

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

INFLUENCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES RELACIONADAS AO ENSAIO DE TRAÇÃO DO AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA ARBL 5L X80

Bruno Gomes Tavares, bgt1982@hotmail.com¹

Filipe José Pereira Prince Nascimento, filipeprince@globo.com¹

Fernando Antônio de Aguiar e Silva, fernandoaas@uol.com.br¹

¹Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda - Universidade Federal Fluminense, Avenida dos trabalhadores 420 – Vila Santa Cecília, CEP: 27255125, Volta Redonda, Rio de Janeiro – Brasil.

Resumo: O presente trabalho mostra os resultados de um estudo experimental da influência da temperatura nas propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração do aço de alta resistência e baixa liga ARBL 5L – X80. Este aço é utilizado em várias aplicações a altas temperaturas, incluindo ciclos térmicos de soldagem. Como aguardado, os resultados demonstraram uma queda no limite de escoamento e módulo de elasticidade do material. Os valores obtidos experimentalmente estão em concordância com os resultados alcançados por outros autores, o que corrobora a qualidade das medições. Os dados foram bem ajustados pelo modelo de Ramberg Osgood nas diferentes temperaturas estudadas. Para esse ajuste foram obtidas as curvas de tensão-deformação reais. Uma comparação do comportamento das mesmas em relação à curva de engenharia também foi efetuada. Devido ao fato dos ensaios serem realizados em pequenas deformações, percebeu-se que as curvas de engenharia e verdadeiras se aproximam. A partir da temperatura de 550 °C as variações nas propriedades estudadas tornam-se significativas. Notou-se um efeito de fragilização do aço a partir da mesma temperatura. Os ensaios foram realizados para uma deformação máxima de 5%, não alcançando o rompimento do material.

Palavras-chave: Ensaio de Tração, Alta Temperatura, Pequenas Deformações, ARBL 5L X80, Propriedades mecânicas

1. INTRODUÇÃO

Uma forma importante de conhecer o comportamento de um material é através da realização de ensaios que mostram, em laboratório, informações sobre suas propriedades e os efeitos que as condições ambientes exercem sobre os mesmos. Dentre os vários ensaios disponíveis destaca-se o ensaio de tração por ser de simples realização e fornecer dados relevantes. Na engenharia, materiais como o aço tem um grande campo de aplicações e é utilizado em diversas estruturas mecânicas. Aços carbono de alta resistência e baixa liga, também conhecidos como aços micro ligados, são aqueles que pela adição de pequenas quantidades de elementos de liga se obtém um limite de escoamento acima de 276 Mpa na condição laminado, tendo como uma das principais características uma boa relação resistência mecânica/tenacidade. A produção desses aços envolve uma primeira etapa de laminação a quente dando a forma final do produto como chapa, perfis etc, e posteriormente uma segunda etapa de laminação com o objetivo de conferir melhores propriedades mecânicas (Rocha, 2010).

Os tubos mais utilizados para o transporte de gás a alta pressão são os de aço API 5L de graus X60, X65, X70 e X80. O uso de tubos do grau X80 em dutos de grande diâmetro ainda é restrito a países desenvolvidos como Estados Unidos e alguns países europeus, no Brasil ainda estão em processo de desenvolvimento (Meireles, 2009). Esse aço pode ter uma microestrutura com ferrita granular, ferrita acicular, perlita, bainita granular e constituinte de Martensita/Austenita (MA) disseminado em quantidades pequenas em uma matriz em forma de ilha, o que proporciona excelentes propriedades de tração (Lira, 2012). O ARBL 5LX80 tem se tornado um material de grande uso na indústria do petróleo e gás para a fabricação de dutos, pois fornece uma boa relação entre tenacidade e ductilidade. Para essa classe, os dois últimos dígitos após a letra X especificam o limite de escoamento mínimo do material (Alves, 2011). O aço API 5L X80 possui um valor mínimo de 80,5 KSI (555 Mpa). A Tab.1 apresenta a classificação e requisitos para os aços API (Meireles, 2009):

Tabela 1. Classificação e requisitos para os aços API.

