

## ANÁLISE DAS POSSÍVEIS CAUSAS DE DISTORSÕES GERADAS NO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE BARRAS DE AÇO AISI 1045<sup>1</sup>

Carla Adriana Theis Soares<sup>2</sup>

Juliana Zottis<sup>3</sup>

João Paulo Vieira Bittencourt<sup>4</sup>

Rafael Paini Pavlak<sup>5</sup>

Tomaz Fantin de Souza<sup>2</sup>

Alexandre da Silva Rocha<sup>6</sup>

### Resumo

A trefilação de barras de aço é usualmente utilizada para conferir precisão dimensional e melhores propriedades mecânicas ao material. Um dos grandes problemas encontrados na fabricação de eixos através deste processo é o aparecimento de distorções de forma após o tratamento térmico. Tais distorções estão diretamente ligadas ao acúmulo de tensões residuais geradas durante as etapas de pré-endireitamento, jateamento e trefilação propriamente dita, modificando o comportamento e resistência mecânica, bem como a resistência à fadiga e à corrosão das peças. Em função disso, este trabalho visa estudar a influência de parâmetros do processo, como forma de agarre, velocidade e lubrificação utilizados na trefilação combinada de barras de aço AISI 1045 analisando o acúmulo das tensões residuais após a trefila. A análise das tensões foi realizada através da modelagem numérica 3D do processo de trefilação, sendo utilizados os softwares de simulação numérica computacional: Simufact.formingGP® e Deform™. A fim de imprimir a velocidade de trefilação, foram analisadas as formas de agarre, a primeira utilizando um puxador na extremidade da barra, a segunda com um puxador envolto movimentando-se ao longo da barra. Através destas análises, verificou-se que a forma de como a barra é tracionada ocasiona uma redução de até 100 MPa nas tensões residuais no centro da barra, o que representa um fator importante no estudo das possíveis causas das distorções. Bem como os fatores velocidade e homogeneidade da lubrificação modificaram consideravelmente o perfil das tensões residuais na barra. Sendo assim, tais resultados evidenciam a elevada influência dos parâmetros estudados no aparecimento de distorções no produto final.

**Palavras-chave:** Trefilação a frio; Tensões residuais; Simulação numérica.

### NUMERICAL SIMULATION OF RESIDUAL STRESSES GENERATED IN THE DRAWING PROCESS FOR DIFFERENT DIE ANGLES

#### Abstract

The drawing of steel bars is usually used to impart better dimensional accuracy and mechanical properties to the material. A major problem encountered in manufacturing axes through this process is the onset of distortion of shape. Such distortions are directly linked to the accumulation of residual stresses generated during the pre-straightening, blasting and drawing itself, modifying the mechanical behavior, mechanical strength, fatigue resistance and corrosion resistance of parts. As a result, this paper aims to study the influence of process parameters such as shape of grip, speed and lubrication used in drawing combined AISI 1045 steel bars analyzing the buildup of residual stress after wire drawing. The stress analysis was performed by 3D numerical modeling drawing process, being used two simulation software: Simufact.formingGP® and Deform™. In order to print the drawing speed were analyzed the forms of grip, the first using a knob on the end of the bar, and the second a puller wrapped and moving along the bar. Through these analyzes, it was found that the shape of how the bar is pulled causes a reduction of up to 100 MPa in residual stresses in the center of the bar, which represents an important factor in the study of the possible causes of the distortion. As well as factors speed and homogeneity of lubrication significantly altered the profile of residual stresses in the bar. Thus, these results demonstrate the high influences of the parameters studied in the appearance of distortions in the final product.

**Key words:** Cold-drawing; Residual stresses; Numerical simulation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro mecânico. Doutorando Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil; [cadria\\_soares@yahoo.com.br](mailto:cadria_soares@yahoo.com.br); [tomazfs@yahoo.com.br](mailto:tomazfs@yahoo.com.br).

<sup>3</sup> Engenheira mecânica. Mestranda. LdTM, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; [juzottis@hotmail.com.br](mailto:juzottis@hotmail.com.br).

<sup>4</sup> Graduando, Engenharia Metalúrgica, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; [joaopaulovb@hotmail.com](mailto:joaopaulovb@hotmail.com).

<sup>5</sup> Graduando, Engenharia Mecânica, UFRGS, RS, Brasil; [paini.pavlak@ufrgs.br](mailto:paini.pavlak@ufrgs.br).

<sup>6</sup> Engenheiro mecânico. Prof. Dr. Pesquisador. LdTM, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; [alexandre.rocha@ufrgs.br](mailto:alexandre.rocha@ufrgs.br).

## 1 INTRODUÇÃO

Na conformação mecânica de materiais a trefilação é utilizada para a fabricação de peças como arames e barras cilíndricas ou tubulares que serão utilizadas em carros, máquinas de engenharia, ferramentas, equipamentos industriais e máquinas têxteis.<sup>(1)</sup>

Nos últimos anos, o método de elementos finitos vem ganhando considerável atenção por ter provado ser uma ótima ferramenta para análise do processo de conformação mecânica, incluindo análise de tensões residuais.<sup>(2)</sup> Indústrias de conformação de todo o mundo têm utilizado tal ferramenta para a otimização de custo e qualidade na execução do produto, para o desenvolvimento de novos produtos em menos tempo, para aumentar o *know-how* no processo de conformação e compensar a diferença da experiência tecnológica e para auxiliar em treinamentos e aumentar a eficácia de *marketing*.<sup>(3,4)</sup>

Dentre os processos de conformação mecânica, o processo de trefilação combinada é um processo muito utilizado na indústria de fabricação de fios, barras e eixos; e consiste no desbobinamento do fio-máquina, que é a matéria-prima da trefilação, e sua passagem pelas etapas de pré-endireitamento vertical e horizontal, jateamento, trefilação, corte e, finalmente, polimento e endireitamento (PTN), como demonstrado na Figura 1.

