

Tema: Metalurgia física e comportamento de materiais em temperaturas elevadas

DETERMINAÇÃO QUANTITATIVA DA RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO ABNT 5160 COM O TEMPO DE RECOZIMENTO À TEMPERATURA CONSTANTE*

Patricia Silva Madeira¹

Viviane Silva Gomide²

Ewerton Augusto de Sousa Nogueira³

Ubirajara Domingos de Castro⁴

Welerson Romaniello de Freitas⁵

Resumo

Os aços molas ou mais especificamente os aços para a fabricação de molas (ASTM 5160) são basicamente aços com teores de carbono entre – 0,5% e 1,2%. O segredo do sucesso dos aços está relacionado a sua versatilidade, isto é da capacidade de se alcançar um conjunto específico de propriedade, dentro de um espectro muito amplo de possibilidades. Neste trabalho foram determinadas de maneira quantitativa as relações entre as propriedades elásticas com o tempo de recozimento variado e temperatura constante. A temperatura utilizada foi de 850°C, com tempos crescentes de 40 a 110 min. Para determinação das propriedades, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração. A partir dos resultados observou-se uma redução do limite de escoamento e do módulo de resiliência do material. Decorridos 70 minutos de recozimento, essas propriedades mantiveram-se constantes. É apresentado ainda uma relação entre as propriedades de construção das molas com as propriedades do material utilizado em sua fabricação.

Palavras-chave: Recozimento; ABNT 5160; Tração; Módulo de elasticidade.

QUANTITATIVE DETERMINATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MODULUS OF ELASTICITY OF A STEEL ABNT 5160 WITH A TIME OF ANNEALING TEMPERATURE CONSTANT

Abstract

The spring steels or steels specifically for the manufacture of springs (ASTM 5160) are primarily steels with carbon contents between - 0.5% and 1.2%. The secret of success of steels is related to its versatility, the ability to achieve a specific set of property within a very broad spectrum of possibilities. In this work were determined quantitatively the relationships between the elastic properties varied with time and constant temperature annealing. The temperature employed was 850°C, with increasing time from 40 to 110 min. To determine the properties, the specimens were subjected to tensile tests. From the results we observed a reduction in the yield strength and Resilient Modulus of the material. After 70 minutes of annealing, these properties remained constant. Still a relationship between the properties of the construction of the spring with the properties of the material used in its manufacture is presented.

Keywords: Annealing; ABNT 5160; Tensile; Modulus of elasticity.

¹ Engenharia Mecânica com Ênfase em Mecatrônica, Graduação, Estudante, Instituto Politécnico, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas), Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Doutora, Professora, Instituto de Ciências Exatas, PUC-Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Mestre, Professor, Instituto Politécnico, PUC-Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Mestre, Professor, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Itaúna, Itaúna, MG, Brasil.

⁵ Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Mestre, Professor, Instituto de Ciências Exatas, PUC-Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Na ciência dos materiais há possibilidade de correlacionar as propriedades mecânicas com a microestrutura do material e com a estrutura cristalina. Especificamente nos aços cujas modificações microestruturais são obtidas por tratamentos mecânicos (como por exemplo, encruamento) e térmicos (como, têmpera, revenimento, recozimento dentre outros). Isto ocorre, pois a microestrutura é caracterizada pelo número de fases presentes, por suas porções e pela maneira pela qual elas estão distribuídas ou arrançadas. As propriedades físicas e, em particular, o comportamento mecânico de um material, dependem da microestrutura, como relata Zepter [1].

Para Martins [2], as propriedades mecânicas das molas dependem do módulo de resiliência e do módulo de elasticidade dos materiais utilizados em sua fabricação. Ao modificar estas propriedades, alteram-se suas propriedades mecânicas, possibilitando a utilização do aço na fabricação de molas para diferentes aplicações. Sendo assim, determinou-se quantitativamente as relações entre o módulo de resiliência e do limite de elasticidade do aço mola ABNT 5160 com o tempo de recozimento variado mantendo-se a temperatura fixa em 850°C. Para obtenção dos valores das propriedades, após o recozimento foram realizadas análises do comportamento mecânico do material.

