

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE FERRAMENTAS DE TREFILAÇÃO DE TUBOS, UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Alexandre Jacob Alves - alexdeco@zipmail.com.br
Jayme Pereira de Gouvêa - jpg@metal.eeimvr.uff.br

Resumo. *O trabalho é um desenvolvimento conjunto entre a Universidade Federal Fluminense e a empresa Vallourec e Mannesmann Tubes (V&M), que forneceu três geometrias de matrizes e duas de mandris (fixo e flutuante), para estudar a influência dos parâmetros do processo de trefilação de tubos (coeficiente de atrito (CA), ângulo de trabalho e tipo de ferramenta), na força de puxada, tensões nos componentes, desgaste das ferramentas, e grau de encruamento do tubo.*

Foi feito um modelamento matemático e uma simulação numérica do processo de trefilação de tubos utilizando o Método dos Elementos Finitos auxiliado pelo programa ANSYS®. A validação do modelo foi obtida pela comparação dos resultados entre os ensaios de tração feitos em amostras de tubos trefilados fornecidas pela V&M, para verificação do grau de encruamento e os obtidos numericamente após a simulação do processo de trefilação.

A partir das simulações podemos citar como principais conclusões:

- *Os conjuntos de ferramentas que utilizam mandris móveis tendem a produzir menores forças de puxada, tensão, e desgaste.*
- *A utilização do mandril flutuante limita-se a condições favoráveis de lubrificação ($CA < 0,07$);*
- *A diminuição do coeficiente de atrito acarreta menor desgaste e eleva o nível de tensão, o que pode ocasionar falha por fadiga.*

Palavras-chave: *tubo, trefilação, simulação, elementos finitos, Ansys.*

1. INTRODUÇÃO:

Nas últimas décadas foi considerável o progresso tanto no desenvolvimento de novas técnicas e processos, quanto na construção de tratamentos analíticos e métodos de avaliação dos processos de conformação de metais. Embora existam diversas formas de conformação, o seu principal objetivo é produzir a mudança de forma desejada. Tendo como maiores interesses por parte dos engenheiros, a força necessária para a operação, as tensões agindo nos componentes do processo e as propriedades do material trabalhado, propriedades estas que afetam o processo, bem como o processo às afeta.

Modernamente, conformação de metais pode ser entendida como a combinação de um melhor entendimento do comportamento do material e mecânico de uma dada operação, com a habilidade de explorar este conhecimento para melhorar um processo existente ou desenvolver novos processos. Isto é, portanto uma mistura de teoria, experiências, e prognóstico do comportamento de um material sob novas circunstâncias que podem ser criadas como mudanças nas condições de lubrificação, novos materiais processados, diferentes ferramentas, grau de deformação em um único passo, etc.

Na medida que a globalização avança, e a concorrência pelo mercado se torna cada hora mais acirrada, questionamentos nas indústrias, tais como, a importância do coeficiente de atrito? ângulo de trabalho ideal? dentre outras, que visam a diminuição dos custos e aumento da produtividade, se tornam mais frequentes, e suas respostas cada vez mais complexas e dispendiosas para serem buscadas nos métodos tradicionais de ajuste por tentativas (try-out). Cresce assim, a intensa busca em todos os setores industriais, de simulações numéricas de seus processos.

Este trabalho utiliza-se do método dos elementos finitos com o auxílio do código ANSYS, como ferramenta para a simulação computacional do processo de trefilação de tubos ressaltando que, uma vez modelado, a facilidade de se utilizar tal método pode ser extremamente útil requerendo menor custo e tempo que qualquer outra forma de análise de processos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Ferramentas de trefilação analisadas

- **Mandril:** O mandril é o componente do processo de trefilação responsável para definir o diâmetro interno do tubo, desta forma ele fica localizado na parte interna do tubo (fig. (4)). Este trabalho utiliza dois tipos de mandril, o primeiro será chamado de mandril fixo (fig (1-a)), e o segundo de mandril flutuante (fig.(1-b)).

