

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

**SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE E MINIMIZAÇÃO DAS
TENSÕES RESIDUAIS NO PROCESSO DE TREFILAÇÃO**

Tomaz Fantin de Souza

**Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia**

Porto Alegre
2011

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

Simulações Computacionais para Análise e Minimização das Tensões Residuais no Processo de
Trefilação

Tomaz Fantin de Souza

Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2011

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Processo de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha, PPGEM - UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Carlos Augusto Silva de Oliveira
Prof. Dr. Eng. Lírio Schaeffer
Dr. Eng. Alberto Moreira Brito

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

“No centro da própria engrenagem,
inventar a contra-mola que resiste”
Secos e Molhados

Agradecimentos

Primeiramente aos meus pais Leonildo e Janete de Souza e minha irmã Bianca que me apoiaram em todos os momentos.

Ao meu orientador professor Dr. Eng. Alexandre Rocha pela dedicação, confiança e apoio desde a indicação para a bolsa, indicação para o estágio de mestrado na Alemanha, esclarecimentos, orientação e puxões de orelha até o fechamento desta dissertação.

À equipe que trabalhou comigo nesse projeto e no desenvolvimento das simulações computacionais nestes últimos dois anos, esses colegas foram parte fundamental na realização deste trabalho, Eng. Carla Soares, graduando em engenharia metalúrgica Tiago Coser, Eng. Milena Mondardo, graduando em engenharia mecânica Lorenzi Freitas, Ing. Stephan Haenisch.

À equipe do GES e aos colegas que fazem parte do projeto maior que este trabalho está inserido, Msc. Engenheiro Rafael Nunes, MSc. Eng. Guilherme Both e Eng. Juliana Dagnese, graduando em engenharia metalúrgica Ricardo.

Ao pessoal da sala de Forjamento do Centro de Tecnologia, em especial ao Dr. Eng. Alberto Brito, Eng. Tiago Gomes, MSc. Eng. Diego Papanduva, Eng. Gian Medeiros, Eng. Tiago Colombo, MSc. Alexandre Moraes e Tecg^o Angela Selau Marques pela troca de informações e pelas conversas de alto nível referentes à engenharia ou não.

À equipe do LdTM, em especial ao professor Dr. Eng. Lírio Schaeffer pelas disciplinas ministradas e esclarecimentos.

À equipe do IUL Dortmund, por terem me recebido de braços abertos no estágio realizado na Alemanha e pela ajuda prestada para a realização deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Aos meus grandes amigos Marauê, Daniel de Leon, Daniel Damiani, Karen Dentes, Juliano de Sá, José Rosalez, Rodrigo, Tábata e Maurício que me suportaram por diversas angústias relacionadas a este trabalho ou não.

Ao pessoal do futebol das terças-feiras e ao pessoal do futebol das quintas-feiras, em especial ao Rodrigo, à Crissi, Flavio, Jimi.

À minha namorada Tamara Bubanz, luz dos meus olhos.

Índice:

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	14
1.1	Introdução e objetivos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Simulações Computacionais em Processos de Fabricação	16
2.2	Método de Elementos Finitos	16
2.2.1	Cálculo de Tensões Residuais em Processos de Trefilação através da utilização de MEF	17
2.3	Tensões Residuais	18
2.3.1	Origem e importância das tensões residuais	19
2.3.2	Tensões Residuais em Trefilação	19
2.3.3	Métodos de Medição	20
2.3.3.1	Métodos Destrutivos	20
2.3.3.2	Métodos Semi-Destrutivos	21
2.3.3.3	Métodos Não-Destrutivos	22
2.4	Trefilação	24
2.5	Trefilação Combinada	25
2.5.1	Pré-endireitamento	26
2.5.2	Jateamento com Granalha	26
2.5.3	Trefilação	26
2.5.4	Endireitamento Com Rolos	27
2.6	Empenamentos, rompimentos, defeitos superficiais	27
2.7	Parâmetros do Processo de Trefilação	28
2.7.1	Força de Trefilação	28
2.7.2	Ângulo de Fieira	29
2.7.3	Parâmetro Δ	30
2.7.4	Temperatura	30
2.7.5	Curva de Escoamento	32
2.7.6	Atrito	33
3	OBTENÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS	35
3.1	Obtenção da Curva de Escoamento	35
3.2	Ensaio do Anel para Estimativa do Coeficiente de Atrito	37
3.3	Medição das Tensões Residuais via Difração de Nêutrons	39
4	MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS	41
4.1	Simulação do Processo Real	41
4.1.1	Modelo Axissimétrico Mecânico com Fieira Rígida	42
4.1.2	Modelo Axissimétrico Mecânico com Fieira Elástica	43
4.1.3	Modelo Axissimétrico Termomecânico com Fieira Rígida	43
4.1.4	Modelo Mecânico Tridimensional	44
4.2	Simulação com Variação dos Parâmetros do Processo	45
4.2.1	Diferentes Ângulos de Fieira	45
4.2.2	Diferentes Curvas de Escoamento, Velocidade e Diâmetro das barras	46
4.2.3	Fieira com Duas Reduções	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1	Modelos desenvolvidos para Reproduzir o Processo Real	48
5.1.1	Forças e Deformações	48
5.1.2	Tensões Residuais	49
5.2	Modelos desenvolvidos Variando-se os Diferentes Parâmetros do Processol	54
5.2.1	Forças e Deformações para Diferentes ângulos de Fieira	54
5.2.2	Tensões Residuais para Diferentes ângulos de Fieira	57
5.2.3	Tensões Residuais para Diferentes Curvas Tensão Deformação, velocidade de Trefila e Diâmetro das barras	58
5.3	Diferente Configuração Geométrica de Fieira	59
6	CONCLUSÕES	62

7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	64
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

Índice de figuras:

<i>Figura 1-1 – Processo de Trefilação Combinada [Nunes, 2009].</i>	14
<i>Figura 2-1 – Método Slting Utilizado Para Medir Tensões em Barras.</i>	21
<i>Figura 2-2 – Tipos de Extensômetros Utilizados na Aquisição das Deformações para o Método do Furo Cego.</i>	21
<i>Figura 2-3 –Espalhamento das Ondas Medidas sobre a Superfície[ASTM Handbook].</i>	24
<i>Figura 2-4 – Fieira da trefilação e suas Regiões[Nunes, 2007].</i>	25
<i>Figura 2-5 – Principais Etapas do Processo de Trefilação[Rocha, 2008].</i>	26
<i>Figura 2-6 – Tensões trativas e compressivas atuando em elemento da barra de trefilação[Dieter, 1986]</i>	27
<i>Figura 2-7 – Trefilação e Parâmetro Δ.</i>	30
<i>Figura 2-8 –Diagrama Tensão-Deformação.</i>	31
<i>Figura 2-9 – Corpos de Prova antes e após Ensaio de tração.</i>	32
<i>Figura 3-1 – Equipamentos Utilizados para a Realização dos Ensaios de Tração.</i>	35
<i>Figura 3-2- Dimensões dos Corpos de Prova utilizados no Ensaio de Tração.</i>	36
<i>Figura 3-3 – Curvas de Escoamento Encontradas através do Ensaio de Tração.</i>	36
<i>Figura 3-4 – Resultados da Simulação do Ensaio do Anel.</i>	38
<i>Figura 3-5 – Curva de Calibração para o Ensaio do Anel.</i>	39
<i>Figura 3-6 – Tamanho e Dimensões dos Corpos de Prova utilizados para Medições das Tensões Residuais.</i>	39
<i>Figura 3-7 – Desenho Esquemático do Instrumento que Realiza as Medições.</i>	40
<i>Figura 4-1 – Processo de Trefilação Combinada.</i>	41
<i>Figura 4-2 – Etapas da Trefilação.</i>	41
<i>Figura 4-3 – Modelo Bidimensional Criado.</i>	42
<i>Figura 4-4 –Modelo Tridimensional Criado.</i>	43
<i>Figura 5-1 –Resultados para a Força de Trefilação</i>	48
<i>Figura 5-2 –Resultados para a deformação global equivalente.</i>	49
<i>Figura 5-3-Tensões Residuais nas direções axial, radial e tangencial para o ângulo de fieira 15°</i>	51
<i>Figura 5-4 – Tensões Residuais nas direções axial, radial e tangencial para o modelo mecânico axissimétrico com fieira elástica</i>	53
<i>Figura 5-5 –Resultados para a Força de Trefilação para Diferentes ângulos de Fieira</i>	55
<i>Figura 5-6 Tensões Residuais nas direções axial, radial e tangencial para diferentes ângulos de Fieira.</i>	57
<i>Figura 5-7 – Tensões Residuais na direção axial, radial e tangencial para diferentes Parâmetros do Proceso.</i>	58
<i>Figura 5-8 – Tensões Residuais na direção axial, radial e tangencial para a fieira com 2 reduções</i>	60

Índice de tabelas:

<i>Tabela 3-1 – Parâmetros da Simulação do Ensaio do Anel.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 3-2 – Dados do Equipamento utilizado para Medições por Difração de Nêutrons.</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 4-1 – Parâmetros da Simulação do Processo de Trefilação.</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 4-2 – Parâmetros do Processo de Trefilação com Feira Elástica.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 4-3 – Parâmetros do Processo de Trefilação Termomecânica.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 4-4 – Parâmetros Térmicos da Feira.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 4-5 – Parâmetros da Simulação Tridimensional.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 4-6 – Processo de Simulação com Diferentes ângulos de Feira</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 4-7 – Simulação da Trefilação Variando os Parâmetros</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 4-8 – Simulação com 2 Reduções de Feira.....</i>	<i>47</i>

Lista de símbolos e abreviaturas

r	Raio da barra;
A_0	Área inicial;
A_1	Área final;
d_0	Diâmetro inicial;
d_1	Diâmetro final;
d_m	Diâmetro médio;
β	Semi-ângulo de entrada;
α	Semi-ângulo de trabalho;
γ	Semi-ângulo de saída;
μ	Coefficiente de atrito;
Δ	Parâmetro Delta;
K_{f_m}	Tensão de escoamento média;
K_{f_0}	Tensão de escoamento inicial;
φ	Deformação verdadeira;
l	Comprimento da zona de deformação;
L_i	Comprimento inicial;
L_f	Comprimento final
d'	Espaçamento interplanar;
θ	Ângulo de difração;
n	Número inteiro;
λ	Comprimento de onda;
ε_1	Deformação local na direção 1;
ε_2	Deformação local na direção 2;
ε_3	Deformação local na direção 3;
φ_a	Deformação axial verdadeira
$\dot{\varphi}$	Taxa de deformação
σ_1	Tensão na direção 1;
σ_2	Tensão na direção 2;
σ_3	Tensão na direção 3;
X	

σ_r	Tensão radial;
A	Constante de calibração para o método do furo cego;
B	Constante de calibração para o método do furo cego;
$\tau_{m\acute{a}x}$	Tensão cisalhante máxima;
m	Comprimento da barra;
Δh	Abertura da deflexão;
Δ	Parâmetro delta;
H_c	Comprimento da região de trabalho;
M	Momento fletor aplicado à barra
I	Momento de inércia
c	Distância em relação ao eixo neutro
E	Módulo de Elasticidade
R	Raio de curvatura

RESUMO

Este trabalho é parte da cooperação internacional BRAGECRIM (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa em Tecnologia de Fabricação) do projeto "*Investigation and improvement of a manufacturing process chain from cold drawing processes to induction hardening – reducing dimensional changes and distortion*" (Investigação e Melhoramento de uma Rota do Processo de Trefilação Combinada e Endurecimento por Indução para Minimização de Distorções e Mudanças de Forma) e está diretamente relacionado ao tema de estudo. As tensões residuais são aquelas presentes em um material quando não há atuação de forças externas ou presença de gradientes de temperatura, podendo gerar distorções de forma e empenamentos. Elas podem atuar de forma benéfica, para o caso de possuírem sentido contrário ao da carga de trabalho; ou maléfica, no caso do seu sinal ser o mesmo da carga aplicada em regime, o que gera, por exemplo, redução da vida em fadiga. Com a evolução dos *softwares* de modelagem e simulação numérica dos últimos 40 anos, a simulação computacional tem se mostrado uma importante ferramenta para prever o comportamento, as características geométricas e os parâmetros (velocidade, força, etc) dos processos de fabricação. Neste trabalho, foram simuladas numericamente através do método de elementos finitos as tensões residuais geradas durante a trefilação de barras redondas de aço AISI 1045, os resultados numéricos foram comparados com medições de tensões residuais via difração de nêutrons e com equações fornecidas pela literatura para avaliação de forças e deformações. Foram criados três modelos axissimétricos (mecânico axissimétrico, mecânico axissimétrico com feira elástica, termomecânico axissimétrico) e outro tridimensional mecânico com o objetivo de reproduzir o processo de fabricação. Os parâmetros que alimentaram o software foram adquiridos de processos industriais em uso corrente e na literatura, dentre eles: o coeficiente de atrito do processo, a curva tensão-deformação das barras, as dimensões das barras e a velocidade de trefilação. A necessidade do conhecimento prévio do valor do coeficiente de atrito como um dado de entrada para o *software* impôs a realização de simulação computacional para o ensaio do anel, criando uma curva de calibração posteriormente confrontada com os resultados experimentais do mesmo ensaio. A curva de escoamento do material foi obtida através de ensaio de tração e as tensões residuais foram medidas via difração de nêutrons e comparadas com os resultados simulados. O modelo que indicou maior aproximação com os valores de força teórica foi escolhido para a variação de alguns parâmetros como: taxas de deformação, ângulos de feira e configuração geométrica das reduções para se estimar a influência destes na geração de tensões residuais. A comparação entre os resultados de força e deformação analíticos e numéricos demonstrou que os modelos desenvolvidos descrevem corretamente o processo. Observou-se uma grande diferença entre os resultados de tensões residuais simulados e medidos via difração de nêutrons para o centro das barras na direção axial, principal responsável pelo surgimento de tensões residuais, que podem ser originados de erros da medição experimental e da não consideração de importantes fenômenos físicos que ocorrem no comportamento do material como o efeito Bauschinger e a anisotropia do material. A magnitude das tensões residuais na direção axial aumenta com o aumento do semi-ângulo de feira; e as taxas de deformação não modificaram significativamente os resultados, demonstrando não afetar em grande escala o desenvolvimento das tensões residuais. O modelo com duas reduções de feira mostrou-se o que gera menores gradientes de tensão residual, diminuindo os valores compressivos no centro da barra, sendo este o sugerido como melhoramento do processo.

Palavras chave: trefilação, tensões residuais, simulação computacional, difração de nêutrons.

ABSTRACT

This work is part of international cooperation BRAGECRIM (Brazil-German Initiative for Research in Manufacturing Technology) of the project "Investigation and improvement of the manufacturing process chain from cold drawing to induction hardening processes - Reducing dimensional changes and distortion" is directly related to the topic of this study. Residual stresses are those present in a material when there is no action of external forces or presence of temperature gradients, it may lead distortions of form and warping. They can act in a beneficial way, in case they have opposite direction of the loading, or evil, in case your signal is the same under the applied stresses, which generates, for example, reduction of life in fatigue. The evolution of software modeling and numerical simulation of the last 40 years, computer simulation has become an important tool to predict the behavior, geometric characteristics and parameters (speed, strength, etc.) of manufacturing processes. In this work, the residual stresses generated during the drawing of round bars of steel AISI 1045 were numerically simulated using the finite element method, the numerical results were compared with measurements of residual stresses via neutron diffraction and equations given in the literature for evaluating forces and deformations. It was carried out three axisymmetric models (mechanical axisymmetric, axisymmetric with elastic die, thermomechanical axisymmetric) and other three-dimensional mechanical aiming to replicate the manufacturing process. The parameters that fed the software were acquired from industrial processes in current use and literature, among them: the coefficient of friction of the process, the stress-strain curve of the bars, the dimensions of the bars and wire drawing speed. The necessity of knowing the coefficient of friction as an input for the software imposed the implementation of computer simulation to ring test, to create a calibration curve to compare with the experimental results of the same test. The flow curve of the material was taken by tensile test and the residual stresses were measured via neutron diffraction and compared with the simulated results. The model that indicated closer values with theoretical force was chosen for the variation of some parameters such: strain rates, die angle and geometric configuration of the reductions to estimate their influence on the generation of residual stresses. The comparison between the results of their force and deformation and numerical models developed showed that the models correctly describe the process. There was a big difference between the results of simulated and measured residual stresses via neutron diffraction in the center of the bars to the axial direction, the main responsible to the level of residual stresses, which can be derived from errors in the experimental measurement and the for not consider important physical phenomena occurring in the material behavior as the Bauschinger effect and anisotropy of the material. The magnitude of residual stresses in the axial direction increases with increasing die angle, and the strain rate did not change significantly the results showing no affect on a large field development of residual stresses. The model with two reductions showed lower gradients of residual stress, low compressive values in the center of the bar, which is suggested as a process improvement.

Keywords: wire drawing, residual stresses, computer simulation, neutron diffraction.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução e objetivos

Este trabalho foi desenvolvido como parte do projeto "Investigação e Melhoramento de uma Rota de Fabricação do Processo de Trefilação Combinada e Endurecimento por Indução para Minimização de Distorções e Mudanças de Forma" da cooperação internacional BRAGECRIM (Cooperação Internacional Teuto-brasileira para Pesquisa em Processos de fabricação), e parte foi desenvolvida no IUL (Institut fuer Umformtechnik und Leichtbau), na cidade de Dortmund, Alemanha.

A evolução dos processos de fabricação, bem como a crescente competitividade e a necessidade de se evitar a perda de matéria-prima e de energia obrigam que os fenômenos envolvidos em processos de fabricação sejam conhecidos e controlados, de forma que sejam evitados gastos desnecessários, e que se melhore a qualidade do produto final [Tekkaya, 2000].

Dentre os processos de fabricação, a trefilação tem lugar de destaque, e pode ser definida como um processo por deformação plástica no qual há um tracionamento da matéria-prima (como o fio-máquina, por exemplo) através da ferramenta (fieira), ocasionando uma redução de área na seção transversal e aumento do comprimento [Dieter, 1986].

Algumas das características principais do processo de trefilação são: o excelente acabamento superficial e a ótima precisão dimensional alcançados, além do ganho de resistência mecânica e a alta velocidade de processamento. Um dos materiais usados na trefilação de barras é o fio-máquina, ou seja, aço laminado de seção contínua, usualmente cilíndrica, fornecido em rolos.

O uso de produtos trefilados aumentou nos últimos anos [Lange, 2006]. Na **Figura 1.1** é apresentado o processo de trefilação combinada, onde o fio-máquina sai da bobina em que foi armazenado em etapas iniciais de seu processamento; passa pelo processo de pré-endireitamento, que objetiva orientar a matéria-prima, sofre o processo de jateamento para que sejam introduzidas tensões residuais compressivas na superfície para aí sim passar pela etapa de trefilação; após, o material é cortado, polido e endireitado para que se introduzam tensões residuais compressivas [Nunes, 2009].

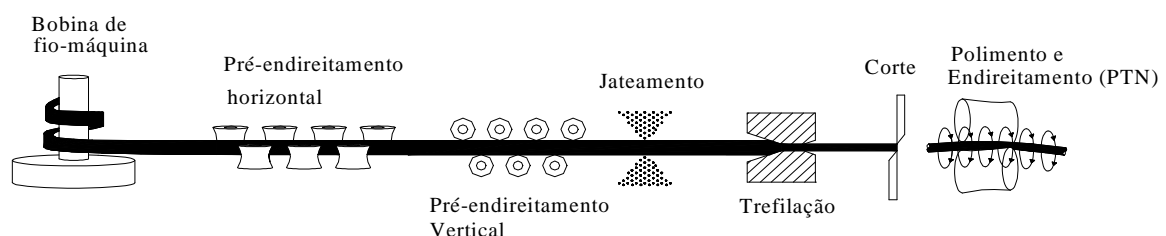


Figura 1.1: Processo de trefilação combinada [Nunes, 2009]

Quando um material é transformado por deformação plástica, como é o caso do processo de trefilação, podem originar-se tensões residuais que podem alterar dimensões, propriedades mecânicas e o

comportamento do material em trabalho, podendo levar a falhas catastróficas de um componente em serviço [Atienza, 2001].

Tensões residuais são as presentes em um material quando este não está submetido a aplicação de forças externas ou diferenças de temperatura. O sistema de tensões residuais necessita estar em equilíbrio e o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos será zero. O valor máximo em módulo que o valor efetivo (dado, por exemplo, pela tensão equivalente de Von Mises) das tensões residuais poderão chegar é o próprio limite de escoamento do material (localmente considerado e levando em conta o histórico de processamento do material) [Shinohara e Yoshida, 2005; Nunes, 2009].

Desde os anos 60, o uso de análises numéricas utilizando, dentre outros, o método de elementos finitos [Woo, 1968], 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 [Tekkaya, 2000, Atienza 2001, Atienza et. al, 2003]. Para o caso da trefilação pode-se, por exemplo, aperfeiçoar as dimensões da peça de trabalho, geometria da fiação, aperfeiçoar parâmetros de processo, dentre outras possibilidades.

Este trabalho é dividido em 6 capítulos:

Introdução e Objetivos: Onde se apresenta o objeto de estudo, os resultados desejados e sua contextualização dentro dos problemas de processos de fabricação.

Revisão Bibliográfica: São apresentados os principais conceitos dos processos de fabricação como: tensões, deformação e taxas de deformação e os critérios que os descrevem matematicamente; detalhes sobre o comportamento mecânico dos metais: elasticidade e plasticidade; testes usuais para a caracterização mecânica dos materiais; a trefilação e seus parâmetros mais importantes, as tensões residuais e o método de medição via difração de nêutrons e uma breve revisão sobre o método de elementos finitos.

