

ANÁLISE TEÓRICA DO PROCESSO DE EXTRUSÃO ROTATIVA DE TUBOS ¹

Thiago Assis Dutra ²
Luciano Pessanha Moreira ³
Geovani Rodrigues ⁴
Marco Aurélio Ledig Ribeiro ⁵
Luiz Carlos Rolim Lopes ⁶

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise teórica do processo de extrusão rotativa usado na redução de espessura de tubos sem costura para fabricação de cilindros leves de armazenamento de gás natural veicular. Para tal, adotou-se um modelo analítico para estimar os esforços de conformação nos processos de extrusão a ré ou avante para as condições de normalizado e temperado e revenido do material do tubo. As propriedades mecânicas foram avaliadas a partir de ensaios de tração uniaxial em corpos de prova extraídos ao longo do comprimento do tubo. O modelo adotado fornece os limites inferiores para as forças de extrusão correspondente a solução do método do trabalho ideal. Em ambos os tipos de processos, a principal componente de força se encontra na direção radial seguida pelas direções axial e tangencial ao passo que as condições iniciais do tubo fornecem esforços comparáveis para um mesmo nível de redução de espessura e tipo de processo.

Palavras-chave: Extrusão rotativa; Tubos sem costura; Conformação mecânica.

THEORETICAL ANALYSIS OF THE FLOW FORMING PROCESS OF TUBES

Abstract

This work presents a theoretical analysis of the flow forming process used for the thickness reduction of seamless tubes to the manufacture of cylinders for natural gas storage. For this purpose, an analytical model is adopted to predict the forces in the backward and forward flow forming processes for the normalized and quenched-tempered tube material conditions. The mechanical properties were obtained from uniaxial tensile tests performed on specimens cut along the tube length. The adopted model gives the minimum values for the flow forming forces corresponding to the solution of the ideal work method. In either process types, the radial force is the most important followed by the axial and tangential components whereas the initial tube conditions give similar forces for the same level of thickness reduction and process type.

Key words: Flow forming; Seamless tubes; Metal forming.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Graduando de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, thiago.dutra@metal.eeimvr.uff.br

³ Engenheiro Mecânico, D.Sc., Professor Adjunto, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br

⁴ Engenheiro Químico, D.Sc., Pesquisador Associado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, geovani@metal.eeimvr.uff.br

⁵ Engenheiro Mecânico, M.Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, ledig@metal.eeimvr.uff.br

⁶ Engenheiro Metalúrgico, D.Sc., Professor Adjunto, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, rolimlop@metal.eeimvr.uff.br

1 INTRODUÇÃO

Em geral, o processo de extrusão rotativa pode ser considerado como uma operação de repuxo onde um esboço de formato plano ou cilíndrico, é primeiro fixado ao cabeçote de um mandril rotativo e, em seguida, conformado por uma ou mais ferramentas para obtenção de peças de simetria axial. Neste tipo de processo, (Figura 1), a deformação plástica do esboço ocorre de forma localizada e, portanto, os esforços necessários à conformação são relativamente menores em comparação aos processos convencionais por estampagem. As aplicações dos processos rotativos de repuxo variam desde painéis de cozinha, cilindros para gases industriais até componentes de mísseis, entre outros. A extrusão rotativa de tubos pode ser ainda classificada de acordo com o fluxo do material, conforme esquematizado na Figura 1.

No primeiro tipo, conhecido como extrusão rotativa avante, tanto a ferramenta como o fluxo de material se movimentam na mesma direção. Já no segundo tipo, extrusão a ré, o fluxo do material conformado ocorre em sentido contrário ao movimento axial da ferramenta.

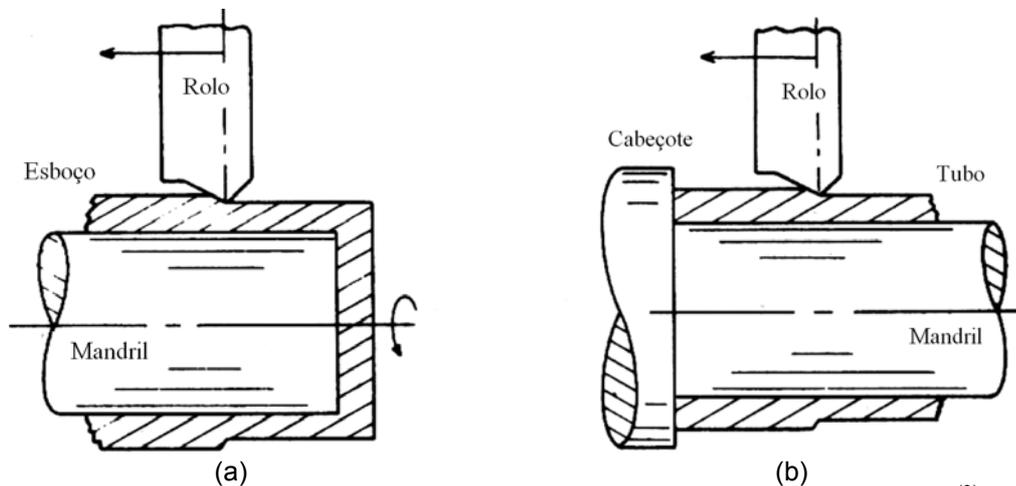


Figura 1. Extrusão rotativa de tubos: (a) avante e (b) a ré (Kobayashi e Thomsen⁽³⁾).

