

# AValiação DA FORça DE TREFILAÇÃO DE TUBOS ATRAVÉS DE MÉTODOS ANALÍTICOS, DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS E DE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS<sup>1</sup>

Danielle Granha Giorgini<sup>2</sup>  
Paulo Roberto Cetlin<sup>3</sup>  
Ronaldo de Faria Antunes<sup>4</sup>  
Luiz Felipe da Silva Antero<sup>5</sup>

## Resumo

Neste trabalho foi avaliada a força de trefilação de tubos através de métodos analíticos, do método de elementos finitos e de medições experimentais. Os modelos analíticos estudados foram: método dos blocos e método do limite superior. A medição experimental foi realizada na linha de produção da V & M do Brasil através de extensômetros e um sistema de aquisição de dados. Para os experimentos foi selecionada a qualidade de aço DIN St 52 normalizado. Em relação aos modelos analisados conclui-se que o método dos elementos finitos é uma ferramenta superior aos métodos analíticos, uma vez que permite o acompanhamento do esforço da trefilação ao longo do processo, fornecendo resultados das cargas de trefilação e as deformações localizadas.

**Palavras-chaves:** Trefilação de tubos; Força de trefilação; Aço carbono.

## EVALUATION OF TUBE COLD DRAWING FORCE THROUGH ANALYTICAL METHODS, FINITE ELEMENT METHOD AND EXPERIMENTAL MEASUREMENTS

### Abstract

In this paper the tube cold drawing force was evaluated through analytical methods, finite element method and experimental measurements. The analytical models studied were the slab method and the upper bound method. The measurement was performed in the production line at V & M Brazil using strain gauges and a data acquisition system. For the experiments the steel grade DIN St 52 normalized was selected. Regarding the analyzed models it was concluded that the finite elements method is a better tool than analytic ones. It allows monitoring the drawing force providing results of cold drawing stresses and localized strains during the forming process.

**Keywords:** Cold drawing tubes; Drawing force; Carbon steel.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira Metalurgista. Engenheira de Pesquisa. V & M do Brasil. Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Professor titular do departamento de Engenharia Mecânica - UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico. Gerente de Qualidade. V & M do Brasil. Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Mecânico. Engenheiro de Pesquisa. V & M do Brasil. Belo Horizonte, MG, Brasil.

# 1 INTRODUÇÃO

A trefilação de tubos é uma das operações de conformação mecânica de grande importância industrial que permite a produção de tubos com excelente acabamento superficial e rígido controle dimensional.<sup>(1)</sup>

A V & M do Brasil apresenta uma unidade de trefilação de tubos que é subdividida em cinco linhas de produtos. Estas linhas são responsáveis pelo processamento completo dos produtos depois da etapa de preparação superficial. Cada linha é composta por bancas de trefilação, serras, equipamentos de ensaios não destrutivos e fornos para tratamentos térmicos.

A previsão dos esforços em que os metais são submetidos durante as operações de conformação representa uma importante área de estudo na indústria metalúrgica, facilitando o desenvolvimento de produtos com características pré-definidas, propriedades mecânicas desejadas e fluxos de produção otimizados.

Neste trabalho foi realizada a avaliação da força de trefilação de tubos através dos modelos analíticos existentes, de medições experimentais na linha de produção e também através da simulação de elementos finitos.

Os modelos analíticos estudados foram: o método dos blocos ou divisão em elementos e o método do limite superior. A medição experimental foi realizada através de um dispositivo composto por extensômetros e um sistema de aquisição de dados na linha de produção da VMB. Os experimentos foram executados em uma banca tripla na linha de produtos hidráulicos da trefilaria da VMB. Para os experimentos foi selecionada a qualidade de aço DIN St 52 no estado de fornecimento normalizado.

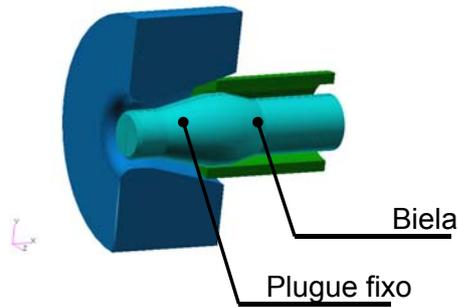
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Trefilação de Tubos

A trefilação caracteriza-se pelo tracionamento do produto através de uma matriz que lhe confere a geometria e as dimensões especificadas.<sup>(2)</sup> Nesse processo, o tubo de partida é puxado contra uma matriz cônica convergente, denominada fieira ou simplesmente matriz, tendo seu diâmetro externo e/ou parede reduzidos e o seu comprimento aumentado.

