



Exacta

ISSN: 1678-5428

exacta@uninove.br

Universidade Nove de Julho

Brasil

Andrade, Fernando Augusto; Al-Qureshi, Hazim Ali  
Modelamento para previsão de propriedades mecânicas no processo de trefilação  
aplicado a tubos de aço com costura  
Exacta, vol. 7, núm. 2, 2009, pp. 229-240  
Universidade Nove de Julho  
São Paulo, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81015222010>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# Modelamento para previsão de propriedades mecânicas no processo de trefilação aplicado a tubos de aço com costura

*Modelling for prediction of mechanical properties in cold drawing process applied to welded steel tubes*

Fernando Augusto Andrade

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PGMAT);  
CERMAT - Departamento de Engenharia Mecânica,  
Universidade Federal de Santa Catarina,  
Florianópolis – SC [Brasil]  
nandoandrade@gmail.com.

Hazim Ali Al-Qureshi

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica (EMC);  
LABMAT - Departamento de Engenharia Mecânica,  
Universidade Federal de Santa Catarina,  
Florianópolis – SC [Brasil]  
alhazim@emc.ufsc.br

Este trabalho promoveu um estudo das propriedades mecânicas de dois tipos de aço comumente usados para a fabricação de tubos de aço com costura que passam pelo processo de trefilação, o SAE 1012 e o ST-52.3. Os tubos foram tratados termicamente e posteriormente trefilados e as propriedades mecânicas foram avaliadas em cada etapa do processo. Na trefilação, foram realizadas reduções incrementais de 5%, a fim de investigar o comportamento de suas propriedades em função da deformação sofrida nas fieiras. Foi realizada uma estimativa da máxima redução permitida sem necessidade de recozimentos intermediários por dois modelos, propostos por Sachs e Baldwin, e outro por Backofen. As equações obtidas a partir dos resultados servirão como base para estimar as propriedades finais desejadas, dos materiais analisados, em função da redução, bem como permitirão selecionar entre os dois aços qual a redução necessária para que se atinja determinada propriedade.

**Palavras-chave:** Propriedades mecânicas. Tubos de aço com costura. Trefilação.

This work carried out a study of the mechanical properties of two common steels used for the manufacture of cold drawing welded steel tubes, SAE 1012 and ST-52.3. The tubes were submitted to chemical and thermal treatment and then were drawn. Properties such as hardness and tensile strength had been evaluated in each stage of the process. Incremental reductions of 5% were made in the tube in order to investigate the behavior of its properties. An estimation of the maximum reduction allowed without necessity of intermediate annealing for two models, considered for Sachs and Baldwin, and another one for Backofen were also discussed. Equations obtained from the curves will be the base to estimate the final properties desired for a specific reduction of the tube. They will also help in the selection of different steels, by making a relation between reduction and its properties.

**Key words:** Cold drawing. Mechanical properties. Welded steel tube.



## Lista de abreviaturas e siglas

A	Alongamento (m)
$A_f$	Área final (m <sup>2</sup> )
$A_o$	Área inicial (m <sup>2</sup> )
K	Coefficiente de resistência (Pa)
l	Comprimento (m)
$l_1$	Comprimento em qualquer ponto (instantâneo) (m)
$l_f$	Comprimento final (m)
$l_o$	Comprimento inicial (m)
n	Coefficiente de encruamento (adimensional)
r	Redução de área (%)
$r_{máx}$	Redução máxima de área (%)
$U_p$	Energia de deformação homogênea (J)
$U_T$	Energia total (J)
$\alpha$	Semi-ângulo de redução da fieira (°)
$\epsilon$	Deformação de engenharia (%)
$\bar{\epsilon}$	Deformação real ou verdadeira (%)
$\mu$	Coefficiente de atrito entre tubo e parede da fieira (adimensional)
$\eta$	Eficiência (%)
$\sigma$	Tensão de engenharia (Pa)
$\sigma_e$	Tensão limite de escoamento (Pa)
$\sigma_r$	Tensão limite de resistência (Pa)
$\sigma_{tref}$	Tensão de trefilação (Pa)
$\sigma_m$	Tensão de escoamento média (Pa)
$\bar{\sigma}$	Tensão real ou verdadeira (Pa)
$\bar{\sigma}_e$	Tensão limite de escoamento verdadeira (Pa)
$\bar{\sigma}_r$	Tensão limite de resistência verdadeira (Pa)

## 1 Introdução

Na prática industrial é necessário que se conheça, além das propriedades das matérias primas que servem de base para o processamento dos produtos, também as propriedades finais de produtos acabados. Ainda, durante a sua fabricação, é preciso monitorar e verificar constantemente a

qualidade dos produtos segundo normas internas ou especificações de clientes.

