

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DURANTE A CONFORMAÇÃO DE TUBOS DE PEQUENOS DIÂMETROS VISANDO DESEMPENHO DE PROJETO¹

Willy Ank de Moraes²
Herbert Christian Borges³
Carlos Augusto Saraiva DeMaria⁴
Maurício Domingos Campos Júnior⁵

Resumo

Na indústria de tubos com costura é de fundamental importância a previsão do desempenho mecânico final destes após a sua produção. Neste estudo, foram selecionados dois tipos de aços laminados a quente que foram conformados em tubos eletrosoldados de vários diâmetros e espessuras. Corpos de prova foram obtidos de amostras antes e depois da conformação destes tubos e de várias posições em relação ao comprimento das bobinas de aço originais. Os resultados obtidos de ensaios de tração instrumentados destes corpos de prova foram analisados e relacionados com as dimensões dos tubos produzidos. Um modelo fenomenológico está sendo apresentado para descrever a variação destas propriedades em relação às propriedades originais do aço utilizado na produção de tubos em função de sua geometria. A análise feita revelou que a previsão das propriedades mecânicas em tubos não é tarefa trivial, pois depende de vários fatores associados ou não à produção dos tubos como uma boa rastreabilidade, uma amostragem representativa, comportamento em encruamento e ensaios mecânicos precisos.

Palavras-chave: aço; laminados planos; tubos com costura; encruamento; limite de escoamento; conformação.

QUANTIFICATION OF MECHANICAL PROPERTIES VARIATION DURING FORMATION OF SMALL DIAMETER TUBES TO OPTIMIZE PROJECT PERFORMANCE

Abstract

In production of seam tubes is important to know the finish mechanic properties of these after forming. In this study, tubes of several diameters and thickness obtained from two different types of hot rolled steels were selected. Samples were obtained before and after forming of these tubes and of several positions in relation to the length of the coils. The obtained results from tensile tests of these samples were analyzed and related with the dimensions of the produced tubes. A phenomenological model is being presented to describe the variation of these properties in relation to the original properties of the steel used. The done analysis revealed that the calculation of the mechanical properties in tubes is not such trivial task, because it depends on several factors associated or not to the production of the tubes, like: good tracking, representative sampling and precise mechanical tests.

Key-words: Steel; Hot rolled sheet; Seam tubes; Hardening; Yield strength; Forming.

¹ Contribuição técnica apresentada no 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² MSc., Eng^o, Téc., Analista de Produto/Desenvolvimento de novo produto, Assistência Técnica, COSIPA; Prof. Departamento Eng^a Mecânica UNISANTA (willymoraes@cosipa.com.br ou willyank@unisanta.br).

³ Eng^o, Analista de Produto/Desenvolvimento de novo produto, Assistência Técnica, COSIPA (herbertborges@cosipa.com.br).

⁴ Técnico Metalurgista, Assistente de Produto, Controle Integrado, COSIPA (saraiva@cosipa.com.br)

⁵ Gerente de Produção Industrial, ARAYA do Brasil Industrial Ltda. (producao@araya.com.br).

1 INTRODUÇÃO

Tubos de aço com costura, obtidos por meio de soldagem por resistência elétrica (ERW-*Electric Resistance Welding* ou HFIW-*High Frequency Induction Welding*), são utilizados para as mais diversas aplicações industriais e estruturais, como por exemplo:

- 1) Aplicações sem pressão interna - eletrodutos, tubos para a indústria moveleira, tubos estruturais e tubos industriais para os quais não se exige ensaio de estanqueidade.
- 2) Aplicações de baixa responsabilidade - tubos de condução para fluidos não perigosos, limitados até 25 bar, para os quais são requeridos ensaios de estanqueidade.
- 3) Aplicações de alta responsabilidade - tubos de condução especiais, tubos para troca térmica (caldeiras e trocadores de calor), para o segmento de óleo e gás, tubos mecânicos e tubos de precisão (para a indústria automobilística).

