

ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO PROCESSO DE EXTRUSÃO ROTATIVA DE TUBOS

Marco Aurélio Ledig Ribeiro
ledig@metal.eeimvr.uff.br

Luciano Pessanha Moreira
luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br

Geovani Rodrigues
geovani@metal.eeimvr.uff.br

Luiz Carlos Rolim Lopes
rolimlop@metal.eeimvr.uff.br

Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense – UFF,
Avenida dos Trabalhadores, 420 Vila Santa Cecília CEP 27255-125, Volta Redonda – RJ, Brasil.

Adriano de Senne
adriano_senne@praxair.com

White Martins Gases Industriais – Cilindros CILBRÁS,
Rodovia Presidente Dutra Km 283, CEP 27 365 000, Barra Mansa, Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo. O processo de extrusão rotativa a ré de tubos é empregado na conformação de corpos cilíndricos obtidos a partir de reduções de espessura de um tubo sem costuras. Neste processo, as forças e deformações impostas ao tubo são de difícil avaliação experimental. Deste modo, foi realizado neste trabalho um estudo numérico com o objetivo de avaliar rotas de conformação em função da condição inicial do material do tubo, a saber, como recebido e após têmpera e revenido. As propriedades mecânicas do aço AISI 41B30H foram avaliadas a partir de ensaios de tração uniaxial em corpos de prova retirados ao longo do comprimento do tubo. Primeiramente, o processo de extrusão rotativa foi analisado por modelos bidimensionais (2D) de elementos finitos adotando-se a hipótese de estado plano de deformações. Em seguida, foram desenvolvidos modelos tridimensionais (3D) adotando-se elementos sólidos com integração completa e reduzida. Ademais, foram utilizados os métodos de integração implícita e explícita na simulação do processo de extrusão rotativa de tubos. Os resultados indicam que o aço AISI 41B30H no estado normalizado fornece forças de conformação ligeiramente menores em comparação ao nível de encruamento obtido após os tratamentos térmicos por têmpera e revenido. Finalmente, os modelos 3D mostram que previsões de forças de conformação dependem fortemente do tipo de formulação dos elementos sólidos adotados para descrever o tubo, em particular, do número de pontos de integração.

Palavras-chave: elementos finitos, método das fatias, extrusão rotativa, conformação mecânica.

1. INTRODUÇÃO

Em geral, a extrusão rotativa de tubos pode ser considerada como um processo de repuxamento onde um esboço de formato de copo ou cilíndrico, é inicialmente 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, 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 repuxamento variam desde painéis de cozinha, cilindros para gases industriais até componentes de mísseis, entre outros.

A extrusão rotativa de tubos pode ainda ser classificada de acordo com a ocorrência de escoamento do material em sentido igual ou oposto àquele de avanço dos rolos, conforme

esquemático na Figura 1. No primeiro tipo, conhecido como extrusão rotativa avante, tanto a ferramenta como o material conformado do tubo se movimentam na mesma direção. Já no segundo tipo, extrusão a ré, o fluxo do material ocorre em sentido contrário ao movimento axial da ferramenta. 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, ou seja, 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 os elementos mais importantes sendo o ângulo de ataque, o raio de adoçamento e o ângulo de saída. A máquina de extrusão rotativa pode possuir um, dois ou três rolos. De acordo com o trabalho de Wong et al.⁽¹⁾ 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.

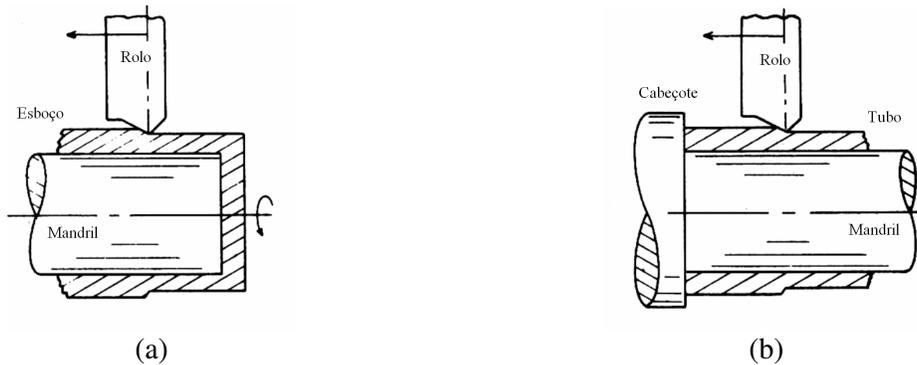


Figura 1. Extrusão rotativa de tubos: (a) avante e (b) a ré (Kobayashi e Thomsen, 1961-62).