Grau	Limite de escoamento mínimo	Limite de escoamento máximo	Limite de resistência mínimo	Limite de resistência máximo
	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
X42	290	495	415	760
X46	320	525	435	760
X52	360	530	460	760
X56	390	545	490	760
X60	415	565	520	760
X65	450	600	535	760
X70	485	635	570	760
X80	555	705	625	825
X90	625	775	695	915
X100	690	840	760	990
X120	830	1050	915	1145

A influência da temperatura é importante quando se deseja analisar o material trabalhando em condições severas ou, submetido a ciclos térmicos de soldagem. Em altas temperaturas a curva tensão-deformação sofre modificações fazendo com que a ductilidade seja aumentada e propriedades como o limite de escoamento e o módulo de elasticidade sofram uma queda em seus valores (D'Oliveira, 2009). O conhecimento do comportamento dessas alterações é de vital importância na área de engenharia.

Com o intuito de analisar o comportamento do material em tais condições, foram realizados ensaios a temperaturas pré-estabelecidas de 350 °C, 550 °C, 650 °C, 750 °C além da temperatura ambiente utilizada como parâmetro de controle. Os ajustes das curvas pelos parâmetros de Ramberg Osgood são influenciados pelas curvas de tensão-deformação verdadeiras, as análises de como tais parâmetros variam com a temperatura também é importante no estudo do material. Os corpos-de-prova e procedimentos adotados nos ensaios foram realizados de acordo com as normas ASTM E-08 e ASTM E-21 que correspondem aos padrões para ensaios de tração à temperatura ambiente e à alta temperatura respectivamente.

Quando se trata de realizar ensaios mecânicos, as normas mais utilizadas são as referentes à especificação de materiais a ao método de ensaio. Um método descreve o correto procedimento para se efetuar um determinado ensaio mecânico. Desse modo, seguindo sempre o mesmo método, os resultados obtidos para um mesmo material são semelhantes e reproduzíveis onde quer que o ensaio seja executado.

2. ANÁLISE EXPERIMENTAL

2.1. Descrição do material:

A influência da temperatura é importante quando se deseja analisar o material trabalhando em condições severas ou, submetido a ciclos térmicos de soldagem. Em altas temperaturas a curva tensão-deformação sofre modificações fazendo com que a ductilidade seja aumentada e propriedades como o limite de escoamento e o módulo de elasticidade sofram uma queda em seus valores (D'Oliveira, 2009). O conhecimento do comportamento dessas alterações é de vital importância na área de engenharia.

Com o intuito de analisar o comportamento do material em tais condições, foram realizados ensaios a temperaturas pré-estabelecidas de 350 °C, 550 °C, 650 °C, 750 °C além da temperatura ambiente utilizada como parâmetro de controle. Os ajustes das curvas pelos parâmetros de Ramberg Osgood são influenciados pelas curvas de tensão-deformação verdadeiras, as análises de como tais parâmetros variam com a temperatura também é importante no estudo do material. Os corpos-de-prova e procedimentos adotados nos ensaios foram realizados de acordo com as normas ASTM E-08 e ASTM E-21 que correspondem aos padrões para ensaios de tração à temperatura ambiente e à alta temperatura respectivamente. As chapas de aço foram fornecidas pela Usiminas. A Tab. 2 mostra os dados de propriedades de tração à temperatura ambiente, medidos para o material. A Tab.3, por sua vez, apresenta a composição química. Os elementos químicos presentes estão descritos em quantidade percentual.

Tabela 2. Propriedades de tração obtidas pela Usiminas.

Propriedade	Obtido	Mínimo	Máximo
Le (Mpa)	570	550	660
Lr (Mpa)	703	631	741
AL (%)	39,8	25	99,99
Le/Lr	81	0	93

Tabela 3. Composição química.

Elementos	C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Nb	V	Cr	Ti	N	Ni	Mo	Ca
%	0,06	1,77	0,19	0,02	0,001	0,02	0,029	0,066	0,026	0,194	0,015	0,0056	0,021	0,22	0,012

2.2. Procedimentos de ensaio e cálculos:

O corpo de prova cilíndrico foi usinado de acordo com o dimensionamento padrão da máquina, o qual segue a norma ASTM - E21, conforme a Fig. 1. As medidas estão apresentadas em mm.

O experimento consistiu em realizar o ensaio de tração em temperatura ambiente, como parâmetro de controle, e nas temperaturas de 350 °C, 550 °C, 650 °C e 750 °C para avaliação da influência do aumento das mesmas.

