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
PPGE3M

ANÁLISE DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE BARRAS CILÍNDRICAS DE AÇO AISI 1045 VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL

MILENA MACARINI MONDARDO

Dissertação para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2012

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
PPGE3M

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE BARRAS CILÍNDRICAS DE AÇO AISI 1045 VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL

MILENA MACARINI MONDARDO
Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) – Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de processo de fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Milanez (SATC/SC)
Prof. Dr. Diego Rodolfo Simões de Lima (IFSC)
Prof. Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito (EE/UFRGS)

Prof. Dr. Telmo Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

"É durante as fases de maior adversidade que surgem as grandes oportunidades de se fazer o bem a si mesmo e aos outros."

Dalai-Lama

Dedico este meu trabalho aos meus amados pais, Irma e Antônio José Mondardo, que com seu trabalho e paciência abriram as portas dos caminhos que levaram a minha formação profissional; e a todos que sempre se fizeram presentes demonstrando carinho e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me direcionar para os bons caminhos;

Aos meus pais que sempre me incentivaram e ajudaram a buscar meus ideais;

A minha tia Lourdes que, assim como meus pais, apoiou e aconselhou em minhas decisões;

Aos meus irmãos e aos amigos pelo estímulo, a alegria que me proporcionam, pelas caronas, conversas e desabafos mesmo que distantes fisicamente. Em especial a grandes amigas que foram fundamentais durante minha passagem por Porto Alegre: a Julita, a Crizolda, a Raquelita e a Betânia;

Ao meu orientador Alexandre da Silva Rocha pelas explicações e pela ajuda em diversos momentos, direcionando-me para alcançar melhores resultados;

Ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) pelo espaço concedido;

Aos amigos que conheci e aos que já faziam parte da minha vida e fizeram aumentar minha admiração. Por toda consideração, ajuda e atenção, em especial ao meu grande amigo Diego R. Simões de Lima, ao Alexsandro de Moraes, ao Rafael Nunes e ao Fábio Knewitz que me auxiliaram nas pesquisas; lembrando também do Patrik, Cerva, Harold, Lewis, Tomáz, Luis, Jana, Marcelo, Camila;

À Empresa Gerdau pelo apoio nos projetos;

À Empresa de Simulação *Simufact - Americas* pela licença do programa, orientação e apoio no trabalho;

Ao CNPq pela bolsa de estudo;

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS _____ *VI*

LISTA DE FIGURAS _____ *IX*

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS _____ *XIII*

RESUMO _____ *XV*

ABSTRACT _____ *XVI*

1. INTRODUÇÃO _____ *1*

2. OBJETIVOS _____ *3*

2.1 Objetivo Geral: _____ 3

2.2 Objetivos Específicos: _____ 3

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA _____ *4*

3.1 Trefilação _____ 4

3.1.1. Fieira ou matriz _____ 6

3.1.2. Ângulo de trabalho _____ 10

3.1.3. Deformação _____ 11

3.1.4. Tensão e Força de Trefilação _____ 16

3.1.4.1. Ensaio de Compressão – Curva de Escoamento _____ 21

3.1.5. Atrito _____ 22

3.1.5.1. Ensaio do Anel _____ 24

3.1.6. Lubrificação _____ 25

3.1.7. Temperatura _____ 26

3.1.8. Taxa de deformação _____ 30

3.1.9. Tensões Residuais _____ 32

3.2 Sistema de Simulação Numérica _____ 35

4. PARÂMETROS DO PROCESSO *40*

4.1 Procedimento Experimental 40

4.2 Processo de Trefilação em Estudo 41

4.3 Material 41

4.4 Curva de Escoamento do Material 42

4.5 Ensaio do Anel – Obtenção do Coeficiente de Atrito (*μ*) 44

4.6 Simulação do Processo de Trefilação 45

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES *46*

5.1 Curva de Escoamento 46

5.2 Ensaio do Anel 48

5.3 Análise da Força no Processo de Trefilação e Comparação com a Simulação 49

5.4 Simulação Computacional das tensões residuais 56

5.4.1 Tensões Axiais e Difração de Nêutrons (α= 10 graus) 57

5.4.2 Tensões Axiais e Difração de Nêutrons (α= 7,5 graus) 58

5.4.3 Tensões Radiais e Difração de Nêutrons (α= 10 graus) 60

5.4.4 Tensões Radiais e Difração de Nêutrons (α= 7,5 graus) 61

5.4.5 Tensões tangenciais e Difração de Nêutrons (α= 10 graus) 61

5.4.6 Tensões tangenciais e Difração de Nêutrons (α= 7,5 graus) 62

5.4.7 Comparação dos Resultados para Diferentes Coeficientes de Atrito na Simulação (μ= 0,07 e μ= 0,1) 63

5.4.8 Simulação da Temperatura na Trefilação 65

6. CONCLUSÕES *67*

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS *69*

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS *70*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapa da trefilação propriamente dita (8) _____ 4

Figura 2: Principais etapas do processo de trefilação combinada (11) _____ 5

Figura 3: Ilustração da fieira (16) _____ 7

Figura 4: Seção transversal da fieira (1) _____ 7

Figura 5: Descrição das dimensões da fieira (2) _____ 8

Figura 6: Parâmetros geométricos que influenciam no processo de trefilação (17) _ 9

Figura 7: Deformação nos elementos da barra sendo trefilada (corte longitudinal) (1) _____ 12

Figura 8: Tipos de carregamento nas regiões da fieira (1) _____ 12

Figura 9: Exemplo de penetração e distribuição da deformação plástica com alto valor de ângulo de fieira (32) _____ 14

Figura 10: Relação do fator Δ com o ângulo de fieira (^{o}) para diversas reduções (32) _____ 15

Figura 11: Esquema de formação de trincas centrais (2) _____ 16

Figura 12: Tensões presentes na trefilação de barras cilíndricas (13) _____ 17

Figura 13: Corpo de prova entre os punções antes do ensaio de compressão ___ 22

Figura 14: Visualização da geometria inicial e após a deformação de um anel cilíndrico (42) _____ 24

Figura 15: Efeito da magnitude do atrito no escoamento do metal durante o ensaio de compressão do anel para boas e deficientes condições de lubrificação (46)___ 25

Figura 16: Sistema de um processo de deformação (53) _____ 27

Figura 17: Influência da temperatura nos resultados de tensão em um ensaio de compressão de um cilindro (52) _____ 28

Figura 18: Distribuição de temperatura de uma barra cilíndrica trefilada (2) (16) (37) _____ 29

Figura 19: Curvas de Tensão x Deformação obtidas por diferentes taxas de deformação (55). _____ 31

Figura 20: Curvas de Tensão verdadeira X Deformação verdadeira (curvas de escoamento) obtidas das equações analisadas para pequenas taxas de deformação _____ 48

Figura 21: Curvas de calibração do atrito pelo ensaio de compressão do anel. Material: aço AISI 1045. _____ 49

Figura 22: Força (kN) de trefilação ($40s^{-1}$) _____ 52

Figura 23: Força (kN) de trefilação para baixas taxas de deformação _____ 54

Figura 24: Comparação entre os resultados de força encontrados para altas e baixas taxas de deformação' _____ 55

Figura 25: Resultado de Força (kN) na simulação com a variação de semiângulo e coeficiente de atrito 56

Figura 26: Tensões Axiais- α=10° (Difração de Nêutrons (11) e Simulação) 58

Figura 27: Tensões Axiais- α=7,5° (Difração de Nêutrons (11) e Simulação) 60

Figura 28: Tensões radiais- α=10° (Difração de Nêutrons e Simulação) 61

Figura 29: Tensões radiais- α=7,5° (Difração de Nêutrons e Simulação) 61

Figura 30: Tensões transversais- α=10° (Difração de Nêutrons (11) e Simulação) 62

Figura 31: Tensões transversais- α=7,5° (Difração de Nêutrons (11) e Simulação) 63

Figura 32: Direção Axial e 2α=20 graus 64

Figura 33: Direção Axial e 2α=15 graus 65

Figura 34: Temperatura (^{o}C) 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de η_{def} típicos de trefilação _____ 20

Tabela 2: Composição Química do Material (%)_____ 42

Tabela 3: Valores com as características do Aço 1045 _____ 42

Tabela 4: Equações de resistência ao escoamento para taxas de deformação de 0,3 s^{1} _____ 47

Tabela 5: Equações de resistência ao escoamento para taxas de deformação de 40 s^{-1} _____ 47

Tabela 6: Semiângulo ideal _____ 50

Tabela 7: Força (kN) de Trefilação (altas taxas de deformação) _____ 52

Tabela 8: Força de trefilação para baixas taxas de deformação_____ 53

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

σ_e= *Tensão de escoamento (MPa= N/mm^2)*

$\overline{D}$= *Diâmetro médio (mm)*

$\dot{\varphi}$= *Taxa de deformação (s^{-1})*

$\overline{\sigma}$ = *Tensão efetiva (MPa)*

μ= Coeficiente de atrito

2D= Duas dimensões; Bidimensional.

2α= Ângulo da região de trabalho na fieira (^{o})

2β = Ângulo da região de entrada na fieira (^{o})

2γ= Ângulo da região de saída da fieira,

A_1= *Área final (mm^2)*

A_{inst}= *Área instantânea (mm^2)*

A_o= *Área inicial (mm^2)*

c= Calor específico (cal/g ^{o}C)

CP= Corpo de prova

D= Diâmetro (mm)

D_1= *Diâmetro final (mm)*

D_o= *Diâmetro inicial (mm)*

E= Módulo de elasticidade (MPa)

F= Força de trefilação (N)

F_{ef}= *Força efetiva (considerando o atrito)*

F_{id}= *Força ideal (sem efeito do atrito)*

F_{inst}= *Força instantânea (N)*

h_1= *Altura final (mm)*

Hc= Altura de calibração na fieira

h_{inst}= *Altura instantânea (mm)*

h_o= *Altura inicial (mm)*

k= C= Coeficiente de resistência (MPa)

$k_f = \sigma_y$= *Tensão de escoamento (MPa)*

k_{fm}= *Tensão/Resistência ao escoamento média (MPa)*

k_w= Resistência à conformação (com o efeito do atrito)

L= Comprimento (mm)

L_r= Comprimento de redução no passe da fieira (mm)

LVDT= Linear variable differential transformer

MEF= Método de Elementos Finitos

n= Coeficiente de encruamento

ø= Fator de deformação redundante

PERC = Polimento final por rolos cruzados

R.B.= Referência bibliográfica

R= Raio entre α e L (^{o})

r= Redução em área (%)

υ= Velocidade do processo (mm/s)

V= Volume do material deformado (mm^3)

W_{tot}= Trabalho de deformação (ensaio de compressão)

α= Semiângulo da fieira (^{o})

$\alpha_{ótimo}$= Semiângulo ideal (^{o})

Δ= Parâmetro delta

Δδ= ΔT= Variação da temperatura (^oC)

ε_A= Deformação relativa em área; Deformação logarítmica (%)

η_{def}= Eficiência ou rendimento de deformação

ρ= Massa específica; densidade (kg/mm^3)

σ_1= Tensão normal principal máxima (MPa)

σ_2= Tensão intermediária (MPa)

σ_3= Tensão normal principal mínima (MPa)

σ_{inst}= Tensão instantânea (MPa)

φ_A= Deformação verdadeira ou homogênea em relação à área da barra (mm/mm)

φ_c = Deformação circunferencial (%)

φ_h= Deformação verdadeira ou homogênea em relação à altura da barra (mm/mm)

φ_l = Deformação longitudinal (%)

φ_m= Deformação média (mm/mm)

φ_r = Deformação radial (%)

RESUMO

Este trabalho objetiva fazer uma análise do processo de trefilação através do uso de simulação computacional e avaliar a influência de variáveis do processo como lubrificante (coeficiente de atrito) e ângulo de fieira, bem como, verificar a eficácia da simulação na previsão de força, de temperatura e das tensões residuais. Foi realizado um trabalho experimental que envolveu a determinação do coeficiente de atrito através do ensaio do anel e a determinação das curvas de escoamento que foram retiradas de amostras trefiladas de um processo real. Efetuaram-se os cálculos das tensões do processo usando dados de curvas de escoamento e equações da literatura, posteriormente realizaram-se simulações computacionais que foram comparadas aos resultados obtidos através dos cálculos. Também se usou, adicionalmente, a simulação otimizada para avaliar as tensões residuais a fim de averiguar estes resultados de tensões residuais, comparando-os com resultados experimentais obtidos via difração de nêutrons para as mesmas barras que foram extraídas do processo industrial. Observou-se que a curva de escoamento do material é determinante para a obtenção de resultados confiáveis. A simulação foi boa para a estimativa da força, mas ainda apresenta limitações quanto à previsão de tensões residuais.

Palavras - chave: Método de Elementos Finitos, Tensões Residuais, Força de Trefilação, Temperatura, Aço AISI 1045.

ABSTRACT

Title: Parameters Analysis of the Drawing of AISI 1045 Steel Rods via FEM

This paper aims to analyze the drawing process using simulation and evaluate the influence of process variables such as lubricant (friction coefficient) and angle of die as well as verify the effectiveness of simulation to preview the drawing force, temperature and residual stresses. Experimental work was carried out involving the determination of friction coefficient by means of the ring test and determination of flow curves by compression tests. The calculations of the stress of the process using data from the flow curves and equations from the literature have been carried out. Later on the experimental results were compared to the simulated results. It was also used in addition, the optimized simulation to evaluate the residual stresses and the results were then compared with experimental results obtained by neutron diffraction for the same bars that were extracted from the industrial process. The results are very influenced by the flow stress curve chosen. The simulation was satisfactory for the estimation of the drawing force but must be improved for a better estimation of residual stresses.

Keywords: Finite Element Method, Residual Stresses, Drawing Force, Temperature, AISI 1045 Steel.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de conformação estão se modernizando cada vez mais e necessitando de continuidade nas pesquisas em relação aos parâmetros, variáveis de processo e suas influências no produto acabado. A finalidade é reduzir os custos de fabricação, evitando perdas de matéria-prima com produtos que não atendem as especificações. Ao acompanhar a evolução da concorrência e as exigências dos consumidores, direcionam-se estudos para obtenção de produtos de alta qualidade a baixos preços.

A busca por métodos rápidos, eficientes e de menor custo faz com que, às vezes, os produtos finais não tenham propriedades satisfatórias. No processo de trefilação, um dos grandes problemas enfrentados pela indústria metal-mecânica é ocasionado por distorções dimensionais e falhas de componentes em serviço, que podem estar diretamente ligadas às tensões residuais (1).

A trefilação é um processo de conformação mecânica geralmente utilizada para a produção de fios, barras e tubos. Caracteriza-se sempre pelo tracionamento da matéria prima através de uma matriz que lhe confere a geometria e dimensões especificadas. Associado ao efeito benéfico do aumento de resistência mecânica pelo encruamento há, simultaneamente, os problemas causados pela deformação heterogênea do material metálico (2).

Tensões residuais ou internas são as tensões presentes em um componente na ausência de cargas externas ou gradientes de temperatura (3). Estas tensões estão em equilíbrio para o corpo e são decorrentes de toda a história de processamento do material. As tensões residuais vão sendo acumuladas no componente como consequência dos processos de fabricação. Estas representam um risco (em potencial) de distorção, pois quando liberadas por processos termomecânicos, durante as próximas etapas do processo de manufatura, podem

levar a mudanças de forma e dimensão do componente. Este potencial de distorção, não é só representado pelas tensões residuais, mas também pela microestrutura, distribuição de inclusões, textura, geometria e é modificado e transferido durante as etapas de fabricação (4).

A área da simulação numérica no processo de conformação dos metais desenvolve programas que apresentam como principais características a geração de resultados precisos, em tempos razoáveis e com custos computacionais aceitáveis. Sendo assim, facilita para que os projetistas de ferramentas possam prever defeitos, evitando erros importantes que possam acarretar em custos elevados para sua correção. A utilização dessa metodologia permite, além da detecção de possíveis defeitos, otimizar a geometria da peça e das ferramentas antes de qualquer investimento em ferramentas ou produção de protótipos (5).

Entre as variáveis dos processos de conformação o coeficiente de atrito é considerado importante, pois afeta diretamente o comportamento do escoamento do material (fluxo), a carga total de conformação e, consequentemente, os cálculos de tensão e deformação, além das propriedades finais do produto, podendo causar perdas de energia e desgaste prematuro de ferramentas (1). Outro importante parâmetro é a temperatura pela geração de calor decorrente da deformação, fazendo-se necessário o uso de um lubrificante que mantenha suas propriedades na faixa de temperatura do processo em questão e que, de preferência, opere também como um isolante térmico entre a peça e a ferramenta nos processos a quente (1).

Neste trabalho será avaliada, no processo de trefilação a frio de barras de aço AISI 1045, a influência do coeficiente de atrito e do ângulo de trabalho da fieira nos valores de temperatura, força de trefilação e tensões residuais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral:

Analisar a resposta da simulação numérica por elementos finitos em barras de aço AISI 1045 no processo de trefilação sob investigação (condições industriais reais) para comparar e avaliar força de trefilação, tensões residuais e temperatura diante de variáveis como lubrificante e ângulo de fieira. Também comparar as tensões residuais simuladas com as encontradas via difração de nêutrons.

2.2 Objetivos Específicos:

- Realizar o ensaio de compressão do anel com dois lubrificantes industriais para obter seus coeficientes de atrito;
- Realizar o ensaio de compressão no material para encontrar a equação que representa a curva de escoamento e pesquisar na literatura outras representações da curva de escoamento para o aço AISI 1045;
- Simular o processo de trefilação de barras de aço utilizando a equação que fornece o banco de dados do *software*;
- Comparar os resultados de força adquiridos através da simulação computacional com as forças calculadas manualmente através de equações de curva de escoamento da literatura e do ensaio de compressão;
- Comparar as tensões residuais da simulação com os valores encontrados pelo método de difração de nêutrons;
- Verificar a variação de temperatura no processo;
- Analisar a influência de parâmetros do processo (semiângulo de fieira, coeficiente de atrito) nos resultados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Trefilação

Os produtos trefilados constituem uma classe de materiais acabados que são comumente usados na indústria, principalmente na automobilística. Sua aplicação mais comum é na obtenção de eixos de diversos tipos, hastes para válvulas de bombas e amortecedores, além de arames, fios, tubos, dentre outros (6).

O processo de trefilação é um dos mais antigos e mais importantes na fabricação de produtos metálicos contínuos de diversas geometrias. O processo de trefilação ocasiona uma redução em área e um aumento no comprimento, porém mantendo o volume do corpo inalterado (7).

Independente do tipo de produto obtido, a trefilação caracteriza-se sempre pelo tracionamento do produto trefilado (barra, fio ou tubo) através de uma matriz/fieira (Figura 1) que lhe confere a geometria e dimensões especificadas (2).

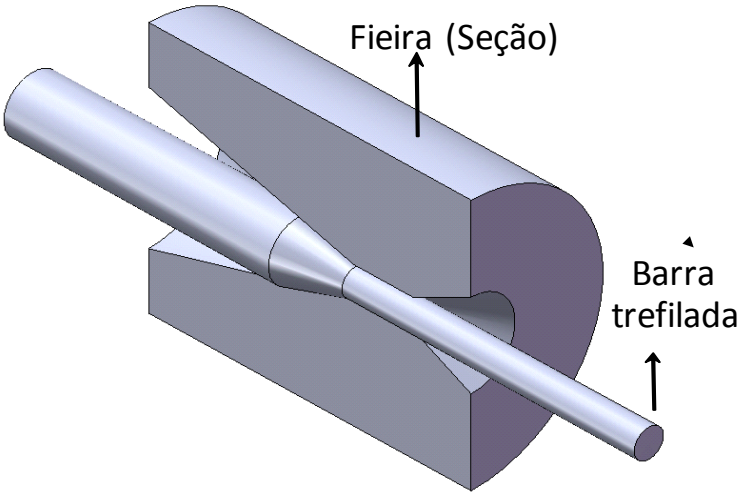


***Figura 1: Etapa da trefilação propriamente dita* (8)**

O material a ser trefilado tem normalmente sua extremidade apontada para facilitar a passagem pela fieira (por torneamento, martelamento rotativo ou outro processo (9)), sendo esta presa por garras de tração para puxar o material a fim de adquirir o diâmetro desejado. Como materiais iniciais do fio máquina, utilizam-se peças pré-formadas por laminação, extrusão ou por trefilação (10). A força de conformação dá origem a uma força de compressão na parede da fieira em virtude do inevitável atrito entre a peça e a ferramenta (9).

