



II Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica
II EnICT
ISSN: 2526-6772
IFSP – Câmpus Araraquara
26 e 27 de Outubro de 2017



ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS PARA O AÇO SAE 1045 TEMPERADO COM E SEM REVENIMENTO

TAYNÁ BERTACINE DE ALMEIDA¹

SÍLVIO APARECIDO VERDÉRIO JÚNIOR²

¹ Graduanda em Mecatrônica Industrial, IFSP Campus Araraquara, taynautentic@hotmail.com

¹ Mestre em Engenharia Mecânica, Docente, IFSP Campus Araraquara, silvioverderio@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): Processos de Fabricação – 3.05.05.00-3

RESUMO: O ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga crescente no centro de um corpo-de-prova específico até a ruptura. É um ensaio destrutivo e muito utilizado na indústria de cerâmicos e metais duros, pois fornece dados quantitativos da deformação desses materiais, quando sujeitos a cargas de flexão. O presente trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos dos tratamentos térmicos de têmpera com ou sem revenimento nas propriedades mecânicas do Aço SAE 1045 quando submetido ao Ensaio de Flexão em 3 Pontos; avaliando as principais propriedades, parâmetros e a resposta do material quanto a esse tipo de sollicitação. Também confrontar os resultados experimentais obtidos com modelos analíticos consolidados, avaliando suas eventuais limitações. Das curvas obtidas e modelos utilizados, calcularam-se as tensões limite de proporcionalidade, limite de flexão, módulo de elasticidade e a influência da têmpera com ou sem revenimento foi claramente avaliada. A expressão analítica para o cálculo do módulo de elasticidade mostrou-se bastante limitada e com alto erro quando aplicada a materiais mais dúcteis, em regime de maiores deformações.

PALAVRAS-CHAVE: Aço SAE 1045; Ensaio de Flexão; Têmpera e Revenimento.

INTRODUÇÃO

De acordo com Garcia (2000), o ensaio de flexão é amplamente aplicado em materiais frágeis ou de elevada dureza como, por exemplo, o ferro fundido, o aço ferramenta, os aços rápidos e os cerâmicos estruturais. Pois, devido à baixa ductilidade, tais materiais dificultam ou não permitem a utilização de outros tipos de ensaios mecânicos.

Existem dois tipos principais desse ensaio, o ensaio de flexão em três pontos e o ensaio de flexão em quatro pontos. Tal qual Garcia (2000), no ensaio de flexão em três pontos utiliza-se uma barra biapoiada com aplicação de carga no centro da distância entre os pontos de apoio. Já o ensaio de flexão em quatro pontos consiste em uma barra biapoiada com aplicação de carga em dois pontos equidistantes dos apoios, sendo assim, existe quatro pontos de carga.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos dos tratamentos térmicos de têmpera com ou sem revenimento nas propriedades do Aço SAE 1045 quando submetido ao Ensaio de Flexão em 3 Pontos; avaliar as principais propriedades, parâmetros e a resposta do material quanto a esse tipo de sollicitação através dos dados obtidos. Também, ao final, comparar os resultados experimentais com os modelos analíticos disponíveis em Souza (1982).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O ensaio de flexão tem como resultante uma área que sofre tração e outra que sofre compressão. Analisando a região do corpo-de-prova entre os pontos de apoio e o ponto em que está sendo aplicada a carga, observa-se que as fibras superiores à linha neutra são comprimidas e as fibras inferiores são tracionadas.

Segundo Souza (1982), o ensaio consiste em sustentar o corpo de prova sob dois apoios com uma distância L entre eles, sendo a carga de flexão aplicada no centro do corpo de prova e elevada lentamente até a fratura do corpo de prova. Assim, determina-se a tensão limite de flexão ou tensão de dobramento (σ_f).