Procedimento Experimental: Onde são apresentados os procedimentos para obtenção dos parâmetros de entrada para software: ensaio do anel para obtenção do coeficiente de atrito, ensaio de tração para adquirir a curva de escoamento do material; são também descritas as medições por difração de nêutrons para obtenção dos perfis de tensões residuais e comparação com os valores simulados.

Modelo Numérico de Elementos Finitos: Apresentam-se as modelagens computacionais que foram desenvolvidas para descrever numericamente um processo real de trefilação e as que se modificou os parâmetros do processo para a avaliação da influência destes na geração das tensões residuais.

Resultados e Discussão: Em que é feita a validação dos primeiros modelos criados através da comparação das forças e deformações calculadas e simuladas, são mostradas as comparações dos perfis de tensões residuais medidos e simulados, assim como os valores de tensões residuais dos modelos onde variaram-se os parâmetros de processo.

Conclusões: são apresentadas as principais conclusões deste trabalho e as sugestões para futuros aprofundamentos deste trabalho

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Simulações Computacionais em Processos de Fabricação

Nos últimos 50 anos o uso de análises numéricas utilizando, o método de elementos finitos [Woo, 1968], 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 permitem melhorar o processo antes mesmo da construção de protótipos, evitando assim, investimentos desnecessários [Yanran et.al., 1995]. Devido aos últimos avanços computacionais atingiu-se um progresso vertiginoso nessa área. Segundo Tekkaya [Tekkaya, 2000]: "No passado, introduzia-se 3 novos modelos a cada 10 anos, hoje em dia é possível introduzir 10 novos modelos a cada 3 anos".

Além disso, a aplicação de simulação computacional permite, dentre outras coisas:

- Eliminação do modelamento físico do processo tecnológico, assim como redução de custos de material e perdas de energia ligadas à produção de protótipos físicos,
- Otimização dos parâmetros tecnológicos de trabalho em metais e melhoramento da qualidade final dos produtos,

- Previsão de quantidade de material suficientemente necessária para a realização do processo,

Modelagem e simulação podem ser usadas para prever o escoamento do material, análise de tensões, deformações e distribuição de temperatura, prever possíveis defeitos e falhas, melhorar a qualidade e a complexidade das peças, além de reduzir os custos. Para o caso da trefilação pode-se, por exemplo, aperfeiçoar as dimensões da peça de trabalho e geometria da fiação dentre outras possibilidades [Dieter, 1986]. Nos dias de hoje, a modelagem e a simulação computacional freqüentemente estão integradas com o processo de design e fabricação de determinados componentes [Tisza, 2004].

Para se realizar uma simulação computacional, é necessário que se conheçam todos os principais parâmetros do processo: propriedades dos materiais, leis constitutivas, tribológicas e de lubrificação. Além disso, antes de se iniciar a realização de um modelo é muito importante estimar-se o tempo computacional que se deseja para a realização do mesmo.

2.2 Método de Elementos Finitos

De acordo com Martins [Martins, 2005], o Método de Elementos Finitos: "se baseia na discretização do domínio de aplicação das equações de derivadas parciais que descrevem o comportamento macroscópico dos materiais metálicos através de sub-domínios de tamanho finito (denominados, elementos). Cada elemento é constituído por pontos nodais nos quais são definidas as variáveis físicas, sendo o valor destas variáveis interpolado entre os pontos nodais."

Inicialmente desenvolvido para sistemas lineares, com o aumento da capacidade de memória e velocidade, o Método dos Elementos Finitos pode ser empregado para os sistemas não-lineares, como, por

exemplo, a plasticidade, nos quais as tensões não são proporcionais a deformação [Yoshida e Furuya, 2004].

Com o MEF, os problemas da engenharia, descritos por equações diferenciais parciais, são discretizados e então convertidos em equações algébricas. Esse método permite, desta forma, lidar com problemas envolvendo condições de estado estacionário ou transiente, em regiões lineares e não-lineares, em uma, duas ou três dimensões e para formas algébricas mais complexas, permitindo obter informações sobre o fluxo do material durante o processo e sobre suas deformações, tensões e temperaturas da peça, o que o converteu em uma ferramenta básica para a indústria e pesquisa no campo dos Processos de Fabricação. [Iankov, 2003; Karnezis e Farrugia, 1998; Norasethosopon e Yoshida, 2008].

À medida que o domínio do método foi se aprofundando, mais e melhores softwares foram sendo criados, com maior capacidade para trabalhar em regiões não-lineares e capazes de simular com sempre maior precisão os processos de conformação mecânica. Softwares mais recentes são capazes de introduzir parâmetros operacionais até então não disponíveis na simulação, tais como: tipo do equipamento (prensa hidráulica, martelos, laminadores, etc) tipo da aplicação do carregamento (intermitente ou contínua) e a simulação de final de processamento, com o alívio do carregamento e a retirada das ferramentas, entre outras. Além disso, permite a simulação de processos nos quais estão presentes várias etapas, transferindo os resultados obtidos na etapa anterior para as posteriores. Somem-se a isto as facilidades incluídas no pós-processamento com inúmeras ferramentas de análise de resultados [Neves, 2003].

Entretanto, a simulação do processo de trefilação é mais difícil de ser realizada, considerando um aspecto específico do modelo, onde em um dado instante, regiões da peça não estão em contato com a ferramenta, vindo a seguir a estabelecer este contato e, posteriormente, deixar a região de deformação, perdendo-o novamente.

2.2.1 Cálculo das Tensões Residuais em Processos de Trefilação através da utilização de Elementos Finitos

Basicamente o cálculo de tensões residuais não difere do cálculo de outras tensões [Dieter, 1986]. Basta utilizar as ferramentas numéricas para analisar o estado de tensões resultante após o material ter sido submetido a carregamentos.

A exatidão do cálculo das tensões residuais é muito importante nas aplicações de MEF aos problemas de trabalho mecânico, especialmente quando se busca conhecer o estado de tensões residuais. O estado determinado pelas deformações elásticas que permanecem uma vez terminados o processo e que interatuam com grandes deformações plásticas para gerar a deformação.

Depois do descarregamento, existe um estado de tensões presentes, que será, por definição, o estado de tensões residuais. Se as tensões residuais são resultado do histórico de carregamentos aplicados, essas tensões são resultado das deformações plásticas ocorridas durante a deformação, o que dificulta em muito a análise [Oeverstam, 2006; Lu et. al. , 2009, Luis et. al., 2005].

2.3 Tensões Residuais

2.3.1 Origem e importância das tensões residuais

As tensões residuais podem ser definidas como um estado de tensões internas equilibradas que existe em corpos livres de forças exteriores ou restrições atuando em seu contorno. Estas tensões surgem como um produto da resposta elástica do material a uma deformação heterogênea das deformações plásticas [Lu, 1996]. Podem aparecer em qualquer etapa de processamento de um material ou durante sua resposta em serviço. Existem três fenômenos principais que podem provocar tensões residuais: gradientes de temperatura, transformações de fase e deformações plásticas heterogêneas. A importância relativa de cada um deles dependerá do processo que é realizado [Lu, 2002].

Resfriamento rápido de um material, transformação de fase, desde a temperatura de tratamento térmico: a superfície e o interior se contraem em diferentes velocidades, nas quais, unindo-se ao efeito das altas temperaturas, o limite elástico mais baixo, pode provocar deformações plásticas, já que o interior pode contrair as regiões de superfície. Ao chegar a temperatura ambiente, a superfície que se entendeu em relação a anterior deixará o material com compressão superficial.

Transformação de fase austenita para martensita: essa transformação gera um forte aumento de volume. A temperatura de transformação alcança antes a superfície, mas o interior permanece no estado austenítico (menos resistente) e deforma plasticamente para acomodar-se a esta mudança. Posteriormente, se produzirá a transformação de fase no interior, produzindo uma expansão que será resistida pela martensita das camadas anteriores, o que produz tensões residuais de tração na superfície.

Deformações plásticas heterogêneas: podem levar a tensões diferentes na superfície do que no interior. O que ocorre, por exemplo, na trefilação. A tensão aplicada para trefilar é suficiente para deformar plasticamente o material. Se a deformação for uniforme em toda a seção não haveria tensões residuais. A deformação plástica heterogênea é a principal causa do surgimento de tensões residuais nos processos de conformação mecânica. A recuperação elástica posterior tenderá a romper a superfície, resultando um estado de tensões residuais.

No caso estudado, trefilação de barras, por não haver grandes mudanças de temperatura, o fator mais importante no surgimento das tensões residuais são as grandes deformações que o material sofre. Pois o perfil das tensões residuais é basicamente uma resposta à profundidade da conformação exercida. Quando a mesma é superficial (para baixas reduções), as tensões são compressivas na superfície e trativas no interior, no entanto este perfil pode ser invertido dependendo do nível de redução (Lin et. al., 2008; Cheng, 2007; Metz, 2007).

Não são muito bem conhecidos os efeitos das tensões residuais, o que normalmente se percebe são conseqüências de sua presença: fraturas devidas a corrosão a baixa tensão, inexactidões dimensionais, fratura, empenamento, as tensões residuais aparecem em quase todos os materiais e se somam ao estado de tensões produzido por forças externas [Atienza, 2001]. Apesar de muitas vezes a presença de tensões residuais ser negativa e desejar-se sua eliminação, em alguns casos elas são desejadas e introduzidas propositalmente nos materiais [Wang e Gong, 2002; Wang e Argyopulos, 2005]. Uma tensão de compressão

na superfície pode ser benéfica para o comportamento em fadiga e pode atrasar a velocidade de propagação de fissuras superficiais. Por exemplo, introduzir tensões superficiais de compressão é o objetivo principal do jateamento superficial [Lu, 1996; Kennedy et. al., 2005].

O sistema de tensões residuais existente em um corpo deve estar em equilíbrio estático [Atienza et. al, 2005; Atienza-Elices, 2004, Martines-Perez, 2004]. Assim, a força total que atua em qualquer plano do corpo e o momento total das forças em qualquer plano deve ser zero. Uma tensão residual compressiva, na realidade, subtrai-se a uma tensão trativa aplicada e uma tensão residual trativa se soma a uma tensão aplicada em tração.

Como as tensões residuais são apenas elásticas, não produzem deformação plástica, o valor máximo que podem atingir é a tensão limite de escoamento do material. De modo que se as tensões ultrapassarem a tensão de escoamento, o material irá deformar-se plasticamente, ocorrendo uma redistribuição destas.

2.3.2 Tensões residuais na trefilação

Dependendo da quantidade de redução, podem ser encontrados dois tipos distintos de distribuição das tensões residuais nas barras trefiladas. Para reduções por passes inferiores a 1%, as tensões residuais longitudinais são compressivas na superfície e trativas no eixo e as tensões radiais são trativas no eixo e aproximam-se de zero na superfície, enquanto que as tensões tangenciais seguem a mesma tendência das tensões residuais axiais [Atienza, 2001]. Para reduções maiores, de significância comercial, a distribuição de tensões é o inverso do explicado anteriormente. Neste caso as tensões axiais são trativas na superfície e compressivas no centro da barra, as tensões radiais são compressivas no eixo e as tensões tangenciais seguem o comportamento das axiais.

No caso das tensões serem trativas na superfície, isso pode ser prejudicial para a vida em fadiga. As análises realizadas com modelos de simetria axial apresentaram tensões residuais trativas na superfície e compressivas no núcleo para deformações da ordem de 20% em fios de diâmetro de 20 mm. Recentemente foram realizados estudos comparando a geometria usual de feira com o formato cônico e seu efeito nas tensões residuais em barras de aço [Metz et. al., 2007].

Estudos comparando microdureza e tensões residuais indicaram forte influência do tratamento térmico ou jateamento da barra no surgimento de tensões residuais, indicando também que a microdureza pode ser utilizada na medição das tensões residuais.

Alguns aspectos como a anisotropia e a presença de diferentes fases na estrutura cristalina do material [Bael et. al., 1991] são muito complicadas de serem modeladas computacionalmente. As medições via difração de nêutrons ocorrem somente em uma fase do material, o que é necessário uma correção matemática para a obtenção das macro-tensões para que se compare com os resultados obtidos por difração de nêutrons. No final do processo de trefilação, o comportamento mecânico das tensões residuais é claramente anisotrópico devido, basicamente ao progressivo alinhamento da cementita lamelar na direção de trefilação. O efeito da anisotropia pode ser importante na deformação e das forças envolvidas no processo de trefilação [Martinez-Perez et. al., 2004].

Pode-se distinguir basicamente 3 tipos de tensões residuais. As de primeira ordem, macroscópicas, de fácil medição, que podem se estender por diversos grãos do material. As de segunda ordem, microscópicas, também conhecidas como microtensões estruturais, encontram-se na distância de um grão

ou parte dele. E as de terceira ordem são encontradas em nível atômico em apenas uma pequena parte do grão [Walton, 2002].

2.3.3 Métodos de Medição

As tensões residuais são difíceis de serem calculadas com precisão por métodos analíticos, sendo então, geralmente, determinadas por uma variedade de técnicas experimentais. Nos últimos anos, as técnicas de medição das tensões residuais evoluíram consideravelmente. A necessidade de medição destas tensões pode ocorrer por diversos motivos, entre eles: análise de falhas causadas por fadiga, avaliação do tempo de serviço, distorção ao longo do processo de fabricação ou distorção na armazenagem ou em serviço.

A grande dificuldade envolvida na medição das tensões residuais é que elas não podem ser medidas diretamente. De maneira geral, algumas propriedades físicas indiretas devem ser medidas para que, através de métodos matemáticos, as tensões sejam calculadas. Qualquer incerteza na medição ou nos valores das propriedades pode causar grandes erros nos resultados da medição [Metz, 2007].

Os métodos de medição das tensões residuais podem ser divididos em dois grandes grupos: métodos destrutivos, quando se destrói o estado de equilíbrio inicial de um corpo, e através da relaxação das tensões, obtém-se os valores das mesmas; e métodos não-destrutivos, que fazem a medição a partir das características cristalográficas de um material em relação às tensões residuais.

A escolha do método deve levar em consideração a magnitude esperada destas tensões, a fim de minimizar os erros em função de tempo e de custos elevados para a realização do ensaio.

2.3.3.1 Métodos Destrutivos

Como já exposto anteriormente, esses métodos caracterizam-se por alterar sensivelmente a resistência e funcionalidade do componente, utilizando-se de equações que permitam equacionar matematicamente a teoria da elasticidade com as deformações ocorridas após a remoção gradativa de camadas externas e internas em componentes [He et. al., 2002].

Método da deflexão: realiza-se um corte em secção na barra, Esquematizado na **Figura 2.1**, com o objetivo de aliviar as tensões e pode ser realizado de diversas formas, como corte por serra, remoção de material por usinagem ou corte por eletroerosão. O perfil de tensão é calculado a partir das deformações causadas pelo aumento progressivo do corte, medidas através de strain-gages. A tensão é relacionada com a teoria linear da elasticidade, **Equação 2.1**:

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{c} = \frac{E}{R} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde: M é o momento de flexão aplicada à barra, I é o momento de Inércia, σ é a tensão, c é a distância em relação ao eixo neutro, E é o módulo de elasticidade e R é o raio de curvatura da viga quando fletida.

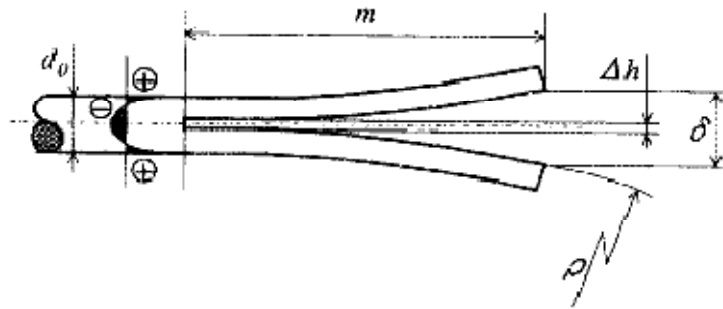


Figura 2.1: Método slitting utilizado para medir tensões em barras [Metz, 2007]

Onde: d_0 é o diâmetro inicial, m , o comprimento da barra, ρ a densidade do material e Δh , a diferença de altura após a abertura.

A tensão existente em barras dificilmente tem comportamento linear, portanto esse método deve ser considerado qualitativo.

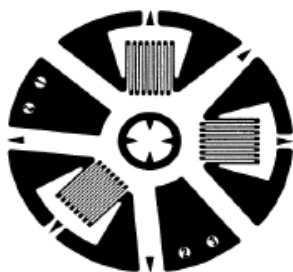
2.3.3.2 Métodos semi-destrutivos

Os métodos semi-destrutivos não afetam sensivelmente a resistência e funcionalidade do componente utilizado

Caracterizados pela geração de pequenos furos ou anéis no componente ou endentações a serem realizadas na superfície fazendo com que a deformação aliviada gere o alívio das tensões residuais que serão adquiridas através de extensometria elétrica.

Método do Furo Cego:

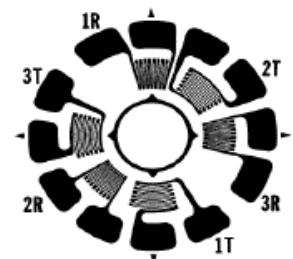
Baseado na medida da mudança de tensão na superfície do material causada pelo alívio da tensão gerado por um furo na superfície [Rocha et. al., 2008]. As tensões residuais principais são relacionadas com as deformações medidas em um extensômetro [Figura 2.2] através da Equação 2.2, onde $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ são as deformações aliviadas medidas e A e B são constantes de calibração.



ROSETA TIPO A



ROSETA TIPO B



ROSETA TIPO C

Figura 2.2: Tipos de extensômetros utilizados na aquisição das deformações para o método do furo cego [ASTM E-837, 2002].

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{4A} \pm \sqrt{\frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1) + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}{4B}} \quad \text{Equação 2.2}$$

Um dos métodos mais sensíveis para o cálculo das tensões residuais em componentes mecânicos é o método diferencial de Kockelmann..

Este método depende da geração de funções de calibração para determinar o perfil de distribuição das tensões residuais a partir das deformações lidas pelo extensômetro. Para ela utiliza-se como referência a variável adimensional ξ

$$\xi = \frac{z}{d_0} \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde: z é a profundidade e d_0 é o diâmetro do furo;

Para a realização da calibração é utilizado um corpo de prova sujeito a um estado de tensões conhecido (por exemplo: carregamento uniaxial), gerando as funções de calibração $\sigma_{c,x}(\xi)$ e $\sigma_{c,y}(\xi)$. Nesta amostra é feito o processo incremental de furação para o qual resultam as deformações de relaxamento $\varepsilon_{c,x}(\xi)$ e $\varepsilon_{c,y}(\xi)$ as quais podem gerar as funções de calibração $K_x(\xi)$ e $K_y(\xi)$.

$$K_x(\xi) = \frac{\frac{d\varepsilon_{c,x}(\xi)}{d\xi} \cdot \sigma_{c,x}(\xi) - \frac{d\varepsilon_{c,y}(\xi)}{d\xi} \cdot \sigma_{c,y}(\xi)}{\frac{1}{E} [\sigma_{c,x}^2(\xi) - \sigma_{c,y}^2(\xi)]} \quad \text{Equação 2.4}$$

A obtenção da derivada das deformações obtidas, $\frac{d\varepsilon_i(\xi)}{d\xi}$ proveniente dos três sinais lidos, além das funções de calibração, é utilizada para calcular as tensões residuais nas direções de cada resistor a partir das equações:

$$\sigma_1(\xi) = \frac{E}{K_x^2(\xi) - \nu^2 K_y^2(\xi)} * \left[K_x(\xi) * \frac{d\varepsilon_1(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi) * \frac{d\varepsilon_3(\xi)}{d\xi} \right] \quad \text{Equação 2.5}$$

$$\sigma_2(\xi) = \frac{E}{K_x^2(\xi) - \nu^2 K_y^2(\xi)} * \left[K_x(\xi) * \frac{d\varepsilon_2(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi) * \left(\frac{d\varepsilon_1(\xi)}{d\xi} + \frac{d\varepsilon_3(\xi)}{d\xi} - \frac{d\varepsilon_2(\xi)}{d\xi} \right) \right] \quad \text{Equação 2.6}$$

$$\sigma_3(\xi) = \frac{E}{K_x^2(\xi) - \nu^2 K_y^2(\xi)} * \left[K_x(\xi) * \frac{d\varepsilon_3(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi) * \frac{d\varepsilon_1(\xi)}{d\xi} \right] \quad \text{Equação 2.7}$$

2.3.3.3 Métodos Não-Destrutivos

Os métodos não-destrutivos medem distorções no reticulado cristalino dos metais. Baseiam-se na teoria de que qualquer força mecânica aplicada a um componente que resulte em tensões abaixo do limite de escoamento do mesmo, gera uma distorção e o deforma elasticamente. Esta deformação elástica causa uma mudança nas dimensões da estrutura atômica, a qual pode ser medida. Os principais métodos baseados neste princípio são: difração de raio-x, difração de nêutrons, métodos ultrasônicos e análise magnética de Barkhausen.

Difração de nêutrons é capaz de medir a deformação elástica introduzida pelas tensões residuais através de um volume fino de aço com uma resolução espacial de menos de 1 mm³ [Yang et. al., 2007]. Para a medição das tensões residuais dentro do componente é preciso que camadas sejam removidas. O princípio da medição por difração de nêutrons é o mesmo da difração por raios-x, a medição dos espaçamentos interplanares dos planos cristalográficos, pois seus espaçamentos são alterados pela presença de tensões, como, por exemplo, as tensões residuais.

O espaçamento entre os planos cristalográficos φ é relacionado com o ângulo de incidência e o difratado pela radiação de nêutrons θ , que são iguais, e o comprimento de onda da radiação monocromática λ pela Lei de Bragg.