Para a maioria das aplicações especiais, são determinantes o grau de resistência do tubo e sua capacidade de sofrer deformação plástica sem apresentar colapso plástico ou fratura durante ou após os processos de fabricação. Entretanto, quanto maior o grau de resistência destes tubos, normalmente piores são as características de soldabilidade ou de plasticidade sem tratamento térmico. A Figura 1 ilustra como exemplo a distribuição de durezas na região da junta soldada de um tubo de aço SAE 1012, que geralmente apresenta trincas durante a trefilação, caso o mesmo não seja convenientemente tratado termicamente (preferencialmente normalizado).

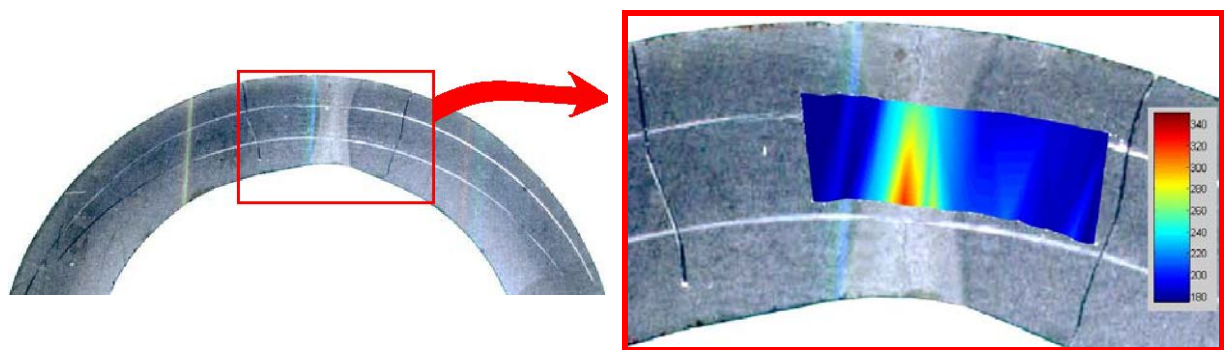


Figura 1. Distribuição de durezas na região soldada de um tubo de aço SAE 1012.

Para aumentar a eficiência e competitividade, os produtores de tubos almejam a obtenção de produtos que atendam aos requisitos geométricos e de resistência mecânica da aplicação final, ao mesmo tempo em que se busca a redução dos custos e do tempo de produção. Uma escolha otimizada da liga a ser utilizada na produção pode permitir que o ganho em resistência mecânica oferecido pela operação de conformação seja explorado eficientemente agregando valor ao produto. Porém este ganho em resistência não é simples de ser calculado, pois este pode variar com as dimensões finais dos tubos, com a forma de amostragem e com as características de encruamento do aço.

Neste trabalho, são revistas algumas premissas básicas envolvidas no processo de produção de tubos de aço carbono visando aplicações especiais. Resultados experimentais são utilizados para a obtenção de uma equação que permita prever o grau de encruamento obtido em conformação de tubos de pequeno diâmetro de um fabricante nacional.

2 DESENVOLVIMENTO

Para a execução deste trabalho foram selecionados dois tipos de aços laminados a quente, cujas principais características de composição química e propriedades mecânicas estão indicados na Tabela 1. As dimensões dos tubos produzidos também estão contidos nesta tabela. O modelamento apresentado neste trabalho baseia-se especialmente no aço carbono manganês (A). Considerações fenomenológicas são apresentadas nos itens a seguir.

Tabela 1. Características dos aços utilizados neste trabalho

Aço	Composição química (valores médios)				Propriedades Mecânicas			Dimensões dos tubos(mm)	
	%C	%Mn	%Si	%(Nb+Ti+V)	LE ⁽¹⁾	LR ⁽¹⁾	n ⁽²⁾	Diâmetro	Espessura
(A)	0,16%	1,20%	0,15%	-	≥310	≥410	≈0,21	30 a 100	2,65 a 5,00
(B)	0,15%	1,35%	0,20%	0,035%	≥355	≥540	≈0,16	42 e 48	3,35 e 4,75

(1)-Valores em MPa: LE-Limite de Escoamento / LR-Limite de Resistência (2)-Expoente de encruamento.

