

PAPER REF: 7448

## **CARATERIZAÇÃO MECÂNICA DO AÇO S 355 A TEMPERATURA ELEVADA**

**A.L. Ramalho<sup>1,2(\*)</sup>, F. Antunes<sup>2</sup>, Telmo Nobre<sup>3</sup>, J.A.M. Ferreira<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, Portugal

<sup>2</sup> Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos (CEMMPRE), Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

<sup>3</sup> Laboratório de Termodinâmica e Aeronáutica do Instituto de Soldadura e Qualidade (LABET ISQ), Castelo Branco, Portugal

(\*) *Email:* aramalho@ipcb.pt

### **RESUMO**

No presente trabalho pretende-se efetuar a caracterização mecânica do aço S 355 AR, EN 10025-4, a altas temperaturas. A avaliação rigorosa da variação da tensão de cedência, do módulo de Young, do módulo de encruamento, do calor específico e do coeficiente de dilatação térmica, com a temperatura é essencial na simulação numérica da distorção e das tensões residuais induzidas por campos térmicos. Embora esta informação esteja disponível em alguns códigos estruturais, como o Eurocódigo 3 parte 1.2, ela não inclui o efeito da composição química e da microestrutura. O aço S 355 AR é um material bastante utilizado em estruturas soldadas, onde a avaliação de distorções e tensões residuais é um problema usual. A caracterização mecânica do aço S 355 AR, EN 10025-4, foi obtida através de ensaios de tração isotérmicos realizados a temperaturas até 600 °C, por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) realizada até à temperatura de 950 °C e por Análise Termomecânica (TMA) conduzida até aos 1350 °C. Os resultados obtidos diferem significativamente dos valores apresentados na parte 1.2 do Eurocódigo 3, para um aço ferrítico genérico.

**Palavras-chave:** Propriedades mecânicas de aços, Aço S 355, Caracterização mecânica a alta temperatura.

### **ABSTRACT**

The present work aims to assess the mechanical characterization of S 355 AR steel, EN 10025-4, at high temperatures. The precise evaluation of the variation of yield stress, Young module, hardening module, specific heat and coefficient of thermal expansion, with the temperature is a key problem in numerical simulation of the distortion and the residual stresses induced by thermal fields. Although this information are available in some of the structural codes, like Eurocode 3 part 1.2, it does not include the effect of chemical composition and microstructure. The S 355 AR steel is a material commonly used in welded structures, where the evaluation of distortion and residual stresses is an usual issue. The mechanical characterization of the S 355 AR steel, EN 10025-4, were obtained by tensile tests conducted at temperatures up to 600 °C, by Differential Scanning Calorimetry (DSC) at temperatures up to 950 °C and by Thermomechanical analysis (TMA) conducted up to 1350 °C. The obtained results differ significantly from the values presented in Eurocode 3 part 1.2 for a general steel.

**Keywords:** Steel properties, S 355 steel, Mechanical characterization, High temperature.

## Introdução

O material de base utilizado neste estudo é um aço estrutural ao carbono, fracamente ligado, de média resistência, S 355 AR EN 10025-4, (St 52-3 DIN 17100), fornecido em chapas de 12.5 mm de espessura, obtidas por laminagem controlada. A composição química deste aço, bem como as suas propriedades mecânicas obtidas à temperatura ambiente, encontram-se publicadas num estudo prévio (Ramalho *et al*, 2011) e constam das tabelas 1 e 2.

**Tabela 1** Composição química do aço , S 355 AR (percentagem em peso).

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Ti
0.131	0.413	1.44	0.063	0.024	0.034	0.009

Al	V	Cu	Co	Nb	P	S
0.029	0.043	0.018	0.013	0.005	0.011	0.005

**Tabela 2** Propriedades mecânicas do aço , S 355 AR à temperatura ambiente.

Ensaio n.º	$\epsilon_R$ [%]	$\sigma_R$ [MPa]	$\epsilon_{0.2}$ [%]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	E [MPa]
1	20.95	554.4	0.3074	386.7	228000
2	19.94	558.0	0.3597	367.0	184000
4	26.64	553.9	0.3423	393.6	223800
5	22.59	554.5	0.3812	387.3	215300
<b>Média</b>	<b>22.53</b>	<b>555.2</b>	<b>0.3476</b>	<b>383.7</b>	<b>212800</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>2.95</b>	<b>1.89</b>	<b>0.03</b>	<b>11.53</b>	<b>17231.71</b>