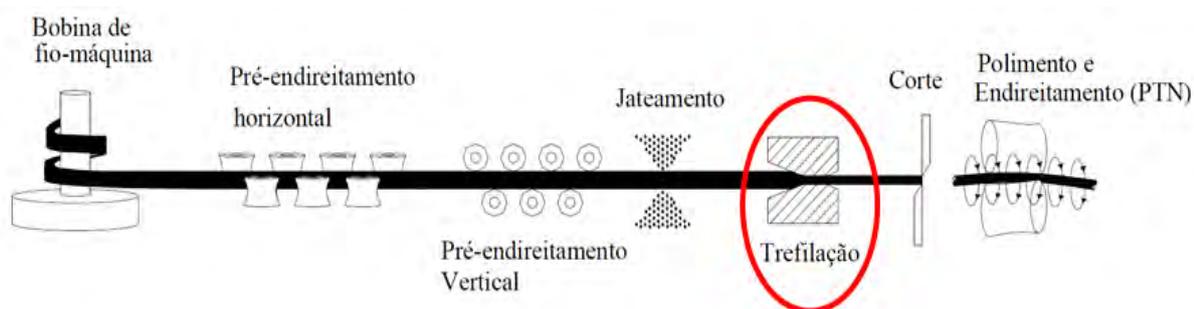


Figura 1. Processo de trefilação combinada.

Este processo gera, ao longo de sua cadeia, tensões residuais que permanecem em um componente na ausência de forças externas e/ou gradientes de temperatura. Estas tensões são originadas sempre que o componente sofre deformação plástica localizada ou deformação elástica não-homogênea. Elas podem ser classificadas como macro ou microtensões residuais, em função da escala na qual se distribuem e seus efeitos podem ser benéficos ou prejudiciais ao componente, dependendo do sinal, magnitude e distribuição destas tensões.<sup>(5)</sup> Tais tensões são o principal potencial para o aparecimento de distorções de forma que podem ocasionar a perda do produto final.

Além das etapas ao longo da cadeia, elevadas velocidades de trefilação podem também causar o acúmulo de tensões residuais na barra, onde o fluido lubrificante pode se decompor, devido ao aumento da temperatura, e perder a sua eficiência lubrificante e refrigerante. Para velocidades elevadas, as condições de operação, sob o ponto de vista térmico, tendem a ser adiabáticas e, para velocidades mais baixas, aproxima-se da condição isotérmica - tais condições térmicas influem, de maneira acentuada, na natureza e forma do escoamento do material e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas do fio trefilado.<sup>(6)</sup>

Em função disso, o objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência de parâmetros do processo, tais como forma de agarre, velocidade e lubrificação

utilizados na trefilação combinada de barras de aço AISI 1045 analisando o acúmulo das tensões residuais após a trefila.

## 2 MODELAGEM COMPUTACIONAL

O uso de análises numéricas, utilizando, entre outros, o método de elementos finitos,<sup>(7)</sup> tem permitido aperfeiçoar o estudo dos diferentes processos de fabricação, de maneira que se evitem erros de projeto que possam acarretar custos elevados, na sua correção, através de longas etapas de “try-out”. Desta forma, simulações computacionais por elementos finitos permitem melhorar o processo antes mesmo da construção de protótipos, evitando, assim, investimentos desnecessários.<sup>(3)</sup>

Para se utilizar o método dos elementos finitos, o objeto de estudo deve ter sua geometria subdividida em várias partes, que são os elementos finitos. Essa subdivisão é chamada malha, sendo geralmente constituída, no caso bidimensional, de triângulos ou quadriláteros, cujos vértices são denominados nós da malha. É através dela, que se monta um sistema de equações, cuja solução permite determinar as grandezas de interesse no fenômeno utilizado.<sup>(7-9)</sup>

Portanto, foram analisados dois tipos de malha: tetraédrica e hexaédrica. A fim de calcular as possíveis distorções do produto final, optou-se pela utilização da malha hexaédrica por ser mais homogênea e distribuir-se melhor ao longo da barra. O modelo desenvolvido para a realização destas simulações está exposto na Figura 2.

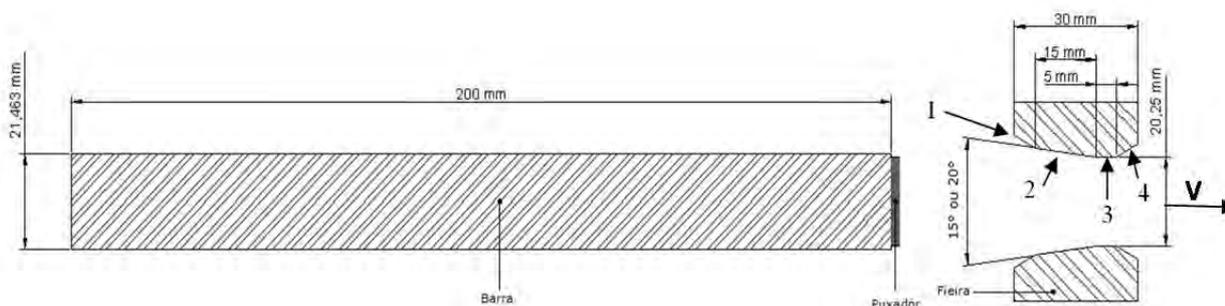


Figura 2. Modelo tridimensional processo utilizado na simulação.