2.1 Mecanismos de Endurecimento

A resistência mecânica dos aços é oriunda do somatório e interação dos seguintes principais mecanismos de endurecimento que podem estar presentes em maior ou menor intensidade conforme ilustrado pela Figura 2. Normalmente o encruamento não é explorado para oferecer ganhos de resistência mecânica em aços laminados a quente.

- solução sólida (Mn, Si);
- tamanho de grão ferrítico (d);
- presença de segunda fase (perlita);
- presença de precipitação (NbCN, VCN, TiCN, CrC, MoC, etc.)

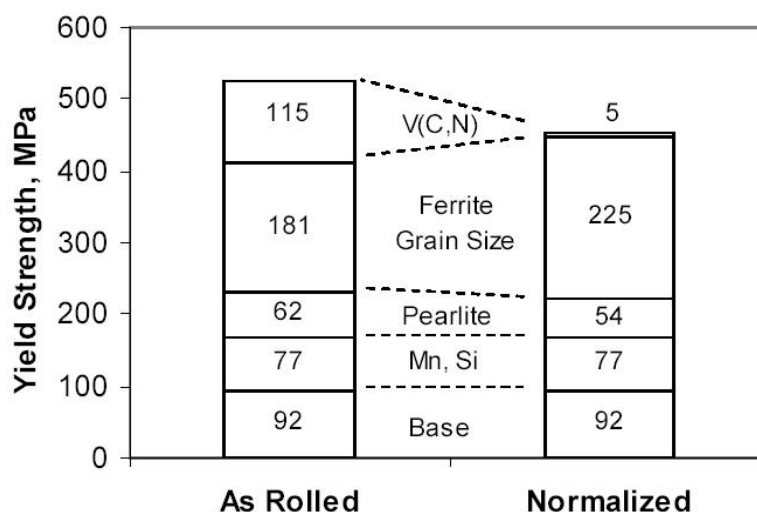


Figura 2. Exemplo da quantificação individual dos mecanismos de endurecimento em um de aço com: 0,24%C; 1,27%Mn; 0,36%Si; 0,77%V; 0,043%Al e 0,0095%N [1].

Existem diversos modelos para a determinação das propriedades mecânicas de um aço com estrutura ferrita-perlita contidos na literatura e que consideram estes mecanismos de endurecimento. Tais modelos são obtidos pela interpolação de dados reais de aços com estrutura ferrita-perlita não encruada, geralmente na situação normalizada.

A resistência mecânica é calculada pelo somatório das contribuições parciais dos diversos mecanismos de endurecimento cobertos pelo modelo, tal como mostrado na

Figura 2. O efeito da precipitação não é geralmente considerado, assim torna-se necessário fazer uma análise regressiva do aço que possua endurecimento por precipitação para se modelar a participação da precipitação no incremento da resistência mecânica. No caso dos aços estudados, a equação (1), atribuída à Irvine e Pickering [2], foi a que melhor correlacionou suas propriedades, com um erro de cerca de 5%:

$$\sigma_{ys} = 91,7 + 40,7(\%Mn)+70,4(\%Si)+1,5(\%Perlita)+521,776(1/\sqrt{d}) \quad \text{Eq. (1)}$$

Para o aço (B), que é microligado, o incremento no limite de escoamento, devido à presença dos microligantes, foi estimada por meio desta equação em 80MPa. Deve-se salientar que este tipo de aço perde praticamente quase toda esta resistência adicional ao ser normalizado, conforme ilustrado pela Figura 2.

2.2 Propriedades de Bobinas Laminadas a Quente

A resistência mecânica de bobinas laminadas a quente também sofre os efeitos geométricos durante o seu resfriamento: as partes externas e as primeiras espiras (no núcleo) resfriam mais rapidamente que o restante da bobina. Uma forma de compensar esta diferença é realizando um resfriamento diferenciado na saída do laminador. Entretanto sempre persistem variações nas propriedades mecânicas nos extremos das bobinas que dificultam a precisa modelização destes produtos, tornando necessário uma amostragem mais eficiente, porém dispendiosa.