Na fabricação de produtos onde está envolvido grande número de etapas, frequentemente é necessário especificar limites restritos de desvio de propriedades em cada fase para que o processo seguinte possa ser eficientemente realizado. Uma das dificuldades que a indústria de conformação mecânica se depara com frequência é a especificação dos produtos em faixas cada vez mais restritas. Neste quesito, muitas vezes é necessário escolher entre vários tipos de materiais, o mais adequado a ser utilizado, em função das propriedades finais esperadas. Modelos teóricos que possam fazer uma estimativa destas propriedades são ferramentas muito úteis ao campo da engenharia, pois levam à redução do número de testes a serem realizados no desenvolvimento de novos produtos. Neste contexto, modelos que sejam conduzidos com as peculiaridades inerentes aos maquinários e condições de processamento próprias tendem a produzir resultados otimizados e mais confiáveis.

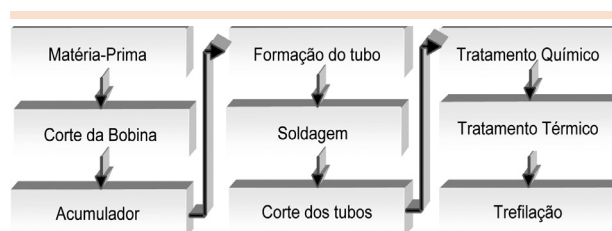
O presente trabalho é resultado de um estudo comparativo do comportamento das propriedades mecânicas de tubos de aço trefilados de dois aços muito usados neste campo. Para isso, aplicou-se um modelo matemático que relacionou a redução de área sofrida pelo tubo no processo de trefilação com as propriedades mecânicas resultantes desse trabalho a frio. Com os resultados, foi possível obter informações relevantes que podem guiar a seleção do tipo de aço e processo adequados aos mesmos, de acordo as propriedades mecânicas finais esperadas.

## 2 Revisão bibliográfica

Os primeiros tubos soldados começaram a ser fabricados no início do século XIX por um processo patenteado por James Whitehouse.

Eram basicamente feitos de tiras de aço marteladas sobre um mandril para alcançar a forma de um tubo e então aquecidas e pressionadas para juntar suas bordas. Outros desenvolvimentos ocorreram, e em 1931 Fretz Moon inventou um método para produzir barris soldados por um processo contínuo. A junção deste processo com a soldagem por efeito Joule consolidou um método que até hoje é usado para produção de tubos com costura (MORGAN, 2004).

O processo de fabricação dos tubos de aço com costura trefilados pode ser dividido em nove etapas, como ilustra a Figura 1.



**Figura 1: Fluxograma do processo de fabricação de um tubo trefilado**

Fonte: Os autores.

Os aços geralmente usados na produção dos tubos com costura são os de baixo carbono, devido ao seu baixo custo e sua boa soldabilidade. Estes, geralmente contêm entre 0,3 e 0,8 % de manganês, que reduz a formação de óxidos e de sulfetos de ferro. Este último se forma nos contornos de grão, sendo mais frágil e de menor ponto de fusão que o sulfeto de manganês, pode provocar fratura frágil durante o trabalho a frio ou a quente do aço. O manganês ainda aumenta a tensão limite de escoamento, refinando a perlita e a endurecendo por meio de solução sólida (SMITH, 1993). Já os aços microligados, como o DIN 17100 RSt-52.3, são especificados não só pela sua composição química, mas pela sua resistência mecânica. São desenvolvidos a partir dos aços de baixo carbono com pequenas adições de Mn (até 2%) e outros elementos em níveis muito

pequenos. Estes aços apresentam maior resistência mecânica que os aços de baixo carbono idênticos, mantendo a ductilidade e a soldabilidade, e são destinados às estruturas onde a soldagem é um requisito importante, assim como a resistência (PANNONI, 2007).

Após as etapas de conformação da chapa, o tubo quase formado passa pela etapa de soldagem. Nesta etapa, faz-se o uso de soldagem por alta frequência (HFIW) que é um processo que promove a fusão localizada das bordas da chapa por meio da aplicação de energia de radiofrequência sobre a área a ser unida. Quando devidamente executada, a solda resultante é tão resistente quanto os materiais originariamente empregados (BRACARENSE, 2007).

As propriedades dos aços dependem, em princípio, de sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor grau, a estrutura dos aços, resultando, em alterações mais ou menos pronunciadas em suas propriedades (CHIAVERINI, 2002).

Para o caso específico dos tubos de aço com costura trefilados, torna-se necessário efetuar um tratamento térmico para que o aço adquira novamente sua ductilidade após ter sido conformado, e para que possa ser deformado na trefilação sem fraturar.

Os tubos de aço trefilados têm ganhado muito espaço nos últimos anos, graças a suas características de ótimo acabamento superficial, precisão dimensional e boas propriedades mecânicas. Entre suas aplicações mais usuais, pode-se citar a indústria automobilística, implementos agrícolas, e aplicações de segurança, onde se podem exigir uniformidade de propriedades mecânicas, perfis diferenciados e melhor acabamento superficial.

Existem diversos métodos teóricos e empíricos desenvolvidos para o estudo da conformação, em especial da trefilação. Um método será tanto



mais preciso quanto mais parcelas de energia forem consideradas durante o cálculo.