As diferenças básicas entre os tipos de extrusão rotativa de tubos são quanto ao formato do esboço, a saber, copo estampado (*avante*) e tubo (*a ré*) e, quanto às solicitações predominantes, i.e., tração na zona deformada (*avante*) e compressão na zona não deformada (*a ré*). Em ambos os casos, o esboço é submetido a reduções incrementais de espessura através de tensões compressivas atuantes em zonas localizadas entre o mandril e a área de contato com o rolo, o qual, por sua vez, tem geometria cônica com ângulo de ataque, raio de adoçamento e ângulo de saída respectivamente.

A máquina de extrusão rotativa pode possuir um, dois ou três rolos. A configuração de três rolos, dispostos a 120 graus, é empregada na maior parte dos casos onde se procura um compromisso entre a rigidez da máquina, acabamento superficial e tolerâncias dimensionais.⁽¹⁾ Em razão do uso crescente de estruturas leves em conjunto com materiais de elevada resistência e graças à automação de máquinas notadamente por CNC, os processos de conformação mecânica como a extrusão rotativa têm-se tornado bastante atrativos graças ao baixo custo de ferramental, boa produtividade e versatilidade de diâmetros em comparação à estampagem profunda de chapas.

É interessante, portanto, avaliar os esforços/potências necessários ao processo de extrusão rotativa de modo a analisar a influência de parâmetros quanto ao estado inicial do material do esboço, geometria do ferramental e condições de operação como, por exemplo, rotação do mandril, avanço do rolo e máxima redução por passe. Os principais modelos propostos na literatura para descrever os mecanismos de deformação plástica durante o processo de extrusão rotativa de tubos foram revisados no trabalho de Rajan et al.⁽²⁾ Entre estes, se destacam os modelos baseados nos métodos das fatias e linhas de deslizamento⁽³⁾ e no método do limite superior.⁽⁴⁾

Estes modelos analíticos possibilitam determinar, em função da redução de espessura, tanto esforços (métodos das fatias e linhas de deslizamento) quanto potências associados com o ângulo ótimo de ataque do rolo (limite superior). Em todos os casos, a hipótese de um estado plano de deformação na direção circunferencial é adotada quando o raio do tubo é muito maior em comparação a sua espessura.

O presente trabalho delinea a análise do processo de extrusão rotativa de tubos tanto a ré quanto avante, através do método das fatias e do trabalho ideal, para os materiais no estado normalizado e temperado-revenido.

2 MODELAMENTO ANALÍTICO

No que se segue, são apresentadas as equações do modelo de extrusão rotativa de tubos proposto por Kobayashi e Thomsen.⁽³⁾ Em geral, o raio do tubo é muitas vezes superior em comparação a sua espessura, o que possibilita assumir que o processo de extrusão rotativa acontece sob condições de um estado plano de deformações, ou seja, que as deformações do esboço na direção circunferencial são iguais a zero. Ademais, as forças de atrito em decorrência do contato entre o esboço e o ferramental são desprezadas assim como os esforços entre o mandril e o esboço. A Figura 2 mostra as variáveis e o sistema de coordenadas adotadas na descrição da extrusão rotativa de tubos através do método das fatias.

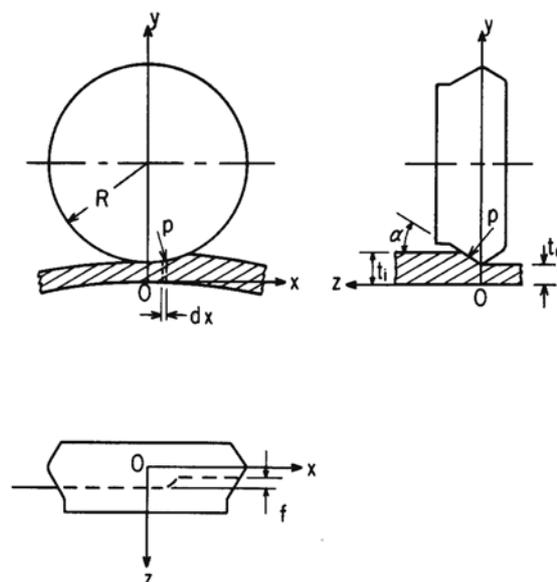


Figura 2. Sistema de coordenadas adotado na solução do problema de extrusão rotativa de tubos através do método das fatias.⁽³⁾

Em primeiro lugar, assume-se como constante a pressão de contato p entre as superfícies do rolo e do tubo. Deste modo, a força normal de contato que atua numa área infinitesimal dA é definida por $dF = p dA$ e suas componentes nas direções tangencial (x), radial (y) e axial (z) podem ser obtidas por:

$$dF_x = p \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) dx dz$$

$$dF_y = - p dx dz$$

$$dF_z = p \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right) dx dz$$
(1)

onde os termos $(\partial y / \partial x)$ e $(\partial y / \partial z)$ são definidos ao longo da superfície de contato. Em seguida, a pressão normal p pode ser determinada através do método das fatias e em função do tipo de extrusão rotativa (avante ou a ré).