A Figura 3 ilustra um exemplo da variação no limite de escoamento e resistência nos dois aços analisados. Em ambos os casos foram realizados resfriamento diferenciado, ainda assim nota-se que podem ocorrer ligeiras diferenças nas médias ao longo das bobinas, especialmente pela maior dispersão nas propriedades nos extremos destas.

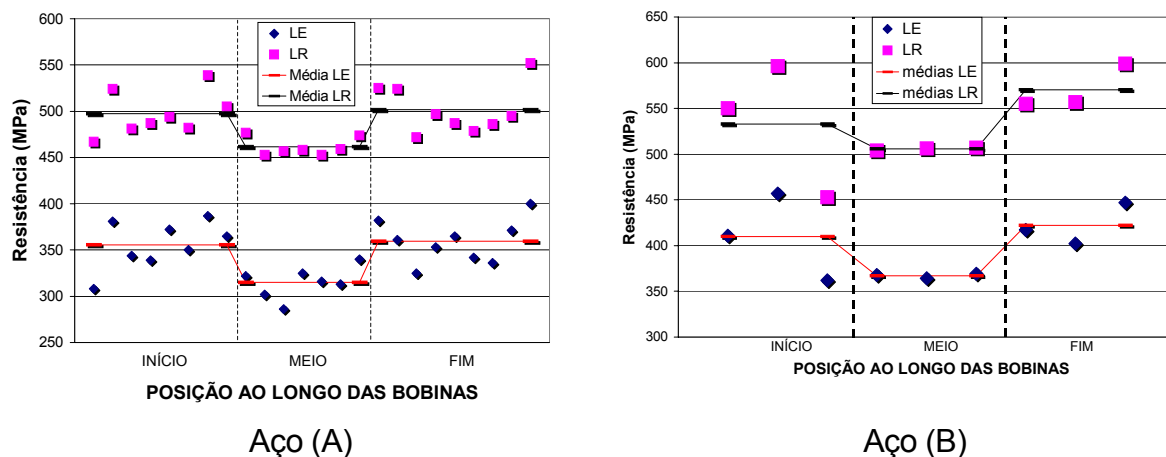


Figura 3. Variação das propriedades mecânicas dos dois utilizados neste estudo. Situação como laminado e amostras retiradas em três posições das bobinas. As posições “início” e “fim” equivalem a cerca de 10% do volume da bobina.

Uma situação similar ocorre também com as amostras retiradas das laterais de bobinas: a variação das propriedades mecânicas torna-se crescente com o aumento do carbono equivalente e com a proximidade das bordas, conforme ilustrado na Figura 4. Apesar de que estas variações não ocasionam descumprimento das normas de qualidade a que estes aços estão vinculadas, a variação localizada nos resultados prejudica a precisão no modelamento deste material.