A qualidade e precisão dos resultados obtidos no ensaio de flexão, conforme Garcia (2000), está submetida a diversos fatores, dentre eles tem-se a temperatura no qual o ensaio foi realizado, a velocidade de aplicação da carga, os defeitos superficiais do material, a precisão dos equipamentos utilizados, com a geometria da seção transversal da amostra e até mesmo as técnicas e procedimentos de manuseio do corpo de prova.

Conforme Souza (1982), Callister (2005) e Costa e Silva e Mei (2010) o módulo de elasticidade é função apenas do material e da temperatura; sendo aproximadamente constante e igual a 210 GPa para o Aço Carbono Comum, independentemente do seu percentual de carbono.

METODOLOGIA

Para a realização do ensaio de flexão utilizou-se uma Máquina de Ensaio Universais EMIC, modelo DL 10000, com sistema de aquisição de dados por meio do *software* Tesc versão 1.10 (presente em um computador acoplado à máquina) e dispositivos de fixação em três pontos e cutelo.

Foram utilizados 2 corpos de prova de Aço SAE 1045 trefilado, usinados nas dimensões iniciais de comprimento 200 mm e diâmetro transversal 8 mm.

Posteriormente na etapa de tratamentos térmicos, uma das amostras foi temperada e a outra temperada e revenida. Os procedimentos e o ciclo térmico dos tratamentos, conforme recomendações do Catálogo Técnico de Aços e Metais da GGD Metals e de Costa e Silva e Mei (2010), encontram-se explicitados na Tabela 1.

TABELA 1. Ciclo Térmico de Tempera e Revenimento para o Aço SAE 1045.

Têmpera	Revenimento
<ul style="list-style-type: none">- Aquecimento do forno em rampa de 10°C/min até a temperatura de 850°C;- Adicionar as peças no forno espaçadas entre si;- Manter o patamar de temperaturas em 850°C por 30 min;- Resfriar as peças em água.	<ul style="list-style-type: none">- Aquecimento do forno em rampa de 10°C/min até a temperatura de 350°C;- Adicionar as peças (assim que temperadas) no forno, que deverá já estar preparado ao final da Têmpera;- Manter o patamar de temperaturas em 350°C por 25 min;- Resfriar as peças em ar calmo.

De forma a se avaliar a eficiência dos tratamentos térmicos realizados procederam-se diversas medições de dureza dos corpos de prova no Durômetro de bancada Rockwell *Insize*, modelo ISH-NR150.

Para a realização do ensaio de flexão em três pontos os corpos de prova foram centro posicionadas, com uma distância entre apoios de 130 mm e a carga sendo progressivamente aplicada pelo cutelo até a ruptura, limite inferior máximo de deslocamento alcançado ou perda dos apoios laterais em casos de elevadas deformações, conforme programação do usuário.

Após a realização do ensaio, os dados coletados foram tratados, organizados e plotados com o auxílio do *software* Microsoft Excel 2010.

Das curvas carga x flecha e tensão de flexão x flecha obtidas, avaliou-se a tensão limite de flexão (σ_f), o módulo de elasticidade (E) e as características e respostas dos corpos de prova as solicitações de flexão impostas; conforme metodologias e equacionamentos propostos por SOUZA (1982).

A tensão limite de flexão (σ_f) pode ser obtida da curva tensão x flecha ou da equação (1) para seções circulares e representa a máxima tensão admitida pelo material antes do início da falha em flexão. O módulo de elasticidade (E) é obtido da equação para cálculo da flecha máxima obtida e foi calculado através da equação (2) para seções circulares. Todas, conforme proposições e hipóteses formuladas por SOUZA (1982) e CALLISTER (2006).

$$T = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} \quad \sigma_f = \frac{2,546 QL}{D^3} \quad (1)$$

$$T = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} \quad E = \frac{0,424 QL^3}{yD^4} \quad (2)$$

Nestas:

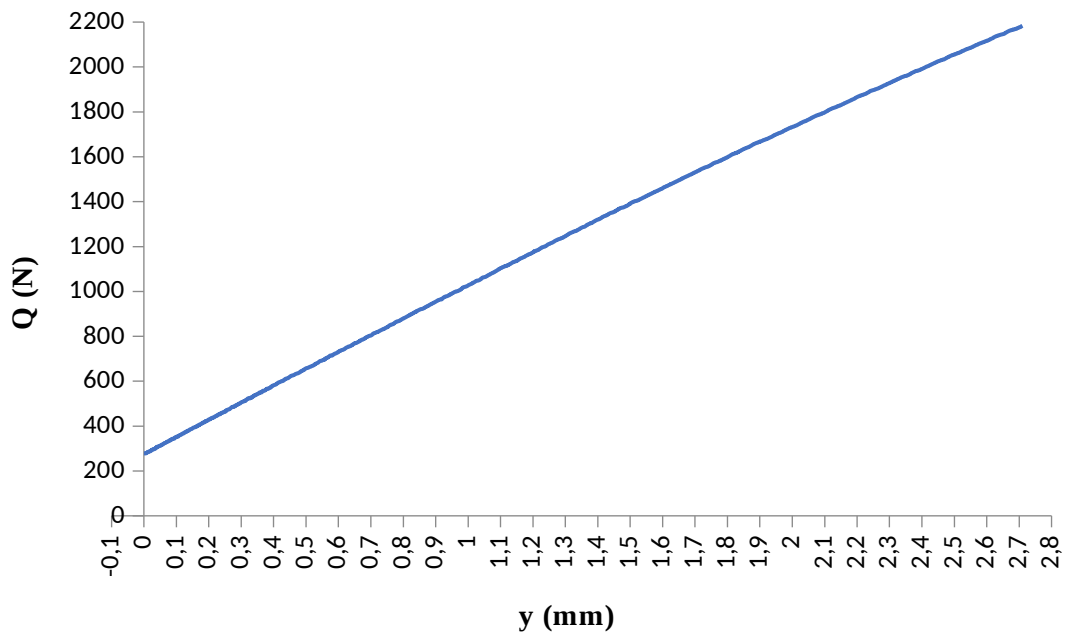
D – diâmetro inicial do corpo de prova, mm.
 E – módulo de elasticidade ou módulo de Young, MPa.
 L – distância entre apoios ou vão, mm.

Q – carga aplicada, N.
 y – flecha, mm.
 σ_f – tensão limite de flexão ou tensão de dobramento, MPa.

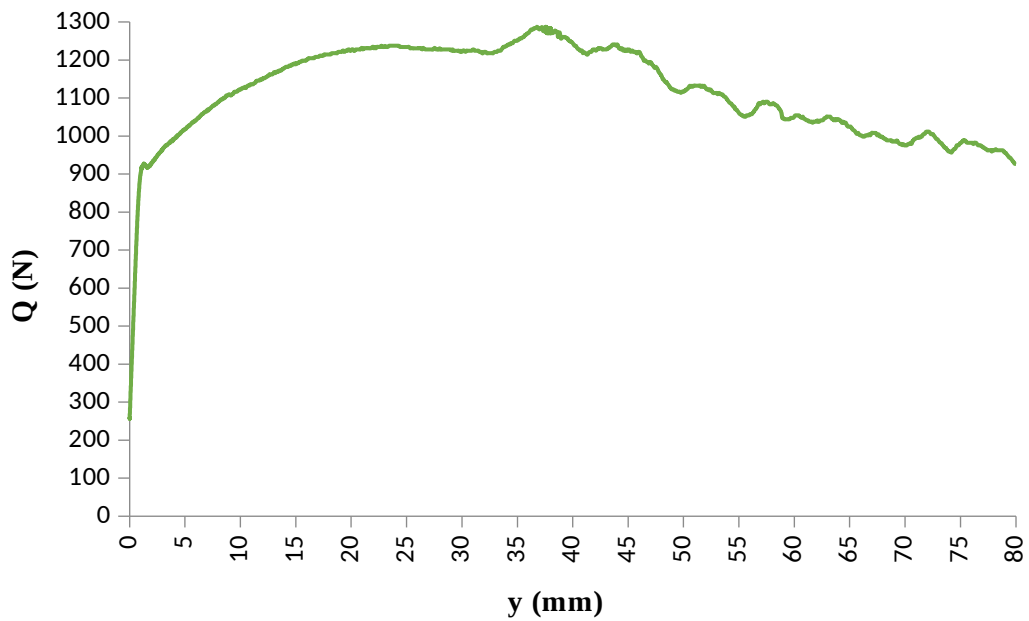
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após diversas medições de dureza, com as devidas correções realizadas pela circularidade da seção transversal dos corpos de prova e tirando-se a média simples dos resultados, obtêm-se uma dureza de 75,5 HRC para o corpo de prova temperado e 38 HRC para o corpo de prova revenido. Dessa forma, espera-se um comportamento mais dúctil, menos resistente e com elevada flecha do corpo de prova temperado e revenido.