Os esforços atuantes no rolo são então obtidos pela integração da Eq. (1). A Figura 3 esquematiza a geometria de deformação entre o rolo e o tubo. A partir da Eq. (1), a força segundo a direção tangencial pode ser obtida por:

$$F_x = \iint p \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) dx dz$$
(2)

onde os limites de integração (Figura 3), são $z = 0 \rightarrow z_{ix}$ e $x = 0 \rightarrow x_0$.

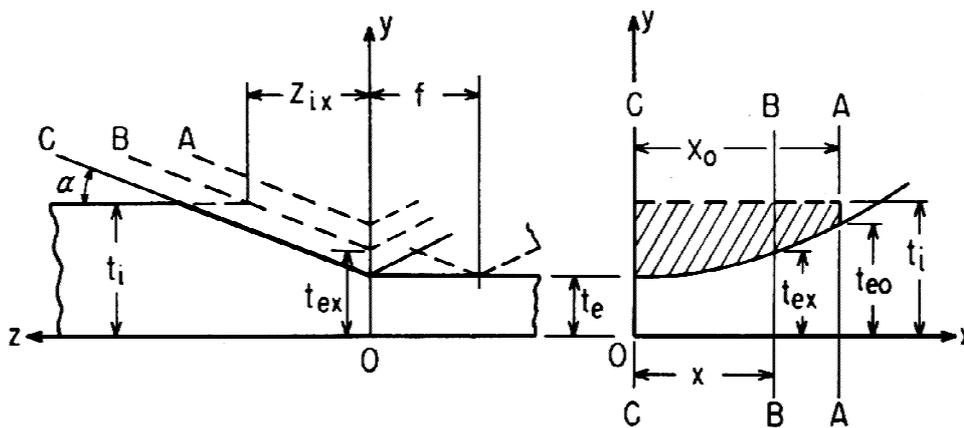


Figura 3. Geometria de deformação da extrusão rotativa de tubos.⁽³⁾

Introduzindo a pressão média de contato p_m e assumindo que os contornos AA, BB e CC permaneçam constantes, a Eq. (2) pode ser redefinida por:

$$F_x = \int_0^{x_0} p_m z_{ix} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) dx$$
(3)

A variável z_{ix} na Eq. (3) pode ser definida a partir da Figura 3 por:

$$z_{ix} = \frac{t_i - t_{ex}}{\tan \alpha} = \frac{t_i}{\tan \alpha} \left(1 - \frac{t_{ex}}{t_i} \right) \quad (4)$$

onde α , t_i e t_{ex} são respectivamente o ângulo de ataque do rolo, a espessura inicial e a espessura do tubo a uma distância tangencial x . Substituindo a Eq. (4) na Eq. (3) e em seguida, introduzindo-se uma mudança de variáveis definida por $dt_{ex} = (\partial y / \partial x)$, $0 \rightarrow t_e$ e $x_0 \rightarrow t_{e0} = t_e + f \tan \alpha$ (Figura 3), onde f é o avanço axial do rolo por rotação do mandril e t_e é a espessura final do tubo, tem-se que:

$$F_x = \frac{t_i}{\tan \alpha} \int_{t_e}^{t_{e0}} \left(1 - \frac{t_{ex}}{t_i} \right) p_m dt_{ex} \quad (5)$$

2.1 Extrusão a Ré

Na Eq. (5), a pressão média de contato para o caso da extrusão rotativa a ré, é determinada a partir da solução através do método das fatias do processo de extrusão de uma chapa no estado plano de deformação. No caso particular em que o atrito é desprezível, a pressão média de contato é definida por:

$$\frac{p_m}{\bar{\sigma}_{DP}} = \frac{t_i}{t_i - t_{ex}} \ln \left(\frac{t_i}{t_{ex}} \right) \quad (6)$$