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 ora por meio de experimentos ora através de simulações numéricas, 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 por Rajan et al.⁽²⁾. Entre estes, podem ser destacados os modelos baseados nos métodos das fatias e de linhas de deslizamento⁽³⁾ e no método do limite superior⁽⁴⁾. Estes modelos analíticos possibilitam determinar, em função da redução de espessura do esboço, tanto esforços (métodos das fatias e linhas de deslizamento) como potências associados com o ângulo ótimo de ataque do rolo (método do 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. Entretanto, as trajetórias de deformação durante a extrusão rotativa de tubos são de fato bastante complexas. Na verdade, o esboço gira em conjunto com o mandril, em razão do atrito, ao mesmo tempo em que o rolo possui um avanço axial por rotação, o qual, por sua vez, gira livremente em torno do seu próprio eixo devido ao contato com o esboço, ou seja, um ponto material do esboço possui movimento de deformação ao longo de espirais. Portanto, ora os campos de deslocamentos são determinados por meio de medidas experimentais, que podem ser obtidas a partir de um “grid” impresso no esboço⁽²⁾, ora a geometria de deformação é considerada com auxílio do método de elementos finitos (MEF). No último caso, os trabalhos reportados na literatura apontam algumas dificuldades em modelar corretamente o processo de extrusão rotativa tanto por meio de esquemas implícitos (estático) como explícitos (quase-estático) de integração⁽⁵⁻⁷⁾.

Posteriormente, Hua et al. ⁽⁸⁾ desenvolveram um modelo de elementos finitos em três dimensões do processo de extrusão rotativa a ré de tubos onde foram considerados tanto a disposição de 3 rolos à 120° como a cinemática das ferramentas. Recentemente, Xia et al. ⁽⁹⁾ investigaram experimentalmente e através do método de elementos finitos as forças envolvidas na extrusão rotativa a ré de tubos com simetria axial e assimétricos. Para a extrusão rotativa de um tubo axissimétrico, estes autores verificaram que as forças de extrusão variam periodicamente com o ângulo de rotação do rolo.

Este trabalho tem por objetivo analisar o processo de extrusão rotativa a ré de tubos através de simulações numéricas por elementos finitos com o auxílio do programa comercial ABAQUS. Este processo de conformação é utilizado na obtenção de selantes metálicos para armazenamento de gás natural veicular (GNV). Inicialmente, foi adotado um modelo bidimensional (2D) adotando-se a hipótese de um estado plano de deformações, isto é, desprezando-se as deformações ao longo da direção circunferencial do tubo. Em seguida, modelos em três dimensões (3D) foram gerados para considerar os efeitos de rotação do mandril e as deformações na direção circunferencial do tubo. Nos modelos 3D, foram usados elementos sólidos com regras de integração completa e reduzida. Além disso, foram adotadas as técnicas de solução implícita e explícita disponíveis no programa de elementos finitos ABAQUS. O esboço é um tubo sem costuras obtido a partir do aço AISI 41B30H e entregue no estado inicial normalizado. Foram realizados ensaios de tração uniaxial em corpos de prova retirados da parede do tubo para avaliação do comportamento plástico tanto no estado normalizado como nos estados obtidos após tratamentos térmicos de têmpera e revenido.

2. METODOLOGIA

2.1 Caracterização Experimental

O material empregado no processo de extrusão rotativa a ré é um aço AISI 41B30H fornecido na forma de tubo sem costura e na condição de normalizado com dimensões nominais de 320 mm de diâmetro interno e 9,53 mm de espessura. As propriedades mecânicas do aço AISI 41B30H no estado normalizado foram avaliadas através de ensaios de tração uniaxial realizados numa máquina universal Wolpert 20 TUZ (200 kN). O encruamento do tubo foi ajustado inicialmente pelos valores do coeficiente de resistência K e do expoente de encruamento n da lei de Hollomon definida por:

$$\sigma = K (\epsilon^p)^n \quad (1)$$

Em seguida, estes parâmetros foram empregados na determinação do termo de pré-deformação ϵ_0 referente à lei de Swift dada por:

$$\sigma = K (\epsilon_0 + \epsilon^p)^n \quad (2)$$

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.

Além da utilização do material como recebido, investigou-se também o comportamento do aço AISI 41B30H após tratamentos térmicos de têmpera e revenido realizados em três corpos de prova extraídos do tubo no estado normalizado. Para este fim, foram realizados tratamentos de têmpera nas temperaturas de 737, 754 e 782 °C, durante 30 minutos. Estes corpos de prova foram então submetidos a um revenimento a 610 °C durante 30 minutos e, em seguida resfriados ao ar.