A composição química deste aço é típica de um aço micro-ligado, também designado por HSLA (“High Strength Low Alloy steel”) (Honeycombe, 1985). Durante as décadas de 1950-1960, o processo de endurecimento dos aços fracamente ligados sofreu grandes alterações. Até esta altura a forma de promover o endurecimento destes aços consistia na adição de carbono até 0.4% e manganês até 1.5%. Os aços assim obtidos são constituídos por uma mistura de ferrite e de perlite, que lhe conferem elevada dureza, mas apresentam uma baixa tenacidade. Estes teores em carbono também comprometem seriamente a soldabilidade (Lesnewich, 1993 e Chen e Pollack, 1993). Constatou-se que a obtenção de um pequeno tamanho de grão na ferrite incrementava a tenacidade do aço. A laminagem controlada no estado austenítico revelou-se um processo de fabrico adequado para promover a obtenção dessa microestrutura. Para o mesmo efeito contribui a adição de pequenas concentrações (inferiores a 0.1%) de elementos refinadores do grão como o nióbio, o titânio, o vanádio e o alumínio. Estes elementos também promovem a precipitação de carbonetos e nitretos na matriz que além de promoverem a recristalização no estado austenítico também favorecem o endurecimento da matriz. A adição destes elementos a aços com 0.03-0.15% C e até 1.5% Mn, permitiu obter aços com grão fino com tensões de cedência entre 400 e 550 MPa e com temperaturas de transição frágil/dúctil muito baixas (até -70 °C).

Este material é utilizado de forma extensiva na construção de componentes estruturais e órgão de máquinas, através de construção soldada. A previsão das distorções e das tensões residuais associadas ao

processo de soldadura são essenciais na fase de projeto destes componentes. Os processos de simulação numérica, com recurso ao método dos elementos finitos, para avaliar estes parâmetros revelam-se eficientes, sendo por isso cada vez mais utilizados. Nestes processos de simulação numérica torna-se imprescindível a disponibilidade das propriedades mecânicas dos materiais, obtidas a altas temperaturas (Goldak, 2008). Para o aço S 355 AR, ou equivalente, não existe disponível na literatura a variação destas propriedades com a temperatura.

As propriedades mecânicas consideradas essenciais para a simulação numérica pelo método dos elementos finitos do processo de soldadura são o calor específico, o coeficiente de dilatação térmica, a tensão de cedência, o módulo de encruamento e o coeficiente de elasticidade (Lindgren, 2001 e Karlsson, 1986). Pretende-se com o presente estudo obter e disponibilizar estas propriedades mecânicas do aço S 355 AR, obtidas a temperaturas elevadas.

### **Procedimento Experimental**

A tensão de cedência, o módulo de encruamento e o coeficiente de elasticidade do aço S 355 AR foram obtidas através de ensaios de tração realizados às temperaturas de 18, 150, 300, 450, 525 e 600 °C, com provetes cilíndricos de geometria proporcional com diâmetro nominal de 6 mm. Os provetes foram obtidos por torneamento, com eixo na direção de laminagem.

Os ensaios foram realizados usando uma máquina servo-hidráulica Instron, modelo 1341 com capacidade de 100 kN, na qual foi acoplado um forno, sendo seguido o procedimento especificado na norma EN 10002-5, 1992. As extensões foram medidas utilizando um extensómetro axial para altas temperaturas de hastes de quartzo, modelo Instron-A1387-1023, acoplado diretamente ao provete, figura 1.