O processo de trefilação em estudo neste trabalho compõe o processo conhecido como trefilação combinada que objetiva a conversão de fio-máquina de aço em barras retas de seção cilíndrica com boas propriedades mecânicas. A trefilação combinada (Figura 2) é composta de várias etapas e dentre as principais características estão a alta produtividade aliada ao alto grau de automação no maquinário. As principais etapas do processo de trefilação combinada são: preparação dos rolos de fio-máquina, pré-endireitamento horizontal, pré-endireitamento vertical, jateamento com granalhas, trefilação, endireitamento horizontal, endireitamento vertical, operação de corte, endireitamento e polimento final por rolos cruzados ("*PERC*"), operações de controle de qualidade e enfeixamento. O material de partida é um fio-máquina laminado a quente e fornecido em forma de bobina (11).

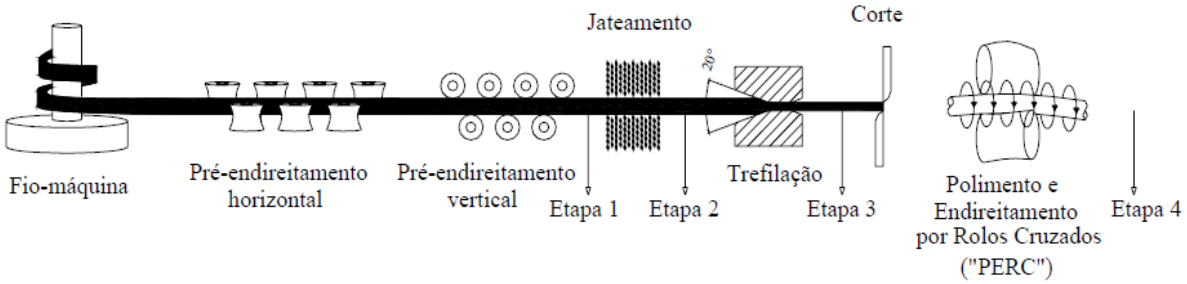


***Figura 2: Principais etapas do processo de trefilação combinada* (11)**

Por ser um processo que ocorre na maioria das vezes à temperatura ambiente, a trefilação permite uma excelente superfície final e controles dimensionais obtidos em produtos não planos com seção constante (2) (9) (12).

Para ocorrer a trefilação, é necessário analisar os parâmetros que influenciam no resultado final do material, pois associado ao efeito benéfico do aumento de resistência mecânica, há simultaneamente os problemas causados pela distorção interna do material metálico com tensões residuais, a perda da ductilidade e a queda da resistência (13).

A ductilidade é uma propriedade que indica a capacidade do material sofrer grandes deformações permanentes numa determinada direção sem ocorrer ruptura, representando a maior ou menor possibilidade do material ser alongado. Na trefilação ocorre a redução da ductilidade, devido à deformação plástica que ocorre no processo, e leva ao encruamento do material. A partir de determinados limites de deformação, específicos para cada material, é necessário um tratamento térmico de recozimento a fim de obterem-se maiores reduções do produto, visando uniformizar a microestrutura do material e recuperar a ductilidade diminuída ao longo do encruamento sofrido durante a trefilação (14).

3.1.1. Fieira ou matriz

A fieira (Figura 3) é uma ferramenta cilíndrica que contém um furo no centro com o formato de um funil por onde passa o material e cujo diâmetro vai diminuindo. Como a fieira é cônica, existe uma relação entre o ângulo de entrada e o de saída, ou seja, o ângulo de entrada é geralmente maior que o ângulo de trefilação para permitir que haja uma melhor penetração do lubrificante **(15)**.

A fieira, principal ferramenta de trefilação, apresenta para a grande maioria dos processos a geometria representada de modo simplificado na Figura 4 (13)**.**

Podem ser observadas quatro regiões na matriz (1) (13):

1) A região de entrada (2β) promove o guiamento da barra de matéria-prima e tem por finalidade auxiliar na lubrificação da barra, garantindo que o lubrificante seja arrastado para dentro da região de deformação
2) Na região de trabalho (2α) ocorre deformação plástica do material, ou seja, acontece a redução do diâmetro da barra;
3) A zona cilíndrica ou a região de calibração (Hc) responsável pelo controle dimensional do produto e pelo aumento da vida útil da fieira;
4) A região de saída (2γ), na qual o produto sofre a recuperação elástica devida ao término dos esforços compressivos. Esta região evita uma abrasão adicional entre fieira e arame proveniente de algum desalinhamento.

***Figura 3: Ilustração da fieira* (16)**

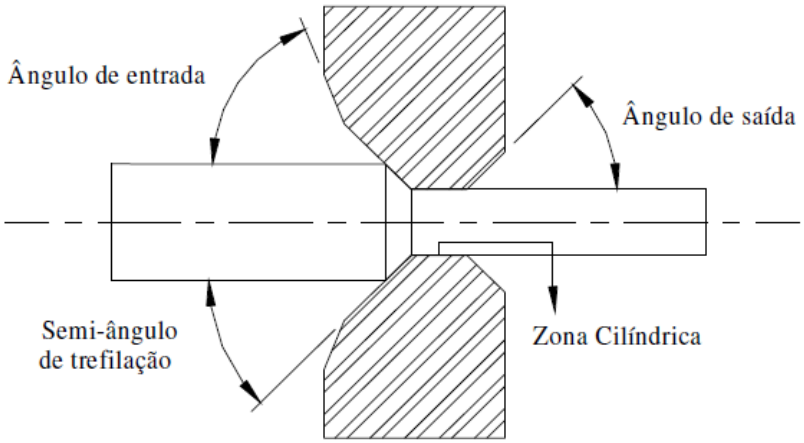


***Figura 4: Seção transversal da fieira* (1)**

Na Figura 5 tem-se uma representação do processo de trefilação de barras, destacando-se as seguintes áreas (2) (1) (15):

a) Cone de entrada: auxilia a passagem do lubrificante ao ângulo de trabalho;
b) Região de trabalho: tem a função de reduzir a seção transversal do material (deformação plástica). Devido à compressão que o material recebe é uma região que precisa de uma boa lubrificação para minimizar o atrito, e consequentemente, o desgaste da fieira;
c) Região de calibração: ocorre o ajuste do diâmetro do material, o controle final do diâmetro do material trefilado para amenizar possíveis distorções e garantir um melhor acabamento superficial.
d) Cone de saída: evita o desalinhamento na saída, impedindo que a região cilíndrica quebre. O produto sofre a recuperação elástica devido ao término dos esforços compressivos.

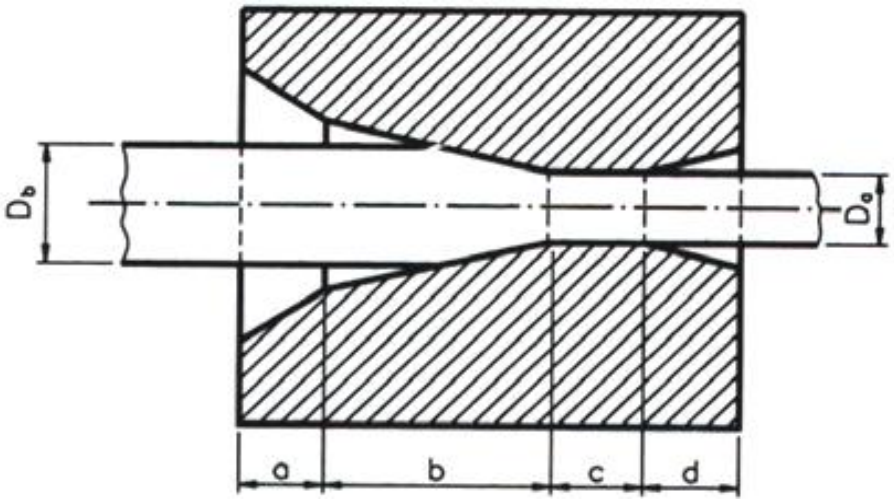
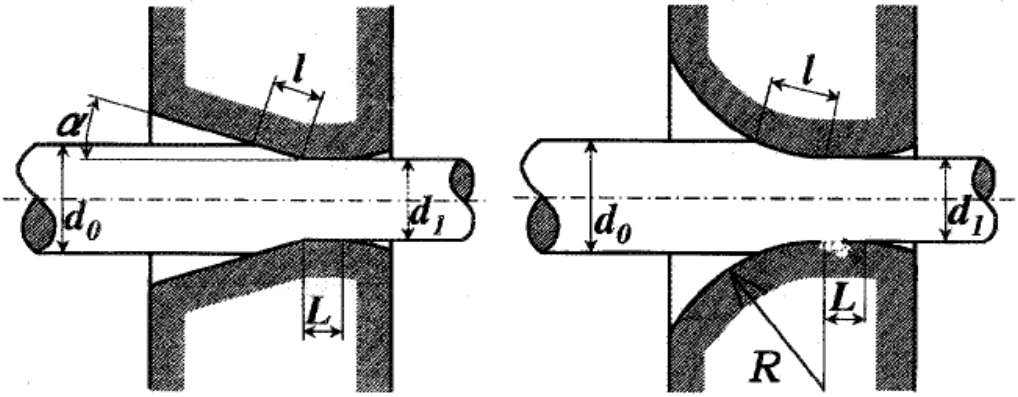


***Figura 5: Descrição das dimensões da fieira* (2)**

No processo de trefilação, as dimensões geométricas da fieira (Figura 6) mais importantes são: o semiângulo (α) da fieira, o comprimento (L) e o raio (R) entre α e L. Além disso, o coeficiente de atrito (μ), a redução em área (r), a velocidade de trefilação e a pré-tensão estão entre alguns dos inúmeros fatores de influência no

resultado (17). A geometria da fieira determina as dimensões finais, a seção de área do produto trefilado e a redução de área (12).



(A) Tipo de fieira angular **(C) Tipo de fieira circular**

Figura 6: Parâmetros geométricos que influenciam no processo de trefilação (17)

A durabilidade da fieira depende diretamente dos regimes de lubrificação presentes no processos que, por sua vez, dependem da rugosidade da ferramenta e do material a conformar, com a complicação adicional que a rugosidade da superfície do material a conformar muda no curso da deformação (18). Assim a rugosidade da peça e da ferramenta influenciam o mecanismo de lubrificação que, por sua vez, determina a rugosidade do produto acabado (18).

A matriz é fabricada com materiais de extrema resistência ao desgaste, empregando-se comumente metal duro (carboneto de tungstênio), diamante (natural ou policristalino) e também alguns materiais cerâmicos (óxido de zircônio, carboneto de titânio e/ou nitreto de titânio). O material das fieiras deve permitir a trefilação de uma grande quantidade de material sem que ocorra desgaste acentuado, resistir às altas temperaturas envolvidas no processo e permitir a adoção de elevadas reduções de seção (19) (20).

Problemas na fieira, assim como em qualquer tipo de ferramental de conformação mecânica, dificultam a implementação de controle de processo apropriado, desenvolvimento de uma produção enxuta, atender prazos cada vez mais apertados, controle de estoques e entregar produtos de qualidade. Além disso,

o custo total real de ferramentas é uma surpresa para a maioria dos executivos. Os casos extremos de fratura da fieira resultam em fratura catastrófica (21).

Os fatores que influenciam a vida útil da fieira são a velocidade de trefilação, a composição do material, a redução da seção transversal por passe e o material empregado na fabricação do núcleo da fieira (19). Por ser um dos principais componentes do processo de trefilação, aumentam-se as pesquisas sobre os fatores que influenciam a utilização da fieira e as formas de aumentar a sua vida útil (22).

3.1.2. Ângulo de trabalho

O ângulo de trabalho da fieira (2α), ou semiângulo de fieira (α), é um dos mais importantes parâmetros do processo de trefilação, devendo ser selecionado de modo a assegurar baixa tensão, boa qualidade superficial e alta durabilidade da ferramenta (23).

No ângulo de trabalho ocorre a conformação, ou seja, acontece a redução da seção do material. O ângulo de trabalho ideal, também chamado de ângulo ótimo ($2\alpha_{ótimo}$), é o ângulo para o qual a energia de trefilação é minimizada, ou seja, uma menor força de trefilação é necessária no processo (2).

A energia total de conformação depende diretamente da redução de seção e, desta forma, o ângulo ideal de trabalho também dependerá da redução imposta no processo (2).

Uma análise da literatura indica que não há um consenso bem definido sobre o ângulo ideal de ferramenta, sendo que para Dieter (24), o ângulo ideal ($\alpha_{ótimo}$) corresponde à faixa entre 10° a 14°. Além disso, há uma relação de semiângulo ótimo de trabalho da fieira, representada na (

Equação *1*), que mostra a sua influência com relação à força de conformação (25) (26) (27).

Equação 1:

$$\alpha_{ótimo} = \sqrt{1,5.\mu.\ln\frac{A_0}{A_1}}$$

Onde: μ é o coeficiente de atrito, A_o é a área inicial e A_1 é a área final.

Para melhor eficiência do processo nas reduções intensas, o ângulo da ferramenta deve ser igual ao ótimo; para menor desgaste, nas reduções pequenas, deve ser menor que o ângulo ótimo (2).

3.1.3. Deformação

A deformação é a medida da variação das dimensões de um corpo metálico causada pela aplicação de tensões mecânicas. A deformação no processo de trefilação é realizada por uma combinação de tensões trativas e compressivas que são criadas por força de tracionamento na saída da fieira e pela configuração da fieira (12).

No caso da trefilação, o metal ao passar pela zona de deformação dentro da fieira está sujeito a diferentes caminhos de deformação e, dessa forma, é passível de ter suas características de encruamento alteradas (1). A deformação sofrida por uma barra trefilada pode ser interpretada através da análise da Figura 7. Comparando a geometria de um elemento próximo à superfície da barra, antes da sua entrada na zona de deformação, e após sua passagem pela fieira é possível notar que o elemento passa por estiramento e cisalhamento. À medida que se caminha da superfície da barra para o centro, o efeito do cisalhamento torna-se menor, enquanto o estiramento se mantém, caracterizando assim uma heterogeneidade da deformação ao longo da seção transversal da barra, verificando-se que é maior a deformação interna do material trefilado. A deformação

responsável pelo estiramento da barra é uma deformação homogênea, enquanto a deformação que causa o cisalhamento é uma deformação chamada de redundante (1) (6).

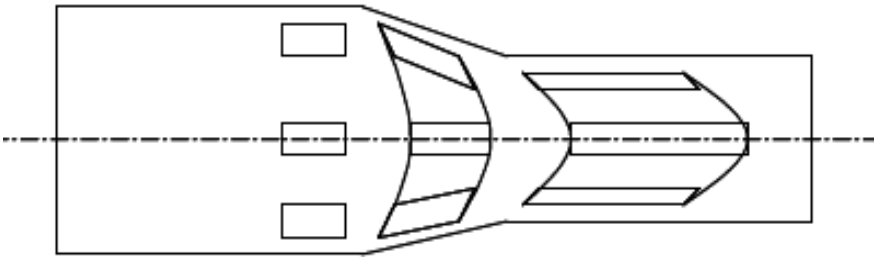


Figura 7: Deformação nos elementos da barra sendo trefilada (corte longitudinal) **(1)**

A Figura 8 ilustra o caminho de deformação redundante percorrido pelo material dentro da fieira. Na região I, o metal sofre um primeiro cisalhamento. Na região II, o metal passa a ser tracionado, cisalhado e comprimido. Finalmente, na região III, o metal sofre um último cisalhamento passando a ser apenas tracionado (1)

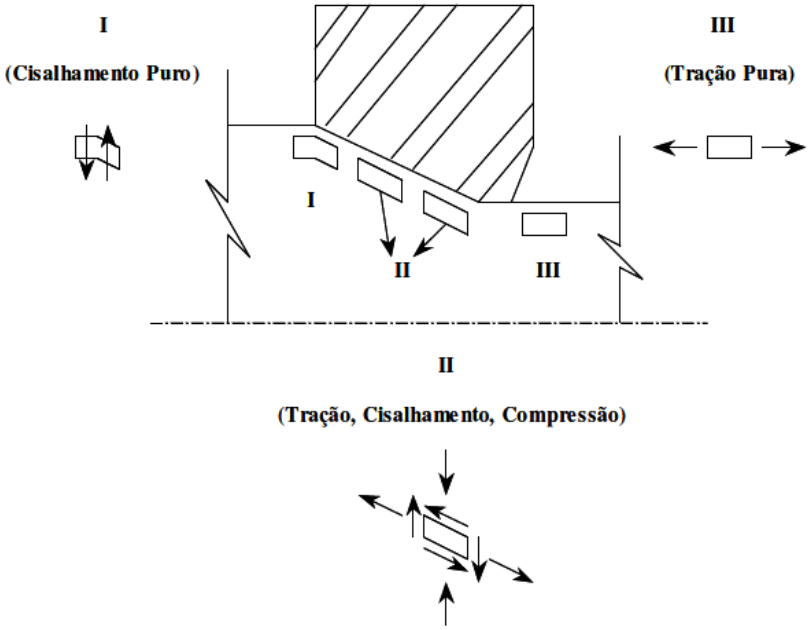


Figura 8: Tipos de carregamento nas regiões da fieira **(1)**

Devido ao atrito entre o material e a matriz, o modo de escoamento na periferia do material trefilado apresenta uma velocidade menor que a velocidade das regiões próximas ao eixo da barra. Esse perfil de velocidade pode levar à formação do defeito denominado *chevron* caso não sejam adotadas condições adequadas de redução de área e de lubrificação (2). Além disso, estas diferenças de deformação levarão ao aparecimento de tensões residuais no material trefilado.

A deformação relativa em área é usualmente utilizada para definir a quantidade global de deformação sofrida pelo material e pode ser calculada pela Equação 2 (28).

Equação 2:

$$\varepsilon_A = \frac{A_o - A_1}{A_o}$$

O cálculo das deformações na trefilação de barras circulares tem sido realizado pela deformação média (1). Analiticamente (10) (29) (30), a deformação média φ_m é fornecida pela Equação 3.

Equação 3:

$$\varphi_{\mathrm{m}} = \emptyset . \varphi_{\mathrm{A}}$$

Onde φ_A (Equação 4) representa a deformação verdadeira em relação à área da barra e ø o fator de deformação redundante (Equação 5).

Equação 4:

$$\varphi_A = ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right)$$

Equação 5:

$$\emptyset = 1 + 0{,}21(\Delta + 1)$$

A Equação 6 (30) (31) apresenta o parâmetro delta (Δ), onde se observa que Δ depende somente dos parâmetros geométricos do processo (redução em área (r) e ângulo de trefilação (2α)) (6).

Equação 6:

$$\Delta = \left(\frac{\alpha_{tref}}{r}\right)\left(\left(1 + (1 - r)^{1/2}\right)^2\right)$$

A partir do parâmetro Δ pode-se estimar a natureza das tensões residuais, pois as tesões residuais dependem da forma da zona de deformação. Para pequenas regiões de contato, as deformações não penetram em uma profundidade alta no material e a tendência é que as tensões residuais se mantenham compressivas na superfície do material (Figura 9). A magnitude de Δ aumenta ou diminui de acordo com a variação do ângulo da fieira e da redução imposta, conforme mostrado na Figura 10 (32).

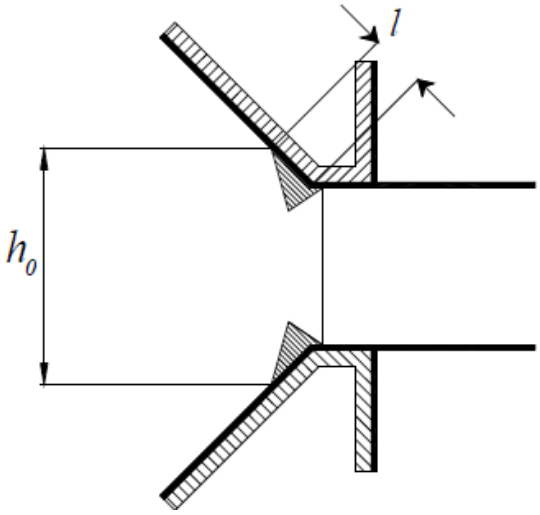


***Figura 9: Exemplo de penetração e distribuição da deformação plástica com alto valor de ângulo de fieira* (32)**

Um valor de Δ menor sugere uma zona longa de deformação e maior contato com a fieira. Isso resulta em trabalho por atrito excessivo e geração de calor que exigem melhor lubrificação e menor coeficiente de atrito. Porém, esses valores menores de Δ resultam em menor pressão na fieira, sua maior durabilidade e

promove um fluxo uniforme do metal, sendo que este melhor fluxo previne a formação de defeitos no núcleo do material. Muitos projetos comerciais de fieira incorporam uma zona de deformação com Δ ≈ 3 (Δ aproximadamente igual a 3) para minimizar a tensão de trefilação (31).