1.1 Revisão Bibliográfica

Segundo Scheer [3], a aplicabilidade do aço 5160 se dá devido a alta temperabilidade e boa ductilidade do material na condição de beneficiado. As aplicações são determinadas pelo comportamento mecânico dos materiais.

Para Melconian [4] as molas são elementos de máquinas, que caracterizam-se por apresentar grandes deformações sem que o material ultrapasse o limite elástico. Isto acontece, pois o material possui uma configuração atômica que lhe dá a capacidade de sofrer deslocamento momentâneo ao receber uma força.

As propriedades mecânicas da mola dependem diretamente das propriedades mecânicas do material. Sendo assim, ao modificar a microestrutura por meio de tratamento térmico, modificam as propriedades mecânicas dos materiais e, por conseguinte da mola. A especificação do material é determinada a partir de suas propriedades mecânicas. Estas por sua vez são avaliadas, por exemplo, a partir do ensaio de tração.

As deformações elásticas e plásticas dos aços são respostas às tensões impostas aos mesmos. Segundo Gladman [5] para o estudo do aço mola é importante a compreensão da relação entre a tensão aplicada (σ) e a deformação elástica (Δl) resultante.

1.1.1 Propriedades mecânicas para construção de molas

Como relata Moura [6], as propriedades mecânicas de um material representam sua identidade, e determinam suas aplicações. Sendo assim, é possível determinar seu comportamento perante a fadiga, o desgaste, entre outras. Algumas propriedades relevantes no estudo de aços são o módulo de elasticidade (E), módulo de resiliência (U_R), limite de elasticidade (σ_E), limite de resistência (σ_{re}) e etc.

Estas propriedades são obtidas a partir da realização do ensaio de tração. Para o presente trabalho foram estudados o Módulo de Elasticidade, Módulo de Resiliência e o Limite de Elasticidade que são propriedades associadas ao comportamento elástico dos materiais.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Segundo Callister [7], o módulo de elasticidade representa a rigidez elástica do material e está relacionada com a força de ligação dos átomos. Trata-se da correlação entre a tensão aplicada e a deformação elástica experimentada pelo material. No regime elástico, é determinada pelo módulo de elasticidade ou módulo de Young (E).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade

ε : Deformação

σ : Tensão aplicada

Para Callister [7] o módulo de resiliência é a capacidade do material absorver energia quando deformado elasticamente. Em termos numéricos, o módulo de resiliência é a área sob a curva tensão-deformação até o escoamento. Dessa forma, os materiais resilientes são aqueles que possuem limites de escoamento elevado e módulo de elasticidade pequeno, conforme mostra a equação 2.

$$U_r = \frac{\sigma_E^2}{2E} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

U_r : Módulo de resiliência

σ_E : Limite de Elasticidade

E : Módulo de Elasticidade do Material

1.1.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste em submeter amostras do material a esforços uniaxiais e coletar informações da força aplicada (F) e do alongamento (Δl) experimentado pela amostra, como relata Callister [7].

As dimensões dos corpos de prova e os procedimentos para a realização deste ensaio são estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 6892-1 2013 [8].

As informações coletadas de tensão aplicada (σ) e deformação correspondente (ε) são plotados em uma curva de Tensão (σ) x Deformação (ε).

No presente trabalho os ensaios de tração foram realizados sem a ruptura dos corpos de prova.

1.1.3 Reozimento

Para Nogueira [9] o reozimento é um tratamento térmico que tem por finalidade o alívio das tensões ocasionadas por algum processo metalúrgico ou mecânico. Este alívio ocorre devido a variação intergranular dos materiais. Obtendo como resultado a alteração das propriedades mecânicas, remoção das tensões residuais, ajuste no tamanho de grão e eliminação das transformações sofridas por qualquer tipo de tratamento térmico anterior.