Na Eq. (6), $\bar{\sigma}_{DP}$ é uma medida de encruamento corrigida para o estado plano de deformação e pode ser definida empregando-se o critério de von Mises por $\bar{\sigma}_{DP} = (2/\sqrt{3})\bar{\sigma}$, onde $\bar{\sigma}$ é a tensão equivalente identificada pela tensão de escoamento do tubo em tração uniaxial. Por fim, ao substituir a pressão média de contato na Eq. (5) obtém-se, após integração desta, a força tangencial normalizada para a extrusão rotativa a ré:

$$\frac{F_x}{\bar{\sigma}_{DP} t_i f} = \left[1 - \ln(1 - S_0 + \kappa) - \frac{1 - S_0}{\kappa} \ln \left(1 + \frac{\kappa}{1 - S_0} \right) \right] \quad (7)$$

onde $\kappa = (f/t_i) \tan \alpha$ enquanto que $S_0 = (t_i - t_e)/t_i$ define a redução de espessura do tubo. No caso limite em que $\kappa \rightarrow 0$, a Eq. (7) se reduz a solução obtida pelo método do trabalho ideal,⁽⁵⁾ dada por:

$$\frac{F_x}{\bar{\sigma}_{DP} t_i f} = \ln \left(\frac{1}{1 - S_0} \right) \quad (8)$$

A tensão axial na parede do tubo obtida pelo método das fatias é descrita por:

$$\frac{\sigma_z}{\bar{\sigma}_{DP}} = \ln \left(\frac{t_i}{t_{ex}} \right) = \ln \left(\frac{I}{I - S_0} \right) \quad (9)$$

a qual fornece na condição em que $\sigma_z = \bar{\sigma}_{DP}$ que a redução máxima de espessura é $S_{Máx} \sim 63\%$. Este valor pode ser visto como uma primeira aproximação do limite de flambagem para o processo de extrusão rotativa a ré de tubos em razão das restrições do método das fatias, sobretudo quanto à desconsideração das tensões de cisalhamento e do trabalho redundante.

Por outro lado, as forças normalizadas segundo as direções radial (y) e axial (z) podem ser determinadas a partir das Eqs. (1) e (6) e definidas por:⁽³⁾

$$\frac{-F_y}{\bar{\sigma}_{DP} t_i \sqrt{2 R f / \tan \alpha}} = \frac{F_z}{\bar{\sigma}_{DP} t_i \sqrt{2 R f \tan \alpha}} = 2 \left[I - \sqrt{\frac{I - S_0}{\kappa}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{\kappa}{I - S_0}} \right] - \ln(I - S_0 + \kappa) \quad (10)$$

onde R é o raio do rolo.

2.2 Extrusão Avante

Para o caso da extrusão rotativa avante, uma análise similar à anteriormente descrita pode ser aplicada à mesma. A diferença entre os dois tipos está na aplicação das condições de contorno no equilíbrio de forças, de onde resultam as equações para obtenção da pressão média de contato. Sendo assim, para o caso da extrusão rotativa avante, temos:

$$\frac{p_m}{\bar{\sigma}_{DP}} = \frac{t_{ex}}{t_i - t_{ex}} \ln \left(\frac{t_i}{t_{ex}} \right) \quad (11)$$

Ao substituímos a Eq. (11) na Eq. (5), obtém-se após integração da mesma a força tangencial normalizada para o caso da extrusão rotativa avante:

$$\frac{F_x}{\bar{\sigma}_{DP} t_i f} = \frac{1}{4 \cdot \kappa} \left\{ \begin{array}{l} (1 - S_0 + \kappa)^2 \cdot [1 - 2 \ln(1 - S_0 + \kappa)] \\ - (1 - S_0)^2 \cdot [1 - 2 \ln(1 - S_0)] \end{array} \right\} \quad (12)$$

No caso limite em que $\kappa \rightarrow 0$, a Eq. (12) se reduz a solução obtida pelo método do trabalho ideal,⁽⁵⁾ ou seja:

$$\frac{F_x}{\bar{\sigma}_{DP} t_i f} = (1 - S_0) \ln \left(\frac{1}{1 - S_0} \right) \quad (13)$$

De maneira análoga à extrusão a ré, a máxima redução de espessura do tubo $S_{Máx}$ pode ser obtida quando a tensão de escoamento atuante na região do tubo sob compressão se iguala a tensão de escoamento em compressão plana, a qual fornece $S_{Máx} \sim 63\%$.

As forças normalizadas segundo as direções radial (y) e axial (z) podem ser determinadas a partir das Eqs. (1) e (11) e definidas em:⁽³⁾

$$\frac{-F_y}{\bar{\sigma}_{DP} t_i \sqrt{2Rf' \tan \alpha}} = \frac{F_z}{\bar{\sigma}_{DP} t_i \sqrt{2Rf' \tan \alpha}} = (1 - S_0) \left[\begin{array}{l} \frac{4}{3} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{1 - S_0}{\kappa}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{\kappa}{1 - S_0}} \right\} + \frac{2}{9} \frac{\kappa}{1 - S_0} \\ - \left\{ 1 + \frac{1}{3} \frac{\kappa}{1 - S_0} \right\} \ln(1 - S_0 + \kappa) \end{array} \right] \quad (14)$$

3 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

O material empregado no processo de extrusão rotativa a ré é um aço AISI 41B30H cuja composição típica está apresentada na Tabela 1. O tubo de aço é sem costura e fornecido na condição de normalizado com dimensões nominais de 320 mm de diâmetro interno e 9,54 mm de espessura. As propriedades mecânicas do aço AISI 41B30H foram avaliadas através de ensaios de tração uniaxial realizados segundo a norma NBR6892 numa máquina universal Wolpert modelo 20 TUZ com capacidade de 200 KN. Foram retirados três corpos de prova no sentido longitudinal do tubo.