Os parâmetros utilizados para ambas as simulações estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros fixos para as simulações do processo de trefilação

Análises	3D mecânica
Material	AISI 1045
Diâmetro inicial e final	21,4 e 20,25 mm
Temperatura inicial	20°C
Módulo de Young	210 GPa
Coeficiente de Poisson	0,3
Ângulo de Fieira (2α)	20°
Comprimento da barra	200 mm

Conforme Palmeira<sup>(6)</sup>, as velocidade de trefilação variam de 30 m/min a 2.400 m/min (dependendo do material e do diâmetro do fio); e as ferramentas normalmente de perfil cônico podem apresentar um semi-ângulo de 4 a 120 e uma parte cilíndrica com comprimento igual a até dois diâmetros finais. Sendo assim, as velocidades de trefilação foram variadas em 400, 625 e 1250 mm/s. Para imprimir essa velocidade,

foi utilizado um artifício denominado puxador cuja forma de agarre também foi avaliada. Este puxador foi disposto na barra de duas formas: a primeira na base da barra e a segunda, com o mesmo envolto na barra.

O coeficiente de atrito entre o fio e a ferramenta influi de maneira decisiva no desgaste da fieira, no aquecimento e no acabamento superficial do fio, sendo que esta variação do coeficiente de atrito, em princípio, depende das condições de operação, incluindo a natureza dos materiais do fio e da ferramenta. Para a avaliação da influência deste parametro, foi variado tal coeficiente de atrito na interface barra/ferramenta entre 0,1 e 0,15  $\mu$ , bem como o posicionamento da fieira. As simulações computacionais podem ser realizadas através da utilização de vários softwares de elementos finitos, conforme tipo de análise e resultados esperados. Para este estudo, foram aplicadas propriedades similares em dois diferentes softwares de simulação, os quais serão apresentados nas seções 2.1 e 2.2.

A fim de analisar o comportamento do processo e avaliar a influência de diferentes parâmetros, foram realizadas simulações conforme o fluxograma mostrado na Figura 3, em ambos os *softwares*.

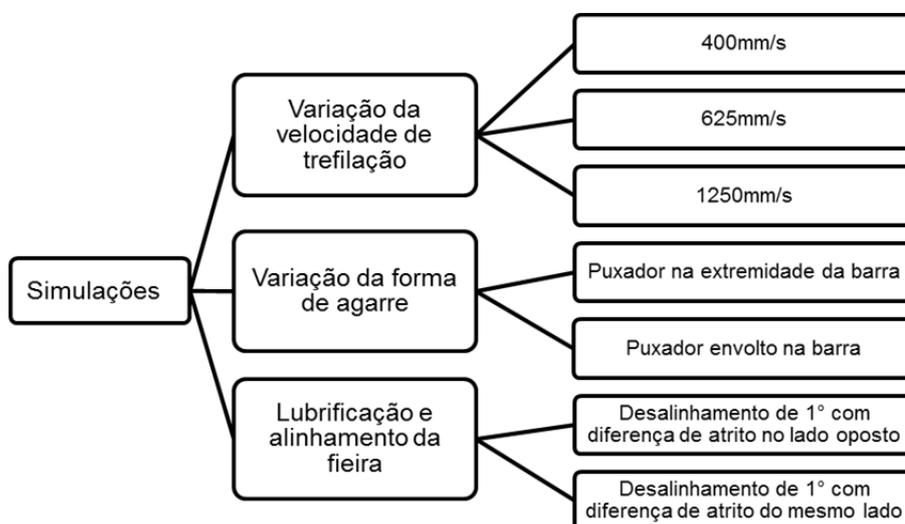


Figura 3. Fluxograma das simulações realizadas.

## 2.1 Software Simufact.formingGP®

Para a realização das simulações, foi considerado um modelo elasto-plástico não linear de plasticidade para a curva de escoamento do material AISI 1045 através do método de elementos finitos no software comercial Simufact.formingGP® para avaliar as tensões residuais geradas pelo processo de trefilação. O Software utiliza o solver Marc que por sua vez, para este caso, resolve o problema da não linearidade da curva de escoamento do material através do método Newton-Raphson<sup>(10)</sup> que introduz um vetor de correção residual para transformar equações lineares em não lineares até sua convergência.

O material isotrópico utilizado foi do banco de dados do software e este considera três taxas de deformação  $1,6s^{-1}$ ,  $8s^{-1}$  e  $40s^{-1}$ , respectivamente, dadas pelas Equações 1, 2 e 3.

$$k_f = 1018,098. \varphi^{0,1123} \quad (1)$$

$$k_f = 1012,572. \varphi^{0,0799} \quad (2)$$

$$k_f = 1008,29. \varphi^{0,0774} \quad (3)$$

Onde  $k_f$  representa a tensão de escoamento e  $\varphi$  a deformação.