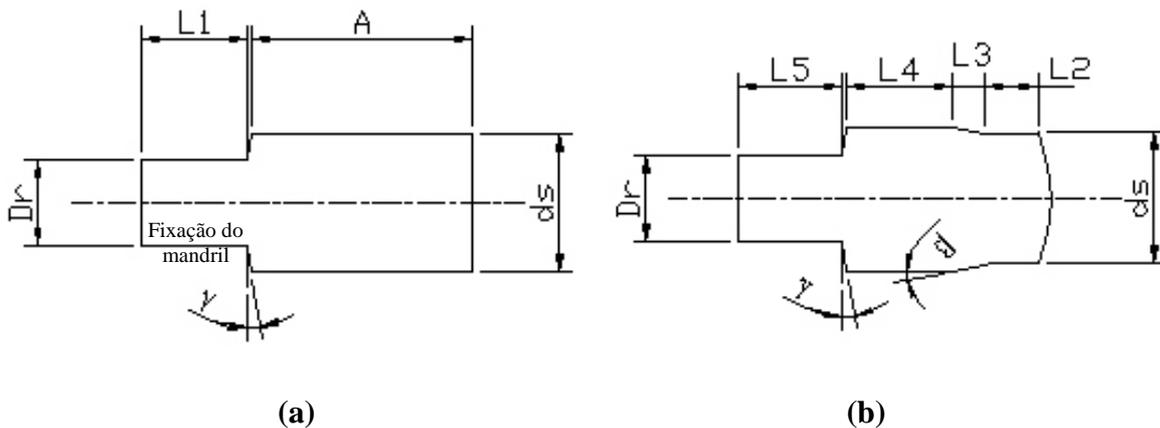


Figura 1 (a) Mandril Fixo. (b) Mandril Flutuante

- **Matriz:** É o componente do processo de trefilação responsável pela redução do diâmetro externo da peça. Possui três regiões principais, o cone de trabalho (3) onde a redução efetivamente ocorre, cilindro de calibração (2), e o cone de saída (1). (ver fig (2)) Utiliza-se neste trabalho três matrizes, que se diferem no ângulo do cone de trabalho, de 10° , $12,5^\circ$ 15° .

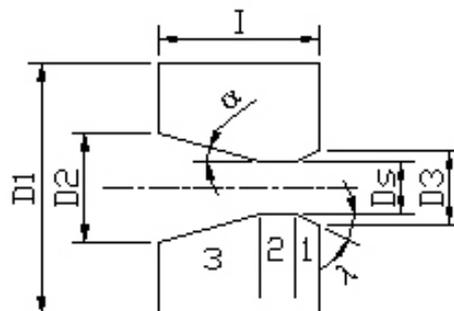


figura 2. Matriz

Os dois tipos de mandril são combinados com os três tipos de matriz, dando um total de 6 conjuntos matriz-mandril aqui estudados. Para facilitar a dissertação deu-se nomes aos 6 conjuntos o qual serão chamados ao longo do trabalho.

- **Conjunto 1** : Mandril Fixo e Matriz de 10°
- **Conjunto 2** : Mandril Fixo e Matriz de $12,5^\circ$
- **Conjunto 3** : Mandril Fixo e Matriz de 15°
- **Conjunto 4** : Mandril Flutuante e Matriz de 10°
- **Conjunto 5** : Mandril Flutuante e Matriz de $12,5^\circ$
- **Conjunto 6** : Mandril Flutuante e Matriz de 15°

2.3. Peça trabalhada

O tubo estudado possui as seguintes dimensões iniciais:

- Diâmetro externo: 33,4mm
 - Espessura: 3,38 mm
- Sofrendo uma redução de área de 26,55 % , passando para uma dimensão final de:
- Diâmetro: 29,0 mm
 - Espessura: 2,85 mm

2.4. Materiais utilizados

Tabela 1. Propriedades dos materiais utilizados

COMPONENTE	MATERIAL	MÓDULO DE ELASTICIDADE E (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON ν
MATRIZ	Metal duro – classe G2	590.000	0,33
MANDRIL FIXO	Metal duro – classe G2	590.000	0,33
MANDRIL FLUTUANTE	Metal duro – classe G2	590.000	0,33
TUBO	Aço AISI 1010	210.000	0,33

Por sofrer plastificação, o tubo além do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson necessita da curva total de escoamento, o qual foi obtida por um ensaio de tração realizado em amostras antes da trefilação.

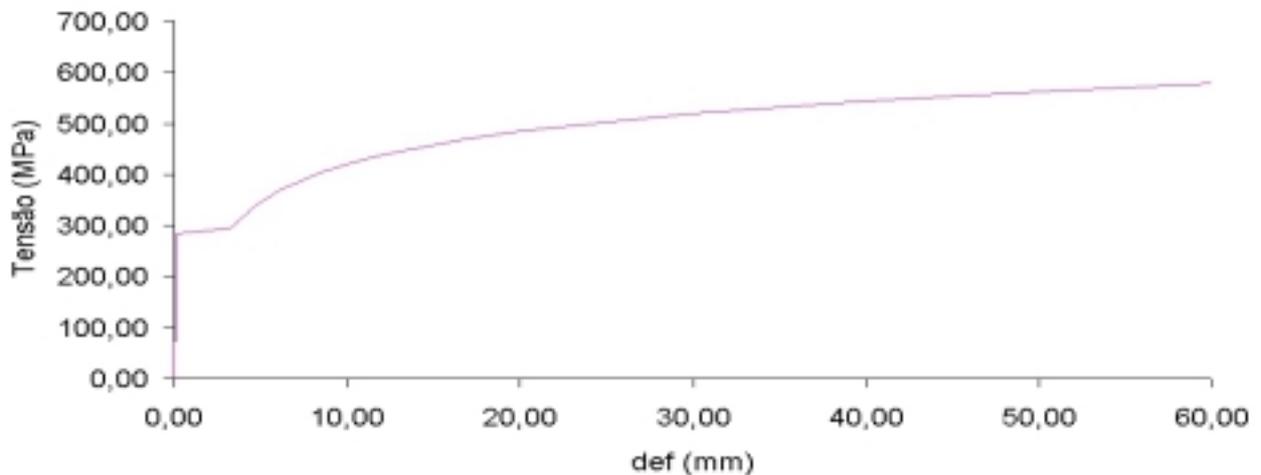


Figura 4. Curva de escoamento do Aço AISI – 1010

2.5. Modelamento e Simulação

É mostrado na fig.3 o modelo utilizado para a simulação, repare que somente é apresentado metade da seção reta dos componentes, o que é devido à utilização de axissimetria no modelo.