Existem três tipos básicos de processos de trefilação de tubos que são os que utilizam mandril, os que utilizam plugue, e os que utilizam apenas a matriz, sem mandril ou plugue. Denomina-se mandril a ferramenta interna que é um corpo cilíndrico maciço cujo diâmetro é o diâmetro interno do tubo trefilado. Por outro lado, denomina-se plugue a ferramenta interna de perfil cônico adaptado à geometria interna do tubo em deformação na zona de trabalho.

Este trabalho foi realizado utilizando a trefilação de tubos com plugue fixo. A haste que fixa o plugue é denominada biela. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático da trefilação de tubos com plugue fixo.



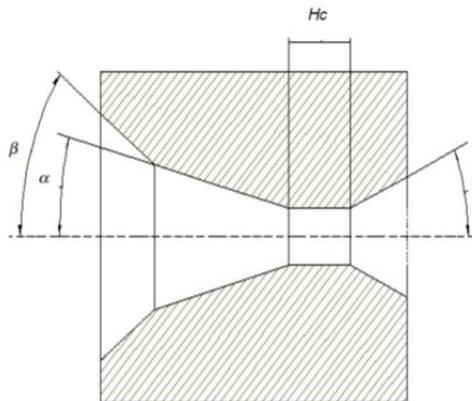
**Figura 1.** Trefilação de tubos com plugue fixo.

### 2.1.1 Ferramentas na trefilação

A qualidade e o custo dos produtos trefilados dependem em grande parte da natureza das ferramentas, matriz e/ou mandril/plugue, especificamente de suas características geométrica, bem como do material em que são fabricados.

De um modo geral, a matriz é constituída de um núcleo de material resistente ao desgaste e suficientemente duro para resistir aos esforços aplicados, encaraçado em outro material menos nobre. A matriz reage ao esforço aplicado, induzindo tensões compressivas que facilitam o escoamento do material, de modo que o esforço axial necessário para a deformação é menor do que seria sem a presença daquela ferramenta.<sup>(3)</sup>

O perfil de uma matriz de trefilação é cônico na maioria das vezes e compõe-se de quatro regiões bem definidas na Figura 2.<sup>(2)</sup>



**Figura 2.** Detalhes do núcleo de uma matriz de trefilação.<sup>(2)</sup>

A região de entrada, representada pelo ângulo  $\beta$ , que promove o guiamento do tubo de matéria-prima em direção ao cone de trabalho.

Na região de trabalho, representada pelo ângulo  $2\alpha$  (ângulo do cone de trabalho), ocorre a deformação plástica do material pelo seu escoamento convergente. Esta é, portanto, a região onde é aplicado ao tubo o esforço de compressão.

A região de calibração, representada pela altura de calibração  $H_c$ , é responsável pela definição da geometria e das dimensões do produto trefilado. O comprimento do cilindro de calibração determina a quantidade de atrito na região. Comprimentos excessivos dessa região podem causar o aumento da tensão de trefilação e, desta forma, reduzir a redução máxima possível por passe e aumentar a possibilidade de desgaste da matriz.

A região de saída, representada pelo ângulo  $2\gamma$ , é a região onde o produto sofre a recuperação elástica devida ao término dos esforços compressivos e deve

proporcionar uma saída livre do tubo sem causar danos nas superfícies da matriz e do tubo.<sup>(2)</sup>

O plugue pode ser cilíndrico ou cônico e controla o tamanho e a forma do diâmetro interno, resultando em uma boa precisão dimensional.

### **2.1.2 Atrito e lubrificação na trefilação**

Na trefilação o material a conformar é deformado por meio de contato com as ferramentas: matriz e mandril/plugue. A pressão necessária para deformação gera uma tensão normal à superfície das ferramentas, e o movimento relativo do material a conformar com a superfície da ferramenta gera uma tensão tangencial na interface. Assim, uma clássica situação tribológica surge com atrito na interface ferramenta-material a conformar e com potencial de desgaste de ambas. Para evitar estes efeitos utiliza-se um lubrificante.<sup>(4)</sup>