As curvas carga x flecha estão disponíveis na Figura 1, (a) e (b) e as curvas tensão de flexão x flecha na Figura 2, (a) e (b).

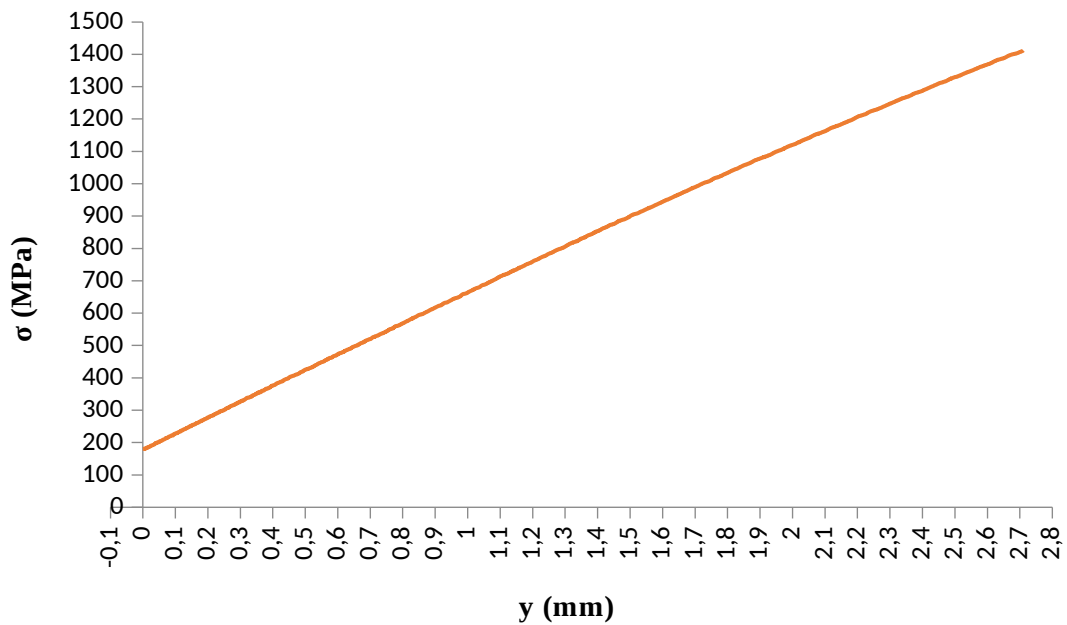


(a)