Figura 1

O coeficiente de dilatação térmica foi obtido através de análise termomecânica realizada com o equipamento Netzsch TMA 402 F3 em atmosfera de azoto. Foram ensaiadas três amostras cilíndricas com diâmetro e comprimento nominais de 5 e 25 mm respetivamente. As amostras foram obtidas por torneamento. A amostra foi fixada com uma pré-carga de 0.5 N. Foi utilizado um fluxo de azoto de 60

ml/minuto e uma taxa de aquecimento de 10 °C/minuto. O coeficiente de dilatação térmica foi obtido para temperaturas entre 40 e 1350 °C, sendo obtido a cada intervalo de 10 °C.

O calor específico foi obtido através de calorimetria exploratória diferencial realizada com o equipamento Netzsch STA 449 F3 em atmosfera de hélio, Figura 3. Foram ensaiadas três amostras cilíndricas com diâmetro e comprimento nominais de 5 e 1.5 mm respectivamente. As amostras foram recolhidas por corte de um cilindro de 5 mm de diâmetro obtido por torneamento. Foi utilizado um fluxo de hélio de 60 ml/minuto e uma taxa de aquecimento de 20 °C/minuto. O calor específico foi obtido para temperaturas entre 400 e 950 °C, sendo obtido a cada intervalo de 2.5 °C.

### Apresentação e Discussão de Resultados

Para cada temperatura de realização dos ensaios de tração, a Figura 2 representa um dos registros da tensão nominal versus extensão nominal. Para cada temperatura foram realizados três ensaios.

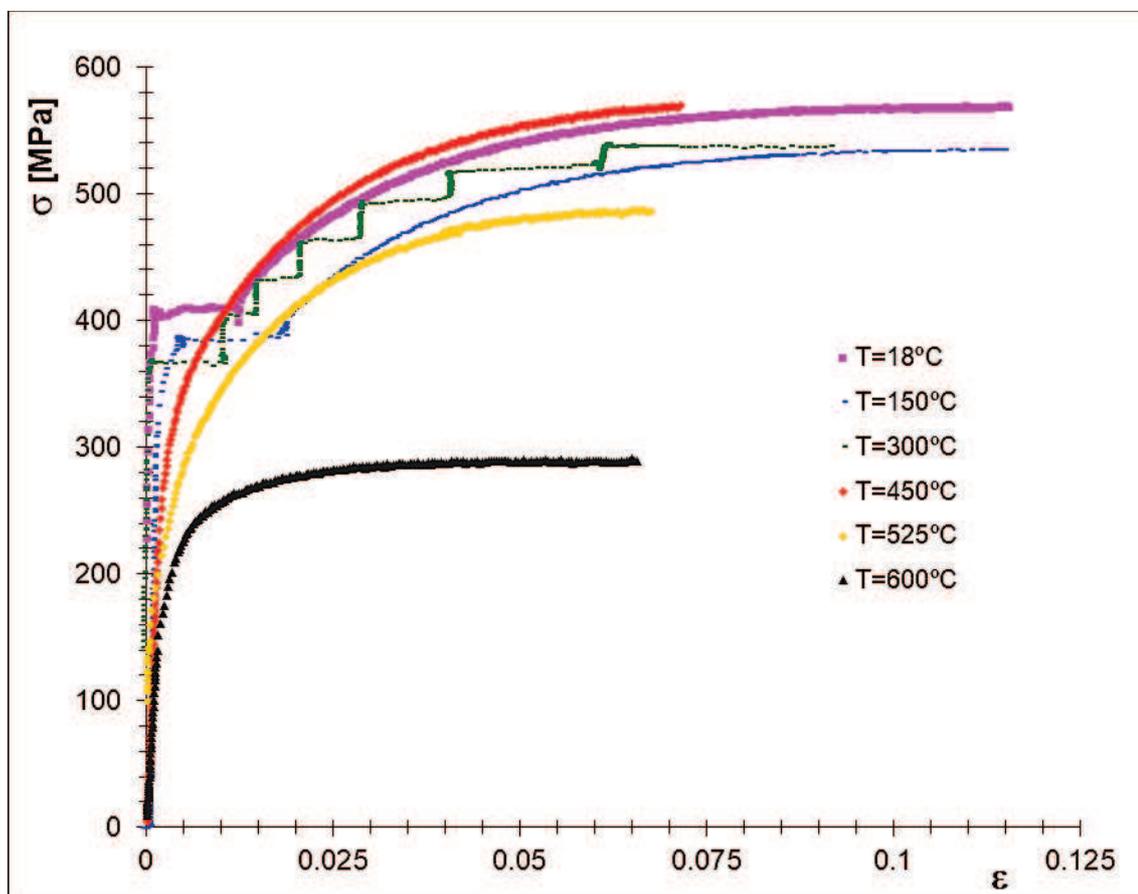


Figura 2 – Curvas de tração a temperatura elevada.

