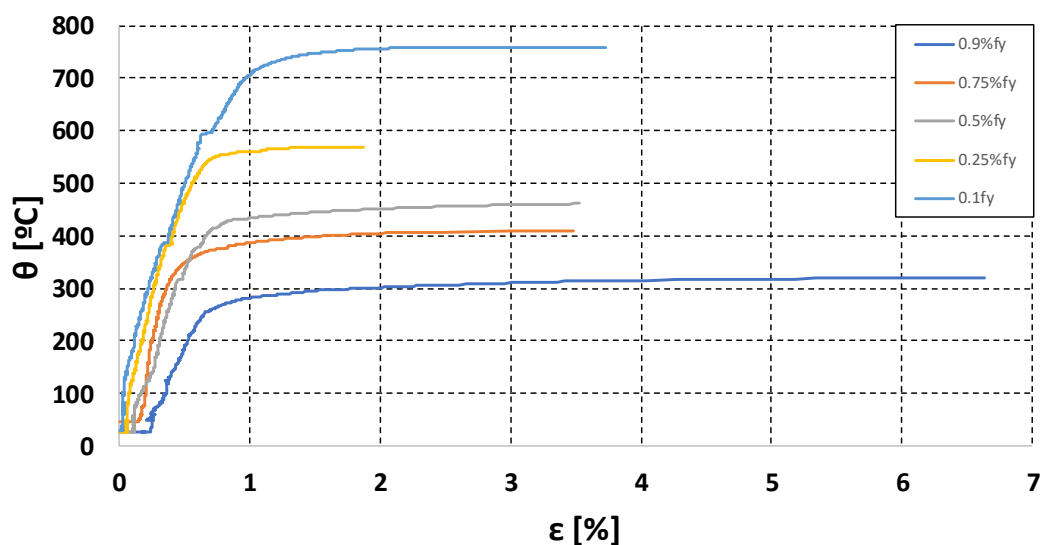


Figura 3-12 Gráfico Temperatura-Extensão fornecido por cada ensaio em regime transiente – S350GD+Z.

A construção da curva tensão-extensão associada a cada temperatura é feita determinando a extensão a uma dada temperatura para todos os patamares de tensão ensaiados. Desta forma, o rigor da curva tensão-extensão (Figura 3-13) é proporcional à quantidade de tensões pré-instaladas ensaiadas.

Importa referir dois aspetos relativamente a estes ensaios. Às extensões extraídas do ensaio foram retiradas as extensões associadas à dilatação térmica, à semelhança dos ensaios em regime estacionário. Ao contrário dos ensaios em regime estacionário, o tempo de ensaio destes provetes, para temperaturas mais altas, chegou a ser próximo de uma hora. Por consequência, ensaios que exigiam temperaturas mais elevadas na sua rotura podem ter tido influência de fenómenos de fluência.

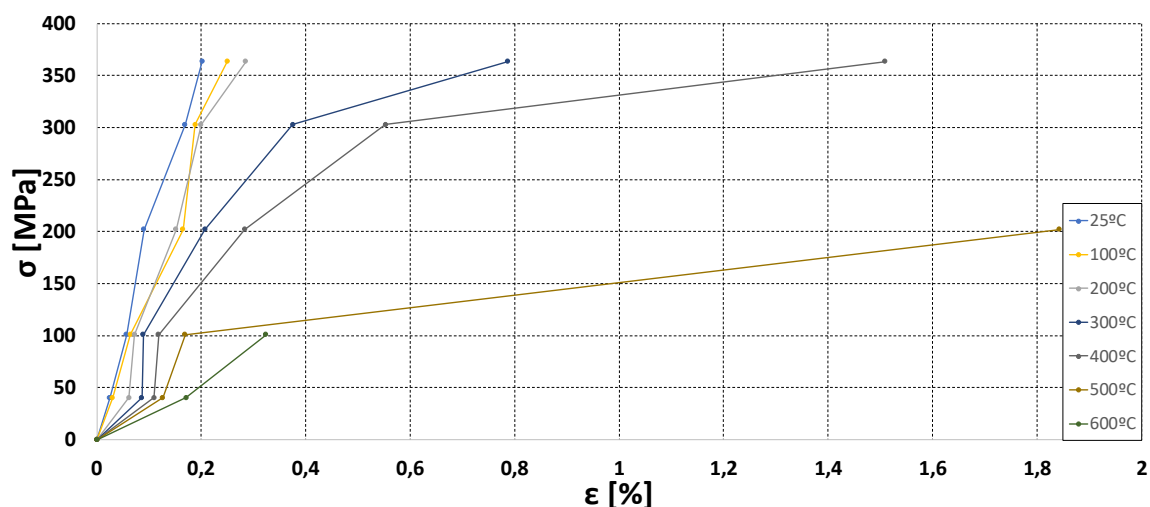


Figura 3-13 Curvas tensão-extensão obtidas nos ensaios em regime transiente - S350GD+Z

Da análise da Figura 3-13 pode-se verificar que, para temperaturas de 200°C e inferiores o material não apresenta qualquer indício de entrar em cedência. Embora se notem inclinações diferentes das retas, na fase elástica, que traduz a redução do módulo de elasticidade. Aos 300°C a curva já evidencia uma tendência de cedência do provete perto dos 300 MPa. Acima desta temperatura as curvas mostram relações tensão-extensão associadas à fase de rotura. Esta fase é de extrema dificuldade de caracterizar, sendo necessário uma larga campanha de ensaios para estimar certos regimes característicos do comportamento do aço, como os patamares de cedência e rotura. Mais uma vez, verificamos extensões relativamente baixas nesta qualidade de aço. Na Tabela 2 são apresentados os valores médios obtidos nestes ensaios para a tensão de cedência ($f_{y,\theta}$), módulo de elasticidade (E_θ) e tensão de rotura ($f_{r,\theta}$). Para a tensão de rotura preferiu-se apontar intervalos de valores uma vez que seria preciso uma larga escala de ensaios para assumir com a precisão necessária qual a tensão de rotura do material. Na Figura 3-14 pode-se verificar os modos de rotura dos ensaios em regime transiente que dizem respeito ao aço S350GD+Z.

Tabela 2 Valores médios das propriedades mecânicas - S350GD+Z – Regime transiente

Ensaio	Temperatura [°C]	\bar{E}_θ [GPa]	$\bar{f}_{y0.2\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{y0.5\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{y1.5\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{r,\theta}$ [MPa]
A_25	25°C	195,17	-	-	-	>363,6
A_100	100°C	179,38	-	-	-	>363,6
A_200	200°C	152,00	-	-	-	>363,6
A_300	300°C	147,44	-	321,34	-	[303;363,6]
A_400	400°C	107,60	178,36	283,24	363,01	[202;303]
A_500	500°C	45,38	116,63	120,96	181,29	[101;202]
A_600	600°C	21,43	-	-	-	[40,4;101]

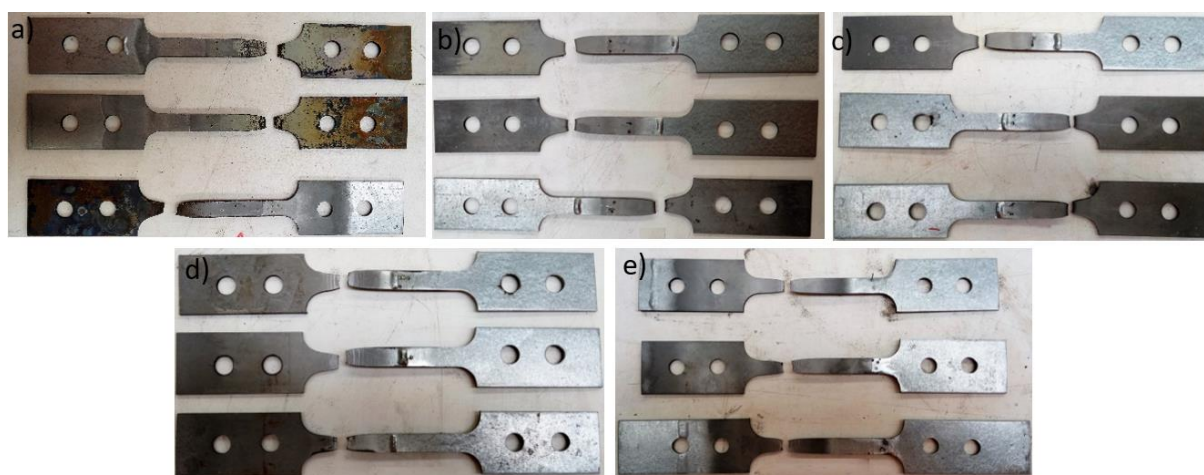


Figura 3-14 Modos de rotura dos ensaios em regime transiente - S350GD+Z. a) 0,10% f_y ; b) 0,25% f_y ; c) 0,50% f_y ; d) 0,75% f_y ; e) 0,90% f_y .

3.4.2.4 Ensaios em regime transiente – S280GD+Z

Todos os pressupostos tidos em conta para o desenvolvimento dos ensaios em regime transiente para o aço S350GD+Z foram mantidos para o aço S280GD+Z. Uma vez mais a tensão de cedência escolhida para definir as tensões pré-instaladas foi a tensão $f_{y0.2\%,\theta}$ do ensaio à temperatura ambiente – 303.23 MPa. Assim sendo para o aço S280GD+Z foram consideradas tensões de 30, 75, 150, 225 e 270 MPa. Na Figura 3-15 pode-se verificar os gráficos temperatura-extensão extraídos dos ensaios em regime transiente.

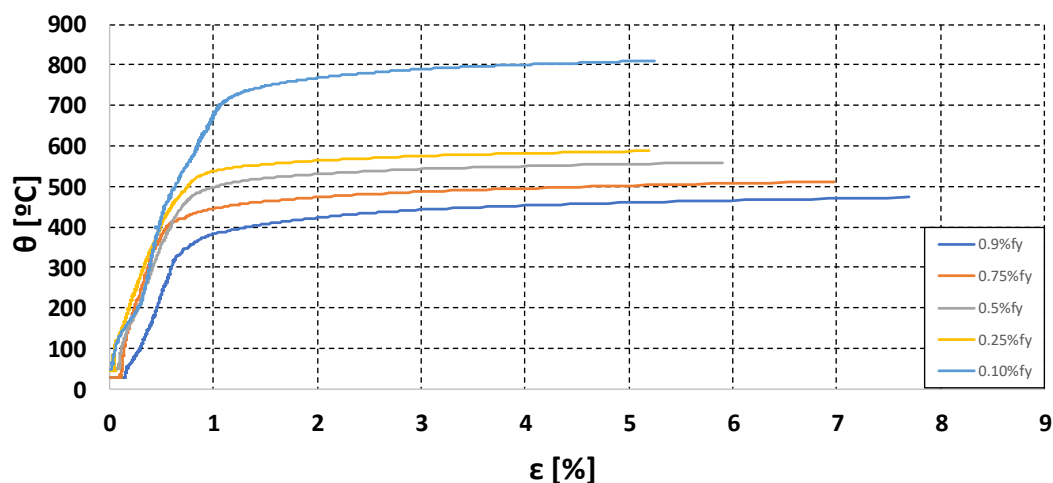


Figura 3-15 Gráfico temperatura-extensão fornecido por cada ensaio em regime transiente – S280GD+Z.

Toda a metodologia de processamento dos dados foi idêntica, a subtração da extensão associada à dilatação térmica à extensão total, foi feita recorrendo à curva de alongamento térmico proposta por Craveiro *et al.* (2016). A questão relativa ao fenómeno de fluência mantém-se nestes ensaios uma vez que para as tensões pré-instaladas mais baixas os ensaios chegaram a ter durações de perto de uma hora, que apesar de tudo não se espera ter grande influência.

Da análise da Figura 3-16 pode-se verificar que, à semelhança dos ensaios em regime transiente do aço S350GD+Z, existe um espetro de temperaturas nas quais o material não entra em cedência. Neste caso até aos 300°C, o material não apresenta características de cedência. Apesar de não se verificar a cedência do material pode-se constatar que as inclinações das retas na fase elástica têm inclinações diferentes evidenciando uma redução do módulo de elasticidade. Aos 400°C a curva tensão-extensão evidencia cedência do material perto dos 250 MPa. Acima da temperatura de 400°C, as curvas mostram relações tensão-extensão associadas à fase de rotura do material. Para esta classe de aço verificam-se extensões significativamente maiores quando comparadas com os ensaios do aço S350GD+Z. Na Tabela 3 são apresentados os valores médios obtidos nestes ensaios para a tensão de cedência ($f_{y,\theta}$), módulo de elasticidade (E_θ) e tensão de rotura ($f_{r,\theta}$). Uma vez mais a tensão de rotura preferiu-se apontar intervalos de valores para caracterizar a rotura do material.