Os resultados dos ensaios de tração uniaxial estão apresentados na Tabela 2, onde σ_e , σ_r , ε_u e ε_T são o limite de escoamento a 0,2% de deformação plástica, o limite de resistência, a deformação uniforme e a deformação total à ruptura respectivamente. Nesta tabela, o coeficiente de resistência K e o expoente de encruamento n foram obtidos pelo ajuste dos valores experimentais de tensão e deformação plástica verdadeiros à lei de encruamento de Hollomon, $\sigma = K (\varepsilon^p)^n$. Em seguida, estes parâmetros foram empregados na determinação do termo de pré-deformação ε_0 referente à lei de Swift definida por:

$$\bar{\sigma} = K (\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n \quad (15)$$

aplicando-se a condição segundo a qual a deformação plástica verdadeira ε^p é igual a zero, ou seja, quando a tensão verdadeira se iguala ao limite de escoamento.

Tabela 1. Composição química do aço AISI 41B30H (% peso).

Teor	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	B	P	S
Mín.	0,28	0,40	0,15	0,20	0,80	0,15	–	0,010	0,0005	–	–
Máx.	0,33	0,60	0,35	0,30	1,10	0,25	0,35	0,030	0,002	0,015	0,010

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço AISI 41B30H normalizado.

Ensaio	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	ε_u (%)	ε_T (%)	K (MPa)	n
1.1	450	755,9	5,96	6,34	1.113	0,136
1.2	480	755,5	5,93	6,31	1.070	0,123
1.3	475	744,2	6,00	6,37	985	0,106

Além da utilização do material como recebido, analisou-se também o comportamento do aço AISI 41B30H após os tratamentos térmicos de têmpera e revenido realizados em três corpos de prova extraídos do tubo inicialmente no estado normalizado. Para este fim, foram realizados tratamentos de têmpera nas temperaturas de 737, 754 e 782 °C durante 30 minutos com resfriamento em óleo.

Estes corpos de prova foram então submetidos a um revenimento a 610 °C durante 30 minutos e, em seguida resfriados ao ar. A Tab. 3 resume as propriedades mecânicas determinadas nos ensaios de tração uniaxial em função destes tratamentos térmicos de têmpera e revenido.

Tabela 3. Propriedades mecânicas do aço AISI 41B30H no estado temperado e revenido.

Temperatura °C	σ_c (MPa)	σ_T (MPa)	ε_T (%)	K (MPa)	n	ε_0 ($\times 10^{-3}$)
737	415	621	22,4	1161	0,2148	8,3176
754	445	636	21,3	1205	0,2103	8,766
782	482	615	17,9	1244	0,1031	1,078

4 PREVISÕES NUMÉRICAS

As previsões numéricas foram obtidas a partir das Eqs. (7), (10), (12) e (14), onde inicialmente, foi observada a influência dos parâmetros de processo κ e S_0 para o material no estado como recebido (normalizado).

Posteriormente realizou-se uma análise comparativa entre os materiais no estado normalizado e temperado-revenido tomando por base os parâmetros do processo de extrusão rotativa de tubos empregados na empresa CILBRÁS do grupo White Martins Gases Industriais, a saber, raio do rolo $R = 230$ mm, avanço do rolo/rotação do mandril $f = 4$ mm e ângulo de ataque do rolo $\alpha = 30^\circ$.

4.1 Influência dos Parâmetros κ e S_0

Para verificar a influência dos parâmetros κ e S_0 foi adotado o material no estado normalizado. Em seguida os valores para o avanço do rolo por rotação f e ângulo de ataque α foram adotados segundo Rajan et al.⁽³⁾ A Figura 4 apresenta a força na direção tangencial para os processos de extrusão rotativa avante e a ré.