A escolha correta do lubrificante é uma das grandes dificuldades existentes em qualquer processo. Esta escolha baseia-se em parâmetros como os materiais usados nas ferramentas e na peça, a temperatura e a velocidade de processo. A eficiência do lubrificante está relacionada à sua capacidade de formar uma película estável sob as condições do processo, que previna o contato entre as superfícies.<sup>(2)</sup>

Comumente, empregam-se soluções de sabões, de óleos vegetais ou de graxas animais fracamente aciduladas.<sup>(2)</sup> Considerando os lubrificantes usualmente empregados no processo de trefilação os valores típicos do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) são 0,02 a 0,05.<sup>(4)</sup>

### **2.1.3 Análise da tensão de trefilação**

Diversos trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de estimar a tensão de trefilação. As diferenças entre os resultados obtidos através das diversas técnicas estariam associadas à abordagem e às hipóteses consideradas nos mesmos, ou seja, à escolha das variáveis a serem utilizadas: ocorrência das forças de fricção (coeficiente de atrito), encruamento do material (tensão de escoamento não é constante) e deformação redundante (fator de trabalho redundante).<sup>(5)</sup> Esses métodos podem ser agrupados em métodos teóricos e métodos experimentais.

Os métodos experimentais apresentam a vantagem de fornecerem resultados mais próximos dos observados na prática industrial, mas apresentam os inconvenientes de exigirem a execução de um grande número de experimentos e serem restritos a algumas condições de processamento (geometria dos produtos, materiais trefilados, redução de seção) e alto custo.<sup>(2)</sup>

Os métodos teóricos apresentam resultados tanto mais precisos quanto mais complexos. Dentre os métodos teóricos destaca-se o método dos elementos finitos que apresenta resultados com elevada precisão.

Os métodos analíticos para a obtenção da tensão de trefilação foram, e ainda são largamente utilizados. Esses métodos são mais ou menos poderosos, conforme é necessário assumir-se hipóteses simplificadoras para a resolução das expressões matemáticas que traduzem o modelo adotado. Neste sentido o Método dos Blocos ou Divisão em Elementos é menos preciso, uma vez que não considera o trabalho redundante.<sup>(6,7)</sup> e mais valioso é o Método do Limite Superior, cujos resultados apresentam muito boa concordância com os dados experimentais.<sup>(8,9)</sup>

#### **• Método dos blocos**

O método dos blocos ou divisão em elemento consiste em isolar um elemento diferencial na zona de deformação e estabelecer o equilíbrio de forças na região.

Este método admite que o material se deforme uniformemente na zona de deformação.<sup>(10)</sup> De um modo, este método adota as seguintes hipóteses: material é isotrópico e admite-se que a pressão da matriz é igual à pressão do plugue. Além disso, considera o atrito, mas não considera o trabalho redundante.

A partir das hipóteses simplificadoras, as equações de equilíbrio das forças atuantes no elemento são estabelecidas levando em consideração o componente devido ao atrito entre a peça e as ferramentas. As relações entre as tensões principais são estabelecidas usando o critério de escoamento e, finalmente, é aplicada a lei de escoamento plástico que estabelece as relações entre a tensão e deformação.<sup>(3,7)</sup>

A tensão de trefilação na seção de saída é dada por:

$$\sigma_{tref} = \frac{\sigma'}{B} \left( \frac{1+B}{B} \right) \left[ 1 - \left( \frac{R_{of} - R_{if}}{R_o - R_i} \right)^B \right] \quad (1)$$

Onde  $R_o$  é o raio externo e  $R_i$  o raio interno do inicial do tubo (antes da trefilação) e  $R_{of}$  o raio externo e  $R_{if}$  o raio interno final do tubo. A constante  $B$  é determinada pelo tipo específico de processo de trefilação. Para plugue estacionário com forma cilíndrica:

$$B = \frac{2\mu}{\tan\alpha} \quad (2)$$

Onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito e  $\alpha$  é o ângulo do cone de trabalho.

#### • Método do limite superior

O método do limite superior (MLS) baseia-se no teorema do limite superior que afirma que o trabalho das forças internas do corpo é, no máximo, igual ao trabalho das forças externas que atuam sobre ele. O MLS permite a inclusão, além das parcelas devidas ao atrito e a deformação homogênea, do trabalho redundante, sendo este último o trabalho executado para alterar-se o módulo e a direção da velocidade de um ponto em particular quando este ingressa ou deixa a zona de deformação.