Nestas simulações não foram considerados os efeitos térmicos e a ferramenta do processo (fieira) foi considerada rígida. Foi utilizado um ângulo de fieira ( $2\alpha$ ) de  $20^\circ$  com uma redução de aproximadamente 11% para todas as simulações. Os parâmetros utilizados nas simulações com o software Simufact.formingGP<sup>®</sup> são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Parâmetros da simulação do processo de trefilação - Simufact.formingGP<sup>®</sup>

Modo de simulação	3D Mecânica
Elementos	59700
Coeficiente de atrito doulomb ( $\mu$ )	0,1-0,15

## 2.2 Software Deform<sup>TM</sup>

Da mesma maneira, foi construído um modelo numérico tridimensional a partir do software Deform<sup>TM</sup>, sendo que este possui diferentes opções de solver: Lagrangian Incremental, ALE rolling, ALE extrusion, entre outros. Por ser indicado para forjamento convencional e processos como extrusão e trefilação, o método de solução utilizado foi Lagrangian Incremental. O aço AISI 1045 também foi considerado isotrópico, sem efeitos térmicos, com ferramenta (fieira) rígida e 5edução do diâmetro em 11%. Os demais parâmetros utilizados nas simulações são mostrados na Tabela 3.

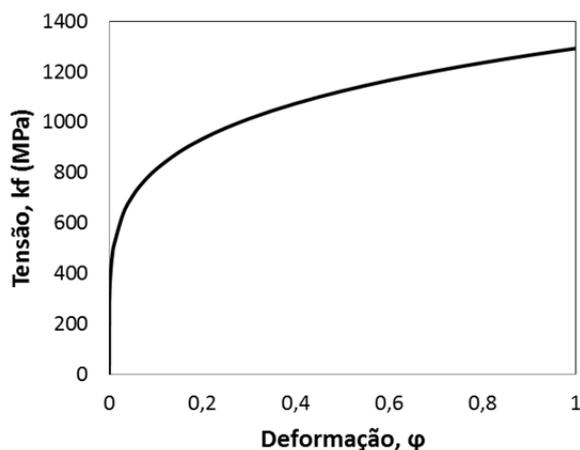
**Tabela 3.** Parâmetros da simulação do processo de trefilação – Deform<sup>TM</sup>

Modo de simulação	Isso-Thermal
Elementos	18750
Tipo de Análise	Elasto-plástica
Coeficiente de atrito de Coulomb ( $\mu$ )	0,1-0,15
$Kf_0$	368,875 MPa

A curva de escoamento utilizada para caracterização do material nas simulações utilizando o Deform<sup>TM</sup> foi obtida experimentalmente por um ensaio de compressão, sendo representada pela Equação 4.

$$k_f = 1292,8 \cdot \varphi^{0,2018} \quad (4)$$

A Figura 4 apresenta a curva de escoamento inserida como dado de entrada do material isotrópico.



**Figura 4.** Curva de escoamento utilizada no Deform<sup>TM</sup>.

### 3 VALIDAÇÃO NUMÉRICA

Antes de se comparar os perfis de tensões residuais obtidos na simulação com os resultados experimentais, foi feita uma análise de validação numérica para verificar a correspondência entre o modelo simulado e o problema físico. Após serem feitas as simulações, comparou-se a força teórica de trefilação segundo Siebel (Equação 5), com os valores de força simulados.<sup>(11)</sup>

$$F = A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} \cdot \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{\varphi_A} \right) \quad (5)$$

Onde:  $k_{fm}$  é a tensão de escoamento média,  $\varphi_A$  é a deformação verdadeira de área do material,  $\mu$  é o atrito de Coulomb,  $\alpha$  é o semi-ângulo da fieira e  $A_1$  é a área final da peça.

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Validação Numérica

As simulações numéricas foram validadas através da comparação entre os dados de força calculados pela Equação 5, equação de Siebel e simulados como demonstrado na Tabela 4.

**Tabela 4.** Comparação entre os resultados de força simulados e calculados

Parâmetros	Simufact.formingGP <sup>®</sup>	Deform <sup>™</sup>	Siebel
400 mm/s	71,4 (kN)	85,1(kN)	
625 mm/s	71,7 (kN)	94,4(kN)	
1250 mm/s	72,1 (kN)	94,0(kN)	64,4 (kN)
Puxador envolto (1250 mm/s)	73,0 (kN)	90,0(kN)	
Atrito 0,15 a 0°	83,2 (kN)	122,0(kN)	
Atrito 0,15 a 180°	83,7 (kN)	108,7(kN)	