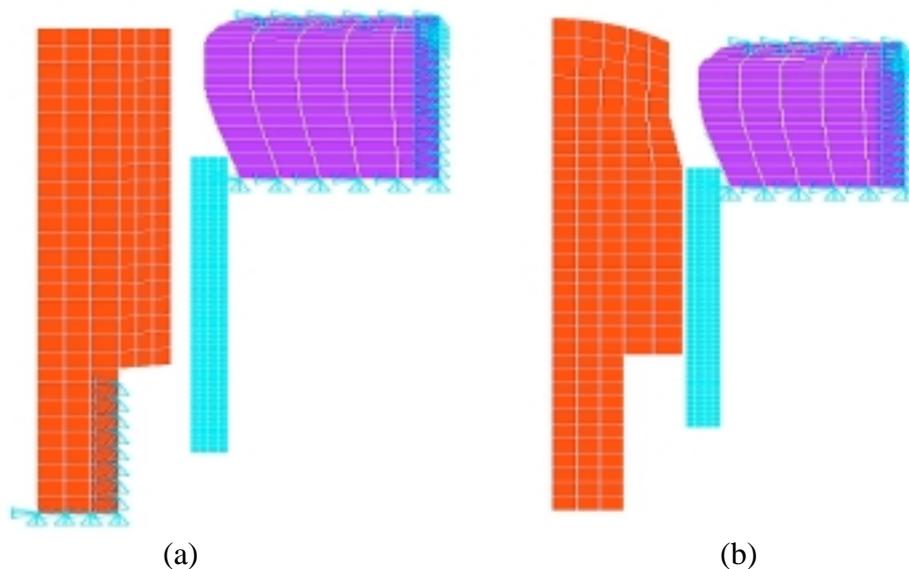


figura 5 (a) Sistema com Mandril Fixo. (b) Sistema com Mandril Flutuante

2.5.1. Geometria

A construção das geometrias dos componentes do processo foi realizada diretamente no Ansys, tomando-se o cuidado de fornecer um arquivo de entrada de dados de fácil acesso e manuseio, permitindo variar qualquer um dos parâmetro geométrico mostrado anteriormente, obtendo rápida resposta.

2.5.2. Elementos Utilizados

- Para todos os componentes do processo utilizou-se um elemento plano, axissimétrico, com quatro nós, denominado no ANSYS como “Plano 42”.
- Para a região da interface entre ferramentas e peça, utilizou-se um elemento que promove o contato entre os elementos, permitindo o deslizamento da peça sobre as ferramentas, denominado no Ansys “Contact 48”.

2.5.3. Restrições e Carregamentos

- **Matriz:** O movimento da matriz foi restringido em todas as direções nas suas paredes externas, como mostra a fig. 5.
- **Mandril:** O mandril fixo se caracteriza por possuir uma posição de trabalho definida, sendo fixado através de uma barra presa em sua extremidade esquerda (fig. 5-a) que restringe o seu movimento longitudinal. O mandril flutuante se caracteriza por não possuir a priori uma posição fixa de trabalho, ele fica livre para encontrar a sua posição de equilíbrio durante o processo.
- **Tubo:** O tubo é o componente que recebe o carregamento propriamente dito. Na realidade é imposto o deslocamento de seus nós superiores na direção y, e conseqüentemente o deslocamento de toda a peça, o Software fornece como resultado a força necessária para que este deslocamento ocorra.
Este carregamento é feito de maneira gradativa (passos de carregamento), até que o sistema atinja um regime estacionário, ou seja, aumentando-se o deslocamento, a força e a distribuição de tensão não mais variam.

2.6. Método de Análise:

Será analisada a influência do ângulo de trabalho, tipo de mandril e coeficiente de atrito nos seguintes parâmetros:

- Força de puxada - que representa o consumo de energia do processo.
- Tensões equivalentes máximas agindo nos componentes - que representa o maior ou menor esforço requerido nos componentes.
- Força de atrito máxima atuando nas peças, que representa o conjunto que promove maior ou menor desgaste superficial dos componentes.

Primeiramente é feito simulações com os seis tipos de conjuntos fixando o valor do coeficiente de atrito (CA) para um valor típico de 0,05 sugerido por Rowe, 1977. Plota-se os resultados em gráficos e analisa-se a influência do ângulo de trabalho e tipo de mandril

A seguir fixa-se o conjunto de ferramenta e varia o coeficiente de atrito. Este procedimento é realizados com os conjuntos 2 e 5, por apresentarem mandris diferentes. Mais uma vez plota-se os resultados em gráficos e a influência do atrito pode ser assim analisada.

2.7. Validação

A validação do modelo foi baseada no grau de encruamento adquirido pelo material após o processo de trefilação, comparando o resultado prático e numérico.

Foi fornecido pela empresa Valorei e Mannesmann Tubes, amostras de tubos de material aço AISI 1010 trefilado com um determinado conjunto de ferramenta e uma redução de área especificada, onde foi feito o ensaio mecânico de tração para se verificar o grau de encruamento alcançado pela peça. Paralelamente fez-se a simulação numérica do processo de trefilação ao qual foi submetido esta peça juntamente com a simulação do ensaio de tração.