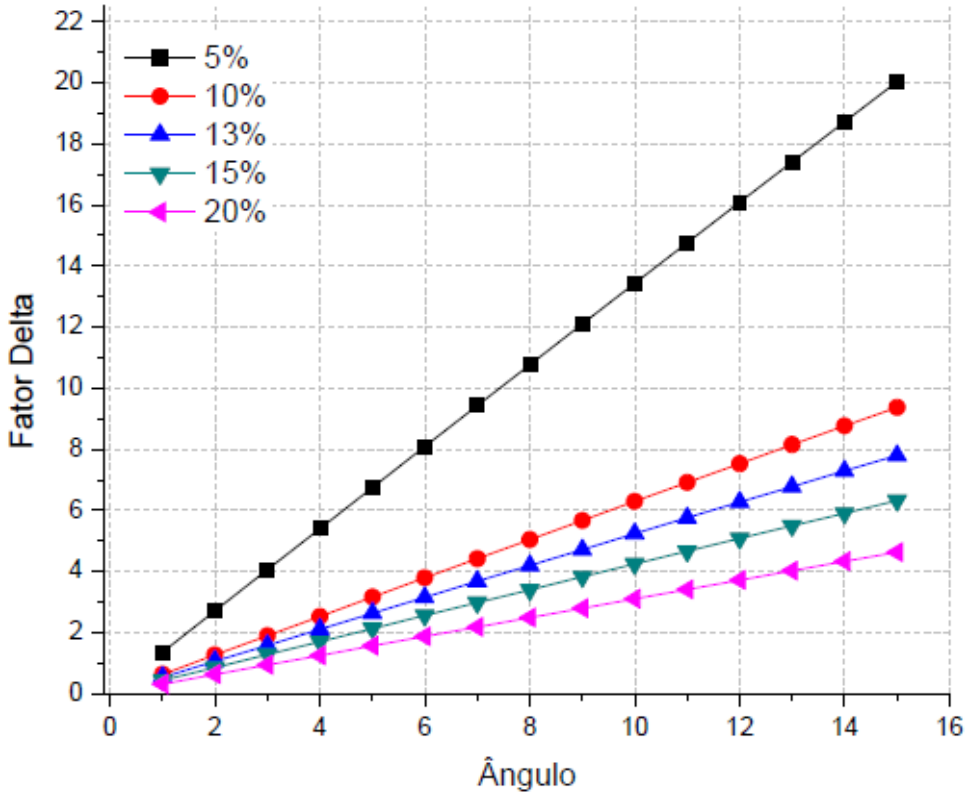


***Figura 10: Relação do fator Δ com o ângulo de fieira (°) para diversas reduções* (32)**

Quando a redução da seção transversal é pequena e o ângulo de trefilação é relativamente grande, a ação compressiva da fieira não penetra até o centro da peça. Isso ocorre tipicamente quando $\bar{D}/L_r > 2$, sendo que $\bar{D}$ corresponde ao diâmetro médio (Equação 7) e L_r corresponde ao comprimento de redução no passe da fieira. Tal situação, de deformação heterogênea, gera tensões secundárias trativas no núcleo da peça, que pode vir a sofrer um trincamento característico, em ponta de flecha, chamado de defeito chevron (Figura 11). A melhor solução é diminuir a relação $\bar{D}/L_r$, o que pode ser feito empregando-se uma fieira de menor ângulo, ou então aumentando a redução no passe com outra fieira de saída mais estreita (33).

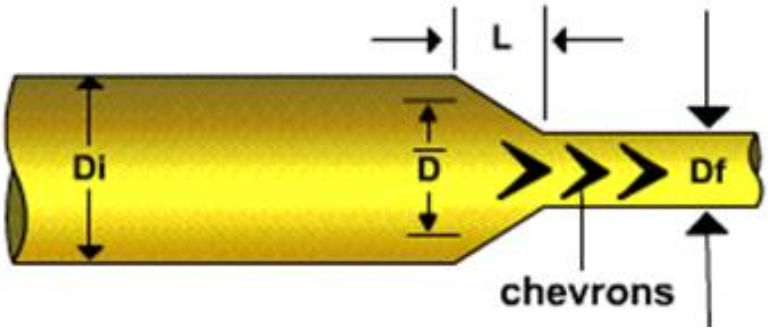


***Figura 11: Esquema de formação de trincas centrais* (2)**

Equação 7:

$$\bar{D} = \frac{D_o + D_1}{2}$$

Dependendo da redução, podem ser encontrados dois tipos distintos de distribuição das tensões residuais nas barras trefiladas. Para reduções inferiores a 1%, as tensões residuais longitudinais e as transversais são compressivas na superfície e trativas no eixo, enquanto que as tensões radiais são trativas no eixo e aproximam-se de zero na superfície. Para reduções maiores, de valor comercial, a distribuição de tensões é inversa (34).

3.1.4. Tensão e Força de Trefilação

As tensões mecânicas presentes no processo de trefilação podem ser analisadas considerando-se o esquema apresentado na Figura 12 para a trefilação de barras cilíndricas (13).

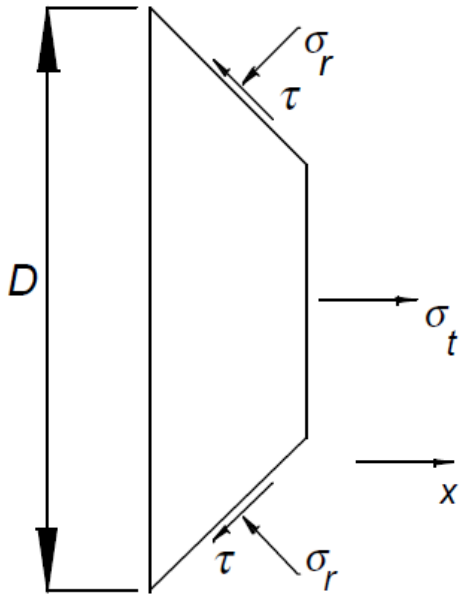


***Figura 12: Tensões presentes na trefilação de barras cilíndricas* (13)**

Podem-se definir três tensões atuantes na região de trabalho (13):

1. Tensão trativa/axial (σ_t) na direção *x* devida ao tracionamento da barra;
2. Tensões radiais compressivas (σ_r) devidas à reação da parede cônica da matriz ao movimento axial da barra;
3. Tensões transversais (τ) devido ao atrito causado pelo movimento da barra em contato com a matriz.

A tensão axial define a tensão de trefilação (σ_{tref}) e multiplicada pela área da seção transversal do produto trefilado fornecerá a força de trefilação (F_{tref}) - Equação 8 - que definirá juntamente com a velocidade de trefilação (v), qual será a potência necessária (P_{tref}) para a trefiladora (Equação 9) (13):

Equação 8:

$$F_{tref} = A.\sigma_{tref}$$

Equação 9:

$$P_{tref} = F_{tref}.v$$

Além de pesquisadores como Avitzur [1983], Bonzel [1935], Rowe [1965], Wistreich [1958], muito outros têm trabalhado no sentido de estabelecer uma relação entre força necessária para trefilação e as diversas variáveis como: geometria de ferramenta, lubrificação, temperatura e velocidade. A lubrificação, e consequentemente o atrito, é um dos principais fatores considerados (20).

No início do processo a força aumenta devido a forte resistência à deformação elástica na peça e na ferramenta, até que o material da peça começa a escoar e preenche a toda a cavidade da matriz (35). A força de conformação dá origem a uma força de compressão na parede da fieira em virtude do inevitável atrito entre a peça e a ferramenta (9).

Há uma relação de semiângulo ótimo de trabalho da fieira, representada na (Equação 1), que mostra a sua influência com relação à força de conformação (25) (26) (27) para minimizar energia e estão representadas de acordo com diferentes autores na Equação 10, Equação 11 e Equação 12.

A Equação 10 apresenta a força de trefilação conforme Pomp, Siebel e Houdremont (36) (26) (37) e a Equação 11 conforme Sachs (36):

Equação 10:

$$F = A_1 . k_{fm} . \varphi_1 \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2\alpha}{3\varphi_1}\right)$$

Equação 11:

$$F = A_1 . k_{fm} . \left(1 + \frac{1}{\mu . \cot g\alpha}\right) . \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0}\right) \mu . \cot g\alpha\right]$$

Força de trefilação conforme Koerber e Eichinger (Equação 12) (36):

Equação 12:

$$F = A_1.k_{fm}\left\{\left(1+\frac{1}{\mu.\cot g\alpha}\right).\left[1-\left(\frac{A_1}{A_0}\right)\mu.\cot g\alpha\right]+0,77\alpha\right\}$$

Os métodos desenvolvidos para o cálculo de tensões e deformações nos processos de trefilação são muito úteis, permitindo avaliar variáveis como (2):

- Distribuição de tensões internas no produto trefilado;
- Deformação e encruamento acumulados por passes sucessivos;
- Esforços de trefilação;
- Potência da trefiladora e
- Dimensionamento das ferramentas.

Esses métodos podem ser agrupados em métodos teóricos e métodos experimentais. Os métodos teóricos ainda podem ser agrupados em métodos analíticos e numéricos.

Os métodos experimentais apresentam a vantagem de fornecerem resultados mais próximos dos observados na prática industrial, mas apresentam os inconvenientes de exigirem a execução de um grande número de experimentos e serem restritos a algumas condições de processamento (geometria dos produtos, materiais trefilados, redução de seção).

Os métodos teóricos apresentam resultados mais precisos quanto maior for a sua dificuldade de desenvolvimento. Para fins de aproximação dos resultados esperados, os métodos teóricos são suficientes para a escolha dos equipamentos de trefilação e para dimensionamento das ferramentas.

Considerando-se somente a energia de deformação uniforme tem-se a seguinte expressão para a tensão de trefilação (2):

Equação 13:

$$\left(\sigma_{tref}\right)_{ideal} = \sigma_{f,m} ln \frac{A_0}{A_1}$$

$$\sigma_{f,m} = \frac{k.\varphi^n}{n+1}$$

Onde k é o coeficiente de resistência, n é o coeficiente de encruamento e φ é a deformação logarítmica (deformação verdadeira). Os valores de k e n (Equação 16) podem ser obtidos através da curva de escoamento.

Lange define essa tensão de trefilação como sendo ideal, pois não considera o atrito e o trabalho redundante. Para determinar a tensão efetiva (Equação 14) que ocorre no processo, Lange define uma eficiência de deformação η_{def} e apresenta a Tabela 1 com η_{def} para alguns processos de trefilação (2).

Equação 14:

$$\left(\sigma_{tref}\right)_{real} = \frac{\left(\sigma_{tref}\right)_{ideal}}{\eta_{def}}$$

Tabela 1 – Valores de η_{def} típicos de trefilação

Processo	r (%)	η_{def}
Trefilação de barras, arames e fios.	14	0,45 a 0,55
	40	0,65 a 0,75
Trefilação de tubos.	14	0,5
	40	0,65 a 0,75

Se for considerada também a energia devida ao atrito e a geometria da matriz, pode ser utilizada a Equação 15 (2):

Equação 15

$$\sigma_{tref} = \sigma_{f,m} \frac{1+B}{B}\left[1 - \left(\frac{D_f}{D_0}\right)^{2B}\right]$$

$$B = \mu cot\alpha$$

3.1.4.1. Ensaio de Compressão – Curva de Escoamento

Um dado importante para a aplicação do método de elementos finitos na análise da conformação de metais é a descrição do encruamento do material durante a sua deformação. Para isso, é necessário alimentar o software de simulação com uma equação representativa para obter resultados numéricos mais próximos dos encontrados nos processos de conformação de metais.

A curva de escoamento (k_f) pode ser determinada no ensaio de compressão, que é quando um corpo de prova é comprimido entre placas, também chamadas de punções (Figura 13), até que ocorra o escoamento do material (9). Neste ensaio deve se ter especial atenção com a redução do atrito, pois este desviará o estado de tensões uniaxial, necessário à correta determinação de tensão de escoamento.

Durante o ensaio, tanto os esforços quanto os deslocamentos do objeto são medidos durante o ensaio e em seguida dispostos em um gráfico de tensão em função da deformação. A partir desse gráfico se obtêm uma expressão matemática da curva de escoamento ou de fluxo do material, representando o comportamento do material na região plástica. Existem diferentes modelos matemáticos a fim de se descrever numericamente as curvas de escoamento, um deles é a equação de Ludwik Holomon (Equação 16).

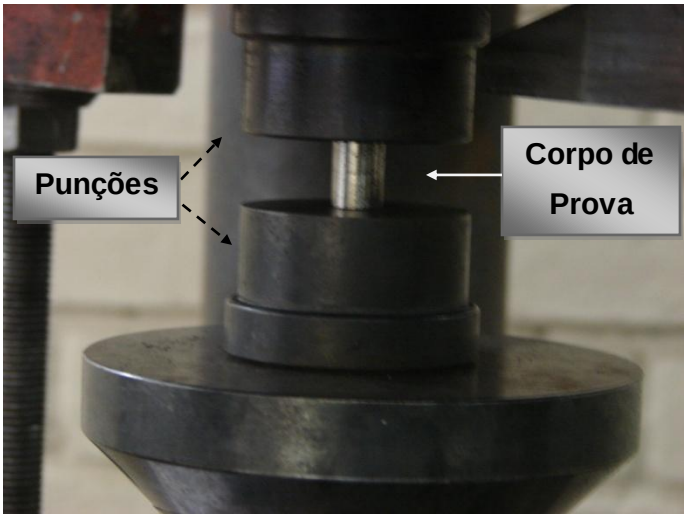


Figura 13: Corpo de prova entre os punções antes do ensaio de compressão

Equação 16:

$$k_f = C.\varphi^n$$

Onde:

C= coeficiente de resistência; que é associado ao nível de resistência que o material pode suportar.

n= coeficiente de encruamento; que é a capacidade com que o material distribui a deformação. Quanto maior n, maior a capacidade do material se deformar sem que ocorra a estricção.

3.1.5. Atrito

Define-se atrito como a resistência ao movimento relativo de dois corpos em contato direto. Em processos por conformação, esse movimento ocasiona deformações plásticas, aquecimento e desgaste, podendo resultar em perda de eficiência (20).

Na conformação mecânica dos metais, o atrito está presente em todos os processos, sendo geralmente considerado nocivo, mas é prejudicial se alcançar valores muito altos, pois (20) (29) (38):

- Alteração, geralmente desfavorável, dos estados de tensão necessários para a deformação;
- Produção de fluxos irregulares de metal durante o processo de conformação;
- Aparecimento de tensões residuais no produto;
- Elevação da temperatura do material em níveis capazes de comprometer as propriedades mecânicas;
- Aumento do desgaste das ferramentas;
- Aumento do consumo de energia necessária à deformação;
- Reduz a qualidade do acabamento superficial da peça.

Tais condições dependem basicamente do tipo de lubrificação adotada. No processo, é essencial que o calor gerado seja extraído, especialmente para altas velocidades de trefilação. Se isso não for feito, o lubrificante estará falhando e as propriedades do produto trefilado sofrerão danos (39) (12).

O atrito pode ser determinado através de duas formas distintas (40):

a) Método de medição direta: consiste em medirem-se, através de extensômetros, as tensões de cisalhamento de atrito e a tensão normal na superfície de contato entre o corpo de prova e as matrizes. Este método possibilita o conhecimento direto das tensões e do coeficiente de atrito em pontos específicos da matriz. Desta forma pode-se fazer uma avaliação do comportamento do coeficiente de atrito ao longo de uma superfície. Sua desvantagem está no grau de complexidade dos dispositivos e equipamentos exigidos.

b) Método de medição indireta: Pode ser realizado de diferentes formas, sendo que o emprego destas depende do conhecimento das variáveis do processo, para que a escolha do método possa representar e simular suas reais condições. O método do anel é muito conhecido e aplicado para determinação do coeficiente de atrito, em condições de deformação plástica, que consiste na deformação de corpos de prova em forma de anéis com superfícies planas e com medidas padronizadas.

3.1.5.1. Ensaio do Anel

O ensaio de compressão do anel é um método experimental utilizado para a determinação de condições de atrito nos processos de conformação mecânica. Foi inicialmente proposto por Kunogi, em 1956, e então, desenvolvido por Male e Cockcroft entre 1964-1965 (12) (41). O ensaio propicia uma avaliação qualitativa sendo possível quantificar o atrito quando associado a modelos matemáticos.

A técnica do teste do anel consiste em uma compressão de anéis cilíndricos (Figura 14) e medição da porcentagem de variação da altura em função da porcentagem de variação do diâmetro interno.

***Figura 14: Visualização da geometria inicial e após a deformação de um anel cilíndrico* (42)**

Realizando-se sucessivas deformações na altura para um dado material de trabalho e condições específicas de lubrificação, é possível obter curvas de calibração para o atrito. A geometria de anel mais usual é a que respeita a

proporção 6:3:2, onde o primeiro número denota o diâmetro externo; o segundo número o diâmetro interno e o último corresponde a altura do anel (43).

Se o atrito for zero, o anel deforma-se como um disco sólido, com cada elemento fluindo radialmente para fora em uma taxa proporcional a sua distância ao centro. Quando existe atrito na interface, a deformação dos diâmetros externos e internos diminui, podendo ocorrer uma redução do diâmetro interno. Sendo que o decréscimo do raio interno é mais acentuado quando o atrito é elevado (Figura 15) (43) (44).

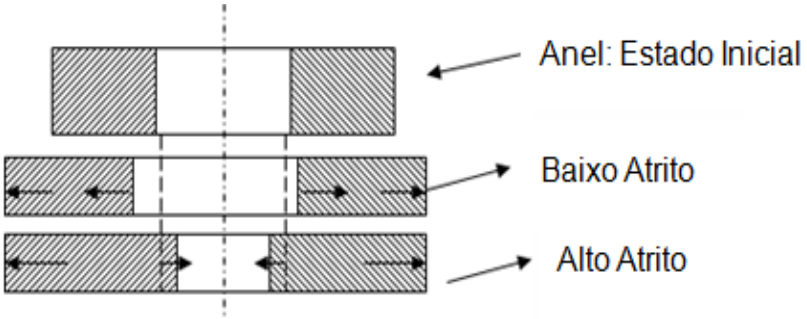


Figura 15: Efeito da magnitude do atrito no escoamento do metal durante o ensaio de compressão do anel para boas e deficientes condições de lubrificação (45)

Têm-se encontrado muitas dificuldades no estudo do atrito e o que se faz é definir alguns modelos de atrito e realizar ensaios simplificados de fabricação para determinar coeficientes de atrito relativos às condições de processamento próximas àquelas encontradas nos processos de conformação (46). A literatura informa que coeficiente de atrito de Coulomb para trefilação de barras de aço, situa-se em torno de 0,1 (47).

3.1.6. Lubrificação

O objetivo principal do emprego de lubrificantes em processos de deformação plástica, nos quais sua utilização é possível, é o de evitar que as superfícies da ferramenta e da peça-trabalho entrem em contato, diminuindo-se assim o atrito entre as superfícies e o desgaste. A eficiência do lubrificante está relacionada à sua

capacidade de formar uma película estável sob as condições de processo, que previna o contato entre as superfícies (2).

Se na interface de dois materiais é colocado um elemento com resistência ao cisalhamento menor que a dos materiais em contato, diz-se que há lubrificação (20):

No caso específico da trefilação o lubrificante deve satisfazer as seguintes propriedades (20):

- Ser capaz de manter separadas a superfície da fieira e do material trefilado durante todo o processo de trefilação;
- Manter-se estável perante a mudança de temperatura;
- Não reagir quimicamente com as superfícies metálicas;
- Manter limpas as superfícies lubrificadas;
- Ser de fácil remoção da superfície do produto nas operações de acabamento.

Superfícies com ranhuras paralelas à direção de escoamento permitem uma maior possibilidade de fuga do lubrificante, se comparado às ranhuras perpendiculares. Assim, a rugosidade do material influencia o mecanismo de lubrificação e, consequentemente, a rugosidade do produto (18).

A escolha correta do lubrificante é uma das grandes dificuldades existentes em qualquer processo. Esta escolha se baseia em parâmetros como os materiais usados na ferramenta e na peça, a temperatura e a velocidade do processo. Para se determinar o melhor sistema de lubrificação não se deve basear somente em fatores técnicos, mas principalmente em fatores econômicos (48).

3.1.7. Temperatura

O calor gerado na conformação (Figura 16 e Figura 18) possui duas fontes principais: uma está associada ao trabalho de deformação e outra ao coeficiente de

atrito entre o material e a fieira. A quantidade de calor do trabalho de atrito depende fortemente dos ângulos da fieira (23).