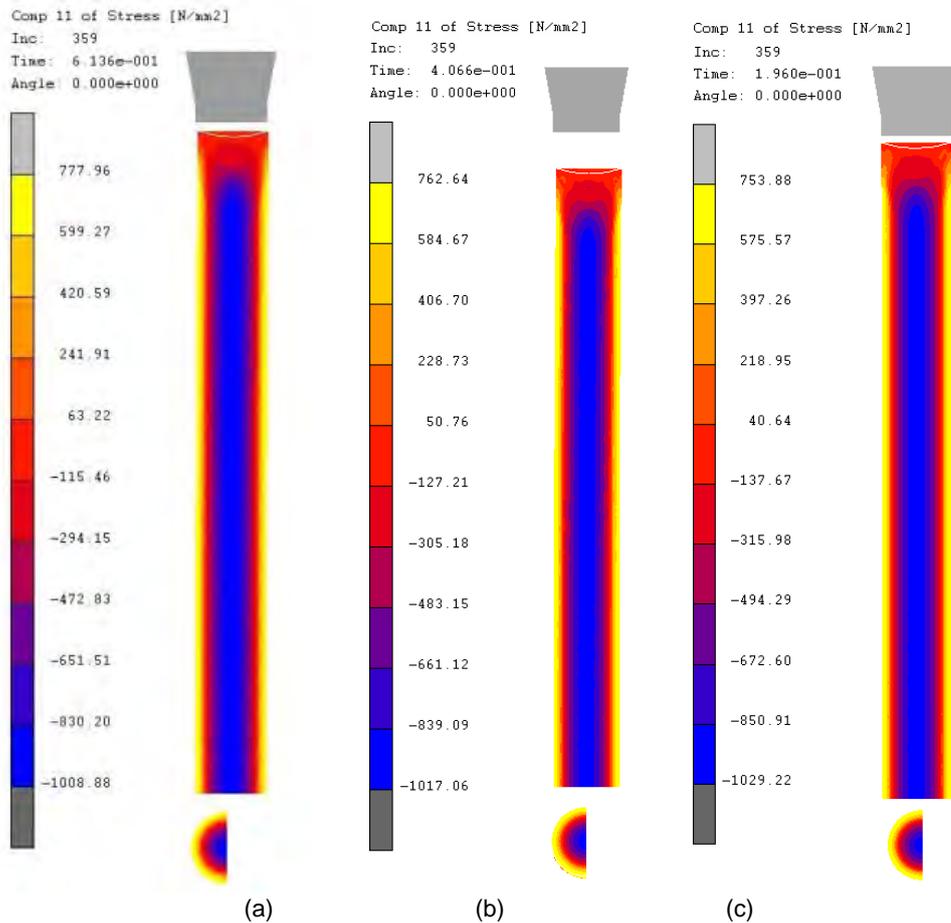
A diferença máxima entre os valores de força simulados pelo software Simufact.formingGP<sup>®</sup> e calculados pela equação de Siebel para a fieira de 20°, foi cerca de 25% para a simulação que considera dois diferentes atritos e desalinhamento da fieira. A diferença mínima foi de 10% para a simulação que considera velocidade de 400 mm/s.

Ao avaliarmos as forças geradas nas simulações utilizando o software Deform<sup>™</sup>, percebe-se que as diferenças passam a aumentar em relação às forças calculadas, chegando a 56% para a simulação com atritos diferentes e desalinhamento da fieira e a um mínimo de 32% para a simulação com velocidade de 400 mm/s.

As diferenças encontradas entre a simulação e as equações podem ser atribuídas a diversos fatores, dentre eles as limitações da equação de Siebel que, por exemplo, não considera a região de calibração. A consideração desta região levaria a forças um pouco maiores, reduzindo a diferença encontrada.

#### 4.2 Resultados das Simulações no Software Simufact.formingGP<sup>®</sup>

Conforme citado na seção 2, foram avaliadas três velocidades de trefilação: 400, 625 e 1.250 mm/s. Sendo assim, a Figura 5 apresenta os resultados obtidos, respectivamente, para tais velocidades.



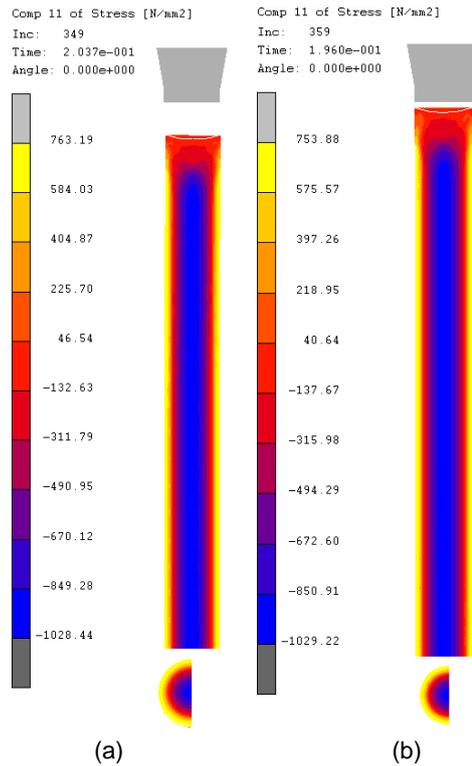
**Figura 5.** Simulações com puxador na ponta da barra para as velocidades de (a) 400 mm/s, (b) 625 mm/s e (c) 1.250 mm/s.

Pode-se verificar que para as velocidades de 400, 625 e 1.250 mm/s as tensões residuais identificadas após o processo foram, respectivamente:

- Centro: -1000 MPa e Superfície: 700 MPa;
- Centro: -1003 MPa e Superfície: 708 MPa;
- Centro: -1019 MPa e Superfície: 692 MPa.