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad \text{Equação 2.8}$$

Limitações e aplicações:

Na maioria das aplicações, especialmente aços e ferros fundidos, o espaçamento inicial, livre de tensões, entre os planos cristalográficos d_0 (característica do material), não pode ser facilmente medido no exato ponto da deformação. Isso pode gerar vários erros na previsão das tensões residuais através da difração de Nêutrons. Isso pode ser agravado pelo fato de que a posição do elemento d_0 varia consideravelmente com a componente de fase (martensita, austenita, ferrita). Embora mais complexo e custoso o método de difração de nêutrons possibilita a medição em grandes volumes e profundidades [He et. al, 2002].

Método de difração de raios-X

A análise por raios X é o principal método não-destrutivo para medir tensões residuais. Esta técnica é baseada no princípio de que quando um material é irradiado por raios-X monocromáticos, para um cristal perfeitamente alinhado os átomos estão empacotados regularmente e a distância entre os planos cristalográficos é definida pelas características físicas do material [**Figura 2.3**]. A tensão medida no retículo cristalino e as tensões residuais associadas são determinadas a partir de constantes elásticas assumindo uma distorção linear do retículo cristalino. A medida das tensões residuais pelo método de raios-X é feita a partir da contribuição de vários grãos do cristal e esta medida depende fundamentalmente da geometria de feixe que irá incidir na amostra bem como do tamanho de grão da amostra [Fitzpatrick & Fry, 2005].

A técnica de raios-X pode ser aplicada em materiais cristalinos com pequeno tamanho de grão [SAE, 2003].

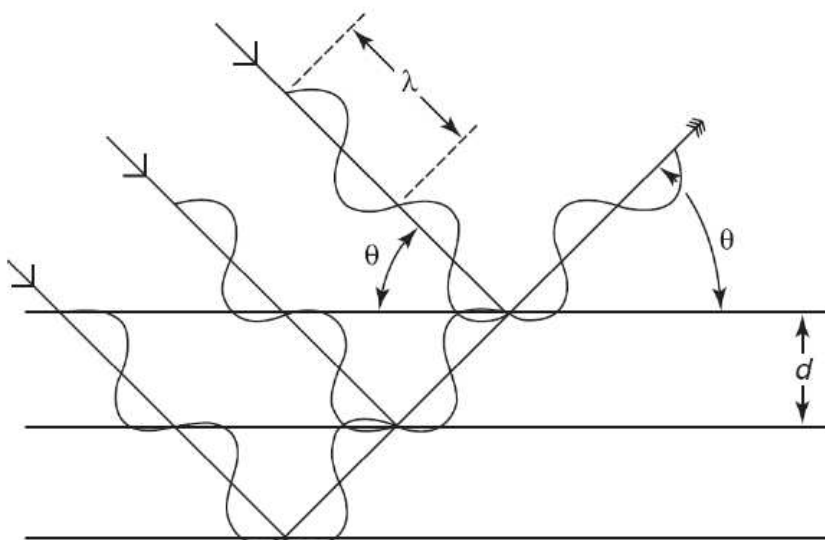


Figura 2.3: Espalhamento das ondas incidentes sobre a superfície [Fitzpatrick e Fry, 2005].

A profundidade de penetração na amostra depende principalmente do tipo de tubo de ânodo usado no equipamento de raios-X, do tipo de material que será analisado e também do ângulo de incidência do feixe na amostra e esta medida é sempre próxima à superfície da amostra. O desconhecimento da distância original entre os planos cristalográficos (d_0) pode gerar erros na definição da deformação.

2.4 Trefilação

Trefilação é um processo de trabalho em metais utilizado para fabricar barras, arames e tubos em que uma força trativa faz com que uma barra, um arame ou um tubo de metal, normalmente com uma geometria circular, atravesse uma ferramenta cônica (denominada fieira), feita de um material duro causando redução de diâmetro [Dieter, 1981]. A trefilação é utilizada como método de produção de fios há cerca de 1200 anos, existindo evidências de sua existência desde o início da utilização de metais como ouro e prata [Newbory e Notis, 2004].

A forma final pode ser modificada pela geometria da fieira a qual define o percentual de redução. Usualmente, esta operação é conduzida à temperatura ambiente podendo ser realizada em diversos passes através de fieiras dispostas em seqüência. Em alguns casos, operações de recozimento intermediário podem ser necessárias dependendo do grau de redução final desejado.

A redução no diâmetro da peça é, em sua maior parte, devida ao escoamento plástico (permanente) do material, que é causado por uma reação de compressão realizada pela ferramenta no metal enquanto este sofre a ação da força trativa.

Por sua vez, a força trativa é aplicada por um mecanismo do outro lado da fieira que a “puxará” realizando a força necessária para que essa barra a atravesse realizando o trabalho de redução de diâmetro. As velocidades de trefilação variam de 150 a 1500 mm/s [Neves, 2003].

As grandes vantagens do processo de trefilação são o ganho de resistência mecânica no material, acabamento superficial e a alta velocidade do processo.

Na **Figura 2.4** é apresentada a fieira de trefilação e suas regiões.

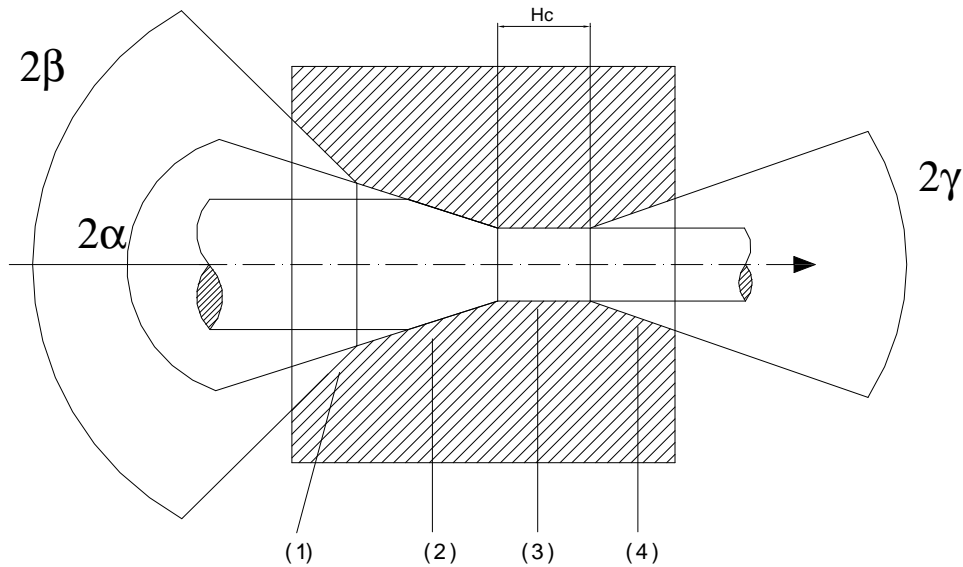


Figura 2.4: Fieira de trefilação e as quatro zonas distintas. [Nunes, 2007]

Zona de entrada (1): região da fieira com um ângulo pouco maior que o ângulo de trefilação, isso facilita a lubrificação do processo e o guiamento da barra;

Zona de trabalho (2): região onde se situa o ângulo de trefilação, em que ocorre a reação da fieira à força trativa que impulsiona o metal a atravessar a fieira, essa reação promove o escoamento plástico do material. Local onde se define o semi-ângulo (α) e a redução da fieira e , por conseqüência, do diâmetro final do material em trabalho;

Zona de calibração (3): região cilíndrica de comprimento H_c , com ângulo zero, relacionada à estabilização dos parâmetros do material que foram modificados durante o processo de trefilação. Apesar de não causar redução de diâmetro, relaciona-se com a qualidade do produto final, removendo danos na superfície causados durante o escoamento plástico do material.

Zona de saída (4): região com ângulo de saída (γ) oposto ao ângulo de trefilação e ao ângulo de entrada. Esta região facilita a saída do produto final e permite o retorno elástico do material antes da saída completa da fieira, além de minimizar a possibilidade de abrasão, caso a trefilação pare ou a fieira esteja desalinhada.

2.5 Trefilação Combinada

A trefilação combinada foi desenvolvida com base em análises empíricas de fabricantes europeus e japoneses [Neves, 2003] de empresas produtoras de barras trefiladas para componentes automotivos. O processo de trefilação combinada é apresentado esquematicamente na **Figura 2.5**.

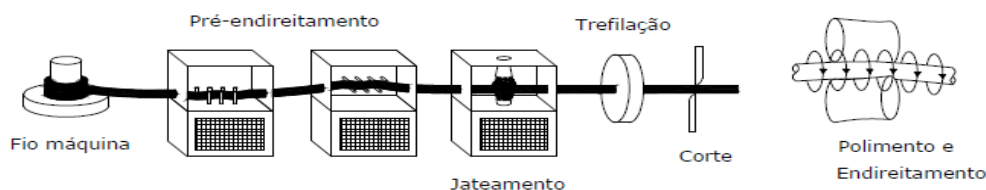


Figura 2.5: Principais Etapas do Processo de Trefilação Combinada [Rocha, 2008]

Nos capítulos 2.5.1 ao 2.5.4 serão apresentadas as etapas do processo de trefilação combinada separadamente.

2.5.1 Pré-endireitamento

O processo de pré-endireitamento consiste na passagem da barra por 7 rolos dispostos na posição horizontal e 6 rolos dispostos na posição vertical, com o objetivo de retirar a curvatura causada pela laminação a quente e pelo desbobinamento das barras. Apesar de ter sido pouco estudada, esta etapa tem extrema importância na qualidade do produto final, em função das deformações envolvidas [Nastran e Kuzman, 2002].

2.5.2 Jateamento com granalha

Consiste na formação de um jato de partículas pequenas que impacta na superfície do material para retirar os óxidos presentes formados durante a laminação a quente do material. As partículas utilizadas são feitas de aço, cerâmica ou plástico, o tamanho varia de 50 μm até 6 mm de diâmetro e as velocidades podem chegar a 150 m/s.

Cada esfera produz uma deformação plástica local com colisões sucessivas sujeitando a superfície do material a um carregamento cíclico. Essa deformação plástica gera esforços trativos no interior do material, o que produz tensões residuais compressivas na superfície.

Tensões compressivas na superfície das peças são muito importantes, pois causam aumento da vida em fadiga e uma redução do limite de escoamento. Este efeito pode ser anulado caso o componente seja submetido a carregamentos cíclicos [Zoch, 2006].

2.5.3 Trefilação

É o processo de trefilação propriamente dito, o qual já foi discutido no item 2.1 por ser o objeto deste estudo.

A deformação é alcançada através da combinação de tensões trativas e compressivas apresentadas na Figura , que são criadas pela força de tração na saída da fieira e pela geometria da mesma. Considerando as tensões principais representadas por $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, podem ser utilizados diferentes critérios de falha [Akikazu et. al., 2007; Wang e Gong, 2002]]. O escoamento de um metal é determinado pela movimentação entre os grãos da microestrutura o que é regido pelas tensões cisalhantes. Portanto, o início da deformação plástica pode ser determinado pela tensão máxima cisalhante baseada no critério de Tresca apresentado na **Equação 2.9**.

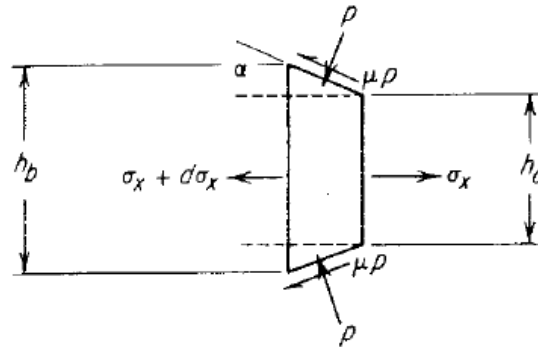


Figura 2.6: Tensões trativas e compressivas atuando em elemento da barra em trefilação [Dieter, 1986]

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\sigma_0}{2} \quad \text{Equação 2.9}$$

Onde τ_{max} representa a tensão máxima cisalhante e σ_0 é determinado pelo limite de escoamento em um ensaio de tração uniaxial.

2.5.4 Endireitamento com Rolos

Visando uma melhoria na qualidade do produto final, realiza-se a etapa final da trefilação combinada, que consiste no endireitamento e polimento da barra com a utilização de dois rolos hiperbólicos.

Esta operação torna-se fundamental para que se atinjam níveis de empenamento da ordem de 0,5 mm/m para materiais de baixa liga e até 1,5 mm/m para aços de alta resistência mecânica

Durante o endireitamento com dois rolos, as tensões tendem a ser aliviadas gerando novamente tensões compressivas na superfície [Wu et.al., 2000].

2.6 Empenamentos, rompimentos, defeitos superficiais

O processo de trefilação combinada, apesar das inúmeras vantagens como a agilidade do processo, qualidade do produto final, facilidade de estocagem, envolve importantes deformações, nas quais o limite de

escoamento do material é ultrapassado, gerando mudança no estado de tensões que podem gerar inúmeros defeitos e empenamentos que devem ser considerados nos cálculos de projeto. Os defeitos na barra trefilada podem também ser originados durante a laminação por problemas superficiais.

Em diversos trabalhos analíticos e experimentais relacionados aos processos produtivos de conformação, foram encontradas fortes influências da matéria-prima na estabilidade da geometria e propriedades mecânicas dos produtos finais [Neves, 2003; Atienza, 2001; He, 2002]. Mesmo com as tolerâncias restritas para o material de partida, os efeitos podem ser fortes para os produtos e devem ser levados em conta.

Um dos defeitos mais comuns é o rompimento do centro da barra, uma análise dos parâmetros de trefilação pode prever para quais semi-ângulos (α), reduções ou condições de atrito esse rompimento poderá ocorrer.

Tensões residuais trativas junto à superfície são particularmente perigosas, e em alguns casos, a causa de falhas por fratura frágil, fadiga precoce e corrosão sob tensão. Por outro lado, tensões residuais compressivas na superfície são comumente utilizadas para aumentar a vida de componentes em fadiga. Estes efeitos influenciam diretamente no desempenho dos produtos [WANG, 2002; ELICES, 2004; ATIENZA et. al, 2004].

No caso da realização de etapas posteriores de endurecimento superficial como cementação ou têmpera por indução, novas tensões superficiais podem ser induzidas devido a formação de novas fases – usualmente com profundidades da ordem de 0,1 mm – as quais, se somadas a tensões heterogêneas na matéria-prima, podem causar distorções. No aço estudado neste trabalho, as barras fornecidas são retificadas com uma remoção de 0,02 mm temperadas por indução para formação de uma camada de 0,08 mm de profundidade.

Existem também efeitos, muitas vezes, erroneamente não quantificados. Ao longo dos processos produtivos, distorções podem ocorrer após operações intermediárias ao longo do tempo de estocagem ou mesmo durante a utilização do produto. Portanto, é de suma importância o conhecimento destes efeitos nos projetos de processo e produto. Os avanços na tecnologia e instrumentação disponível para o estudo das tensões residuais têm permitido a inclusão destas na modelagem matemática e projeto de componentes.

2.7 Parâmetros da trefilação

O estudo da trefilação aumentou consideravelmente nos últimos 30 anos, um grande esforço tem sido feito para entender o escoamento do material quando passa pela feira, para evitar a fratura do material durante o processo e para otimizar a geometria da feira. Parâmetros como a força de trefilação, a lubrificação, a temperatura, a transferência de calor e a curva de escoamento, entre outros, tem sido muito investigados. Entretanto, a ciência da trefilação está longe de controlar todas as variáveis do processo [Gerbase, 1976, Altan et. al., 1998].

2.7.1 Força de Trefilação

A força de trefilação é a que faz o material atravessar a fieira. Um parâmetro básico do processo que tem uma forte relação com a porcentagem de redução do material; quanto maior é a redução, maior a força necessária. Existe um limite máximo de porcentagem de redução que depende das características da máquina, das propriedades do material e da qualidade da lubrificação. Na prática, a redução de área por passe de trefilação está na margem entre 30-35% [Kim et. al., 1997]. Provavelmente seja o parâmetro mais estudado do processo de trefilação [Asakawa et. al., 2002].

Uma das formas mais tradicionais de se relacionar matematicamente a força trativa que provoca o deslocamento da barra dentro da fieira é expressa pela equação de Siebel [**Equação 2.10**], que calcula a força de tração necessária para que a barra atravesse a fieira:

$$F = A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{\varphi_A}\right) \quad \text{Equação 2.10}$$

Onde: k_{fm} é a tensão de escoamento média, φ_A é a deformação verdadeira em área do material, μ é o atrito de Coulomb, α é o semi-ângulo da fieira e A_1 é a área final da peça.

2.7.2 Ângulo de Fieira

Para cada percentual de redução de área haverá um ângulo de fieira pelo qual a força trativa necessária para que a barra atravesse a fieira será mínima [Vega et. al., 2009].

É interessante encontrar o ângulo de fieira que minimiza a força de trefilação, denominado semi-ângulo ótimo ($\alpha_{ótimo}$), o que permitirá reduzir os gastos com energia, os valores das tensões envolvidas e o risco de rompimentos da barra. Para isso, deriva-se a **Equação 2.10** em função do ângulo ótimo e iguala-se a zero, o que indicará matematicamente o ponto em que o trabalho realizado pela força de atrito e o trabalho realizado pela força de trabalho redundante são iguais, chegando a **Equação 2.11**, deduzida a seguir [Norasethapon e Yoshida, 2006].

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

$$F = A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} + A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} \cdot \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \cdot A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} \cdot \frac{\alpha}{\varphi_A}$$

$$\frac{dF}{d\alpha} = 0$$

$$\frac{dF}{d\alpha} = -A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} \cdot \frac{\mu}{\alpha^2} + \frac{2}{3} \cdot A_1 \cdot k_{fm} = 0$$

$$\frac{2}{3} \cdot A_1 \cdot k_{fm} = A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} \cdot \frac{\mu}{\alpha^2}$$

$$\frac{2}{3} = \varphi_A \cdot \frac{\mu}{\alpha^2}$$

$$\alpha^2 = \varphi_A \cdot \frac{3}{2} \cdot \mu$$

$$\alpha = \sqrt{\varphi_A \cdot \frac{3}{2} \cdot \mu} \quad \text{Equação 2.11}$$

2.7.3 Parâmetro Δ

Um importante dado da trefilação é o parâmetro Δ , mostrado esquematicamente na Figura 2.3 o qual consiste na razão entre o comprimento de redução (l) e o diâmetro médio na região de redução d_m , o qual é descrito na **Equação 2.14**.

Na **Figura 2.7** é pode-se visualizar o efeito do parâmetro Δ .

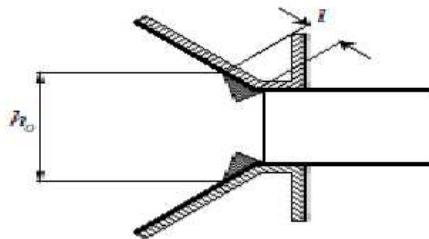


Figura 2.7: Trefilação e parâmetro Δ

$$\Delta = \frac{h_0}{l} = \frac{d_0 + d_1}{d_0 - d_1} \sin \alpha \quad \text{Equação 2.12}$$

Para o processo de trefilação de eixos simétricos, a redução é dada por:

$$\Delta = \frac{\sin \alpha (1 + (1-r)^{1/2})^2}{r} \quad \text{Equação 2.13}$$

Um valor de Δ menor sugere uma longa zona de deformação e aumenta o contato com a fiara [Write, 1979]. Isto resulta em trabalho por atrito em excesso e geração de calor necessitando boa lubrificação e um menor coeficiente de atrito. Em compensação, estes valores menores possibilitam uma redução nos esforços para a fiara e maior durabilidade, além de diminuir o trabalho redundante e excesso de tensão no centro do material prevenindo defeitos internos. Diversos projetos comerciais de fiara sugerem o parâmetro delta próximo a 3 para minimizar as tensões de trefilação [McAllen e Phelan, 2007].

2.7.4 Curva de escoamento

Outro importante fator de influência no processo de trefilação é a curva de escoamento do material, ou seja, a forma como o material se comporta quando submetido à aplicação de uma carga uniaxial.

Todo objeto metálico quando submetido a algum esforço sofre deformação. Ele pode retornar às dimensões originais após a retirada do esforço ou não recuperar suas dimensões originais, sofrendo uma

deformação irreversível. No primeiro caso, diz-se que o objeto sofreu uma deformação elástica e no segundo, uma deformação plástica.

Na **Figura 2.8** apresenta-se uma curva tensão-deformação típica para um material dúctil, entre eles, o aço.

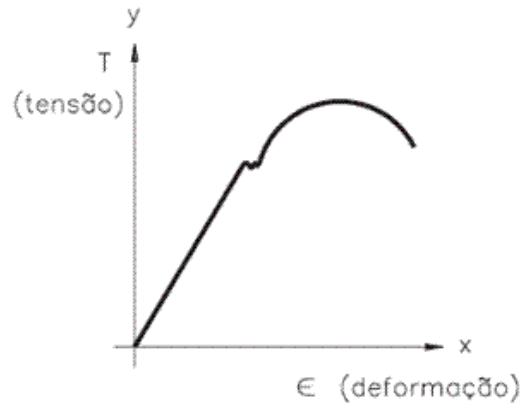


Figura 2.8: Diagrama tensão-deformação

A região elástica é descrita matematicamente pela Lei de Hooke (Equação 2.16), em que a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo material podem ser relacionadas linearmente com uma constante chamada de módulo de Young.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Equação 2.14}$$

Onde: E é o módulo de elasticidade do material, e ε é a deformação do material.

Na região plástica não se verifica a Lei de Hooke. A forma mais comum é uma expressão potencial indicada pela **Equação 2.17**.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad \text{Equação 2.15}$$

Onde k é a tensão para $\varepsilon=1,0$ e n, denominado coeficiente de escoamento, é a inclinação do gráfico log-log da equação 2.7. Essa equação só é válida do começo do escoamento plástico até o início da região de ruptura do material.