Para a trefilação sem mandril, utilizando-se o método da divisão e equilíbrio de elementos, também denominado *slab method*, considera-se o atrito entre o tubo e as ferramentas, bem como a geometria das ferramentas, porém só como fator geométrico e não como influente na energia de trabalho redundante. Sachs e Baldwin (1946) apud Dieter (1988) investigaram as tensões envolvidas nesse processo, assumindo que a espessura do tubo permanece constante. Sendo assim, a tensão de trefilação é expressa por:

$$\sigma_{tref} = \sigma_m \frac{(1 + B)}{B} \left[ 1 - \left( \frac{A_f}{A_o} \right)^B \right] \quad (1)$$

em que:

$$B = \mu \cot \alpha \quad (2)$$

e

$$\sigma_m = \frac{1}{\bar{\epsilon}} \int \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = \frac{K \bar{\epsilon}^n}{n+1} \quad (3)$$

onde  $\sigma_{tref}$  é a tensão de trefilação (Pa),  $\sigma_m$  é a tensão de escoamento média (Pa),  $A_o$  e  $A_f$  as áreas iniciais e finais (m),  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre tubo e parede da fiação,  $\alpha$  é o semi-ângulo de redução da fiação (°),  $\bar{\epsilon}$  é a deformação real (%),  $\bar{\sigma}$  é a tensão real (Pa),  $K$  é o coeficiente de resistência (Pa) e  $n$  é o coeficiente de encruamento.

Analisando o limite de trefilação agora por um modelo examinado por Backofen (1969) apud Smith (1988), a tensão de trefilação real desenvolvida no processo de trefilação pode ser descrita como:

$$(\sigma_{tref})_{real} = \frac{(\sigma_{tref})_{ideal}}{\eta} \quad (4)$$

sendo que:

$$(\sigma_{tref})_{ideal} = \int \sigma d\epsilon = \sigma_m \ln \frac{A_f}{A_o} \quad (5)$$

e

$$\eta = \frac{U_p}{U_T} \quad (6)$$

onde  $(\sigma_{tref})_{real}$  é a tensão de trefilação real,  $(\sigma_{tref})_{ideal}$  é a tensão de trefilação ideal,  $\eta$  é a eficiência (%),  $s$  é a tensão de engenharia (Pa),  $\eta$  é a deformação de engenharia (%),  $U_p$  é a energia de deformação homogênea (J),  $U_T$  é a energia total (J).

O valor de  $\eta$  corresponde à eficiência do processo, onde se leva em conta as perdas em função do atrito e do trabalho redundante.

### 3 Materiais e métodos

Antes de descrever o que foi feito, deve-se explicar quais serão as etapas realizadas, destacando a importância de cada uma delas para se atingir o objetivo desejado.

Para o estudo do comportamento dos tubos de aço em suas etapas de fabricação foram selecionados dois tipos de aço com características distintas, a fim de validar os modelos matemáticos em aços variados. Para a caracterização dos mesmos, foi realizada análise química para se qualificar quantitativamente a composição química presente nos aços. Além disso, por análise microestrutural, observou-se a região da solda, com o objetivo de verificar a homogeneização da microestrutura

após o tratamento térmico. Foram também realizados ensaios mecânicos de dureza e resistência à tração, que em geral fornecem informações para o controle das características dos produtos acabados ou no decorrer do seu processamento, na forma de ensaios de rotina. Com o ensaio de tração foi possível obter os dados para inserção nos modelos matemáticos para previsão das propriedades finais. Realizou-se também todo o acompanhamento da fabricação dos tubos em condições normais de processamento, a fim de obter dados consistentes com as reais condições de processo.

Os aços utilizados foram o SAE J403 NOV2001 1012 e o DIN 17100 RSt-52.3, ambos laminados a quente. Estes aços serão chamados no decorrer do trabalho de SAE 1012 e ST-52, respectivamente. As composições químicas encontradas são listadas Tabela 1. O aço SAE 1012 foi fornecido pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e o ST-52 pela Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA).

**Tabela 1: Resultados da análise de composição química**

	<b>SAE 1012</b>	<b>ST-52</b>
<b>C (%)</b>	0,15	0,19
<b>Mn (%)</b>	0,53	1,52
<b>P (%)</b>	0,008	0,001
<b>S (%)</b>	0,007	0,003
<b>Si (%)</b>	0,002	0,345
<b>Cu (%)</b>	0,025	0,032
<b>Al (%)</b>	0,05	0,039

Fonte: Os autores.

As tiras de aço foram conformadas em uma linha formadora de tubos OTTOMILLS. O diâmetro externo e espessura selecionados, juntamente com os parâmetros de processo estão indicados na Tabela 2. A etapa seguinte foi o tratamento químico de decapagem dos tubos, para retirar o excesso de óleo e oxidação da superfície dos tubos, antes de serem enviados ao forno.

**Tabela 2: Parâmetros de processo de formação e soldagem dos tubos**

	<b>SAE 1012</b>	<b>ST-52</b>
<b>Diâmetro Externo nominal (mm)</b>	33,7	42,2
<b>Espessura nominal (mm)</b>	3	2,65
<b>Velocidade de linha (m/min)</b>	40	29
<b>Potência de soldagem (kW)</b>	106	130
<b>Frequência de soldagem (kHz)</b>	300	300

Fonte: Os autores.