1.1.4 Propriedades de construção das molas e Propriedades dos materiais.

Apresentam-se a seguir breves considerações relacionando as propriedades mecânicas de uma mola com as propriedades dos materiais utilizados em sua construção

A constante elástica da mola (K) determina sua rigidez e está relacionada com a força aplicada e a deformação elástica correspondente através da Lei de Hooke, mostrada na Equação 3.

$$F = K * \Delta l_1 \quad \text{Equação 3}$$

Nesta equação tem-se:

F : força aplicada

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



K : constante elástica da mola

Δl_1 : deformação da mola

Outro parâmetro de projeto da mola é a tensão de cisalhamento ($\tau_{m\acute{a}x}$), mostrada na Equação 4

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{8 \cdot F \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:

$\tau_{m\acute{a}x}$: Tensão de cisalhamento máximo

D : Diâmetro da mola

d : Diâmetro do fio que será utilizado para confecção da mola

F : Força aplicada sobre a mola

Correlacionando estas propriedades com o módulo de elasticidade (E) e com o módulo de resiliência obtém-se:

$$K = \frac{E \cdot F_1}{l_0 \cdot \sigma} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

K: Constante elástica da mola

F_1 : Força aplicada sobre a mola

l_0 : Comprimento inicial do fio

σ : Tensão aplicada

Partindo da equação 4, obtém-se a relação da tensão de cisalhamento máximo com o módulo de elasticidade do material, expressa pela equação 6.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{8 \cdot F_1 \cdot D}{\pi \cdot E \cdot \varepsilon} \quad \text{Equação 6}$$

Em resumo, as equações 5 e 6 mostram a dependência das propriedades de uma mola com as propriedades elásticas do material. Mais especificamente a equação 7 mostra a dependência da constante elástica da mola (K) com o módulo de resiliência (U_r) do material..

$$K = \frac{A \cdot \sigma_E^2}{2 \cdot U_r \cdot l_0} \quad \text{Equação 7}$$

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente estudo utilizou-se o aço ABNT 5160, fornecido pela empresa Açocon Indústria e Comércio Ltda. A composição é apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Tabela da constituição do aço ABNT 5160 [10]

| Elemento | Porcentagem (%) |
|-------------------|-----------------|
| C | 0,56 – 0,64 |
| Mn | 0,75 – 1,00 |
| $P_{m\acute{a}x}$ | 3,0 |
| $S_{m\acute{a}x}$ | 4,0 |
| Si | 0,15 – 0,35 |
| Cr | 0,70 – 0,90 |

Os corpos de prova (CP) para ensaio de tração foram usinados segundo a norma ABNT NBR ISO 6892-1 2013. As dimensões foram 260 mm para o comprimento total, comprimento útil de 100 mm e 12 mm de diâmetro nominal. Inicialmente foi realizado um ensaio para caracterização do material como recebido. Os ensaios foram realizados em uma máquina Emic, modelo DL 20000 n° 11441, NS 094, calibrada conforme a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025, certificado de calibração n° 586/13. Os

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



demais corpos de prova seguiram para recozimento em fornos tipo MUFLA. Para se realizar o tratamento térmico utilizou-se um estojo de Ferro Fundido (FOFO) com diâmetro externo de 30mm e um tempo de encharque de 30 minutos.

Após o recozimento os CPs foram submetidos a ensaios de tração obtendo-se, aproximadamente 400 valores de força e alongamento. De posse destes valores foram construídas curvas de Força (F) x Alongamento (Δl), para se avaliar as relações existentes entre estas duas grandezas. Estas curvas foram geradas com o auxílio do software ORIGIN 6.0 e foram utilizadas nos cálculos dos valores do módulo de elasticidade e do módulo de resiliência. Todas as curvas apresentaram o aspecto ilustrado na figura 1.

Para se equacionar a região linear da curva, foi considerado, uma força de 60% do valor da força correspondente ao início das deformações plásticas. Para os valores iniciais foram considerados valores de força de pelo menos duas vezes o valor da força inicial devido à inércia da máquina. Desta forma após a determinação dos valores máximos e mínimos das forças obteve a faixa dos valores lineares.

Mesmo após a determinação desta faixa o numero de valores para Força (F) x Alongamento (Δl) mostrou-se consideravelmente alto, sendo assim, foram selecionados valores espaçados 15 em 15 pontos.

