

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EMPENO EM BARRAS TREFILADAS

Autora: Verônica Sousa de Araújo
Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin
Co-orientador: Prof. Dr. Alisson Duarte da Silva

Belo Horizonte
Março de 2015

VERÔNICA SOUSA DE ARAÚJO

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EMPENO EM BARRAS TREFILADAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Área de concentração: Metalurgia de transformação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin

Co-orientador: Prof. Dr. Alisson Duarte da Silva

Belo Horizonte

2015

FOLHA DE APROVAÇÃO

“Que darei eu ao Senhor, por todos os benefícios que me tem feito?” Salmos 116:12

“Mas em todas estas coisas somos mais do que vencedores, por aquele que nos amou.” Romanos 8:37

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor, toda glória e honra por mais esta vitória.

Ao meu amado Rafael, agradeço pelo apoio incondicional, pela motivação incessante, pela compreensão e, especialmente, pela presença constante em minha vida.

Carinhosamente, agradeço aos meus pais, irmãs, cunhados e sobrinhos por todo incentivo, pela compreensão e confiança depositados em mim.

Agradeço ao prof. Paulo Cetlin pela dedicação, pela grande experiência proporcionada e pelo exemplo de profissionalismo, cooperativismo e amizade.

Agradeço ao Alisson Duarte da Silva pelos ensinamentos e disponibilidade constante em ajudar.

A todos os colegas do Laboratório de Conformação de Chapas e do Laboratório de Ensaios Especiais, agradeço enormemente o companheirismo e todo auxílio recebido. Especialmente, agradeço ao Luiz Paulo Mendonça e Silva pelas atividades de metalografia e também à Marcela Nascimento pelo carinho, atenção e amizade em todos os momentos.

À CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG, ao PPGEM e a todos os órgãos de fomento, agradeço pelo apoio financeiro e pela infraestrutura física e acadêmica que proporcionaram o término deste trabalho.

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desta etapa.

RESUMO

Os processos de conformação mecânica permitem a fabricação de diversos produtos para o setor industrial. O ramo automotivo utiliza barras trefiladas para produção de hastes para amortecedores e a precisão dimensional é um fator decisivo de desempenho destes componentes. O processo de trefilação, no entanto, resulta em um perfil de tensões residuais que podem provocar empeno nas barras. A variação dos parâmetros de processo de trefilação pode ser determinante para a elevação das tensões residuais e da distorção final do componente. Neste trabalho, construíram-se modelos de simulação numérica para avaliar o perfil de tensões residuais e a distorção de barras trefiladas, modificando-se alguns parâmetros de processo. Investigaram-se os parâmetros geométricos da barra, o ângulo de trabalho da fieira, o coeficiente de atrito entre o material e a ferramenta e o alinhamento inicial entre a fieira e a barra. Concluiu-se que o parâmetro mais crítico para a ocorrência de empeno nas barras foi o desalinhamento angular da fieira, resultando em mais de 2% de distorção. Os demais parâmetros investigados apresentaram resultados baixos para distorção, porém acima do limite de retilineidade, o que indica a ocorrência do empeno para estas situações.

Palavras-chave: Distorção em barras; tensão residual; trefilação de barras; empeno em barras.

ABSTRACT

Metal forming processes provide various products for the industrial sector. The automotive industry uses drawn bars for the production of rods for shock absorbers and the dimensional accuracy is a key factor in the performance of these components. The drawing step in the manufacturing process of these rods results in a residual stress profile that can cause distortion in the bars. The variation of the drawing process parameters can be crucial to the level of residual stresses and distortions of the final component. In this work, numerical simulation models have been built to evaluate the profile of residual stresses and distortion of drawn bars, including the variation of some process parameters such as the geometric parameters of the bar, the working angle of the die, the coefficient of friction between the material and the tool and the initial alignment between the die and the bar. It has been concluded that the most critical parameter for the occurrence of distortions in the bars was the angular misalignment of the die, resulting in more than 4% of distortion. The other investigated parameters led to low distortions.

Keywords: Distortion; residual stress; bar drawing.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
I INTRODUÇÃO.....	14
II OBJETIVOS.....	16
III REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
III.I Processos de conformação mecânica.....	17
III.II Trefilação	18
III.II.I Conceito	18
III.II.II Aplicações industriais dos produtos trefilados	23
III.II.III Tensões e deformações no processo de trefilação	25
III.III Tensão residual.....	27
III.III.I Conceito	27
III.III.II Tensão residual na trefilação.....	28
III.IV Atrito.....	32
IV MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
IV.I Materiais.....	33
V.II Métodos	35
V RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
V.I Curvas de fluxo do Aço AISI 1045 do DEFORM® e do fio máquina	42
VII. Resultados das simulações.....	46
V.II.I Ângulo de trabalho (α).....	46
V.II.II Coeficiente de atrito (m)	49
V.II.III Geometrias do fio máquina.....	52
V.II.IV Posicionamento relativo entre fieira e barra	58
V.II.V Material Real versus Material DEFORM®	63
VI.III.VI Resultados gerais.....	67
VI CONCLUSÕES.....	70

VII SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
VIII REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Esquema simplificado do processo de trefilação (Guimarães, 2010)	19
Figura 3.2 – Detalhe interno da fieira: a) cone de entrada; b) cone de trabalho; c) cilindro de calibração; d) cone de saída (Bresciani Filho, et al.; 1997)	20
Figura 3.3 – Detalhamento dos fatores geométricos da fieira (Bresciani Filho, et al.; 1997)	21
Figura 3.4 – Definição de Δ para canal convergente (Backofen, 1972)	22
Figura 3.5 - Componentes de um amortecedor (Harris, 2014).....	24
Figura 3.6 – Processo simplificado para produção de haste para amortecedor (Couto, 2011)	25
Figura 3.7 – Tensões durante a trefilação (Adaptado; Nunes, 2008).....	25
Figura 3.8 – Tensões durante a trefilação (Adaptado; Corrêa, 2004)	26
Figura 3.9 – Resultante da interação entre temperatura, tensão e microestrutura (Bhadeshia, 2002)	28
Figura 3.10 – Tensões residuais longitudinais em arame de latão trefilado a frio (Wang e Gong, 2002).....	30
Figura 3.11 – Tensões residuais longitudinais em arame de latão trefilado a frio (Dieter, 1986)	31
Figura 4.2 – Corpo de prova de tração	34
Figura 4.3 – Malha tetraédrica da barra	35
Figura 4.4 – Formas do fio máquina: (A) Reto com seção circular; (B) Curvo com seção circular; (C) Reto com seção ovalizada; (D) Reto com defeito superficial.....	36
c) $2\alpha = 30^\circ$; d) $2\alpha = 40^\circ$	37
Figura 4.6 – Posicionamentos entre fieira e barra: (A) Alinhamento centralizado; (B) Desalinhamento transversal; (C) Desalinhamento angular.	38
Figura 4.7 – Esquema da simulação de trefilação de uma barra	39
Figura 5.1 – Curva de fluxo do material da biblioteca do software DEFORM ..	43
Figura 5.2 – Curva de engenharia obtida pelos resultados dos ensaios de tração	43