A energia despendida para deformar plasticamente o material durante a conformação mecânica é convertida quase que inteiramente em calor, esta energia que aumenta a temperatura do componente/material a ser conformado e das ferramentas, também é dissipada ao ambiente (49). Na deformação plástica de um metal, apenas 5 a 10% ficam acumuladas na rede cristalina sob a forma de energia interna, sendo o restante (90 a 95%) convertido em calor (50) (37), ou seja, num processo isento de atrito cerca de 95% do trabalho de deformação é convertido em calor, levando a aumento de temperatura (51).

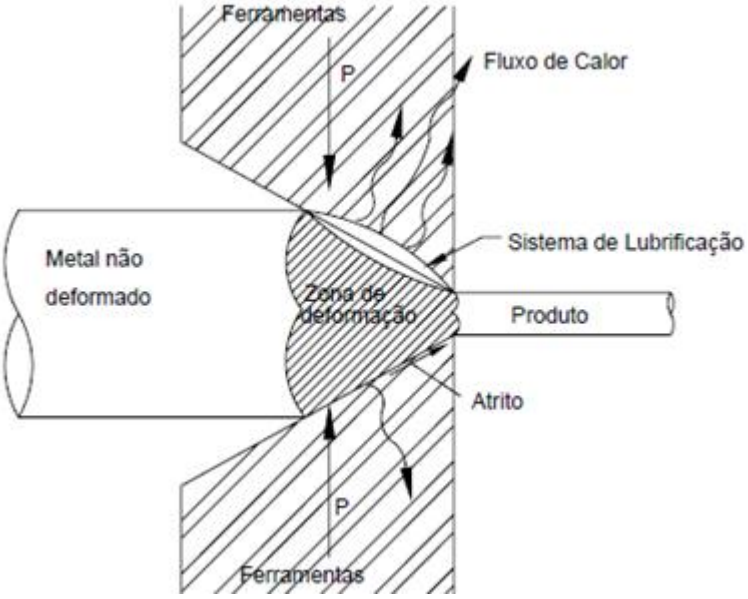


Figura 16: Sistema de um processo de deformação (52)

Em algumas operações de conformação contínua, como extrusão e trefilação (efetuadas em altas velocidades), a temperatura pode aumentar em centenas de graus. Uma parte do calor gerado é dissipada (transmitido às ferramentas ou perdido para a atmosfera), mas o restante permanece na peça, elevando a temperatura (50).

Altas velocidades de processo modificam as condições de deformação, as condições de lubrificação, e, portanto de atrito, e provocam alterações nas temperaturas do material trefilado. Nesse caso, podem ocorrer modificações

sensíveis na estrutura e nas propriedades mecânicas (Figura 17), tendendo a um aumento da oxidação, de perda de materiais e possíveis mudanças estruturais. (20). Quanto maior o volume de material deformado, menor é a influência do atrito no aumento global da temperatura (51).

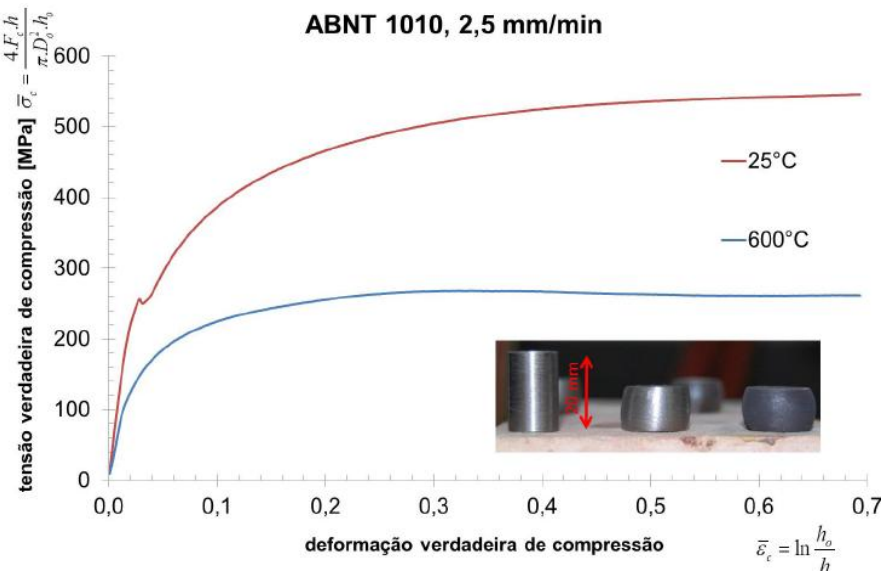


***Figura 17: Influência da temperatura nos resultados de tensão em um ensaio de compressão de um cilindro* (51)**

O cálculo da variação de temperatura na Equação 17 não considera os efeitos da taxa de deformação nem da extração de calor pelo lubrificante ou por um sistema de resfriamento qualquer. Aparentemente um aumento na taxa de deformação reduz a transferência de calor para a matriz, mas também pode diminuir a eficiência do lubrificante e/ou do sistema de refrigeração utilizado. Como as deformações não são homogêneas no material trefilado, a distribuição de temperatura também não o será (Figura 18) (16) (2).

***Equação 17* (36):**

$$\Delta\vartheta = \frac{k_f.\varphi_{eq}}{c.\rho}$$

φ_{eq}= deformação equivalente
k_f= tensão de escoamento (N/mm^2)
c = calor específico do material
ρ = peso específico (kg/mm^3)

Equação 18:

$$\varphi_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}.(\varphi_r^2 + \varphi_c^2 + \varphi_l^2)}$$

φ_r corresponde à deformação verdadeira radial (Equação 19), φ_c à deformação verdadeira circunferencial (Equação 19) e φ_l á deformação verdadeira longitudinal (Equação 20).

Equação 19:

$$\varphi_r = \varphi_c = ln\frac{r_1}{r_o}$$

Equação 20:

$$\varphi_l = \varphi_A = ln\frac{r_o^2}{r_1^2}$$

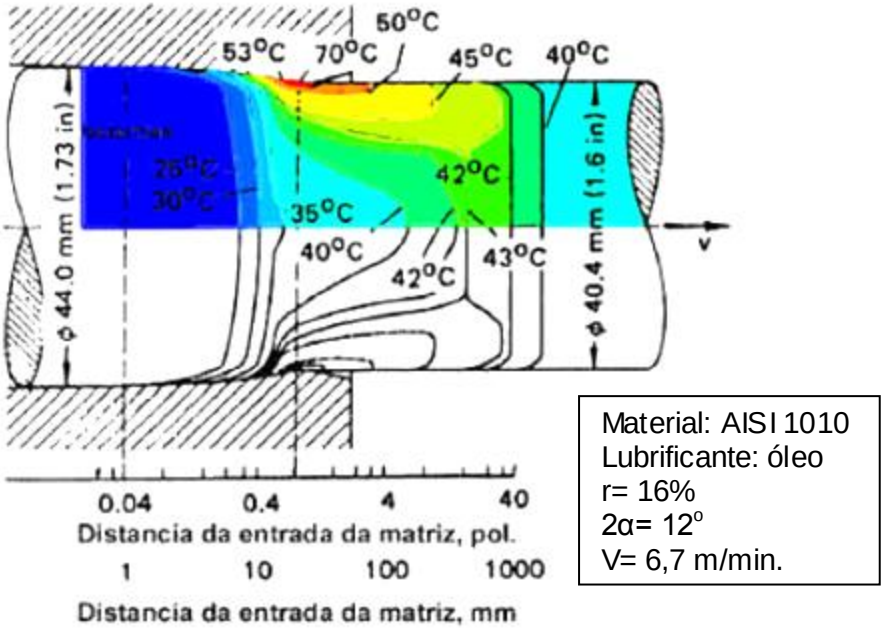


***Figura 18: Distribuição de temperatura de uma barra cilíndrica trefilada* (2) (16) (37)**

Outras referências bibliográficas utilizam para o cálculo da variação de temperatura a Equação 21 (37) (2) ou a Equação 22 (53).

Equação 21:

$$\Delta T = \sigma_{f,m} ln \frac{A_o}{A_1}\left(\frac{1}{c\rho}\right)$$

***Equação 22*:**

$$\Delta T = \left[\frac{k}{\rho c(n+1)^2}\right]\left[\left\{ln\left(\frac{1}{1-r}\right)\right\}^{n+1}\right]\left\{\left(1+\frac{tan\ \alpha}{\mu}\right)\left[1-\left(\frac{A_f}{A_0}\right)^{\mu cot\alpha}\right]+\frac{4\alpha^2}{3\sqrt{3}}\left(\frac{1-r}{r}\right)\right\}$$

3.1.8. Taxa de deformação

O valor da taxa de deformação ($\dot{\varphi}$), que é a variação da deformação por unidade de tempo, pode ser calculado através da Equação 23 (36).

Equação 23* (36)*:

$$\dot{\varphi} = \frac{6.v.\tan\alpha}{(d_o - d_1)\left(1+\frac{d_o}{d_1}+\frac{{d_o}^2}{{d_1}^2}\right)}.ln\left(\frac{d_o}{d_1}\right)^2$$

Sendo que: v = velocidade do processo (mm/s)

A influência da taxa de deformação pode ser verificada nos gráficos da Figura 19 obtidos de ensaios de compressão a quente de aço inoxidável duplex UNS S31803 (SAF 2205) (54).

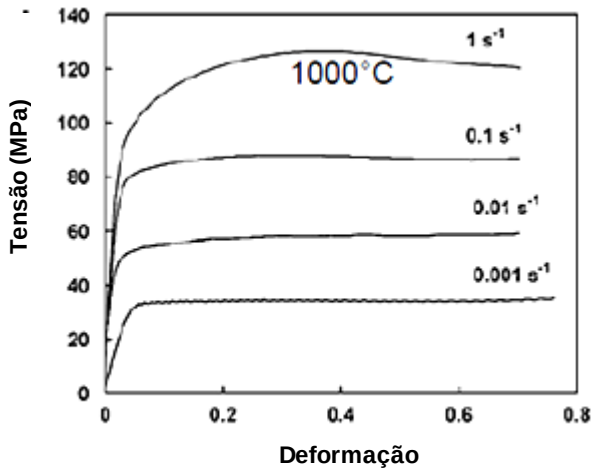


***Figura 19: Curvas de Tensão x Deformação obtidas por diferentes taxas de deformação* (54).**

Verificam-se essencialmente alguns problemas decorrentes do aumento da velocidade (14):

- O aumento da taxa de produção de calor, que afeta o desempenho do lubrificante, pela redução de sua viscosidade;
- Afetada a viscosidade ocorre uma diminuição na eficiência da separação material-matriz. Isto acarreta, entre outros, maior força de trefilação e o aumento na energia necessária;
- Têm-se também problemas no acabamento da superfície do produto acabado;
- A vida da matriz é diminuída, acarretando uma diminuição do comprimento de produto trefilado;
- Também o tempo perdido na troca das matrizes (fieiras) é aumentado, com a elevação do tempo de máquina parada.

3.1.9. Tensões Residuais

São tensões existentes em um corpo sem aplicação de forças externas (incluindo gravidade) ou gradientes térmicos (55). Podem surgir devido a não uniformidade de deformação plástica (3) (51). O sistema de tensões residuais presentes em um material sempre estará em equilíbrio (3).

As tensões residuais vão sendo acumuladas no componente como consequência dos processos de fabricação. Estas tensões representam um risco (em potencial) de distorção, pois quando liberadas por processos termomecânicos, durante as próximas etapas do processo de manufatura, levam a mudanças de forma e dimensão do componente. Este potencial de distorção (não só representado pelas tensões residuais, mas também pela microestrutura, distribuição de inclusões, textura, geometria, dentre outros fatores), é modificado e transferido durante as etapas de fabricação (4).

As tensões residuais apresentam caráter elástico (10), sendo assim, o valor máximo que estas tensões podem atingir é a tensão de escoamento do material. As tensões residuais podem ser aliviadas aquecendo o material até uma temperatura onde a tensão de escoamento do material é igual ou inferior às tensões residuais presentes no material (3). A desvantagem de utilizar tratamentos térmicos após a trefilação está em se adicionar mais uma etapa ao processo, aumentando o seu tempo e o valor do produto.

Geralmente, três tipos de tensões residuais podem ser caracterizados num sólido de acordo com sua extensão:

- Tipo I: denominado macroscópico, que se estende por vários grãos do material (56). Estas tensões inabilitam o material a manter sua dimensão durante os processos de fabricação, pois durante estes processos pode haver uma redistribuição das tensões no material, ocasionando assim, uma distorção remanescente. A formação destas tensões é causada principalmente por fatores externos, tais como efeitos de deformação plástica

não uniforme no material durante os processos de fabricação ou ainda gradientes de temperatura que causam expansões não uniformes no material. Podem ser medidas por métodos de dissecção do material, como por exemplo, *hole-drilling* e métodos de secção (*slitting*) (32);

- Tipo II: denominado microtensão estrutural, que cobre a distância de um grão ou parte de sua extensão, podendo ocorrer, por exemplo, entre duas fases do material que contêm diferentes características físicas ou até mesmo em áreas que contêm partículas, como inclusões (56). São formadas pela não homogeneidade da estrutura cristalina do material (57).
- Tipo III: Cobre várias distâncias atômicas dentro dos limites do grão numa pequena fração do material (56).

Para os processos de trefilação os fatores mais importantes a serem considerados são a transformação de forma (induzida pela deformação que afeta as propriedades na microestrutura do material) e as tensões de deformação, que também influenciarão muito nas tensões residuais do material. Outros fatores também poderão ocorrer em menor escala no processo de trefilação com menos contribuição para distorções (32).

Todos os processos mecânicos de fabricação que envolve deformação plástica, gradientes térmicos, transformações de fase, alterarão o estado de tensões residuais. Sejam elas elevadas ou não, estas tensões residuais afetarão diretamente as propriedades do material em relação à resistência a fadiga, resistência à corrosão e resistência a ruptura (58). São consequências da interação entre tempo, temperatura, deformação e microestrutura, onde as fundamentais propriedades dos materiais são dependentes da temperatura (59).

Quando presentes nos componentes, as tensões residuais podem prejudicar as propriedades do material, mas também há efeitos favoráveis nas características de resistência dependendo se elas agem na direção oposta da carga de tensão (60). Tais efeitos na maior parte dos casos são nocivos, uma vez que podem causar deformações, aumentando a velocidade das transformações de fase e de processos de corrosão (61).

Quando um componente com tensões trativas na superfície sofre carregamento de tração, este material será sobrecarregado localmente pelas tensões residuais trativas existentes na superfície do componente. O inverso ocorre quando um componente com tensões residuais compressivas na superfície sofre carregamento trativo, as tensões residuais compressivas irão subtrair as tensões trativas aumentando o desempenho deste componente em serviço.

No processo de trefilação combinada, tensões residuais estão relacionadas ao aparecimento de distorções em barras durante o processo de trefilação, ou ainda, em etapas subsequentes de processamento, como por exemplo, usinagem e tratamentos térmicos (55) (62).

As tensões residuais trativas podem provocar o início de uma trinca e, consequentemente, uma diminuição da vida ou resistência à fadiga do material. As tensões de compressão agem de maneira a aumentar a resistência à fadiga, agindo como se fossem barreiras, impedindo a nucleação e propagação das trincas (61).

Existem vários métodos disponíveis para medir tensões residuais nos materiais, dentre os quais, pode-se citar: mecânicos, ultrassom, eletromagnéticos (*Barkhausen*), difração de nêutrons, difração de raios-x, simulação computacional. Rafael Nunes (32) analisou a variação das tensões residuais em barras trefiladas de aço AISI 1048 após as etapas de fabricação, para isso utilizou o método do furo cego (*hole-drilling*), o método da flexão (*slitting*) e a difração de raios-x (61). As pesquisas abrangem análises apenas da componente axial da tensão residual ou avaliações mais completas, verificando o comportamento das componentes axial, radial e transversal em toda a seção da barra trefilada (1).

A difração de raios-X e nêutrons são baseados na medida da tensão no retículo cristalino em relação ao espaçamento interplanar de um material policristalino. O método da difração de raios-X mede as tensões residuais possui excelente precisão na medição, porém uma de suas desvantagens é o fato de só permitir a análise das tensões residuais na superfície do componente e também à portabilidade do equipamento que impedem medidas em campo. O método de difração de nêutrons

mede as tensões residuais em relação ao volume da amostra, medindo da mesma forma que o método por raios-X a medida dos espaçamentos interatômicos (3).

É importante destacar que todos esses métodos medem a deformação, ou alguma outra propriedade do material que é afetada pela presença das tensões residuais. Essa tensão é obtida relacionando a propriedade medida com as propriedades elásticas do material. As tensões residuais são quantidades tensoriais, e, portanto, devem ser descritas em três dimensões (61) (63).

O objetivo de futuros projetos serão eliminar imprevisíveis características e aplicar tensões residuais favoráveis na otimização de tecnologias de produção com correto entendimento e uma avaliação quantitativa de tensões residuais (60).

3.2 Sistema de Simulação Numérica

Na procura constante por meios que diminuam os erros no processo de fabricação, a simulação computacional é uma ferramenta que viabiliza solucionar estas dúvidas antes de colocar na prática o projeto. Com esse método, podem-se variar os parâmetros e verificar a influência destes nas características do material e das ferramentas do processo, durante e no resultado final do produto.

A busca por novas tecnologias e processos é feita para manter a competitividade e atender as expectativas do mercado, tai como (64):

- Maximizar a qualidade das peças;
- Otimizar o uso de diferentes matérias primas;
- Aumentar a produtividade;
- Minimizar o custo de fabricação;
- Reduzir o tempo para lançamento de produtos;
- Melhorar a comunicação entre os diferentes setores da empresa (engenharia, ferramentaria e produção) e seus fornecedores.

O estudo dos processos de conformação mecânica tem sido realizado através de métodos analíticos, experimentais e numéricos. Os métodos analíticos caracterizam-se por fornecerem análises mais limitadas em termos de geometria e grandezas de saída, fornecendo geralmente apenas valores de carga de conformação. Os estudos experimentais, na maioria das vezes, demandam um grande número de experimentos e um custo elevado quando comparado aos outros métodos. Dentre as análises numéricas, o método de elementos finitos tem sido amplamente utilizado por apresentar as seguintes características: possibilidade de avaliação de um grande número de geometrias de processo, maior número de informações sobre o processo (fluxo do material, distribuição de deformação e tensão, dano, entre outras), rapidez na geração dos resultados e custo relativamente baixo (65).

Sem o conhecimento da influência de variáveis, tais como, condições de atrito, propriedade do material e geometria da peça na mecânica do processo, não seria possível projetar as matrizes e equipamentos necessários adequadamente, ou prever e prevenir o surgimento de defeitos. Logo, a modelagem do processo para a simulação computacional tem sido uma grande preocupação na tecnologia de conformação metálica moderna. Prever as forças e as tensões necessárias para executar a operação de conformação é preciso para o projeto da ferramenta e para selecionar o equipamento apropriado, com força adequada e capacidade de energia para executar a operação de conformação (64).

As equações matemáticas para resolução de uma simulação e das equações para previsão de comportamento térmico, de empenamento e de contração exigem cálculos extensos. Para atender esta demanda surgiram as simulações numéricas computadorizadas (64).

Os sistemas computacionais para simulação de processos são constantemente aperfeiçoados, de maneira que permitem a obtenção de resultados precisos, reduzindo significativamente os custos de desenvolvimento de produto e o tempo de seu lançamento (64).

O método de elementos finitos é uma técnica matemática que utiliza o computador como recurso para a obtenção de soluções numéricas aproximadas, resumindo os cálculos das equações que fornecerão a resposta de sistemas físicos sujeitos a influências externas (66) (67).

A aceitação industrial de simular conformação metálica pelo MEF tem aumentado rapidamente durante recentes anos devido ao rápido avanço da tecnologia computacional e a redução do custo do computador (68).

Dentre as vantagens do MEF, pode se citar: (1)

- Capacidade de obtenção de soluções detalhadas em corpos sendo deformados (velocidade, formas, tensões, temperatura);
- Possibilidade de utilização do código elaborado em diferentes situações, bastando que os dados de entrada sejam alterados;
- Rapidez na obtenção dos resultados, quando comparado com técnicas experimentais.

Marçal, Yamada, Zienkiewicz, Kobayashi e seus respectivos colaboradores foram os primeiros investigadores a aplicarem o método de elementos finitos na resolução de problemas elasto-plásticos em deformação plana ou assimétrica. Uma década depois se desenvolveu a formulação de escoamento plástico, onde as deformações elásticas são desprezadas, o que é admissível em relação às grandes deformações plásticas que as peças sofrem durante as operações de fabricação por deformação plástica, causando polêmica, tempos depois, pois o fato de desprezar a componente elástica implica alterações na geometria final do material (principalmente quando envolvem pequenas espessuras como as chapas) e, consequentemente, nas tensões residuais. Os materiais são descritos através de leis de comportamento rígido-plásticas/viscoplásticas e as relações entre tensão e velocidade de deformação baseiam-se nas equações de *Levy-Mises* (69).