2.2 Modelamento Numérico

As simulações do processo de extrusão rotativa a ré foram realizadas com o programa comercial de elementos finitos ABAQUS através das técnicas de integração implícita (ABAQUS/Standard) e explícita (ABAQUS/Explicit). Para minimizar os custos computacionais,

adotou-se um tubo com um comprimento reduzido igual a 80 mm. Esta simplificação é aceitável, pois os campos de tensões e deformações impostos ao tubo não sofrem alterações significativas uma vez que um estado estacionário é atingido após um dado número de rotações dos rolos. Ademais, admite-se que as deformações elásticas no ferramental sejam muito pequenas e que possam assim ser desprezadas. Neste caso, tanto o mandril como os rolos foram assumidos como corpos rígidos descritos através do emprego de superfícies analíticas. Em todos os casos discutidos neste trabalho, o atrito entre o ferramental e o tubo foi descrito pela lei de Coulomb.

Em relação à descrição do comportamento mecânico do tubo, assumiu-se que o material é isotrópico descrito no regime elástico de deformações pela lei generalizada de Hooke através do módulo de elasticidade $E = 200.000$ MPa e do coeficiente de Poisson $\nu = 0,30$, respectivamente. Por outro lado, o regime plástico é descrito pelo critério de escoamento de von Mises em conjunto com a hipótese de encruamento isotrópico, onde o encruamento relacionando as grandezas equivalentes é descrito pela lei de Swift, Eq. (2). É importante ressaltar que para fins de simulação, foi necessário extrapolar o domínio de deformações plásticas a valores correspondentes a grandes deformações acumuladas, $\approx 70\%$, pois sob tração uniaxial a deformação uniforme obtida com o aço AISI 41B30H após tratamentos térmicos por têmpera e revenido é próximo a 20 %.

2.2.1 Modelo 2D

Primeiramente, foi criado um modelo bidimensional (2D) admitindo-se um estado plano de deformação segundo a direção circunferencial do tubo. As condições de contorno que foram impostas são restrições ao deslocamento na direção radial, 2, aos nós do tubo em contato com o mandril e ao deslocamento na direção axial, 1, aos nós do tubo localizados no batente do mandril, conforme mostrado na Figura 2. o tubo foi discretizado por elementos sólidos de interpolação bilinear com 4 pontos de integração, CPE4 de acordo com a terminologia do programa ABAQUS. Neste modelo, a malha é formada por 5 camadas de elementos na espessura e 35 no comprimento. Foi adotado o coeficiente de atrito $\mu = 0$ entre o tubo e a ferramenta em razão de dificuldades de para valores de coeficiente de atrito entre o tubo e o mandril acima de $\mu = 0,10$.

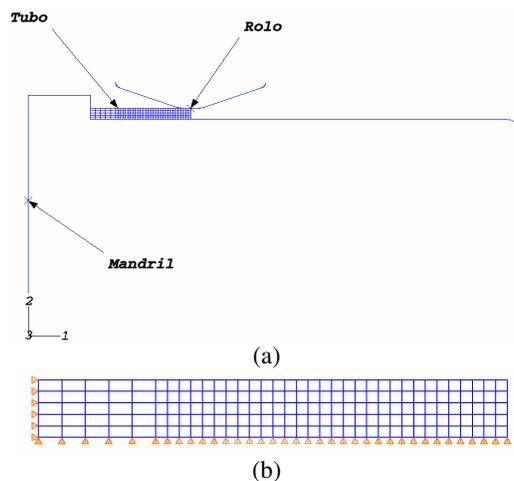


Figura 2. Modelo 2D de elementos finitos do processo de conformação de tubos por extrusão rotativa: (a) conjunto e (b) tubo discretizado com a indicação das restrições aplicadas.

2.2.2 Modelo 3D

O modelo em três dimensões (3D) foi adotado para descrever a cinemática do processo de extrusão rotativa, ou seja, a disposição dos três rolos à 120° e a rotação do mandril. Neste modelo, a condição de contorno prescrita ao tubo é de restrição ao deslocamento segundo a direção radial, 2, aos nós do tubo situados em sua região anular em contato com o batente do mandril. A Figura 3 apresenta o modelo 3D e a discretização do tubo.

O modelo 3D possui malha proporcional à adotada para o modelo 2D com 48 divisões na circunferência do tubo, num total de 8.400 elementos sólidos lineares com 4 pontos de integração (C3D8) ou com regra de integração reduzida (C3D8R). Quanto ao atrito, adotou-se um coeficiente de atrito $\mu = 0,30$ entre o tubo e o mandril e $\mu = 0,08$ entre o tubo e os rolos visto que os mesmos recebem lubrificação durante o processo.