Figura 5.3 – Curva de fluxo obtida pelos resultados dos ensaios de tração	44
Figura 5.4 – Comparação das Curvas de fluxo do material do DEFORM e do fio máquina	44
Figura 5.6 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano YZ para diferentes ângulos de trabalho.....	47
Figura 5.7 – Perfis de distorção para diferentes ângulos de trabalho	48
Figura 5.8 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano XZ para diferentes coeficientes de atrito	50
Figura 5.9 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano YZ para diferentes coeficientes de atrito	50
Figura 5.10 – Perfis de distorção para diferentes coeficientes de atrito.....	51
Figura 5.11 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano XZ para diferentes geometrias do fio máquina	52
Figura 5.12 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano YZ para diferentes geometrias do fio máquina	53
Figura 5.13 – Detalhe da assimetria de distribuição de tensões para barra curva	54
Figura 5.14 – Detalhe da região do defeito superficial	54
Figura 5.15 – Distribuição de tensões longitudinais residuais ao longo do plano XZ para diferentes geometrias	55
Figura 5.16 – Distribuição de tensões longitudinais residuais ao longo do plano YZ para diferentes geometrias	55
Figura 5.17 – Perfis de distorção diferencial para diferentes geometrias do fio máquina	56
Figura 5.18 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano XZ para diferentes alinhamentos do fio máquina e fieira.....	58
Figura 5.19 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano YZ para diferentes alinhamentos do fio máquina e fieira.....	59
Figura 5.20 – Diferença no perfil de tensões residuais longitudinais no plano XZ após trefilação e após retorno elástico, para desalinhamento angular	59
Figura 5.21 – Diferença no perfil de tensões residuais longitudinais no plano YZ após trefilação e após retorno elástico, para desalinhamento angular	60

Figura 5.22 – Distribuição de tensões longitudinais ao longo do plano XZ após trefilação e após retorno elástico, para desalinhamento angular	60
Figura 5.23 – Distribuição de tensões longitudinais ao longo do plano YZ após trefilação e após retorno elástico, para desalinhamento angular	61
Figura 5.24 – Distribuição de tensões longitudinais residuais ao longo do plano XZ para diferentes alinhamentos entre fieira e barra	61
Figura 5.25 – Distribuição de tensões longitudinais ao longo do plano YZ para diferentes alinhamentos entre fieira e barra.....	62
Figura 5.26 – Perfis de distorção diferencial para diferentes alinhamentos de fieira e barra.....	62
Figura 5.27 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano XZ para material DEFORM e material Real, alinhamento centralizado, coeficiente de atrito 0,01 e geometria reta.....	64
Figura 5.28 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano YZ para material DEFORM e material Real, alinhamento centralizado, coeficiente de atrito 0,01 e geometria reta.....	64
Figura 5.29 – Distribuição de tensões longitudinais ao longo do plano XZ para material DEFORM e material Real, alinhamento centralizado, coeficiente de atrito 0,01 e geometria reta	65
Figura 5.30 – Distribuição de tensões longitudinais ao longo do plano YZ para material DEFORM e material Real, alinhamento centralizado, coeficiente de atrito 0,01 e geometria reta	65
Figura 5.31 – Perfis de distorção para Material do DEFORM e Material Real, alinhamento centralizado, coeficiente de atrito 0,01 e geometria reta	66
Figura 5.33 – Mapa de distorção por variável simulada.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Processos e produtos típicos de conformação mecânica	17
Tabela III.2 – Classificação de barras, arames e fios.....	23
Tabela IV.1 – Detalhamento das simulações	39
Tabela IV.2 – Condições de contorno para a simulação de trefilação	40
Tabela V.1 – Dados da Curva de Fluxo do Aço AISI 1045	42

I INTRODUÇÃO

A conformação mecânica representa importante papel no cenário industrial. Grande parte dos produtos do setor secundário da economia advém ou são formados por subprodutos oriundos de processos por conformação mecânica de metais, como é o caso da indústria automobilística, de bens de consumo em geral, construção civil, entre outros. Fatores econômicos são guia para investimentos em tecnologia e novos desenvolvimentos para aprimoramento dos processos e soluções para novas aplicações. No entanto, a melhoria dos processos e o desenvolvimento de tecnologia tornam-se bastante complexos de acordo com a aplicação.

Os amortecedores são um dos sistemas mecânicos de veículos, sendo responsáveis pela absorção da energia armazenada nas molas em função do impacto entre o veículo e o solo, pela estabilização de vibrações da carroceria e também pela ligação entre o chassi e a carroceria. Alguns de seus componentes são produzidos por conformação mecânica, cujo processo de fabricação pode ser estudado a partir de simulação computacional. A primeira etapa do processo de fabricação de hastes para amortecedores, a trefilação, comumente acarreta empenamento da barra, o que aumenta os custos de produção e reduz a produtividade. O estudo do empeno nos processos de trefilação é bastante complexo, em virtude do estado de tensões ao qual o material é submetido e dos diversos fatores que influenciam o processamento do material.

A utilização de ferramentas CAE de alto desempenho como códigos de simulação numérica com base no Método dos Elementos Finitos (FEM) tem um papel importante na melhoria contínua dos processos, em que se destacam as ferramentas computacionais de simulação. As simulações numéricas baseadas no Método de Elementos Finitos são capazes de facilitar a análise esta complexidade, para que se obtenham resultados passíveis de serem extrapolados para a realidade industrial.

A busca pelas condições ideais de processamento por trefilação, ainda que em ambiente computacional, requer entender a correlação entre os parâmetros do processo, tais como o ângulo de trabalho, a geometria do fio máquina e seu alinhamento com a ferramenta. Ferramentas CAE em 3D assumem um papel importante na verificação das causas do empeno à medida que permitem a simulação do processo de fabricação e a avaliação das variáveis de processo, buscando correlacioná-las à ocorrência deste defeito.

II OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é simular o empeno em barras trefiladas de aço AISI 1045, através do Método de Elementos Finitos.