Após a decapagem, os tubos foram tratados termicamente em um forno contínuo de soleira de rolos, marca METALTREND, com aquecimento a gás natural e atmosfera controlada de nitrogênio (95%) e hidrogênio (5%). O equipamento dispõe de três zonas de aquecimento e uma de resfriamento. Dados do tratamento de normalização estão dispostos na Tabela 3.

**Tabela 3: Parâmetros de tratamento térmico de normalização**

	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tempo (min)</b>
<b>Zona 1</b>	800	16
<b>Zona 2</b>	880	15
<b>Zona 3</b>	930	15
<b>Resfriamento</b>	*	80

\* Resfriamento de 930 °C até temperatura ambiente.

Fonte: Os autores.

Seguindo o processo, os tubos foram preparados para a trefilação. Nesta etapa, foi realizado o apontamento, que consiste na redução de diâmetro externo de uma das pontas do tubo, necessário para permitir que os tubos sejam inseridos por meio da fieira de trefilação, a fim de dar início ao processo. Em seguida, os tubos receberam lubrificação com sabão, com os parâmetros de banho como descrito no Tabela 4.



**Tabela 4: Parâmetros do tratamento químico para saponificação**

	Tempo (min)	Temperatura (°C)
Decapagem	10	60
Enxágue	1	amb. <sup>1</sup>
Neutralizador	1	amb.
Fosfatização	8	65
Enxágue	1	amb.
Neutralizador	1	60
Saponificação	4	70
Secagem	5	85

<sup>(1)</sup> amb.: Temperatura ambiente

Fonte: Os autores.

A trefilação dos tubos foi realizada em uma máquina para trefilação marca GALIUM, com capacidade para até 400 kN. Para a obtenção da curva de propriedades em função da redução, foram efetuadas reduções incrementais (passe) de 5 em 5% em relação ao diâmetro inicial, sem tratamento térmico intermediário entre as etapas. A cada passe, foram retiradas amostras para ensaios. A Tabela 5 traz o diâmetro das fieiras utilizadas que mais se aproximam para cada redução desejada. Foi utilizada uma velocidade de trefilação de 40 m/min para ambos os aços. O valor do ângulo de redução das fieiras é de 16° ( $\alpha = 8^\circ$ ) e o coeficiente de atrito entre parede da fieira e tubo para lubrificante a base de sabão, segundo Button (2005), é de 0,05. Assim, o valor do parâmetro B vale:  $B = \mu \cot \alpha = 0,356$ . O diâmetro externo e a espessura dos tubos antes da trefilação, necessárias para o cálculo da área inicial, são apresentadas na Tabela 6.

As amostras para ensaios mecânicos e determinação da composição química foram retiradas da chapa usada para conformar o tubo, e também após sua formação, após o tratamento térmico e após a trefilação.

Para os ensaios de tração, segundo a norma ASTM A 370, os corpos de prova foram retirados da seção longitudinal da chapa e do tubo, neste

**Tabela 5: Ferramental usado para trefilação e reduções correspondentes**

Passe	Redução Desejada (%)	SAE 1012		ST-52	
		Fieira Usada	Redução Prevista (%)	Fieira Usada	Redução Prevista (%)
1	5	32	5	40	5,2
2	10	30,45	9,6	38	10
3	15	28,45	15,6	36	14,7
4	20	27	19,9	34	19,4
5	25	25,2	25,2	31,75	24,8
6	30	24	28,8	29,42	30,3
7	35	22	34,7	27,15	35,7
8	40	20	40,7	25,4	39,8
9	45	18,47	45,2	24	43,1
10	50	17,44	48,2	21,6	48,8

Fonte: Os autores.

**Tabela 6: Dimensões dos tubos antes da trefilação**

	SAE 1012	ST-52
Diâmetro Externo medido (mm)	33,58	42,26
Espessura medida (mm)	3,16	2,67
Área inicial (mm²)	301,99	332,08

Fonte: Os autores.

último a 180° da região soldada. Foram retiradas três amostras para ensaios antes e após o tratamento térmico. Uma amostra foi ensaiada para os outros casos (chapa e trefilação). Foi utilizada a máquina de ensaios EMIC DL, com velocidade de ensaio de 20 mm/min, equipada com extensômetro de comprimento e com capacidade para até 10 kN. No caso dos corpos de prova oriundos dos tubos, deve ser feito um cálculo para a correção da área da seção transversal do corpo de prova, que é curvo, para uma equivalente seção retangular, conforme norma ASTM E8M. O alongamento total foi calculado com base de medida igual a 50 mm. O controle do ensaio é realizado pelo programa TESC, permitindo a obtenção da curva convencional e exportação dos dados para tratamento dos mesmos.



A determinação da composição química das chapas foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica marca SPECTROCAST, regulado para “Aço Baixa Liga”, realizando-se uma média de três queimas.

Para a observação da microestrutura, foi realizado o corte das amostras na zona termicamente afetada em seção transversal e embutidas em resina baquelite. Posteriormente, foi realizado o lixamento, polimento e ataque em Nital 3%. As fotos foram obtidas com auxílio de um microscópio OLYMPUS BX51M e do *software* ANALYSIS.