Em termos comerciais, a maioria dos pacotes de elementos finitos trabalha com duas formulações: rígido-plástica ou elasto-plástica. Na abordagem rígido-plástica, a

deformação da peça conformada é considerada apenas de ordem plástica e, para a outra abordagem, a deformação é dividida nas parcelas elástica e plástica (65).

A grande maioria dos programas atuais voltados para a solução de problemas de conformação mecânica possui algoritmos específicos, que determinam automaticamente parâmetros como número e tamanho de elementos (definição da malha) e número de incrementos (70).

Existem algumas características durante a preparação de uma simulação numérica utilizando o método de elementos finitos, como:

- FASE DE PRÉ-PROCESSAMENTO: onde são coletados os dados do material. Essa etapa compreende modelamento físico e matemático do problema em questão (70). Dentro do modelamento físico devem ser definidas as geometrias das matrizes e da peça inicial, podendo ser feitas por interface gráfica do software ou utilizando programas como o CAD, neste o desenho deverá ser importado para o software;
- PROCESSAMENTO – SIMULAÇÃO NUMÉRICA: O processamento é a etapa onde é realizado o cálculo computacional, com o problema dividido em incrementos de deslocamento, sendo realizadas iterações até atingir determinado critério de convergência para cada incremento (70);
- PÓS-PROCESSAMENTO – ANÁLISE DOS RESULTADOS: Esta etapa consiste na análise dos resultados obtidos na etapa anterior. Utilizando recursos gráficos podem-se visualizar tensões, deformações, distribuição de temperatura, fluxo de material, força. Os parâmetros podem variar de acordo com o tipo de análise (mecânica, termomecânica) ou, mais especificamente, com o tipo de software utilizado (71).

De forma resumida, pode-se dizer que o MEF trabalha da seguinte maneira: (66)

1. O domínio do problema é dividido em regiões chamadas de elementos. O conjunto de elementos é chamado de malha;
2. As equações que regem transformam-se em equações algébricas aproximadas;

3. As equações são numericamente avaliadas para cada elemento da malha e montado com base no elemento de conectividade;
4. Condições de contorno são impostas para modificar o sistema de equação; valores são adicionados aos termos registrados e/ou os termos são transferidos de um lado das equações para outro.
5. O sistema de equações é resolvido;
6. O Pós-processamento da solução fornece exposições em diferentes formas.

Em função das diversas formulações do método de elementos finitos, uma prática importante na utilização do método é verificar a proximidade dos resultados numéricos em relação aos dados experimentais do processo de conformação sendo estudado. Essa verificação indica se a formulação utilizada está apropriada para o estudo em questão ou se necessita de modificações (65).

Wang e Argyropoulos (68) estudaram um novo projeto de perfil da fieira utilizando processo de simulação, apresentando resultados de deformações uniformes na zona plástica de deformação, aumento da qualidade do produto, redução do tempo e custo de processamento. Nakagiri (9) avaliou tensões residuais em dois tipos de fieira, uma do tipo cônica e outra circular, através da simulação MEF e experimentalmente.

Embora essa formulação consiga aproximar os resultados numéricos de alguns dados experimentais, ainda existe uma diferença entre a distribuição numérica da deformação efetiva da barra trefilada em relação à mesma distribuição obtida experimentalmente. Santos (1) atribui que uma possível explicação para essa diferença seria o efeito do caminho de deformação, realizando em sua tese a simulação numérica por elementos finitos da trefilação considerando esse efeito.

Existem diversos trabalhos de autores que realizaram suas pesquisas utilizando o método de simulação computacional, tais como Schaeffer (72), Yanran (73), Elices (74), Phelippeau (75), Atienza (76) (77) (78), Walters (79), Hamada (80), Baldissera (81), Lazararev (27).

4. PARÂMETROS DO PROCESSO

4.1 Procedimento Experimental

A finalidade deste trabalho é a de realizar a simulação computacional do processo de trefilação para, posteriormente, adquirir os resultados da força de trefilação, do aumento de temperatura e das tensões residuais existentes no produto final.

Existem referências bibliográficas aproximando os parâmetros do processo de fabricação com o material a ser analisado. O ideal é chegar o mais próximo possível da metodologia encontrada durante a produção.

Para aproximar os resultados da simulação com os encontrados no processo industrial, ensaios foram realizados com o material. As barras de aço AISI 1045 passaram pelo processo de trefilação combinada reduzindo seu diâmetro de 21,25 mm para 20,25 mm, ou seja, a redução em área foi de 12,43%.

Inicialmente foram realizados no laboratório os ensaios de compressão para adquirir a expressão matemática da curva de escoamento do material e, assim, obter o valor da tensão de escoamento referente ao material. Essa tensão foi comparada com outras encontradas em referências bibliográficas para verificar as diferenças nos valores de força de trefilação.

Em laboratório também foi efetuado o ensaio do anel para adquirir o valor do coeficiente de atrito do processo e analisar as mudanças que causam nas tensões residuais do material.

Após calcular o ângulo ideal que minimiza a força de trefilação para dois valores dos coeficientes de atrito encontrados no ensaio do anel, efetuou-se a

simulação com os dois ângulos calculados. A força de trefilação obtida por simulação foi comparada com as calculadas pela Equação 10.

Para conferir os resultados de tensões residuais da simulação computacional, utilizaram-se as medições feitas na barra, via difração de nêutrons, localizadas no trabalho de dissertação de Rafael Nunes (32).

4.2 Processo de Trefilação em Estudo

O material trefilado foi obtido pelo processo conhecido como trefilação combinada que objetiva a conversão de fio-máquina de aço em barras retas de seção cilíndrica com boas propriedades mecânicas. O material de partida é um fio-máquina laminado a quente e fornecido em forma de bobina.

As principais etapas do processo de trefilação combinada são: preparação dos rolos de fio-máquina, pré-endireitamento horizontal, pré-endireitamento vertical, jateamento com granalhas, trefilação, endireitamento horizontal, endireitamento vertical, operação de corte, endireitamento e polimento final por rolos cruzados ("*PERC*"), operações de controle de qualidade e enfeixamento.

A simulação do processo não foi feita de todas as etapas, apenas do momento em que as barras passam pela fieira e realizam a trefilação do material. Sendo assim, parte-se do princípio de que as barras estão isentas de tensões ao iniciar o processo, situação que na prática não ocorre.

4.3 Material

O material em questão é o aço carbono AISI 1045 recozido, sua composição química é apresentada na

Tabela 2.

Tabela 2: Composição Química do Material (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0,44	0,24	0,67	0,01	0,02	0,08 – 0,12	0,05 – 0,10	0,01

Na Tabela 3 (82) encontram-se os demais valores de propriedades indispensáveis para efetuar a simulação computacional do processo de trefilação.

Tabela 3: Valores com as características do Aço 1045

Propriedade	Valor
Densidade (kg/mm^3)	7,83 x 10^{-6}
Coeficiente de Expansão Térmica (1/k)	1,5 e-005
Coeficiente de transferência de calor (W/K*mm^2)	0,05
Coeficiente de Radiação	0,82
Calor específico (J/kg*K)	419
Módulo de Elasticidade (GPa)	200
Poisson	0,29
Condutividade Térmica (W/mK)	46,73

Neste trabalho o material foi avaliado através do ensaio *Brinell*, apresentando como resposta: H_B= 249 – 256.

4.4 Curva de Escoamento do Material

Para adquirir a curva de escoamento experimentalmente, 5 corpos de prova cilíndricos foram preparados com as dimensões de 20 mm de diâmetro e de 30 mm

de altura. O ensaio foi efetuado em corpos de prova usinados a partir das barras do aço AISI 1045. Os equipamentos utilizados foram:

- Aquisição de força: Célula de carga (20 ton);
- Aquisição de dados: Spider 8 – software: Catman;
- Paquímetro (precisão: 0,05 mm)
- Prensa hidráulica com acionamento manual, capacidade máxima 30 toneladas.

Cada corpo de prova foi colocado entre dois punções de material H13 (Figura 13), lubrificados com *spray* de grafite e em seguida a prensa hidráulica foi acionada para comprimir os mesmos.

O condicionador *Spider 8* adquire os valores de forças empregadas durante todo o ensaio. O *LVDT* é um sensor para medição do deslocamento linear.

Para construir o gráfico de tensão (σ_{inst}) x deformação (φ_{inst}) é necessário, a partir dos dados obtidos durante o ensaio, empregar algumas equações descritas a seguir. Com a Equação 24 se adquire as tensões em cada momento do ensaio.

***Equação 24*:**

$$\sigma_{inst} = \frac{F_{inst}}{A_{inst}}$$

Para alcançar a área instantânea utiliza-se a Lei da Constância do Volume (Equação 25), onde se pode considerar que o volume permanece constante.

***Equação 25*:**

$$A_o.h_o = A_{inst}.h_{inst}$$

Para encontrar as deformações instantâneas, emprega-se a

Equação 26.

***Equação 26*:**

$$\varphi_{inst} = \ln \frac{h_{inst}}{h_o}$$

Com estes dados é possível construir o gráfico σ_{inst} x φ_{inst}. Para determinar o valor de C e n da Equação 16 é necessário realizar uma linearização desta curva, construindo outro gráfico do tipo log σ_{inst} x log φ_{inst}. O coeficiente de encruamento (n) é obtido pela inclinação da reta e o coeficiente de resistência (C) é igual ao valor de σ_{inst} para a deformação igual a 1.

4.5 Ensaio do Anel – Obtenção do Coeficiente de Atrito (*μ*)

Para a caracterização do atrito, realizaram-se ensaios de compressão de corpos de prova em forma de anel, à temperatura ambiente, em uma prensa hidráulica. Para os experimentos foram utilizados corpos de prova em forma de anéis com as dimensões de 18 mm de diâmetro externo, de 12 mm de diâmetro interno e de 6 mm de altura.

Os ensaios de compressão do anel foram realizados para dois tipos de lubrificantes. As ferramentas (punções) foram adequadamente lubrificadas antes de sofrerem compressão. As reduções de altura compreenderam a faixa dos 20% aos 65%.

Após a compressão dos anéis mediram-se os diâmetros internos e as alturas com auxílio de um paquímetro, com três medições de cada, adotando-se como valor do ensaio a média das três direções de medição.

4.6 Simulação do Processo de Trefilação

Neste estudo, as análises se basearam em um *software* de elementos finitos conhecido comercialmente por *Simufact Forming SFM 9.0*. Os parâmetros de processo adotados para as simulações numéricas foram tratados como análise bidimensional (2D) utilizando elementos tipo QUAD, processo axissimétrico e o refinamento de malha foi implementado automaticamente pelo *software*. Assumiu-se que a fieira era rígida, e a barra de aço um comportamento elasto-plástico.

No modelo desenvolvido, realizou-se a simulação somente com a metade da barra por se tratar da análise de um material simétrico, não necessitando simular o diâmetro da barra inteira. O diâmetro inicial inserido no programa de simulação foi de 10,82 mm, reduzindo para 10,125 mm. 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.

No processo de simulação foram usados os materiais da base de dados do programa, por serem, normalmente, usados como materiais equivalentes aos materiais usados nos experimentos. Este procedimento foi adotado, pois o banco de dados do programa já possui as características mecânicas destes materiais, sendo inseridos no *software* os coeficientes de atrito obtidos no ensaio de compressão e modificadas algumas propriedades do aço AISI 1045 que se encontram na Tabela 3 para realizar a simulação do processo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Curva de Escoamento

As curvas utilizadas para a simulação computacional foram obtidas através do ensaio de compressão e de referências da literatura pesquisada. Para construção do gráfico foram utilizados os dados apenas da região de deformação plástica do material (φ = 0,2 a 0,8) por ser esta a região de interesse para o processo de conformação mecânica.

A partir dos dados do ensaio de compressão e da Equação 16 se obteve uma relação matemática para a curva de escoamento do material pesquisado que é apresentada na Equação 27.

Equação 27:

$$K_f = 1298{,}93.\ (\varphi)^{0{,}1075}$$

Na Tabela 4 são apresentadas as equações do aço AISI 1045 pesquisados em diferentes referências bibliográficas (RB). A referência bibliográfica 1 (RB – 1) está relacionada ao livro do autor Doege (83), a referência bibliográfica (RB – 2) foi retirada das pesquisas de Schaeffer (36) e a referência bibliográfica (RB – 3) foi através das análises de Kopp (26). A parte experimental foi adquirida dos ensaios laboratoriais do ensaio de compressão e o termo *Simufact* designa curvas de escoamento retiradas do banco de dados do programa de simulação *Simufact.forming 9.0*. Na Tabela 5 os dados são apresentados para curvas com baixas taxas de deformação e em temperatura ambiente. A Tabela 5 atribui os resultados de tensão de escoamento para altas taxas de escoamento.

Tabela 4: Equações de resistência ao escoamento para taxas de deformação de 0,3 s^{1}

Referência	Equação	Tensão de escoamento (para φ= 0,1327)
Simufact	$K_f = 997,70. (\varphi)^{0,0741}$	K_f= 859,02 N/mm²
RB – 1: Doege (83)	$K_f = 1131,36. (\varphi)^{0,0657}$	K_f= 990,77 N/mm²
RB – 2: Schaeffer (36)	$K_f = 848. (\varphi)^{0,1817}$	K_f= 587,52 N/mm²
RB – 3: Kopp (26)	$K_f = 1468,25. (\varphi)^{0,174}$	K_f= 1033,19 N/mm²
Experimental - Trefilado	$K_f = 1298,93. (\varphi)^{0,1075}$	K_f= 1045,50 N/mm²

Tabela 5: Equações de resistência ao escoamento para taxas de deformação de 40 s^{-1}

Referência	Equação	Tensão de Escoamento (para φ= 0,1327)
Simufact	$K_f = 1003,70. (\varphi)^{0,0625}$	K_f= 884,67 N/mm²
RB – 1	$K_f = 1065,61. (\varphi)^{0,0461}$	K_f= 970,88 N/mm²

Por não se conhecer o estado anterior do material ensaiado, pelas suas diferenças do estado de fornecimento, podem-se compreender melhor o porquê dos diferentes resultados da taxa de deformação apresentados na Tabela 4.

A tensão de escoamento, verificando a Tabela 4 e a Tabela 5, sofre pequenas alterações com a mudança da taxa de deformação do material (aproximadamente

2,5%), considerando-se a deformação equivalente de 0,1327, sendo que para a taxa de deformação de 40 s^{-1} os valores são de 20 a 25 MPa mais altos.

Os resultados encontrados de k_f para RB – 2 e para Simufact (Tabela 4) são mais baixos em relação a todos os outros. Analisando graficamente a partir da Figura 20, pode-se verificar que para estas referências a curva tensão verdadeira vs. deformação verdadeira efetivamente apresenta valores menores em relação às outras curvas para toda a faixa de deformações até 0,8.

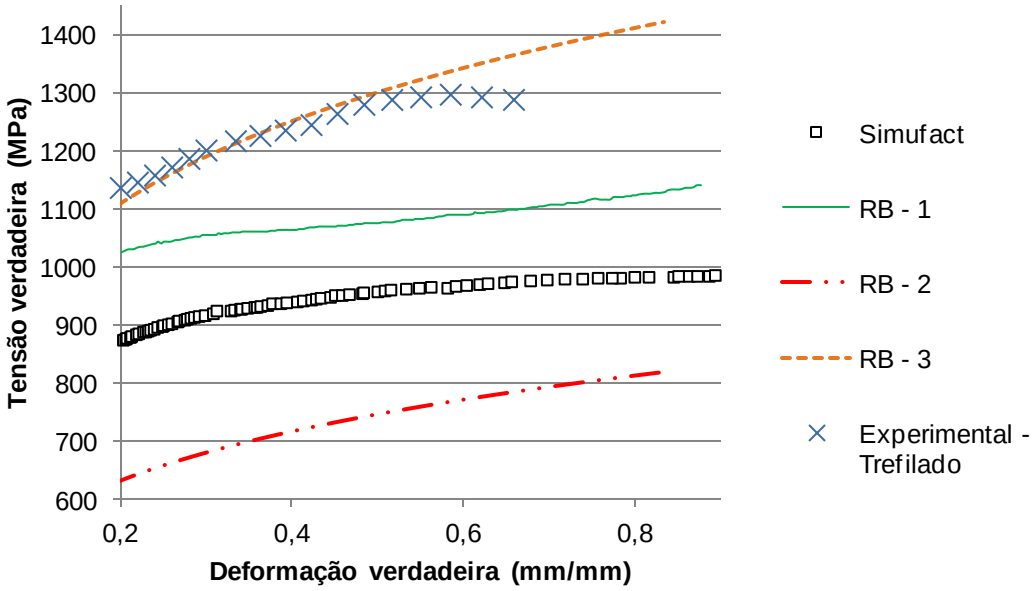


Figura 20: ***Curvas de Tensão verdadeira X Deformação verdadeira (curvas de escoamento) obtidas das equações analisadas para pequenas taxas de deformação***

5.2 Ensaio do Anel

A partir do ensaio do anel, obtiveram-se as curvas com a redução do diâmetro interno (%) em função da redução da altura (%) apresentadas na Figura 21. Com este gráfico, pode-se completar os dados no programa de simulação computacional requeridos pelo *SimufactFormingSFM* e adquirir os valores do coeficiente de atrito dos lubrificantes estudados. Com estes resultados, foi possível avaliar qualitativamente e quantitativamente o atrito para as condições de lubrificação

estudas, na qual se pode perceber, visualizando a Figura 21, que o lubrificante B indica um menor coeficiente de atrito. Os resultados obtidos foram de um atrito de μ = 0,1 para o lubrificante A e μ = 0,07 para o lubrificante B.

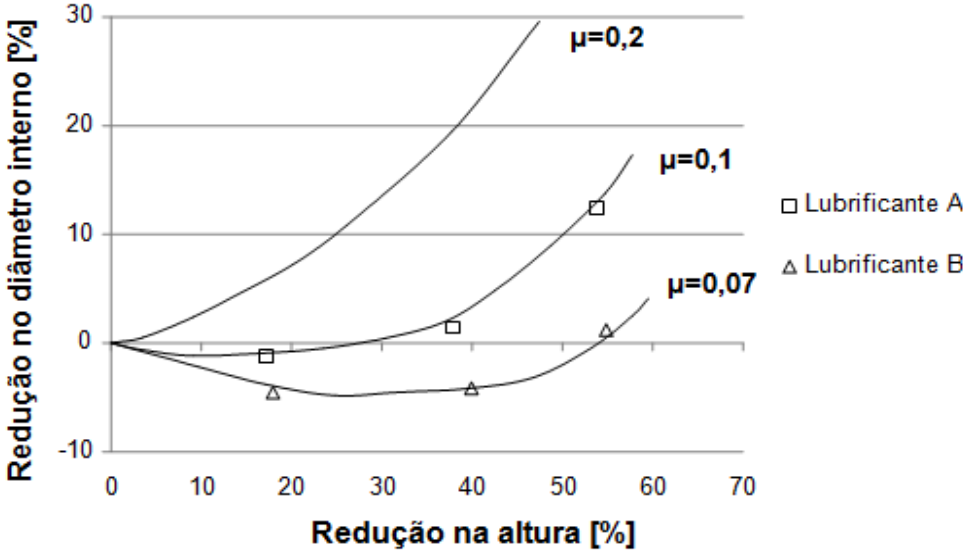


Figura 21: Curvas de calibração do atrito pelo ensaio de compressão do anel. Material: aço AISI 1045.

5.3 Análise da Força no Processo de Trefilação e Comparação com a Simulação

Os valores de deformação envolvidos no processo foram adquiridos através da Equação 19, Equação 20 e da Equação 18. A deformação global verdadeira radial e a circunferencial foram de -0,0664; a longitudinal e a equivalente apresentaram um valor de 0,1327, pois inicialmente o diâmetro da barra era de 21,64mm e foi reduzida para 20,25mm.

O cálculo das deformações médias leva em consideração a redução atribuída no processo e o ângulo da fieira na trefilação, já as deformações equivalentes só relacionam os parâmetros geométricos (redução) na equação. A deformação média,

obtida através da Equação 3 que leva em conta também as deformações não homogêneas, apresentou resultado de 0,27 para o ângulo de 15 graus e de 0,307 para o ângulo de 20 graus. Estes valores são mais elevados do que os valores de deformação global ideal que fornece um valor de 0,1327.