Como objetivos específicos, buscou-se:

- Desenvolver um modelo com base no Método dos Elementos Finitos para simulação numérica de trefilação de barras cilíndricas;
- Realizar simulações variando-se os parâmetros do processo;
- Verificar a relação entre os parâmetros e a distorção das barras;
- Identificar os parâmetros mais significativos para a ocorrência do empeno de barras trefiladas.

III REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

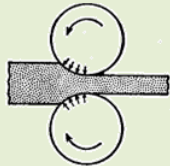
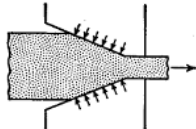
III.1 Processos de conformação mecânica

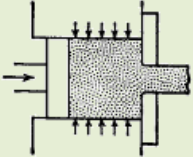
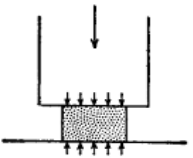
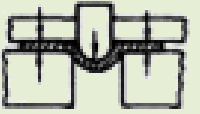

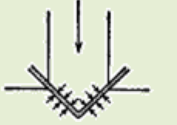
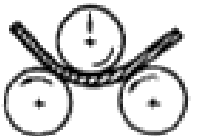
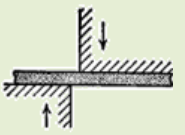
Entende-se por conformação mecânica o processo no qual são aplicados esforços mecânicos externos a fim de impor mudança de forma e dimensões em materiais metálicos (Helman e Cetlin, 2005).

Helman e Cetlin (2005) ainda destacam que a temperatura de processamento e as características metalúrgicas do material conformado são importantes variáveis nos processos de conformação, conferindo características distintas aos produtos. Por isso, os processos de conformação mecânica são usualmente classificados como trabalho a frio ou a quente. Outros importantes parâmetros desses processos são a velocidade de deformação e o grau de deformação imposto ao material durante seu processamento.

Os principais processos de conformação mecânica são apresentados na Tabela 1, sendo destacados os esforços preponderantes, a temperatura usual de trabalho e os principais produtos.

Tabela III.1 – Processos e produtos típicos de conformação mecânica

Processo	Força preponderante	Trabalho		Esquema	Semi-produtos ou produtos
		A frio	A quente		
Laminação	Compressão direta	X	X		Placas, chapas, barras, perfis.
Trefilação	Compressão indireta	X			Barras, arames, fios, tubos.

Processo	Força preponderante	Trabalho		Esquema	Semi-produtos ou produtos
		A frio	A quente		
Extrusão	Compressão indireta	X	X		Tubos, barras, perfis.
Forjamento	Compressão direta	X	X		Peças moldadas
Estampagem	Tração	X	X		Peças estampadas a partir de chapas
Estiramento	Tração	X			Peças de chapas estiradas
Dobramento	Flexão	X	X		Peças de chapas e tiras dobradas
Calandragem	Flexão	X			Tubos
Corte	Cisalhamento	X	X		Peças cortadas

Fonte: Adaptada, Bresciani Filho, et al. (1997)

III.II Trefilação

III.II.I Conceito

A trefilação é um processo de conformação mecânica amplamente conhecido e usada para produção de barras, fios e tubos, usualmente trabalhados a frio. Por definição, é um processo de fabricação por deformação plástica, no qual a matéria-prima passa pela fieira sendo

tracionada na saída da ferramenta (Figura 3.1), gerando redução na área da seção transversal e aumento no comprimento do material trefilado (Dieter, 1986).

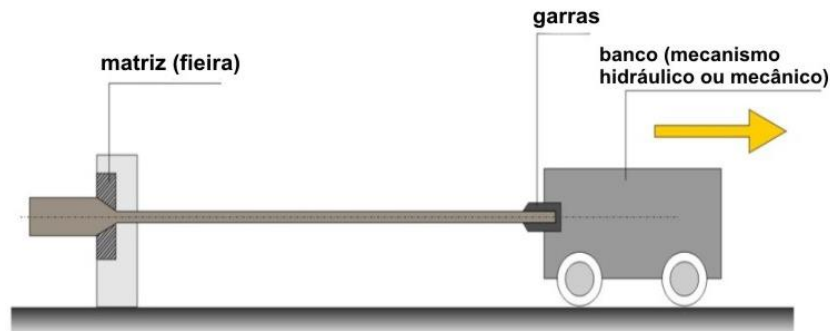


Figura 3.1 – Esquema simplificado do processo de trefilação (Guimarães, 2010)

Em um passe de trefilação, a redução da área da seção transversal pode ser calculada pela relação:

$$r = \frac{(A_i - A_f)}{A_i} \times 100 \% \quad (3.1)$$

onde A_i é a área da seção transversal antes de ser trefilado e A_f , a área da seção transversal após ser trefilado.

Os produtos trefilados, quando trabalhados a frio, apresentam ganho de resistência mecânica, acabamento superficial de boa qualidade e ótima precisão dimensional, características que, aliadas às altas velocidades de processamento (entre 30m/min a 100m/min), tornam o processo muito vantajoso (Bresciani Filho, et al.;1997).

Apesar de apresentar uma construção relativamente simplificada, o processamento de material por trefilação é complexo, pois depende da interação de diversos parâmetros, tais como a geometria da fieira, propriedades iniciais do material, percentual de redução de área,

lubrificação e velocidade de trefilação (Kabayama, Taguchi e Martinez; 2009).

A ferramenta responsável pela redução da seção transversal da matéria-prima é denominada fieira ou trefila. Basicamente, essa ferramenta é um cilindro de metal com um canal interno convergente, dividido em 4 seções: zona de entrada, zona de redução, cilindro de calibração e zona de saída (Figura 3.2). Comercialmente, a geometria do canal interno das fieiras podem ser circular, quadrada ou hexagonal, para aplicação em diversas áreas industriais.

As regiões internas da ferramenta possuem finalidades distintas durante o processo. A zona de entrada é destinada a guiar o material a ser trefilado até a zona de redução; a zona de redução ou trabalho destina-se a provocar o esforço compressivo sobre o material, causando a mudança de forma. Caracteriza-se pelo semiângulo, responsável pelo nível de deformação imposta ao material. O cilindro de calibração objetiva manter e aferir as dimensões do produto trefilado, enquanto que a zona de saída permite que o material saia livremente sem danos à ferramenta ou à superfície do produto (Bresciani Filho, et al.;1997).