Após a determinação da faixa de valores, os mesmos foram inseridos no software a fim de se plotar as curvas. Após obtenção da parte linear, foi feita uma análise para a determinação da inclinação da curva Força (F) x alongamento (Δl), que representa a constante elástica (K) do corpo de prova. Este valor de inclinação da reta foi utilizado para cálculo do módulo de elasticidade. A constante elástica do CP e o módulo de elasticidade do material estão correlacionadas conforme a equação 8.

$$E = \frac{K \cdot l_0}{A_0} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

E: Módulo de elasticidade do material

K: Constante elástica do material

l_0 : é o comprimento inicial do fio

A_0 : Área da seção útil do corpo de prova

Com o valor do módulo de elasticidade foi possível calcular o módulo de resiliência. A partir da equação 5:

$$U_r = \frac{\sigma_e^2}{2 \cdot E} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

U_r : Módulo de resiliência do material

σ_e : Limite de elasticidade

E: Módulo de elasticidade

De posse dos valores do módulo de resiliência e do módulo de elasticidade foi possível efetuar a análise da variação destas propriedades com o tempo de recozimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As propriedades elásticas do aço ABNT 5160 submetido aos diversos tempos de recozimento foram determinadas a partir de ensaios de tração, onde foram obtidos mais de 400 pares da força (F) aplicada e do alongamento correspondente (Δl). Os limites de escoamento (σ_E) foram determinados para deformações $\varepsilon = 0,2\%$.

A partir destes dados foram construídas curvas de F x Δl , utilizando software ORIGIN 6.0. Todas elas exibiram o aspecto como ilustrado na figura 1.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

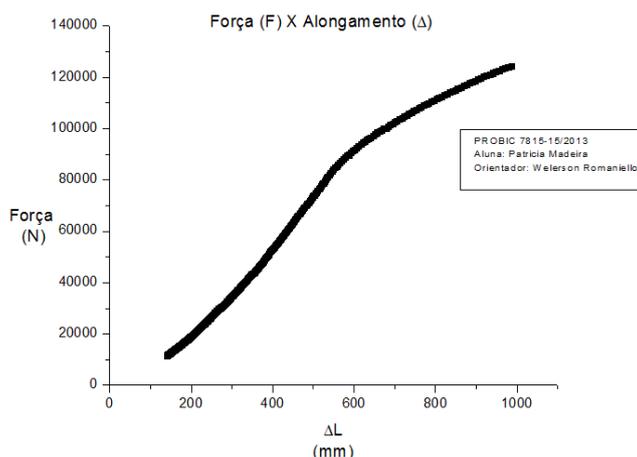


Figura 1. Curva Força x Alongamento

Nesta curva percebem-se basicamente três regiões:

Inicialmente uma região não linear que corresponde à acomodação das garras da máquina.

Uma segunda região, linear que corresponde às deformações elásticas experimentadas pelos corpos de provas.

Finalmente uma região não linear que corresponde à não proporcionalidade entre F e Δl , E e ao início das deformações plásticas.

Os valores do limite de escoamento – σ_E , do módulo de elasticidade – E e do módulo de resiliência - U_R em função do tempo de recozimento estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Tabela que representativa dos valores de variação das propriedades mecânicas com o tempo de recozimento

| Tempo de recozimento a 850°C (min) | σ_E (MPa) | E (GPa) | U_R (GPa) |
|------------------------------------|------------------|-----------|-------------|
| 0 | 831 | 153 | 2,3 |
| 40 | 603 | 132 | 1,4 |
| 50 | 535 | 132 | 1,1 |
| 60 | 418 | 132 | 0,8 |
| 70 | 395 | 132 | 0,6 |
| 80 | 395 | 132 | 0,6 |
| 90 | 395 | 132 | 0,6 |
| 100 | 395 | 131 | 0,6 |
| 110 | 395 | 131 | 0,6 |

Os valores do limite de escoamento σ_E foram determinados a partir a partir da deformação $\varepsilon = 0,2\%$. Os valores do módulo de elasticidade (E) foram determinados a partir da inclinação da parte linear das curvas que representam as constantes elásticas K dos corpos de prova.

Os valores para o módulo de elasticidade e para o módulo de resiliência foram determinados a partir das equações 8 e 9 respectivamente.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

3.1 Relações Quantitativas entre as Propriedades Elásticas com o Tempo de Recozimento

Observou-se então que o módulo de resiliência (U_r) decresce linearmente até o tempo de recozimento de 70 minutos e a partir daí torna-se constante. O mesmo comportamento foi observado para o limite de escoamento de σ_E . Estas observações estão ilustradas nas curvas representadas nas figuras 2, 3, 4, e 5.