O parâmetro delta (Δ) adquirido para o ângulo de 15 graus foi de 3,94, enquanto que para o ângulo de 20 graus foi de 5,26.

O semiângulo ideal encontrado para minimizar a força de trefilação, calculado através da

Equação 1, é visualizada na Tabela 6.

Tabela 6: Semiângulo ideal

μ	**$\alpha_{ótimo}$**
0,07	6,8°
0,1	8,1°

A taxa de deformação média ($\dot{\varphi}$) apresentou um valor médio de acordo com a Equação 23 de 39,34 s^{-1}, sendo necessário inserir os dados do processo abaixo para obter-se este resultado:

- Velocidade do processo= 1250 mm/s
- Ângulo de trefilação= 10°
- d_0 =21,64 mm
- d_1 =20,25 mm

Para prever a força de trefilação para puxar a barra utilizou-se a Equação 10, conforme Pomp, Siebel e Houdremont, e os coeficientes de atrito encontrados no ensaio do anel. A deformação global sofrida pelo material no processo de trefilação e utilizada nos cálculos foi de 0,1327.

A Tabela 7 apresenta os resultados encontrados com a equação da curva de escoamento retirada dos dados do programa de simulação (referenciada como ‘simufact’) e através da literatura (‘RB – 1’). Também há os resultados via simulação numérica computacional, referenciada como ‘simulação’, sendo que para obter estes resultados foram inseridos os parâmetros do processo no software e automaticamente este software os calculou. Os semiângulos ideais, obtidos pela

Equação 1, foram aproximados para 7 e 8 graus.

Através da Tabela 7 (ilustrado graficamente na Figura 22) se verifica menor alteração nos resultados de força diante dos ângulos de trabalho da fieira quando comparado com igual coeficiente de atrito, apresentando uma diferença média de 0,96%. No ‘simulado’ não houve mudança para o coeficiente de atrito de 0,07, permanecendo com a força de 71,4 kN e a maior diferença foi no ‘simulado’ (cerca de 2,4%) para o coeficiente de atrito de 0,1, passando de 80,2 kN (7º) para 82,1 kN (8º).

Quando se analisa uma referência, por exemplo ‘simulado’, para o semiângulo de 8º, os valores passam de 71,4 kN com o coeficiente de atrito de 0,07 para 82,1 kN com o coeficiente de atrito de 0,1; mostrando uma maior influência do coeficiente de atrito nos resultados, com uma diferença média de 11,6%.

Notam-se grandes diferenças no comparativo dos resultados calculados analiticamente com os resultados obtidos via simulação numérica computacional, com uma diferença de valores entre as referências ‘simufact’ e ‘simulado’ de cerca de 13%, mesmo com a curva de escoamento do ‘simufact’ ter sido retirada do banco de dados do programa de simulação, programa este que realizou a simulação e obteve o resultado do termo ‘simulado’. Como ao longo do processo de trefilação a resistência ao escoamento do material se altera devido ao aumento de temperatura (diminuindo a sua resistência ao escoamento), a simulação refaz as condições para cada instante do processo automaticamente, enquanto que com a equação este

comportamento do material não é levado em conta, ou seja, não considera o aumento de temperatura que ocorre durante a trefilação, isto poderia explicar em parte as diferenças encontradas.

Tabela 7: Força (kN) de Trefilação (altas taxas de deformação)

	Coeficiente de atrito 0,07			Coeficiente de atrito 0,1		
Semiângulo	**Simufact**	**RB – 1**	**Simulado**	**Simufact**	**RB – 1**	**Simulado**
7º	82,7	90,7	71,4	92,2	101,2	80,2
8º	83,4	91,5	71,4	91,4	100,4	82,1

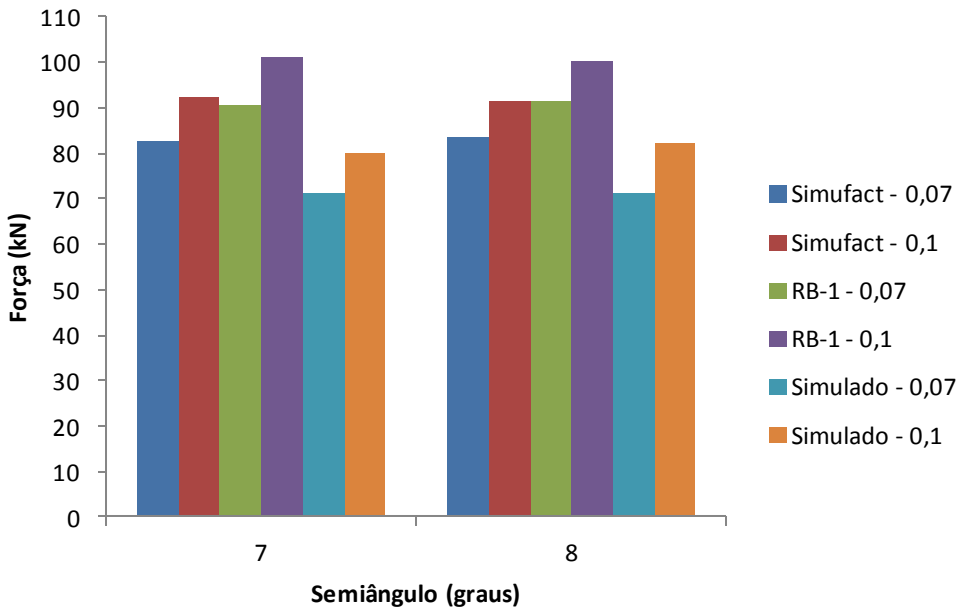


Figura 22: Força (kN) de trefilação (40s^{-1})

Na

Tabela *8* se podem comparar os valores obtidos para as referências da Tabela 4 que são para pequenas taxas de deformação. As forças encontradas na

Tabela 8 e ilustradas na Figura 23, mostram que os semiângulos ótimos, expostos na Tabela 6, apresentam os menores valores; mostrando uma excelente

concordância entre as equações e a simulação diante da redução imposta ao material.

Tabela 8: Força de trefilação para baixas taxas de deformação

Referência	A	μ	F (kN)
Simufact	7º	0,07	80,3
		0,1	89,3
	8º	0,07	80,9
		0,1	88,8
RB – 1	7º	0,07	92,6
		0,1	103,0
	8º	0,07	93,3
		0,1	102,4
RB – 2	7º	0,07	54,9
		0,1	61,1
	8º	0,07	55,3
		0,1	60,7
RB – 3	7º	0,07	96,6
		0,1	107,4
	8º	0,07	97,3
		0,1	106,8
Experimental	7º	0,07	97,7
		0,1	108,7
	8º	0,07	98,5

	0,1	108,1

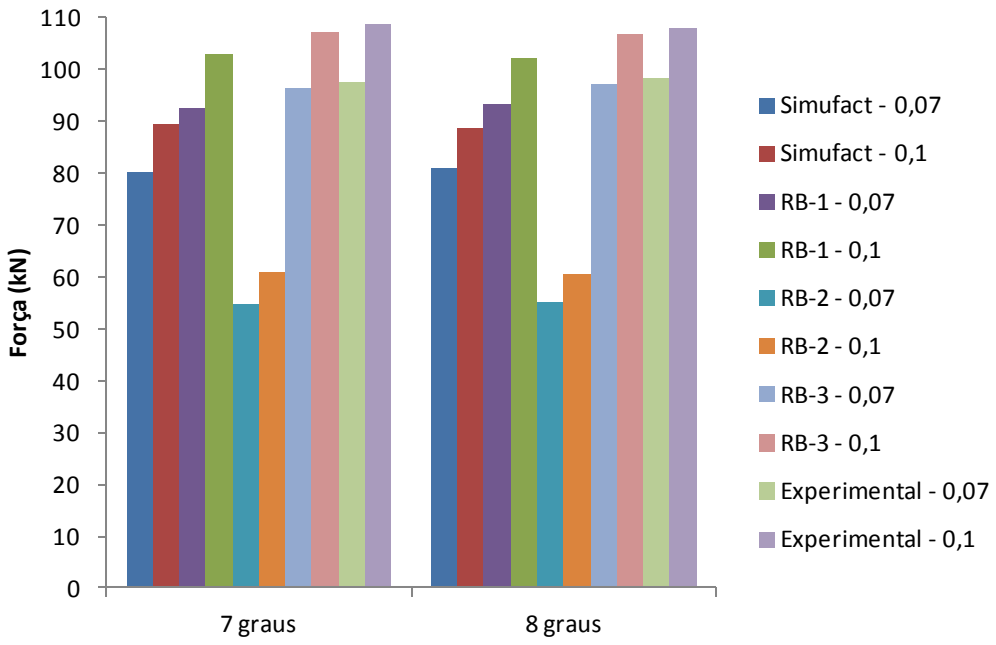


Figura 23: Força (kN) de trefilação para baixas taxas de deformação

Na Figura 22 e na Figura 23 estão os gráficos que representam a Tabela 7 e a

Tabela *8* com os resultados separadamente de força de trefilação para altas taxas de deformação e para baixas taxas de deformação, respectivamente. Analisando os dois gráficos, verifica-se que não mostram muita alteração entre os resultados quando comparados os semiângulos de trefilação, já os valores com a mesma equação de tensão de escoamento e diferentes coeficientes de atritos tiveram maiores alterações nos resultados.

A Figura 24 resume todos os valores de força calculados manualmente com as diferentes equações, para as diferentes taxas de deformação e para os dois

coeficientes de atrito. Quando se compara os resultados apresentados na Figura 24 do‘simufact’ e do ‘RB – 1’ da Tabela 7 com a

Tabela *8*, nota-se que a alta taxa de deformação levou a valores de força maiores para o ‘simufact’, enquanto que para a referência ‘RB – 1’ os números encontrados são menores.

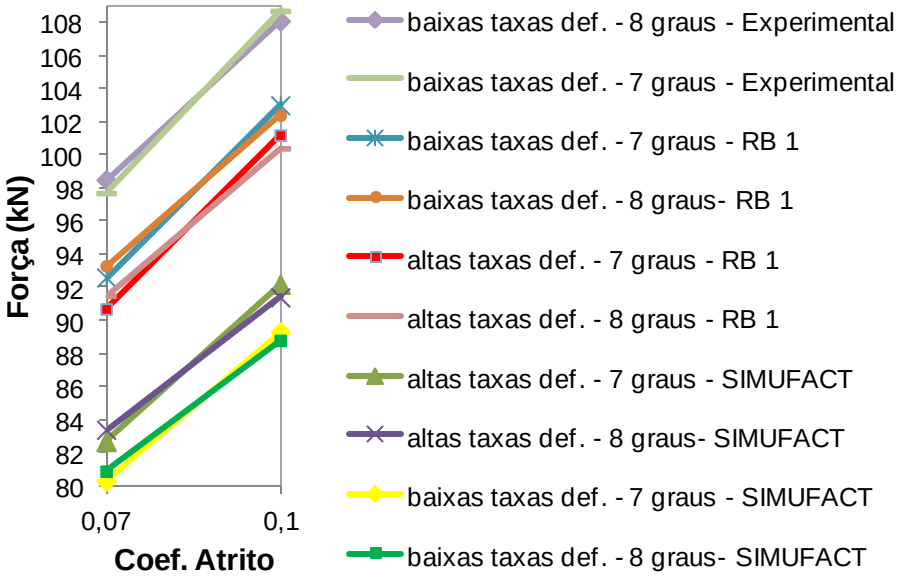


Figura 24: Comparação entre os resultados de força encontrados para altas e baixas taxas de deformação’

A Figura 25 apresenta a média das forças (kN) obtidas apenas via simulação Computacional calculada automaticamente com a curva de escoamento que há no *software* para o material AISI 1045, com semiângulos de trabalho variando entre 6° e 12° e os coeficiente de atrito de 0,1 e de 0,07. Observa-se na Figura 25 que a curva representativa do coeficiente de atrito 0,1 é superior em cerca de 12% para todos os resultados de semiângulo estudados e este é o coeficiente que representa um lubrificante correntemente em uso na indústria. A literatura informa que para menor desgaste, nas reduções pequenas (neste caso d_0=21,64 mm e d_1= 20,25 mm), o ângulo da ferramenta deve ser menor que o ângulo ótimo (2). Isso pode ser verificado na Figura 25, pois o $\alpha_{ótimo}$ calculado para μ= 0,07 foi de aproximadamente 7° (71,4 kN), mas a menor força para estes parâmetros foi para o semiângulo de 6°

(70,7 kN). O mesmo ocorreu para o μ= 0,1 onde o $\alpha_{ótimo}$ encontrado foi de 8° (82,1 kN), mas a menor força mostrada está para o semiângulo de 7° (80,2 kN). Trabalhos futuros podem verificar se esta conclusão se repete para outras condições de reduções pequenas.

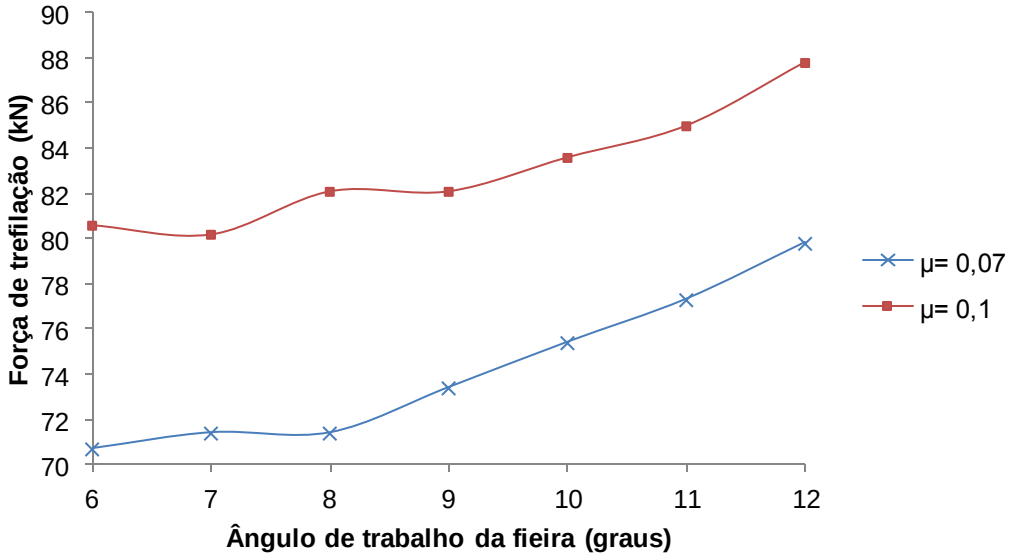


Figura 25: Resultado de Força (kN) na simulação com a variação de semiângulo e coeficiente de atrito

5.4 Simulação Computacional das tensões residuais

Utilizou-se o programa de simulação numérica computacional para calcular o nível de tensões residuais nas barras desde a superfície até o núcleo do material. Como já mencionado, a curva de escoamento do termo simulação é a que está presente no banco de dados do *software*, que é inserida automaticamente ao ser selecionado o material.

O material já apresenta tensões residuais antes da etapa de trefilação devido aos processos anteriores de pré-endireitamento e jateamento que induzem tensões

residuais compressivas na superfície da barra. Nas simulações isto não está sendo levado em consideração, sendo assim, a barra entra na fieira livre de tensões.

Quando foram efetuadas as simulações do processo de trefilação, ainda não havia sido encontrada a equação correta nas referências bibliográficas para a obtenção do ângulo ideal que minimiza a força. Dessa maneira, utilizaram-se os dois semiângulos que a empresa colaboradora das pesquisas empregava em seu processo de fabricação, ou seja, 10 e 7,5 graus. Além disso, dispunha-se de resultados experimentais de análise de tensões residuais somente para estes dois ângulos de processamento. Para cada um desses semiângulos empregaram-se na simulação os coeficientes de atrito adquiridos através do ensaio de anel, ou seja, os valores de 0,07 e de 0,1.

5.4.1 Tensões Axiais e Difração de Nêutrons (α= 10 graus)

Na Figura 26 há o comparativo entre os resultados obtidos via simulação computacional realizada para este trabalho e o por difração de nêutrons analisados na referência.

O Ponto zero (0) é relativo ao centro da barra e o ponto 10 (mm) é referente ao valor da superfície, região que teve o contato com a fieira. Estas análises foram feitas utilizando o coeficiente de atrito de 0,1.

Nestes resultados não há alteração nos limites de escala da simulação, sendo a figura e os dados originais adquiridos do *software*.

Uma observação importante da figura da barra apresentada é de que o final da barra não passou pelo processo de trefilação na simulação. Essa parte foi desenhada com uma medição adequada para passar pelo diâmetro da fieira e, assim, poder inserir a garra no material para puxá-lo e realizar o processo de trefilação.

Todas essas informações apresentadas servem também como referências para os resultados mostrados nas seguintes figuras: Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31. O que é alterado nesses itens são os semiângulos.

Através do gráfico, apresentado na Figura 26, nota-se que no centro da barra há maiores valores compressivos para os resultados da simulação, porém esta diferença vai gradativamente diminuindo ao se aproximar da superfície do material. A superfície apresenta tensão trativa para os dois casos. O ponto de inversão das tensões residuais, em que a tensão atuante é zero, encontra-se a cerca de 4 mm da superfície.

A variação entre os resultados é muito maior no centro da barra e diminui próximo da superfície. Essa discrepância pode ser devida a tensões pré-existentes no material.

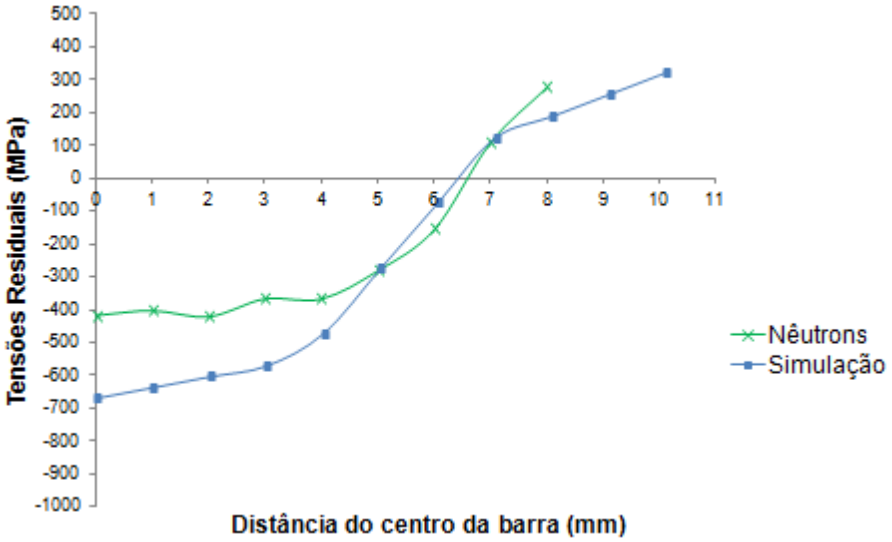


Figura 26: Tensões Axiais- α=10° (Difração de Nêutrons* (11) *e Simulação)

.

5.4.2 Tensões Axiais e Difração de Nêutrons (α= 7,5 graus)

Na Figura 27 também há comparação entre os valores simulados e experimentais, diferenciando o semiângulo da fieira que é de 7,5 graus neste caso.

Nota-se que, assim como nos valores do semiângulo de 10 graus, as tensões compressivas são bem mais elevadas no centro da barra para os resultados de simulação em relação à difração de nêutrons. A região de inversão de tensões se encontra mais acima da superfície do material em relação ao semiângulo de 10 graus, ou seja, há aproximadamente 3 mm de profundidade.

Para a direção axial, os menores ângulos de fieira deveriam apresentar valores de tensões residuais mais baixos na superfície da barra (84). Também de acordo com o valor do parâmetro delta (Δ), o valor calculado para o ângulo de 15 graus foi de 3,94 e de 5,26 para o ângulo de 20 graus, e, de acordo com a literatura o material que passou pela fieira com ângulo de 15 graus deve apresentar deformações mais homogêneas e com isto desenvolver menores gradientes de tensões residuais.

Conforme mencionado na revisão bibliográfica, muitos projetos comerciais de fieira incorporam uma zona de deformação de Δ aproximadamente de 3 para minimizar a tensão de trefilação. Não é o que se verifica ao comparar os gráficos da Figura 26 e da Figura 27, onde na superfície o ângulo de 15 graus apresenta valores próximos de 400 MPa e o ângulo de 20 graus próximos de 350 MPa para a simulação. Nos resultados de difração de nêutrons a superfície se manteve com os mesmos valores, 300 MPa. Os maiores gradientes de tensões residuais também foram observados para o menor ângulo calculado (15 graus).