Para adquirir a curva de resistência ao escoamento do material é realizado, dentre outros, o ensaio de tração, que consiste na aplicação de carga uniaxial em um corpo-de-prova até a ruptura [**Figura 2.9**], medindo-se a variação do comprimento em função da carga [SPIM, 1999].

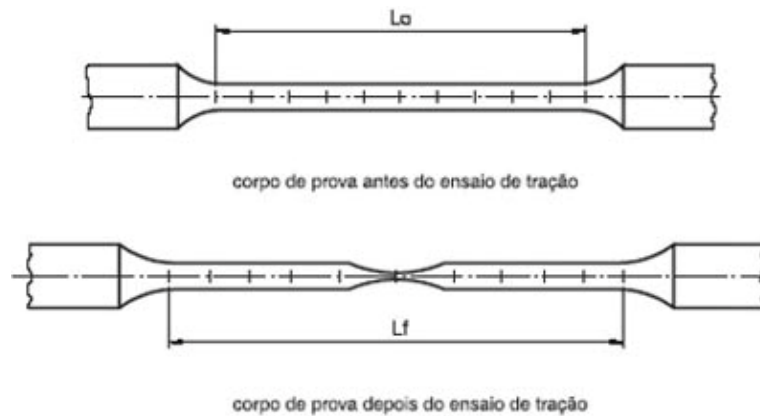


Figura 2.9: Corpos de prova antes e após ensaio de tração

A partir desse ensaio, é possível associar certos parâmetros ou grandezas relacionadas ao material, como, por exemplo, o módulo de Young, o endurecimento por deformação (encruamento), o limite de escoamento, o limite de resistência, a região de deformação elástica, a região de deformação plástica uniforme, a região de deformação plástica não-uniforme e fratura.

Indicar matematicamente os fenômenos da plasticidade é muito mais complicado que na zona elástica, pois nessa, somente o estado inicial e final são importantes devido à facilidade de aplicação do módulo de Young. Mesmo considerando diversos efeitos, a plasticidade ainda encontra dificuldade em descrever fenômenos como a anisotropia plástica, o efeito Bauschinger e a histerese elástica [Norasedosophon, 2005].

2.7.5 Atrito

Atrito é a resistência ao movimento das superfícies de dois corpos em contato, durante o deslizamento de um sobre o outro [ASM, 1988]. O atrito influencia significativamente a deformação do material [Avitzur 1989; Sahim *et al.*, 2005], alterando os valores de forças e desgaste na relação ferramenta-peça.

A base da teoria do atrito é que superfícies reais possuem picos e depressões, desta forma, quando duas superfícies são colocadas em contato, esses picos e depressões entram em contato causando resistência ao movimento. A área de contato real A_r , entre duas superfícies é a soma das áreas de contato de todas as asperezas. Além disso, as superfícies raramente encontram-se limpas, contendo camadas de moléculas de gás ou água e freqüentemente um filme fino de óxido. À medida que a carga normal da interface aumenta, o metal se deforma plasticamente nas asperezas, aumentando a área de contato.

Uma das principais leis que governam o atrito nos corpos sólidos é a Lei de Coulomb, que foi formulada em 1875, com os seguintes fundamentos:

- O atrito estático é maior que o atrito dinâmico
- Atrito é independente da velocidade de deslizamento

- A força de atrito é independente da força aplicada
- A força de atrito é independente da área de contato

Através da Lei de Coulomb o atrito pode ser representado pelo coeficiente de atrito μ , que pode ser aplicado em diversas situações, relacionando a força realizada pelo atrito com a força normal:

$$\mu = \frac{F}{N} \quad \text{Equação 2.16}$$

Uma outra abordagem possível é medir a pressão normal média gerada pela força de atrito e a pressão normal de maneira que μ possa ser calculado através da relação analítica entre estes fatores.

$$\mu = \frac{\tau}{p} \quad \text{Equação 2.17}$$

Onde τ é a tensão cisalhante na interface e p é a pressão normal à interface;

Esta análise foi feita para o caso do atrito por escorregamento na interface, como por exemplo, o deslizamento de um bloco sobre uma superfície plana. Num outro extremo, pode-se considerar que a interface possui uma resistência ao cisalhamento constante. O caso mais comum é o atrito por aderência, onde não existe movimento relativo entre a peça e as ferramentas. Tal situação ocorre frequentemente em deformação por trabalho a quente, onde a lubrificação é mais difícil de ser realizada.

A análise para a condição de atrito por aderência sugere uma alternativa para o conceito de atrito por escorregamento permitindo interpretar o atrito nos processos de conformação mecânica. Esta abordagem considera que a peça em contato com as ferramentas pode ser representada como um material de resistência ao cisalhamento constante. Supõe-se que a resistência ao cisalhamento da interface possa ser uma fração constante m da tensão limite de escoamento ao cisalhamento, onde m é denominado fator de cisalhamento de atrito.

$$m = \frac{\tau}{k} \quad \text{Equação 2.18}$$

Onde: k é a tensão normal necessária para que ocorra aderência entre a peça e a ferramenta. Os valores de m variam desde 0 (deslizamento perfeito) até 1 (aderência).

A maioria dos processos de conformação mecânica tem sido realizada usando-se μ , no entanto, o uso de m deve ser considerado não somente como o mais apropriado fisicamente, mas também por introduzir simplificações matemáticas.

O atrito é fundamental em processos de transformação de metais, transformando-se em um dos principais parâmetros a serem controlados nos processos. Em um processo de trefilação, por exemplo, as pressões entre a fiação e a peça de trabalho são muito altas [Celentano, 2008].

Para a minimização do atrito, normalmente são utilizados lubrificantes para separar a fiação e a peça. Ao selecionar um lubrificante, a peça, a matriz e o lubrificante devem ser considerados como um único sistema. São várias as funções de um lubrificante em processos de conformação:

1. Reduzir a carga de deformação
2. Aumentar o limite de deformação que antecede a fratura
3. Controlar o acabamento da superfície
4. Minimizar a absorção de metal da peça para as ferramentas
5. Minimizar o desgaste da ferramenta
6. Proporcionar um isolamento térmico para a peça e as ferramentas
7. Resfriar a peça ou as ferramentas

O ensaio do anel [Barrientos, 2007] é um teste muito utilizado na determinação do coeficiente de atrito em processos de forjamento e consiste na compressão de anéis cilíndricos de aço para análise geométrica e medição da porcentagem de variação da altura em função da porcentagem de variação do diâmetro interno. Para baixos valores de atrito, a deformação do anel segue um caráter de deformação do disco, ou seja, tanto o diâmetro interno quanto o diâmetro externo do anel deformam-se radialmente para fora. Já para o caso de altos coeficientes de atrito, enquanto o diâmetro externo deforma-se radialmente para fora, aumentando o seu valor, o diâmetro interno deforma-se radialmente para dentro, diminuindo o seu valor [Sahim M. *et al.*, 2005; Robinson T., 2004]

O escoamento lateral do metal, do seu interior para fora, à medida que é comprimido, ocasiona o surgimento de tensões cisalhantes nas superfícies da matriz em contato com a peça. Este cisalhamento superficial é dirigido para o centro do disco, opondo-se ao escoamento radial em direção à extremidade do disco. Tais tensões cisalhantes de atrito ocasionam pressões laterais no material, que são zero nas arestas do disco, alcançando um valor máximo no centro.

É interessante ressaltar que não é necessária uma medida direta da força de deformação ou conhecer a tensão de escoamento do material para medir o atrito através do ensaio do anel. Assim, o fator de atrito pode ser medido a elevadas taxas de deformação e temperaturas típicas dos processos de conformação mecânica.

3 OBTENÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

Para simular numericamente as tensões residuais presentes em um processo real de trefilação combinada foi necessário levantar todos os parâmetros com base em processos industriais em uso corrente e da vasta literatura dessa área: coeficiente de atrito, curva de escoamento do material, velocidade de trefilação, diâmetro inicial e final da barra, semi-ângulo de fieira.

O coeficiente de atrito do processo foi encontrado através do ensaio do anel. Os resultados do ensaio do anel foram confrontados com uma curva de calibração gerada através de simulação computacional com os mesmos parâmetros dos resultados experimentais.

Realizou-se também ensaio de tração para que fosse obtida a curva de escoamento que melhor descrevesse o comportamento do material em estudo.

Além disso, as tensões residuais foram medidas via difração de nêutrons para posterior comparação com os resultados simulados.

3.1 Obtenção da Curva de Escoamento

Foram realizados ensaios de tração para o aço AISI 1045 de uso comum na indústria em uma máquina termomecânica de testes Gleebe® 3500 mostrada na **Figura 3.1**. A máquina é equipada com extensômetros a laser que permitem medições simultâneas da deformação transversal e longitudinal dos corpos de prova.

Para medir a deformação longitudinal, as marcas de referência foram soldadas a uma distância de 10 mm de comprimento de ambos os lados da amostra, as medições foram realizadas por dois feixes a laser com efeitos de sombreamento. Foi aplicada uma velocidade de deformação de 0,0001 1/s de acordo com a possibilidade da máquina de ensaio.



Figura 3.1: Equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de tração

Ensaio-se corpos de prova cilíndricos de 20 mm de comprimento (área útil de ensaio) e 5 mm de diâmetro esquematizados na **Figura 3.2**.

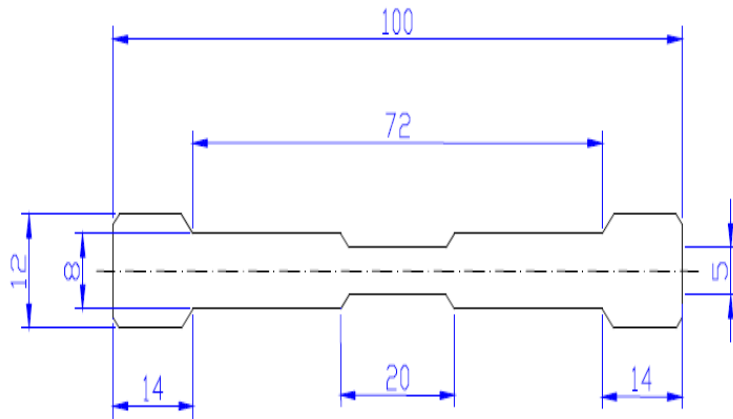


Figura 3.2: Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração

Na **Tabela 3.1** é apresentada a composição química do aço AISI 1045.

Corrida	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%W	%Cu	LAB
OP 292	0,43	0,23	0,77	0,02	0,02	0,1	0,06	0,02	0,01	-----	Mill
OP 292	0,43	0,23	0,80	0,02	0,02	0,12	0,07	0,02	<0,01	0,1	UFRGS
OP 292	0,43	0,24	0,79	0,03	0,02	0,13	0,08	0,03	-----	0,1	IWT

Na **Figura 3.3** é mostrada a comparação entre os diferentes ensaios de tração.

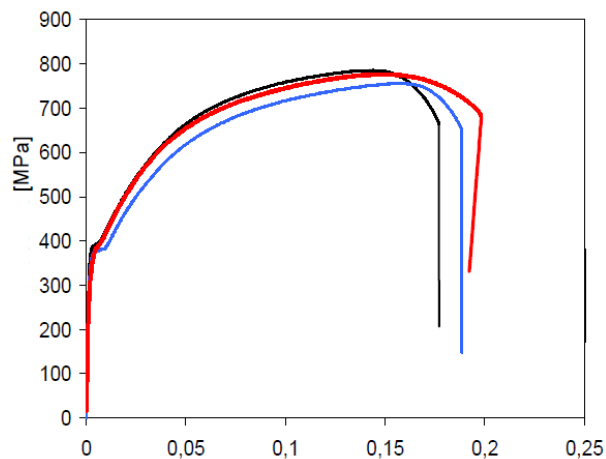


Figura 3.3: Comparação entre diferentes ensaios de tração

Obteve-se a relação matemática para a curva de escoamento (**Equação 3.1**), que é a média encontrada para os diversos ensaios de tração realizados.

$$k_f = 1157,8 \cdot \varphi^{0,19} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde k_f é a tensão de escoamento e φ é a deformação.

A utilização desta curva de escoamento não reproduz exatamente o comportamento do material em estudo. Não se levou em conta aspectos como efeito Bauschinger, que provavelmente ocorre, já que o material, antes de ser trefilado passa por etapas de pré-endireitamento e jateamento, o que provoca deformações em mais de uma direção. Também, devem ser analisados os efeitos da variação da taxa de deformação, para isso, seria necessário a realização de ensaio com uma velocidade média de $40s^{-1}$, valor real do processo, que não foi realizado devido às limitações da máquina de ensaio.

3.2 Ensaio do anel para estimativa do coeficiente de atrito

Foi realizado o ensaio do anel, que é um teste muito utilizado na determinação do coeficiente de atrito em processos de conformação. O ensaio consiste na compressão de anéis cilíndricos de aço para análise geométrica.

As dimensões dos anéis foram de 20 mm de diâmetro externo, 10 mm de diâmetro interno e 6 mm de altura. Estes anéis foram submetidos a reduções de altura de aproximadamente 20, 40 e 60%. A variação do diâmetro interno foi registrada como função da redução de altura. Os punções foram fabricados com o mesmo material da fiação (metal duro, WC-Co), o mesmo acabamento superficial e o mesmo lubrificante de processos industriais, o teste gerou a curva experimental.

Após a realização dos testes foi desenvolvida a simulação do ensaio do anel utilizando-se o software Simufact.forming GP com parâmetros expostos na **Tabela 3.1**. O objetivo desta simulação foi gerar curvas de calibração a fim de serem comparados com a curva experimental. Foram realizadas oito simulações para coeficientes de atrito de Coulomb (μ) variando desde 0,05 a 0,4.

Tabela 3.1– Parâmetros da simulação do ensaio de compressão do anel

Malha	50x50
Material	$k_f = 1157,8. \varphi^{0,19}$
Coeficiente de atrito	0,05 a 0,4
Carregamento	Prensa hidráulica
Velocidade	0,1 mm/s
Software	Simufact.formin GP

Na **Figura 3.4** são mostradas as imagens do ensaio do anel produzidas pela simulação computacional, apesar de terem sido realizadas apenas simulações axissimétricas, a visualização 3D é permitida por ferramenta do software.

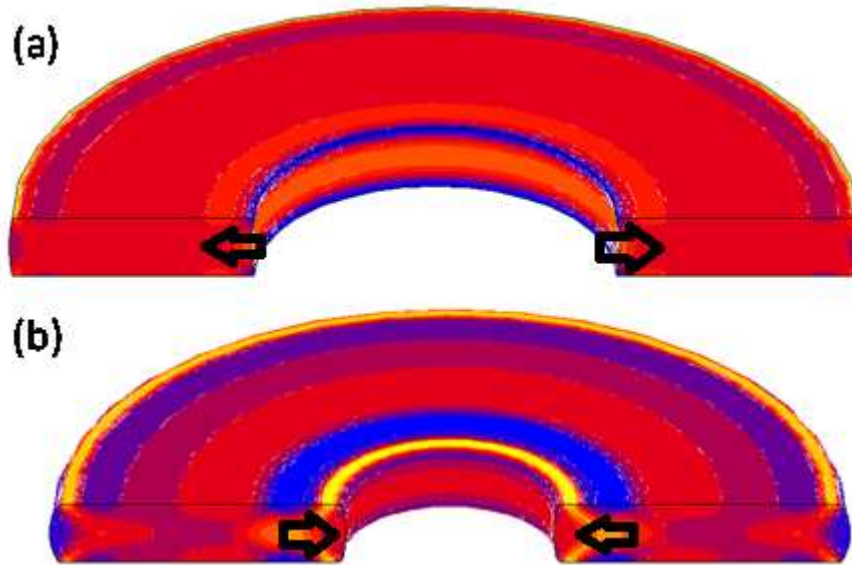


Figura 3.4 imagens da simulação do ensaio do anel para diferentes coeficientes de atrito.

Na **Figura 3.4a** apresenta a visualização do anel deformado em 60% de altura para um coeficiente de atrito de 0,05; pode-se perceber que tanto o diâmetro interno quanto o externo deformam-se radialmente para fora. A **Figura 3.4b** mostra a mesma redução em altura para um μ de 0,25 onde pode ser visualizado o efeito de embarrigamento característico para altos atritos, onde o diâmetro interno deforma-se radialmente para dentro.

Na **Figura 3.5** é apresentado o conjunto de curvas de calibração para o ensaio do anel produzida pelo software e o comparativo com os resultados dos testes experimentais.

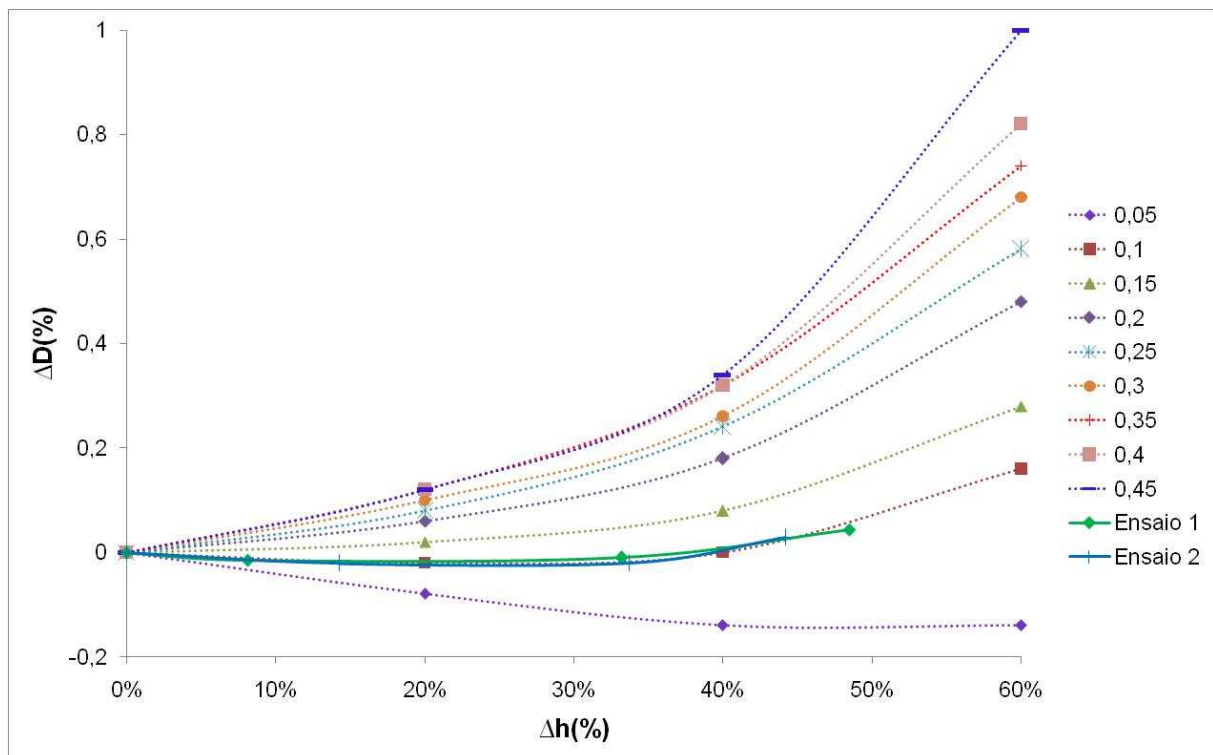


Figura 3.5 –Curva de calibração para o ensaio de compressão do anel variando o coeficiente de atrito (μ) de 0.05 até 0.4 e comparação com os dois ensaios do anel realizados experimentalmente

Através da **Figura 3.5** é possível perceber que o coeficiente de atrito envolvido no processo é de 0,1, pois a curva obtida através dos testes experimentais é coincidente com a respectiva curva gerada pelo software para um μ de 0,1.

3.3 Medição das Tensões Residuais por Difração de Nêutrons

Foi utilizado o método de medição da difração de nêutrons para a obtenção dos perfis de tensões residuais. A medição foi realizada após a trefilação e o corte das barras do aço AISI 1045 para um ângulo de feixe de 15°. Os corpos de prova medidos possuíam medidas de seção redonda de 200 mm de comprimento e 20,25 mm de diâmetro e estão esquematizados na **Figura 3.6**.

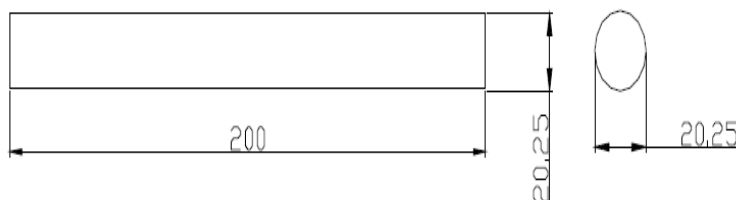


Figura 3.6: Tamanho e dimensões dos corpos de prova utilizados nas medições das tensões residuais

A análise por difração de nêutrons foi baseada na medição das distâncias interplanares dos planos {211} do ferro- α para as direções axiais, periféricas e radiais das barras. A partir das distâncias interplanares, foram calculadas deformações nas três direções principais e utilizando-se as constantes elásticas específicas, são calculadas as tensões principais. Esta parte do trabalho é tema específico de outros trabalhos inseridos no projeto maior a que esta pesquisa está inserida. Na **Tabela 3.2** são apresentados os parâmetros do equipamento utilizado na determinação das tensões residuais.

Tabela 3.2 –Dados do equipamento utilizado para a determinação de tensões residuais via difração de neutrons.