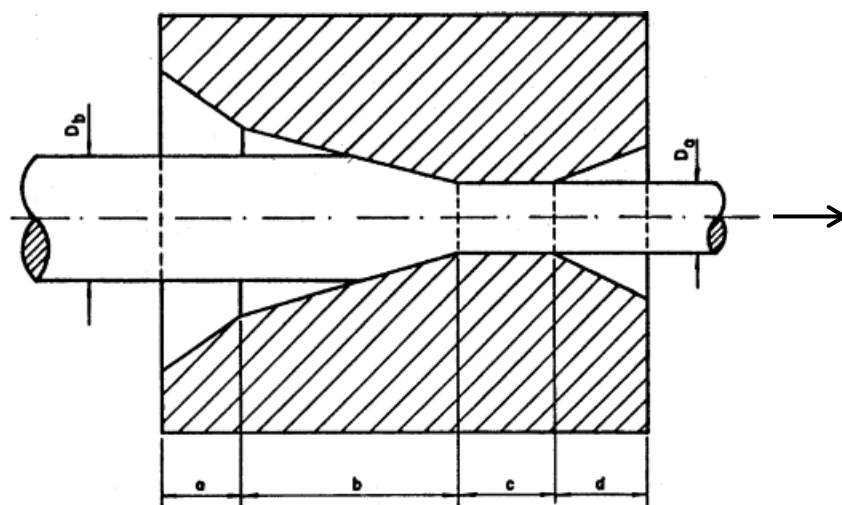


Figura 3.2 – Detalhe interno da fieira: a) cone de entrada; b) cone de trabalho; c) cilindro de calibração; d) cone de saída (Bresciani Filho, et al.; 1997)

Bresciani (1997) afirma que as propriedades mecânicas dos materiais trefilados são fortemente influenciadas pela geometria da fieira. A Figura 3.3 apresenta os principais fatores geométricos das fieiras, sendo estes os ângulos de entrada, trabalho e saída (β , α e γ , respectivamente), o comprimento do cilindro de calibração (H_c) e o diâmetro do cilindro de calibração (D_c).

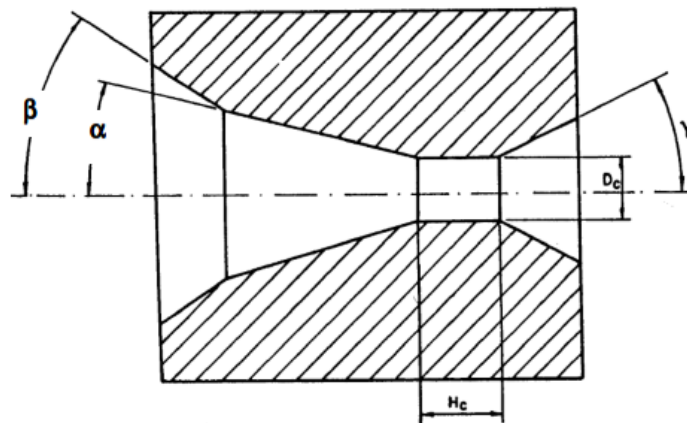


Figura 3.3 – Detalhamento dos fatores geométricos da fieira (Bresciani Filho, et al.; 1997)

Diversos trabalhos têm sido realizados no intuito de investigar a relação entre as características da ferramenta e do processo e as características dos produtos trefilados.

Entre os fatores geométricos, destaca-se o ângulo de trabalho ou da fieira (2α), responsável pela aplicação dos esforços compressivos no material. São também relevantes o comprimento de calibração (H_c) e o raio do filete entre a região cônica (b) e a zona de calibração (c) (Salcedo, et al; 2010).

Kabayama, Taguchi e Martinez (2009) verificaram que, mantendo-se os demais parâmetros da fieira, ângulos de trabalho menores geram menores coeficientes de atrito e força de trefilação. Ao variar o comprimento do paralelo, fixando-se as demais variáveis, foi verificado

que a força de trefilação e o coeficiente de atrito aumentam com o comprimento de calibração, conhecido como paralelo.

Uma medida importante no processo de trefilação foi definida por Backofen (1972) como sendo a relação entre a espessura e o comprimento dos canais convergentes, visando correlacionar a geometria com as propriedades mecânicas dos materiais extrudados ou trefilados. Este parâmetro delta (Δ) é o quociente entre a espessura média (h) e o comprimento da aresta de contato entre o material e o canal (L), definida pela equação 3.2.

$$\Delta = \frac{h}{L} \quad (3.2)$$

Para um canal convergente, a aplicação correta da fórmula seria:

$$\Delta = \frac{l}{L} \quad (3.3)$$

sendo l o arco circular no centro da região plástica e L o comprimento de contato entre o material e a matriz, como mostrado na Figura 3.4.

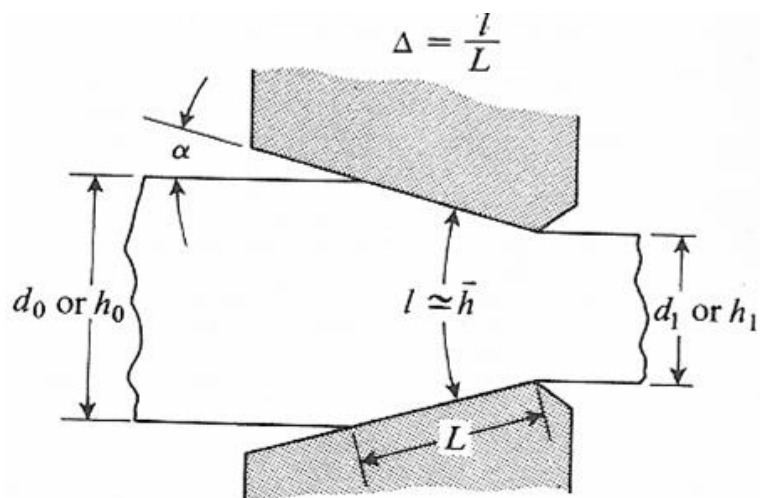


Figura 3.4 – Definição de Δ para canal convergente (Backofen, 1972)

III.II.II Aplicações industriais dos produtos trefilados

O processo de trefilação produz materiais com elevada resistência e boas características de acabamento. Em função destas características e da grande variedade de bitolas produzidas, o campo de aplicação dos produtos trefilados é bastante amplo.

Comumente, os produtos trefilados apresentam seção circular e são divididos em barras e arames (indústria civil/mecânica) ou fios (fins diversos), além dos tubos usualmente comercializados. Na literatura, não foi encontrada padronização para a nomenclatura de tais produtos, entretanto, verificou-se que a definição apresentada na Tabela 2 é usualmente aceita.