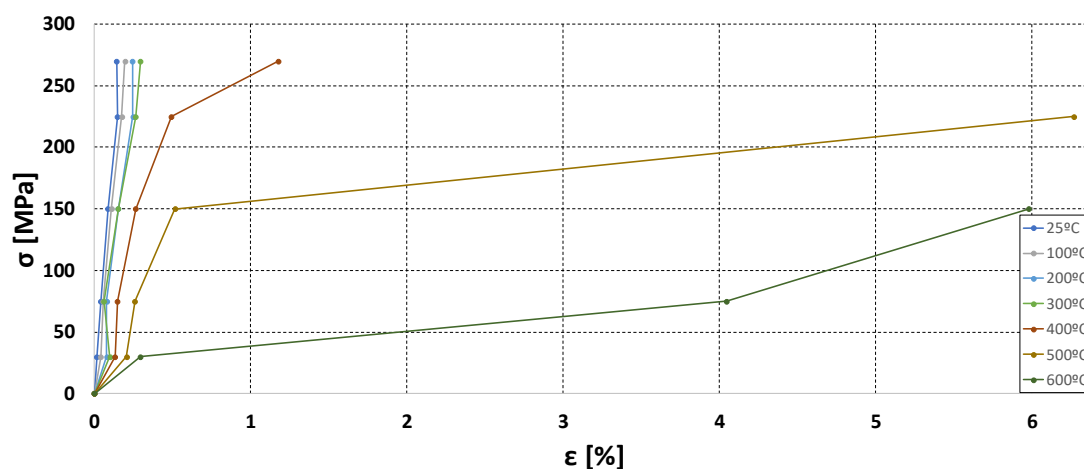


Figura 3-16 Curvas tensão-extensão obtidas nos ensaios em regime transiente - S280GD+Z

Tabela 3 Valores médios das propriedades mecânicas – S280GD+Z – Regime transiente

Ensaio	Temperatura [°C]	\bar{E}_θ [GPa]	$\bar{f}_{y0.2\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{y0.5\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{y1.5\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{y1.5\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{r,\theta}$ [MPa]
B_25	25°C	187,43	-	-	-	-	>270
B_100	100°C	172,36	-	-	-	-	>270
B_200	200°C	144,84	-	-	-	-	>270
B_300	300°C	130,19	-	321,34	-	-	>270
B_400	400°C	71,25	201,35	225,52	229,38	237,86	[225;270]
B_500	500°C	44,01	122,5	146,03	162,85	169,37	[75;150]
B_600	600°C	12,90	31,17	32,48	44,47	50,46	[30;75]

Na Figura 3-17 pode-se verificar os modos de rotura dos ensaios em regime transiente para o aço S280GD+Z. Os ensaios à temperatura ambiente foram realizados por forma a determinar as características do material, nomeadamente a tensão de cedência para realizar os ensaios em regime transiente.

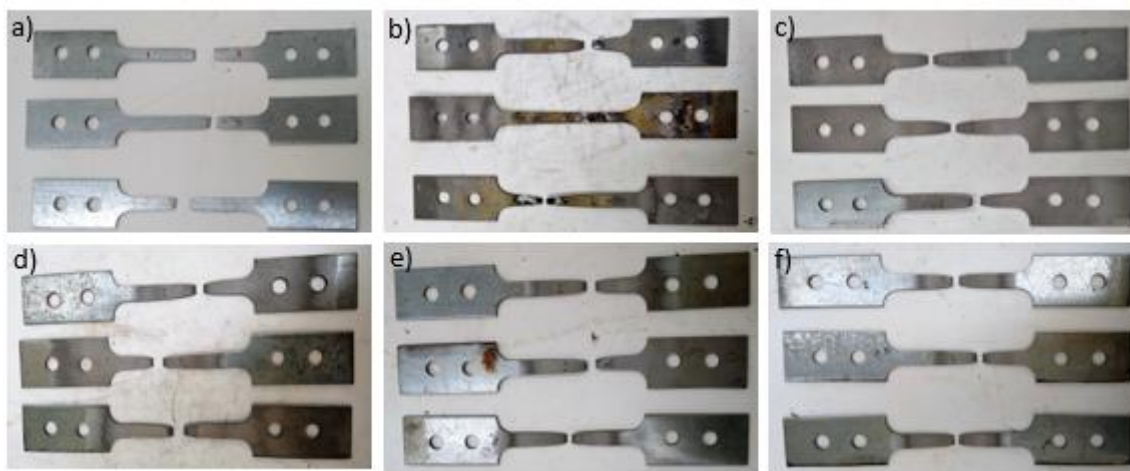


Figura 3-17 Modos de rotura dos ensaios em regime transiente – S280GD+Z. a) 25°C; b) 0,10% f_y ; c) 0,25% f_y ; d) 0,50% f_y ; e) 0,75% f_y ; f) 0,90% f_y .

Do mesmo lote de aço, Craveiro *et al.* (2016) realizou ensaios em regime estacionário. Os valores médios obtidos pelo autor encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 Valores médios das propriedades mecânicas - S280GD+Z – Regime estacionário (adaptado de Craveiro *et al.* (2016))

Ensaio	Temperatura [°C]	\bar{E}_θ [GPa]	$\bar{f}_{y0.2\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{y0.5\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{y1.5\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{y2.0\%,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{p,\theta}$ [MPa]	$\bar{f}_{u,\theta}$ [MPa]
CT_20	20°C	204,18	306,81	309,06	331,26	342,41	212,5	424,04
CT_100	100°C	200,11	295,24	297,17	325,29	342,53	209,25	415,49
CT_200	200°C	171,8	275,75	292,31	352,53	371,89	170,68	471,5
CT_300	300°C	143,59	223,57	237,61	284,66	298,18	136,37	397,41
CT_400	400°C	121,21	181,68	190,19	220,23	224,91	98,71	291,73
CT_500	500°C	84,54	113,67	122,49	142,73	146,44	80,25	165,85
CT_600	600°C	62,46	77,83	79,85	82,97	85,1	54,57	87
CT_700	700°C	22,21	36,34	40,32	49,1	49,83	19,26	50,48
CT_800	800°C	17,45	19,91	22,93	28,96	29,8	16,49	31,47

3.4.3 Comparação entre ensaios em regime transiente e estacionário

De maneira a facilitar a confrontação de resultados entre os diversos parâmetros estudados nesta análise experimental recorre-se ao conceito de fatores de redução. Fatores de redução são coeficientes que afetam as propriedades mecânicas do material quando pretendemos prever o comportamento do aço numa situação de incêndio. Estes fatores, para as várias propriedades mecânicas do aço a temperaturas elevadas ($k_{E,\theta}, k_{y,\theta}, k_{u,\theta}, k_{r,\theta}, k_{p,\theta}$) são obtidos através do rácio entre o valor médio de cada parâmetro obtido a uma dada temperatura com o valor desse mesmo

parâmetro à temperatura ambiente. Exceto o fator de redução da tensão limite de proporcionalidade que foi obtido através do rácio entre a tensão limite de proporcionalidade a alta temperatura e a tensão de cedência.

Por forma a realizar uma análise mais detalhada, estudaram-se os fatores de redução relativos à tensão de cedência associados às diversas extensões supracitadas no capítulo anterior ($f_{y0.2\%,\theta}$, $f_{y0.5\%,\theta}$, $f_{y1.5\%,\theta}$, $f_{y2.0\%,\theta}$). Pode-se verificar na Tabela 5 e Tabela 6 os fatores de redução para o aço S350GD+Z para regime estacionário e transiente, respetivamente.

Tabela 5 Fatores de redução S350GD+Z - Regime estacionário

Fatores de Redução - $k_{E,\theta}, k_{y,\theta}, k_{u,\theta}, k_{r,\theta}, k_{p,\theta}$ – S350GD+Z – Regime Estacionário

T [°C]	E_{θ}/E_{25}	$f_{p,\theta}/f_{y,25}$	$f_{u,\theta}/f_{u,25}$	$f_{r,\theta}/f_{r,25}$	$f_{y,\theta}/f_{y,25}$			
					0.2%	0.5%	1.5%	2.0%
25	1	0,931	1	1	1	1	1	1
150	1,000	0,854	1,013	1,013	0,937	0,947	0,986	1,010
300	0,734	0,822	1,027	1,026	0,912	0,912	0,965	1,014
450	0,504	0,593	0,603	0,543	0,659	0,661	0,656	0,655
600	0,264	0,328	0,346	0,225	0,389	0,384	0,375	0,372
750	0,098	0,139	0,152	0,047	0,171	0,165	0,157	0,151

Tabela 6 Fatores de redução S350GD+Z - Regime Transiente

Fatores de Redução - $k_{E,\theta}$ e $k_{y,\theta}$

T [°C]	E_{θ}/E_{25}	$f_{y,\theta}/f_{y,25}$		
		0.2%	0.5%	1.5%
25	1	1	1	1
100	0,919	>0,9	>0,831	>0,793
200	0,779	>0,9	>0,831	>0,793
300	0,755	0,712	0,735	>0,793
400	0,551	0,590	0,648	0,792
500	0,233	0,284	0,277	0,396
600	0,110	-	-	-

Na Tabela 6 verifica-se alguns fatores de redução registados em forma de intervalo de valores. Da análise da Figura 2-13 verifica-se que, para um leque variado de temperaturas, a curva tensão-extensão não permite determinar a extensão associada aos parâmetros $f_{y0.2\%,\theta}$, $f_{y0.5\%,\theta}$,

$f_{y1.5\%,\theta}$, nem se obtiveram extensões superiores a 2.0%. Na Tabela 5 verifica-se que para as tensões de cedência associadas às extensões de 2.0% os fatores de redução são pouco coerentes com da tensão de cedência associada às restantes extensões, assumindo até valores superiores à unidade e relativamente parecidos aos fatores de redução da tensão última. Por estas razões a esmagadora maioria dos autores (Outinen, 2004; Chen e Young, 2007) e normas (EN 1993-1-2 (2010)) desaconselham a metodologia para determinação da tensão de cedência associada às extensões de 1.5% e 2.0%.

Na Figura 3-18 pode-se verificar que na grande maioria das temperaturas estudadas, os ensaios em regime transiente conduzem a fatores de redução mais penalizadores para o módulo de elasticidade. Apenas aos 300°C as curvas propostas para os fatores de redução do módulo de elasticidade se cruzam, embora a diferença entre os coeficientes propostos por ambos os ensaios seja pequena. Nas gamas mais baixas de temperatura (100, 200°C) para os ensaios em regime estacionário revelam uma perda nula, ou pouco relevante neste parâmetro contra os ensaios em regime transiente que mostram que o material já reduziu o módulo de elasticidade em cerca de 10% e 20% para as temperaturas de 100 e 200°C, respetivamente. Entre os 250 e os 450°C verificam-se valores similares, mas, acima dos 500°C mostram maiores fatores de redução. Nos ensaios em regime transiente verifica-se que aos 600°C a capacidade resistente do material é muito baixa (perto dos 10%) enquanto que para os ensaios em regime estacionário este mesmo valor de degradação do material só é atingido aos 750°C.

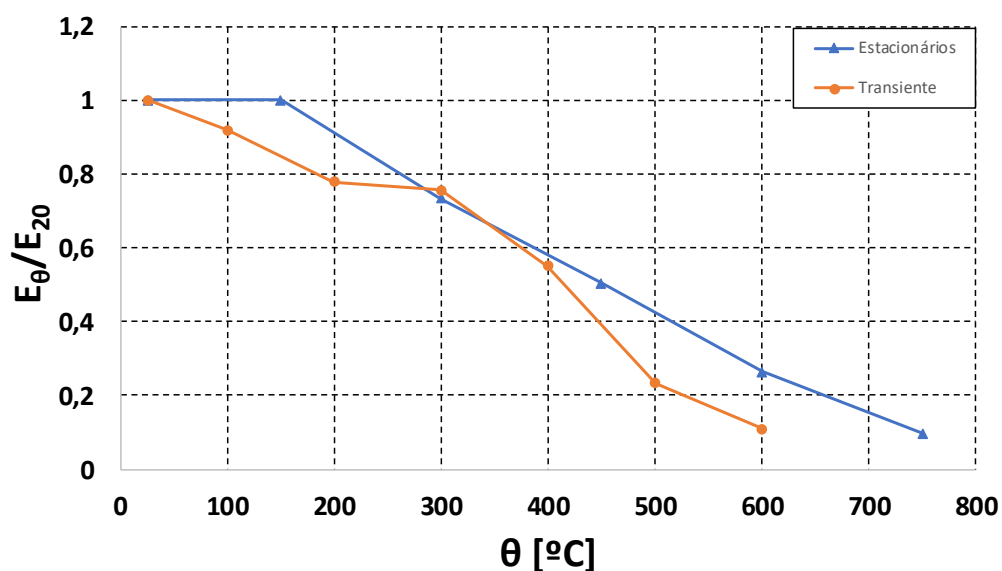


Figura 3-18 Fator de redução para o módulo de elasticidade - S350GD+Z

Estudando os fatores de redução relativos à tensão de cedência na Figura 3-19, verifica-se que os fatores de redução obtidos para os ensaios estacionários (E) são semelhantes. À semelhança do módulo de elasticidade os ensaios em regime transiente (T) assumem valores mais baixos quando comparados com os ensaios em regime estacionário. Excluindo as gamas de temperaturas inferiores aos 200°C, onde não se conseguiu definir a cedência do material nos ensaios em regime transiente, as curvas propostas para os fatores de redução são bastante similares.