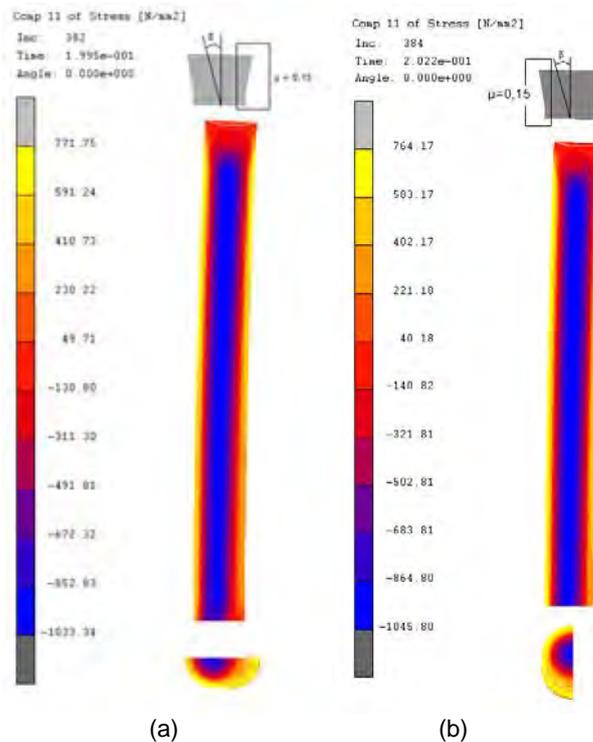
Para avaliar a influência da forma de agarre nas tensões residuais do processo de trefilação, foram realizadas duas simulações com os parâmetros apresentados nas Tabelas 1 e 2, variando-se apenas a localização do puxador.

A Figura 6 apresenta os perfis obtidos para as simulações com (a) puxador envolto na barra e (b) puxador na extremidade da barra.



**Figura 6.** Simulações com diferentes formas de agarre – (a) puxador envolto na barra (b) puxador na extremidade da barra.

Observa-se que, sem alterar velocidade ou coeficiente de atrito, a barra simulada com o puxador envolto resultou em uma tensão residual central de -1018 MPa e superficial de 701 MPa. Valores estes não distantes para a simulação com o puxador na extremidade da barra, a qual apresentou -1019 MPa no centro da barra e 692 MPa na superfície da mesma.



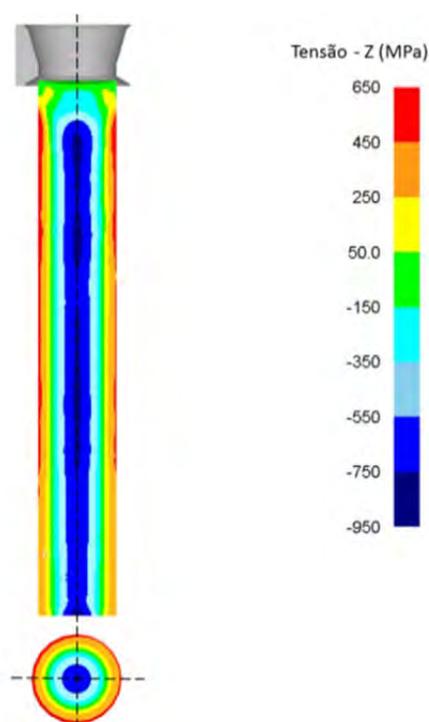
**Figura 7.** Simulações com dois diferentes atritos e desalinhamento da feira.

No lado da fieira em que o atrito é 0,15, ou seja, o lado oposto à inclinação  $\beta=1^\circ$  da fieira, demonstrado na Figura 7 (a), as tensões na superfície ficaram em torno de 545 MPa. Já no parte da fieira em que o atrito foi de 0,1, as tensões na superfície reduziram consideravelmente ficando com um valor de 325 MPa na superfície da mesma barra. No centro da barra, as tensões residuais também reduziram se comparar com as demais simulações, ficando com um valor de aproximadamente -975 MPa. Já na Figura 7 (b), pode-se perceber a simulação com atrito 0,15 no mesmo lado da inclinação fieira, onde na superfície, no lado da ferramenta em que o atrito foi 0,15, as tensões reduziram consideravelmente para 507 Mpa. No lado oposto, com atrito 0,1, as tensões mantiveram-se em aproximadamente 631 MPa. No centro da barra as tensões residuais permaneceram em cerca de -1017 MPa, seguindo o comportamento das demais simulações.

### 4.3 Resultados das Simulações no Software Deform<sup>TM</sup>

A fim de uma posterior comparação dos resultados, foi criado um modelo de referência com os parâmetros apresentados nas Tabelas 1 e 3. Tal modelo visa aproximar-se ao máximo do modelo ideal, com velocidade principal de 1250mm/s, mesmo coeficiente de atrito ( $0,1\mu$ ) entre a superfície da barra e a ferramenta, utilizando-se a forma de agarre com puxador na extremidade da barra.

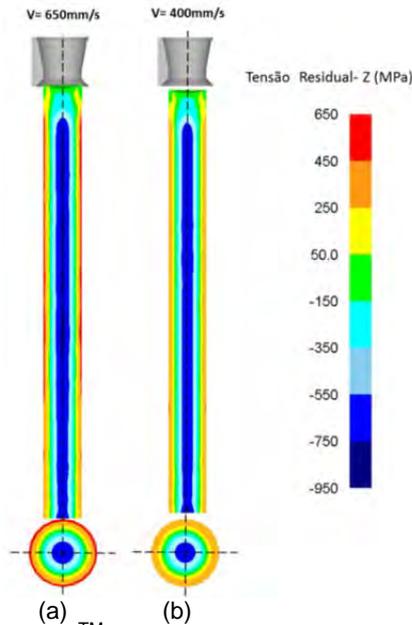
A Figura 8 mostra o resultado das tensoes residuais para este modelo de referência.