Admite-se que o corpo seja isotrópico. O campo de velocidades cinematicamente admissível proposto é descrito na Figura 3 que apresenta o tubo dividido em três zonas:

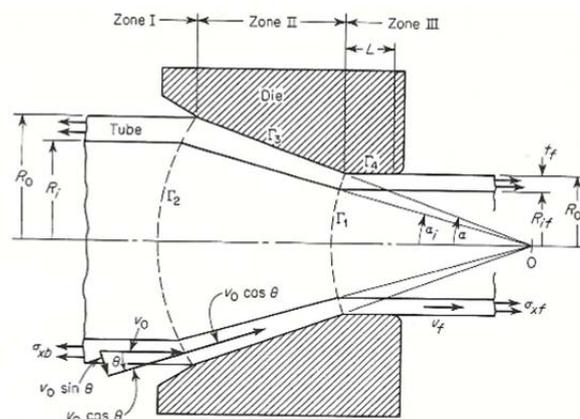


Figura 2. Modelo cinemático da trefilação de tubos com plugue.<sup>(8)</sup>

$$\sigma_{tref} = \frac{f(\gamma) \ln \frac{R_o}{R_{of}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ \left[ \frac{\alpha}{\text{sen}^2 \alpha} - \text{cotg } \alpha \right] - \left[ \frac{\alpha_i}{\text{sen}^2 \alpha_i} - \text{cotg } \alpha_i \right] \right\} + B \left( 1 - \ln \frac{R_o}{R_{of}} \right) + 2\mu_1 \frac{L}{R_{of}}}{1 + 2\mu_1 \frac{L}{R_{of}}} \quad (3)$$

Onde:

$$B = 2\{\mu_1 \text{cotg } (\alpha) + \mu_2 \text{cotg } (\alpha_i)\} \quad (4)$$

$$f(\gamma) = f(\alpha, \alpha_i) = \frac{1}{\text{sen}^2 \alpha}.$$

$$\left[ \cos \alpha_i \sqrt{1 - \frac{1}{12} \text{sen}^2 \alpha_i} - \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{1}{12} \text{sen}^2 \alpha} + \frac{1}{\sqrt{132}} \ln \left( \frac{\sqrt{\frac{11}{12}} \cos \alpha_i + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \text{sen}^2 \alpha_i}}{\sqrt{\frac{11}{12}} \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \text{sen}^2 \alpha}} \right) \right] \quad (5)$$

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

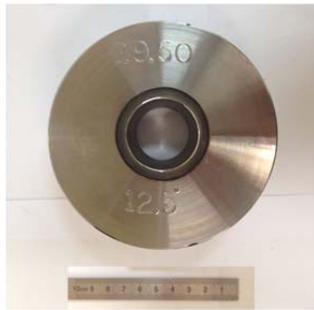
O trabalho realizado foi dividido em cinco fases: (a) seleção dos principais métodos teóricos de previsão da força de trefilação; (b) simulação numérica e simulação através dos modelos analíticos existentes; (c) planejamento e execução dos experimentos em linha de produção; (d) análise e discussão dos resultados e (e) conclusão final.

A medição da força de trefilação experimentalmente foi realizada na linha de produção da VMB. Os experimentos foram realizados na linha de produtos hidráulicos da Trefilaria da VMB.

#### 3.1 Materiais

A qualidade do aço da matéria prima escolhida foi o DIN St 52 (aço ao manganês). A matéria prima selecionada apresentava diâmetro externo de 33,4mm e parede de 5,0mm e estado de fornecimento normalizado.

Foram utilizadas duas matrizes para a realização dos experimentos, todas constituídas de um núcleo de metal duro encarcado em outro material menos nobre. Os plugues utilizados foram do tipo estacionário cromados com forma cilíndrica. A Figura 4 apresenta algumas das ferramentas utilizadas.



a) Matriz de metal duro.



b) Plugue cromado.

**Figura 4.** Ferramentas de trefilação.

### 3.2 Procedimento Experimental

Durante o procedimento experimental o lubrificante utilizado foi a fosfatização de zinco seguido de saponificação. Para a medição da força de trefilação foi desenvolvido um dispositivo de medição de cargas. Este dispositivo foi composto por extensômetros e um sistema de aquisição de dados.

Os tubos de aço DIN St 52 de bitola 33,4 x 5,0mm foram submetidos a níveis de redução de área 8,8% e 32,6%. Na Tabela 1 estão descritas as bitolas finais das reduções programadas. Todos os experimentos foram realizados em um passe de trefila partindo sempre da bitola 33,4 x 5,00mm.