No que se refere ao módulo de elasticidade, ele praticamente não variou com o tempo de recozimento conforme, pode ser observado nos valores constantes da tabela 2.

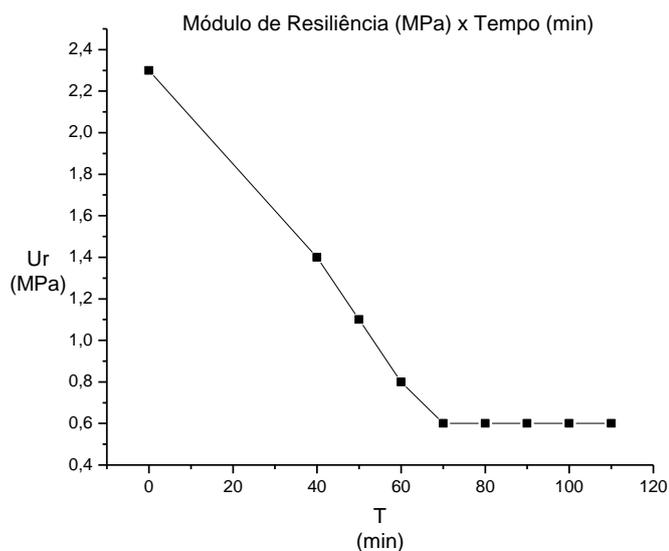


Figura 2. Variação de U_r com o Tempo de Recozimento.

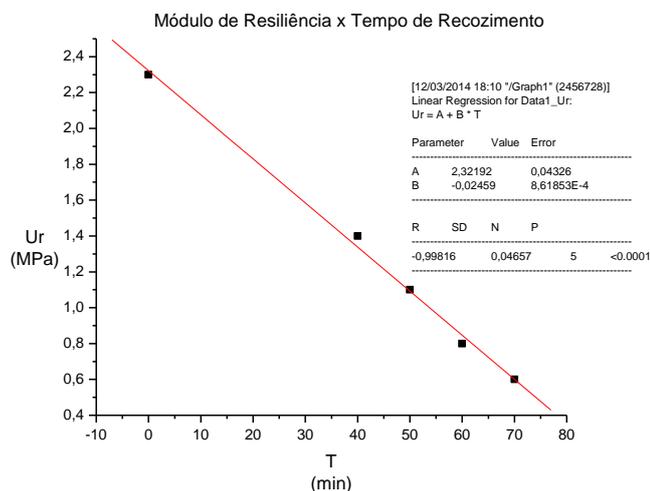


Figura 3. Relação quantitativa de U_r e Tempo de Recozimento.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

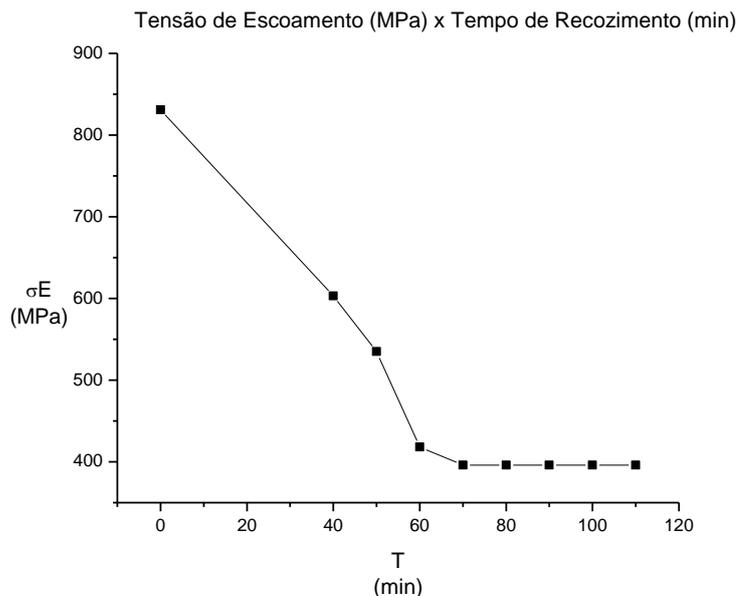


Figura 4. Relação qualitativa de σ_E com o tempo de Recozimento.