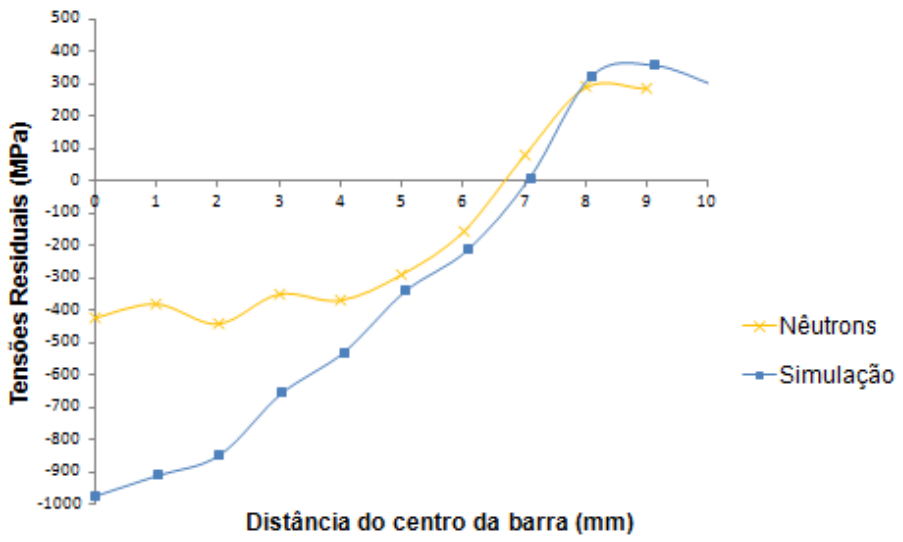


Figura 27: Tensões Axiais- α=7,5° (Difração de Nêutrons* (11) *e Simulação)

5.4.3 Tensões Radiais e Difração de Nêutrons (α= 10 graus)

Observa-se da Figura 28 que para a direção radial o nível de tensões na extensão da barra é menor. Continuam apresentando perfil trativo na superfície e compressivo no centro do material.

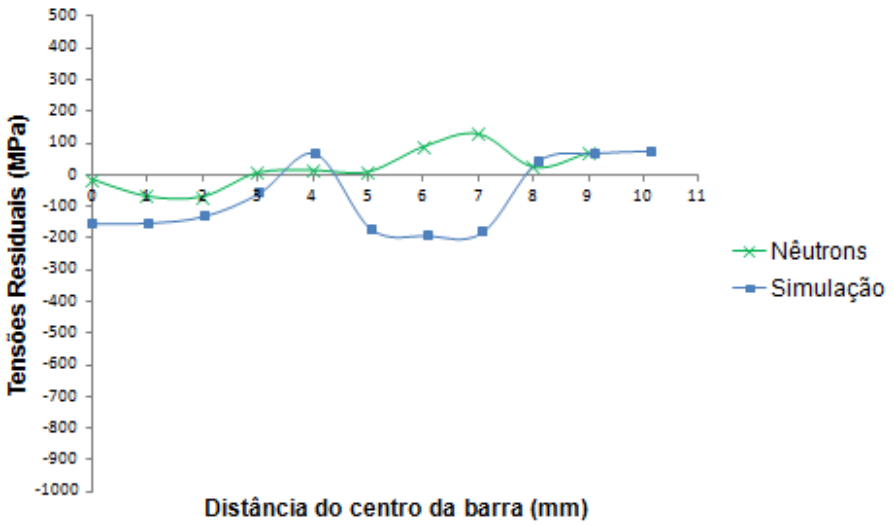


Figura 28: Tensões radiais- α=10° (Difração de Nêutrons e Simulação)

5.4.4 Tensões Radiais e Difração de Nêutrons (α= 7,5 graus)

Para a Figura 29 nota-se que o comportamento da simulação computacional está praticamente uniforme, apresentando em toda a sua extensão valores compressivos. O ponto neutro diferem muito na localização comparando-se os dois métodos de estudo. Na simulação está bem próximo da superfície, cerca de 1 mm abaixo da mesma. Na difração de nêutrons se encontra em quatro pontos (zero; 2,8 e entre os pontos quatro e cinco), ou seja, bem mais próximos ao centro da barra.

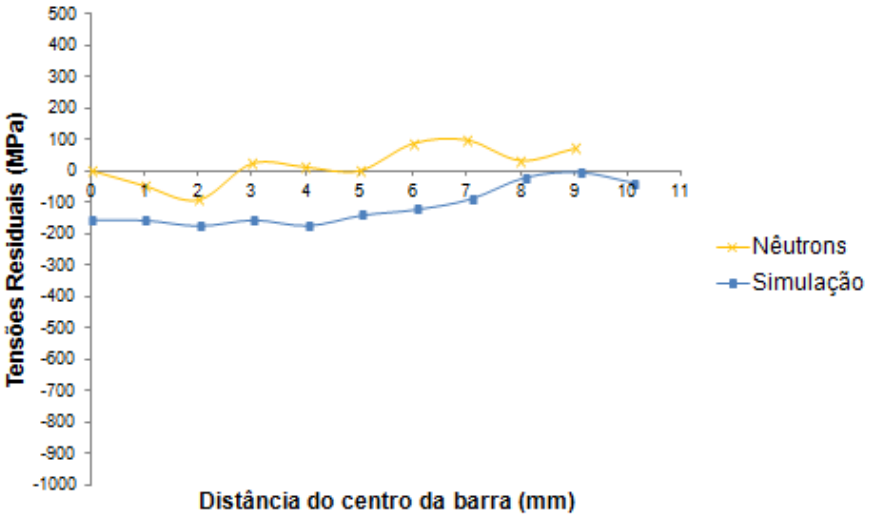


Figura 29: Tensões radiais- α=7,5° (Difração de Nêutrons e Simulação)

5.4.5 Tensões tangenciais e Difração de Nêutrons (α= 10 graus)

Ao examinar a Figura 30, verifica-se que as tensões apresentadas são predominantemente trativas. Apenas no centro da barra foram encontrados valores compressivos para os dois métodos pesquisados. A difração de nêutrons e a simulação computacional seguiram com níveis de tensões similares no gráfico, onde a tensão zero passa pelo mesmo ponto.

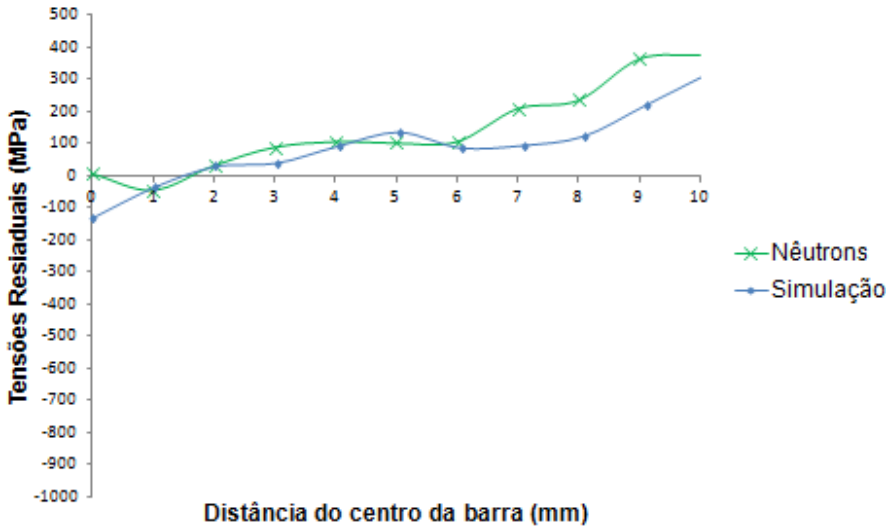


Figura 30: Tensões transversais- α=10˚(Difração de Nêutrons* (11) *e Simulação)

5.4.6 Tensões tangenciais e Difração de Nêutrons (α= 7,5 graus)

Quando se verifica a Figura 31 com a representação do gráfico com semiângulo de 15 graus observa-se que neste caso o ponto neutro difere para os métodos de ensaios realizados, sendo que na difração de nêutrons segue análogo ao encontrado na Figura 30. Já na simulação o ponto com tensão zero está mais próximo à superfície, a cerca de 5 mm da mesma. Na difração de nêutrons predominam as tensões trativas. Na simulação computacional as tensões se dividem na metade da área estudada, ou seja, no centro da barra elas apresentam comportamento compressivo e após 5 mm passam a ter tensões trativas.

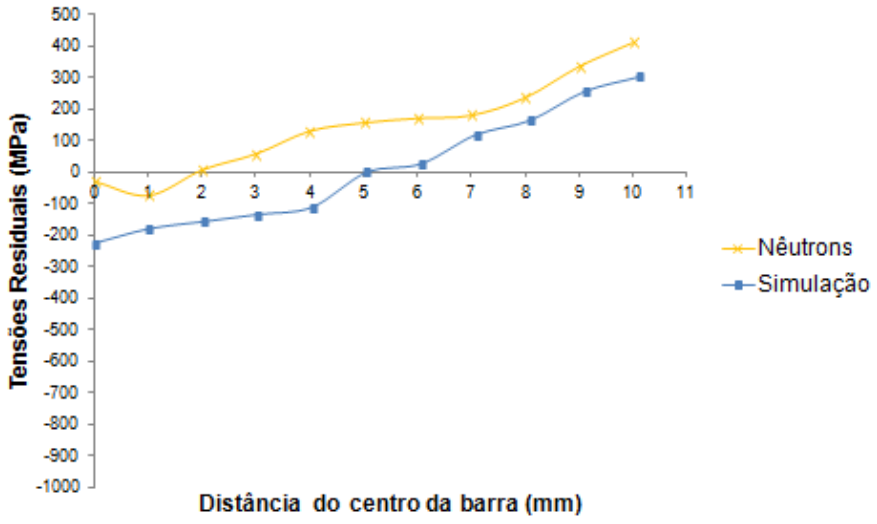


Figura 31: Tensões transversais- α=7,5° (Difração de Nêutrons* (11) *e Simulação)

As direções axiais e tangenciais apresentaram comportamento compressivo no centro e trativo na superfície. Na direção radial, apenas a simulação realizada com o semiângulo de 7,5 graus apresentou o resultado esperado de comportamento compressivo no centro da barra. 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 (8). Para reduções menores que 0,4% as tensões residuais apresentam-se compressivas na superfície e trativas no centro da barra. Isso permite observar que em menores reduções de área, durante a trefilação, o nível de tensões residuais será diminuído drasticamente (12).

5.4.7 Comparação dos Resultados para Diferentes Coeficientes de Atrito na Simulação (μ= 0,07 e μ= 0,1)

A construção dos gráficos, que seguem abaixo, foi obtida através dos resultados adquiridos pela simulação computacional realizada pelo *software*. Os valores para a aquisição dos gráficos foram retirados dos desenhos obtidos do

resultado final, realizando-se uma representação pontual destes dados para a construção do gráfico.

O coeficiente de atrito na Figura 32 apresentou grande diferença nos resultados, sendo que o coeficiente de atrito de 0,1 gerou valores trativos e compressivos mais altos. Nos dois casos a superfície possui tensões trativas e gradativamente passam para tensões compressivas no centro da barra.

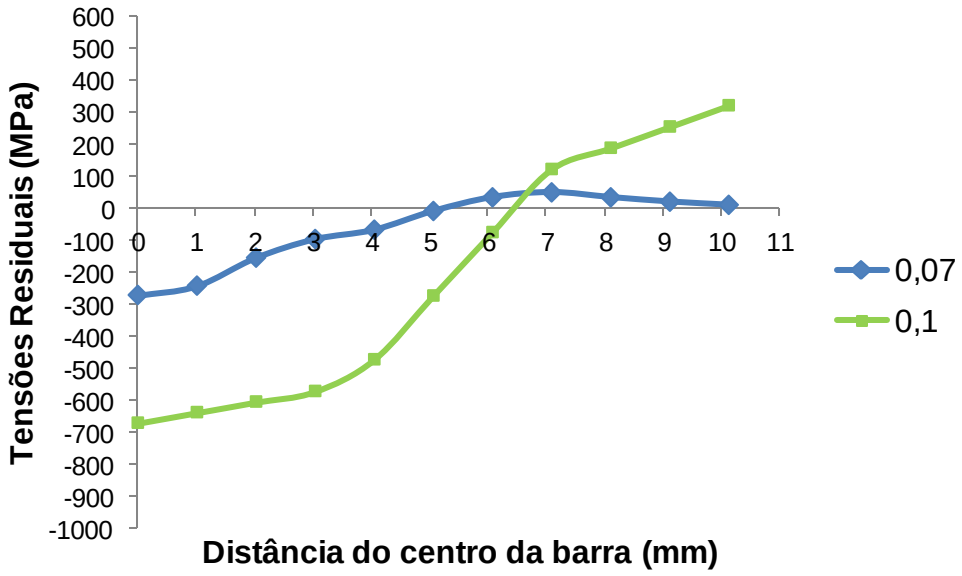


Figura 32: Direção Axial e 2α=20 graus

Na Figura 33 os valores são similares e, assim como no semiângulo de 10 graus da Figura 32, possuem resultados de tensão positivos na superfície e compressivos no centro.

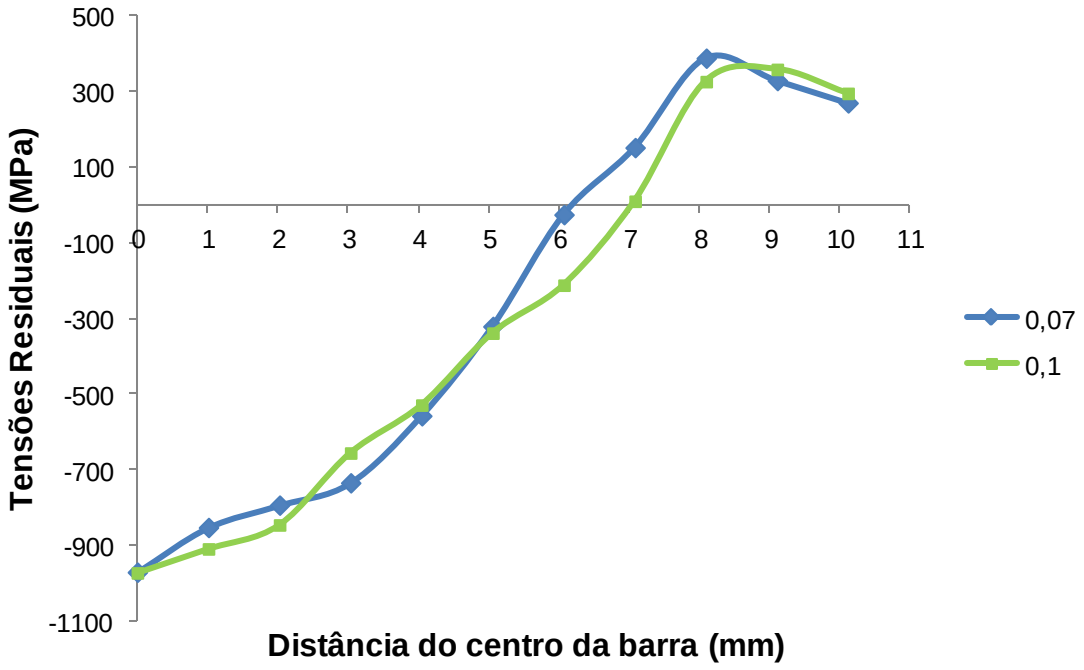


Figura 33: Direção Axial e 2α=15 graus

5.4.8 Simulação da Temperatura na Trefilação

A Figura 34 ilustra as temperaturas (^{o}C) obtidas durante o processo de trefilação e as encontradas logo após a retirada da fieira da barra.

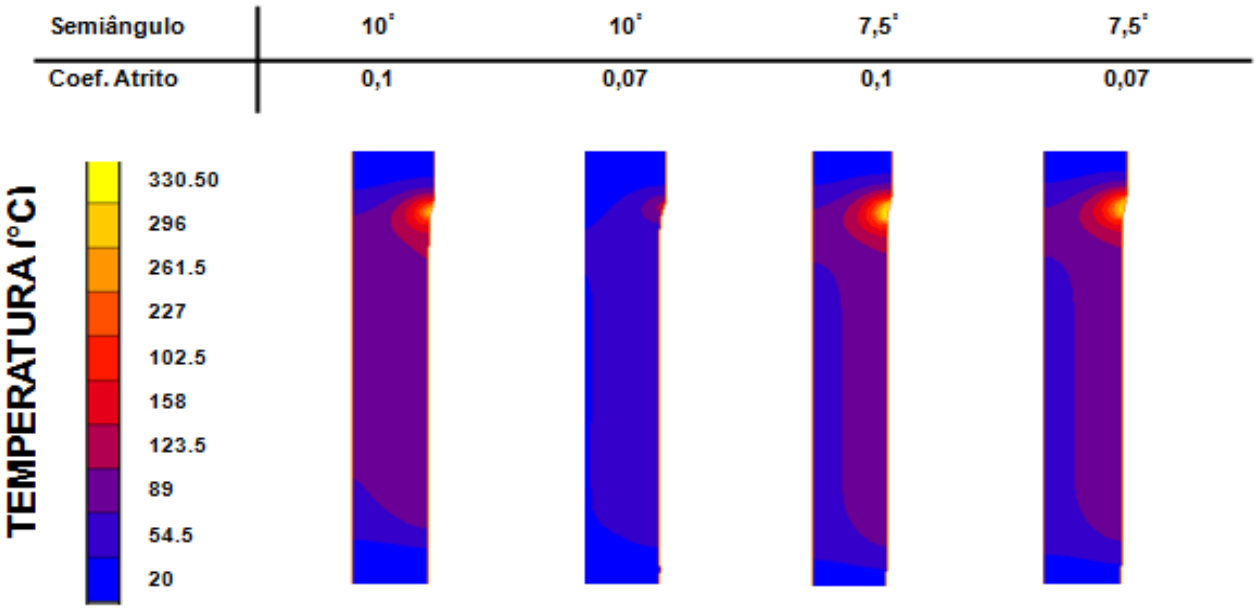


Figura 34: Temperatura (°C)

Observa-se que logo após o processo, o maior valor está em 330,5 °C, mas a maior parte do material encontra-se com 89 °C. Como a simulação iniciou com 20°C, houve uma variação de temperatura na barra em torno de 69°C. Este aumento de temperatura ocorre de maneira muito localizada na região que a fieira toca no material, logo após sua retirada. O maior efeito dessa propriedade ao longo da barra encontra-se com o semiângulo de 10 graus e o coeficiente de atrito de 0,1; e o menor efeito é verificado no coeficiente de atrito de 0,07 e também com o semiângulo de 10 graus. A menor mudança de temperatura ao longo da barra, com e sem a fieira, é com o coeficiente de atrito de 0,07 e semiângulo de 10 graus. Os resultados para o semiângulo de 7,5° com os dois coeficientes de atrito não apresentaram alterações significativas.

6. CONCLUSÕES

- A literatura apresenta diferentes curvas de escoamento para o material AISI 1045, resultando em grandes alterações nos cálculos de força. Verifica-se a necessidade de realizar o ensaio no material para obter a equação que o representa**.**

- Nos resultados de força houve maior influência quando modificados os valores de coeficiente de atrito em relação à alteração nos ângulos de trabalho da fieira.

- Todos os resultados de força foram maiores para o coeficiente de atrito 0,1, mostrando a importância da lubrificação no processo.

- As diferenças no comparativo de forças calculadas analiticamente com os obtidos via simulação numérica computacional podem ser porque o programa de simulação refaz as condições automaticamente da resistência ao escoamento durante o aumento de temperatura no processo. Já nas equações esse aumento de temperatura não é considerado.

- Através dos resultados apresentados na Figura 25, comprova-se o que descreve a literatura ao informar que para menor desgaste, nas reduções pequenas, o ângulo da ferramenta deve ser menor que o ângulo ótimo.

- Nos resultados de temperatura o comportamento na barra com o ângulo de 15 graus se apresentou similar para os dois coeficientes. Já para o ângulo de 20 graus houve muita variação no perfil entre os dois coeficientes de atrito, com temperaturas superiores em 35°C para o coeficiente de atrito de 0,1.

- As diferenças nos resultados de tensões residuais axiais entre a simulação e a difração de nêutrons podem ser devido a tensões pré-existentes nos materiais não levadas em consideração nestas simulações.

- As tensões residuais axiais apresentam superfícies trativas similares para os dois métodos analisados, mas as tensões compressivas no centro da barra são maiores para os resultados de simulação.

- A literatura informa que na direção axial os menores ângulos de fieira deveriam apresentar tensões residuais mais baixos na superfície, mas o ângulo de 20 graus obteve os menores valores na simulação.