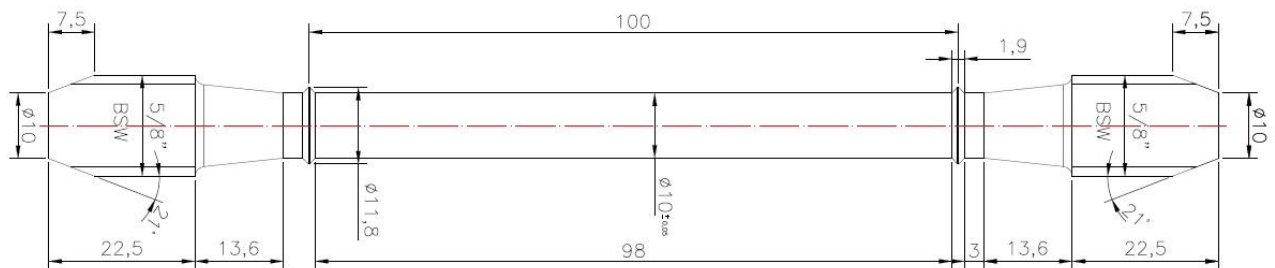


Figura 1. Dimensionamento do corpo-de-prova usinado.

Os experimentos foram realizados na máquina de ensaio de fluência tipo Roell + Korthaus, modelo DSM 6100 podendo atingir a temperatura máxima de 1000 °C, com o sistema de tração acionado por uma mola cuja carga máxima é de 50 KN. As temperaturas de ensaio foram determinadas de acordo com a limitação da máquina, procurando-se avaliar uma faixa de variação satisfatória. Foram aferidas três regiões de temperatura no corpo de prova: região superior, centro e região inferior, necessitando da utilização de três termopares. Seguindo a norma ASTM E21 – 09 (Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials1) os corpos de prova foram aquecidos até uma temperatura 25 °C abaixo da temperatura desejada, logo após aguardou-se em torno de uma hora para a homogeneização nessa temperatura de transição. Posteriormente os corpos de prova foram levados à temperatura desejada, aguardando-se novamente uma hora e, então, o ensaio foi iniciado. O painel de controle das temperaturas com o processo de aquecimento para a temperatura 750 °C é mostrado na Fig. 2.



Figura 2. Máquina de ensaio de fluência.

O equipamento utilizado para se conectar à máquina foi o Spider oito, e o software utilizado para registro dos dados de força P e deslocamento L foi o catman Easy-Ap. Após coletados os dados, os mesmos foram transformados em tensão S e deformação e de engenharia segundo as Eq. (1) e Eq. (2) respectivamente, as quais utilizam os valores do comprimento inicial L_0 e da área inicial A_0 da região útil do corpo de prova. As Eq.(3) e Eq.(4) foram utilizadas para a conversão dos dados de engenharia em dados de tensão σ e deformação ε verdadeiras. Para a curva tensão deformação verdadeira dos metais, a partir do limite de escoamento, $\sigma \geq \sigma_0$, utiliza-se normalmente uma relação potencial para descrever o comportamento tensão versus deformação plástica. Uma relação exponencial foi proposta por Ramberg e Osgood em 1943 e é amplamente utilizada. As deformações elásticas e plásticas são consideradas separadamente e depois somadas (Dowling, 2007). A Eq.(5) está relacionada aos parâmetros n e H de Ramberg Osgood. O procedimento para se encontrar tais constantes consiste em linearizar a parcela plástica da equação de Ramberg Osgood através do procedimento logarítmico conforme demonstrado pela Eq. (6). Posteriormente pode-se aplicar o processo de regressão linear para obtê-los.

$$S = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

$$\sigma = S \times (e + 1) \quad (3)$$

$$\varepsilon = \ln(e + 1) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p, \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H}\right)^n \quad (5)$$

$$\log \sigma = n \log \varepsilon + \log H \quad (6)$$

2.3. Resultados:

A Fig.3 apresenta a associação das curvas de tensão e deformação de engenharia, obtida para cada temperatura estudada:

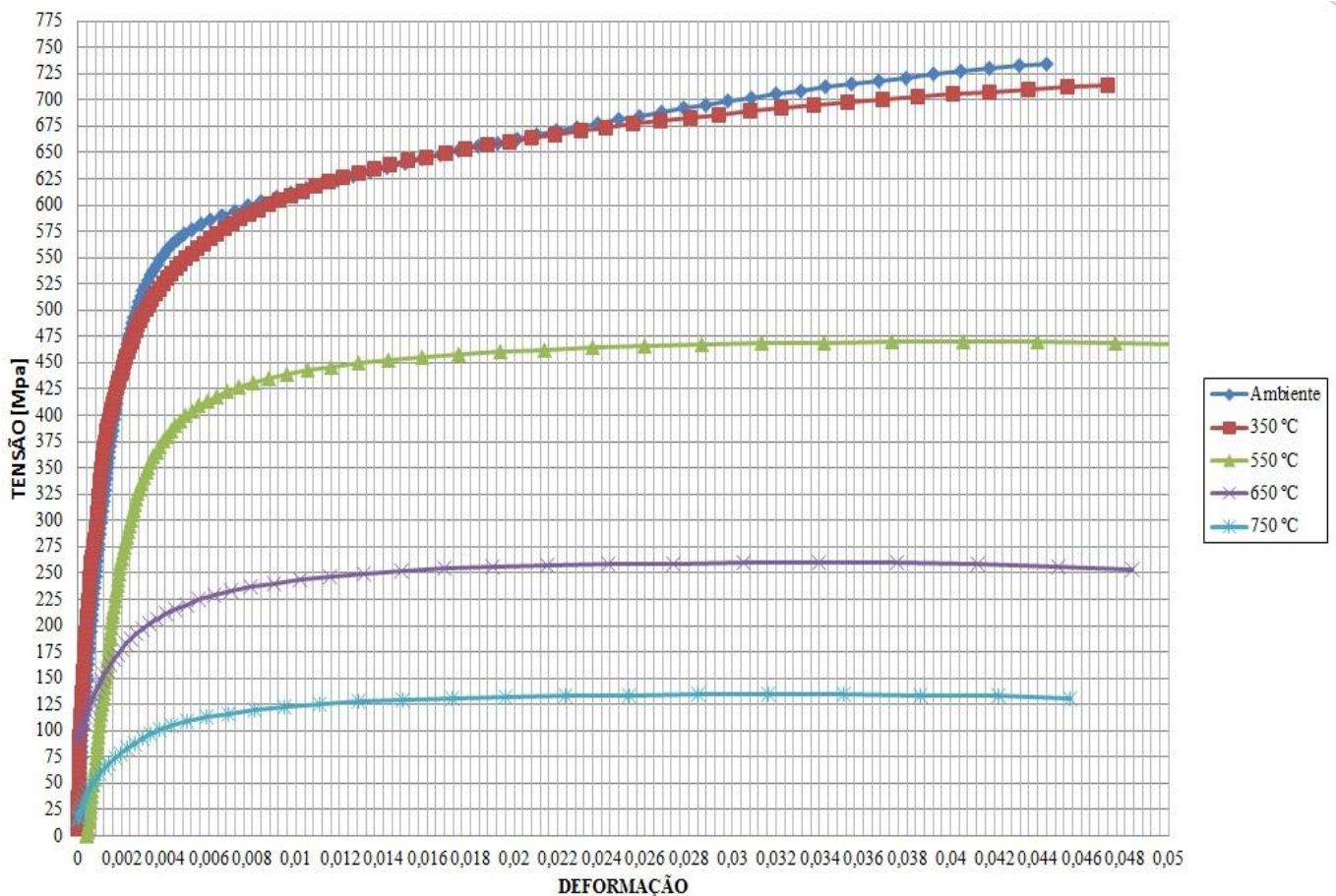


Figura 3. Associação das curvas de tração obtidas nas temperaturas analisadas.

Para o cálculo do módulo de elasticidade foi realizada uma regressão linear tomando-se um conjunto de valores de tensão e deformação de engenharia dentro da região elástica. A Fig. 4 apresenta o procedimento aplicado para a temperatura ambiente.

Em engenharia, o limite que descreve o comportamento elástico utilizável é o limite de escoamento, S_y , o qual é definido como a tensão que produz uma pequena deformação permanente, normalmente igual a 0,002. A Fig. 5 apresenta o procedimento aplicado para a temperatura ambiente.