O material apresenta uma variação das propriedades mecânicas com a temperatura típica dum aço estrutural ao carbono: módulo de elasticidade decrescente, tensão limite de elasticidade (tensão de cedência a 0.2%) decrescente, aumento do módulo de encruamento até à temperatura de 450 °C. Este aumento da resistência até aos 450 °C deve-se ao envelhecimento dinâmico do aço, sendo inclusivamente visível o efeito de Portevin-Le Chatelier para a temperatura de 300 °C.

A partir dos 450 °C, até ao 600 °C ocorre uma diminuição significativa da rigidez e da resistência, deixando de se observar o efeito do envelhecimento dinâmico.

Constatou-se que o extensómetro não revelou rigidez adequada para a obtenção das propriedades elásticas. Esta deficiência está associada ao método de fixação das hastes ao provete. Os modelos mais recente deste extensómetro, da série Instron 2632-05X, já têm melhorias no processo de fixação que poderá corrigir a deficiência registada. Foram utilizados os fatores de redução das propriedades elásticas do Eurocódigo 3, parte 1.2 para um aço de construção ferrítico, que constam na Tabela 3, para determinar os valores da extensão plástica nominal.

Tabela 3

T [°C]	$k_{E,T}$	$k_{Re,T}$
18	1.00	1.00
150	0.95	1.00
300	0.80	1.00
450	0.65	0.92
525	0.47	0.70
600	0.31	0.47

No que se refere à variação do módulo de encruamento com a temperatura, na Tabela 4 são apresentadas as tensões correspondentes a determinados valores da extensão plástica nominal, para cada uma das temperaturas.

Tabela 4

T [°C]	$\sigma(\epsilon_p=0)$ [MPa]	$\sigma(\epsilon_p=0.023)$ [MPa]	$\sigma(\epsilon_p=0.047)$ [MPa]	$\sigma(\epsilon_p=0.057)$ [MPa]	$\sigma(\epsilon_p=0.17)$ [MPa]
18	383.7	484.4	541.2	551.7	551.7
150	368.0	432.3	502.1	515.3	515.3
300	367.1	463.5	520.0	523.4	523.4
450	338.4	496.3	554.3	563.5	-
525	289.3	433.1	480.8	486.0	-
600	238.0	283.1	289.3	289.3	-

Pela análise dos valores constantes da Tabela 4, constata-se a ocorrência de envelhecimento dinâmico até aos 450 °C.

Na Figura 3 está representada a variação do coeficiente de dilatação térmica linear e unitário ( $\alpha$ ) para o aço S 355 AR. Para facilitar a comparação, na mesma figura estão representados os valores propostos pelo Eurocódigo 3 e por Thomas *et al*, 1984, para um aço com composição química semelhante.