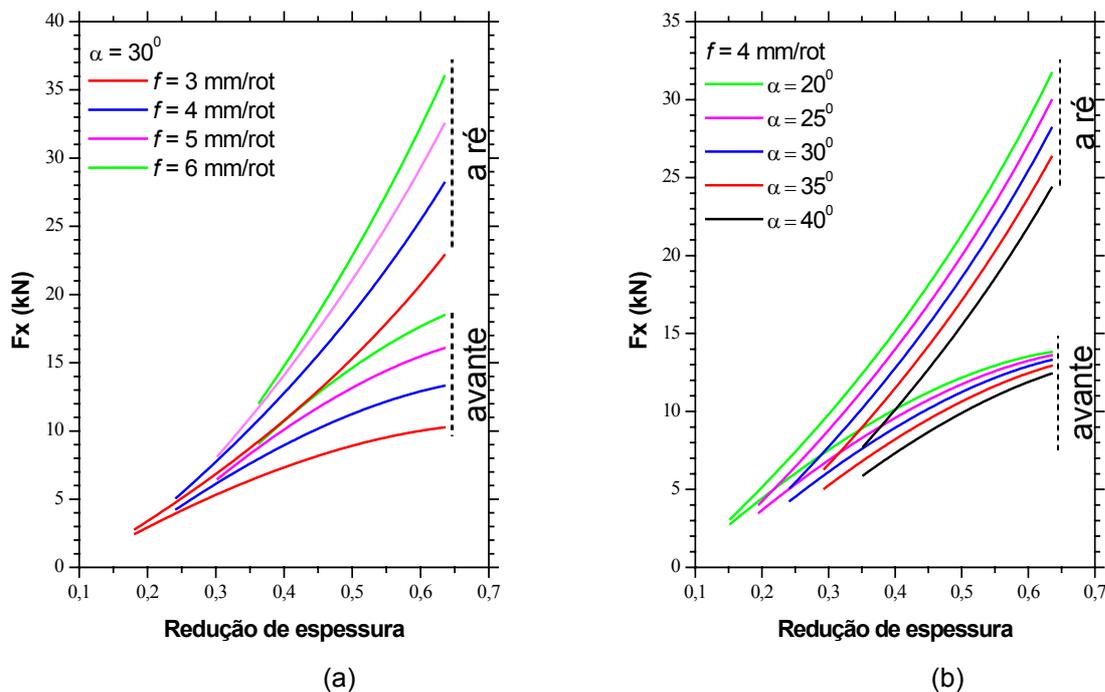


Figura 4. Previsões da força axial: (a) $\alpha = 30^\circ$ e (b) $f = 4$ mm/rot.

Como pode ser observado na Figura 4a, com o aumento do avanço do rolo por rotação f , a força tangencial, tanto no processo de extrusão a ré quanto avante, cresce devido à velocidade do processo ser maior em avanços maiores.

Por outro lado, na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos para a força na direção radial para os processos de extrusão rotativa avante e a ré. Na Figura 5a, a força radial, tanto no processo de extrusão rotativa a ré quanto avante tal como a força tangencial, cresce à medida que o avanço do rolo por rotação aumenta. Isto também é devido à velocidade do processo ser maior em avanços de rolo maiores. Ainda há que se observar que, tanto a força tangencial quanto a força radial em ambos os processos de extrusão (avante ou a ré) diminuem à medida que o ângulo de ataque do rolo α aumenta (Figuras 4a e 5a). Isto acontece porque a área de contato do rolo com o tubo é menor para ângulos maiores resultando numa força necessária para o processo de extrusão menor.