**Figura 8.** Perfil de tensões residuais para o modelo de referência (Deform<sup>TM</sup>).

Ao avaliar-se o perfil de tensões residuais, verifica-se que no centro a barra apresenta uma tensão máxima compressiva de -950 MPa e na sua superfície uma tensão máxima trativa de 650MPa, com distribuição quase homogênea.

Como citado anteriormente, a velocidade é um fator importante na avaliação do perfil de tensões residuais após a trefilação. Sendo assim, a Figura 9 apresenta os resultados das tensões residuais para a avaliação da velocidade com o software Deform<sup>TM</sup>.

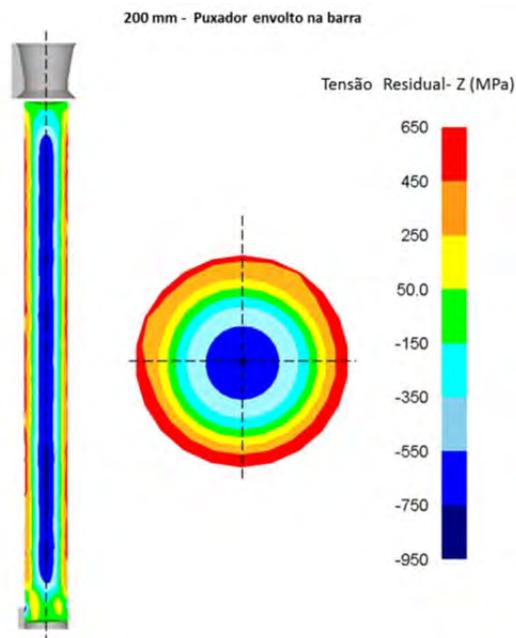


**Figura 9.** Simulações Deform™ para as velocidades: (a) 400 mm/s, (b) 625 mm/s.

Pode-se verificar que para as simulações com variação de velocidade (400 mm/s e 625 mm/s) a média das tensões residuais após o processo foram respectivamente:

- Centro: -743 MPa e Superfície: 441 MPa;
- Centro: -807 MPa e Superfície: 529 MPa.

Assim como a velocidade, a forma de agarre também foi avaliada. A Figura 10 apresenta os resultados para a simulação com o puxador envolto na barra.



**Figura 10.** Simulações com diferentes formas de agarre: puxador envolto na barra.

Pode-se observar que para esta simulação a barra possui um comprimento maior, este artifício foi utilizado para melhor construção do modelo e adaptação da malha hexaédrica, tal fator não implica nos resultados obtidos.

Houve uma distribuição não homogênea na superfície da barra, sendo que o valor de tensão residual máxima variou entre 650 e 450 MPa, e a tensão obtida no centro foi de -750 MPa.

A lubrificação, fator importante na análise do processo, foi variada juntamente com o desalinhamento da fieira, representando um erro de calibração de 1°. O comportamento referente às tensões residuais destas simulações pode ser visualizado na Figura 11.

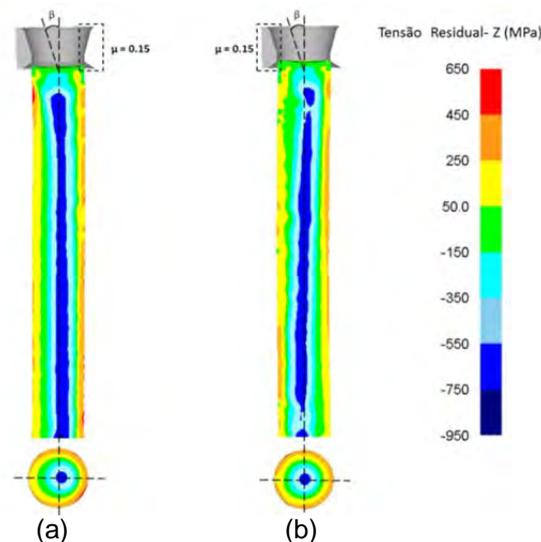


Figura 11. Simulações com diferentes atritos e desalinhamento da fieira.

Ao modificar o coeficiente de atrito modificou-se o comportamento das tensões residuais após o processo de trefilação. Ambas as simulações apresentaram perfis heterogêneos com diferentes distribuições de tensão, sendo que estas variaram entre -700 MPa no centro e 400 MPa na superfície da barra.

### 4.3 Discussão

Avaliando as simulações realizadas, pôde-se perceber uma redução das tensões residuais com a redução da velocidade. Segundo Nakagiri et al.<sup>(12)</sup> um dos parâmetros do processo que influencia nas condições finais dos produtos trefilados, entre elas o empenamento, é a velocidade de trefilação. Com o aumento desta velocidade de trefilação observa-se um incremento na variável empenamento. Quanto menor a velocidade, maior tempo de contato entre a fieira e a barra, ocorrendo maior e melhor distribuição do estado de tensões em todo o material, favorecendo para uma deformação mais homogênea de tensões residuais.

Já diz que a relação entre velocidade e empenamento aparece claramente em processos de trefilação quando o fio-máquina é trefilado a uma velocidade de 60 m/min, sendo situado entre 1 mm/m e 1,3 mm/m, enquanto que reduzindo a velocidade de trefilação para 50 m/min, há uma redução do empenamento médio para aproximadamente 0,7 mm/m.