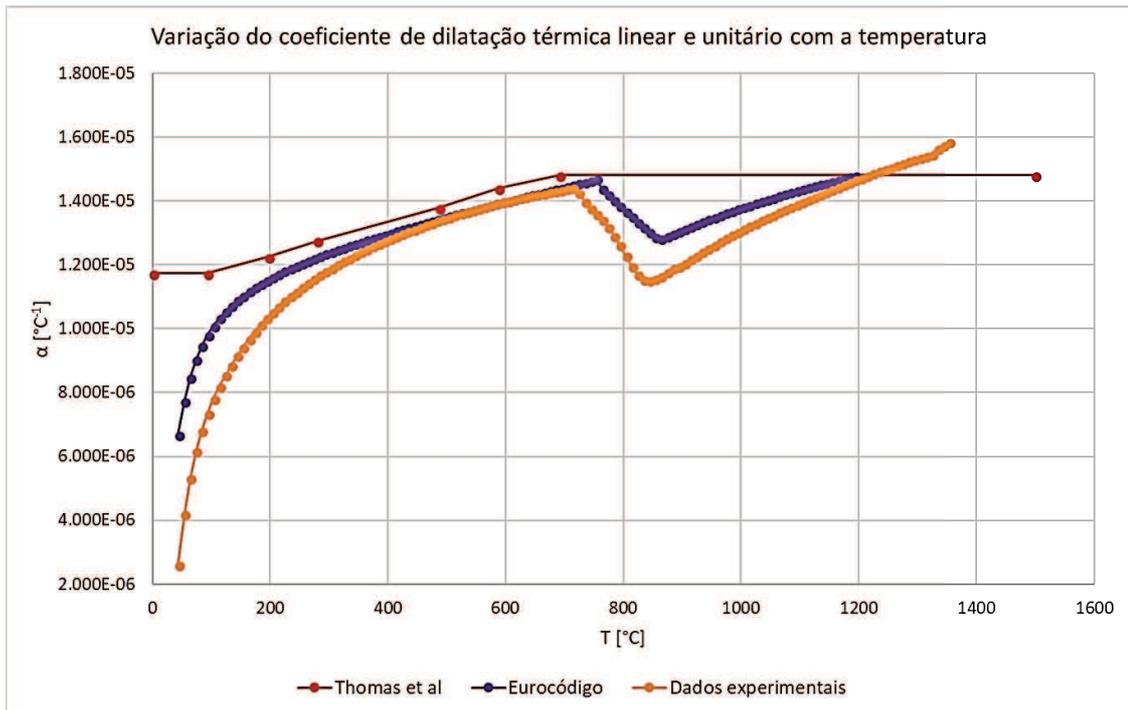


Figura 3

Verifica-se que os valores propostos pelo Eurocódigo 3 estão muito próximos dos resultados obtidos, no entanto, a sensibilidade dos processos de simulação numérica (distorção e tensões residuais) relativamente a esta propriedade é muito elevada, pelo que, sempre que possível deve recorrer-se à utilização de valores experimentais.

Na Figura 4 está representada a variação do calor específico ( $C_p$ ) para o aço S 355 AR. Para facilitar a comparação, na mesma figura estão representados os valores propostos pelo Eurocódigo 3.