A figura 6 curva abaixo representa o material AISI 1010, trefilado pelo conjunto 2, ou seja, mandril fixo e matriz de $12,5^\circ$, com 26,55% de redução de área.

As novas curvas de encruamento foram plotadas juntamente com a curva original do material encontrada no ensaio de tração, antes de ser submetido ao processo de trefilação.

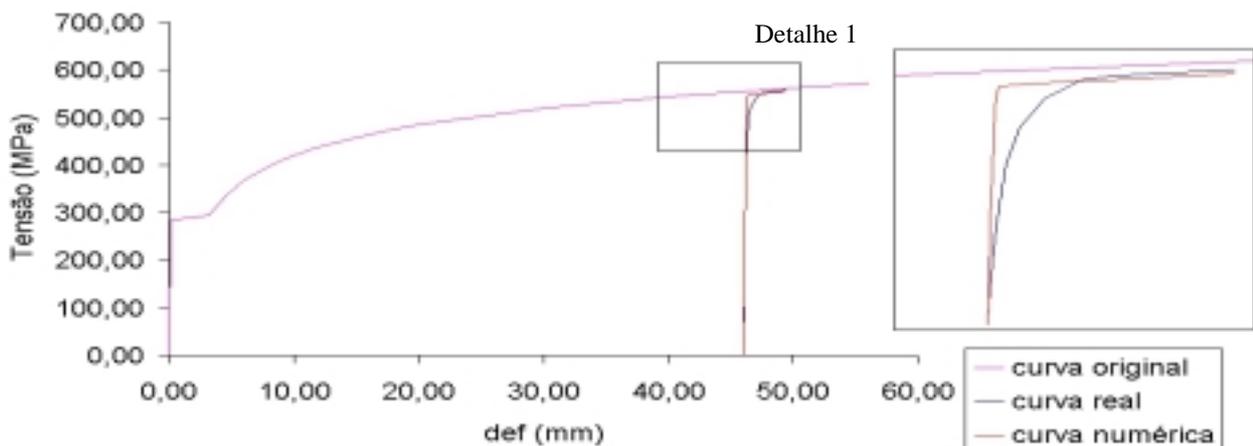


Figura 6. Comparação das curvas de escoamento – Validação

Perceba que as curvas reais e numéricas possui após o escoamento um patamar de crescimento da tensão muito próximos com erro aproximado de 0,36 %, diferindo-se apenas na transição entre a fase plástica e elástica, onde a curva real apresenta uma passagem mais suave.

Outro ponto a se destacar é a diferença dos patamares da curva original com as outras duas, o que se deve ao fato de após o processo de trefilação, além de encruado o tubo está sujeito a tensões residuais essencialmente de tração, o que leva a uma pré-tensão trativa no tubo que favorece a ruptura precoce durante o ensaio.

3. Resultados e Discussões:

3.1. Distribuição das tensões equivalentes de von Mises

Segue abaixo figuras que ilustram os resultados do nível de tensões equivalentes de von Mises fornecida pelo Ansys. São apresentados aqui somente os conjuntos 2 e 5 como forma de ilustração, os demais resultados serão apresentados sob forma de gráficos.