O ensaio de dureza foi realizado no durômetro marca HECKERT com escala HRB na região oposto a solda. Para cada ensaio, as duas primeiras medições eram descartadas, sendo feita uma média das três leituras seguintes.

## 4 Resultados e discussões

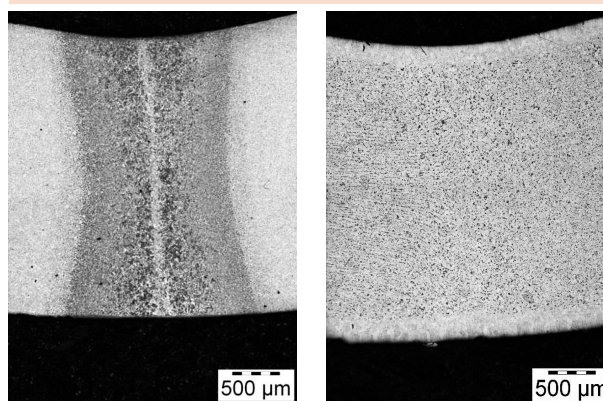
Nos resultados dos ensaios de tração, apresentados no Tabela 7, verifica-se a evolução das propriedades dos tubos ao longo do seu processamento. Para o caso do Tubo Formado e Após o Tratamento Térmico, é apresentada a média aritmética dos três ensaios realizados.

Durante a formação do tubo, ocorre o endurecimento devido ao encruamento do mesmo, o que leva a um aumento da resistência e diminuição do alongamento. Já após o tratamento térmico, ocorre a restauração parcial das propriedades que foram alteradas na formação do tubo. Assim, a energia térmica permite que haja maior mobilidade de discordâncias, ocorrendo a recristalização dos grãos e homogeneização das propriedades. Na Figura 2 podem ser visualizadas as fotos da microestrutura na região da solda antes e após o tratamento térmico para o SAE 1012 e na Figura 3 para o ST-52. É possível observar que houve uma completa homogeneização da zona termicamente afetada.

**Tabela 7: Resultados dos ensaios de tração**

Aço	Propriedade	Chapa	Tubo formado	Após tratamento térmico
SAE 1012	Dureza (HRB)	75	78	50
	$\sigma_e$ (MPa)	289	420	240
	$\sigma_r$ (MPa)	422	460	350
	A (%)	31	21	39
	n	0,148	0,051	0,127
	K (MPa)	739	587	531
ST-52	Dureza (HRB)	82	86	81
	$\sigma_e$ (MPa)	497	520	402
	$\sigma_r$ (MPa)	600	630	560
	A (%)	24	15	28
	n	0,101	0,048	0,145
	K (MPa)	884	871	931

Fonte: Os autores.



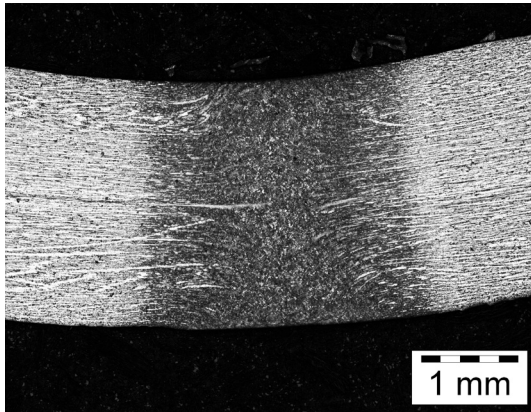
**Figura 2: Micrografias da região da zona termicamente afetada para o SAE 1012: (a) antes e (b) após o tratamento térmico. Ataque: Nital 3%**

Fonte: Os autores.

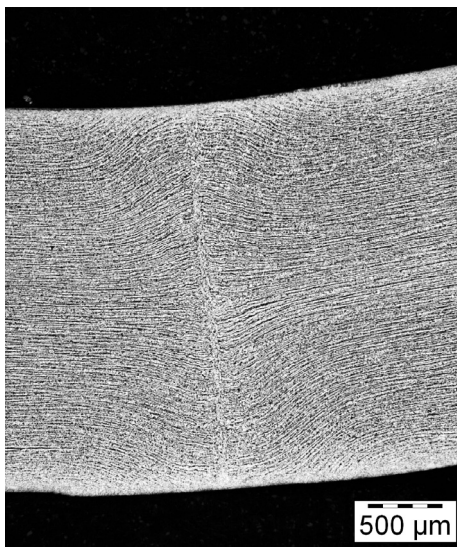
Após o tratamento térmico, foi realizada a trefilação com reduções incrementais, para obtenção da curva propriedades em função da redução. Os resultados dos ensaios de ensaios de tração estão apresentados na Figura 4 para o SAE 1012 e na Fonte: Os autores. para o ST-52, com as propriedades partindo da condição de tratamento térmico (redução igual a zero).