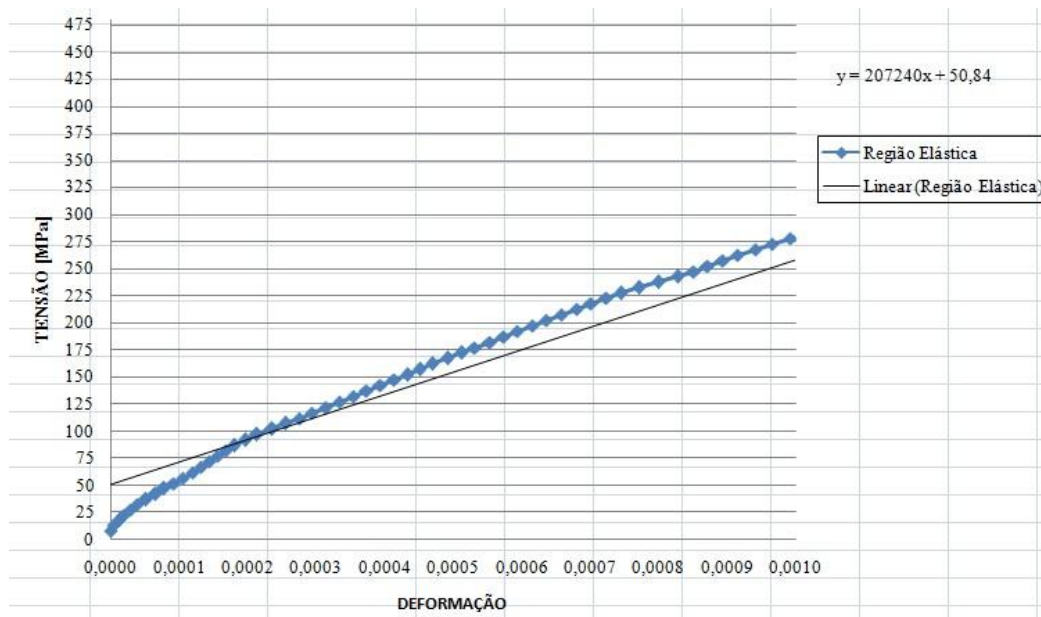


Figura 4. Módulo de elasticidade obtido através do procedimento de regressão linear.

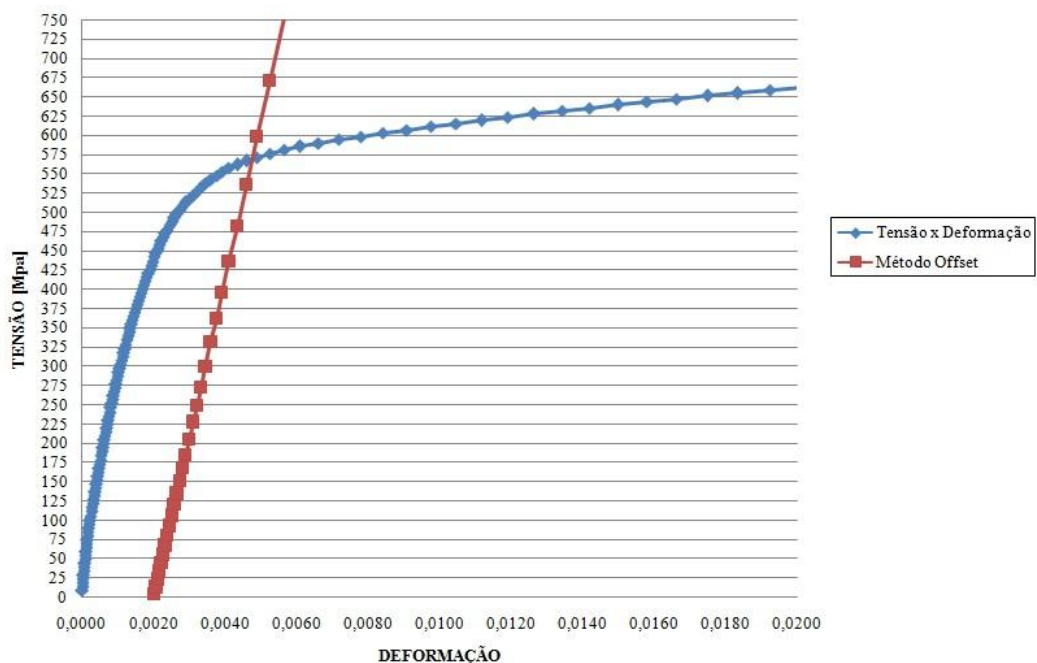


Figura 5. Obtenção do limite de escoamento através do método offset.