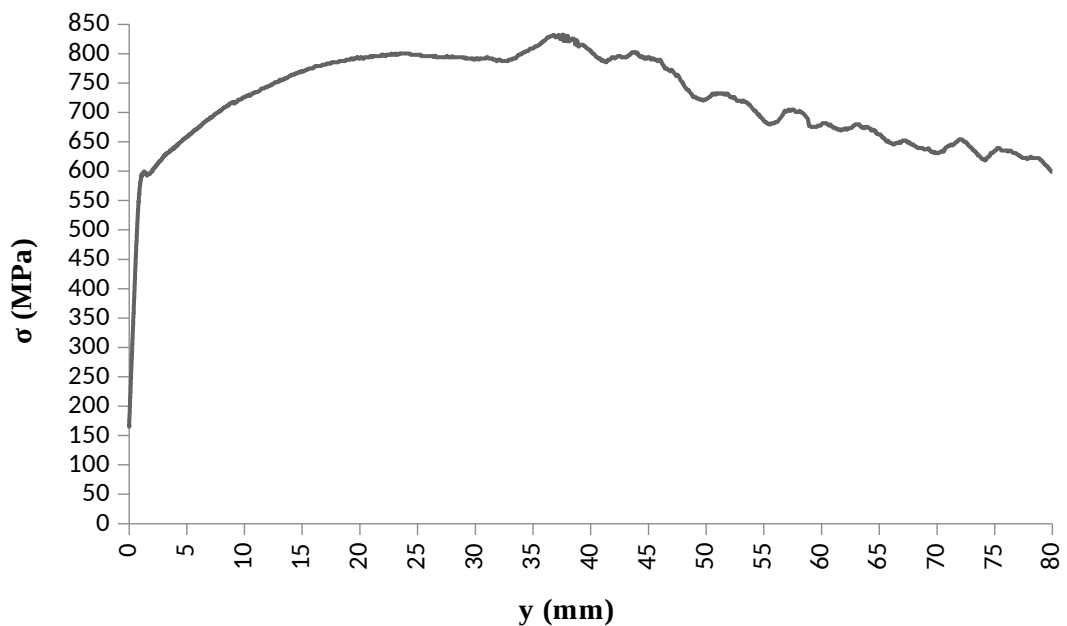


(b)

FIGURA 1. Curva Carga x Flecha para o aço SAE 1045, (a) temperado e (b) temperado e revenido.



(a)



(b)

FIGURA 2. Curva Tensão de Flexão x Flecha para o aço SAE 1045, (a) temperado e (b) temperado e revenido.

Da Figura 1 (a) tem-se que o Aço SAE 1045 Temperado rompeu-se com uma carga máxima da ordem de 2200 N, apresentando uma flecha máxima menor que 2,8 mm. Observa-se que a curva tem comportamento predominantemente linear-elástico, com um leve desvio ao final; o que indica que o material é tão frágil que se rompeu logo imediatamente após iniciar o regime de deformações plásticas. Tal comportamento já poderia ser aferido dos resultados de dureza obtidos.

A Figura 1 (b) mostra que o Aço SAE 1045 Temperado e Revenido entrou em processo de falha a partir de uma carga da ordem de 1250 N, apresentando uma flecha de aproximadamente 25 mm. Da curva observa-se que o regime linear-elástico termina com uma carga por volta de 900 N, prosseguindo em regime plástico até o corpo de prova perder contato com os apoios laterais, o que é mostrado pelas oscilações finais do gráfico que surgem por volta de 35 mm de flecha. Logo o comportamento observado é que o material deforma-se tanto, que antes de romper perde contato com os apoios laterais; caracterizando-se, assim, mais um Ensaio de Dobramento, do que de Flexão.

Através da Figura 2 obtêm-se as tensões limite de proporcionalidade (σ_p), limite de flexão (σ_f) e flecha máxima (y_{\max}) para as amostras em questão. Da equação (1), da flecha máxima obtida antes da ruptura ou falha, obtêm-se as tensões limites de proporcionalidade antes de modelo analítico. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 2. Tensões limite de proporcionalidade, limite de flexão (Experimental e Analítica) e flecha máxima obtidos da Figura 2 e da Equação (2).