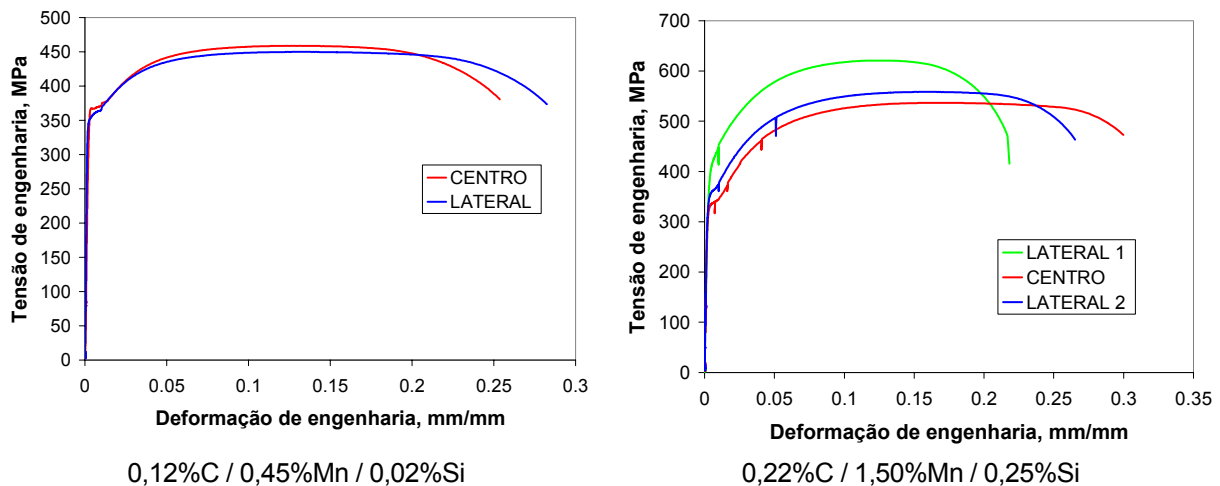


Figura 4. Curvas tensão versus deformação de amostras de aços retiradas no centro e muito próximo às laterais das bobinas.

Neste estudo a análise foi realizada em amostras de chapas (como laminado) e em tubos oriundos de regiões fora dos extremos das bobinas. Este procedimento oferece uma maior precisão pela redução das variações nos resultados das propriedades mecânicas, tal com é sugerido pelos valores mostrados nos gráficos das Figuras 3 e 4.

2.4 Deformação e Encruamento por Dobramento

Pela análise elástica elementar, sabe-se que as deformações nas fibras externas de uma seção em dobramento são inversamente proporcionais ao raio de dobramento e diretamente proporcionais à espessura ($\epsilon_1=z_1/\rho$ e $\epsilon_2=z_2/\rho$), conforme Figura 5. As superfícies interna e externa do tubo serão as regiões efetivamente deformadas plasticamente, conforme também ilustrado na Figura 5. À medida que é aumentada a deformação da chapa para se produzir o tubo, maior será o percentual da espessura da chapa que ficará deformada plasticamente e maior será o valor das deformações presentes, sendo maior o encruamento experimentado pelo material.

Considerando um metal cujo comportamento plástico seja oferecido em tração e em compressão pela relação $\sigma=K\epsilon^n$, as flechas são determinadas pela equação abaixo [3]:

$$\frac{d^2z}{dx^2} = -\frac{1}{\rho} = \frac{M\epsilon_1^{(1-n)}(n+2)}{3KI} \quad \text{Eq. (2)}$$

Os termos desta equação demonstram que a deformação, e conseqüentemente o encruamento, não são obtidos diretamente e sim pela integração de uma função dos parâmetros geométricos de dobramento e do expoente de encruamento do aço. Usualmente é empregada a relação diâmetro/espessura (ϕ/e) para exprimir o grau de severidade de conformação na produção de um tubo e para estimar empiricamente o encruamento subseqüente.

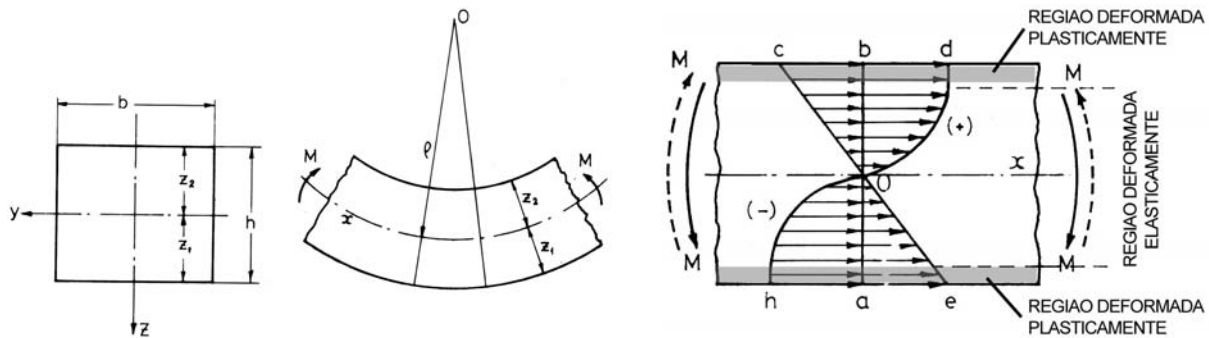


Figura 5. Sistema de referência para o estudo das deformações e tensões oriundas do dobramento de uma viga de seção retangular com lados b e h [3].