A Tab.4 apresenta um quadro resumo das propriedades de tração obtidas para cada temperatura analisada. Observou-se que as curvas de tensão deformação verdadeiras se aproximavam das curvas de engenharia, uma vez que os ensaios foram realizados com valores pequenos de deformação em torno de 5%. A Tab.5 apresenta um quadro resumo dos parâmetros de Ramberg Osgood obtidos para cada temperatura analisada.

O comportamento da redução de área conforme a variação de temperatura pode ser observado pela Fig. 6.

Tabela 4. Quadro resumo das propriedades de tração obtidas para cada temperatura analisada.

Temperaturas analisadas	E (Gpa)	S _v (Mpa)
Temperatura ambiente	207,2	568
Temperatura de 350° C	206,7	540
Temperatura de 550 °C	166,3	375
Temperatura de 650 °C	60,8	225
Temperatura de 750 °C	32,5	113

Tabela 5. Quadro resumo dos parâmetros de Ramberg Osgood obtidos para cada temperatura analisada.

Temperaturas analisadas	H (Mpa)	n
Temperatura ambiente	743,83	0,058
Temperatura de 350° C	760,32	0,062
Temperatura de 550 °C	881,04	0,138
Temperatura de 650 °C	294,44	0,040
Temperatura de 750 °C	358,09	0,234

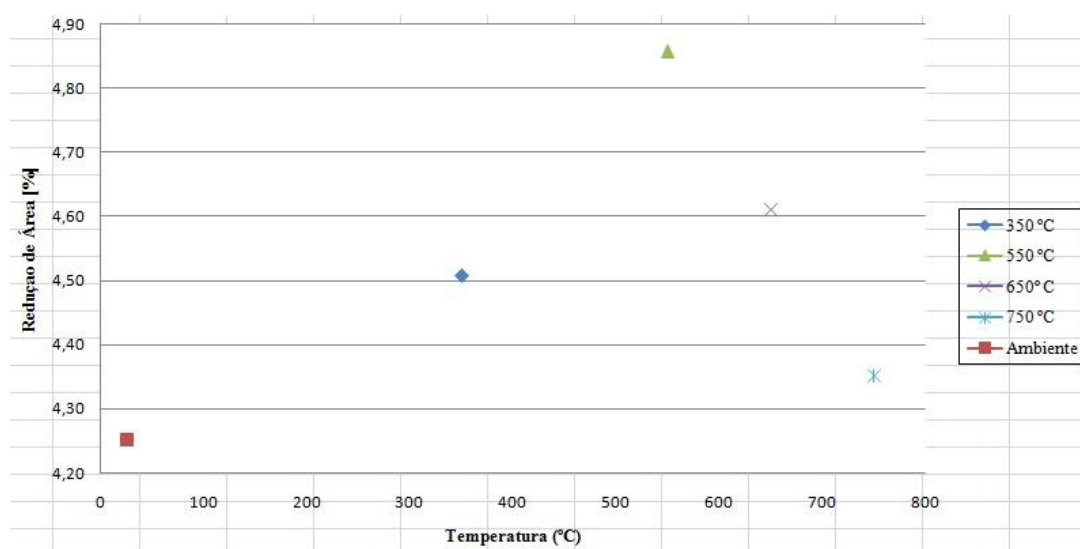


Figura 6. Redução de área conforme variação da temperatura.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS:

Os valores obtidos para os comportamentos das variações de tensão e redução de área em relação à variação da temperatura são corroborados por resultados alcançados por outros autores, como por exemplo, (Chiaramonti *et al.*, 2014) conforme demonstrado pelas Fig. 7 e Fig. 8 respectivamente. A referência citada demonstra que, utilizando-se do método da tensão que produz uma pequena deformação permanente de 0,2%, valores próximos ao deste presente trabalho foram encontrados para o limite de escoamento do material. A tensão última *U.T.* associada à ruptura do material durante o ensaio não foi alvo do presente estudo.