Equipamento	E3 – HMI – Berlin
Ângulo Monocromador	65°
Comprimento de onda	0,1486 nm
Colimação	open
FWHM	0,3(a 2theta=90°)
Fluxo	5 X 10 ⁶ n/cm ² /s
Detetor	PSD 30 X 30 cm ²
Monocromador	Si(400) Double Focus
Abertura	2 mm

A **Figura 3.7** apresenta um desenho esquemático do equipamento utilizado para as medições das tensões residuais:

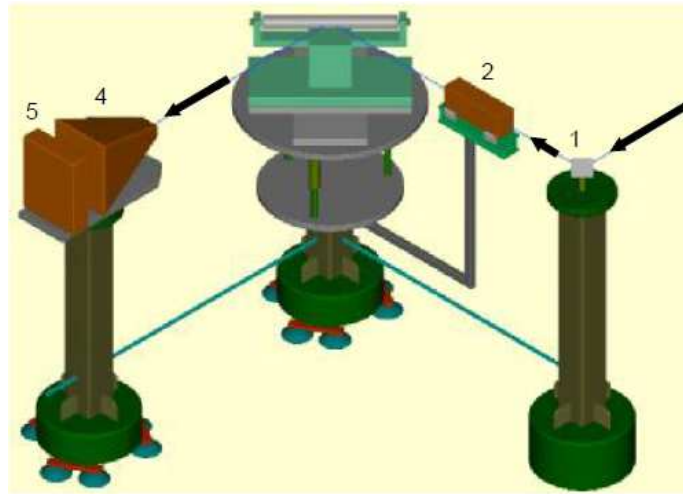


Figura 3.7: Desenho esquemático do instrumento utilizado para as medições com 1=monocromador, 2=haste com abertura de incidência, 3=corpo de prova, 4=difratômetro, 5=detector

4 MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS

Essa parte do trabalho foi dividida em dois momentos distintos:

No primeiro, foram desenvolvidos 4 modelos computacionais para que fosse reproduzido um processo de trefilação encontrado comumente na indústria. Foram feitos 3 modelos axissimétricos (mecânico axissimétrico com fieira rígida, mecânico axissimétrico com fieira elástica, termomecânico axissimétrico com fieira rígida) e um modelo tridimensional mecânico com fieira rígida.

No segundo, foram variados parâmetros do processo de trefilação para avaliar a influência destes na geração das tensões residuais. Foram realizadas simulações axissimétricas mecânicas para diferentes ângulos de fieira, taxas de deformação e configuração das reduções da fieira.

4.1 Simulação do processo industrial

Um esquema do processo de trefilação combinada de barras cilíndricas encontrado com frequência na indústria é apresentado na **Figura 4.1**.

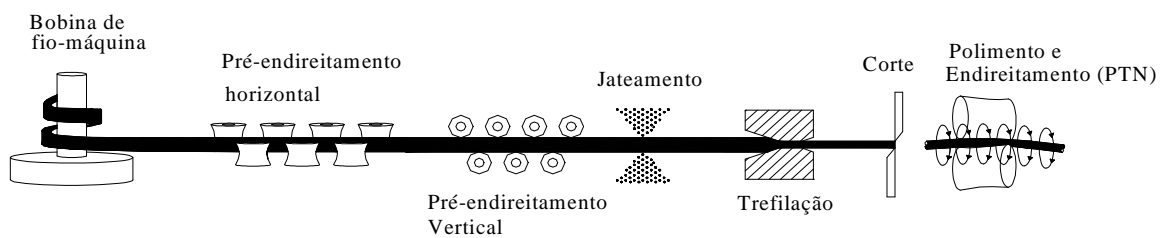


Figura 4.1 Processo de trefilação combinada

Devido à facilidade de modelamento a etapa da trefilação, apresentada na **Figura 4.2**, foi escolhida para ser simulada. Para isso, utilizou-se o software comercial Simufact.forming®, que se utiliza do código de elementos finitos MARC, para posterior comparação com os valores medidos experimentalmente.

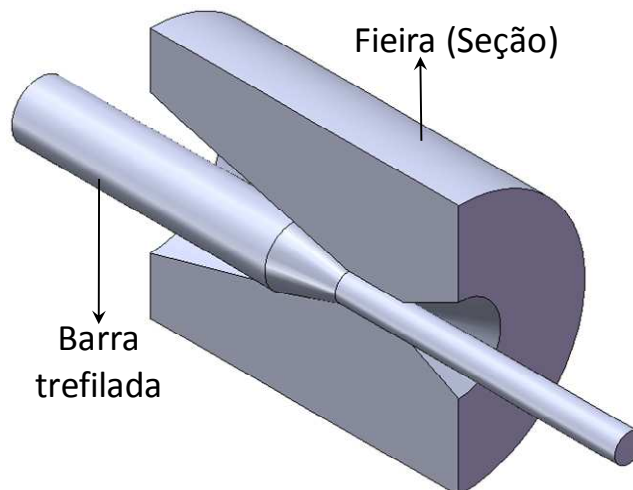


Figura 4.2: Etapa da trefilação propriamente dita

O material foi considerado isotrópico e foi utilizado um modelo que considera os efeitos elásticos para a descrição do material, além disso foram desprezadas as transformações de fase. Foi utilizada a equação tensão-deformação verdadeira do material conforme **Equação 3.1** e foram analisadas as forças e deformações desenvolvidas no processo.

O coeficiente de atrito de Coulomb entre a fieira e a barra foi obtido através do ensaio do anel descrito no capítulo 3.

Para imprimir a velocidade (V) de trefilação, foi colocado um artifício denominado “puxador” em uma das pontas da barra, o qual simula o efeito do braço mecânico que puxa a peça de trabalho durante o processo real de trefilação.

O estado de tensões residuais foi calculado no final do processo, após a barra ter atravessado toda a fieira.

4.1.1 Modelo Axissimétrico Mecânico com Fieira Rígida

O primeiro modelo desenvolvido para descrever o processo de trefilação foi um modelo axissimétrico mecânico que permite que se calcule metade da barra e os resultados sejam extrapolados para o restante da geometria, o que permite reduzir o tempo de cálculo computacional. O modelo é esquematizado na **Figura 4.3**.

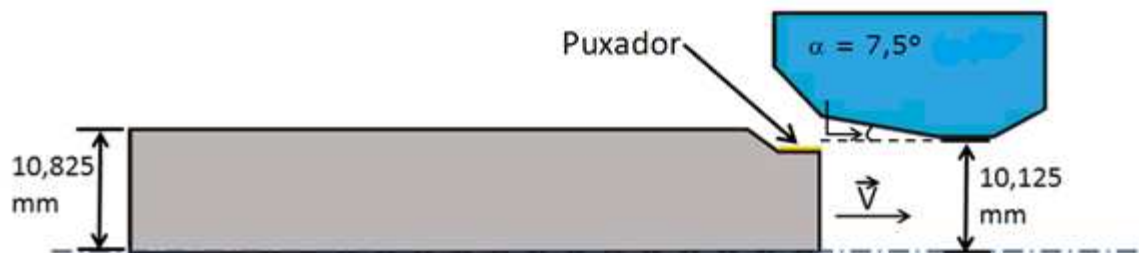


Figura 4.3 - Modelo bidimensional criado

A **Figura 4.3** apresenta o modelo desenvolvido para simulação, foi modelado somente a metade da barra, com diâmetro antes da trefilação de 10,825 mm e após de 10,125 mm, optou-se por colocar um rebaixo na ponta da barra para colocação do puxador com o mesmo ângulo de rebaixo inicial utilizado na indústria para que inicie-se o processo. A fieira possui comprimento total de 30 mm, sendo que as regiões de entrada, saída e calibração possuem 5 mm de comprimento e a região de trabalho 15 mm.

Na **Tabela 4.1** são apresentados os parâmetros do processo de trefilação utilizados no software.

Tabela 4.1 - Parâmetros da simulação do processo de trefilação

Análises	Mecânica axissimétrica
Número de elementos	600
Curva de Escoamento	$k_f = 1157,8 \cdot \varphi^{0,19}$
Material	AISI 1045
k_{fo}	449 MPa
Coefficiente de atrito (μ)	0,1
Velocidade de trefilação	1500 mm/s

Diâmetro inicial e final	21,65 e 20,25 mm
Temperatura inicial	20°C
φ_a	0,1337
Ângulo de fieira (2 α)	15°

4.1.2 Modelo Axissimétrico Mecânico com Fieira Elástica

O segundo modelo, geometricamente semelhante ao mostrado no item anterior, considera deformação elástica da fieira com um módulo de elasticidade de 660 GPa, correspondente ao carbeto de tungstênio (WC-Co), mesmo material utilizado num processo real.

Na **Tabela 4.2** são apresentados os parâmetros do processo de trefilação utilizados na simulação com fieira elástica.

Tabela 4.2 - Parâmetros da simulação do processo de trefilação com fieira elástica

Análise	Fieira elástica
Número de elementos barra	4000
Curva de Escoamento	$k_f = 1157,8 \cdot \varphi^{0,19}$
Material	AISI 1045
k_{fo}	449 MPa
Coefficiente de atrito(μ)	0,1
Velocidade de trefilação	1500 mm/s
Diâmetro inicial e final	21,65 e 20,25 mm
Temperatura inicial	20°C
Número de elementos fieira	2633
Material da Fieira	WC-Co
φ_a	0,1337
E (módulo de elasticidade) da fieira	660 GPA
Ângulo de fieira (2 α)	15°

4.1.3 Modelo Axissimétrico Termomecânico Fieira Rígida

A modelagem termomecânica, utilizada para o terceiro modelo, considera os efeitos térmicos das mudanças de temperatura que ocorrem no material durante o processo, sem levar em consideração as possíveis transformações de fase, o que poderia gerar tensões residuais. Porém é muito difícil que isso ocorra, já que os processos atuais de produção de barras de aço via trefilação possuem eficientes sistemas de lubrificação.

É muito importante analisar o efeito da temperatura no processo, que é aumentada devido a três fatores.

- a deformação homogênea

- a deformação heterogênea, ou trabalho redundante
- o atrito com a fiação

Na **Tabela 4.3** são apresentados os parâmetros do processo de trefilação utilizados na simulação termomecânica.

Tabela 4.3 - Parâmetros da simulação do processo de trefilação termomecânica

Análises	Termomecânicas axissimétrica
Número de elementos	4000
Curva de Escoamento	$k_f = 1157,8 \cdot \varphi^{0,19}$
Material	AISI 1045
k_{fo}	449 MPa
Equação do Material	$k_f = 1157,8 \cdot \varphi^{0,19}$
Coefficiente de atrito(μ)	0,1
Velocidade de trefilação	1500 mm/s
Diâmetro inicial e final	21,65 e 20,25 mm
Temperatura inicial	20°C
φ_a	0,1337
Ângulos de fiação (2 α)	15°

Na **Tabela 4.4** são apresentados os parâmetros térmicos da fiação.

Tabela 4.4- Parâmetros térmicos da fiação

Propriedades	Valor	Referência
Densidade(g/cm ³)	15,3	Smithells Metals Reference Book
Módulo de Young (GPa)	660	Smithells Metals Reference Book
Coefficiente de Poisson	0,22	Smithells Metals Reference Book
Condutividade Térmica (W/mK)	100	Smithells Metals Reference Book
Coefficiente de transmissão de calor- Barra/Ferramenta (W/m ² K)	210000	Atienza
Coefficiente de transmissão de calor- Barra/Ar (W/m ² K)	10000	Atienza

4.1.4 Modelo Mecânico Tridimensional com Fiação Rígida

Além dos modelos anteriores, foi criado um modelo 3D, esquematizado na **Figura 4.4**, para verificar se haveria diferenças nos resultados obtidos usando-se esta modelagem, muito mais detalhada pela quantidade de elementos e por não usar os efeitos de axissimetria. Neste modelo por considerações geométricas de simetria e a fim de diminuir o tempo de cálculo foi simulado ¼ (um quarto) da barra.

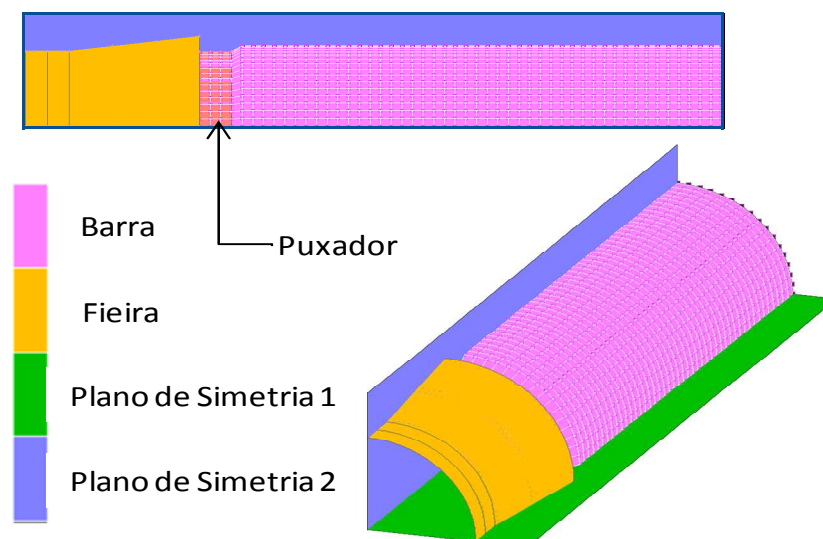


Figura 4.4 - Modelo tridimensional criado

Na **Figura 4.4** em rosa visualiza-se a barra de AISI 1045, em amarelo a fieira, em verde o plano de simetria 1 e em azul o segundo plano de simetria, que são necessários pelas imposições geométricas de um modelo tridimensional. Este modelo pretende descrever com maiores detalhes o processo real através da consideração de uma parte maior da barra e de uma quantidade maior de elementos.

Na **Tabela 4.5** são apresentados os parâmetros utilizados na simulação tridimensional:

Tabela 4.5 - Parâmetros da simulação do processo de trefilação tridimensional

Análises	mecânica tridimensional
Número de elementos	4998
Material	AISI 1045
Equação do Material	$k_f = 1157,8 \cdot \varphi^{0,19}$
k_{fo}	449 MPa
Coefficiente de atrito(μ)	0,1
Velocidade de trefilação	1500 mm/s
Diâmetro inicial e final	21,65 e 20,25 mm
Temperatura inicial	20°C
φ_a	0,1337
Ângulos de fieira (2 α)	15°

4.2 Simulação com variação de parâmetros do processo

Na segunda parte desta etapa do trabalho, foram desenvolvidos mais três modelos de elementos finitos variando os parâmetros do processo, para que se avaliasse a influência de cada parâmetro na geração das tensões residuais e para que fosse encontrada uma nova configuração que permitisse melhorar o processo.

4.2.1 Diferentes ângulos de fieira

Foi desenvolvido um modelo axissimétrico mecânico para os ângulos de fieira de 12°, 15°, 16,2°, 18° e 20° para a avaliação deste parâmetro o efeito dos diferentes ângulos de fieira na geração das tensões residuais.

O ângulo de 16,2° foi encontrado através da equação detalhada na revisão bibliográfica, o qual pode ser definido como o ângulo ótimo para a configuração geométrica deste trabalho e indicará a menor força de trefilação possível.

Foi utilizada a equação da curva de escoamento do material, conforme a **Equação 3.1**.

$$\alpha = \sqrt{\varphi_A \cdot \frac{3}{2} \cdot \mu} \quad \text{Equação 2.11}$$

Os parâmetros utilizados nas simulações são mostrados na **Tabela 4.6**.

Tabela 4.6 - Parâmetros da simulação do processo de trefilação com diferentes ângulos de fieira

Análise	Axissimétrica mecânica
Elementos	1500
Material	AISI 1045
Equação do Material	$k_f = 1157,8 \cdot \varphi^{0,19}$
k_{fo}	449 MPa
Coefficiente de atrito (μ)	0,1
Velocidade de trefilação	1500 mm/s
Diâmetro inicial e final	21,65 e 20,25 mm
Temperatura inicial	20°C
φ_a	0,1337
Ângulos de fieira (2 α)	12°, 15°, 16,2°, 18° e 20°

4.2.2 Diferentes curvas tensão-deformação, velocidade de trefilação e diâmetro das barras

4.2.2.1 Curva de Escoamento do Material

Foi utilizada a curva de resistência ao escoamento do material AISI 1045 obtida através do banco de dados do software Simufact.forming GP®. Foram utilizadas curvas para três taxas de deformação demonstradas a seguir:

$$k_f = 1018,098 \cdot \varphi^{0,1123} \quad \text{Equação 4.1}$$

$$k_f = 1012,572 \cdot \varphi^{0,0799} \quad \text{Equação 4.2}$$

$$k_f = 1008,29 \cdot \varphi^{0,0774} \quad \text{Equação 4.3}$$

As **Equações 4.1 a 4.3** representam as curvas utilizadas pelo software para as taxas de deformação de 1,6s⁻¹, 8s⁻¹ e 40s⁻¹, respectivamente. Para o processo em questão, foi verificado que ocorrem taxas de deformação de até 40s⁻¹.

Além disso, mudou-se o diâmetro de entrada para 21,463 mm e a velocidade de trefilação para 1250 mm que também são parâmetros encontrados freqüentemente em processos industriais.

Tabela 4.7 - Parâmetros da simulação do processo de trefilação Com novos parâmetros

Análises	Mecânica axissimétrica
Elementos radiais	20
Material	AISI 1045

Equações do Material	Banco de dados Simufact.formingGP®
Coeficiente de atrito (μ)	0,1
Velocidade de trefilação	1250 mm/s
Diâmetro inicial e final	21,463 e 20,25 mm
Temperatura inicial	20°C
φ_a	0,1337
Ângulos de fieira (2 α)	15°

4.2.3 Fieira com 2 reduções

Foi criado um modelo axissimétrico mecânico, onde a redução de 21,5 mm para 20,25 mm foi dividida em duas etapas. Segundo a literatura pesquisada, as tensões residuais para reduções menores que 0,4% invertem o sentido das tensões residuais [Wang e Gong, 2002]. Objetivou-se nesta modelagem inserir tensões residuais compressivas na superfície e trativas no centro da barra através da segunda redução, de modo a diminuir-se a magnitude das tensões residuais resultantes do processo.

Na primeira redução do diâmetro inicial da barra foi de 21,5 para 20,29 mm e a segunda redução de 20,29 mm para 20,25 mm.

Na **Tabela 4.8** são apresentados os parâmetros utilizados na simulação com duas reduções na fieira.

Tabela 4.8 - Parâmetros da simulação do processo de trefilação com duas reduções

Análises	Mecânica axissimétrica
Elementos	600
Material	AISI 1045
Equação do Material	$k_f = 1157,8 \cdot \varphi^{0,19}$
k_{fo}	449 MPa
Coeficiente de atrito (μ)	0,1
Velocidade de trefilação	1500 mm/s
Diâmetro inicial e final	21,50-20,65 e 20,65- 20,25 mm
Temperatura inicial	20°C
φ_a	0,1337
Ângulos de fieira (2 α)	15°

5 Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações computacionais, para forças, deformações e tensões residuais tanto para os modelos desenvolvidos para reproduzir um processo real, quanto para os modelos onde variou-se os parâmetros do processo para análise da influência dos mesmos.

5.1 Modelos desenvolvidos para reproduzir o processo real

5.1.1 Forças e Deformações

Antes de se comparar os perfis de tensões residuais obtidos na simulação com os resultados experimentais, foi feita uma validação numérica para verificar a correspondência entre o modelo simulado e o problema físico. Utilizou-se a comparação da força teórica de trefilação segundo Siebel com os valores de força simulados, além disso, foram comparados os valores das deformações equivalentes fornecidos pelo software, com os valores das deformações calculadas empiricamente.

Na **Figura 5.1** é apresentada a validação numérica através da força de trefilação utilizando-se a Equação de Siebel [**Equação 2.10**].

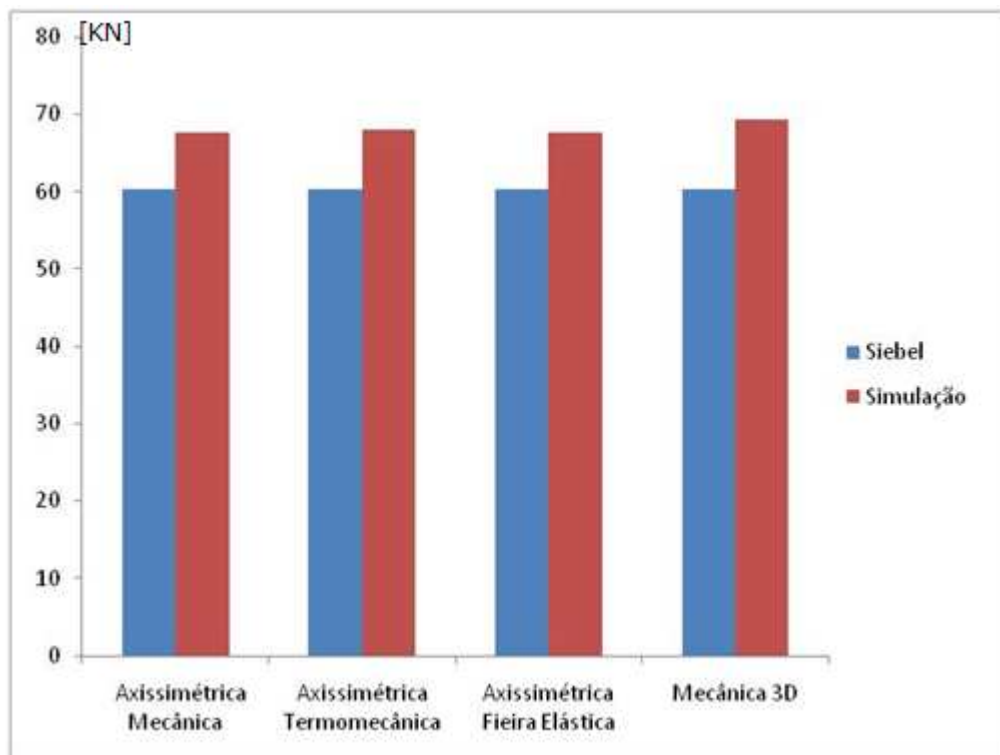


Figura 5.1 – Resultados para a força de trefilação

Pode-se verificar através **Figura 5.1** que são pequenas as diferenças encontradas na comparação entre a Equação teórica de Siebel e os valores das forças fornecidos pelo software. Em termos percentuais, a

maior diferença é de 13% para o caso tridimensional, e no caso das simulações axissimétricas, a diferença máxima é de 11,43% para o caso da simulação termomecânica axissimétrica. A simulação axissimétrica mecânica que considera o material da fieira apresenta o melhor resultado comparativo de 10,75%.