Neste trabalho foram avaliadas duas posições para dois atritos diferentes em lados opostos da ferramenta. Percebeu-se uma grande variação nas tensões residuais entre estes lados e também, um empenamento visível foi verificado nas barras após a trefilação. A força de trefilação também teve um ganho considerável se consideradas com as simulações em que há apenas um atrito constante. Segundo a literatura, este atrito na interface ferramenta/peça pode ter um grande efeito no

escoamento do material como defeitos internos e externos de formação e requisitos de maior força e energia no processo.<sup>(13-16)</sup>

Quanto às diferentes formas de agarre, constatou-se que os resultados são divergentes, sendo que para o software Deform<sup>TM</sup>, as tensões residuais variam em torno de 150 MPa e a distribuição é heterogênea na superfície da barra; enquanto que para o Simufact.formingGP® estes valores não apresentam significativas variações.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados pode-se concluir que:

- quanto aos valores de força encontrados nas simulações, pode-se concluir que, utilizando o software Simufact.formingGP®, estas são consideradas aceitáveis ao serem comparados com a equação empírica de Siebel, pois, a maior diferença verificada foi de 25% na avaliação da força simulada em que o atrito avaliado é considerado alto para este processo. Para as simulações realizadas através do Deform<sup>TM</sup>, os valores resultantes de força aumentaram em 56%, o que pode ser atribuído à diversos fatores, dentre eles as limitações da equação de Siebel que, por exemplo, não considera a região de calibração;
- quanto a consideração de diferentes velocidades de processo, as simulações com velocidade de 400 mm/s apresentaram perfil de tensões mais homogêneo em relação as outras simulações e também, com menores tensões;
- quanto a forma de agarre, as diferenças no perfil das tensões residuais variaram em função do *software* utilizado, sendo necessário um estudo mais aprofundado neste caso;
- a combinação dos fatores lubrificação e erro de calibração da ferramenta nas simulações realizadas, para ambos os softwares, resultaram em perfis heterogêneos de tensões residuais, sendo que a combinação destes parâmetros gera maior probabilidade de distorções no produto após o tratamento térmico.

## Agradecimentos

Agradecemos a Capes, CNPq e Finep pelo apoio financeiro através do programa Bragecrim (Brazilian German Collaborative Research Initiative in Manufacturing Technology) e também a FAPERGS pelo financiamento de uma bolsa de iniciação científica.

## REFERÊNCIAS

- 1 Santos, C. C. dos. Influência de Parâmetros de Processo no Empenamento de Barras Trefiladas do Aço 9254. Dissertação de Mestrado, PPGEM – UFRGS, 2008.
- 2 WANG, Z.; GONG, B. "Residual Stress in the Forming of Materials." In *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. p. 141-49. Canada: ASM International, 2002.
- 3 Tekkaya A.E.; "State-of-the-art of Simulation of Sheet Metal Forming", *Jornal of Materials Processing Technology* 103, 2000, p:14-22, doi:10.1016/S0924-0136(00)00413-1.
- 4 ARBAK, E. et al. "Forging Simulation at Izeltas." In *4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds – CESME*, 4. Turkey, 2007.

- 5 Martins, C. O. D., Strohaecker, T. R., Rocha, A. S., Hirsch, T. K. Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100. In: *Matéria*, vol 9, Nº 1(2004) 23 – 31.
- 6 Palmeira, A. A. Processos de Trefilacao. Departamento de Mecânica e Energia. UERJ, 2005.
- 7 GAMBIN, W. "A Method of Large Finite Elements." In *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. p. 351-65: Elsevier, 1977.
- 8 NORASETHASOPON, S.; YOSHIDA, K. . "Prediction of Chevron Crack Initiation in Inclusion Copper Shaped-Wire Drawing." *Engineering Failure Analysis* 15 (2008): p. 378-93.
- 9 ARAÚJO, A. C. . "Análise Da Formação De Bandas De Cisalhamento Por Meio De Corpos De Prova De Tração Especiais". Dissertação de mestrado. UFMG, 2009.
- 10 MARC<sup>®</sup>. Theory and user information. Volume A, 2010, p. 713-726.
- 11 Dieter, G.; "Metalurgia Mecânica". Rio de Janeiro, Guanabara Dois, p: 653, 1981.
- 12 Nakagiri, A., Yamano, T., Konada, M., Asakawa, M., Sasaki, W. Behavior of Residual Stress and Drawing Stress in Conical-Type Die and Circle-Type Die Drawing by FEM Simulation and Experiment. *Wire Journal International*, p. 72-80, 2001.
- 13 BUDINSKI, K. G.; BLAU, P. J. . "Testing Methods for Solid Friction ". In *Handbook of Mechanical Testing and Evaluation*. p. 306-16: ASM International, 2000.
- 14 GODFREY, H. "The Benefits of Using Wiredrawing Dies with Smaller Included Angles and Longer Nibs." *Wire Journal International* 33, no. 6 (2000): p. 102.
- 15 ATIENZA, J. M. et al. "Residual Stresses in Cold-Drawn Pearlitic Rods." *Scripta Materialia* 52, no. 12 (2005): p. 1223-28.
- 16 ROCHA, A. S. et al. "Simulação Computacional De Um Processo De Trefilação Para Produção De Barras Redondas De Aço AISI 1045." *Revista Escola de Minas*, 2011, p. 513-18.