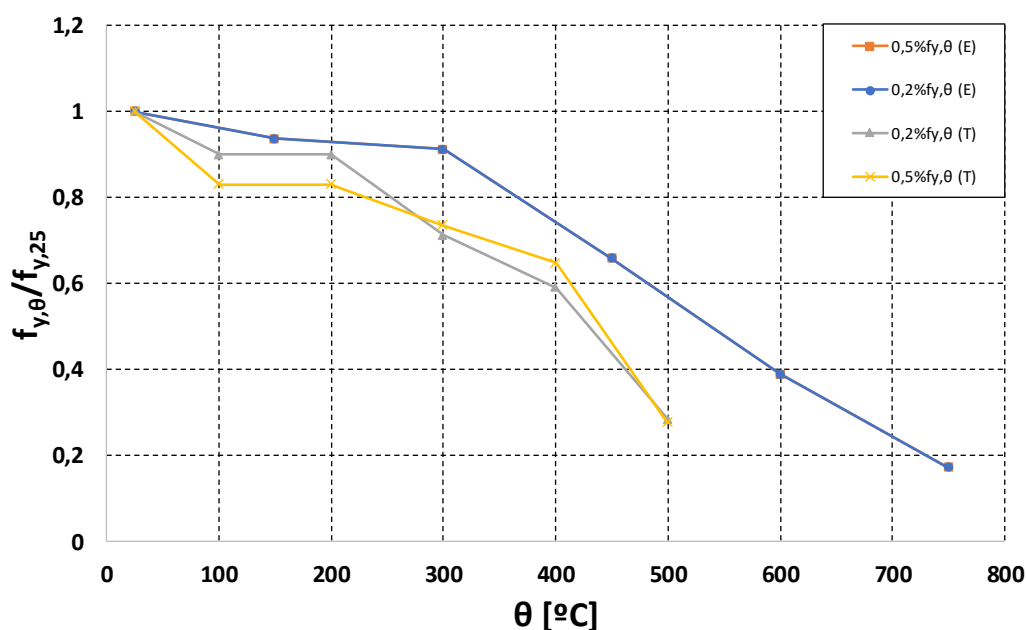


Figura 3-19 Fator de redução para a tensão de cedência - S350GD+Z

Para temperaturas superiores a 300°C observam-se grandes diferenças entre as duas metodologias de ensaio chegando a assumir uma diferença de 30% entre o fator de redução proposto, para os 500°C.

Na Tabela 7 e Tabela 8 são apresentados os fatores de redução para aço S280GD+Z para ensaios em regime estacionário e transiente, respetivamente.

Tabela 7 Fatores de redução S280GD+Z - Regime estacionário (adaptado de Craveiro et al., 2016)

Fatores de redução - $K_{E,\theta}$, $K_{u,\theta}$, $K_{p,\theta}$ e $K_{y,\theta}$ – S280GD+Z – Regime estacionário

T [°C]	E_{θ}/E_{20}	$f_{p,\theta}/f_{y,20}$	$f_{u,\theta}/f_{u,20}$	$f_{y,\theta}/f_{y,20}$			
				0.2%	0.5%	1.5%	2.0%
25	1	0,692	1	1	1	1	1
100	0,98	0,682	0,979	0,962	0,961	0,966	1
200	0,841	0,556	1,111	0,898	0,945	1,047	1,086
300	0,703	0,444	0,937	0,728	0,768	0,846	0,87
400	0,593	0,321	0,687	0,592	0,615	0,654	0,656
500	0,414	0,261	0,391	0,37	0,396	0,424	0,427
600	0,305	0,177	0,205	0,253	0,258	0,246	0,248
700	0,108	0,062	0,045	0,118	0,13	0,145	0,145
800	0,085	0,053	0,038	0,064	0,074	0,086	0,087

Tabela 8 Fatores de redução S280GD+Z - Regime transiente

Fatores de Redução - $k_{E,\theta}$ e $k_{y,\theta}$

T [°C]	E_{θ}/E_{25}	$f_{y,\theta}/f_{y,25}$			
		0.2%	0.5%	1.5%	2.0%
25	1	1	1	1	1
100	0,920	>0,891	>0,874	>0,815	>0,789
200	0,773	>0,891	>0,874	>0,815	>0,789
300	0,695	>0,891	>0,874	>0,815	>0,789
400	0,380	0,671	0,730	>0,815	>0,789
500	0,235	0,404	0,473	0,492	0,495
600	0,069	0,103	0,105	0,134	0,147

Relativamente ao fator de redução do módulo de elasticidade para o aço S280GD+Z pode-se analisar na Figura 3-20 a coerência relativamente aos resultados do aço S350GD+Z. Os ensaios em regime transiente conduzem a fatores de redução mais condicionantes quando comparados com os ensaios em regime estacionário. Para esta classe de aço nota-se uma diferença pouco significativa para temperaturas iguais e inferiores a 300°C, mas a partir desta temperatura as diferenças entre os fatores de redução propostos torna-se relevante.

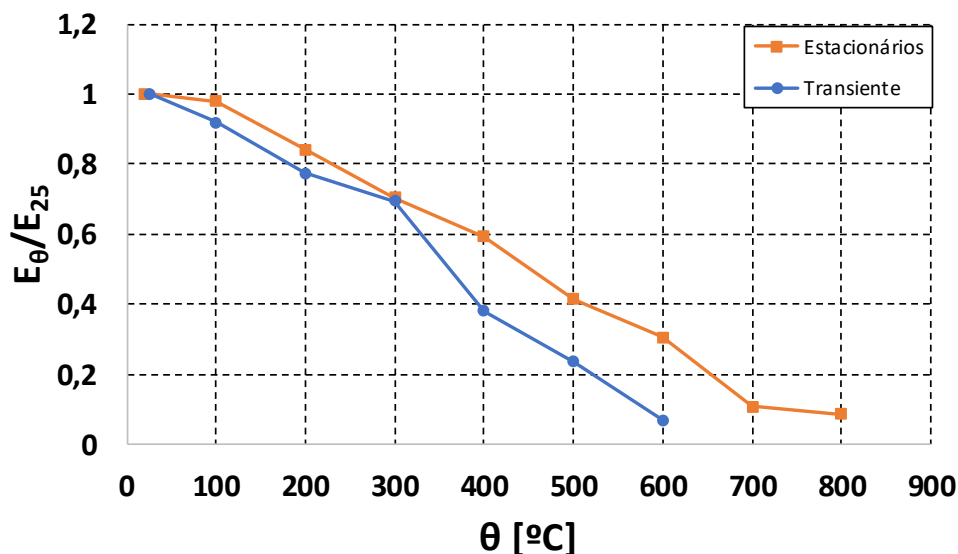


Figura 3-20 Fator de redução para o módulo de elasticidade – S280GD+Z

No que diz respeito à tensão de cedência podemos verificar na Figura 3-21 que os fatores de redução obtidos têm valores bastantes semelhantes para cada metodologia de ensaio. À semelhança do ocorrido no aço S350GD+Z os ensaios em regime transiente não evidenciaram entrar em cedência para temperaturas inferiores aos 300°C, uma vez que a cedência ocorre para um estado de tensão superior ao aplicado. Ainda assim, após esta temperatura a configuração da curva proposta para os fatores de redução são bastante idênticas.

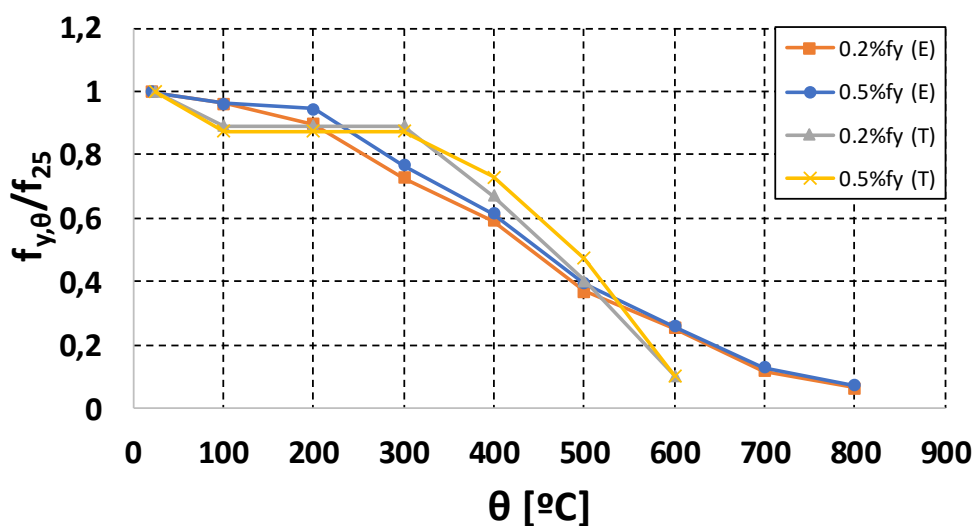


Figura 3-21 Fator de redução para a tensão de cedência – S280GD+Z

Em jeito de conclusão deste capítulo, para prever o comportamento mecânico de um aço numa situação de incêndio a realização de ensaios em regime estacionário é economicamente mais viável uma vez que a campanha de ensaios necessária é de uma escala bastante inferior quando comparada com os ensaios em regime transiente. Por outro lado, é de consenso geral que os ensaios em regime transiente traduzem com maior rigor uma situação real de incêndio. Ou seja, o protocolo de ensaio levado a cabo nos ensaios em regime transiente (manter uma carga de serviço e fazer variar a temperatura) é o que acontece num cenário de incêndio, ao contrário dos ensaios em regime estacionário (manter a temperatura e fazer variar a tensão aplicada). Verifica-se que para os parâmetros estudados neste capítulo (módulo de elasticidade e tensão de cedência) os ensaios em regime transiente conduzem a fatores de redução mais penalizadores para as propriedades mecânicas do material. Assim sendo, como os ensaios em regime transiente são os que simulam melhor uma situação real de incêndio e estes assumem valores mais gravosos para as propriedades do aço, recomenda-se este tipo de ensaios principalmente se a estrutura em causa tiver maior suscetibilidade de sofrer um incêndio. A relação investimento – qualidade de resultados terá de ser analisada com cuidado por forma a escolher quais os ensaios a proceder na previsão do comportamento do material.

O estudo levado a cabo contempla cinco patamares de tensão pré-instalada, a construção das curvas tensão-extensão é limitada neste parâmetro. Por isso não seria coerente apresentar valores para alguns parâmetros para ensaios em regime transiente como a tensão última, rotura, limite proporcionalidade para estes ensaios. A determinação da curva tensão-extensão a partir de ensaios em regime transiente é um processo complexo e, dependente do grau de precisão desejado para a determinação da curva, podemos ter de realizar um estudo experimental com largas dezenas de ensaios.

3.4.4 Comparação dos resultados entre classes de aço

Neste capítulo comparam-se os fatores de redução entre as diferentes classes de aço estudadas neste programa experimental: S280GD+Z e S350GD+Z. São estudados no âmbito deste capítulo os fatores de redução do módulo de elasticidade, tensão de cedência e tensão última.

A similaridade na degradação do módulo de elasticidade para as gamas mais baixas de temperatura é facilmente visível na Figura 3-22. Pode-se concluir no desenvolvimento deste programa experimental que, para as diferentes classes a degradação deste parâmetro mecânico para temperaturas mais altas é relativamente próxima, a 600°C temos uma degradação na ordem dos 90%. A diferença que mais se destaca é os intervalos de temperatura que cada tipo de aço começa a perder as suas propriedades. Nota-se que no intervalo de valores (entre os 200 e os 500°C) em que o aço S280GD+Z tem tendência a perder a sua capacidade resistente mais rapidamente, voltando a ter uma curva semelhante perto da rotura.

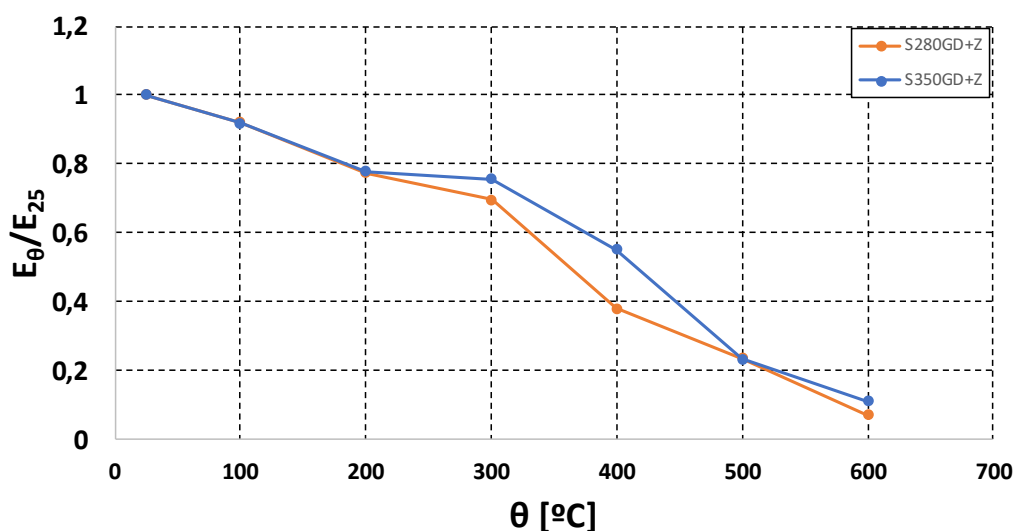


Figura 3-22 Fator de redução para o módulo de elasticidade (regime transiente) - S350GD+Z vs. S280GD+Z

Na Figura 3-23 confrontam-se os valores para os fatores de redução relativos à tensão de cedência. Para um primeiro intervalo de valores de temperatura (até 200°C), a degradação deste parâmetro é extremamente idêntica, notando-se um ligeiro decaimento da tensão de cedência (cerca de 10%) em ambos os aços até à temperatura de 200°C. A partir dos 200°C verifica-se uma degradação mais rápida para o aço de classe mais baixa. Sendo a ponto com maior importância neste gráfico aquele que tem por abcissa os 300°C onde se nota a maior diferença entre a degradação das duas classes de aço. Para temperaturas a cima dos 300°C nota-se uma

degradação aproximadamente linear da tensão de cedência para ambas as classes de aço estudadas.