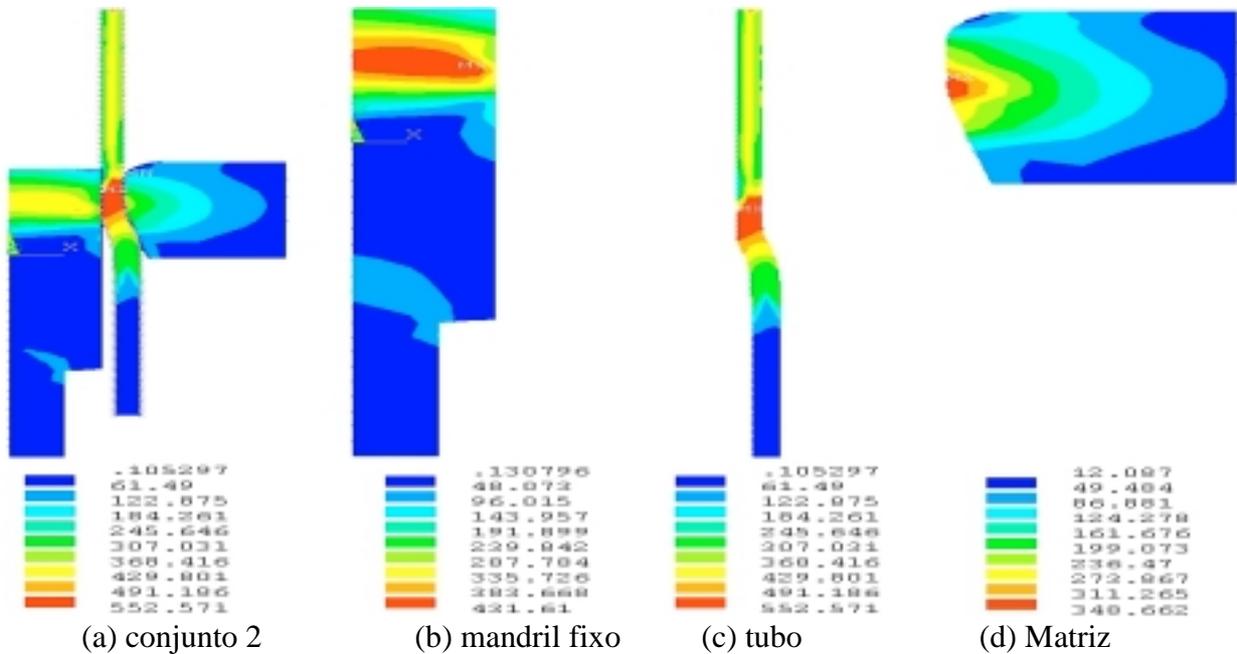


Figura 7. Distribuição das tensões equivalentes de von Mises – Conjunto 2

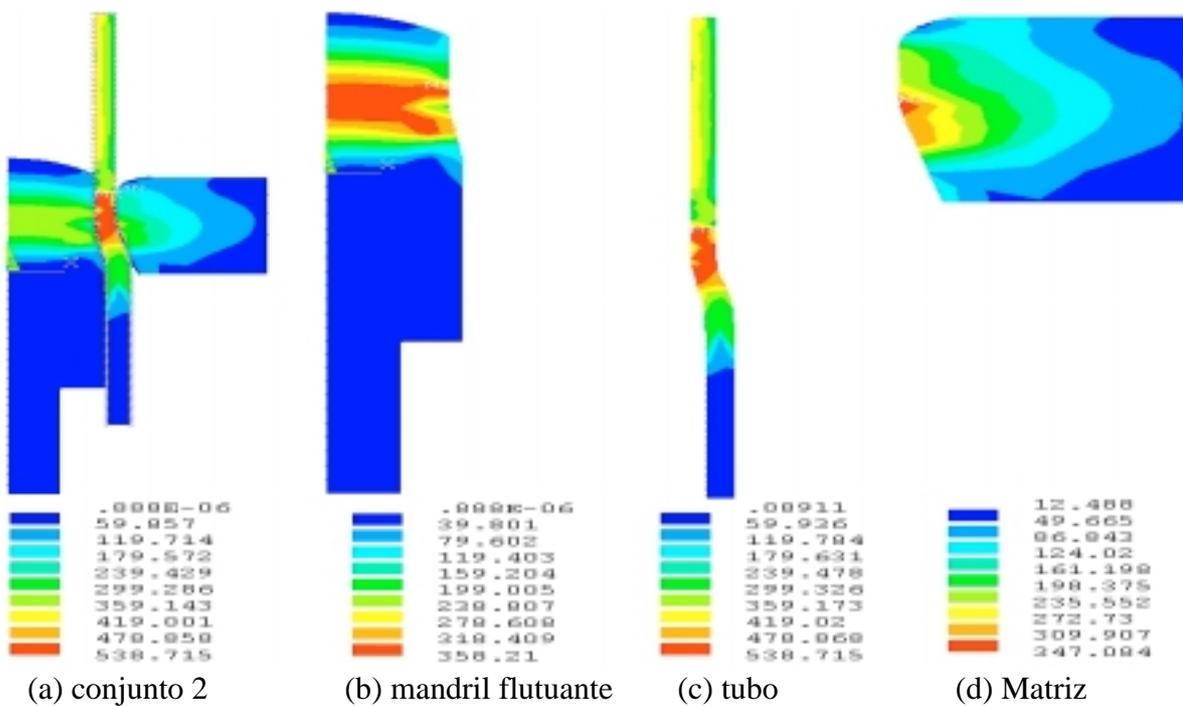


Figura 8. Distribuição das tensões equivalentes de von Mises – Conjunto 5

3.2. Influência do ângulo de trabalho e coeficiente de atrito:

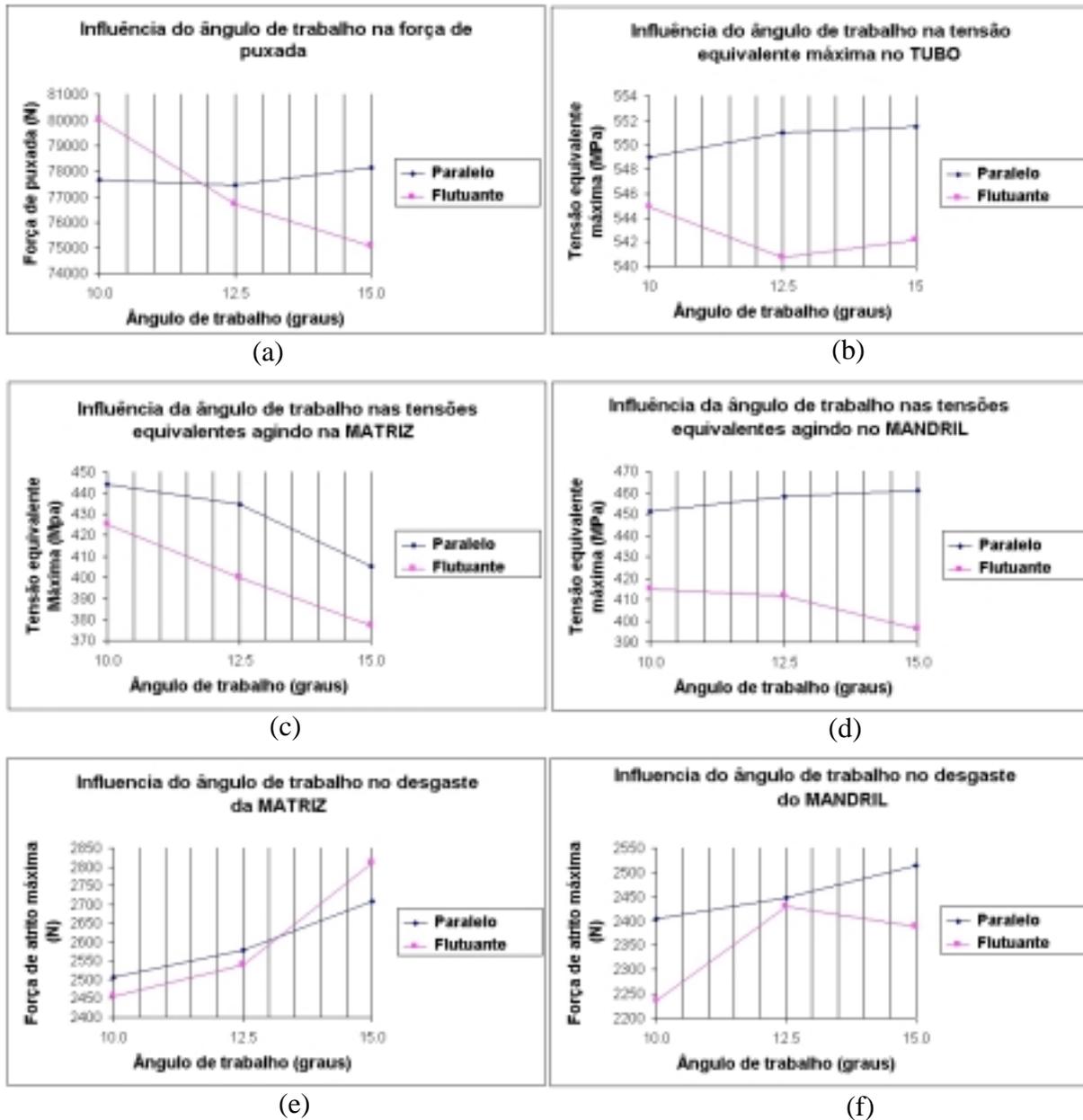


Figura 9. Influência do ângulo de trabalho

- O aumento do ângulo de trabalho acarreta num aumento da força de flexão inicial da parede do tubo, ao mesmo tempo em que diminui a área de contato entre tubo e ferramenta, diminuindo a força de atrito que se opõe ao movimento. A fig. (9-a) mostra que no mandril flutuante a força de puxada decresce (economia de energia) com o aumento do ângulo, devido a maior importância do atrito neste processo, que é responsável pelo “arraste” da ferramenta até sua posição de equilíbrio. Já o mandril fixo apresenta uma pequena variação em seus valores, pois o aumento da força de flexão e a diminuição da força de atrito variam na mesma proporção, de qualquer modo o seu valor atinge um ponto ótimo (menor consumo) com o ângulo de 12.5°.
- A fig. (9-c) mostra que o nível de tensão equivalente máxima agindo na matriz diminui com o ângulo de trabalho, ou seja, o aumento do ângulo de trabalho gera menor esforço neste componente.