- Nas tensões radiais, o perfil da difração de nêutrons exibe gráficos similares para os dois ângulos, já na simulação os resultados são predominantemente compressivos em toda a extensão da barra, com comportamento praticamente uniforme no ângulo de 15 graus.

- Na direção tangencial predominam as tensões residuais trativas nos dois métodos para o ângulo de 20 graus. Para o ângulo de 15 graus simulado, o material estudado se comportou com perfil trativo da superfície até a metade, tronando-se compressivo no centro da barra. E na difração de nêutrons continua, assim como o ângulo de 20 graus, o comportamento trativo na barra.

- Nas simulações realizadas, os resultados das tensões residuais com o ângulo de 15 graus são similares para os dois coeficientes de atrito estudados. Com o ângulo de 20 graus grandes diferenças foram encontradas, com maiores valores para o coeficiente de atrito de 0,1.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a simulação de cada etapa do processo, inserindo nas simulações os resultados das tensões encontradas na etapa anterior do processo a que se esta avaliando, desta maneira os resultados da simulação devem apresentar valores mais próximos dos obtidos na difração de nêutrons;
- Fazer a simulação com pelo menos dois semiângulos menores do que o $\alpha_{ótimo}$ calculado para se verificar se as forças de trefilação continuam menores quando pequenas reduções são impostas no material;
- Outra sugestão estaria em simular com outros tipos de fieiras além da fieira do tipo cônica, já que Nakagari et al (17) estudou o efeito da geometria da fieira sobre a tensão residual de várias condições de trefilação de amostras de aço (0.44% C) e verificou que a fieira tipo convexa apresenta menores valores de tensão residual axial na superfície da barra, quando comparada com a fieira do tipo côncava (1);

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **SANTOS, Carlos Augusto dos.** Simulação Numérica de Trefilação Assimétrica do Aço Inoxidável 420 Considerando o Efeito do Caminho de Deformação. Junho de 2005. Universidade Federal de Minas Gerais.

2. **BUTTON, Sérgio Tonini.** Programa de Educação Continuada. Setembro de 2006. Cursos ABM - Trefilação.

3. **LU, Jian.** *Handbook of Measurement of Residual Stress.* s.l. : Ed. The Fairmont Press, INC, France,1996. Society for Experimental Mechanics, Inc.

4. **MARTINS, Carlos Otávio Damas, et al., et al.** Análise das Tensões Residuais desenvolvidas no Processo de Fabricação de Anéis para Rolamento através do Método do Furo. *59 Congresso Anual da ABM.* São Paulo. Julho de 2004.

5. **BLAKE, et al (1996), Cito in: MAGALHÃES, Frederico de Castro e CAMPOS, Haroldo Beria.** Estudo Numérico e Analítico das Evoluções da Força e Espessura em Chapas de Aço Livre de Intersticiais durante o Processamento por Embutimento e Ironing. Minas Gerais : s.n., 2005. Universidade Federal de Minas Gerais.

6. **MONTANDON, João Jaques Augusto.** Análise da Variação das Propriedades Mecânicas à Tração Provocada pela Trefilação de Barras de Aço AISI 1212. Dissertação de Mestrado.

7. **DE OLIVEIRA, Bruno Fedeli.** Trefilação - Processo de Conformação Plástica dos Metais. 2002.

8. **SOUZA, Tomaz Fantin.** Simulações Computacionais para Análise e Minimização das Tensões Residuais no Processo de Trefilação. Porto Alegre : s.n., 2011. Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

9. **GRUNING, Klauss.** *Umformtechnik.* [ed.] Polígono S.A. [trad.] Prof. Arno Blass. Técnica da Conformação 1973. Berlim : s.n., 1966. pp. 19;177-187.

10. **DIETER, G.E.** Metalurgia Vergalhões, Arames e Tubos. 2 ed. *Trefilação de Verga.* s.l., Rio de Janeiro : Guanabara Dois, 1981. pp. 561-563;657-571. Cito in Carlos Augusto dos Santos: Simulação Numérica de Trefilação Assimétrica do Aço Inoxidável 420 Considerando o Efeito do Caminho de Deformação, 2005.

11. **NUNES, Rafael, ROCHA, Alexandre da Silva e HIRSCH, T. K.** Análise de Tensões Residuais via Difração de Nêutrons em Barras de Aço AISI 1045 produzidas por Trefilação Combinada. *Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.* Rio de Janeiro. 2010, edição 65, pp. 453-464. Anais do 65 Congesso Anual da ABM.

12. **DIETER, G.E., KUHN, H.A. e SEMIATIN, S.L.** Drawing od wire, rod and tube. *ASM Intenational.* 2003, pp. 278-290; 345.

13. **BUTTON, S. T.** Programa de Educação Continuada. Campinas : s.n., 2004. Cursos ABM - Trefilação.

14. **MARTINEZ, Gustavo Aristides Santana.** Otimização da Velocidade de Trefilação do Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304. Campinas : s.n., Setembro de 1993. pp. 2893-2897. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia de Materiais.

15. **LIMA, V. T.** Apostila de Processos Mecânicos e Metalúrgicos de Fabricação. 2006. Universidade de Rio Verde - Faculdade de Engenharia Mecânica - FESURV.

16. **MORAIS, Willy Ank.** Apostila de Conformação Plástica dos Metais (0864) - Engenharia de Produção Mecânica. São Paulo, SP : s.n., 2003. pp. 40-62;117-128. Universidade Santa Cecília - UNISANTA.

17. **NAKAGIRI, Akikazu, et al., et al.** Behavior of Residual Stress and Drawing Stress in Conical-Type Die and Circle-Type Die Drawing by FEM Simulation and Experiment. August de 2001. pp. 72-80.

18. **SCHEY, Jonh A.** June de 1983, Lubrication Engineering, Vol. 39. Surface Roughness Effects in Metalworking Lubrication.

19. **DAROIT, Mateus.** Comparativo de Processos de Trefilação para a produção de Arames de Aço. Porto Alegre, RS, Brasil : s.n., 2006. pp. 3-7;12-13. Trabalho de Diplomação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Departamento de Metalurgia).

20. **MARTINEZ, Gustavo Aristides Santana.** Comportamento da Lubrificação no Tribo-Sistema de Trefilação a Altas Velocidades. Campinas, S.P. : s.n., jun de 1988. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas.

21. **GROCHE, Peter, et al., et al.** Hydrodynamic effects of macroscopic deterministic surface structures in cold forging process. [ed.] Elsevier. *Tribology Internacional - journalhomepage: www.elsevier.com/locate/triboint.* 42, 2009, pp. 1173-1179. ScienceDirect - 15/07/09. E-mail address: groche@ptu.tu-darmstadt.de(P.Groche)..

22. **MARTINEZ, Gustavo Aristides Santana e BUTTON, Sérgio Tonini.** *O Papel das Fieiras na Trefilação (Metalurgia e Materiais).* 1999. Vol. 55.

23. **PILARCZYK, Jan W., et al., et al.** FEM Modelling of Drawing of Wires for Wires for Prestressed Concrete. *Wire Journal Internacional.* edição: 37 nº2, February de 2004. Cito in M. Schneider, Drawing, WGH Katowice 1961 (in Polish).

24. **DIETER, G.E, H.A e S.L.** *Handbook of Workability and Process Design.* 2003. pp. 278 - 290; 280. ASM International.

25. **LEPAND, H.** *Herstellung von Stahldraht; Teil 1; Verlag Stahl - eisen mbH, Dusseldorf; Herausgegeben von Verein Deutscher Eisenhuttenleute.* 1969.

26. **KOPP, Reiner e WIEGELS, Herbert.** *Einführung in die Umformtechnik.* Aachen : s.n., 1999. pp. 229-231.

27. **LAZARAREV, J.** Optimatization of the Matrix`s Angle for Wire Drawing Influence Drawing Force. pp. 139-144.

28. **SCHAEFFER, Lirio e ROCHA, Alexandre da Silva.** *Conformação de Metais - Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação.* edição: 1. Porto Alegre : editora: Imprensa Livre, 2007. p. 223.

29. **HELMAN, H. e CETLIN, P. R.** *Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais.* 2ª. 1993. p. 170. Fundação Christiano Ottoni.

30. **BACKOFEN, W.A.** Deformation Processing. 1 ed. Massachusetts: Adisson Wesley Reading. 1972. p. 326. Cito in Carlos Augusto dos Santos: Simulação Numérica de Trefilação Assimétrica do Aço Inoxidável 420 Considerando o Efeito do Caminho de Deformação, 2005.

31. **SHEMENSKI, Dr. Robert M.** Wiredrawing by Computer Simulation. *Wire Journal International.* Reader service No 16, Abril de 1999, pp. 166-183. This tribute to Howard J. Godfrey and Allan B. Dove is apresented as Part II of two: Continuing the visio.

32. **NUNES, Rafael Menezes.** Análise de Tensões Residuais no Processo de Trefilação combinada do Aço AISI 1048 visando minimizar Distorções Pós Processamento. Porto Alegre, RS : s.n., 2008. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

33. www.cimm.com.br. *http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6500-defeitos-em-trefilados.* [Online] [Citado em: 03 de 05 de 2011.]

34. **ATIENZA, J.** Tensiones Residuales en Alambres de Acero Trefilados. Madrid : s.n., 2001. Tese de Doutorado pela Universidade Politécnica de Madrid.

35. **BATALHA, Gilmar Ferreira.** *Introdução a Manufatura Mecânica.* [http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/transparencias2202.pdf - acessado:02/12/2011] São Paulo : s.n., 08 de 10 de 2003. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Deistemas Mecânicos.

36. **SHAEFFER, Lirio.** *Conformação Mecânica.* [ed.] editora: Livre Imprensa. Porto Alegre : s.n., 2004. pp. 99,101. Vol. 2ª Edição.

37. **LANGE, Kurt.** Handbook of Metal Forming. s.l. : McGraw-Hill, 1985, cap.13. Fundamentals of Extrusion and Drawing. SME: Society of Manufacturing Engineers.

38. **DIETER, G.E.** *Mechanical Metallurgy. Fundamentals of Extrusion and Drawing.* s.l. : Ed. McGraw Hill, Boston, 1976. Vol. 2 ed.

39. **KOBAYASHI, Shiro, OH, Soo - Ik e ALTAN, Taylan.** *Metal Forming and the Finite- Element Method.* s.l. : Copyright, 1989. Oxford Series on Advanced Manufacturing.

40. **BORDER, Carlos.** Análise do Coeficiente de Atrito do Anel para o Forjamento a Quente. São Paulo : s.n., 1995. Trabalho de Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo..

41. **MALE, A.T. e COCKCROFT, M.G.** A Method for Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation. *Journal of the Institute of Metals.* 1964, Vol. 93, pp. 38-46.

42. https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/133382/1/Ficha_Lab1_07.pdf. [Online] [Citado em: 07 de 04 de 2011.]

43. **GEIER, Martin.** Considerações sobre o Atrito para Processos de Forjamento a Frio através do Ensaio de Compressão do Anel. Porto Alegre, RS : s.n., 2007. Dissertação (Mestrado em

PPGEM/UFRGS Programa de Pós-Graduação em Eng Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

44. **SAHIN, M., CEM, S. e AKATA, H.** Effect of Surface Roughness on Friction Coefficients during Upsetting Process for different Materials. Turkey, Turkey : s.n., 2005. Department of Mechanical Engineering, Trakya University.. doi:10.1016/j.matdes.2005.07.019.

45. **ROCHA, Alexandre da Silva, SKONIESKI, Adão F.O. e NUNES, Rafael M.** Caracterização e Avaliação do Atrito para Matrizes de Aço Ferramenta AISI H13 Nitretadas a Plasma. *Senafor.* 2007.

46. **BUTTON e Cito in MORAIS, W. A.** Apostila de Conformação Plástica dos Metais. 2002. Universidade de Santa Cecília; http:/cursos.unisanta.br, acessado em 18/12/2008.

47. **SCHEY, A.** Tribology in Metalworking: Friction, Lubrification and Wear. 1984.

48. **DAROIT, Mateus.** Comparativo de Processos de Trefilação para a produção de Arames de Aço. Porto Alegre, RS, Brasil : s.n., 2006. Trabalho de Diplomação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Departamento de Metalurgia).

49. **ROSOCHOWSKA, M. e BALEANDRA, R. K.** Method of Measuring Thermal Contact Conductance. *Journal of Materials Processing Technology.* edição: 135, 2003.

50. **MORO, Norberto e AURAS, André Paegle.** Processos de Fabricação - Conformação Mecânica I (Generalidades, Laminação e Forjamento). [www.norbertocefetsc.pro.br]. Florianópolis, SC : s.n., 2007. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Gerência Educacional de Metal Mecânica - Curso Técnico de Mecânica Industrial.

51. **MAGNABOSCO, Rodrigo.** http://fei.edu.br. *http://fei.edu.br/~rodrmagn/MR7210/MR7210-09.pdf.* [Online] 2008. [Citado em: 17 de 05 de 2011.] Comportamento mecânico dos materiais.

52. http://www.pdf.here.com. *http://www.dem.feis.unesp.br/maprotec/educ/cpm/cpm_9.pdf.* [Online] [Citado em: 03 de 05 de 2011.] pesquisado em 03/05/2011.

53. **EL-DOMIATY, Aly e KASSAB, Saddek K.** Temperature Rise in Wire-Drawing. [ed.] Elsevier. s.l. : 1998, 16 de June de 1997. pp. 72-83.

54. **MOMENI, A. e DEHGHANI, K.** Hot Working behavior of 2205 Austenite-Ferrite Duplex Stainless Steel Characterized by Constituve Equations and Processing Maps. *Materials Science and Engineering A.* 2011, Vol. 528, pp. 1448-1454. Cito in MAGBABOSCO, Rodrigo..

55. **ASAKAWA, Motoo, SASAKI, Wataru e SHISHIDO, Shunsuke.** 2002, Wire Journal Internacional 35 nº10. Effect of Die Approach Geometry and Bearing Lenght on Residual Stress after Bar Drawing.

56. **LU, J. e RETRAINT, D.** A Review of Recent Development and Applications in the Field of X-ray Diffraction for Residual Stress Studies. *Journal of Strain Analysis.* n.2, 1998, Vol. 33, pp. 127-136.

57. **HUTCHINGS, M. T., et al., et al.** Introduction to the Characterization of Residual stress by Neutron Diffraction. 2005. p. 13.

58. **LU, J.** Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress Problem. Ohio : s.n., 2002. p. 11. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM Internacional. Cito in Rafael Nunes.

59. **BHADESHIA, H.K.D.H.** Material Factors. *Handbook of Residual Stresses and Deformation of Steel.* 2002, pp. 1-9. ASM International (www.asminternational.org). University of Cambridge.

60. **SCHWARZ, Thomas e KOCKELMANN, Hans.** The Hole-Drilling Method - the best technique for the experimental determination of residual stresses in many fields of application. edição No. 2, 1993, pp. 33-38. State Materials Testing Organization (MPA), University of Stuttgart. Translated article from MTB 29.

61. **DAMASCENO, Deoclécio.** Análise das Tensões Residuais após Torneamento e Retificação do Aço ABNT 52100 Endurecido. 1993. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica.

62. **ATIENZA, J. M. e ELICES, M.** Influence of Residual Stresses in the Stress Relaxation of Cold Drawn Wires. *Materials and Structures.* June de 2004, Vol. 37, pp. 301-304. Cito in: Análise de Tensões Residuais via Difração de Nêutrons em Barras de Aço AISI 1045 produzidas por Trefilação Combinada.

63. **CULLITY, B. D.** Elements of X-ray diffraction. . Massachussets - USA : s.n., 1978.

64. **CARNEIRO, Márcio S.** setembro/outubro de 2006, A simulação de injeção no desenvolvimento e fabricação de peças e moldes para injeção de termoplásticos. Revista Ferramental - Revista Brasileira da Indústria de Ferramentais, Vol. II, p. 27. 8.

65. **SANTOS, Carlos Augusto dos, et al., et al.** Evaluation of different Finite Element Approaches to Predict the Drawing Load.

66. **CARTER, Bruce J.** Computational Fracture Mechanics - Introductory Lecture. s.l. : http://fac.cfg.cornell.edu/~bruce/papers/intro_lecture.pdf - 30/11/2009, Jan. de 2001.

67. **BURNETT, David S.** Finite Element Analysis from Concept to Applications. 1988.

68. **WANG, Karen L. e ARGYROPOULOS, Vasilis.** Design and analysis of direct cold drawing of section rods through a single die. *Journal of Materials Processing Technology.* 2005, Vol. 166, pp. 345 - 358.

69. **RODRIGUES, Jorge e MARTINS, Paulo.** *Tecnologia Mecânica.* Portugal : Editora: Escolar, 2005. p. 497... Vols. I - Fundamentos Teóricos, Tecnologia da Deformação Plástica.

70. **SCHAEFFER, L., et al., et al.** Recursos Informáticos agilizam o Processo de Conformação. Setembro de 2001, pp. 146-157.

71. **BRAGA, Lincoln Ferreira.** Simulação Computacional por Elementos Finitos do Processo de Forjamento em Matriz Fechada de Rodas SAE 4140 de Utlilizaçãoem Ponte Rolante. *Dissertação de Mestrado.* Belo Horizonte : s.n., 21 de Dezembro de 2005. PUC Minas.

72. **SCHAEFFER, Lirio, BRITO, Alberto M.G. e GEIER, Martin.** Numerical Simulation using Finite Elements to Develop and Optimize Forging Processes. *Steel Research International - Forging and Precision Forming.* edição: 76, 2005, Vols. No 2/3, February/March, pp. 199-204. Metal Work Laboratory, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

73. **YANRAN, Zhan, WANG, Z.R. e WEIMIN, Chen.** Numerical Simulations for Extrusion and Ironing and Die-angle optimization. *Journal of Materials Processing Technology.* edição: 55, 1995, pp. 48-52. Division of Metalforming, #435. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology. People's Republic of China.

74. **ELICES, M.** Influence of Residual Stresses in the performance of Cold-drawn Perlitic Wires. *Journal of Materials Science.* 39, 2004, pp. 3889-3899. Departamento de Ciência de Materiales. Universidade Politécnica de Madri. Special section in honor of Robert W. Cahn.

75. **PHELIPPEAU, A., et al., et al.** Cold Drawn Steel Wires - Processing, Residual Stresses and Ductility (Part II: Synchrotron and Neutron Diffration). *Journal Compilation.* edição: Fadigue Fract Engng Mater Struct 29, 29 de September de 2006, pp. 255-265.

76. **ATIENZA, J.M., et al., et al.** Residual Stresses in Cold Drawn Ferritic Rods. *Science Direct.* 52, Ed. Elsevier. Madrid, Spain. 2005. , pp. 305-309.

77. **ATIENZA, J.M., et al., et al.** Residual Stresses in Cold Drawn Pearlitic Rods. *Science Direct.* 52, Ed. Elsevier. Madrid, Spain, 2005., pp. 1223-1228.

78. **ATIENZA, J.M. e ELICES, M.** Influence of Residual Stresses in the Tensile Test of Cold Drawn Wires. *Material and Strutures / Matériaux et Constructions.* October de 2003. Madrid, Spain., Vol. 36, pp. 548-552.

79. **WALTERS, John, FOSTER, Mike e LAMBERT, Dave.** Process Simulation of Drawing and Cold Heading Processes. *Wire Journal International.* edição: 38 No 3, Março de 2005, pp. 199-204.

80. **HAMADA, Takanari, HIROUCHI, Tetsuya e AKIYAMA, Masayoshi.** A Numerical Study on the Distribution of Temperature in a Fine High Carbon Steel Wire Subjected to High-Speed Drawing. *Wire Journal International.* May de 2001, pp. 86-92. Wai's Annual Convention, Nashville, Tennessee, USA..

81. **BALDISSERA, M.R., et al., et al.** Análise por Elementos Finitos do Processo ECAP (Prensagem em Canais Equiangulares) do Aço VMB 300. *17 CBECIMat (Foz do Iguaçu-Paraná).* Novembro de 2006, pp. 6434-6443. Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda..

82. www.matweb.com . [Online] [Citado em: 16 de 12 de 2007.]

83. **DOEGE, Eckart, MEYER-NOLKEMPER, Heinz e SAEED, Imtiaz.** Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe. Alemanha : Hanser Verlag Munchen Wien, 1986, pp. 95-98.

84. **HE, S., et al., et al.** Residual Stress Determination in Cold drawn Ateel Wire by FEM Simulation and X-Ray Diffraction. *Materials Science and Engineering.* 2003, Vol. 346, pp. 101-107.

85. **ROBINSON, T. e ARMSTRONG, C.G.** Study on Ring Compression Test using Physical Modelling and FE Simulation. *Journal of Materials Processing Technology.* 2004, Vols. 153-154, pp. 54-59.