MATERIAL	EXPERIMENTAL			ANALÍTICO
	σ_p (MPa)	σ_f (MPa)	y_{\max} (mm)	σ_f (MPa)
Aço SAE 1045 Temperado	1100	1400	2,7	1422,18
Aço SAE 1045 Temperado e Revenido	600	800	25	808,06

Da Tabela 2 observa-se uma perfeita concordância dos resultados experimentais e analíticos para a tensão limite de flexão, com um erro da ordem de 1,56% para o Aço SAE 1045 Temperado e de 1% para o Aço SAE 1045 Temperado e Revenido.

Ainda da Figura 2 e da flecha máxima do Gráfico 2, tem-se o cálculo do Módulo de Elasticidade (E). Da equação (2) obtêm-se $E=185,31\text{ GPa}$ para o Aço SAE 1045 Temperado e $E=11,37\text{ GPa}$ para o Aço SAE 1045 Temperado e Revenido. Nota-se que o material frágil apresenta maior precisão de resultados, com um erro da ordem de 11,76% em relação ao valores encontrados na literatura. De outra banda, o material mais dúctil apresenta um comportamento totalmente discordante das referências bibliográficas, exatamente 18,5 vezes menor que as referências da literatura.

Recalculando o Módulo de Elasticidade (E) para o Aço SAE 1045 Temperado e Revenido agora através da carga e flecha ao final da reta elástica, com um regime de pequenas deformações, obtêm-se $E=204,68\text{ GPa}$; valor bastante razoável e próximo dos dados da literatura, com um erro residual da ordem de 2,53%.

Do exposto conclui-se que as expressões para avaliação da flecha e do módulo de elasticidade, conforme equação (2), apresentam maior precisão no regime de pequenas deformações, onde os efeitos do encruamento ainda não são tão significativos. De outro lado a realização do ensaio com extensômetros reduziria os erros presentes no sistema de aquisição de dados ao considerar as folgas, movimento dos fusos, etc. e melhoraria a qualidade dos resultados alcançados.

CONCLUSÕES

A partir da metodologia aplicada e da análise dos resultados pode-se melhor compreender a influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento na dureza e nas propriedades mecânicas observadas, especialmente quanto a resistência mecânica e a capacidade de deformação em flexão.

Uma melhor compressão do fenômeno da flexão foi alcançada a partir das hipóteses simplificadoras, princípios físicos e equações da Resistência dos Materiais utilizadas na quantificação do ensaio.

Especialmente na aplicação em projetos mecânicos e na avaliação experimental da resposta do material a essa solicitação através dos ensaios de flexão e dobramento.

Das curvas obtidas para o ensaio de flexão em 3 pontos avaliou-se as cargas máximas aplicadas e a flecha até o processo de ruptura ou falha, tensões limite de proporcionalidade e limite de flexão e Módulo de Elasticidade para os Aços SAE 1045 Temperado com ou sem Revenimento. Os resultados analíticos e experimentais apresentaram excelente concordância em relação as tensões limite de flexão.

Em relação ao cálculo do módulo de elasticidade, concluiu-se a limitação da equação (2) de Souza (1982) ao regime de grandes deformações; sendo mais bem empregada em materiais frágeis, com região plástica bastante reduzida ou restringindo-se a análise unicamente a região elástica, no caso de materiais mais dúcteis. Concluiu-se também que a realização do ensaio com extensômetros melhoraria a precisão dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, W. D.; **Materials Science and Engineering - An Introduction**. John Wiley & Sons: New York, 2ª Ed, 2005.

CATÁLOGO TÉCNICO Aços e Metais – GGD *Metals*. Disponível em: <http://www.ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2016/01/Construcao-Mecanica.pdf>. Data de Acesso: 04/07/2017.

DA COSTA E SILVA, A. L. V. e MEI, P. R.; **Aços e Ligas Especiais**. Blucher: São Paulo, 3ª Ed, 2010.

GARCIA, A.; **Ensaio dos Materiais**. LTC: Rio de Janeiro, 1ª Edição, 2000.

SOUZA, S. A.; **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. Edgard Blucher: São Paulo, 5ª Edição, 1982.