- Na fig. (9-d) verifica-se que para o conjunto de ferramenta que utiliza mandril fixo, o aumento do ângulo de trabalho acarreta num maior esforço de trabalho do mandril, enquanto que nos conjuntos de mandris flutuantes provoca um aumento das tensões equivalentes máxima neste componente. No mandril fixo, ao aumentar o ângulo de trabalho, o contato inicial do tubo com o

mandril ocorre de maneira mais incisiva quando se aumenta o ângulo de trabalho. Quando se utiliza mandril flutuante, o aumento do ângulo de trabalho faz com que o contato do mandril com o tubo ocorra mais cedo, o que aumenta a área de contato entre eles e conseqüentemente uma melhor distribuição das tensões, diminuindo o valor da tensão equivalente máxima.

- Na fig. (9-e) é possível perceber que o aumento do ângulo de trabalho provoca um aumento da força de atrito máxima agindo na matriz, ocorrendo conseqüentemente, maior desgaste. Este aumento leva a uma incidência mais ortogonal do tubo na matriz, aumentando assim a componente da força que age perpendicularmente (força normal) ao contato. Assim a força de atrito, que é diretamente proporcional à força normal, aumenta.

- A fig. (9-f) mostra que, para o conjunto de ferramentas que utilizam mandril fixo, há o aumento de desgaste do mandril com o aumento do ângulo de trabalho, o que é explicado pela incidência do tubo no mandril de maneira mais ortogonal aumentando a força normal no contato. Com a utilização do mandril flutuante, a força de atrito assume seu valor máximo com o ângulo de trabalho 12,5°.