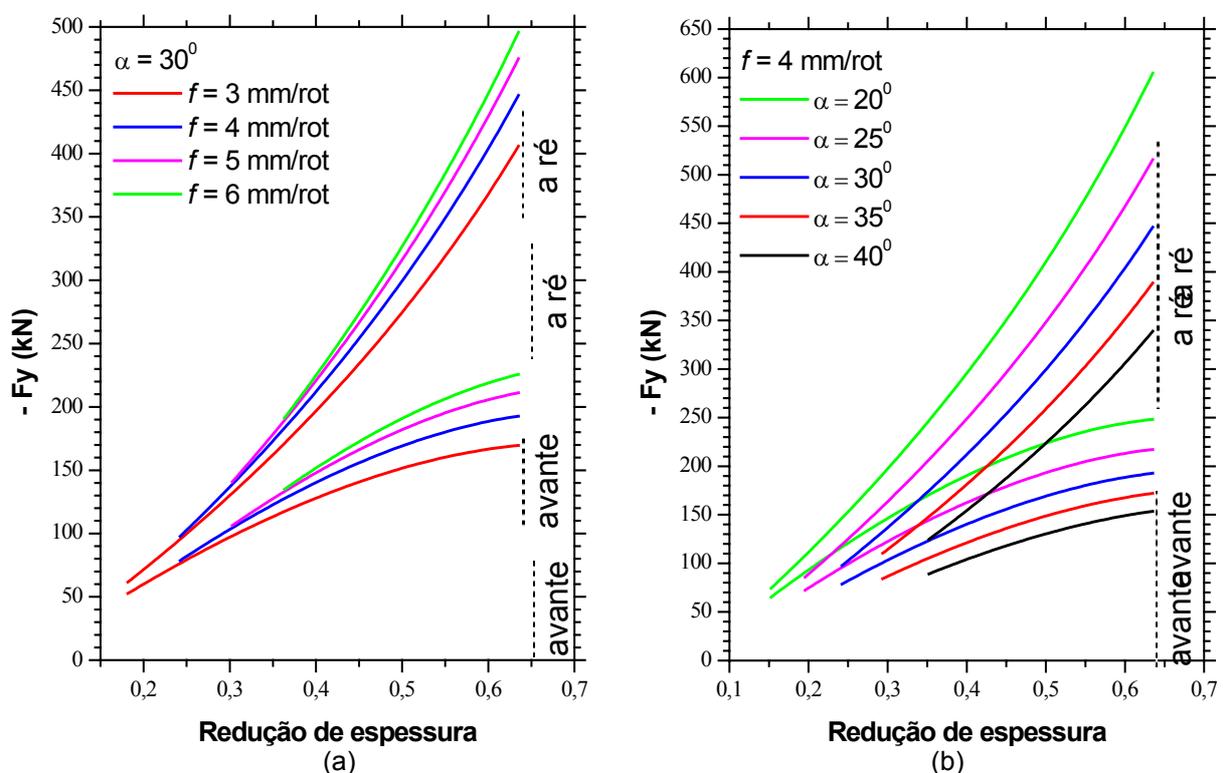


Figura 5. Previsões da força radial: (a) $\alpha = 30^\circ$ e (b) $f = 4$ mm/rot.

A Figura 6 apresenta a força segundo a direção axial para ambos os processos de extrusão rotativa (avante ou a ré). Nela pode ser observado que, tal como acontece com as forças nas demais direções, a força axial cresce à medida que o ângulo de ataque do rolo aumenta. Isto se deve ao fato de que a área de contato do rolo com o tubo aumenta para ângulos de ataque maiores.

No caso da extrusão rotativa avante pode ser observado que as força tendem a um mesmo limite superior em função da redução de espessura devido à área de contato diminuir ao longo do processo, visto que o rolo avança no mesmo sentido que o material a ser deformado. Já para a extrusão rotativa a ré, as componentes de forças não tendem a um mesmo limite superior em função da redução de espessura. Como o material neste processo escoia em sentido oposto ao movimento do rolo, há um acúmulo de material a ser deformado tornando cada vez maior a área de contato do rolo com o tubo.

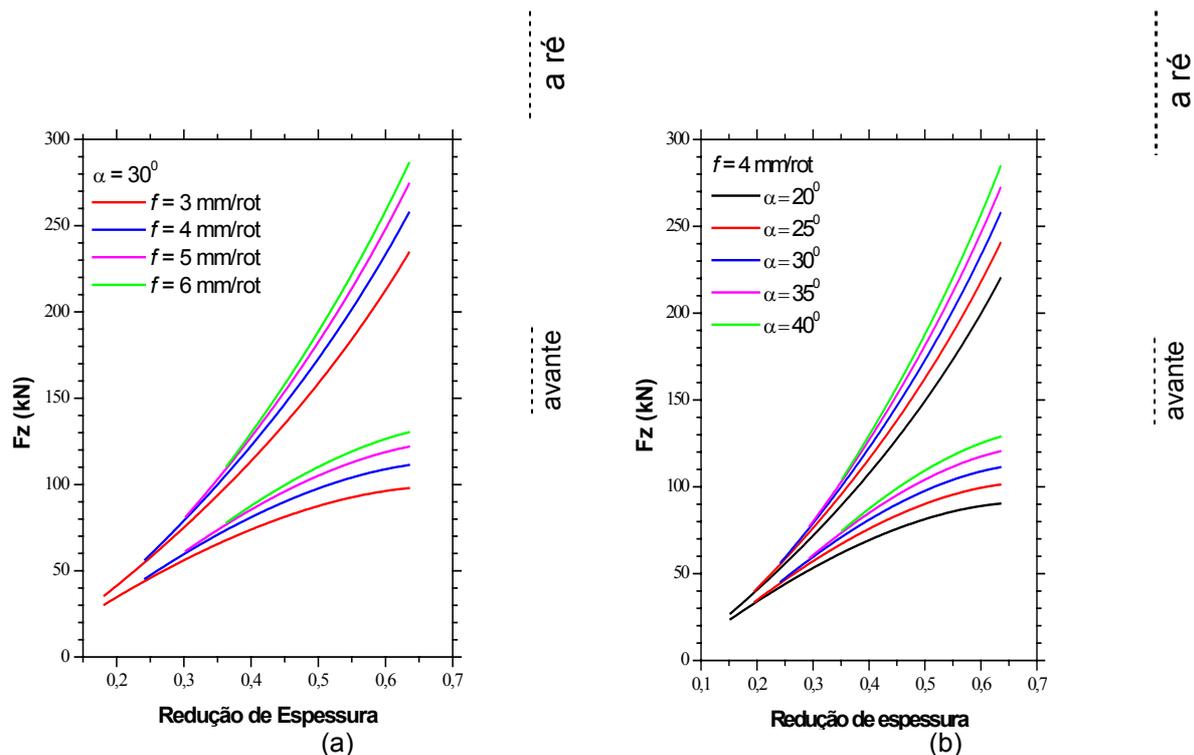


Figura 6. Previsões da força axial: (a) $\alpha = 30^\circ$ e (b) $f = 4$ mm/rot.