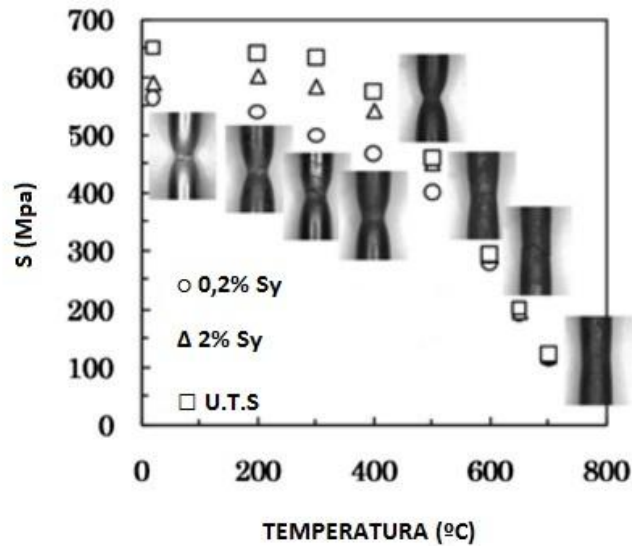


Figura 7. Variação da tensão conforme variação da temperatura.

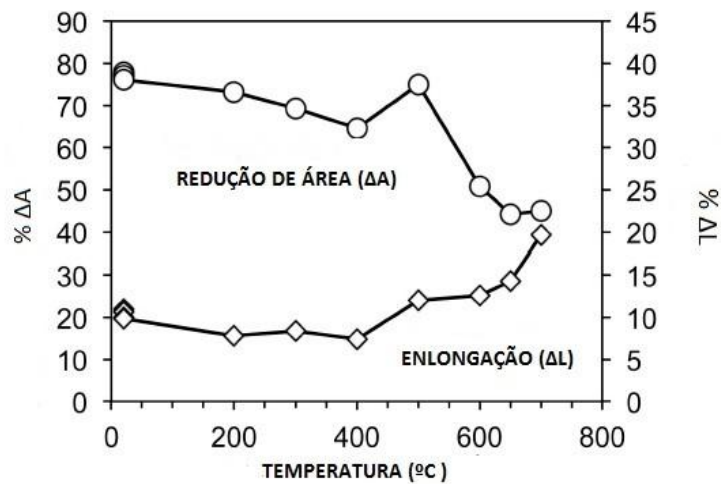


Figura 8. Redução de área conforme variação da temperatura.

Como esperado, o limite de escoamento e o módulo de elasticidade decresceram conforme o aumento da temperatura. As variações foram pequenas no intervalo entre a temperatura ambiente e a temperatura de 350 °C, isto revela que dentro desta faixa o material não sofre significativa sensibilidade ao aumento de temperatura. As variações importantes das propriedades, como demonstrado por (Chiaramonti *et al.*, 2014), ocorrem a partir da temperatura de 550 °C. Nota-se também que a partir desta faixa de temperatura o material passa por um processo de fragilização, alterando-se o seu comportamento de redução de área. Os resultados obtidos pelo ajuste das curvas por Ramberg Osgood foram coerentes com a teoria com a observação que para as temperaturas de 550 °C e 750 °C, os valores ultrapassaram um pouco o esperado. A Tab.5 fornece a variação percentual das propriedades do limite de escoamento e módulo de elasticidade em relação aos resultados alcançados em temperatura ambiente.