A partir dessas curvas, podem-se obter as curvas da tensão de escoamento e de resistência em função das deformações verdadeiras. Com es-



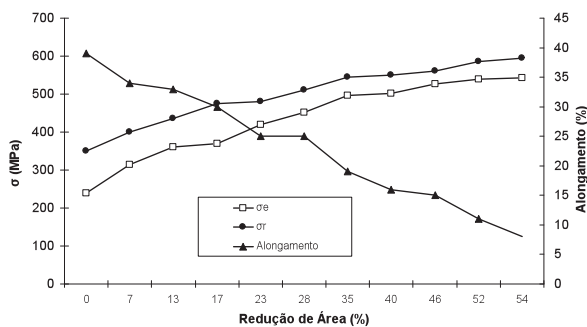


(a)

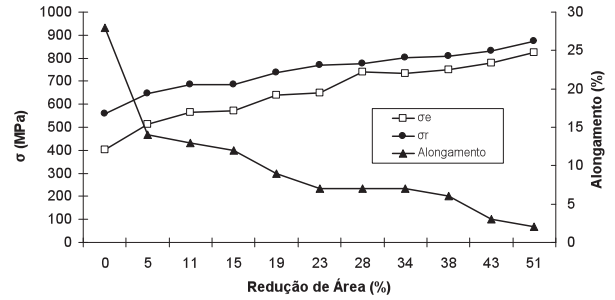


(b)

**Figura 3:** Micrografias da região da zona termicamente afetada para o ST-52: (a) antes e (b) após o tratamento térmico. Ataque: Nital 3%  
Fonte: Os autores.



**Figura 4:** Pontos experimentais da tensão de escoamento, tensão de resistência e alongamento em função da redução para o SAE 1012  
Fonte: Os autores.



**Figura 5:** Pontos experimentais da tensão de escoamento, tensão de resistência e alongamento em função da redução para o ST-52  
Fonte: Os autores.

tas, aplica-se o logaritmo nas duas variáveis e têm-se as curvas lineares que permitem fazer a obtenção da equação que prevê a tensão verdadeira em função da deformação verdadeira. Estas equações são mostradas abaixo:

**SAE 1012:**

$$\bar{\sigma}_e = 926.\bar{\epsilon}^{0,413} MPa$$

$$\bar{\sigma}_r = 969.\bar{\epsilon}^{0,333} MPa$$

**ST-52:**

$$\bar{\sigma}_e = 1330.\bar{\epsilon}^{0,339} MPa$$

$$\bar{\sigma}_r = 1360.\bar{\epsilon}^{0,262} MPa$$

Com estas equações, traçaram-se as curvas de escoamento e de resistência para os dois aços, como mostrado na Figura 6 e Figura 7. Nota-se que há semelhança entre as curvas para os dois tipos de aço, com a tendência do limite de escoamento se aproximar do limite de resistência para grandes deformações, devido ao encruamento do aço pelo trabalho a frio na trefilação. Nesses casos, onde a tensão de escoamento se aproxima muito da tensão de resistência do material, é conveniente que seja realizado uma etapa de recozimento antes de se conduzir a posteriores reduções. Convém obser-

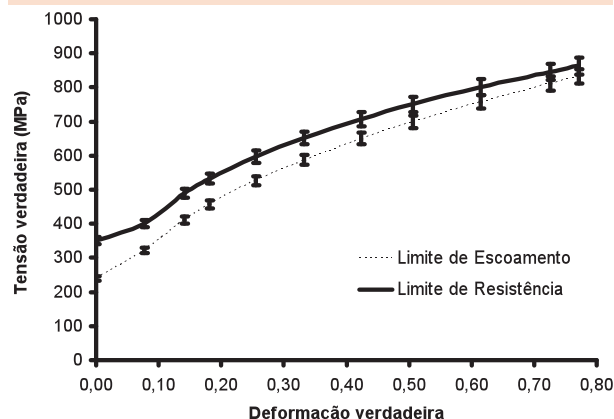
var que essas equações são aproximações, devido ao fato de se utilizar a relação de Hollomom, que negligencia a parte elástica da deformação, o que implica que para uma deformação igual a zero, a tensão também é zero.

Para o ST-52, o desvio padrão entre pontos experimentais e a curva gerada entre ficou em 4,95% para o limite de escoamento e em 3,89% para o limite de resistência, enquanto que o SAE 1012 teve um desvio de 2,89% para o limite de escoamento e em 2,59% para o limite de resistência.

Essas faixas são os limites dentro dos quais se pode estimar a propriedade mecânica (limite de escoamento e de resistência) para uma dada deformação. Observa-se que para o ST-52, a curva de escoamento intercepta a curva de resistência em uma deformação de aproximadamente 0,40, enquanto que para o SAE1012, isso acontece em aproximadamente 0,60. Isso é explicado devido ao fato de o ST-52 possuir uma curva de encruamento mais acentuada, devido aos valores mais altos de  $n$  e  $K$ , que provocam um aumento da resistência com a deformação a frio, e consequentemente, este aço atinge mais rapidamente o limite de deformação.