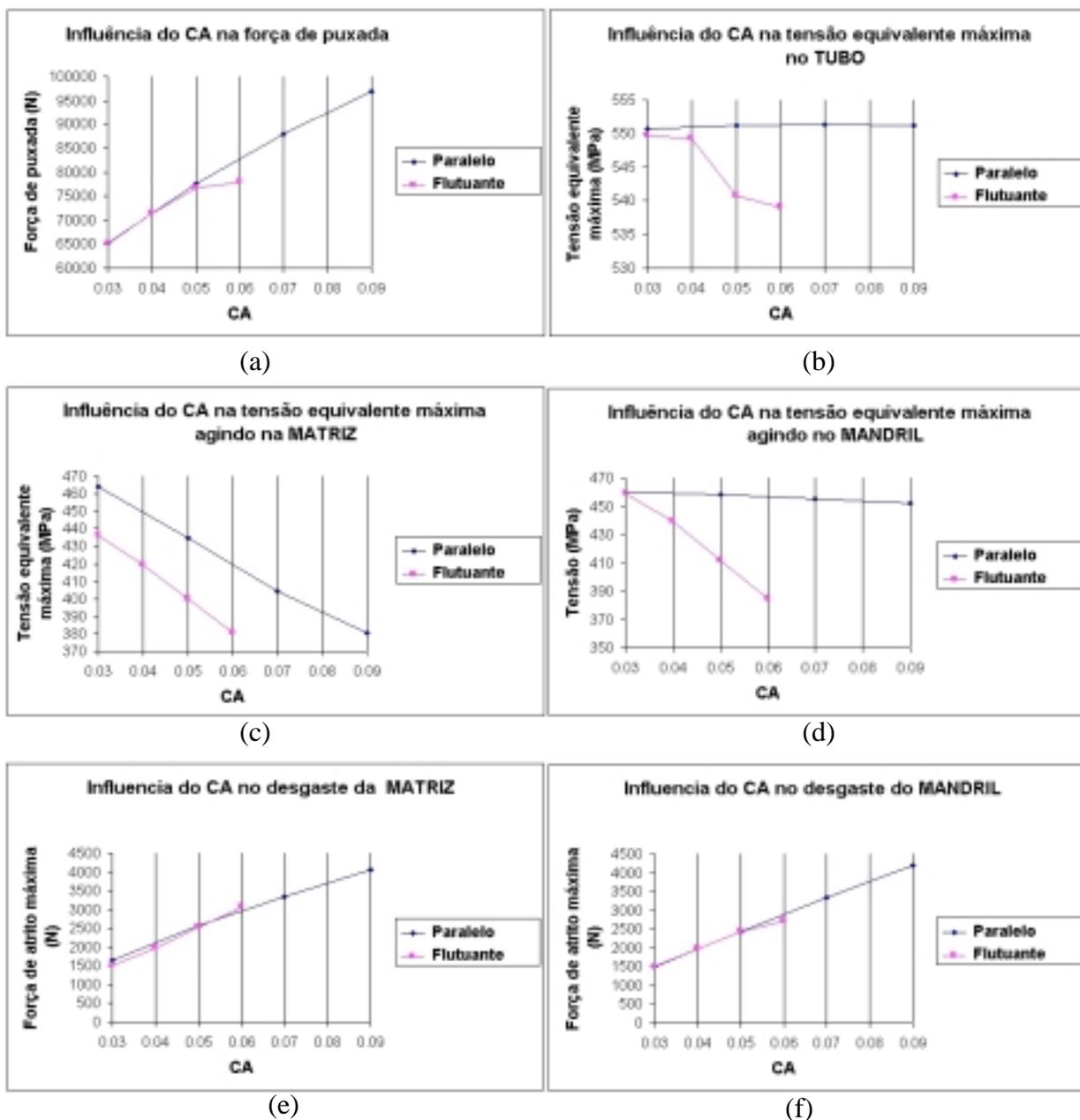


Figura 10. Influência do ângulo de trabalho

- Para o mandril flutuante não se obteve sucesso na simulação com $CA > 0,06$, e mesmo para este valor, verificou-se uma região de grande concentração de tensão na parede do tubo após a fiação. Desta forma foi realizado simulações com $CA = 0,03, 0,05, 0,07, 0,09$ para mandril fixo e $0,03, 0,04, 0,05, 0,06$ para flutuante.
- A fig.10-a mostra que o valor da força de puxada aumenta com o aumento do CA, o que requer maior consumo de energia. Como o valor da força de atrito é diretamente proporcional ao CA, o seu aumento resultará num acréscimo das forças que se opõem ao movimento requerendo uma força de puxada maior para que o processo de trefilação ocorra.
- Na fig 10-b percebe-se que com a utilização do mandril fixo não se verifica alteração da tensão equivalente máxima no tubo, o que indica que a variação do CA não influencia no grau de encruamento adquirido pelo material. O mesmo não ocorre no mandril flutuante, onde o aumento do CA acarreta uma diminuição da tensão equivalente. Este fato ocorre devido ao arraste do mandril pelo tubo até que este encontre uma posição de equilíbrio. Existindo uma boa lubrificação, este “arraste” é comprometido, e a posição de equilíbrio fica aquém da ideal, tornando o processo similar ao que utiliza mandril fixo, aproximando os valores encontrados pelos dois sistemas.
- Ao contrário do que intuitivamente possa parecer a figs. (10-c e 10-d) mostra que o nível de tensão equivalente máxima agindo nas ferramentas é inversamente proporcional ao coeficiente de atrito, ou seja, o aumento do CA provoca uma diminuição no esforço a que a matriz é submetida durante o processo. O que se ao fato da diminuição do atrito gerar uma área de contato menor entre peça e ferramenta, aumentando a concentração das tensões em regiões menores.
- Como a força de atrito é diretamente proporcional ao CA, o desgaste das ferramentas tem um crescimento aproximadamente linear com o seu aumento como mostra as figs (10-e e 10-f).