Tabela III.2 – Classificação de barras, arames e fios

Produtos trefilados	Faixa de diâmetros	
Barras	$\phi > 5\text{mm}$	
Arames ou fios	Grossos	$5\text{mm} > \phi > 2\text{mm}$
	Médios	$2\text{mm} > \phi > 0,5\text{mm}$
	Finos	$0,5\text{mm} > \phi > 0,15\text{mm}$
	Capilares	$\phi < 0,15\text{mm}$

Fonte: Adaptada, Bresciani Filho, et al. (1997)

Os materiais trefilados possuem inúmeras aplicações industriais, desde insumos até produtos acabados. Os arames e fios de aço são utilizados como matéria-prima ou produto acabado em diversas aplicações, entre as quais se destacam a fabricação de pregos, grampos, parafusos, rebites, porcas, arruelas, cercas, lisas ou farpadas, como também as aplicações nas indústrias civil, musical, elétrica e mecânica. As barras e arames de maiores diâmetros são destinados à produção de insumos para indústria de amortecedores, molas, eixos em geral, usinagem, entre outras aplicações (Bresciani Filho, et al.;1997).

Os amortecedores compõem um dos sistemas mecânicos mais importantes de automóveis. São responsáveis pela absorção da energia armazenada nas molas em função do impacto entre o veículo e o solo, pela estabilização de vibrações da carroceria e também pela ligação entre o chassi e a carroceria. Vários componentes constituem o amortecedor, como mostra a Figura 3.5, destacando-se os cilindros, a haste do pistão, a válvula base e o fluido hidráulico, no caso, óleo. Dentre os componentes dos amortecedores, a haste do pistão é uma peça produzida por conformação mecânica e tratamento térmico.

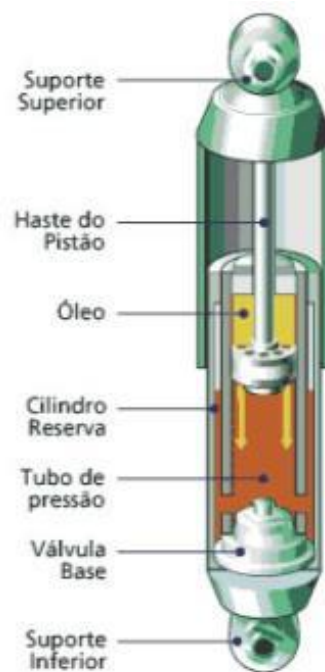


Figura 3.5 - Componentes de um amortecedor (Harris, 2014)

A primeira etapa da produção das hastes é a trefilação do fio máquina para barras de diâmetro pré-definido. Sequencialmente, as barras passam por tratamento térmico de austenitização e têmpera superficial. No processo simplificado, a sequência de operações para produção da haste de amortecedor seria a indicada na Figura 3.6.

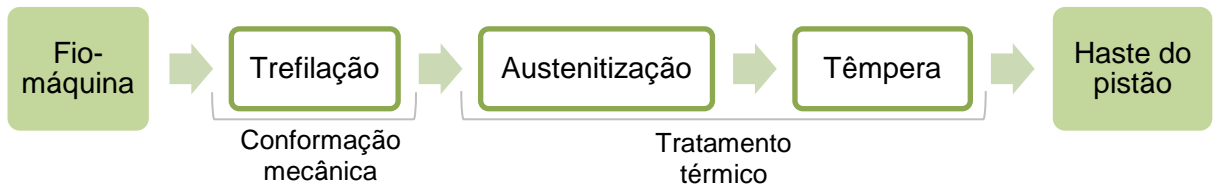


Figura 3.6 – Processo simplificado para produção de haste para amortecedor (Couto, 2011)

No entanto, no processo real, os produtos de cada etapa da sequência de fabricação estão sujeitos à ocorrência de empenos, impondo a inclusão de etapas de desempenho ao final das sequências de trefilação e de tratamento térmico. As operações de desempenho são onerosas e comprometem tanto a produtividade quanto a eficiência da produção.

III.II.III Tensões e deformações no processo de trefilação

Na trefilação, existe uma combinação de esforços trativos externos, responsáveis pela movimentação do material na direção longitudinal, e de esforços compressivos radiais realizados pelas paredes da fieira sobre o material. Esse perfil de tensões é caracterizado por tensões trativas (σ_T) ao longo da direção de trefilação, tensões compressivas (σ_C) na direção radial da zona de trabalho e tensões cisalhantes (τ) ao longo da superfície em contato com a zona de trabalho (Figura 3.7).

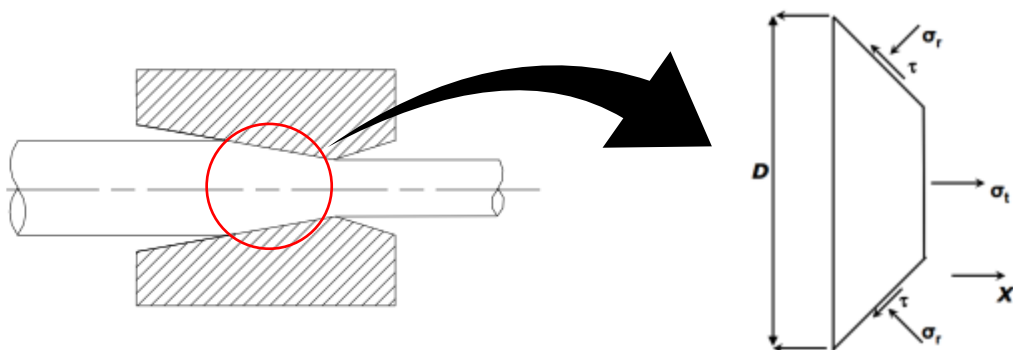


Figura 3.7 – Tensões durante a trefilação (Adaptado; Nunes, 2008)

As deformações decorrentes da trefilação não são homogêneas ao longo da seção transversal do material trefilado. Este fato decorre devido ao esforço compressivo que atua, em função do semiângulo da ferramenta, mais superficialmente do que no centro da barra. De acordo com Cetlin e Helman (2005), o contato com a matriz introduz uma componente radial à velocidade inicial do material. Ao sair da fieira, o movimento volta a ser apenas longitudinal, isto é, no sentido da trefilação. Na Figura 3.8, são mostrados elementos ao longo da superfície e do centro de uma barra sob a ação de uma fieira. Nota-se que o elemento superficial sofre deformações cisalhantes que geram sua distorção, além das deformações compressivas e trativas. Em contrapartida, os elementos ao longo do eixo são deformados por tração e compressão, não apresentando a distorção visualizada no anterior. Essa deformação adicional sofrida na superfície é chamada de “deformação redundante”. O nível de deformação redundante se relaciona ao perfil cônico da fieira, isto é, é determinado pelo semiângulo de trabalho. Quanto menores forem os ângulos menor deformação redundante será introduzida ao material.