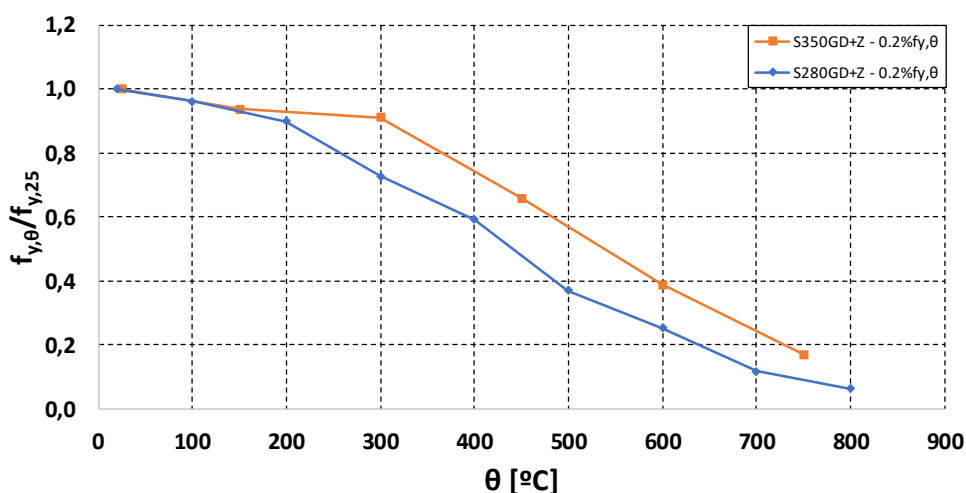


Figura 3-23 Fator de redução para a tensão de cedência (regime estacionário) - S350GD+Z vs. S280GD+Z

No caso da tensão última (Figura 3-24) verifica-se um fenómeno comum no aço enformado a frio. Para as gamas mais baixas de temperatura (entre os 200 e os 300°C) existe uma reorganização dos elementos a nível molecular que tem por consequência fenómenos pouco expectáveis como a tensão última e tensão de rotura se atingirem para valores superiores aos obtidos a temperatura ambiente. Nos ensaios levados a cabo nota-se este comportamento com maior realce para o S280GD+Z, chegando a ter um “ganho” de cerca de 10% no parâmetro da tensão última. Para o S350GD+Z este fenómeno não fica tão evidente, mas ainda assim verifica-se valores de fator de redução para a tensão última superiores à unidade até aos 300°C. A partir dos 300°C atingem-se valores mais baixos para a tensão última quando comparados com a temperatura ambiente. Nota-se que para temperaturas mais elevadas (com atenção para os 700°C) enquanto o S350GD+Z ainda assume valores na casa dos 20% para o fator de redução, o S280GD+Z apresenta valores quase nulos.

De maneira geral, conclui-se que a classe de aço inferior tende a perder as suas propriedades mecânicas de forma mais rápida. Quando confrontadas, ambas as classes de aço assumem valores relativamente próximos dos fatores de redução para as temperaturas inferiores a 200°C e superiores aos 700°C, a diferença mais evidente reside em qual começa a perder a sua resistência mecânica em primeiro lugar. Nas figuras apresentadas neste subcapítulo nota-se que para a temperatura de 300°C, genericamente o S280GD+Z sofre uma quebra maior nas suas propriedades resistentes quando comparado com o S350GD+Z. Deste ponto em diante, os fatores de redução propostos apresentam uma curva perto da linearidade com um declive bastante idêntico, levando o aço de classe mais alta a ter fatores de redução menos penalizadores

para o intervalo de temperatura dos 300 aos 700°C. Estes intervalos de temperatura são menores se estivermos a analisar a Figura 3-22, uma vez que esta apenas evidencia temperaturas até aos 600°C para confrontar com os fatores de redução dos ensaios em regime transiente. Ainda assim, notam-se valores mais penalizadores para os fatores de redução para o aço de classe inferior entre os 200 e os 500°C e de seguida as retas começam a assumir valores muito próximos, à semelhança dos valores obtidos até aos 200°C.

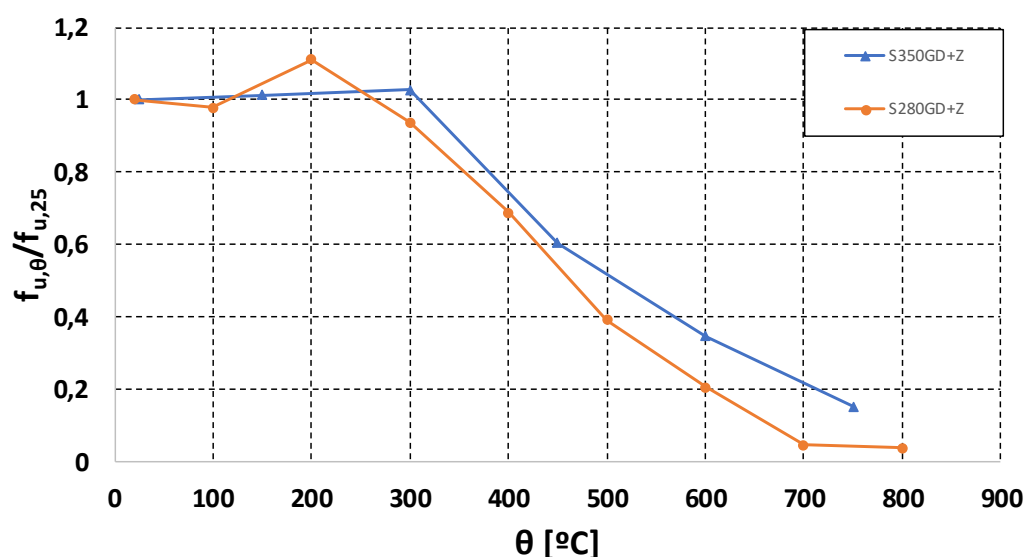


Figura 3-24 Fator de redução para a tensão de última (regime estacionário) - S350GD+Z vs. S280GD+Z

3.4.5 Comparação dos resultados obtidos com as diversas normas

Os resultados obtidos experimentalmente para ambas as metodologias de ensaio e classes de aço foram confrontados com algumas normas, como a EN 1993-1-2 (2010), BS 5950 – Parte 8 (1990) e AS 4100 (1998). A norma britânica (BS 5950-8) é a única que apresenta fatores de redução específicos para aço enformado a frio, no entanto apenas apresenta valores para a tensão de cedência associados a extensões de 0.5%, 1.5% e 2%. A norma europeia (EN 1993-1-2, 2010) propõe os mesmos fatores de redução de aços laminados a quente de classe 4 para aço enformado a frio, facto que se revela pouco consensual entre os autores (Outinen, 2004; Li, 2017).

Os fatores de redução para o módulo de elasticidade propostos pelas normas EN 1993-1-2 (2010) e AS 4100 (1998) são apresentados na Figura 3-25. Pode-se verificar que ambas as normas apresentam valores não conservadores, por exemplo, aos 600°C a AS4100 (1998) propõe uma redução de 50% neste parâmetro mecânico enquanto que o valor obtido experimentalmente conduz a uma degradação quase total desta propriedade mecânica. A EN

1993-1-2 (2010) também apresenta valores dos fatores de redução pouco penalizadores quando comparados com os obtidos experimentalmente, embora a baixo da norma australiana.

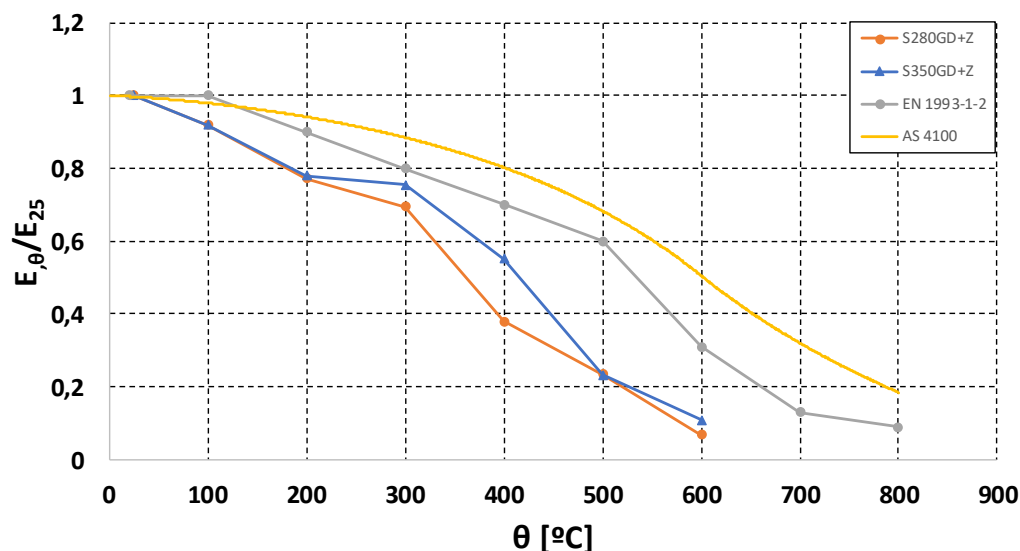


Figura 3-25 Fatores de redução para módulo de elasticidade - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos pelas normas.

Relativamente aos fatores de redução para a tensão de cedência pode-se verificar na Figura 3-26 que na generalidade das equações propostas se verificam valores não conservativos. Apenas a BS 5950 – 0.5% propõe valores conservativos quando comparados com os obtidos experimentalmente para o S350GD+Z, mas ainda assim não conservativos quando comparados com o S280GD+Z. Verificam-se valores propostos pela EN 1993-1-2 (2010) longe dos obtidos experimentalmente uma vez que esta não assume qualquer degradação deste parâmetro mecânico a baixo dos 400°C, enquanto que se observa uma degradação de cerca de 40% nos valores obtidos experimentalmente, para o aço S280GD+Z. Uma vez mais nota-se que a grande divergência de valores entre os obtidos experimentalmente e os propostos pelas diversas normas não reside nos extremos das temperaturas estudadas, mas sim nos valores intermédios. Entre as normas estudadas aquela que mais se adequa à tensão de cedência quando comparada com os valores obtidos experimentalmente é a BS 5950-8 mesmo só referenciando fatores de redução até aos 600°C.

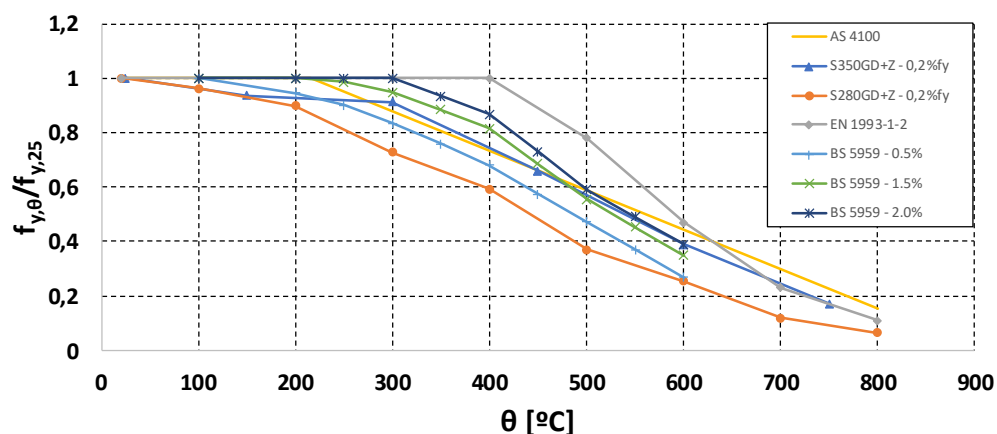


Figura 3-26 Fatores de redução para tensão de cedência- Valores obtidos experimentalmente vs. propostos pelas normas.

Para tensão limite de proporcionalidade apresentam-se na Figura 3-27 a razão entre tensão de limite de proporcionalidade e a tensão de cedência. Este é um parâmetro de maior dificuldade de análise, uma vez que a determinação deste parâmetro não está normalizada. Este parâmetro foi determinado pela razão entre o valor da tensão para o qual a curva tensão-extensão evidencia uma perda de linearidade da sua fase elástica e a tensão de cedência obtida à temperatura ambiente. Uma característica dos aços enformados a frio é o facto de nem sempre terem um patamar de cedência vincado i.e., pode tornar dúbida a determinação deste parâmetro. Nos ensaios levados a cabo experimentalmente para o S350GD+Z nota-se um patamar de cedência mais evidente quando comparado com o S280GD+Z, desta forma obtêm-se valores para a tensão limite de proporcionalidade mais altos para o aço de classe maior. Craveiro *et al.* (2016) estuda este parâmetro verificando uma diferença entre a tensão onde ocorre esta perda de linearidade e a tensão de cedência que chega a ser de 30% para a temperatura ambiente.

A única norma que propõe fatores de redução para este parâmetro é a EN 1993-1-2 (2010). Esta norma propõe valores que se encontram entre os obtidos experimentalmente para ambas as classes de aço. Enquanto que, para o S350GD+Z a norma assume valores genericamente conservativos, para o S280GD+Z apresenta valores não conservativos para as gamas mais baixas de temperatura aproximando-se dos valores obtidos experimentalmente aos 400°C, sendo até extremamente coerentes para temperaturas a cima dos 600°C, inclusive. A norma admite um dimensionamento considerando a tensão de cedência igual à tensão limite de proporcionalidade, i.e., assim que existe a perda de linearidade.