**Tabela 1.** Trefilações programadas para o aço DIN St 52

Aço DIN St 52 bitola 33,4 x 5,0 mm			
Experimentos	Øext [mm]	Parede [mm]	Redução [%]
1	31,8	4,8	8,8
2	29,0	3,8	32,6

### 3.3 Simulação Numérica: Método dos Elementos Finitos

O software utilizado nas simulações através do Método dos Elementos Finitos (MEF) foi o MSC.Marc® v2005r1. O modelo utilizado foi bidimensional axissimétrico em torno do eixo X. Neste modelo foram empregados elementos isoparamétricos de quatro nós.

Foram simulados todos os passes de trefilação realizados nos experimentos. Nas simulações as matrizes e plugues foram modelados conforme as ferramentas utilizadas nos testes em linha. Para a modelagem do comportamento mecânico do tubo foram utilizadas as curvas de tensão e deformação obtidas no ensaio de tração da matéria prima.

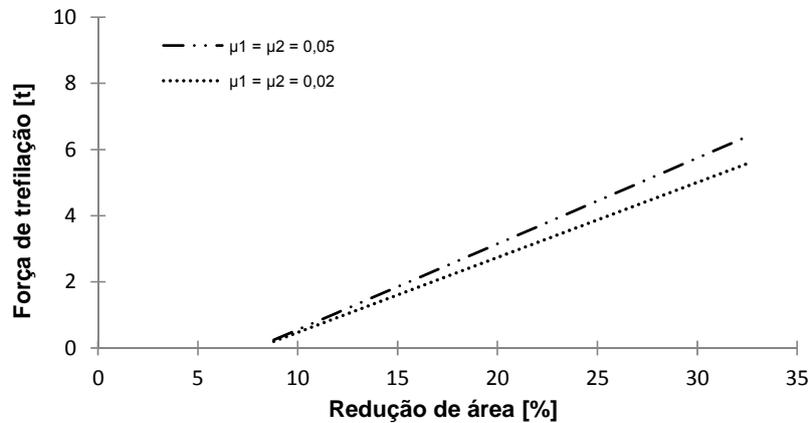
Para a matriz foi adotado o modelo perfeitamente rígido e para o plugue um modelo elástico com aço ferramenta AISI H13,  $E = 210 \text{ GPa}$  e  $\nu = 0,3$  para coeficiente de Poisson.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Simulação pelo Método dos Blocos

Os resultados das simulações empregando-se o método dos blocos são discutidos a seguir. A Figura 5 mostra as curvas da força de trefilação em função das reduções

de área realizadas nos experimentos para valores do coeficiente de atrito de 0,02 e 0,05 entre a matriz/tubo ( $\mu_1$ ) e plugue/tubo ( $\mu_2$ ) para o aço DIN St 52. Esta faixa de coeficiente de atrito foi selecionada em função da literatura que especifica para o processo de trefilação os valores típicos do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) de 0,02 a 0,05.<sup>(4)</sup>

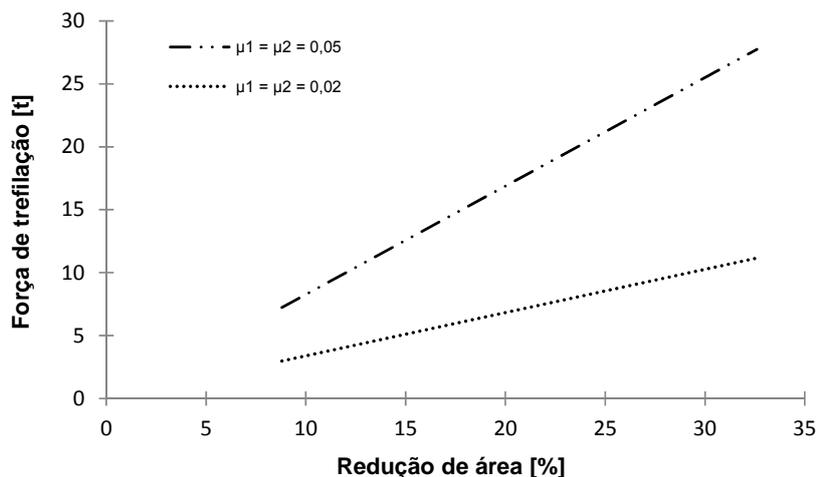


**Figura 5.** Curva força de trefilação x redução de área para o aço DIN St 52.

Estas curvas mostram que o modelo prevê o aumento da força de trefilação com o aumento do coeficiente de atrito. Para a obtenção destas curvas foram utilizados os mesmos semiângulos das matrizes utilizadas nos experimentos.