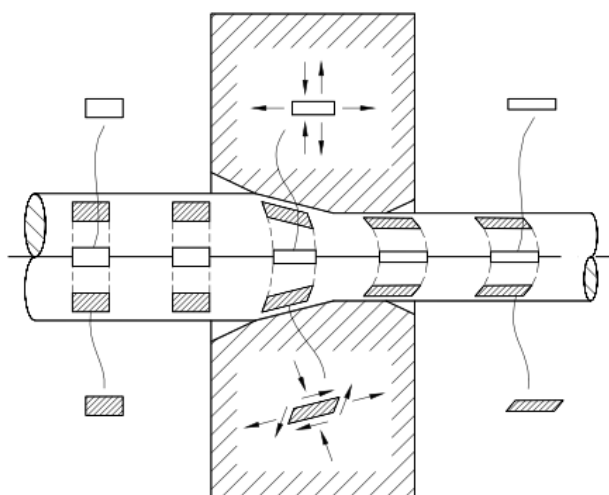


Figura 3.8 – Tensões durante a trefilação (Adaptado; Corrêa, 2004)

III.III Tensão residual

III.III.I Conceito

Define-se tensão residual como as tensões presentes em um corpo que não está submetido a carregamentos externos ou gradientes de temperatura. Um sistema com tensões residuais estará em equilíbrio, sendo, por conseguinte, as resultantes das forças e dos momentos nulas (Dieter, 1986)

Dieter (1986) afirma que o estado de tensões residuais comumente apresentado em um componente é tridimensional, tornando sua determinação muito complexa. Pela sua natureza, verifica-se que o máximo valor, em módulo, atingido pelas tensões residuais é o limite de escoamento do material, sendo que, acima deste limite, ocorrerá deformação plástica do material e o perfil de tensões residuais será alterado.

Os processos de fabricação baseados em deformação plástica, em geral, se caracterizam pela presença de deformações heterogêneas. A principal consequência deste perfil não homogêneo de deformações é a ocorrência de tensões residuais. Diversos processos mecânicos, térmicos e químicos estão relacionados à origem das tensões residuais nos materiais: processos de manufatura por deformação plástica, soldagem, usinagem, nitretação, cementação, têmpera, entre outros. Assim sendo, todos os processos de manufatura que envolvam deformação plástica heterogênea, gradientes térmicos e/ou transformação de fase provavelmente produzirão componentes com tensões residuais. (Bhadeshia, 2002).

Bhadeshia (2002) destacou que a interação entre alguns fatores, destacados na Figura 3.9, tem por resultado a presença de tensões residuais nos componentes. A interdependência entre tais fatores

demonstram quão complexo é o estado de tensões em um sistema de tensões residuais. As distorções de forma estão associadas, em grande parte, à existência de tensões residuais nos materiais (Totten et al, 2002 apud Nunes, 2012). Para a maioria dos processos, apenas a componente longitudinal da tensão residual é associada às distorções de forma, devido à simetria dos componentes, como destacado por Dieter (1961).

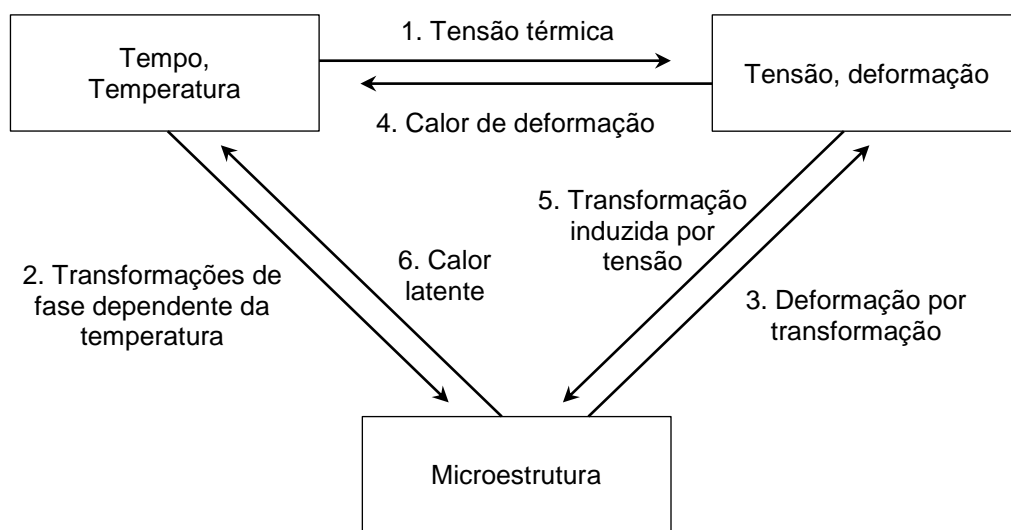


Figura 3.9 – Resultante da interação entre temperatura, tensão e microestrutura (Bhadeshia, 2002)

III.III.II Tensão residual na trefilação

O processo de trefilação impõe deformações plásticas ao material que induzem distribuições de tensões residuais, as quais se alteram durante as diferentes etapas do processo (Dieter, 1986). Tensões residuais macroscópicas são criadas na trefilação pela não homogeneidade no escoamento do material em uma dada distância do eixo central. O estado de tensão interna macroscópica no material trefilado é determinado pelas condições de deformação em cada passe de redução.

O perfil de tensões residuais na trefilação pode ser associado à profundidade da deformação exercida. Quando a redução é abaixo de 1%, a deformação é superficial gerando tensões compressivas na superfície e trativas no interior, enquanto que este perfil se inverte para reduções maiores, sendo a tensão longitudinal trativa na superfície e compressiva no interior do material, conforme apontado por Dieter (1986). A distribuição das tensões residuais deve estar em equilíbrio no componente, porém são relativamente instáveis. Em decorrência disto, os distúrbios não controlados de etapas posteriores a trefilação, como tratamentos térmicos, podem gerar mudanças permanentes de forma e dimensão nos materiais.

Os parâmetros do processo de trefilação, tais como coeficiente de atrito, geometria da fiação, velocidade de trefilação, grau de redução, afetam diretamente a qualidade do produto final. Segundo Wang e Gong (2002), durante o processo de trefilação, as tensões residuais introduzidas pela fiação dependem diretamente do semiângulo e do grau de redução aplicado. A Figura 3.10 apresenta perfis de tensões residuais em barras trefiladas em diferentes níveis de redução de área, para baixo ângulo de trabalho. Observa-se que, para reduções pequenas, o perfil de tensões residuais é compressivo na superfície e trativo na região central. Este perfil é fortemente alterado ao elevar-se o nível de redução aplicado ao material.