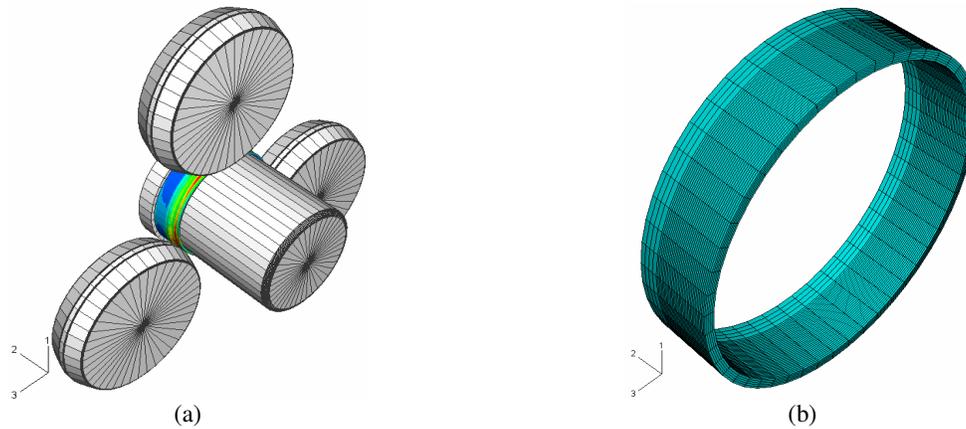


Figura 3. (a) Modelo tridimensional de elementos finitos do processo de conformação de tubos por extrusão rotativa e (b) malha utilizada na discretização do tubo.

4. RESULTADOS

4.1 Ensaio de Tração Uniaxial

A Tabela 1 apresenta os valores médios e respectivos desvios padrão obtidos em três ensaios de tração uniaxial para o estado normalizado, na qual σ_e , σ_r , ϵ_u e ϵ_T são o limite de escoamento definido a 0,2% de deformação plástica, o limite de resistência, a deformação uniforme e a deformação total à ruptura, respectivamente. A Tabela 2 resume as propriedades mecânicas determinadas nos ensaios de tração uniaxial realizados após os tratamentos de têmpera e revenido. Para fins de simulação numérica, foram adotadas as propriedades conseguidas com a têmpera realizada a 737 °C, pois esta se mostra mais adequada à conformação mecânica visto o maior nível de ductilidade, indicado pela deformação total à ruptura, em comparação ao estado normalizado. Na verdade, este tratamento térmico foi realizado na zona intercrítica possibilitando a obtenção de um aço bifásico contendo martensita revenida e ferrita, conforme discutido por Bittencourt et al. ⁽¹⁰⁾.

Tabela 1. Propriedades mecânicas do aço AISI 41B30H no estado normalizado.

σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	ϵ_u (%)	ϵ_T (%)	K (MPa)	n	ϵ_0 ($\times 10^{-3}$)
468,33	751,87	5,96	6,34	1.056	0,122	1,26
16,08	6,64	0,035	0,03	65,14	0,015	0,226

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço AISI 41B30H no estado temperado e revenido.

Temperatura °C	σ_e (MPa)	σ_r (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

4.2 Previsões Numéricas

Os parâmetros de processo da conformação de tubos por extrusão rotativa a ré são definidos pelo raio do rolo $R = 230$ mm, a taxa de avanço do rolo $f = 4$ mm/rot, e pelo ângulo de ataque do rolo de conformação $\alpha = 20^\circ$.

4.2.1 Modelo 2D

Na Figura 4 são mostradas as previsões de deformação plástica e tensão equivalentes de von Mises obtidas com o modelo 2D no estado plano de deformação para a uma redução de espessura de $\sim 36,5\%$. Estes resultados evidenciam um baixo nível de tensões residuais nas regiões do tubo situadas após o ângulo de saída do rolo, constituindo uma grande vantagem do processo de extrusão rotativa a ré, sobretudo quando aplicado a elevadas reduções de espessura.