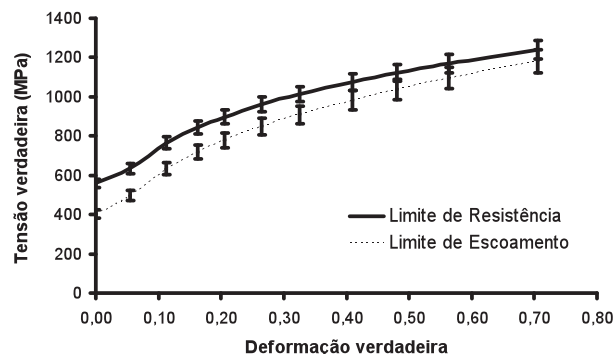
A dureza foi avaliada durante o processo de trefilação e os resultados estão dispostos na Figura 9. Nota-se que a partir do 6º passe (aproximadamente 35 % de redução), a dureza começa a se estabilizar, devido ao encruamento acentuado que o aço sofreu.

Este encruamento é verificado também na variação da espessura durante a trefilação. Como mostra o gráfico da , até o 6º passe para o SAE 1012 e até o 7º passe para o ST-52 (entre 35 a 40% de redução), ocorre um aumento da espessura, devido às tensões compressivas impostas pela fiação. A partir desses pontos, o material se encontra muito encruado, o que não possibilita que o mesmo se deforme no sentido de aumentar a es-



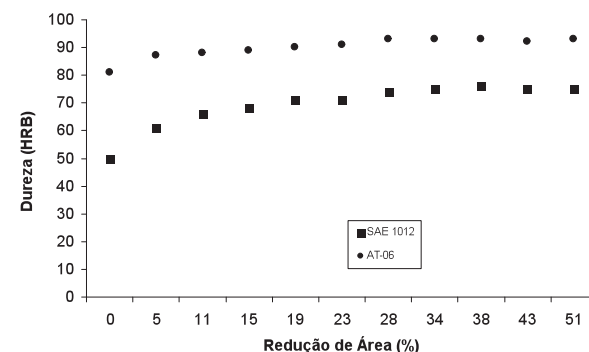
**Figura 6: Curvas de tensão de escoamento e de resistência em função da deformação verdadeira - SAE 1012**

Fonte: Os autores.



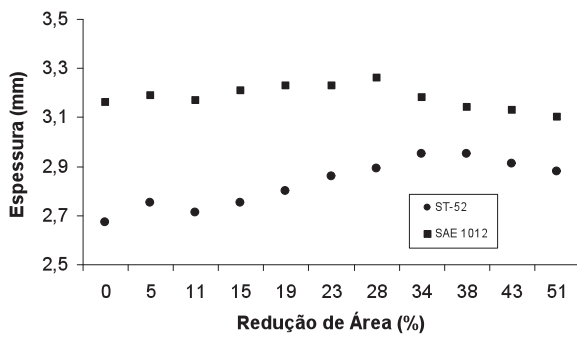
**Figura 7: Curvas de tensão de escoamento e de resistência em função da deformação verdadeira - ST-52**

Fonte: Os autores.



**Figura 8: Evolução da dureza em função da redução de área**

Fonte: Os autores.



**Figura 9: Evolução da espessura em função da redução de área**

Fonte: Os autores.

peSSura, ocorrendo então uma maior deformação no sentido longitudinal.

A eficiência para ambos os aços foi estimada em 80%, já que se trata de um processo de trefilação sem mandril, onde ocorrem maiores perdas por trabalho redundante (DIETER, 1988). Para achar a máxima redução segundo o modelo de Sachs, e sendo  $B = 0,356$ , numa primeira estimativa, temos para o SAE 1012 que a tensão de escoamento do material de saída é:

$$r = 1 - \left( 1 - \left( \frac{0,356}{(1 + 0,356)} \right) \right)^{(1/0,356)} = 0,575$$

$$\bar{\epsilon} = \ln \left( \frac{1}{1 - r} \right) = 0,856$$

$$\bar{\sigma} = 531.0,856^{0,127} = 521 MPa$$

Sabendo que esta é a máxima tensão admissível para a t

$$\sigma_m = \frac{K \bar{\epsilon}^n}{n + 1} = \frac{531.0,856^{0,127}}{0,127 + 1} = 462 MPa$$

$$r_{m\acute{a}x.} = 1 - \left( 1 - \left( \frac{B \cdot \sigma_e}{\sigma_m (1 + B)} \right) \right)^{(1/B)} = 62,7\%$$

Para o ST-52, temos que a tensão máxima na saída é:

$$\bar{\sigma} = 931.0,856^{0,145} = 910 MPa$$

A máxima redução fica então:

$$\sigma_m = \frac{K \bar{\epsilon}^n}{n + 1} = \frac{931.0,856^{0,145}}{0,145 + 1} = 795 MPa$$

$$r_{m\acute{a}x.} = 1 - \left( 1 - \left( \frac{B \cdot \sigma_e}{\sigma_m (1 + B)} \right) \right)^{(1/B)} = 63,4\%$$

Já segundo o modelo de Backofen, como temos um coeficiente de encruamento levemente diferenciado para os aços (0,145 para o ST-52 e 0,127 para o SAE 1012), estes provocam uma pequena diferença na redução máxima:

$$r_{m\acute{a}x.} = 1 - e^{-\eta(n+1)}$$

$$(SAE1012) \quad r_{m\acute{a}x.} = 1 - e^{-0,8(0,127+1)} = 60,0\%$$

$$(AT - 06) \quad r_{m\acute{a}x.} = 1 - e^{-0,8(0,145+1)} = 59,4\%$$

## 5 Conclusões

O levantamento das curvas de propriedades mecânicas em função da redução na trefilação para os dois tipos de aços mostrou ser um bom caminho para a estimativa de propriedades após trefilação.