2.5 Obtenção e Tratamento dos Dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos de amostras de bobinas e tubos de aços nas condições ilustradas na Tabela I. Os materiais foram amostrados na linha de produção da ARAYA do Brasil Industrial Ltda, sendo o aço laminado a quente produzido pela COSIPA visando exatamente o mercado de tubos especiais. Cerca de 100 CP's obtidos destas amostras foram testadas em tração longitudinal em uma máquina eletromecânica MTS Sintech 20/G de 10 ton, equipada com extensômetros eletrônicos (de largura e comprimento) com precisão de $\pm 0,002\text{mm}$ mínima.

Na obtenção dos resultados foi considerada apenas as amostras de chapa e tubo oriundas da parte central do comprimento da bobina. Além disso foi feita uma correção dos valores da área da seção reta do CP obtido de tubo (que é curva) para uma equivalente seção reta retangular conforme a norma de ensaios de tração ASTM E8M [4]. No caso do alongamento, um trabalho anterior [5] dos autores indica que o uso do alongamento proporcional é o mais indicado. Assim os valores obtidos de alongamento na base 50 foram convertidos segundo a ISO 2566[6].

Os resultados obtidos das várias amostras foram correlacionados com os principais parâmetros de conformação:

- geometria de conformação (diâmetro e espessura);
- características de encruamento do aço (expoente de encruamento n);
- impacto do encruamento nos mecanismos de endurecimento do aço.

3 RESULTADOS

Um sumário dos resultados dos testes para o aço A (carbono-manganês sem microligante) está mostrado na Tabela 2. Os resultados ilustrados foram obtidos de médias de ensaios de tração em chapas e tubos amostrados sempre na posição central das bobinas, onde as propriedades são mais homogêneas.

Os dados obtidos foram utilizados para criar uma equação biparamétrica (função do diâmetro- ϕ e espessura-e) pelo *software* de análise *Statistica*[®]. A equação (3) foi obtida com os dados da Tabela 2.

$$\Delta LE = -218,6 - 0,751 \cdot \phi + 160,5 \cdot e - 0,009 \cdot \phi^2 + 0,176 \cdot \phi \cdot e - 15,7 \cdot e^2 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

ΔLE - variação no limite de escoamento (MPa);

ϕ - diâmetro nominal externo do tubo em mm;

e - espessura do tubo em mm;

Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos dos ensaios com o aço A.

Diametro (mm)	Espessura (mm)	LE chapa (MPa)	LR chapa (MPa)	Alongamento Prop. chapa	LE tubo corrigido* (MPa)	LR tubo corrigido* (MPa)	Alongamento Proporcional Tubo	Varição LE	Varição LR	Varição Alongamento
30,0	2,65	401	557	27	484	576	23	83	19	-4,0
42,2	3,75	327	467	37	461	519	24	135	53	-12
60,3	2,65	325	458	39	367	470	35	42	12	-4,2
60,3	3,00	316	453	37	393	470	35	77	17	-2,4
82,6	4,25	328	525	27	453	536	28	125	11	1,1
101,6	4,75	322	477	32	423	486	29	101	9	-2,6
101,6	5,00	294	455	32	403	498	29	109	43	-3,3

* - Ajustado o valor da área de acordo com o grau de curvamento dos CP's.

Para obter a equação (3), utilizou-se uma regressão quadrática suave, cuja curva é ilustrada na Figura 6. O erro obtido pela correlação da curva obtida com os dados experimentais médios para cada combinação geométrica (ϕ/e) encontra-se em torno de 5%.

Resultados previamente existentes para tubos de aços com similar comportamento mecânico, traduzido pelo mecanismo de endurecimento e pelo coeficiente de encruamento, foram utilizados para testar a equação obtida. Os resultados estão mostrados na Tabela 3. Foi comparado o desempenho e atestada a sua limitação no uso com aços com diferente comportamento de endurecimento por encruamento (valores do coeficiente de encruamento n), como os aços microligados.