Também se comparou a simulação numérica através da deformação global equivalente teórica da barra com os valores simulados.

Os resultados simulados e calculados para os valores de deformação equivalente são mostrados na **Figura 5.2**.

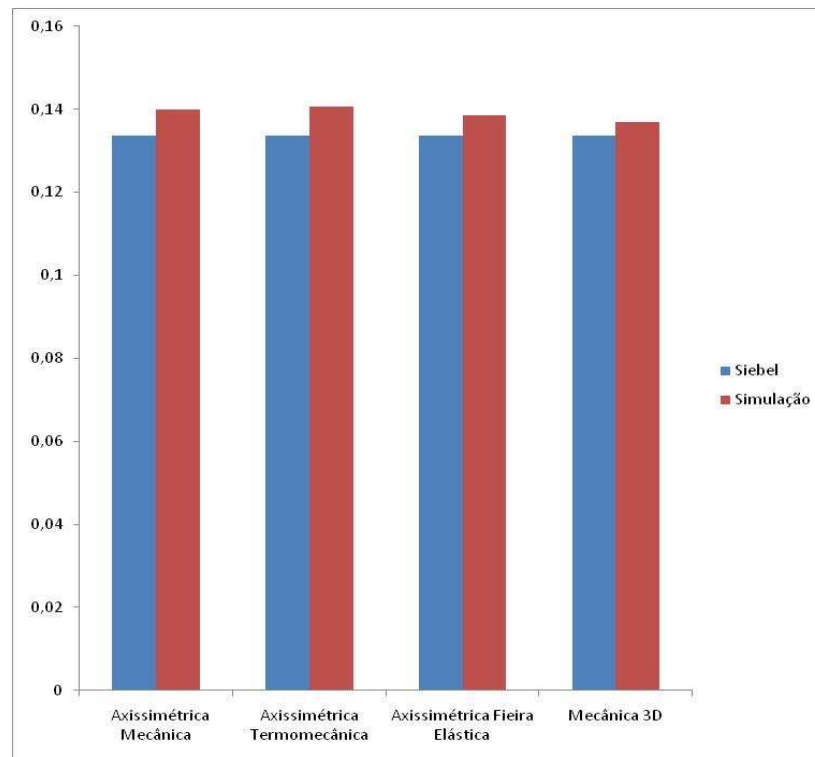


Figura 5.2 – Resultados para a deformação global equivalente

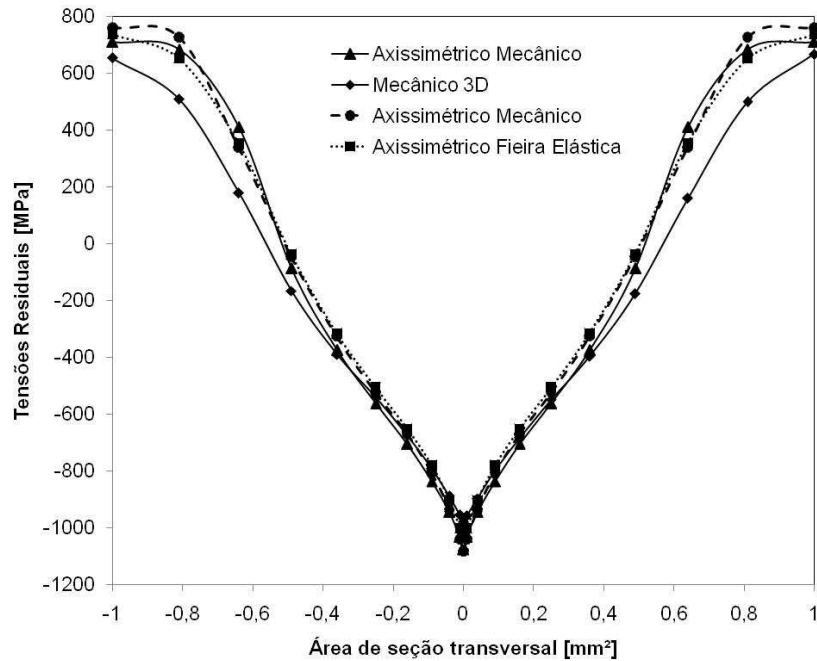
Na **Figura 5.2** nota-se uma diferença máxima entre a equação teórica e os valores de deformação fornecidos pelo software de 4,84% para o caso axissimétrico termomecânico e 2,26% para a simulação tridimensional.

As diferenças presentes não são significantes quando se analisa a magnitude das forças e deformações obtidas no processo, o que permite concluir que a simulação computacional foi eficiente na determinação dos valores de forças e deformações e o modelo descreve corretamente o problema físico em questão.

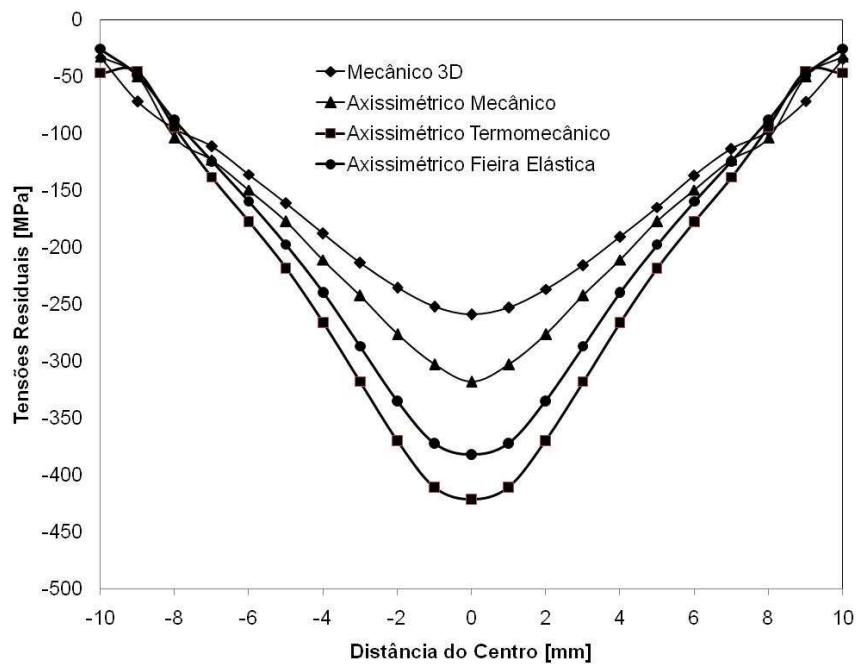
5.1.2 Tensões Residuais

A **Figura 5.3** apresenta o comparativo dos resultados de tensões residuais para as direções axial, radial e tangencial para o ângulo de fieira $2\alpha = 15^\circ$, para os seguintes modelos de elementos finitos: axissimétrico mecânico com fieira rígida, axissimétrico termomecânico com fieira rígida, axissimétrico mecânico com fieira elástica, mecânico tridimensional com fieira rígida.

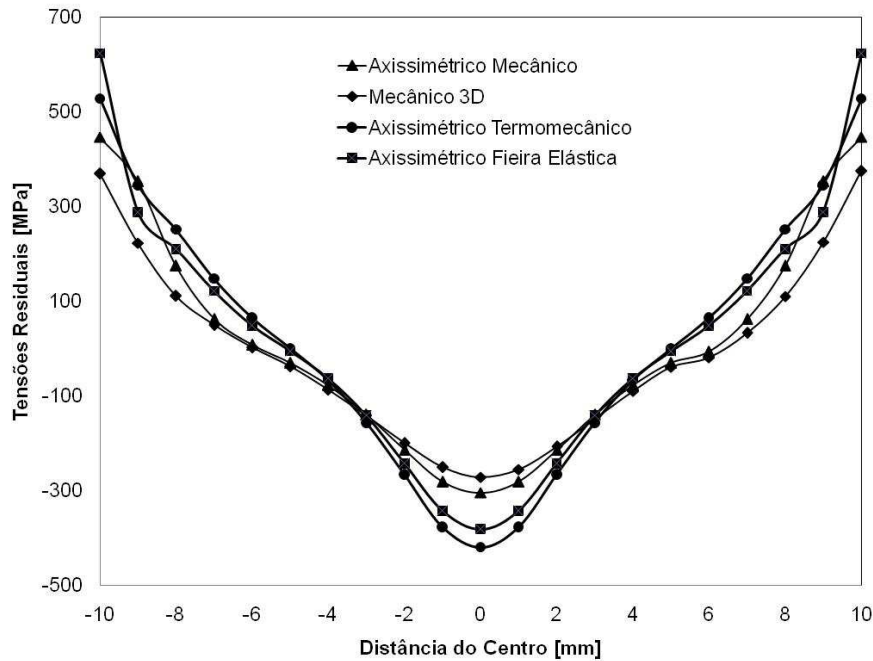
Como esperado [Atienza, 2004], nas direções axial e tangencial, para centro da barra, as tensões apresentam comportamento compressivo; já para a superfície, apresentam comportamento trativo. Na direção radial, as tensões são compressivas em toda a barra aproximando-se de zero na superfície. Esse comportamento dos perfis de tensões residuais é obtido por que a redução de área é maior que 1%, caso contrário, o sentido das tensões seria invertido



(A)



(B)



(C)

Figura 5.3: Tensões Residuais nas direções axial(a) , radial(b) e tangencial(c) para o ângulo de fieira $2\alpha = 15$

o

A **Figura 5.3(a,b,c)** mostra respectivamente os resultados das tensões residuais simuladas para as direções axial, radial e tangencial para os modelos mecânico axissimétrico com fieira rígida, termomecânico axissimétrico com fieira rígida, mecânico axissimétrico com fieira elástica e mecânico tridimensional. Na **Figura 5.3(a)** as tensões residuais para a direção axial são apresentadas em função da área de seção transversal, área em que estão atuando, para melhor visualização da simetria dos resultados a área foi normalizada, onde 0 representa o centro da barra e, os valores unitários, a superfície.

Para a direção axial: Na Figura 5.3(a) observa-se tensões trativas na superfície da barra para todas as simulações, com valores que variam de 600 a 800 MPa (diferenças de 25%), o menor valor foi registrado para o caso da simulação tridimensional e o maior para a simulação axissimétrica mecânica. No centro da barra, os valores das tensões calculadas variam entre -1000 MPa e -1100 MPa (diferenças de 10%).

Para a direção radial: Na Figura 5.3(b) todas as simulações apresentam resultado próximo a zero na superfície da barra. A simulação tridimensional apresenta a maior distância de zero na superfície, com valor de -65 MPa, diferença considerada normal devido às limitações de cálculo do software. Apesar de todas as simulações indicarem um comportamento compressivo das tensões residuais em toda a área de seção superficial da barra, no centro, as diferenças entre os diferentes modelos são consideráveis, a simulação tridimensional apresenta o menor valor, em torno de -250 MPa, e o modelo termomecânico indica valores em torno de -450 MPa (diferenças de 44%).

Para a direção tangencial: Através da Figura 5.3(c) nota-se que as tensões residuais para esta direção apresentam um comportamento parecido com o das tensões para a direção axial, onde se registram diferenças em torno de 200 MPa no centro da barra entre as simulações tridimensional e termomecânica. Para a superfície da barra, as simulações apresentam valores 380 MPa no caso axissimétrico mecânico e 620 MPa o valor máximo (diferença de 60%), este valor foi obtido através simulação que considera o material da fieira.

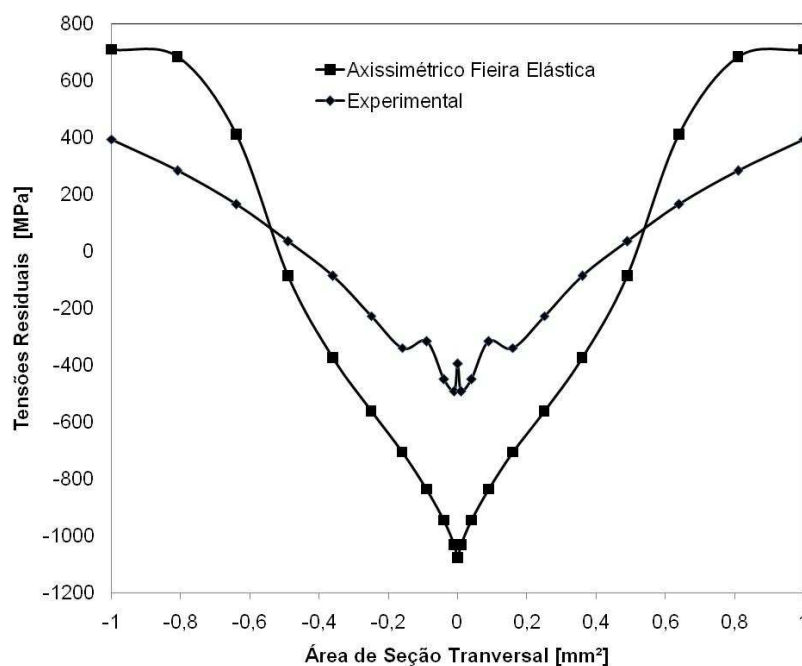
Analisando os perfis de tensões residuais pode se afirmar que não houve grandes diferenças entre os valores de tensões residuais para a direção axial entre os diferentes modelos em se analisando a magnitude das tensões presentes nesse processo. Além disso, nota-se que os valores de tensões residuais para as direções tangencial e axial são próximos na superfície e as direções axial e radial apresentam resultados próximos para o centro da barra (devido às direções possuírem a mesma direção nesse ponto), o que é consistente com a literatura pesquisada e as condições iniciais de modelamento [Atienza, 2005].

A proximidade dos valores de tensões obtidos para a direção radial não se reflete para as direções radial e tangencial, onde as diferenças chegam a 60% dos valores de tensão entre a simulação mecânica axissimétrica e mecânica tridimensional, possivelmente relacionada ao refinamento de malha, já que os modelos mais completos, axissimétrico feira elástica e tridimensional indicam maiores valores de tensões residuais, e o modelo mais simplificado, mecânico axissimétrico, o menor valor dentre as simulações realizadas.

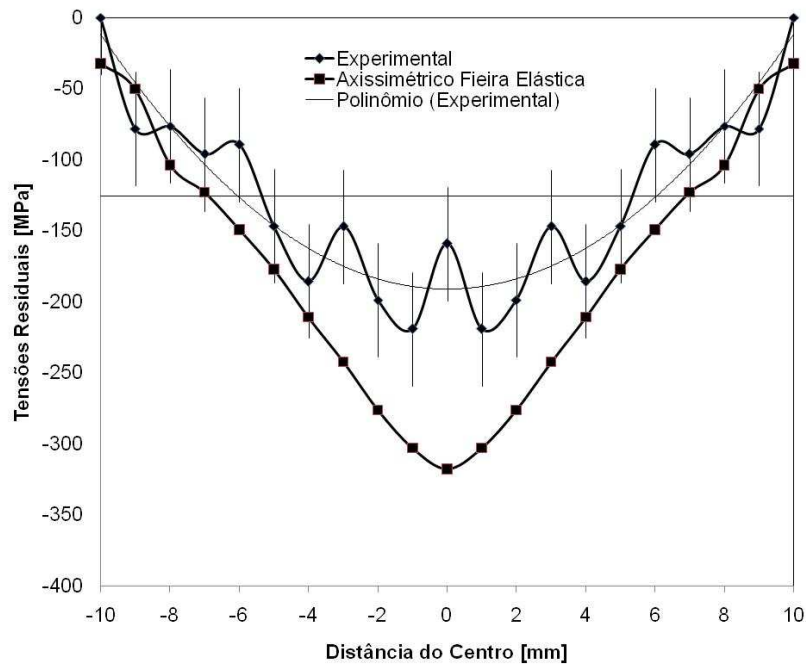
Devido à grande influência do retorno elástico da feira nos resultados de tensões residuais, além de apresentar boa proximidade nos valores de força de trefilação e de deformação equivalente, foi escolhido o modelo mecânico axissimétrico com feira elástica para um comparativo com as tensões residuais medidas via difração de nêutrons.

Outra análise realizada para a comprovação de que os modelos propostos descrevem o problema físico, é a análise da ordem de grandeza das tensões residuais em relação à tensão de escoamento do material. Utilizou-se o Critério de Tresca [Equação 2.9] e comparou-se com o valor da tensão de escoamento do material após o encruamento ocasionado pela redução de área. Para a deformação dada (0,1337) o valor da tensão de escoamento do material é 789,4 MPa, enquanto a Tensão equivalente obtida através do Critério de Tresca, indica um tensão equivalente de 690 MPa para o caso tridimensional, que apresentou maiores gradientes de tensão.

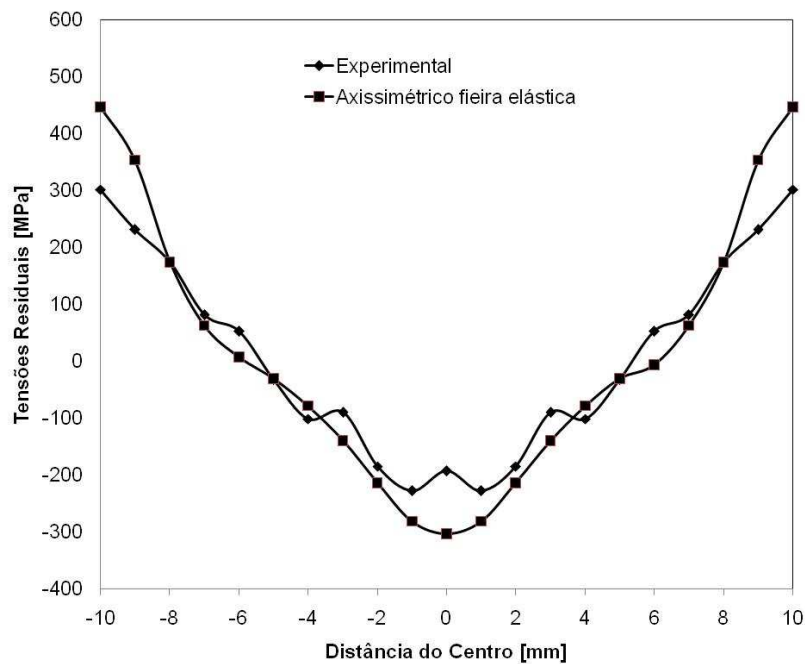
Na **Figura 5.4 (a,b,c)** é apresentada a comparação dos resultados das tensões residuais nas direções axial, radial e tangencial para o modelo mecânico axissimétrico que considera o retorno elástico da feira, com os resultados experimentais medidos por difração de nêutrons.



A)



(b)



(c)

Figura 5.4: Tensões Residuais nas direções axial(a), radial(b) e tangencial(c) para o modelo mecânico axissimétrico com fieira elástica e medidas por difração de nêutrons

Direção axial: Na **Figura 5.4(a)** os valores das tensões residuais medidas por difração de nêutrons foram de -400 MPa na superfície da barra e 400 MPa para o centro, o que gera diferenças de 200 MPa na superfície e de 600 MPa no centro da barra quando se compara com as tensões residuais simuladas.

Direção radial: Na **Figura 5.4(b)** as tensões residuais medidas por difração de nêutrons alcançam valores em torno de -150 MPa no centro da barra e próximos de 0 na região da superfície, os resultados simulados e medidos experimentalmente apresentam grande proximidade, já que para o centro da barra a simulação gera resultados próximos a -300 MPa, um diferença de cerca de 150 MPa.

Direção tangencial: Na **Figura 5.4(c)** as tensões residuais medidas via difração de nêutrons geraram resultados em torno de 300 MPa na superfície, o que indica 150 MPa de diferença para a simulação; e, no centro da barra de -200 MPa, diferença de 100 MPa, já que os valores simulados indicam -300 MPa de tensões residuais neste ponto e direção.

Estas diferenças podem ser originadas de erros em ambas as análises, para o caso da difração de nêutrons, erros ocorridos na medição podem ter acontecido, além da correção matemática que foi realizada para que se obtivesse o perfil das macro-tensões. Nas medições experimentais foram consideradas as macro tensões através de uma correção para a cementita usando os dados da literatura, que também pode gerar algumas diferenças na medição via difração de nêutrons, cálculo realizado em outros trabalhos que pertencem ao mesmo projeto em que este trabalho encontra-se inserido.

Além disso, no modelo proposto, o material é isotrópico, quando na realidade seu comportamento é anisotrópico, pois a matéria-prima é originária de uma processo de laminação que insere anisotropia devido a orientação dos grãos do material. Ao se considerar o material isotrópico, há uma superestimação dos valores de tensões residuais na ordem de 200 MPa no centro da barra para a direção axial. A consideração da anisotropia do material gerará uma grande aproximação dos resultados de simulação com os resultados experimentais. A anisotropia também explica a convergência entre resultados experimentais e simulados ser a pior para a direção axial [Atienza, 2005; He 2002] e pode ser realizada utilizando-se o critério de Hill, um desdobramento do próprio critério de Von Mises, que considera os efeitos anisotrópicos do material.