Tabela 5. Variação percentual das propriedades em relação aos resultados alcançados em temperatura ambiente:

Temperaturas analisadas	ΔE (%)	ΔS_y (%)
Temperatura ambiente	0	0
Temperatura de 350° C	0,24	5
Temperatura de 550 °C	19,73	34
Temperatura de 650 °C	70,65	58,62
Temperatura de 750 °C	84,31	80

4. CONCLUSÃO:

Pôde-se perceber que o material em estudo é de fundamental importância, sobre tudo na área de petróleo e gás, sendo utilizado em dutos de transporte. Com o presente trabalho foi possível avaliar a propriedades de tração do aço de alta resistência e baixa liga API X80 e chegar às principais conclusões a seguir:

- (a) Aços de alta resistência e baixa liga possuem um campo vasto de utilização pelos benefícios de suas propriedades mecânicas
- (b) A utilização em condições submetidas a altas temperaturas influencia suas propriedades.
- (c) O limite de escoamento e o módulo de elasticidade do material decrescem com o aumento da temperatura, não tendo uma expressiva variação, porém, até alcançar a temperatura de 550° C.
- (d) O comportamento da redução de área é afetado a partir da temperatura de 550 °C mostrando um efeito de fragilização do material a partir deste momento.
- (e) A partir da temperatura de 650 °C a variação das propriedades alcança um valor bastante alto, sendo, portanto, uma temperatura de grande referência no estudo.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos responsáveis pelos laboratórios da Universidade Federal Fluminense pela atenção e disponibilidade, especialmente ao técnico Célio. Ao meu orientador pelos conselhos valiosos e aos amigos pelo companheirismo durante a esta caminhada.

6. REFERÊNCIAS

- Alves, E., P., Evaluation of the fracture toughness of the heat affected zone (HAZ) of API 5L X80 steel welded by SMAW and FCAW processes. 2011. Thesis submitted to the polytechnic school of the University of São Paulo for obtaining a doctorate in engineering title, São Paulo, Brazil.
- Chiaromonti, N.A., et al, Understanding the high-temperature mechanical properties of A-710 (80-HSLA) steel with use of complementary atom probe tomography and electron microscopy. 2014. Microscopy Microanal 20 (Suppl 3), USA.
- D'Oliveira, M., C., S., A., Mechanical Properties. In: TM229 - Introduction to Materials, Lamats, Federal University of Paraná, Paraná, Brazil. 2009.
- Dowling, E. N., Engineering Methods for deformation, fracture, and Fatigue. In: Mechanical Behaviour of Materials, Third Edition, 2007.
- Lira, H., Simulation of the heat affected zone cooling curve of API 5L X80 steel welded by cored wire self-protected process. 2012. Dissertation presented to the Federal University of Pernambuco to obtain the title of master of engineering, Recife, Brazil.
- Meireles, M. A., Evaluation of bending parameters for induction of API 5L X80 grade pipes. 2009. Dissertation presented at the Master's degree in materials science from the Military Institute of Engineering to obtain the title of master of engineering, Rio de Janeiro, Brazil.
- Rocha, B., D., API pipe weldability Study 5L X80 using the welding processes: MAG controlled and tubular electrode transfer. 2010. Dissertation presented at Polytechnic School of the University of São Paulo to obtain the title of master of engineering, São Paulo, Brazil.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON PROPERTIES RELATED TO TENSILE TEST OF HIGH STRENGTH AND LOW ALLOY STEEL HSLA 5L X80

Bruno Gomes Tavares, bgt1982@hotmail.com¹

Filipe José Pereira Prince Nascimento, filipeprince@globo.com¹

Fernando Antônio de Aguiar e Silva, fernandoaas@uol.com.br¹

¹Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda - Universidade Federal Fluminense, Avenida dos trabalhadores 420 – Vila Santa Cecília, ZIP code: 27255125, Volta Redonda, Rio de Janeiro – Brazil.

Abstract: *The present work shows the results of an experimental study of the influence of temperature on the mechanical properties obtained on the tensile test of high strength and low alloy steel HSLA 5L - X80. This steel is used in various high temperature applications, including thermal welding cycles. As expected, the results showed a drop in yield strength and elastic modulus of the material. The experimental values are in agreement with the results obtained by other authors, which confirms the quality of the measurements. The data were well adjusted by the Ramberg Osgood model at different temperatures studied. For this adjustment were obtained actual stress-strain curves. A comparison of the behavior of same in relation to the engineering curve was also performed. Because the tests are carried out in small deformations, it was realized that the engineering curves and true approach. The low temperature of 550 ° C studied the variations in properties become significant. It was noted a steel embrittlement effect from the same temperature. The tests were conducted with a maximum deformation of 5 % , not reaching the breaking of the material.*

Keywords: *Tensile test , High Temperature , Small Deformation , HSLA 5L X80 , mechanical properties.*