Tabela 3. Aplicação do modelo obtido a partir de tubos do aço A para outros tipos de tubos de aço carbono manganês e microligado.

AÇO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA				Diam (mm)	Espes. (mm)	LE chapa (MPa)	LR chapa (MPa)	LE tubo Corrigido* (MPa)	LR tubo Corrigido* (MPa)	Delta LE	Delta LR	Delta LE MODELO	ERRO MODELO LE
	%C	%Mn	%Si	%Micro										
C	0,15	1,35	0,20	0,035	48,3	4,75	366	505	471	533	105	28	171	63%
C	0,15	1,35	0,20	0,035	42,2	3,35	369	507	457	538	88	31	119	35%
D	0,15	1,15	0,25	0,025	60,3	4,55	433	552	503	549	70	-3	155	122%
E	0,22	1,50	0,25	-	33,4	3,50	333	537	473	537	140	0	135	3%
E	0,22	1,50	0,25	-	28,6	3,35	423	621	553	616	130	-5	130	0%
F	0,21	0,85	-	-	28,6	3,35	391	552	527	568	136	16	130	4%

- Ajustado o valor da área de acordo com o grau de curvamento dos CP's.

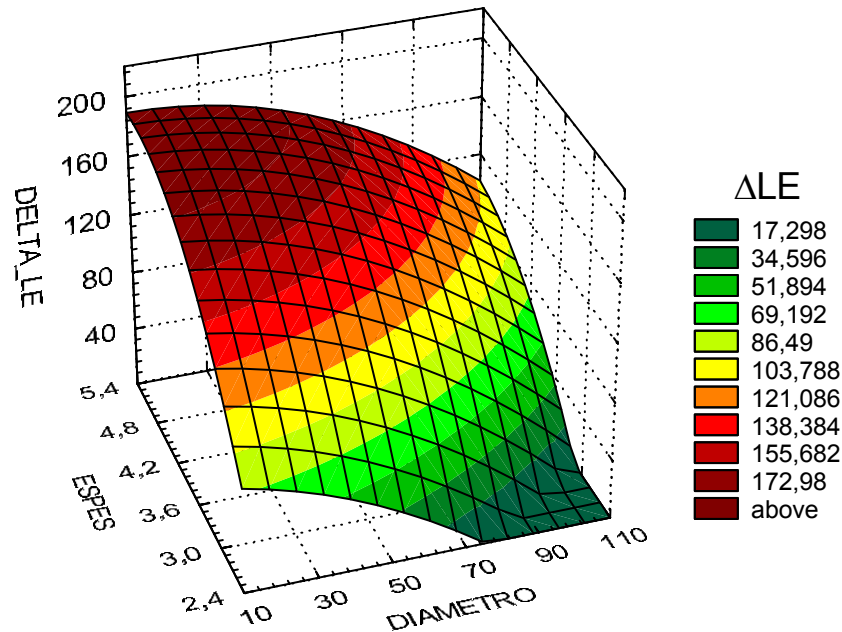


Figura 6. Modelamento do encruamento (incremento no limite de escoamento) de um aço carbono manganês (aço A da Tabela 1) quando conformado na forma de tubos de pequeno diâmetro.

Os dados da Tabela 3 refletem a aptidão do modelo que gerou a equação (3) para representar o ganho de encruamento em aços carbono laminados a quente tais como o aço A mostrado na Tabela 1. Estes aços caracterizam-se por apresentar um coeficiente de encruamento da ordem de 0,20. Nota-se que o aço E possui comportamento similar ao aço normalizado mostrado no gráfico da Figura 2.

Observou-se que o modelo torna-se impreciso quando aplicado na estimativa do grau de encruamento com base nos dados de amostras retiradas próximas às laterais ou nas extremidades das bobinas. As curvas da Figura 4 (direita) ilustram bem a variação localizada que pode ocorrer no material, prejudicando a representatividade do modelo obtido e sua aplicação.