O material já apresenta tensões residuais antes da etapa de trefilação devido aos processos anteriores: os processos de pré-endireitamento e jateamento induzem tensões residuais compressivas na superfície da barra; nas simulações isto não está sendo levado em consideração, pois a barra entra na fieira livre de tensões. Isso poderá ser minimizado aplicando condições de contorno adequadas que reflitam o estado inicial do material; como por exemplo, simulando-se a etapa de jateamento e inserindo os valores nos elementos como estado inicial de simulação. Estes efeitos podem deslocar os valores simulados na direção dos valores medidos via difração de nêutrons.

5.2 Modelos desenvolvidos variando-se os parâmetros do processo

5.2.1 Diferentes ângulos de fieira

Foi realizada a comparação das força teóricas de trefilação segundo Siebel com os valores de força simulados para os diferentes ângulos de fieira.

Na **Figura 5.5** é apresentada a validação numérica através da força de trefilação utilizando-se a equação de Siebel (**Equação 2.10**).

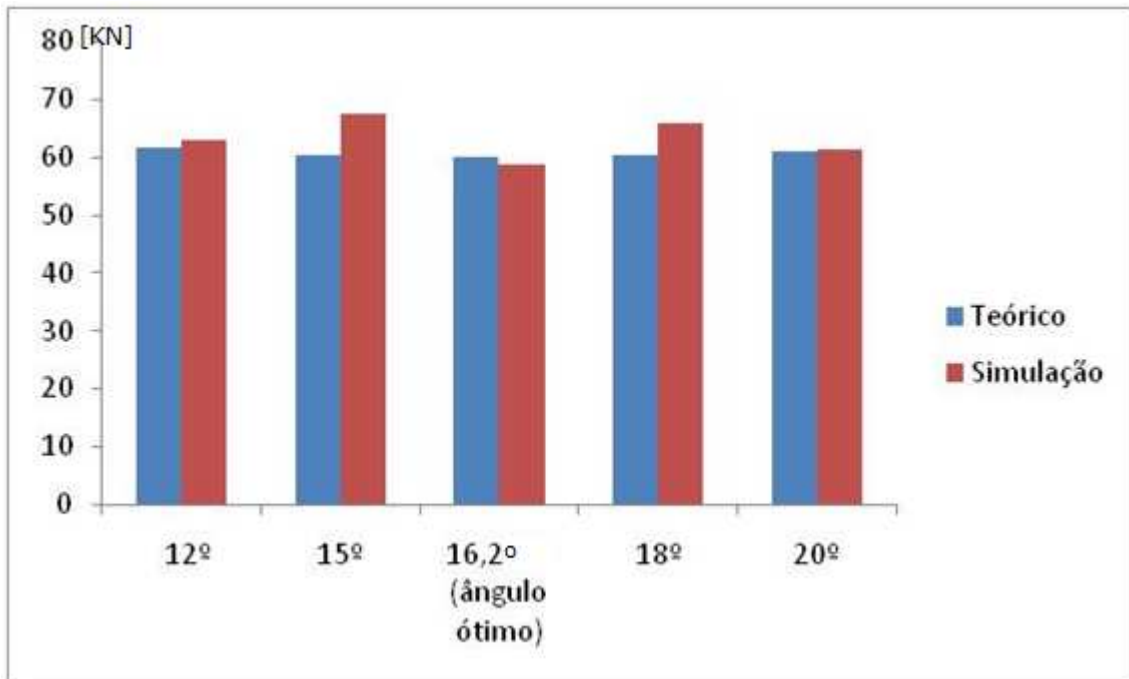


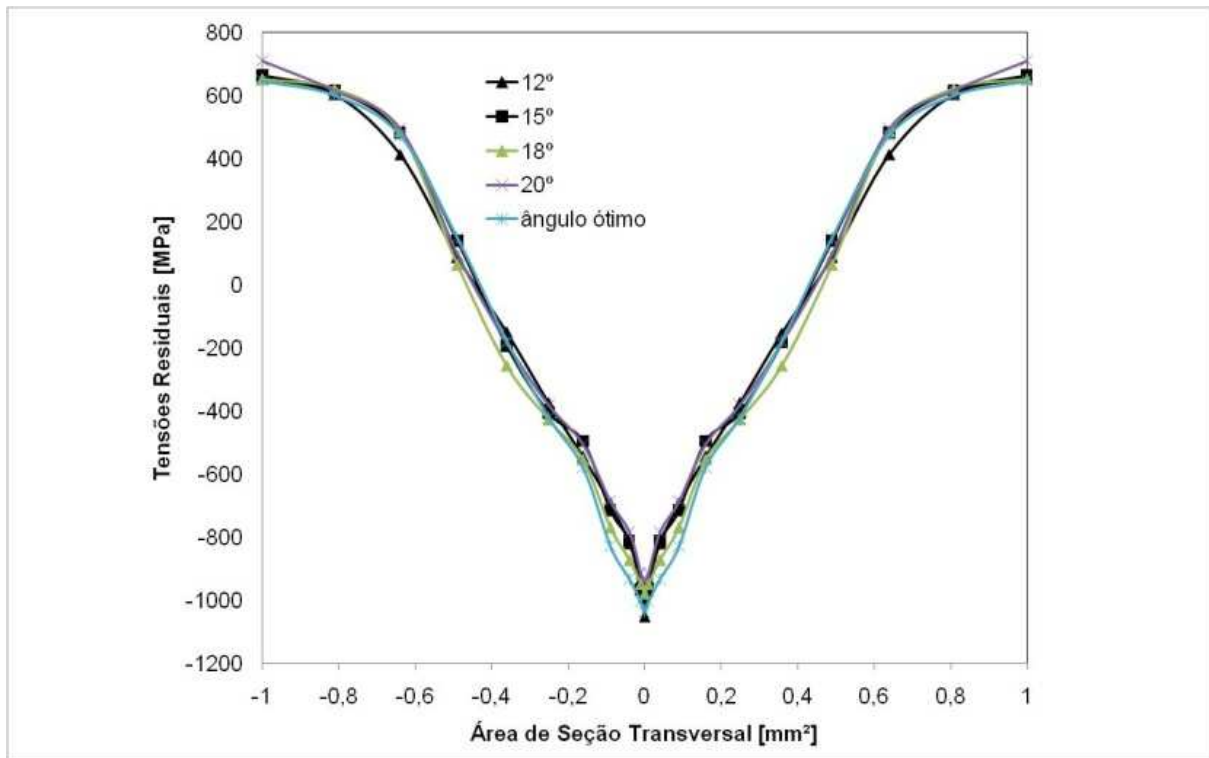
Figura 5.5 – Resultados para a força de trefilação para diferentes ângulos de fieira

Na **Figura 5.5** pode-se verificar que a diferença máxima entre a equação teórica e os valores das forças fornecidos pelo software é de 10,75% para o ângulo de fieira de 15°, seguida pelo ângulo de 18° com diferença de 8,95%. Os ângulos de 12; 16,2; e 20° apresentam diferenças insignificantes nos valores de forças.

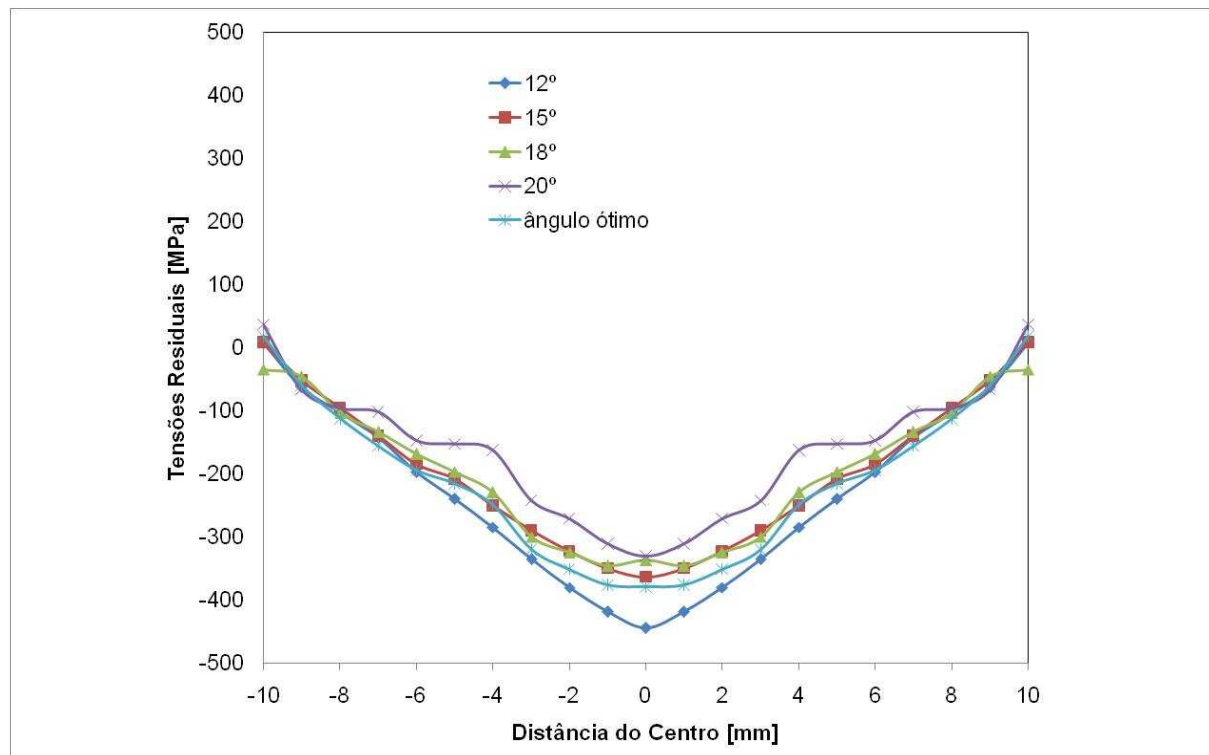
O ângulo da fieira é o fator que exerce maior influência na força de trefilação, 16,2° (ângulo ótimo) apresentou o menor valor de força, que foi de 60,19 kN para o cálculo teórico (**Equação 2**) e 58,75 kN para a simulação, comprovando que a **Equação 2.11** realmente descreve o valor de semi-ângulo de fieira que minimiza os valores das forças de trefilação. Este ângulo é o recomendado para a minimização da energia despendida para a realização do processo.

Para a equação de Siebel, obtiveram-se maiores valores de forças de trefilação para os ângulos de 12° e 20° (menor e maior ângulos simulados), os valores de forças de trefilação aumentam conforme o ângulo se distancia do valor do ângulo ótimo. Já para a simulação, o menor valor de força encontrado, também no ângulo ótimo, porém não se observou o mesmo comportamento da força em relação ao ângulo dos valores encontrados pela Equação teórica, o que pode ser originado por limitações de cálculo do software.

Na **Figura 5.6** é apresentada uma comparação dos perfis de tensões residuais nas direções axial, radial e tangencial para os ângulos de fieira de 12°, 15°, ângulo ótimo (16,228°), 18° e 20°.



(a)



(b)

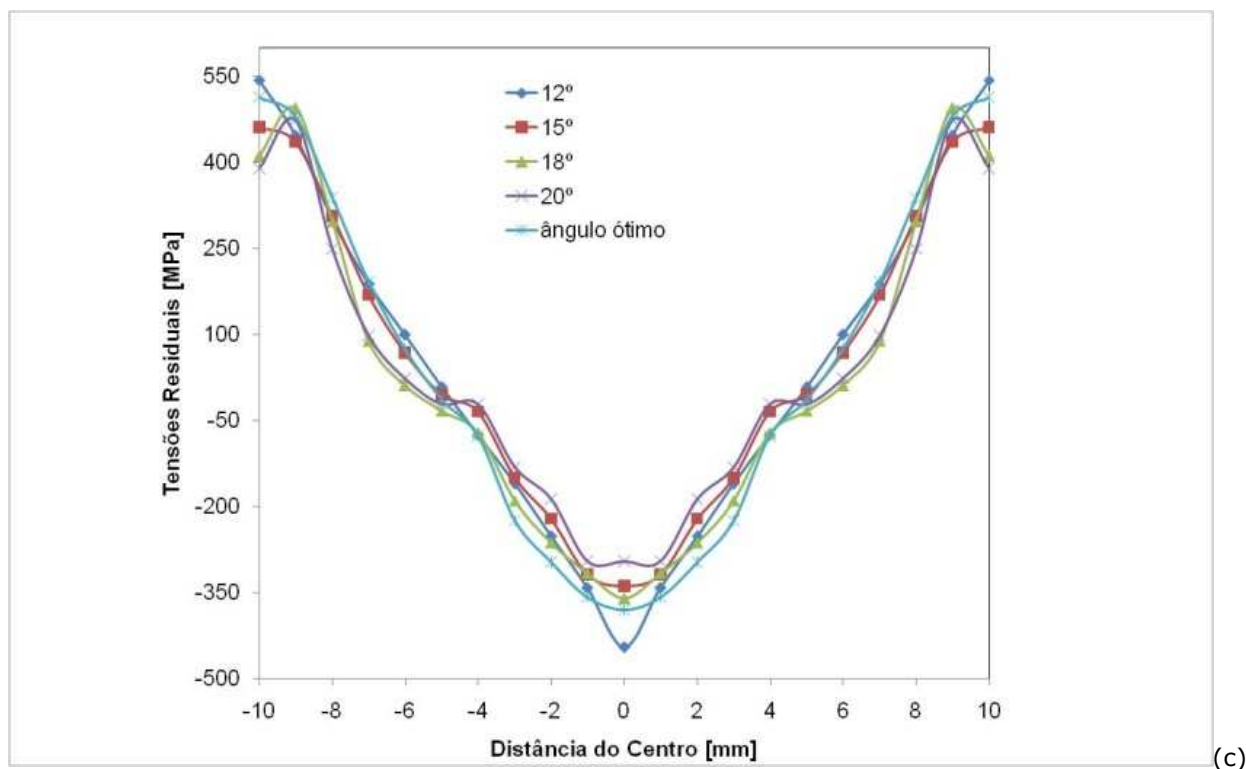


Figura 5.6 - Tensões residuais na direção axial(a), radial(b) e tangencial(c) para diferentes ângulos de feira.

Na **Figura 5.6 (a, b e c)** observa-se que para todos os ângulos de feira o perfil de tensões residuais atinge valores muito próximos.

Analisando o perfil das tensões residuais para a direção axial **Figura 5.6(a)**, é possível perceber que para a superfície da barra encontra-se um valor maior para 2α de 20° e mínimo para o ângulo de 12° , apesar das diferenças serem muito pequenas no intervalo de 12° a 18° .

Na direção radial **Figura 5.6(b)** as diferenças encontradas são maiores, chegando a 180 MPa, sendo os menores valores encontrados nas tensões residuais para o ângulo de feira de 12° e as maiores para o ângulo de feira de 20° .

Para direção axial, a maior responsável pelo surgimento das tensões residuais [He, 2002], os menores ângulos de feira apresentam menores valores de tensões residuais na superfície da barra, aumentando gradativamente até os valores de maiores ângulos de feira. Isto ocorre devido ao aumento do parâmetro Δ , que é diretamente proporcional ao semi-ângulo de feira para os casos de mesma redução de área, um maior parâmetro Δ indica uma menor área de contato entre a feira e a barra, o que produz maior heterogeneidade nas deformações, aumentando os valores de tensões residuais.

Nas direções radial esse comportamento não se repete, os valores de tensões residuais no centro da barra são maiores para os menores valores de semi-ângulo de feira.

Na direção tangencial as tensões residuais não seguem uma ordem gradual (nem direta, nem inversamente proporcional ao semi-ângulo de feira) para a magnitude das tensões residuais no centro da barra. Já na superfície, a magnitude das tensões residuais é inversamente proporcional ao semi-ângulo de feira. Além disso, para os ângulos de feira de 18° e 20° , na superfície, há um decréscimo no valor da tensão residual em relação à medição em uma camada inferior da barra. Não foi encontrada uma explicação para esse fenômeno ocorrente em ângulos maiores da feira.

5.2.2 Efeitos das diferentes curvas tensão-deformação, velocidade de trefilação e diâmetro das barras nas tensões residuais

Na **Figura 5.7** apresenta-se o perfil para as tensões residuais nas direções axial, radial e tangencial após mudarem-se diversos parâmetros de trefilação como a velocidade, os diâmetros de entrada e as taxas de deformação.

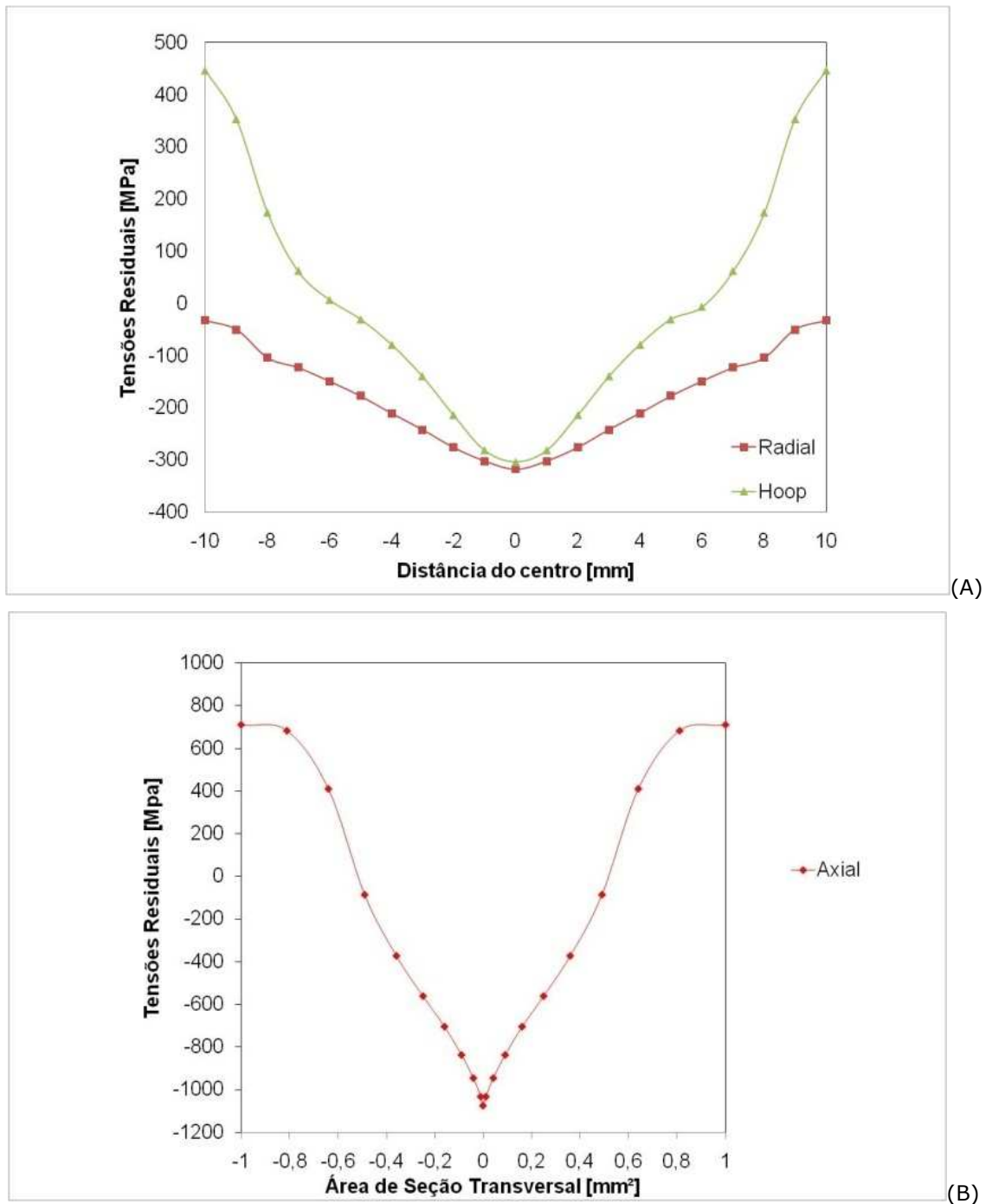


Figura 5.7 - Tensões residuais na direção axial(B), radial e tangencial(A) para diferentes parâmetros de processo.

Para o ângulo estudado, a direção axial apresenta um comportamento trativo na superfície e compressivo no centro da barra, atingindo um valor máximo na superfície de 720 MPa e mínimo no centro da barra de -1070 MPa.

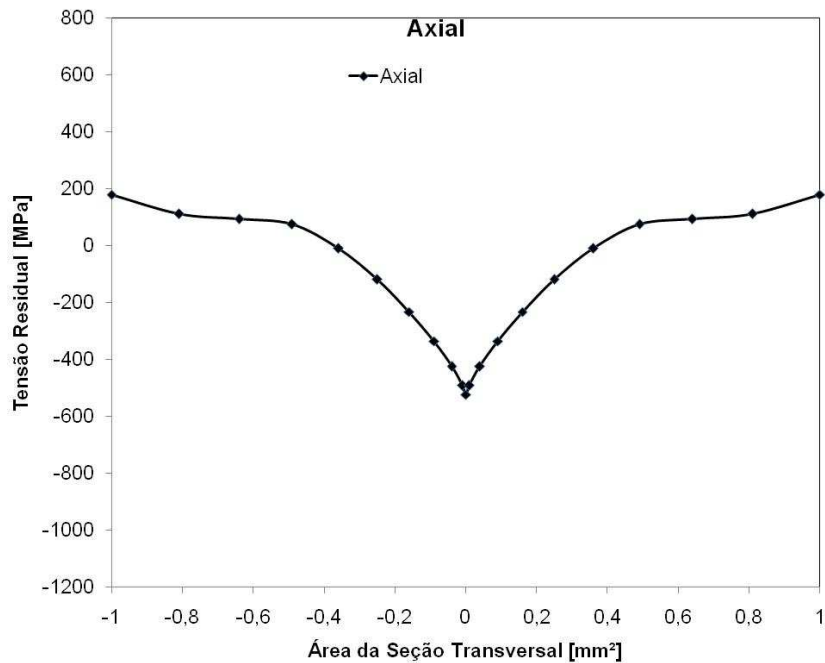
A direção radial apresenta comportamento compressivo em toda a área da barra, atingindo valores mínimos no centro em torno de -320 MPa na simulação e atingindo valores próximos a zero na superfície.