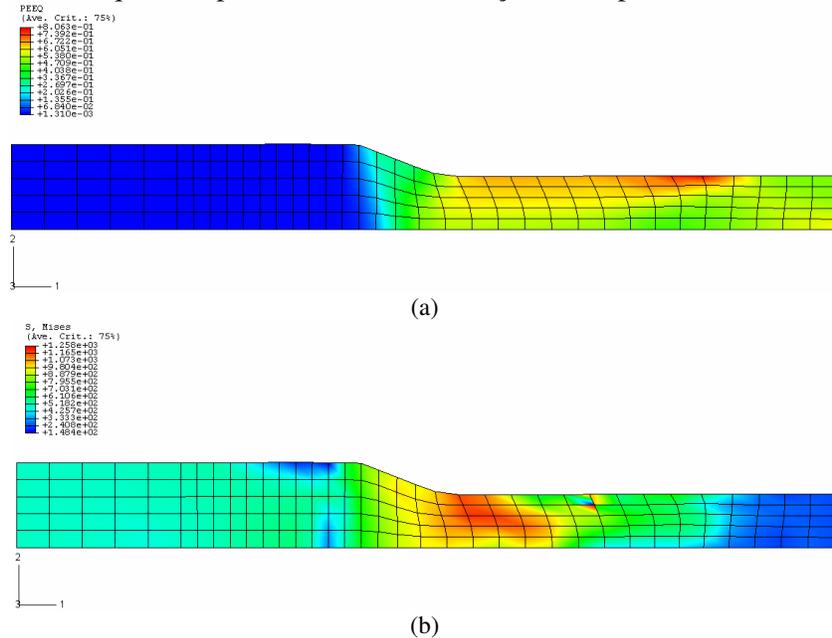


Figura 4. Previsões numéricas determinadas a partir do modelo 2D (ABAQUS/Standard): (a) deformação equivalente e (b) tensão equivalente de von Mises (MPa).

Por outro lado, a previsão de deformação plástica equivalente (PEEQ) fornecida pelo modelo 3D é apresentada na Figura 5a donde verifica-se que as deformações se concentram em regiões próximas aos rolos, evidenciando assim ocorrência de deformações localizadas. Na Figura 5b é apresentada a deformação plástica na direção circunferencial segundo um sistema de coordenadas cilíndricas local. Observa-se que as deformações plásticas são próximas de zero nas regiões conformadas pelos rolos, o que vai ao encontro da hipótese da ocorrência do estado plano de deformação para o processo de extrusão rotativa de tubos.

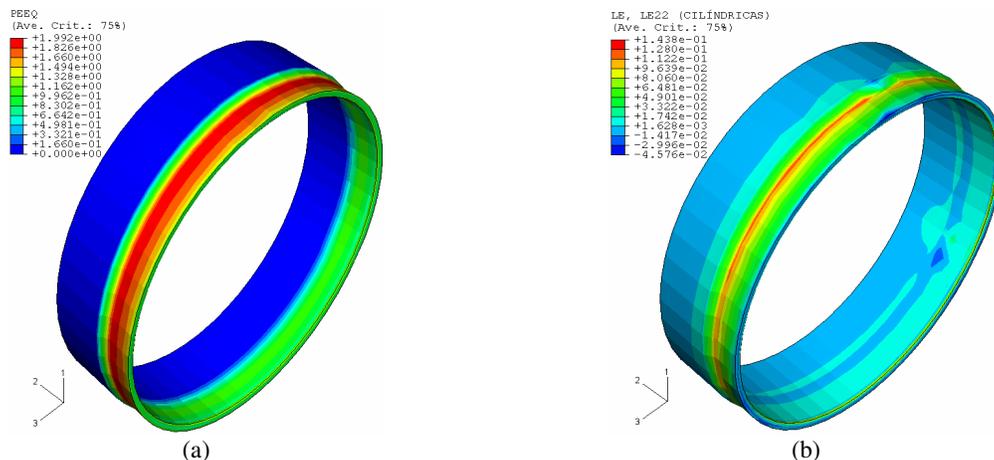


Figura 5. Previsão numérica das deformações plásticas (a) equivalente e (b) na direção circunferencial obtidas para o material no estado normalizado com elemento de integração completa (ABAQUS/Standard).

A Figura 6 compara as previsões de forças radiais e axiais determinadas utilizando-se elementos de integração completa (ABAQUS/Standard) para o material do tubo nos estados normalizado e temperado e revenido. As previsões de forças na direção circunferencial não são aqui apresentadas, pois estas têm o mesmo comportamento que das forças radiais. Estas duas componentes de forças apresentam comportamento ondulatório, com máximos e mínimos alcançados a cada meia volta completada pelos rolos. Esses resultados são condizentes com as medidas experimentais efetuadas por Xia et al. ⁽⁹⁾, onde os picos, valores máximos, são obtidos quando o rolo está posicionado a 0° em relação ao eixo radial ou o eixo circunferencial (sentido positivo) ao passo que os vales, valores mínimos, quando os rolos estão a 180° em relação a esses eixos (sentido negativo). Ademais, observam-se pequenas diferenças entre os valores de forças em função do estado inicial do material do tubo para uma mesma redução de espessura.