#### 4.2 Simulação pelo Método do Limite Superior

A simulação com o método do limite superior também foi empregada para todos os passes de trefilação realizados experimentalmente para cada qualidade de aço selecionada. A Figura 6 apresenta as curvas de força de trefilação em função das reduções de área para valores do coeficiente de atrito de 0,02 e 0,05 entre a matriz/tubo ( $\mu_1$ ) e plugue/tubo ( $\mu_2$ ) para o aço DIN St 52.



**Figura 6.** Curva força de trefilação x redução de área para o aço DIN St 52.

A força de trefilação é maior para maiores valores de coeficiente de atrito. Os valores encontrados para a força de trefilação são maiores do que aqueles obtidos pelo método dos blocos, uma vez que, o MLS leva em consideração também o

trabalho redundante, diferentemente do método dos blocos. Para a obtenção destas curvas também foram utilizados os mesmos semiângulos e o comprimento de calibração das matrizes utilizadas nos experimentos.

### 4.3 Simulação pelo Método dos Elementos Finitos

A Figura 7 apresenta a curva tensão versus deformação verdadeira do aço DIN St 52 obtidos através do ensaio de tração da matéria prima (aço DIN St 52 normalizado). Esta curva foi utilizada para a modelagem do comportamento mecânico do tubo.

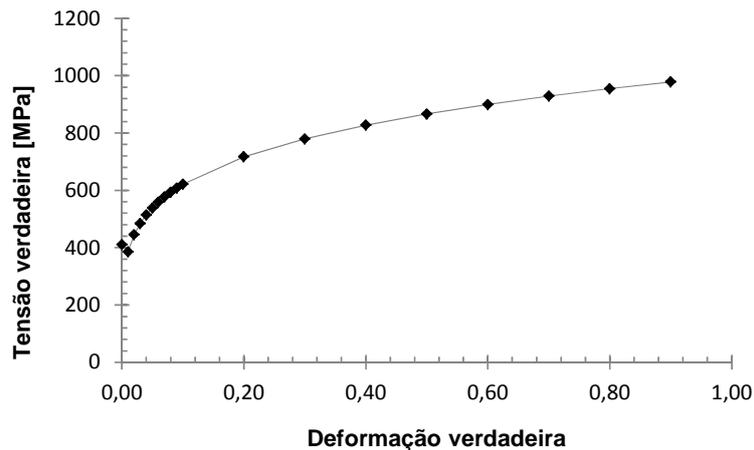


Figura 7. Curva tensão x deformação verdadeira do aço DIN St 52.

Também foram determinados os valores dos coeficientes  $K$  [MPa] e  $n$  [adimensional] que melhor ajustem a equação de Holloman.

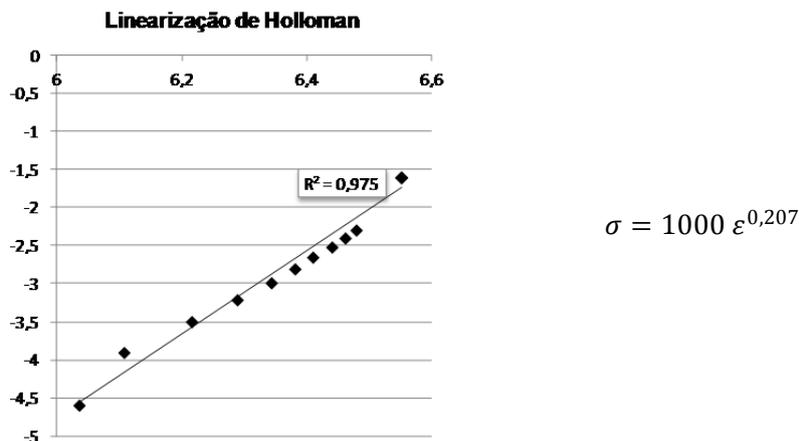
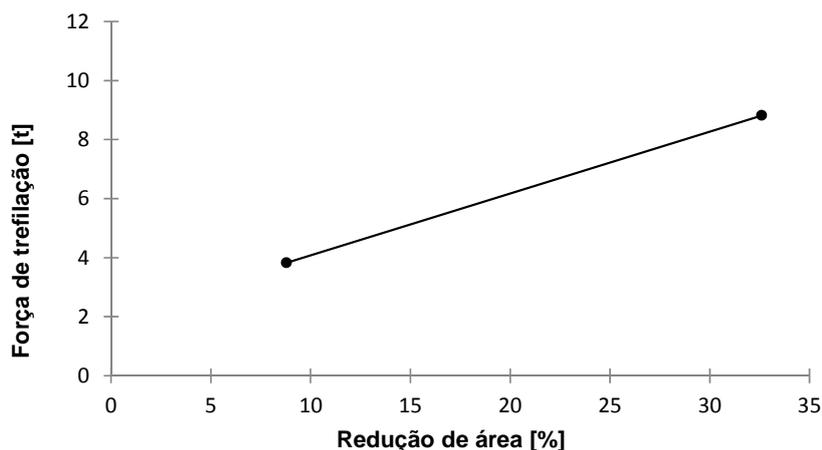