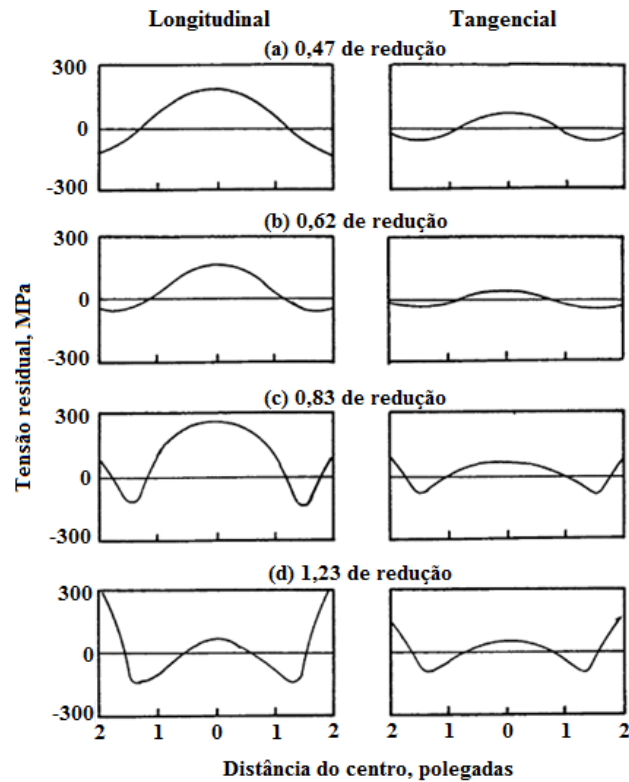


Figura 3.10 – Tensões residuais longitudinais em arame de latão trefilado a frio (Wang e Gong, 2002)

Linicius e Sachs, apud Dieter (1986), determinaram a relação entre o ângulo de trabalho da fieira, a redução de área e a tensão residual longitudinal (Figura 3.11). Observa-se que para um determinado valor de redução de área, a tensão longitudinal superficial aumenta com o ângulo, independente da redução. No entanto, fixando-se um valor de ângulo de trabalho, verifica-se que a tensão residual longitudinal na superfície atinge um valor máximo para determinada redução, exibindo um perfil semelhante para os demais ângulos de trabalho investigados.

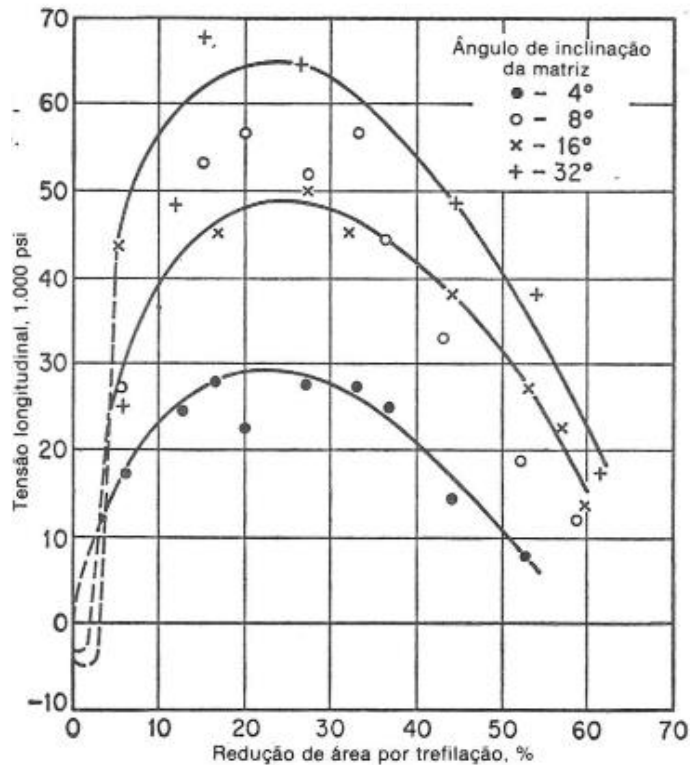


Figura 3.11 – Tensões residuais longitudinais em arame de latão trefilado a frio (Dieter, 1986)

Salcedo et. al. (2010) desenvolveram simulações numéricas para avaliação das tensões residuais variando alguns parâmetros geométricos da fieira e verificaram que a tensão residual longitudinal aumenta quando o semiângulo de trabalho aumenta ou quando o percentual de redução de área é reduzido.

Uma das dificuldades encontradas na realização deste trabalho foi a bibliografia limitada sobre o empeno associado às tensões residuais. Verificou-se na literatura que o estudo do empeno associado às tensões residuais nos processos de conformação mecânica ainda é pouco relatado, tendo-se escassas referências a este assunto, especialmente sobre a aplicação do Método dos Elementos Finitos na avaliação do comportamento dos materiais sob tensões residuais.

III.IV Atrito

A ocorrência de movimento entre duas superfícies originará resistência a este movimento, conhecida como atrito, usualmente designado por τ , e mede a força de resistência ao movimento por área de contato (Avitzur, 1968).

O atrito é muito complexo do ponto de vista fenomenológico, sendo objeto de estudos da área de Tribologia. No entanto, muito pouco se sabe sobre a relação entre o atrito e outros fatores dos processos (Lenard, 2002). Avitzur (1968) destaca duas descrições matemáticas para o mecanismo de atrito: o coeficiente de atrito Coulomb e o fator constante de atrito Shear.

A Lei de Coulomb estabelece que a tensão na superfície (τ) é proporcional à pressão estabelecida entre dois corpos em contato (p), sendo regida pela equação:

$$\tau = \mu \times p \quad (3.4)$$

sendo μ o coeficiente de atrito, considerado constante para dados dois materiais e independente da velocidade (Lenard, 2002).

O fator constante de atrito Shear, como destacado por Avitzur (1968), é um mecanismo que prevê que a tensão cisalhante constante é independente da pressão entre os materiais, durante a deformação plástica. Portanto, quando o material é deformado plasticamente, tem-se que:

$$\tau = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (3.5)$$

O fator de atrito *Shear*, m , é tido como constante para um dado material, sob condições constantes de superfície e temperatura, sendo considerado independente da velocidade.