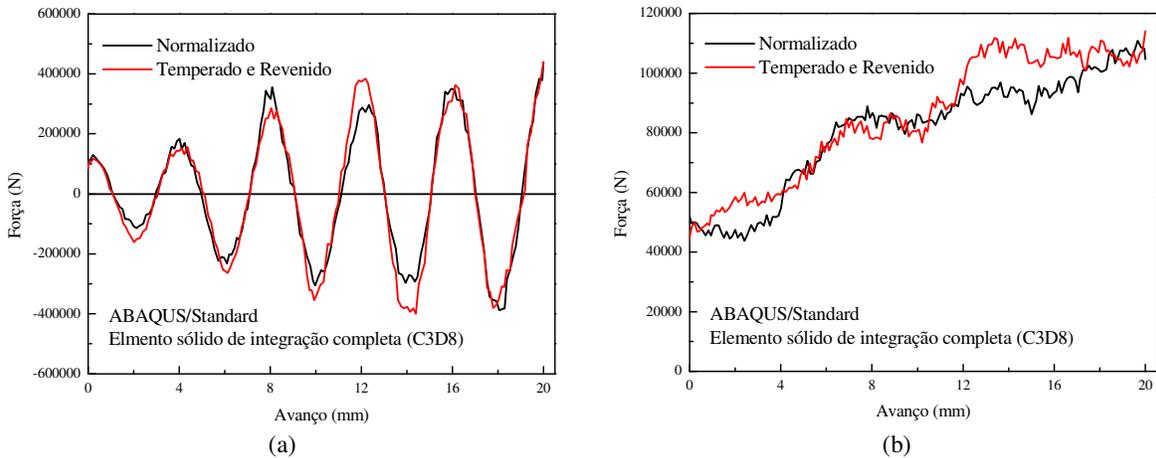


Figura 6. Previsões de forças de reação de extrusão rotativa a ré em função do avanço axial dos rolos obtidas com elementos de integração completa C3D8 (ABAQUS/Standard) para os estados normalizado e temperado e revenido: (a) direção radial e (b) direção axial.

Os resultados mostram também que as forças na direção axial são as de menor intensidade, quando comparadas às forças radiais e ou circunferenciais e que existe uma diferença significativa entre os resultados obtidos por meio de elementos de integração completa e de integração reduzida, conforme apresentado na Figura 7 para o material do tubo no estado normalizado. Por outro lado, observa-se uma boa semelhança entre os resultados obtidos pelos métodos implícito e explícito, utilizando-se o elemento de integração reduzida C3D8R, vide Figura 8, para o material no estado normalizado. Este resultado é também obtido para o material na condição de temperado e revenido.

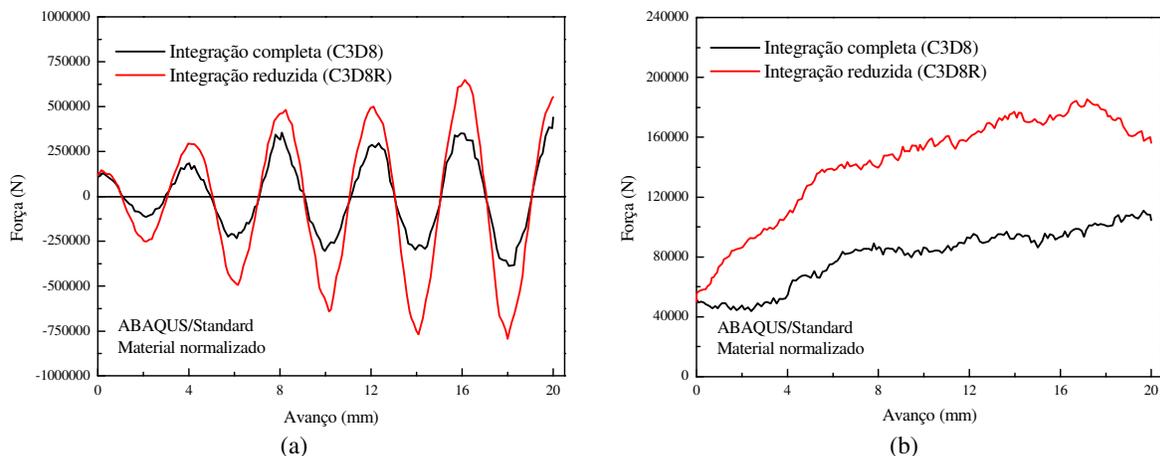


Figura 7. Previsões de forças de reação de extrusão rotativa a ré em função do avanço axial dos rolos obtidas com elementos de integração reduzida C3D8 e completa C3D8R (ABAQUS/Standard) para o estado normalizado: (a) direção radial e (b) direção axial.