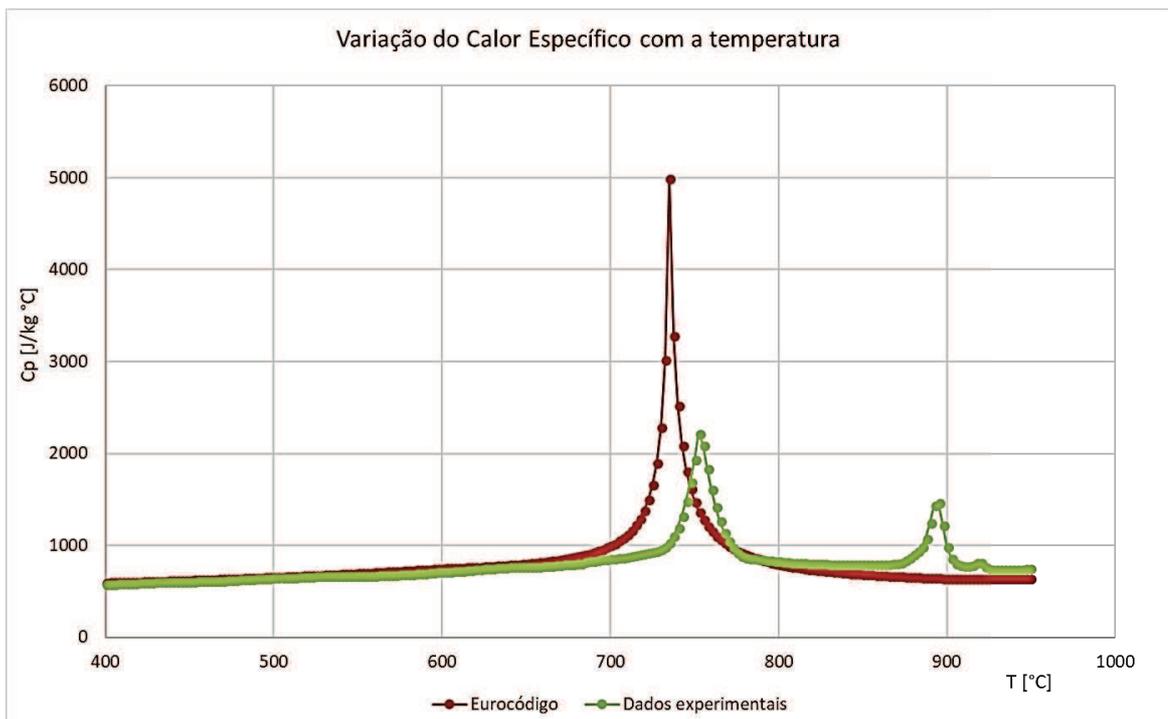


Figura 4

Os valores registados para a variação do calor específico com a temperatura seguem uma tendência próxima da preconizada pelo Eurocódigo 3. Constata-se que o incremento do calor específico provocado pela variação da ferrite  $\alpha$  para austenite, próximo dos 735 °C, é menos localizada do que o previsto pelo Eurocódigo 3, estendendo-se por todo o domínio da transformação, ocorrendo picos junto às fronteiras do domínio de transformação de fases.

## Conclusões

No presente trabalho foi obtida a variação com a temperatura das propriedades mecânicas do aço S 355 AR EN 10025-4.

Constatou-se que o procedimento experimental não foi adequado para obter a variação das propriedades elásticas com a temperatura.

Os resultados obtidos para a variação com a temperatura do calor específico e do coeficiente de dilatação térmica linear e unitário apresentam uma variação semelhante à preconizada pelo Eurocódigo 3, parte 1.2, no entanto, apresentam diferenças significativas, suscetíveis de influenciar os resultados das tensões residuais e distorções de soldadura obtidos através de simulação numérica por elementos finitos.

Foi obtida a variação com a temperatura do módulo de encruamento.

## Referências

Chen, C.C. and Pollack, A., (1993), "Influence of welding on steel weldment properties", ASM Handbook, Vol. 6, p. 416-428.

EN 10002-5 (1992), Norma Portuguesa EN 10002-5, "Materiais metálicos, Ensaio de tracção, Parte 5: Método de ensaio a temperatura elevada.

Eurocódigo 3, (2005) – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-2: Regras gerais – Verificação da resistência ao fogo, EN 1993-1-2:2005.

Goldak, J, (2008), "Distortion and Residual Stress in Welds: The Next Generation", Trends in Welding Research, ASM Proceedings of the 8th International Conference, Stan A. David, Tarasankar DebRoy, John N. DuPont, Toshihiko Koseki, Herschel B. Smartt, editors, p. 45-52.

Honeycombe, R.W.K., (1895), "Aços Micoestrutura e Propriedades", Ed. Fundação Calouste Gulbenkian.

Karlsson, L., (1986), "Thermal Stresses in welding", R. B. Hetnarski (ed.), Thermal Stresses, Vol. 1, Elsevier Science Publishers.

Lesnewich, A., (1993), "Influence of welding on steel weldment soundness", ASM Handbook, Vol.6, p. 408-415.

Lindgren, L.-E., (2001), "Finite Element Modeling and Simulation of Welding. Part 1: Increased Complexity", Journal of Thermal Stresses, Vol. 24, N.º 2, February, p. 141-192.

- Ramalho, A.L., Ferreira, J.A.M., Branco, C.A.G.M., (2011), “ Fatigue behaviour of T welded joints rehabilitated by tungsten inert gas and plasma dressing”, *Materials and Design* 32, p. 4705–4713.
- Thomas, B.G., Samarasekera, I.V., Brimacombe, J.K., (1984), “Comparison of Numerical Modeling Techniques for Complex, Two-Dimensional, Transient Heat-Conduction Problems”, *Metallurgical Transactions B*, Vol. 15B, June, p. 307-318.