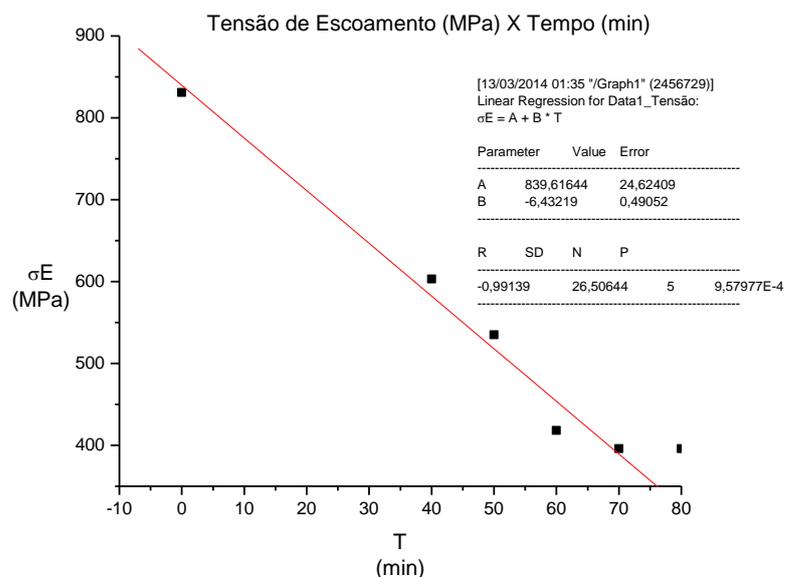


Figura 5. Relação quantitativa de σ_E com o Tempo de Recozimento.

4 CONCLUSÃO

Foram determinadas relações quantitativas entre o limite de escoamento σ_E e do módulo de resiliência U_R do aço ABNT 5160 com os tempos de recozimento de até 70 min minutos à temperatura de 850°C. Para tempos de superiores a 70 minutos estas grandezas permaneceram constantes. O módulo de elasticidade do aço ABNT 5160 praticamente não sofreu alterações com o recozimento. Tanto o limite de escoamento quanto o módulo de resiliência do aço ABNT 5160 decresceram linearmente na faixa de tempo especificada

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Agradecimentos

À FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo apoio financeiro. PROBIC PUC Minas nº 7015-15/2013. À Universidade de Itaúna pela cooperação na execução dos ensaios mecânicos. À Açocon – Indústria e Comércio LTDA, na pessoa do senhor Voltaire Quadros pelo fornecimento do material. À PUC Minas pelo acesso ao Programa institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PROBIC.

REFERÊNCIAS

- 1 Zepter PG. Influência da microestrutura nas propriedades mecânicas do aço ABNT 5160 em condições de carregamento monotônico cíclico. [dissertação de mestrado]. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo; 2007.
- 2 Martins MS. Fadiga do aço para molas de válvula SAE 9208 produzido industrialmente por lingotamento convencional e contínuo. Guaratinguetá; 2010.
- 3 Scheer L. Aço - Introdução à sua Metalurgia, ao alcance de todos. 2ª ed. São Paulo: Aços Villares S.A.; 1966.
- 4 Melconian S. Elementos de máquinas: engrenagens, correias, rolamentos, chavetas, molas, cabos de aço, árvores. 9. ed. rev. São Paulo: Erica; 2009.
- 5 Gladman T. The physical metallurgy of microalloyed steels. Londres: Ash gate Publishing; 1997.
- 6 Moura CFA. Development of a wear test for the evaluation of cemented carbides used in rotary drilling applications. FEUP – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. Porto, Portugal. 2008. 92p
- 7 Callister WD. Ciência e Engenharia dos Materiais. 8ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC; 2013.
- 8 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Materiais metálicos: ABNT NBR ISO6892-1: Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro; 2013. p.35.
- 9 Nogueira JSSA. Recozimento de homogeneização da liga 6063 na empresa SAPA II Perfis. Porto: Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto; 2013.
- 10 Plentz RS. Otimização do processo de resfriamento do aço mola SAE 9254 durante a laminação [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2009.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.