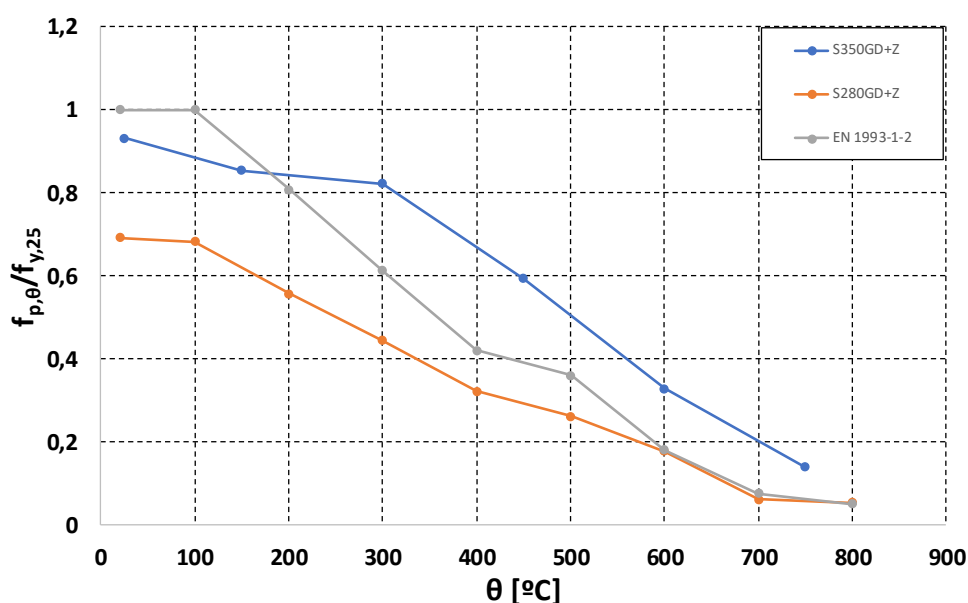


Figura 3-27 Fatores de redução para tensão limite de proporcionalidade - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos pelas normas.

3.4.6 Comparação dos resultados obtidos com bibliografia existente

Neste subcapítulo discute-se os valores obtidos experimentalmente comparando-os com vários autores com investigação desenvolvida no âmbito de aço enformado a frio sujeito a temperaturas elevadas (Kankanamge e Mahendran, 2011; Chen e Young, 2007; Outinen e Makelainen, 2002; Li e Young, 2017).

No que diz respeito ao módulo de elasticidade pode-se verificar na Figura 3-28 que os valores obtidos experimentalmente para os fatores de redução são menores do que os valores obtidos por todos os autores tidos em conta no desenvolvimento desta investigação. Mesmo para os aços considerados de baixa resistência (G250) como os estudados por Kankanamge e Mahendran (2011) e Ranawaka e Mahendran (2009) apresentam fatores de redução maiores do que os obtidos experimentalmente para ambos os aços. Os resultados destes autores foram obtidos recorrendo a ensaios em regime estacionário, que já se concluiu serem menos penalizadores. Outinen e Makelainen (2002) desenvolvem um estudo experimental com um S350GD+Z e obtém fatores de redução relativamente superiores aos obtidos experimentalmente onde se denota maior diferença entre os valores para temperaturas superiores aos 400°C. Chen e Young (2007) propõem uma curva para o fator de redução deste parâmetro mecânico que se adequa relativamente bem até aos 300°C, a esta temperatura os ensaios efetuados traduzem uma quebra na resistência enquanto que para o G450 esta perda só é evidenciada perto dos 450°C. Li e Young (2017) levaram a cabo uma análise experimental

com aço enformado a frio de alta resistência, os resultados obtidos por este autor revelam que os aços de classes mais altas tendem a perder a sua capacidade resistente para temperaturas mais altas. De ressaltar que para a temperatura de 450°C este parâmetro mecânico só é afetado em 20%.

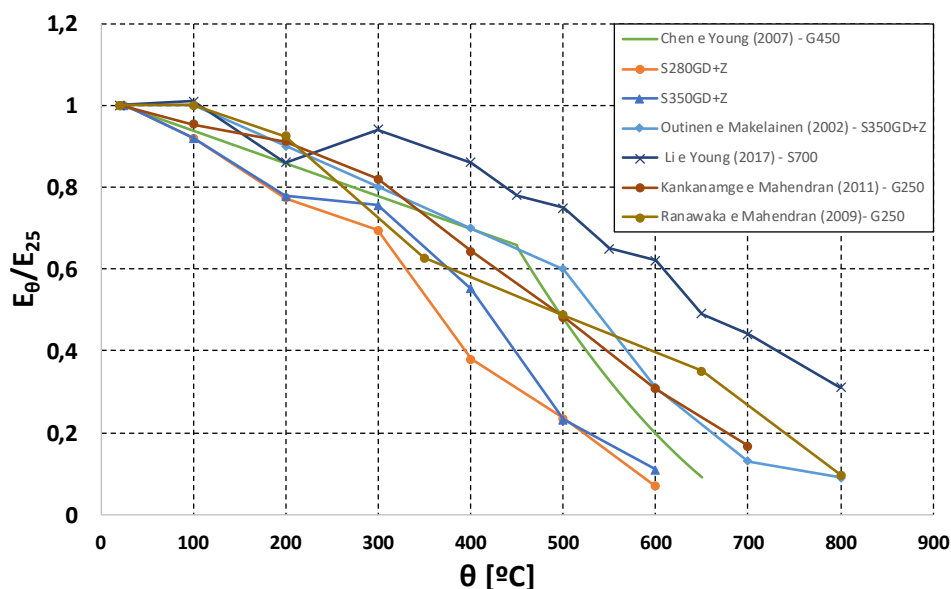


Figura 3-28 Fatores de redução para módulo de elasticidade - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos por outros autores.

Relativamente à tensão de cedência (Figura 3-29) existem diversos autores que propõem fatores de redução coerentes com os obtidos experimentalmente. Podemos verificar que para o aço de classe inferior, Kankanamge e Mahendran (2011) obtém valores para os fatores de redução deste parâmetro mecânico bastante coerentes com os obtidos por Craveiro *et al.* (2016) para o S280GD+Z e Ranawaka e Mahendran (2009) obtém valores genericamente mais baixos que os obtidos experimentalmente. Outinen e Makelainen (2002) por sua vez apresentam valores bastante próximos dos obtidos experimentalmente para o S350GD+Z. Nota-se, uma vez mais uma perda da capacidade resistente para temperaturas mais altas quanto mais alta for a classe do aço, embora para valores de temperaturas mais altos os valores propostos para os fatores de redução sejam bastante similares, chama-se à atenção dos fatores de redução para a temperatura de 700°C.

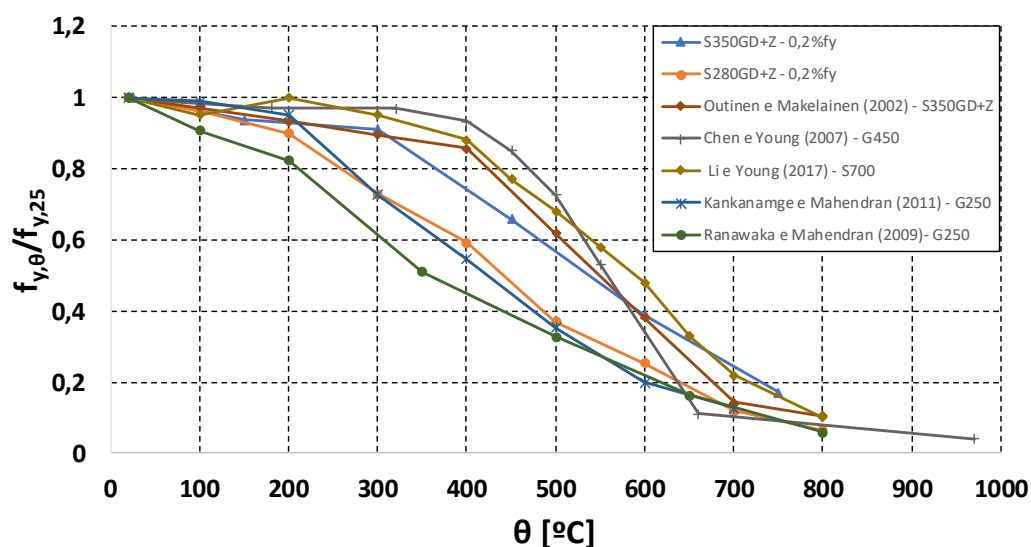


Figura 3-29 Fatores de redução para tensão de cedência - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos por outros autores.

Para a tensão limite de proporcionalidade, verifica-se na Figura 3-30 que até aos 450°C os valores obtidos experimentalmente são relativamente próximos da equação proposta por Chen e Young (2007). Depois desta temperatura a curva proposta pelo autor sofre uma quebra abrupta e os resultados obtidos para o S350GD+Z continuam a decrescer linearmente. Os valores para o fator de redução deste parâmetro propostos por Craveiro *et al.* (2016) começam a aproximar-se dos valores de Outinen e Makelainen (2002) apenas para a temperatura de 400°C e superiores.

Na Figura 3-31 são evidenciados os fatores de redução propostos por outros autores associados à tensão última. Da análise do gráfico pode-se concluir que o ganho de resistência para a temperatura de 200°C é mais acentuado para os aços de classe inferior, tal como os obtidos por Craveiro *et al.* (2016) e Kankanamge e Mahendran (2011). Quando analisamos os resultados obtidos experimentalmente para o S350GD+Z nota-se uma semelhança com o comportamento dos aços de maior resistência até aos 300°C, onde este começa a sofrer uma quebra do que diz respeito a esta propriedade mecânica. Os aços de classe superior tendem a sofrer uma perda de resistência com maior significado para temperaturas mais altas e, quanto maior a classe mais se evidencia uma perda linear da resistência do material. Os ensaios levados a cabo por Li e Young (2017) não evidenciam uma quebra abrupta na resistência como a que se nota a 450°C na curva proposta por Chen e Young (2007).

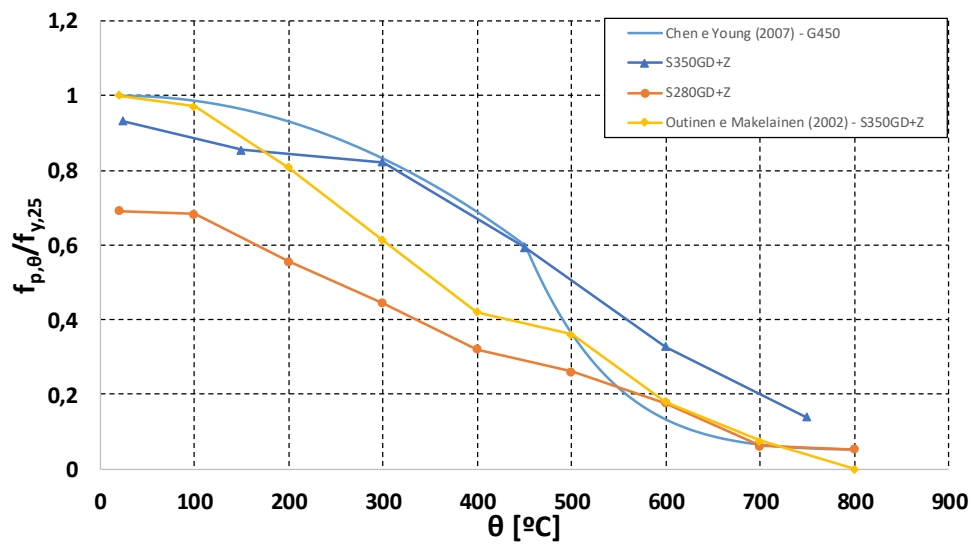


Figura 3-30 Fatores de redução para tensão limite de proporcionalidade - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos por outros autores.

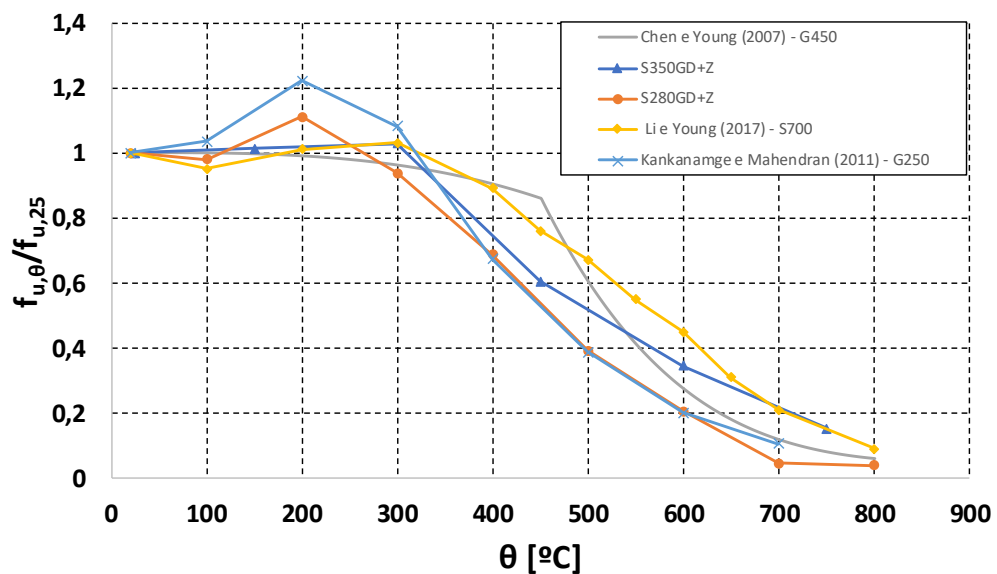


Figura 3-31 Fatores de redução para tensão última - Valores obtidos experimentalmente vs. propostos por outros autores.