A comparação dos dois tipos de aço mostrou uma semelhança no que diz respeito à evolução de

propriedades, ou seja, os mesmos seguem padrões de encruamento previstos na literatura, como o incremento na resistência mecânica e dureza e redução do alongamento.

Analisado-se os modelos de cálculos de tensões de trefilação pelos dois modelos, percebeu-se uma diferença no que diz respeito à redução máxima permitida por cada um. Pelo modelo de Backofen, que leva em conta a eficiência do processo como um todo, e não somente os parâmetros de atrito constante e geometria utilizados por Sachs, a redução máxima permitida é menor. Pode-se adotar este modelo quando se queira um maior fator de segurança nos cálculos dos esforços de trefilação.

As curvas obtidas e suas respectivas equações servirão para estimar os limites de trefilação sem necessidade de recozimentos intermediários, bem com selecionar entre os dois qual o mais adequado para cada aplicação.

Como se viu, o processamento dos tubos de aço, desde a sua formação até a trefilação pode ser otimizado quando os parâmetros de processo são conhecidos e as variáveis identificadas e qualificadas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Tuper S/A pela disponibilização do material e equipamentos para realização dos trabalhos.

## Referências

AL-QURESHI, H. A. *Introdução aos processos de conformação mecânica dos metais*. São José dos Campos, 1996.

ASTM A370. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. American Society for Testing and Materials, 1997.

BANISH, A. Selecting a tube cutting process. Disponível em <[www.thefabricator.com/TubePipeFabrication/TubePipeFabrication\\_Article.cfm?ID=997](http://www.thefabricator.com/TubePipeFabrication/TubePipeFabrication_Article.cfm?ID=997)> . Acesso em: 14 setembro 2007.

BRACARENSE, A. Q. *Soldagem por alta frequência - high frequency welding (HFW)*. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

BRESCIANI Filho, E. (Coord). *Conformação plástica dos metais*. 4. ed. Campinas: Ed. da Unicamp, 1991.

BROOKS, C. R. *Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels*. USA: ASM, 1996.

BUTTON, S. T. *Conformação Plástica dos Metais*. Campinas: UEC, 2001.

CALLISTER, Jr., W. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 5. ed. Ed. New York: J. Wiley, 1999.

CAMINAGA, C.; ISSII, R.; BUTTON, S. Processos e lubrificantes alternativos para extrusão a frio de peças em aço. Disponível em <[www.fem.unicamp.br/~sergio1/laboratorio/031015309.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/laboratorio/031015309.pdf)>. Acesso em 24 julho 2007.

CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos*. 7.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2002.

COLPAERT, H. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.

DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. London: McGraw-Hill, 1988.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. *Fundamentos da conformação mecânica dos metais*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.

KIM, N.; KANG, B.; LEE, S. Prediction and design of edge shape of initial strip for thick tube roll forming using finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 142, pp. 479 – 486, 2003.

MARRA, K.; BATISTA, G.; VALADÃO, M. Efeito da espessura da carepa em aço laminado a quente em soldas HFIW de tubos com costura. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 41. , 2004, Joinville.

MORGAN, M. *Cold processing of steel: Production of welded tube from strip*. London: ISI, 1972.

PANNONI, F. D. Aços estruturais. Disponível em <[www.cbcaibs.org.br/downloads/apostilas/Aços\\_estruturais.pdf](http://www.cbcaibs.org.br/downloads/apostilas/Aços_estruturais.pdf)> . Acesso em: 15 julho 2007.

ROLLASON, E. C. *Metallurgy for Engineers*. 3. ed. London: Edward Arnold, 1961.

SETTON, E.; SENATORE, M. Estudo comparativo entre tubos de aço inoxidável austenítico com e sem costura. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DO AÇO INOXIDÁVEL, 7., 2004, São Paulo.

SMITH, W. F. *Structure and Properties of Engineering Alloys*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, Inc, 1993.



SOUZA, S. A. *Ensaaios mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos*. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

THELNIG, K.E. *Heat treatment - General: Steel and Its Heat Treatment*. 2. ed. London: Butterworths, 1984.

TOBECHERANI, C. T. P. *Noções básicas sobre tubos de aço carbono com costura*. Disponível em: <[www.pipesystem.com.br/Artigos\\_Tecnicos/Tubos\\_Aco](http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Tubos_Aco)>. Acesso em: 16 junho 2007.

Recebido em 15 set. 2009 / aprovado em 15 dez. 2009

**Para referenciar este texto**

ANDRADE, F. A.; ALI AL-QURESHI, H. Modelamento para previsão de propriedades mecânicas no processo de trefilação aplicado a tubos de aço com costura. *Exacta*, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 229-240, 2009.