Figura 8. Determinação da equação de Holloman para o aço DIN St 52.

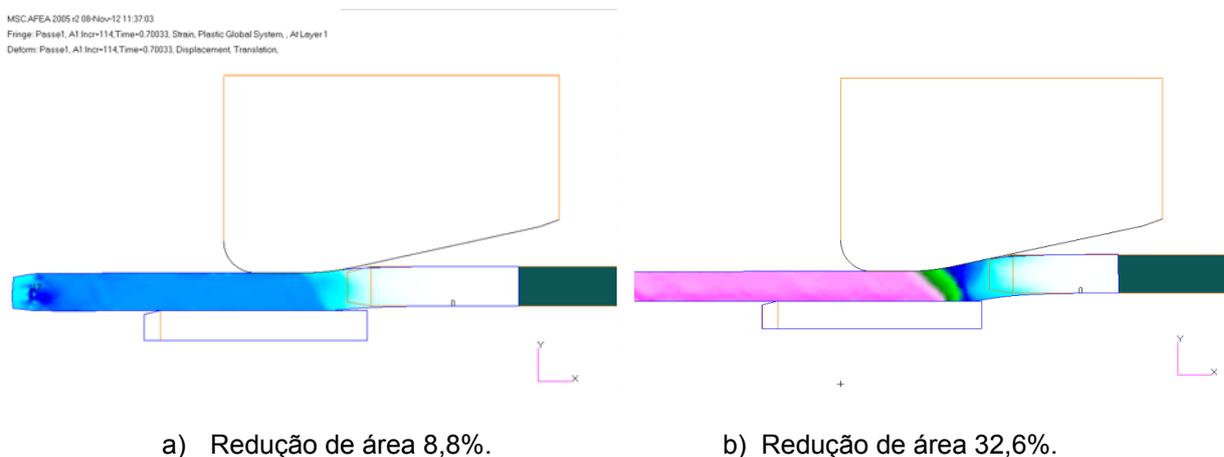
A Figura 9 apresenta a curva força de trefilação versus a redução de área através do método de elementos finitos (MEF) para aço DIN St 52.



**Figura 9.** Curva força de trefilação x redução de área para o aço DIN St 52.

Para a simulação de cada passe, os coeficientes de atrito entre o tubo/matriz e a tubo/plugue foram ajustados de tal forma que os resultados da simulação e dos experimentos apresentassem a melhor concordância entre si. Esta abordagem do coeficiente de atrito é bastante simplificada, uma vez que, para o estudo deste parâmetro é preciso realizar uma análise mais detalhada levando em consideração todo o sistema tribológico. Neste trabalho, o coeficiente de atrito foi utilizado como um coeficiente de ajuste entre os dados experimentais e a simulação. O coeficiente de atrito encontrado foi de 0,02.

A Figura 10 mostra as imagens obtidas na simulação com o MEF para as deformações do aço DIN St 52 com reduções de área de 8,8% e 32,6%, respectivamente.