3.4.7 Comparação das curvas tensão-extensão com as propostas pelo método de Ramberg-Osgood

W. Ramberg and W. R. Osgood (1943) desenvolveram uma metodologia que permite determinar as curvas tensão-extensão à temperatura ambiente relacionando os parâmetros mecânicos do material. Posteriormente, vários autores se basearam nesta metodologia de modo a prever a curva tensão-extensão de um material a altas temperaturas. A expressão levada a cabo para a determinação das curvas tensão-extensão foi a proposta em MMPDS-01 (2003):

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{E_{\theta}} + 0.002 \times \left(\frac{\sigma_{\theta}}{f_{y,\theta}} \right)^{n_{\theta}} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{u,\theta} = 100 \left(\varepsilon_{r,\theta} - \frac{f_{u,\theta}}{E_{\theta}} \right) \quad (3.1a)$$

$$n_{\theta} = \frac{\ln \left(\frac{\varepsilon_{u,\theta}}{0.2} \right)}{\ln \left(\frac{f_{u,\theta}}{f_{y,\theta}} \right)} \quad (3.1b)$$

onde ε_{θ} é a extensão à temperatura θ , σ a tensão à temperatura θ , E_{θ} o módulo de elasticidade à temperatura θ , $f_{y,\theta}$ a tensão de cedência à temperatura θ , $\varepsilon_{u,\theta}$ a extensão para a qual a tensão é máxima à temperatura θ , $\varepsilon_{r,\theta}$ a extensão de rotura à temperatura θ , $f_{u,\theta}$ a tensão última (máxima) à temperatura θ e n_{θ} o parâmetro de Ramberg-Osgood proposto em MMPDS-01 (2003).

As curvas tensão-extensão obtidas através desta metodologia são apresentadas e confrontadas com as obtidas experimentalmente na Figura 3-32. Para as duas gamas de temperaturas mais baixas (150 e 300°C) pode-se verificar que existe um primeiro intervalo de valores na fase elástica onde a curva proposta pelo método analítico é não conservativa. Este comportamento verifica-se até o valor de extensão igual a 3%, aproximadamente, onde a curva experimental passa a ter valores para tensões superiores. A cima destas temperaturas as curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente são bastante coerentes com as propostas analiticamente pelo método de Ramberg-Osgood. Embora as curvas para as temperaturas de 600 e 750°C se verifique um comportamento muito próximo entre as curvas, a proposta pela metodologia de Ramberg-Osgood, determinada analiticamente acaba por assumir valores não conservativos.

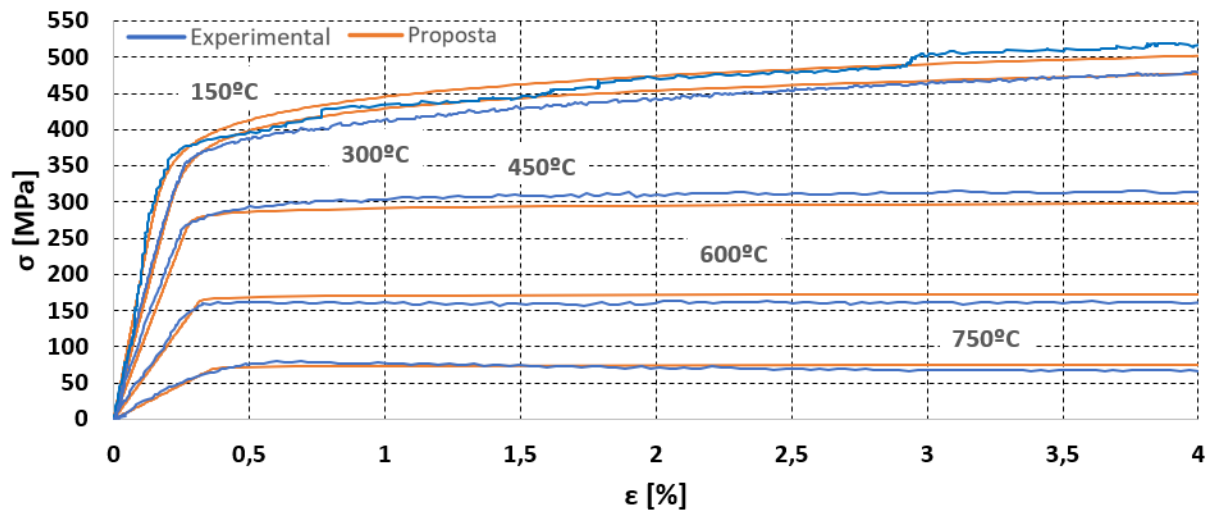


Figura 3-32 Equação proposta pela metodologia de Ramberg-Osgood - MMPDS-01 (2003) vs. resultado experimental

Para além da equação proposta na norma MMPDS-01 (2003), os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com modelos propostos por outros autores: Kankanamge (2011) e Chen e Young (2007). As considerações tidas em conta para os diversos autores diferem; a proposta de Kankanamge (2011) que se apresenta de seguida é para um aço G250.

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma}{E_{\theta}} + \beta \times \left(\frac{f_{y,\theta}}{E_{\theta}} \right) \left(\frac{\sigma}{f_{y,\theta}} \right)^{n_{\theta}} \quad (3.2a)$$

$$n_{\theta} = 0.000138 \times \theta^2 - 0.085468 \times \theta + 19.212 \quad 350^{\circ} \text{ C} \leq \theta \leq 800^{\circ} \text{ C} \quad (3.2b)$$

$$\beta = 0.86$$

Chen e Young (2007) propõe uma abordagem, um pouco mais complexa.

$$\varepsilon_{\theta} = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_{\theta}} + 0.002 \times \left(\frac{\sigma}{f_{y,\theta}} \right)^{n_{\theta}} & \text{para } \sigma \leq f_{y,\theta} \\ \frac{\sigma - f_{y,\theta}}{E_{y,\theta}} + \varepsilon_{u,\theta} \left(\frac{\sigma - f_{y,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{y,\theta}} \right)^{m_{\theta}} + \varepsilon_{y,\theta} & \text{para } \sigma > f_{y,\theta} \end{cases} \quad (3.3a)$$

$$E_{y,\theta} = \frac{E_{\theta}}{1 + 0.002n_{\theta} \left(\frac{E_{\theta}}{f_{y,\theta}} \right)} \quad (3.3b)$$

$$n_{\theta} = 20 - 0.6\sqrt{\theta} \quad (3.3c)$$

$$m_{\theta} = 1 + \frac{\theta}{350} \quad (3.3d)$$

Onde $\varepsilon_{y,\theta}$ é a extensão associada à tensão de cedência, $E_{y,\theta}$ módulo de elasticidade verificado na cedência, n_{θ} e m_{θ} são parâmetros que dependem da temperatura.

Dos autores estudados neste subcapítulo, Chen e Young (2007) é aquele que propõe uma equação para a curva tensão-extensão que melhor se aproxima dos resultados obtidos experimentalmente para o S350GD+Z, embora apresente valores ligeiramente não conservativos para 300 e 400°C (Figura 3-33). Kankanamge (2011) propôs apenas equações a cima dos 350°C, ainda assim são aquelas que menos estão em conformidade com os valores obtidos experimentalmente, com uma relevante discrepância para os 450°C. De ressaltar o diferente comportamento no início da fase plástica para ambos os autores aqui apresentados, para as temperaturas de 450 e 600°C apresentam-se comportamentos bastante distintos quando comparados com os experimentais na parte final da fase elástica. Enquanto os autores propõem equações com uma cedência mais gradual, o resultado experimental e o proposto por MMPDS-01 (2003) evidenciam a cedência do material de uma forma mais vincada.

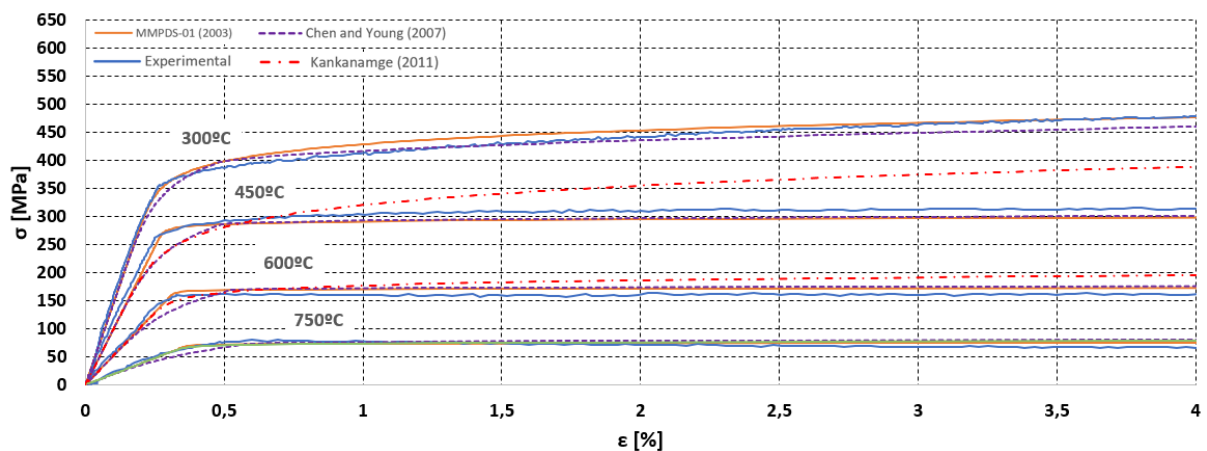


Figura 3-33 Curva tensão-extensão obtida experimentalmente vs. proposta por modelos de outros autores

3.4.8 Comparação das curvas tensão-extensão com as propostas pela EN 1993-1-2

A EN 1993-1-2 (2010) também propõe equações com vista à determinação das curvas tensão-extensão a temperaturas elevadas. A metodologia proposta pela norma europeia é detalhada nas formulas apresentadas de seguida.

$$\sigma = \begin{cases} \varepsilon E_{\theta} & \text{para } \varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta} \\ f_{p,\theta} - c + \left(\frac{b}{a}\right) \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0.5} & \text{para } \varepsilon_{p,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{y,\theta} \\ f_{y,\theta} & \text{para } \varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta} \\ f_{y,\theta} \left[1 - \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta})}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})} \right] & \text{para } \varepsilon_{t,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta} \\ 0 & \text{para } \varepsilon = \varepsilon_{u,\theta} \end{cases} \quad (3.4a)$$

Onde,

$$\varepsilon_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{E_{\theta}} \quad \varepsilon_{y,\theta} = 0.02 \quad \varepsilon_{t,\theta} = 0.15 \quad \varepsilon_{u,\theta} = 0.02$$

$$\begin{aligned} a^2 &= (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_{\theta}} \right) \\ b^2 &= c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{\theta} + c^2 \\ c &= \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})} \end{aligned} \quad (3.4b)$$

As condições apresentadas em cima não têm em conta a fase de endurecimento característica dos aços. Desta forma, o anexo A propõe algumas condições por forma a considerar o comportamento do material com este fenómeno.

$$\sigma = \begin{cases} 50(f_{u,\theta} - f_{y,\theta})\varepsilon + 2f_{y,\theta} - f_{u,\theta} & \text{para } 0.02 < \varepsilon < 0.04 \\ f_{u,\theta} & \text{para } 0.04 \leq \varepsilon \leq 0.15 \\ f_{u,\theta} [1 - 20(\varepsilon - 0.15)] & \text{para } 0.15 < \varepsilon < 0.2 \\ 0 & \text{para } \varepsilon \geq 0.2 \end{cases} \quad (3.5)$$

A tensão última proposta para a fase de endurecimento do material no anexo A é a apresentada de seguida:

$$f_{u,\theta} = \begin{cases} 1.25f_{y,\theta} & \text{para } \theta < 300^{\circ}\text{C} \\ f_{y,\theta}(2 - 0.0025\theta) & \text{para } 300^{\circ}\text{C} \leq \theta < 400^{\circ}\text{C} \\ f_{y,\theta} & \text{para } \theta \geq 400^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (3.5a)$$

Na Figura 3-34 é apresentado o resultado da comparação entre as curvas tensão-extensão obtidos experimentalmente e as propostas pela EN 1993-1-2 (2010). Pode-se verificar que, para as temperaturas de 150 e 300°C, embora a tensão obtida experimentalmente seja, regra geral superior à proposta, merece atenção o facto de estas evidenciarem extensões de rotura substancialmente mais baixas que as referidas na norma. Para a temperatura de 450°C nota-se um comportamento coerente entre as curvas até à extensão de 15% onde o comportamento se afasta, mas acaba por ser uma proposta conservativa. O dado mais preocupante é salientado nas temperaturas mais altas onde a proposta da EN 1993-1-2 (2010) oferece valores não conservativos na generalidade do comportamento, uma vez que a curva propõe valores acima dos obtidos experimentalmente.