4.2 Influência do Estado Inicial do Material do tubo

Foi realizada uma análise comparativa das forças necessárias para o processo de extrusão rotativa de tubos para os materiais normalizado e temperado-revenido.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados do processo de extrusão rotativa a ré e avante referentes ao tubo normalizado obtidos pelos métodos do trabalho ideal e das fatias. É possível observar que o processo a ré apresenta os maiores valores de forças para todas as componentes.

Tabela 4. Forças de extrusão rotativa a ré: material normalizado.

Método	Tangencial (KN)	Radial (KN)	Axial (KN)
Trabalho ideal	18,14	256,08	147,85
Fatias	11,48	192,69	111,25

Tabela 5. Forças de extrusão rotativa avante: material normalizado.

Método	Tangencial (KN)	Radial (KN)	Axial (KN)
Trabalho ideal	11,33	159,88	92,31
Fatias	8,31	131,95	76,18

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os resultados dos processos de extrusão rotativa a ré e avante, respectivamente, obtidos para o material no estado temperado-revenido com têmpera realizada a 737° C. Esta têmpera foi escolhida, pois fornece o material que se mostrou mais adequado do ponto de vista de conformação por apresentar um maior nível de ductilidade e menor tensão inicial de escoamento. Como pode ser observado também para o material no estado temperado-revenido, o processo a ré possui os maiores valores de força para as três componentes.

Tabela 6. Forças de extrusão rotativa a ré: material temperado-revenido.

Método	Tangencial (KN)	Radial (KN)	Axial (KN)
Trabalho ideal	17,60	248,42	143,42
Fatias	11,14	186,93	107,92

Tabela 7. Forças de extrusão rotativa avante: material temperado-revenido.

Método	Tangencial (KN)	Radial (KN)	Axial (KN)
Trabalho ideal	10,99	155,10	89,55
Fatias	8,06	128,01	73,90

5 CONCLUSÕES

O modelo analítico adotado para análise teórica do processo de extrusão rotativa fornece a previsão de forças de conformação dos rolos segundo as direções tangencial, radial e axial do tubo. Ademais, estas previsões fornecem um limite inferior para as forças de conformação, constatando-se que a principal componente de força se encontra na direção radial seguida pelas direções axial e tangencial. Em ambos os casos de extrusão rotativa de tubos, isto é, a ré e avante, os estados normalizado e temperado-revenido fornecem esforços comparáveis para um mesmo tipo de extrusão e nível de redução de espessura. É importante ressaltar que, para o caso da extrusão avante, os níveis de esforços são menores para os dois tipos de material devido à área de contato diminuir ao longo do processo. Isto se deve ao fato do rolo seguir no mesmo sentido que o material a ser deformado não havendo assim acúmulo de material. Espera-se que o aço AISI41B30H na condição de temperado-revenido suporte maiores reduções de espessura graças a uma boa ductilidade observada nos ensaios de tração uniaxial.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio financeiro para realização deste trabalho no quadro do projeto de pesquisa “Rotas de Conformação para Fabricação de Selantes Metálicos e Cilindros Leves para GNV” (MCT/FINEP/Ação Transversal – RBT 01/2004). Thiago Assis Dutra agradece ao CNPq pela bolsa do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica. Marco Aurélio Ledig Ribeiro agradece a CAPES pelas bolsas de estudos de pós-graduação. Geovani Rodrigues agradece ao CNPq pela Bolsa de Desenvolvimento Tecnológico Industrial concedida no âmbito do presente projeto FINEP.

REFERÊNCIAS

- 1 WONG, C.C.; DEAN, T.A.; LIN, J. **A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003. vol. 43, p. 1419-1435.
- 2 RAJAN, K.M.; DESHPANDE, P.U.; SALWAN, S.K.; NARASIMHAN, K. **Theoretical Studies in Flow Forming: A Review**. International Journal of Forming Processes, 2002. vol. 5, n°. 1, p. 71-107.
- 3 KOBAYASHI, S.; THOMSEN, E.G. **Theory of Spin Forging**. C.I.R.P. Annalen, 1961-62. vol. 1, p. 114-123.
- 4 PARK, J.-W.; KIM, Y.-H.; BAE, W.B. **Analysis of the Tube-Spinning Process by the Upper-Bound Stream Method**. Journal of Materials Processing Technology, 1997. vol. 66, n. 1-3, p. 195-203.
- 5 HOSFORD, W.F.; CADDELL, R.M. **Metal Forming Mechanics and Metallurgy**. Ed. Prentice-Hall International Inc., 1983. p. 103-114.