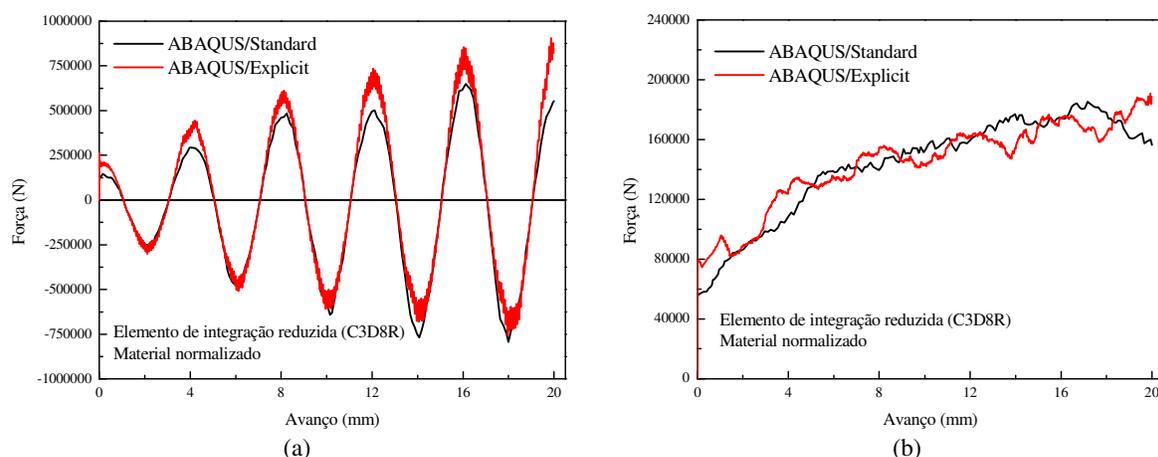


Figura 8. Previsões de forças de reação de extrusão rotativa a ré em função do avanço axial dos rolos obtidas para o estado normalizado através das técnicas de integração implícita (ABAQUS/Standard) e explícita (ABAQUS/Explicit): (a) direção radial e (b) direção axial.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores máximos das forças de reação do processo de extrusão rotativa a ré de tubos determinadas a partir dos modelos 2D no estado plano de deformação e 3D. Em todos os casos, observa-se que as forças necessárias ao material no estado temperado e revenido são comparáveis aos valores numéricos previstos para a condição do tubo como recebido, isto é, no estado normalizado. De modo equivalente, as diferenças entre as previsões em função da técnica de integração adotada, implícita ou explícita, são muito pequenas no caso particular de elementos sólidos lineares com regra de integração reduzida. Entretanto, este tipo de elemento é susceptível a modos de energia de deformação nula (“hourglass”) por ter um único ponto de integração, os quais, por sua vez, podem provocar grandes distorções na malha e, portanto, fornecer soluções inexatas. Por outro lado, a resposta obtida com elementos com quatro pontos de integração é mais refinada apesar de ter um custo computacional elevado em comparação a regra de integração reduzida.

Tabela 3. Valores máximos das forças de reação de extrusão rotativa a ré de tubos obtidas para o material normalizado.

Modelo	Elemento	Técnica	Axial (N)	Radial (N)	Circunferencial (N)
2D	CPE4	Implícita	137.678	794.552	---
3D	C3D8	Implícita	110.909	439.520	445.744
3D	C3D8R	Implícita	185.379	793.578	729.459
3D	C3D8R	Explícita	190.762	905.014	848.783

Tabela 3. Valores máximos das forças de reação de extrusão rotativa a ré de tubos obtidas para o material temperado.

Modelo	Elemento	Técnica	Axial (N)	Radial (N)	Circunferencial (N)
2D	CPE4	Implícita	145.145	849.082	---
3D	C3D8	Implícita	114.112	440.050	477.437
3D	C3D8R	Explícita	208.262	974.207	904.846

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas simulações por elementos finitos do processo de extrusão rotativa a ré de tubos. As previsões mostram que as forças de reação dos rolos no tubo na direção axial têm menor intensidade em comparação às forças segundo as direções radial e circunferencial, as quais, por sua vez, variam periodicamente em função da rotação e ou avanço axial dos rolos e apresentam valores muito próximos entre si. As previsões numéricas revelam também um baixo nível de tensões residuais nas regiões do tubo localizadas logo após o ângulo de saída dos rolos, constituindo uma grande vantagem deste processo, sobretudo para elevadas reduções de espessura. Com relação ao estado inicial do material do tubo, as simulações por elementos finitos indicam para um mesmo nível de redução que o aço AISI41B30H na condição de têmpera e revenido fornece praticamente o mesmo nível de forças de reação dos rolos que no estado normalizado. Entretanto,