As equações encontradas na norma acabam por ser limitativas dado que propõem uma extensão de rotura comum de 20%, o que se torna pouco conservativo para as temperaturas mais baixas, comparando com as curvas obtidas experimentalmente, onde a 300 e 450°C se verificam roturas para extensões consideravelmente mais baixas.

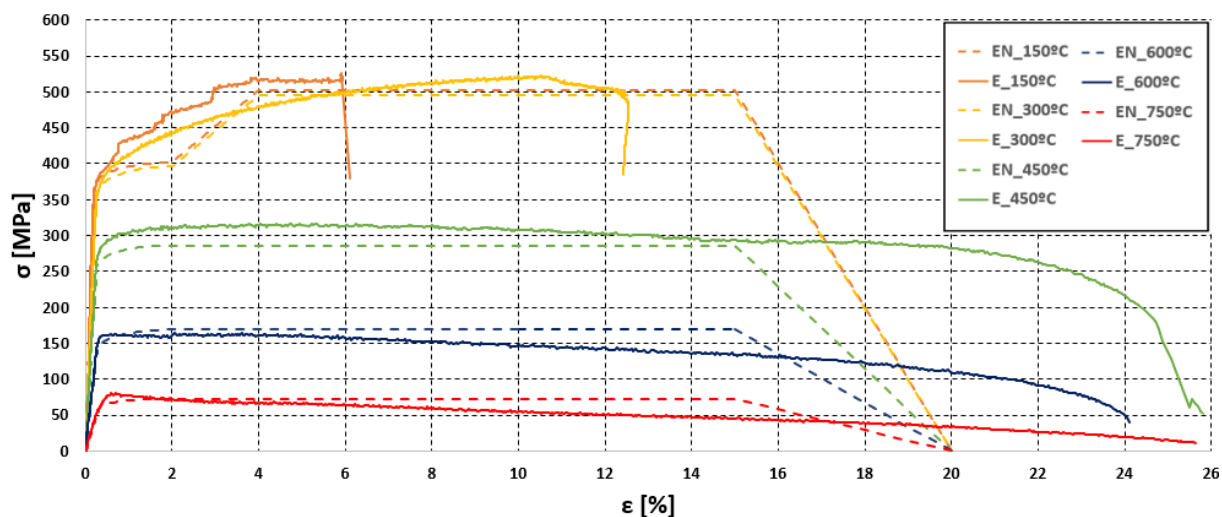


Figura 3-34 Comparação das curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente vs. propostas pela EN 1993-1-2 (2010) -Considerando o endurecimento do aço previsto na EN 1993-1-2 (2010)

Na Figura 3-35 verifica-se em destaque o comportamento inicial das curvas tensão-extensão, para as temperaturas mais altas onde se observa um comportamento relativamente adequado embora pouco conservativo para as temperaturas de 600 e 750°C. Para as temperaturas de 150

e 300°C verifica-se alguma discrepância após a fase elástica do material entre os 0.4% e os 4% de extensão.

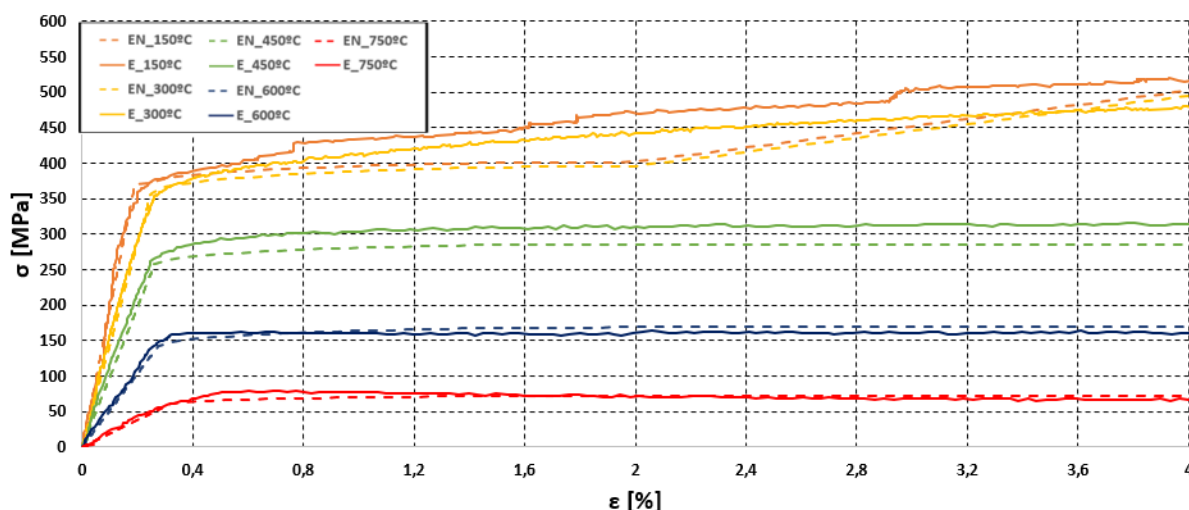


Figura 3-35 Comportamento inicial das curvas tensão-extensão - Propostas em EN 1993-1-2 vs. Experimental

Craveiro *et al.* (2016) obteve resultados pouco conformes com a EN 1993-1-2 (2010) para ensaios levados a cabo com um S280GD+Z, argumentado que a norma fornece equações para aços laminados a quente de classe 4 e, conseqüentemente não tem resultados ajustados com a realidade do comportamento de aços enformados a frio. Também Chen e Young (2007) obtém resultados que não se adequam às curvas propostas pela norma, tanto para a classe de G450 como G550. A principal crítica foi também o facto de a norma evidenciar extensões inadequadas, principalmente para as temperaturas mais baixas, como também se pode constatar na Figura 3-34.

De uma forma geral pode-se concluir que a EN 1993-1-2 (2010) não se adequa aos resultados experimentais obtidos, muito em parte por considerar o aço enformado a frio como tendo um comportamento igual a um aço laminado a quente de classe 4. A inserção de uma proposta para o comportamento em aços enformados a frio a altas temperaturas seria uma mais valia no dimensionamento de estruturas com este tipo de aço. A pertinência desta proposta passa também por estudar o comportamento para aços enformados a frio a baixa e alta resistência, como referenciado em subcapítulos anteriores os aços enformados a frio de alta resistência, em muitos casos tendem a distinguir o seu comportamento dos aços de menor resistência.

3.4.9 Equações propostas para determinação das curvas tensão-extensão – S350GD+Z

Baseadas nas equações propostas pela EN 1993-1-2 (2010) foram desenvolvidas equações que pretendem prever o comportamento desta qualidade de aço enformado a frio, baseado no comportamento do aço S350GD+Z.

- para $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$ e para $25^\circ\text{C} \leq \theta < 750^\circ\text{C}$, onde $\varepsilon_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{E_\theta}$

$$\sigma = \varepsilon \times E_\theta \quad (3.6)$$

- para $\varepsilon_{p,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$ e para $25^\circ\text{C} \leq \theta < 450^\circ\text{C}$, onde $\varepsilon_{t,\theta}=0.05$

$$\sigma = f_{p,\theta} - c + \frac{b}{a} \left[a^2 - (\varepsilon_{t,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0.5} \quad (3.7)$$

Onde:

$$\begin{aligned} a^2 &= (\varepsilon_{t,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \left(\varepsilon_{t,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_\theta} \right) \\ b^2 &= c(\varepsilon_{t,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_\theta + c^2 \\ c &= \frac{(f_{u,\theta} - f_{y,\theta})^2}{(\varepsilon_{t,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_\theta - 2(f_{u,\theta} - f_{y,\theta})} \end{aligned} \quad (3.7a)$$

A consideração do endurecimento do aço é feita ao abrigo da EN 1993-1-2 (2010), considerando $f_{u,\theta} = 1,25f_{y,\theta}$ na equação (3.5a) neste caso, também foi considerado este fenómeno para a temperatura de 450°C .

- para $\varepsilon_{p,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$ e para $450^\circ\text{C} \leq \theta < 600^\circ\text{C}$, onde $\varepsilon_{t,\theta}=0.02$

$$\sigma = f_{p,\theta} - c + \frac{b}{a} \left[a^2 - (\varepsilon_{t,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0.5} \quad (3.8)$$

Onde:

$$\begin{aligned} a^2 &= (\varepsilon_{t,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \left(\varepsilon_{t,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_\theta} \right) \\ b^2 &= c(\varepsilon_{t,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_\theta + c^2 \end{aligned} \quad (3.8a)$$

$$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{t,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$$

- para $\varepsilon_{t,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}$ e para $25^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 150^{\circ}\text{C}$, onde $\varepsilon_{u,\theta}=0.055$

$$\sigma = f_{u,\theta} \quad (3.9)$$

- para $\varepsilon_{t,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}$ e para $150^{\circ}\text{C} < \theta \leq 300^{\circ}\text{C}$, onde $\varepsilon_{u,\theta}=0.10$

$$\sigma = f_{u,\theta} \quad (3.10)$$

- para $\varepsilon_{t,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}$ e para $300^{\circ}\text{C} < \theta \leq 450^{\circ}\text{C}$, onde $\varepsilon_{u,\theta}=0.14$

$$\sigma = f_{y,\theta} \quad (3.11)$$

A partir dos 450°C não se verifica um ganho de tensão após a cedência do material, não sendo considerada a fase de endurecimento após esta temperatura. Desta forma, propõem-se um comportamento linear logo a seguir à cedência do material:

- para $\varepsilon_{p,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}$ e para $450^{\circ}\text{C} < \theta \leq 600^{\circ}\text{C}$, onde $\varepsilon_{u,\theta}=0.04$

$$\sigma = f_{y,\theta} \quad (3.12)$$

- para $\varepsilon_{t,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}$ e para $600^{\circ}\text{C} < \theta \leq 750^{\circ}\text{C}$, onde $\varepsilon_{u,\theta}=0.02$

$$\sigma = f_{y,\theta} \quad (3.13)$$

A rotura do material é caracterizada por um comportamento linear, que nas temperaturas até aos 450°C se verifica depois do endurecimento do aço e para temperaturas superiores logo após a cedência do material.

- para $\varepsilon_{u,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{r,\theta}$ e para $25^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 150^{\circ}\text{C}$, onde $\varepsilon_{r,\theta}=0.06$

$$\sigma = f_{u,\theta}(1 - 200[\varepsilon - \varepsilon_{u,\theta}]) \quad (3.14)$$

- para $\varepsilon_{u,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{r,\theta}$ e para $150^{\circ}\text{C} < \theta \leq 300^{\circ}\text{C}$, onde $\varepsilon_{r,\theta}=0.12$

$$\sigma = f_{u,\theta}(1 - 50[\varepsilon - \varepsilon_{u,\theta}]) \quad (3.15)$$

- para $\varepsilon_{u,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{r,\theta}$ e para $300^\circ\text{C} < \theta \leq 450^\circ\text{C}$, onde $\varepsilon_{r,\theta}=0.24$

$$\sigma = f_{u,\theta}(1 - 10[\varepsilon - \varepsilon_{u,\theta}]) \quad (3.16)$$

- para $\varepsilon_{u,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{r,\theta}$ e para $450^\circ\text{C} < \theta \leq 750^\circ\text{C}$, onde $\varepsilon_{r,\theta}=0.24$

$$\sigma = f_{u,\theta}(1 - 5[\varepsilon - \varepsilon_{u,\theta}]) \quad (3.17)$$

- para $\varepsilon_{u,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{r,\theta}$ e para $600^\circ\text{C} < \theta \leq 750^\circ\text{C}$, onde $\varepsilon_{r,\theta}=0.24$

$$\sigma = f_{u,\theta}(1 - 4,5[\varepsilon - \varepsilon_{u,\theta}]) \quad (3.18)$$

Na Figura 3-36 pode-se verificar que todas as equações propostas assumem um comportamento conservativo. As equações expostas neste subcapítulo são baseadas nas equações propostas pela EN 1993-1-2 (2010). Para as temperaturas mais baixas (150 e 300°C) o comportamento após a fase elástica linear é feito em função da tensão última e tensão de cedência (equação 3.7a) enquanto que para as temperaturas superiores são função a tensão de cedência e tensão limite de proporcionalidade (equação 3.8a). As temperaturas de 600 e 750°C assumem um comportamento linear após a cedência do material, foi também assumido o comportamento linear de rotura para extensões relativamente baixas devido à evidente degradação das propriedades mecânicas do aço logo a seguir à cedência, algo que a EN 1993-1-2 (2010) não prevê para os aços laminados a quente.