4. CONCLUSÕES:

- a) Os conjuntos de ferramentas que utilizam mandris flutuantes, em geral, produzem menores forças de puxada (consumo de energia), tensões equivalentes máxima (esforço) nos componentes, força de atrito (desgaste). Diferenças que se acentuam quando ângulos de trabalho maiores são utilizados.
- b) Do ponto de vista consumo de energia, conclui-se que os conjuntos que utilizam mandris fixo, a variação do ângulo não acarreta grande economia. Para os conjuntos com mandris flutuante a economia de energia aumenta com o ângulo.
- c) A não convergência das simulações com mandris flutuantes com $CA > 0,06$, sugere que esses valores podem levar a um processo de ruptura do tubo. Conclui-se assim, que mandris flutuantes não são adequados a condições de atrito desfavoráveis.
- d) O aumento do CA representa uma considerável elevação na força de puxada, representando um aumento do consumo de energia.
- e) A diminuição do CA provoca o decréscimo da força de atrito máxima e conseqüentemente do desgaste superficial da ferramenta, entretanto há um aumento das tensões equivalentes o que pode acelerar um processo de falha por fadiga.
- f) A utilização de ângulos de trabalho maior acarreta menor esforço (tensão equivalente máxima) da matriz e do mandril flutuante, não verificando grande influência no esforço do mandril fixo. Ao passo que, em geral, provocam maior desgaste (força de atrito máxima) dos componentes.

5. APLICAÇÕES PRÁTICA DO ESTUDO

Todos os resultados aqui apresentados serão utilizados pela empresa Vallourec e Mannesmann Tubes para otimização dos seus processos de fabricação de tubos trefilados. Apesar disso, temos a consciência de que uma infinidade de outros resultados poderiam e podem ser obtidos. Fica de mais valioso deste estudo, não os resultados em si, mas a ferramenta desenvolvida que pode ser utilizada para prever a influência dos parâmetros aqui analisados e de diversos outros, bem como adequá-la a outros processos de conformação mecânica que se queira estudar.

6. REFERÊNCIAS:

- Blazynski, T.Z.,1976, “ METAL FORMING tools Profiles and Flow”, Ed. The macmillan Press Ltda, London, England, pp.3-65, 69-200.
- Rowe, G. W.,1977, “Principles of Industrial Metalworking Processes”, Ed Edward Arnold Ltda, London, England, 1-48, 151-166.
- ZienKiewicz, O., C. and Taylor, R.,L., 1991, ”The Finite Element Method”, McGraw-Hill Book Company, England, pp. 211-304.
- Hosford, W., F. and Caddell, R., M., 1993, “Metal Forming”, Ed. PTR Prentice Hall, New Jersey, pp. 1-70, 80-84, 105-110.
- Hoffman, O. and Sachs, G., 1953, “Introduction to the Theory of Plasticity for Engineers”, McGraw-Hill Book Company, New York, pp.193-201.

7. DIREITOS AUTORAIS:

Alexandre Jacob Alves
Jayme Pereira de Gouvêa

PERFORMANCE ANÁLISES OF TUBES DRAWING TOOLS, BY FINITE ELEMENT METHODS

Alexandre Jacob Alves

Universidade Federal Fluminense – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda.
Rua Angelino de Oliveira 157 – Matadouro - Barra do Piraí, RJ – CEP 27115-130
Phone: (24) 2442-0198
email: alexdeco@zipmail.com.br

Jayme Pereira de Gouvêa

Universidade Federal Fluminense – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda.
Av. dos Trabalhadores, 420 – Vila Sta Cecília, Volta Redonda, RJ CEP 27255-125
Phone: (24)3344-3022
e-mail: jpg@metal.eeimvr.uff.br

Abstract. *This Work is a development between Universidade Federal Fluminense and Vallourec and Mannesmann Tubes (V&M) who provides three matrices and two mandrel (fixed and floating) designs to study the influence of the parameters of tubes drawing process (friction coefficient (FC), work angle, kind of tools), in the drawing forces, components stresses, tools abrasion, and the tube hardening.*

It was made a mathematic modeling and a numerical simulation of the tube drawing process by Finite Element Method assisted by ANSYS®) software. The model validation was obtained by comparison of the results between the tensile test made on drawn tubes provide by V&M where verify the hardening and the obtained numerically after the drawing process simulation.

From these simulation the principals concludes were made:

- *The tools assembly that use floating mandrel have the tendency to produce lowest drawing forces, stresses level, and abrasion.*
- *The floating mandrel utilization is limited for good lubrication conditions ($FC < 0,07$);*
- *The friction coefficient decrease, cause the lowest abrasion, but it increases the stresses level, which can cause fatigue crack.*

Keywords: *tubes, drawing, simulation, finite element method, Ansys*