esperara-se que o aço AISI41B30H na condição de temperado e revenido suporte maiores reduções de espessura graças a uma boa ductilidade observada nos ensaios de tração uniaxial. Por outro lado, os elementos sólidos lineares de integração reduzida C3D8R, empregados para descrever o tubo, fornecem previsões numéricas semelhantes independentemente da técnica de integração adotada e do estado inicial do material do tubo. Contudo, estes elementos fornecem níveis de forças de reação muito maiores em comparação aos elementos sólidos lineares com quatro pontos de integração. Estas diferenças podem ser atribuídas aos modos de deformação de energia zero (“hourglass”) e, portanto, merecem maior atenção no que se refere à condução de um estudo de sensibilidade dos efeitos de densidade de malha e controle destes modos. Enfim, é importante destacar que os custos computacionais de um modelo 3D em uma plataforma Linux 64-bits com um processador Intel Pentium D 3.0 GHz e 4 Gb RAM, variam de 1 hora a 70 horas para as técnicas explícita e implícita de integração disponíveis no programa de elementos finitos ABAQUS.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a FINEP pelo apoio financeiro para realização deste trabalho (“Rotas de Conformação para Fabricação de Selantes Metálicos e Cilindros Leves para GNV”, MCT/FINEP/Ação Transversal – RBT 01/2004). Os autores agradecem igualmente a empresa White Martins Gases Industriais – Cilindros CILBRÁS pelo fornecimento dos corpos de prova, ensaios e acesso as informações do processo de extrusão rotativa a ré de tubos. M. A. L. Ribeiro agradece a CAPES pela bolsa de Mestrado. G. Rodrigues agradece ao CNPq pela Bolsa de Desenvolvimento Tecnológico Industrial.

7. REFERÊNCIAS

1. WONG, C.C. et al. A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, p. 1419-1435, 2003.
2. RAJAN, K.M. et al. Theoretical Studies in Flow Forming: A Review. **International Journal of Forming Processes**, v. 5, n. 1, p. 71-107, 2002.
3. KOBAYASHI, S. e THOMSEN, E.G. Theory of Spin Forging. **C.I.R.P. Annalen**, v. 1, p. 114-123, 1961-62.
4. PARK, J.-W. et al. Analysis of the Tube-Spinning Process by the Upper-Bound Stream Method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 66, n. 1-3, p. 195-203, 1997.
5. XUE, K. et al. The Disposal of Key Problems in the FEM analysis of Tube Stagger Spinning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 69, n. 1-3, p. 176-179, 1997.
6. XU, Y. et al. 3D Rigid-Plastic FEM Numerical Simulation on Tube Spinning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 113, n. 1-3, p. 710-713, 2001.
7. WONG, C.C. et al. Incremental Forming of Solid Cylindrical Components Using Flow Forming Principles, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153-154, p. 60-66, 2004.
8. HUA, F.A. et al. Three-dimensional Finite Element Analysis of Tube Spinning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 168, n. 1, p. 68-74, 2005.
9. XIA, Q.X. et al. Finite Element Simulation and Experimental Investigation on the Forming Forces of 3D non-axisymmetrical tubes Spinning, **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 48, n. 7, p. 726-735, 2006.
10. BITTENCOURT, T.S. et al. Evaluation of Mechanical Properties of the AISI 41B30H Steel with the Changing of the Volume Fraction of Ferrite and Martensite Phases by means of Different Heat Treatments in the Intercritical Region, In: CONGRESSO SAE BRASIL 2006, São Paulo, SAE PAPER 2006-01-2701 E.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE TUBE FLOW FORMING PROCESS

Marco Aurélio Ledig Ribeiro

ledig@metal.eeimvr.uff.br

Luciano Pessanha Moreira

luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br

Geovani Rodrigues

geovani@metal.eeimvr.uff.br

Luiz Carlos Rolim Lopes

rolimlop@metal.eeimvr.uff.br

Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense – UFF,
Avenida dos Trabalhadores, 420 Vila Santa Cecília CEP 27255-125, Volta Redonda – RJ, Brasil.

Adriano de Senne

adriano_senne@praxair.com

White Martins Gases Industriais – Cilindros CILBRÁS,
Rodovia Presidente Dutra Km 283, CEP 27 365 000, Barra Mansa, Rio de Janeiro, Brasil.

Abstract. *The flow forming process is used to form cylindrical vessels by means of thickness reductions of a seamless tube by keeping its internal diameter. In this process, the forces and deformations imposed to the tube are very complicated to be evaluated by means of experiments. Therefore, a numerical study is performed in this work with the aim of analyze forming routes as a function of the initial condition of the material of the tube, namely, in the as-received state and after quenching and tempering. The mechanical properties of the AISI 41B30H steel were evaluated from uniaxial tensile tests conducted on specimens cut along the tube length. Firstly, the tube flow forming process is analyzed by a two-dimensional (2D) finite element model assuming a plane-strain state. Afterwards, three-dimensional (3D) finite element models were developed adopting linear solid elements with either fully and reduced integration rules. Furthermore, both implicit and explicit integration techniques have been used in the finite element simulation of the tube flow forming process. The numerical predictions indicate that the AISI 41B30H steel in the normalized condition gives slightly lower drawing forces in comparison to the levels obtained after quenching and tempering. Finally, the numerical predictions determined with the 3D models show that the drawing forces strongly depend upon the element formulation adopted to describe the tube, in particular, the number of integration points.*

Keywords: *numerical simulation, finite element method, flow forming, metal forming.*