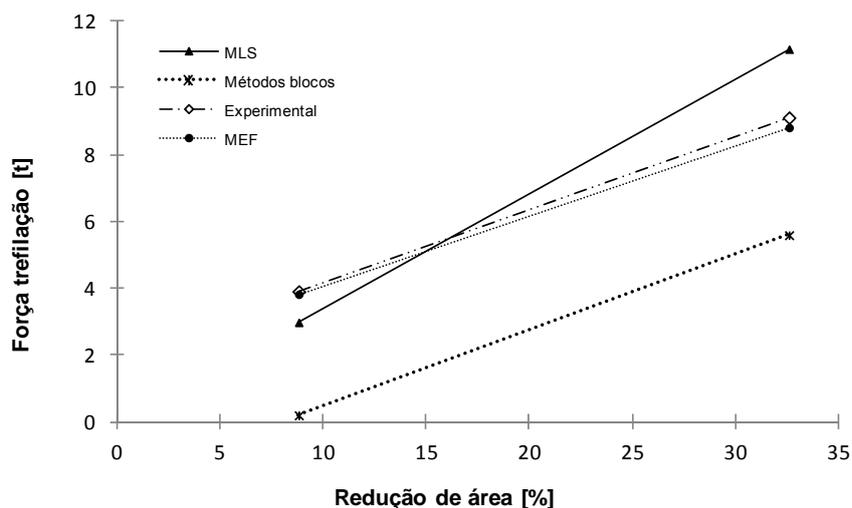


**Figura 10.** Deformação equivalente aço DIN St 52.

Observa-se em todas as imagens que a deformação é homogênea em toda a superfície do tubo sendo mais acentuada na condição de maior redução de área.

#### 4.4 Comparação das Forças de Trefilação Obtidas

A Figura 11 apresenta a curva da força de trefilação em função da redução de área obtida através dos métodos experimentais e analíticos para o aço DIN St 52. O coeficiente de atrito utilizado foi do  $\mu = 0,02$ .



**Figura 11.** Comparação da força de trefilação obtida por diferentes métodos para o aço DIN St 52.

Observa-se no gráfico acima que os resultados obtidos pelos métodos dos blocos são menores que os resultados obtidos pelo MLS. Dentre estes dois métodos o MLS se aproxima mais dos dados experimentais, apresentando uma melhor concordância para reduções de área menores que 20%. Acima deste valor o MLS superestima os valores da força de trefilação, em média 22% acima do valor experimental durante todo o intervalo testado. O MEF apresentou desvios no máximo de 4% dos dados experimentais e foi o modelo que melhor representou o processo analisado.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a força de trefilação de tubos através dos modelos analíticos, de medições experimentais na linha de produção e também através da simulação de elementos finitos.

O modelo desenvolvido pelo método dos blocos apresentou resultados para a força de trefilação bastante inferiores aos obtidos pelos outros métodos de simulação numérica, analítica e experimental.

O modelo desenvolvido pelo método do limite superior apresentou resultados mais próximos dos obtidos nos experimentos em relação ao método dos blocos. Apesar disso, ainda apresentou desvios representativos dos dados experimentais para o aço DIN St 52 de até 22%.

O modelo desenvolvido pelo método dos elementos finitos apresentou os melhores resultados. Os desvios em relação aos dados experimentais foram de 4%.

Em relação aos modelos analisados conclui-se que o modelo desenvolvido pelo método dos elementos finitos é uma ferramenta superior aos métodos analíticos, uma vez que permite o acompanhamento do esforço da trefilação ao longo do processo, fornecendo resultados às cargas de trefilação e às deformações localizadas, além do menor desvio em relação aos resultados experimentais.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a V & M do Brasil, pela oportunidade de realizar este projeto.

## REFERÊNCIAS

- 1 HELMAN, H.; CETLIN, P. R. *Fundamentos da conformação mecânica dos metais*. 2. ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1993.
- 2 BUTTON, S. T. *Trefilação*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 63p.
- 3 NEVES, F. O. *Análise das tensões residuais em tubos trefilados de aço inox ABNT 304*. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- 4 LANGE, K. *Handbook of metal forming*. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1985. p. 6.1-6.26.
- 5 CORRÊA, E. C. S. *Aspectos do encruamento de Metais Previamente Deformados a Frio*. 2004. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- 6 AVITZUR, B. *Handbook of Metal-Forming Process*. N. York: John Wiley & Sons, 1983.
- 7 ROWE, G.W. *Principles of Industrial Metal Working Processes*. 4. ed. London: Edward Arnold, 1977. 407 p.
- 8 AVITZUR, B. Analysis of wire drawing and extrusion through conical converging dies. *J. Eng. Industry*. [S.l.], p. 305-316, 1964.
- 9 UM, K. K.; LEE, D. N. An upper bound solution of tube drawing. *J. Mat. Tech.*, v. 63, p. 43-48, 1997.
- 10 DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. 2. ed. London: SI Metric, 1988. 751 p.