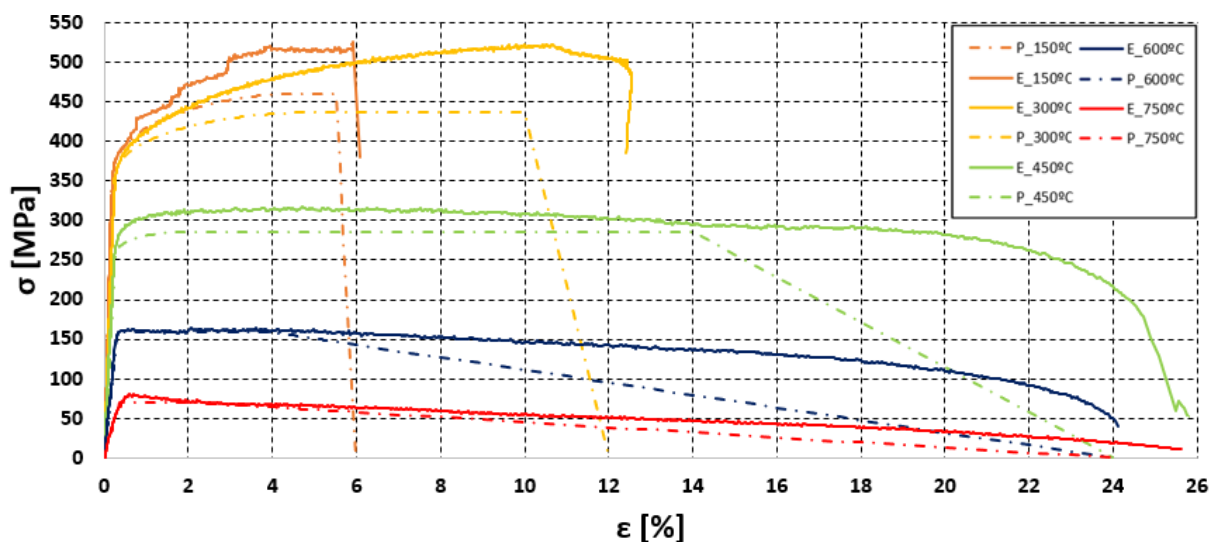


Figura 3-36 Curvas tensão propostas vs. obtidas experimentalmente

4 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

4.1 Conclusões

No âmbito desta investigação foram realizados 54 ensaios com o intuito de estudar a degradação das propriedades mecânicas do aço enformado a frio quando sujeitos a altas temperaturas. Esta análise tinha a intenção de comparar a evolução da degradação das propriedades de dois tipos de aço: S280GD+Z e S350GD+Z.

Foram realizados ensaios em regime estacionário e em regime transiente. Primeiramente começou-se por analisar as diferenças obtidas entre estas duas metodologias de ensaio. É de salientar que o princípio base dos ensaios em regime transiente é traduzir com maior rigor uma situação real de incêndio, sendo os seus resultados mais próximos do comportamento real do aço. No que diz respeito à comparação entre as duas metodologias de ensaios realizadas, conclui-se que para os parâmetros estudados (módulo de elasticidade e tensão de cedência) os fatores de redução obtidos nos ensaios em regime transiente são mais gravosos quando comparados com os obtidos para os ensaios em regime estacionário. Deste aspeto pode-se retirar que, ao realizar ensaios em regime estacionário para prever o comportamento do material pode-se estar a levar a cabo um dimensionamento estrutural com base em valores não conservativos para a degradação das propriedades mecânicas do aço. O fator que incita maior desvantagem na metodologia de ensaios em regime transiente é a complexidade que lhes é inerente. Para prever com rigor os parâmetros mecânicos do material é necessário realizar uma campanha de ensaios a uma escala muito superior do que ensaios em regime estacionário e, conseqüentemente, economicamente menos interessante. Este foi um dos aspetos que levou à carência de resultados expostos no subcapítulo deste tema, apontar valores para fatores de redução da tensão última ($f_{u,\theta}$) e para a tensão limite de proporcionalidade ($f_{p,\theta}$) era pouco coerente uma vez que seria preciso realizar mais ensaios com diferentes tensões pré-instaladas para ser possível determinar com o rigor exigido esta fase do comportamento do material, bem como a fase de rotura. Sugere-se que, para uma determinação mais rigorosa das propriedades mecânicas do aço, nomeadamente em estruturas com maior suscetibilidade de sofrer uma situação de incêndio ou quando estivermos na presença de uma estrutura com uma maior classe de importância, sejam realizados ensaios em regime transiente e, conseqüentemente o processo de verificação de segurança de estruturas de aço enformado a frio seja realizada considerando os fatores de redução das propriedades mecânicas obtidas através destes ensaios.

Relativamente à comparação de resultados entre as diferentes classes de aço, S280GD+Z e S350GD+Z, bem como classes superiores comparadas através de investigações de outros autores pode-se verificar que os fatores de redução para as temperaturas mais baixas são

bastante coerentes tanto para a tensão de cedência como para o módulo de elasticidade. A partir dos 300°C o S280GD+Z apresenta uma degradação das propriedades mecânicas mais acentuada. Pode-se concluir que para as temperaturas mais altas, os fatores de redução são relativamente próximos, a grande diferença entre as classes do aço reside nos valores de temperatura intermédios, onde a classe mais baixa tende a ter uma quebra mais vincada para menores valores de temperatura, enquanto o S350GD+Z tem uma quebra nas suas propriedades para valores um pouco mais altos. Quando comparados com outros autores que realizaram investigações com classes mais altas confirmamos esta tendência, para as temperaturas inferiores a 200°C e superiores a 700°C verifica-se fatores de redução muito próximos para as diferentes classes. A diferença entre as classes mais uma vez destaca-se ao verificar que a perda de resistência do material é severamente posta em causa para valores maiores da temperatura quanto maior for a classe em estudo.

A comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os propostos pelas normas em vigor estudadas neste âmbito também levanta alguns problemas. Os parâmetros mecânicos de maior relevo confrontados com as normas foram o módulo de elasticidade (E_{θ}) e a tensão de cedência ($f_{y,\theta}$). Verifica-se que os fatores de redução propostos na EN 1993-1-2 (2010) e AS 4100 (1998) para o módulo de elasticidade são desajustados quando comparados com os obtidos nos ensaios em regime transiente. Para a tensão de cedência surge a problemática de a EN 1993-1-2 (2010) não sugerir qualquer redução para este parâmetro para valores iguais ou inferiores a 400°C, o que tem destacada importância principalmente para aços de classes mais baixa. Por exemplo, aos 400°C o S350GD+Z sugere-se um fator de redução $k_{y,400}=0.75$, quanto menor for a classe do aço mais penalizador, Craveiro *et al.* (2016) sugere $k_{y,400}=0.60$.

Quando confrontados os resultados obtidos experimentalmente com os obtidos por outros autores verifica-se que, entre as classes estudadas se obtém resultados bastante próximos com os obtidos experimentalmente. Verifica-se uma clara degradação das propriedades mecânicas do material mais penalizadora para aços de menor classe, para as temperaturas entre os 200 e os 500°C. Todos os autores estudados nesta investigação se encontram numa conclusão, as normas em vigor para os laminados a quente de classe 4, de uma maneira ou de outra não se adequam ao comportamento do aço enformado a frio.

As curvas tensão-extensão baseadas na metodologia de Ramberg-Osgood para aços sujeitos a temperaturas elevadas propostas pela MMPDS-01 (2003) são aquelas que melhor se adequam às obtidas experimentalmente. Dos modelos propostos por outros autores Chen e Young (2007) é o que se aproxima mais das experimentais. Também foram confrontadas as equações propostas na EN 1993-1-2 (2010) baseadas em secções de classe 4, estas revelaram um

comportamento pouco adequado na precisão das extensões e um comportamento não conservativo para as temperaturas mais altas (600 e 750°C).

Por fim, foram apresentadas equações que traduzem o comportamento do material para o S350GD+Z para temperaturas elevadas. Estas assumem um comportamento conservativo em todos os intervalos de temperatura. É proposta uma primeira fase elástica linear até ao início da cedência do material para todas as gamas de temperatura, de seguida um comportamento de endurecimento do aço que só se evidencia para temperaturas iguais ou inferiores aos 450°C, um patamar linear onde o material aumenta a extensão mantendo a tensão e um comportamento linear de rotura do material. São propostas extensões de rotura mais baixas para as temperaturas de 150 e 300°C onde se evidencia um comportamento mais frágil do material.

A consideração do aço enformado a frio como uma secção laminada a quente de classe 4 pela EN 1993-1-1 (2010) e a consequente utilização das considerações que este tipo de secções implica no dimensionamento de estruturas a uma situação de incêndio pela EN 1993-1-2 (2010) não é a mais correta. E nota-se que quanto menor a classe do aço estudado mais vertiginosa é a diferença entre as propostas na norma europeia e no comportamento real do material. No subcapítulo seguinte sugerem-se algumas metodologias que se podem revelar uteis na caracterização do comportamento deste tipo de aço com maior rigor.

4.2 Desenvolvimentos futuros

A carência de informação a cerca do comportamento de estruturas compostas por aço enformado a frio ainda existe e, regulamentarmente falta aprofundar a abordagem deste tipo de aço.

Para trabalhos de investigação futuros, sugere-se um estudo de aços enformados a frio de alta resistência, uma vez que a utilização destes materiais está em claro crescimento nos países com maior poder económico, seria interessante ser determinado com maior rigor o comportamento deste tipo de estruturas numa situação de incêndio.

Realizar uma campanha de ensaios em regime transiente capaz de caracterizar o comportamento do aço com maior rigor, nomeadamente a fase de endurecimento e a fase de rotura do material. Uma campanha de ensaios com vários regimes de carga pré-instalada (com intervalos de tensão mais pequenos), nomeadamente com uma tensão igual à tensão de cedência.

Levar a cabo um trabalho de investigação para se estudar a diferença entre ensaios em regime transiente e regime estacionário suficientemente complexa para que se consiga tirar conclusões mais rigorosas. Nomeadamente, realizar ensaios de fluência para que se verifique se este é fator

de grande relevo ou se introduz um erro desprezível, mesmo para ensaios de menor duração (menos de uma hora).

Propor equações do comportamento do aço a altas temperaturas em função da classe do material, consideração que a EN 1993-1-1 (2010) não assume. Uma investigação com um aço de baixa resistência, por exemplo um aço S280GD+Z e um aço de alta resistência S550GD+Z ou superior.

BIBLIOGRAFIA

Anis, A., Bjork, T., e Heinilla, S. (2012). “Prediction of residual stresses in cold formed corners”. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, Vol. 2, Issue 4, pp 252–264.

AS 4100 (1998): Steel structures. Australia standard, Sydney, Austrália.

BS 5950-8 (1990), Structural Use of Steelwork in Building - Part 8: Code of Practice for Fire Resistance Design. British Standards Institution (BSI), Londres, Reino Unido.

Chen, J., e Young, B. (2006). “Corner properties of cold-formed steel sections at elevated temperatures”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, Issue 2, pp. 216–223.

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

Cowan M., Khandelwal K. (2014), Modelling of high temperature creep in ASTM A992 structural steels. *Engineering Structures*, Vol. 80, 426-434.

Craveiro, H., Rodrigues, J. P. C., Santiago, A., e Laím, L. (2016). “Review of the high temperature mechanical and thermal properties of the steels used in cold formed steel structures – The case of the S280 GD+Z steel”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 98, pp. 154–168.

Dubina, D., Ungureanu, V., Landolfo, R. (2012), Design of cold-formed steel structures. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: Design of cold-formed steel structures, ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, Wiley-Blackwell

EN 1993-1-1 (2010), Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardisation, Brussels, 91 p.

EN 1993-1-2 (2005), Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-2: General rules, Structural fire design, European Committee for Standardisation, Bruxelas.

EN 1993-1-3 (2006), Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules, Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, European Committee for Standardisation, Bruxelas.

EN 1993-1-5 (2006), Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-5: Plated structural elements, European Committee for Standardisation, Brussels, 55 p.

Feng, M., Wang, Y. C., e Davies, J. M. (2004). “A numerical imperfection sensitivity study of cold- formed thin-walled tubular steel columns at uniform elevated temperatures”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 42, Issue 4, pp. 533–555.

Kankanamge, N. D., e Mahendran, M. (2011). “Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, Issue 1, pp. 26–44.

Lee, J.H., Mahendran, M., Mäkeläinen, P. (2003), Prediction of mechanical properties of light gauge steels at elevated temperatures, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, Issue 12, pp. 1517-1532.

Li, Hai-ting, Young, Bem (2017), “Material properties of cold-formed high strength steel at elevated temperatures”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 115, pp. 289-299.

MMPDS-01 (2003), *Metallic Materials Properties Development and Standardization*, Washington, DC.

Moen, C. D., Igusa, T., e Schafer, B. W. (2008). “Prediction of residual stresses and strains in cold- formed steel members”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, Issue 11, pp. 1274–1289.

Morovat, M. (2014), “Creep Buckling Behavior of Steel Columns Subjected to Fire”. Tese de doutoramento apresentada para obtenção de grau de Doutor, Universidade do Texas

Mota, A. (2016). “A Resistência ao fogo de colunas de aço enformado a frio com secção em sigma o”. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Outinen, J., Kaitila, O., Mäkeläinen, P. (2000), A study for the development of the design of steel structures in fire conditions, *Proceedings of the 1st International Workshop of Structures in Fire*, Copenhagen, Denmark, pp. 267-281.

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

Quach, W. M., Teng, J. G., e Chung, K. F. (2004). “Residual stresses in steel sheets due to coiling and uncoiling: A closed-form analytical solution”. *Engineering Structures*, Vol. 26, Issue 9, pp. 1249–1259.

Quach, W. M., Teng, J. G., e Chung, K. F. (2006). “Finite element predictions of residual stresses in press-braked thin-walled steel sections”. *Engineering Structures*, Vol 28, Issue 11, pp. 1609–1619.

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

Ranawaka, T., Mahendran, M. (2010), Numerical modeling of light gauge cold-formed steel compression members subjected to distortional buckling at elevated temperatures, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, pp. 334-344

Schafer, B., e Peköz, T. (1998). “Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 47, Issue 3, pp. 193–210.

Rhodes, J. (1991). “Design of cold-formed steel members”. Elsevier Applied Science, London.

Yu, W., e LaBoube, R. A. (2010). “Cold-formed steel design”. John Wiley & Sons, Inc, Nova Jérσία.