Por outro lado, aços microligados, apresentam um incremento em sua resistência mecânica devido à precipitação de carbonitretos possuindo valores mais baixos do coeficiente de encruamento, assim como uma relação elástica mais próxima a unidade (normalmente $LE/LR > 0,80$). Esta situação altera o seu comportamento em face ao grau de encruamento e o peso deste aumento de resistência mecânica em relação aos demais mecanismos de endurecimento, impedindo a aplicação da equação (3) nesta classe de materiais. Nesta situação o modelo superestima o encruamento realmente obtido na conformação destes aços para a produção de tubos.

Nestes casos, apesar de não ser possível traçar uma curva completa com os poucos dados disponíveis para estes aços, é possível fazer uma curva similar à obtida para o aço anterior, já que se conhecem os mecanismos de endurecimento vigentes, a evolução do encruamento por meio do coeficiente de encruamento e uma aplicação que permite quantificar as deformações envolvidas com um aço carbono manganês não microligado.

4 CONCLUSÕES

A análise feita revelou que a previsão das propriedades mecânicas em tubos não é tarefa tão trivial, pois depende de vários fatores associados ou não à produção dos tubos, tais como: uma boa rastreabilidade, uma amostragem representativa,

comportamento em encruamento e ensaios mecânicos precisos. Nas condições deste trabalho obteve-se um modelo que permite descrever o grau de encruamento para a faixa dos dimensionais analisados e também a possibilidade de prever propriedades de tubos que ainda não tenham sido produzidos, conhecendo-se:

- as propriedades mecânicas originais da chapa que lhe deu origem;
- a geometria de conformação pelos valores do diâmetro e espessura do tubo;
- e a categoria de encruamento do aço (laminado a quente sem microliga).

Ao longo deste trabalho percebeu-se que a amostragem tem efeito significativo na representatividade dos resultados utilizados no modelamento. Neste caso os resultados obtidos de amostras retiradas nos extremos e laterais das bobinas foram desprezados devido à maior dispersão dos resultados e ao acúmulo de erros que estas induzem.

No caso de materiais microligados, sabe-se que o coeficiente de encruamento (n) destes aços é mais baixo, refletindo a limitação na capacidade destes aços de adquirirem resistência mecânica pelo encruamento. Porém, conhecendo-se o comportamento dos aços aqui modelados, o que reflete o efeito do coeficiente de encruamento, as características mecânicas destes aços e a geometria de conformação dos tubos, é possível extrapolar os resultados para obter uma equação também aplicável aos aços microligados.

REFERÊNCIAS

- 1 BODNAR, R.L.; FLETCHER, F.B.; MANOHAR, M., **The physical metallurgy of normalized plate steels**. Materials Science and Technology 2004 Conference Proceedings, The Association for Iron & Steel Technology (AIST) and TMS (The Minerals, Metals and Materials Society), USA, 2004.
- 2 IRVINE, K.J.; PICKERING, F.B.; **Low-carbon steels with ferrite-pearlite structures**. JISI, vol. 201, November, 1963, pp.944-959. In: BODNAR, R.L.; FLETCHER, F.B.; MANOHAR, M., The physical metallurgy of normalized plate steels. Materials Science and Technology 2004 Conference Proceedings, The Association for Iron & Steel Technology (AIST) and TMS (The Minerals, Metals and Materials Society), USA, 2004.
- 3 MOURA BRANCO, C.G.A.; **Mecânica dos Materiais**, Fundação Calouste Gulbenkian, 2ª edição, Lisboa, 1994.
- 4 ASTM E8-04; **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Book of Standards**. Volume: 03.01. American Society for Testing and Materials, 2004.
- 5 MORAIS, W.A. et. al.; **Estudo das variáveis de deformação plástica em aços através de ensaios de tração instrumentados**. 59º Congresso Anual da ABM, São Paulo, julho 2004.
- 6 ISO 2566/1; **Steels – Conversion of elongation values – Part 1: Carbon and low alloy steels**. International Organization for Standardization, 1984.