A direção tangencial apresenta comportamento parecido com o apresentado na direção axial, com tensões residuais trativas na superfície girando em torno de 450 MPa compressivas no centro da barra com -300 Mpa.

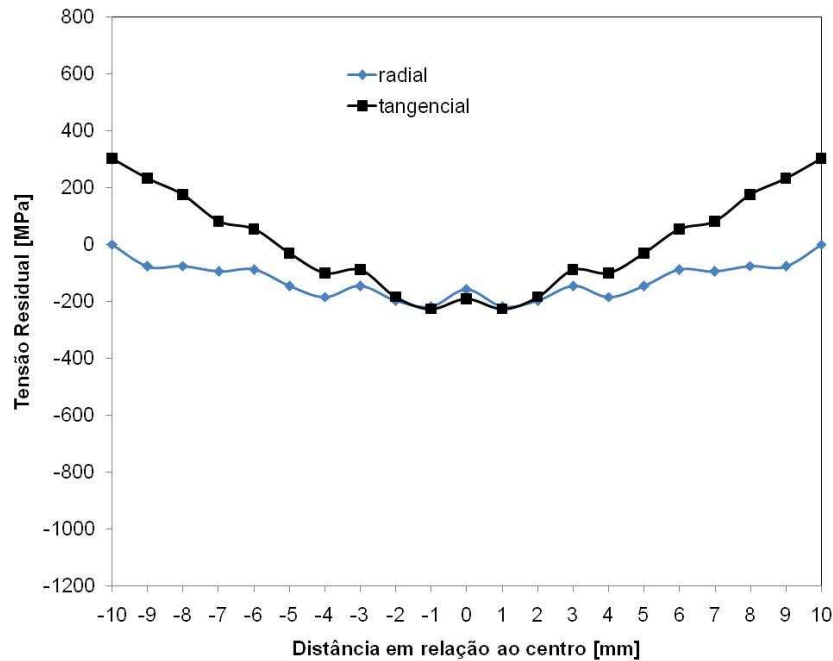
Esta nova configuração de parâmetros foi escolhida, pois também é típica do processo industrial em que esse estudo foi baseado. Os resultados apresentados não diferem significativamente dos resultados da modelagem inicial, de modo que os parâmetros alterados para essa simulação não alteram os resultados de tensões residuais, chamando-se a atenção para que os resultados da equação própria do material não diferem significativamente para os resultados em que se utilizou o banco de dados do software.

5.3 Diferente Configuração Geométrica da Fieira

Na **Figura 5.8** apresenta-se o perfil para as tensões residuais nas direções axial, radial e tangencial para duas reduções de fieira.



(A)



(B)

Figura 5.8 - Tensões residuais na direção axial(A), radial e tangencial(B) para fieira com duas reduções

Na **Figura 5.8** são apresentados os resultados simulados para o perfil de tensões residuais para o caso de duas reduções da fieira.

Para a direção axial: as tensões residuais atingem um valor de 180 MPa na superfície e -530 MPa no centro.

Para a direção radial: as tensões residuais têm um comportamento compressivo em toda a superfície da barra chegando próximo a zero na superfície.

Para a direção tangencial: observa-se um comportamento parecido com o da direção axial, com as tensões superficiais chegando a 100 MPa e centrais de -200 MPa.

Esta configuração permite concluir que as tensões residuais em uma única redução não são somente dependentes da redução de área e do ângulo da fieira, mas também podem ser afetadas por uma leve deformação gerada por uma fieira imediatamente depois da redução maior. Estudos anteriores [Wang e Gong, 2002] demonstram que para reduções de área menores que 0,4% geram tensões residuais inversas do que se obteve até o momento. Para reduções menores que 0,4% as tensões residuais apresentam-se compressivas na superfície e trativas no centro da barra. Isso permite observar que para os casos com duas reduções, sendo que a segunda redução é muito pequena o nível de tensões residuais será diminuído drasticamente.

Isto ocorre por que as zonas de deformação plástica nas duas fieiras estão conectadas devido à pequena distância entre as duas fieiras, e a deformação heterogênea produzida pela primeira fieira não somente é afetada, mas também controlada completamente pela segunda fieira.

É importante ressaltar que esses estudos anteriores demonstram que a distância entre as duas reduções precisa ser pequena, variando-se entre 5mm e 21mm, ou seja, é necessário que a barra ainda esteja sofrendo deformação na primeira fieira quando entrar na segunda. Esta redução é devida à zona de

deformação plástica nas 2 feiras, tornar-se mais homogênea devido à ação dupla de deformação, o que introduz deformações mais homogêneas, reduzindo a magnitude das tensões residuais..

As tensões residuais para uma trefilação de multiestágios tem comportamento similar ao de uma única redução.

Esta modelagem apresenta o melhor resultado de tensões residuais dentre os modelos simulados, de modo que comprovou-se a teoria de que para baixas reduções, o sinal das tensões residuais é invertido, sendo compressivo na superfície e trativo no centro da barra, o que trouxe o valor das tensões residuais para o centro, que até então atingiam valores perto de -1000 MPa para -530 MPa.

Na superfície o magnitude das tensões residuais também foi drasticamente reduzida para a direção axial, onde até então apresentava-se valores em torno de 800 MPa e agora a simulação apresenta 200 MPa.

Estes resultados para as tensões residuais permitem prever que esta configuração gerará as menores distorções devido a considerável redução na magnitude das tensões residuais, é sugerida como um melhoramento do processo.

6 Conclusões

Ao longo deste trabalho foram discutidos diversos aspectos relativos ao processo da trefilação de barras do aço AISI 1045 para que se compreendessem os fenômenos envolvidos na geração das tensões residuais, potenciais de quebras no material e distorções.

Levantaram-se dados de um processo real e pesquisou-se a literatura publicada, desenvolveram-se modelos numéricos computacionais com o objetivo de descrever um problema físico. Além disso, desenvolveram-se modelos com variações de alguns parâmetros do processo para posterior definição de sugestões de melhorias no processo.

Os resultados obtidos pela simulação computacional quando comparados com os testes experimentais permitem concluir que:

- A simulação do ensaio do anel para levantamento de uma curva de calibração, que ao ser comparada com os resultados experimentais, permitiu encontrar o valor do coeficiente de atrito do processo com bastante confiança. O valor encontrado pode ser utilizado para estimar o valor do coeficiente de atrito do processo, o que pode ser verificado na comparação da força de trefilação simulada com a calculada analiticamente. Além disso, obteve-se uma metodologia para definição do coeficiente de atrito em processos utilizando-se como ferramenta a simulação numérica computacional.

- Através de 4 modelagens distintas (mecânica axissimétrica com fieira rígida, mecânica tridimensional com fieira rígida, termomecânica axissimétrica com fieira rígida e mecânica axissimétrica com fieira elástica) foi possível reproduzir-se por Elementos Finitos, através do software Simufact.formingGP®, um processo real da etapa de trefilação dentro de uma rota de fabricação de uma trefilação combinada. A validação da simulação foi realizada através da comparação da deformação global equivalente e da força de trefilação simuladas com resultados obtidos através de cálculos teóricos.

- Quando se comparam os valores de tensões residuais simulados com os valores medidos experimentalmente, pode-se concluir que para as direções radial e tangencial não há diferenças significativas. Para a direção axial, esta comparação apresentou grandes diferenças, principalmente na região central da barra. Essas diferenças podem originar-se do estado inicial de tensões da barra após o processo de jateamento; do comportamento anisotrópico do material, que é produzido por laminação, processo que induz uma diferente orientação dos grãos do material, de pequenos erros de medição via difração de nêutrons ou mesmo na correção dos valores para obtenção das macro-tensões.

- Nas simulações desenvolvidas para análise da influência do semi-ângulo de fieira na magnitude das tensões residuais pode-se observar que maiores ângulos de fieira permitem o surgimento de maiores tensões residuais na direção axial, a qual é a principal responsável pelo surgimento de tensões residuais. Pois a área de contato entre a barra e a fieira será menor, gerando deformações mais heterogêneas, causando aumento no valor das tensões residuais. Isto pode ser quantificado pelo parâmetro Δ .

- Foi encontrado o valor de ângulo de fieira ótimo de $16,2^\circ$ para a redução estudada.

- O modelo desenvolvido para diferentes parâmetros também comuns dentro do mesmo processo industrial objeto deste estudo como: curvas tensão-deformação do aço AISI 1045, velocidade de trefilação e diâmetro das barras, não gerou diferenças significativas nos valores das tensões residuais.

- O modelo com duas reduções de feira demonstrou uma grande redução das tensões residuais para a direção axial no centro da barra. Este modelo é sugerido como o ideal para o processo, pois as zonas de deformação plástica nas duas feiras estão conectadas devido à pequena distância entre as duas feiras, e a deformação heterogênea não somente é afetada, mas também controlada completamente pela segunda feira.

7 Sugestões para Trabalhos Futuros

Embora este trabalho tenha estabelecido e reafirmado diversas conclusões ligadas à trefilação de barras de aço AISI 1045, muitas são as questões que necessitam de aprofundamento para melhor compreensão deste processo de fabricação, dentre elas:

- Consideração do efeito da anisotropia do material durante a modelagem, isto poderá ser realizado através da utilização do critério de Hill, que considera os efeitos da anisotropia e é possível de ser utilizado através de Elementos Finitos.

- Realização de ensaios de tração com altas taxas de deformação, utilização das curvas do banco de dados do software para altas taxas de deformação;

- Consideração da condição inicial das tensões presentes antes da trefilação através da simulação da etapa de jateamento e utilização dos resultados desta como estado inicial para a trefilação, o que pode ser realizado tanto numa mesma rota de simulação, quanto separadamente, apenas inserindo os valores de tensões em alguns nós do modelo.

- Inclusão de não-linearidades entre as barras e a fieira para que analisados os efeitos da distorção, isto pode ser realizado através de simulações tridimensionais com a introdução de ângulos entre a fieira e a barra, heterogeneidades na forma das barras e estado inicial de desalinhamento antes do início da trefilação.

- Para um estudo mais completo e de maior prazo pode-se sugerir a simulação de todas as etapas do processo de trefilação combinada desde o desbobinamento até tratamentos térmicos posteriores para alívio de tensões.

8 Referências Bibliográficas

1. Akikazu, N.; Takaki, Y.; Maszuri, K.; "Behaviour of Residual Stress and Sawing Stress in Conical-type and Cauch-type die Drawing by FEM Simulation and Improvement". Wire Journal International, p:72, 2001
2. Altan, T. Vazquez, V.; "Numerical Process Simulation for Tool and Process Design in Bulk Metal Forming". Keynote Papers, p: 601-603, 1998
3. "ASM Metals Handbook", 1988, vol. 18, p:12.
4. Asawaka, M.; Sazaki, W.; Shshido, S.; "Effect of the Die Approach Geometry and Bearing on Residual Stress After Bar Drawing". Wire Journal International, p: 446-450, 2000
5. Atienza J.M., Elices M.; Material Strict 2004, 37, p:301.
6. Atienza, J.; "Influence of Residual Stresses in the Tensile Test of Cold Drawn Wires". Materials and Structures, p: 548, 2003
7. Atienza, J.; Martinez-Perez, M.; Ruiz-Hervias, J.; Monpean, F.; Garcia-Hernandez M.; Elices, M. "Residual Stress in Cold ferritic Rods". Scripta Materialiam v.52, p:305-309, 2005
8. Atienza, J.M., Ruiz-Hervias, J., Martinez-Peres, M.L.; Monpean, F.J., Hernandez, M.G., Elices, M.; "Residual Stresses in Cold-drawn Pearlitic Rods", Scripta Materialia 52, 2005, p:1223-1228, doi:10.1016/j.scriptamat.2005.03.003.
9. Atienza,J.; "Tensiones Residuales en Alambres de Acero Trefilados". Tese de Doutorado, Universidade Politécnica de Madrid, p: 3-10, 2001
10. Avitzur B.; Wire Ind., 1989, April p:243.
11. Bael, A.; Houtte, P.; Aernoudt, E.; Hall, F.; Pellingier, I.; Hartley, P.; Sturges, C.; "Anisotropic Finite Element Analysis of Plastic Metalforming Process". Rextures and Microstructures, v. 14-18, p:1007-1012
12. Barrientos, D.; Leite, M.; Souza, R.; "Ensaio de Compressão do Anel: Resultados Experimentais e por Elementos Finitos", VIII Encontro de Iniciação Científica do LIS, 2007, p:13-15, São Paulo
13. Celentano, D.; Palacios, M.; Rojas, E. Cruchagu, M.; Artigas, A.; "Simulation and Experiments Validation of Multiple Step Wire Drawing Process"; Finite Elements in Analysis and Design, v.45, p:163-180, 2009
14. Cheng. W.; Fimmie, I.; "Residual Stresse Measurements and the Slitting Method". Springer Verlag, p:110, 2007
15. Dies: Simulation and Experiments". Science in China Series: Technological Sciences, 2009
16. Dieter, G.; "Metalurgia Mecânica". Rio de Janeiro, Guanabara Dois, p:561, 1986
17. El Doniatu, Kassab, S. "Temperature rise in Wire-Drawing". Journal of Materials Processing Technology, v.83, p:72-88, 1998
18. Fitzpatrick, M.; Fry, A.; " Measurements Good Practice Guide n 52, Determination of Residual Stresses by X-Ray Diffraction- Issue 2", p:5, 2005
19. Gerbase, J.; "Método de Força de Trefilação de Arames: Acaliação da variação do Coeficiente de Atrito em Trefilação e Arames de Aço", Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre, p:1-5, 1976
20. Godfrey, Richards F., Saron S.; Wire J. Int, 2000, p: 102.

- 21.** He, S.; Bael, A.; Li, S.; Houtte, P.; Mei, P.; Sarlan, A.; "Residual Stress Determination in Cold Drawn Steel Wire by FEM Simulation and X-Ray Diffraction". *Materials Science and Engineering*, v. 346, p:101-107, 2003
- 22.** Iankov, R.; "Finite Element Simulation of Profile Rolling of Wire". *Journal of Materials Processing Technology*, v.142, p:355-361, 2003
- 23.** Karnezis, P.; Farrugia, D.; "Study of Cold Tube Drawing by Finite Element Modelling". *Journal of Materials Processing Technology*, v.80-81, p:690-694, 1998
- 24.** Kennedy, D.; Vahey, J.; Hanney, D.; "Micro-Shot Blasting of Machined Tools for improving surface Finish and Reducing Cutting Forces in Manufacturing". *Materials and Design* 26, p: 203-208, 2005
- 25.** Kim, T.; Kim, B.; Choi, J.; "Prediction of Die Wear in the Wire-Drawing Process". *Journal of materials processing Technology*, v.65, p:11-17, 1997
- 26.** Lange, K.; "Handbook of Metal Forming". Society of Manufacturing Engineers. Gmbh, 2006, p:13-24
- 27.** Lin, H.; Hsu, Y.; Kih, C.; "Inhomogeneous Deformation and Residual Stress in Skin-pass Axisymmetric Drawing". *Journal of Materials Processing Technology*, v.101, p:128-132, 2008
- 28.** Lu, J.; "Handbook of Measurements of Residual Stresses". SEM, p: 88, Inc. 1996
- 29.** Lu, Y.; Zeng, P.; Lei, L.; Qu, T.; Fang, G.; Sun, J.; "Investigation on Drawing Process of Bi-2223/Ag Wires Using Racetrack-type, p:2255-2262, Science in China Press, 2009
- 30.** Lu, J.; "Prestress Engineering of Structural material: A global Design Approach to the Residual Stress Problem". *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, ASM International, p:11, 2002
- 31.** Luis, C.; León, J.; Luri, R.; "Comparison Between Finite Element Method and Analytical Methods for Studying Wire Drawing Process". *Journal of Materials Processing Technology*, v.164-165, p:1218-1225, 2005
- 32.** Martins P., Rodrigues J.; "Tecnologia Mecânica", Escolar Editora, vol. 1, p: 497, Lisboa 2005
- 33.** Martinez-Perez, M.L., Garcia-Hernandes M., Elices M., Gil-Sevillano, J., Peng, R.L, Buslaps, T.; "Residual Stresses Profiling in the Ferrite and Cementite Phases of Cold-drawn Steel Rods by Synchrotron X-Ray and Neutron Diffraction", *Acta Materialia*, 2004, p: 5303-5313
- 34.** Metz, M.; "Caracterização das Tensões Residuais Originadas no Processo de Trefilação Combinada do Aço SAE 1048". *Dissertação de Mestrado, PPGEM-UFRGS, 2007, Porto Alegre*
- 35.** Metz, M.; Santos, C.; Rocha, A.; "Análise Qualitativa das tensões Residuais Longitudinais em Barras Trefiladas de Aço SAE 1045 Através do Método Slitting", 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, P: 1213-1221, 2007
- 36.** Nastran, M.; Kuzman, K.; "Stabilisation of Mechanical Properties of the Wire by Rolles Straightening" *Journal of Materials Processing Technology*, v.125-126, p:711-719, 2002
- 37.** Neves, F.; "Análise de Tensões Residuais em Tubos Trefilados de Aço ABNT 304". *Tese de Doutorado, Unicamp, 2003*
- 38.** Norasethasophon, S.; Yoshida, K.; "Influences of Inclusion Shape and Size in Drawing of Cooper Shaped Wire". *Journal of Materials processing Technology*, v.108, p:210-218, 2007
- 39.** Norasethasophon, S.; Yoshida, K.; "Prediction of Chevron Crack Initiation in Inclusion Cooper Shaped Wire Drawing". *Engineering Failure Analysis*, v. 15, p:378-393, 2008
- 40.** Nunes R.; "Análise de Tensões Residuais no Processo de Trefilação Combinada do Aço AISI 1048 Visando minimizar distorções pós-processamento". *Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre 2007*

41. Oeverstam, H.; "The Influence of Bearing Geometry on the Residual Stress State in Cold Drawn Wire Analysed by the FEM". *Journal of Materials Processing Technology*, v.171, p:446-459, 2006
42. Robinson, T.; Armstrong, C.G.; "Study on ring Compression Test Using Physical Modelling and FE Simulation", *Journal of Materials Processing Technology*, v.153-154, p:54-59, 2004
43. Rocha, A.; Nunes, R.; Ferlauto, E.; "Avaliação dos Efeitos de Tensões Residuais através da Remoção de Material". *Estudos Tecnológicos*, v.4, p:157-169, 2008
44. Sahin, M., Cem S., Akata H.; "Effect of Surface Roughness on Friction Coefficients During Upsetting Process for Different Materials", v. 28, p. 633-640, 2005; Department of Mechanical Engineering, Trakya University, Turkey, doi:10.1016/j.matdes.2005.07.019.
45. Schaeffer, L.; "Conformação Mecânica". Imprensa Livre, Porto Alegre, 1999
46. Shinohara, T.; Yoshida, K.; "Deformation analysis of Surface Flows in Stainless Steel Wire Drawing". *Journal of Material Processing Technology*, v. 162-163, p:579-584, 2004
47. Spim, J. A., Garcia, A., Santos C.; *Ensaio dos Materiais*, LTC Editora, Rio de Janeiro, 1999
48. Tekkaya A.E.; "State-of-the-art of Simulation of Sheet Metal Forming", *Journal of Materials Processing Technology* 103, 2000, p:14-22
49. Tiernan, P.; Hillery, M.; "Dieless Wire Drawing an Experimental and Numerical Analysis". *Journal of Materials Processing Technology*, v.155-156, p:1178-1186, 2004
50. Tisza M.; "Numerical MOdelling and Simulation in Sheet Metal Forming". *Journal of Material Processing Technology*, v. 151, p:58-62, 2000
51. Vega, G.; Haddle, A.; Imad, A.; "Investigation of Process Parameters Effect on the Copper Wire Drawing". *Materials and Design*, v.30, p:3308-3312, 2009
52. Yang, F.; Wang, Y.; Jiang, J.; Fang, F.; Ma, C.; Zhao, K.; Li, W.; "Material Science and Engineering" v487, p:468-472
53. Yanran, Z.; Wang, Z.; Weinman, C.; "Numerical Simulations for Extrusion and Ironing and Die Angle Optimization". *Journal of Material Processing Technology*, p: 48-52, 1995
54. Yoshida, K.; Furuya, H.; "Mandrel Drawing and Plug Drawing of Shape-memory-alloy Fine Tubes Used in Catheters and Stents". *Journal of Material Processing Technology*, v. 153-154, 2004
55. Walton, H.; "Deflection Methods Chapter", *Handbook of Residual Stress and Deformation Steel*, G.E. Totten, ASM International, p:89-99, 2002
56. Wang, Z.; Gong, B.; "Residual Stress in the Forming of Materials". *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, G.E. Totem, ASM International, p: 141, 2002
57. Woo, D.M.; "On the complete solution of the deep-drawing problem", *Int, J.Mech, Sci* 10, 1968, p: 83-94
58. Woo, D.M.; "On the complete solution of the deep-drawing problem", *Int, J.Mech, Sci* 10, 1968, p: 8
59. Wu, A.; Ren, J.; Peng, Z.; Murakawa, H.; Ueda, Y.; "Numerical Simulation of the residual Stress of Stellite Hard-Facing on Carbon Steel". *Journal of materials processing Technology*, v.101, p:70-75, 2000
60. Zoch, H.; "Iron Single Production Step to Entire Process Chain- The Global Approach pf Distortion Engineering". *Stiftung Institut Workstofftechnik (IWT)*, 2006