IV MATERIAIS E MÉTODOS

IV.1 Materiais

O material trefilado utilizado nas simulações foi aço AISI 1045, amplamente utilizado na fabricação de barras para amortecedores automotivos. Inicialmente, utilizaram-se as propriedades mecânicas e metalúrgicas informadas na biblioteca do software de simulação numérica DEFORM®3D. Para a temperatura ambiente (20°C), o material apresenta módulo de Young de 210GPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

Foram adquiridas quatro amostras de fio máquina, gentilmente cedidas pela empresa Arcelor Mittal, utilizadas para determinação das propriedades do material antes do processo de trefilação. O material do fio máquina é o aço AISI 1045 e definiu-se avaliar suas propriedades mecânicas e metalúrgicas, a fim de serem obtidos dados para as simulações de forma a comparar os resultados do material referenciado na biblioteca do DEFORM®.

As propriedades mecânicas do fio máquina foram obtidas através de ensaio de tração, realizado segundo a norma NBR ISO 6892, que regulamenta os ensaios de tração de materiais metálicos a temperatura ambiente. Atendendo aos parâmetros normativos, os corpos de prova foram usinados na forma cilíndrica, cujas dimensões foram definidas para corpos de provas proporcionais, isto é, o comprimento da seção transversal é relacionado ao seu diâmetro por um parâmetro. A Figura 4.2 mostra o desenho e dimensões do corpo de prova de tração.

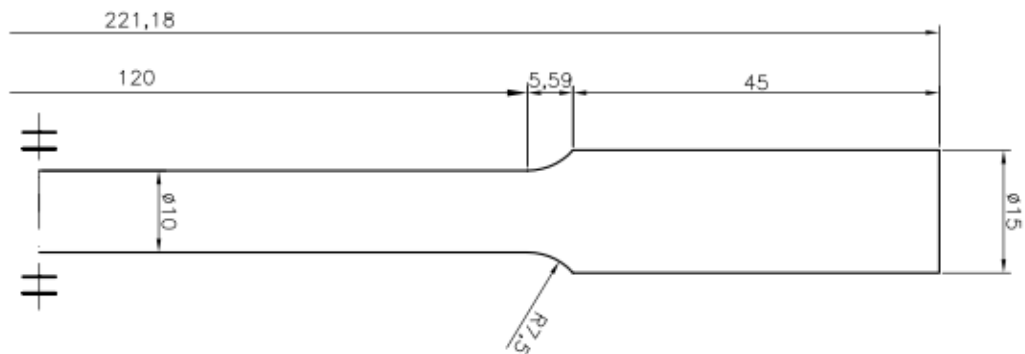


Figura 4.2 – Corpo de prova de tração

Os ensaios de tração foram realizados na máquina de ensaios universal INSTRON®, modelo 5582. Com base no diâmetro do corpo de prova (10mm) e na tensão de ruptura nominal do material (585MPa), previu-se que a carga máxima do ensaio seria da ordem de 46kN. Portanto, foi utilizada a célula de carga de 100kN. O ensaio foi realizado com uma velocidade do cabeçote de 0,120mm/s, que corresponderia a uma taxa de deformação de $1 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$.

Todos os corpos de prova foram ensaiados até a ruptura, porém um ensaio foi desconsiderado, pois apresentou ruptura muito próxima à garra de fixação. A carga máxima alcançada nos ensaios foi 55kN. O aspecto da fratura foi do tipo taça-cone, característico de materiais dúcteis.

V.II Métodos

As simulações numéricas do processo de trefilação foram realizadas com auxílio do software DEFORM®3D, disponibilizado no Laboratório de Conformação de Chapas da Escola de Engenharia da UFMG. Este software é baseado no método de elementos finitos (FEM). Os parâmetros de simulação utilizados foram *time step* de 0,01s e o método de iteração Newton-Raphson.

O material base para a trefilação possui o formato cilíndrico, com comprimento inicial de 200mm e diâmetro inicial de 22,5mm. A malha definida para a simulação possui geometria tetraédrica e foi constituída de 50000 elementos e 11000 nós, aproximadamente, conforme Figura 4.3. A relação dimensional entre os elementos foi definida em 2:1, isto é, a malha pode incorporar elementos com até o dobro do tamanho mínimo.

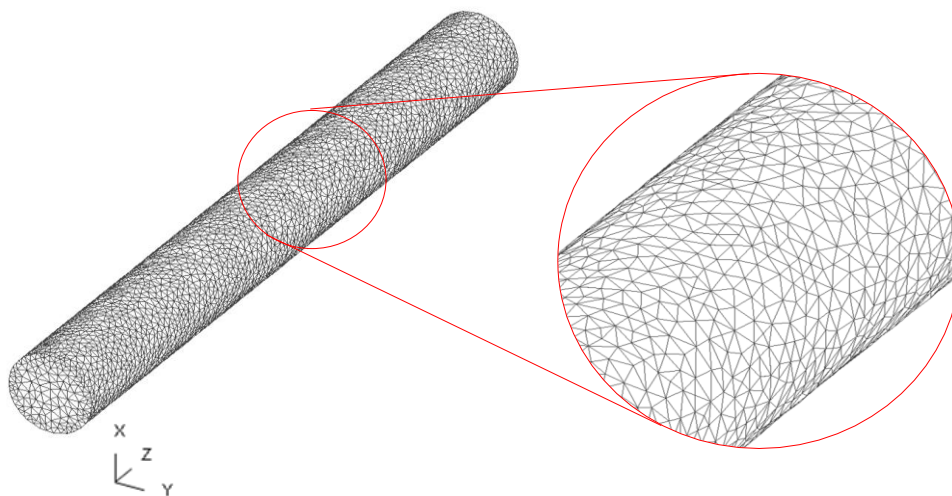


Figura 4.3 – Malha tetraédrica da barra

O processo de trefilação foi definido para redução do diâmetro da barra de 22,5mm para 20,4mm (17,8% de redução de área), mantendo-se a geometria circular. Assim sendo, o diâmetro do cilindro de calibração é 20,4mm. O comprimento inicial da barra é de 200,0mm, passando a 243,3mm após o processamento.

Os parâmetros selecionados para as simulações foram a forma do fio máquina, o ângulo de trabalho da fieira, o coeficiente de atrito entre o material e a ferramenta e o alinhamento entre a fieira e a barra, antes da trefilação.

Foram consideradas quatro formas iniciais do fio máquina, sendo constante o comprimento inicial de 200mm e diâmetro inicial de 22,5mm. A primeira forma refere-se a um cilindro padrão, com comprimento retilíneo e seção circular, sendo indicado como modelo ideal para trefilação. A segunda forma foi elaborada a partir de uma seção da bobina de fio máquina, tendo, portanto, seção circular e comprimento curvilíneo, com raio de curvatura de 600mm, conforme medida da bobina de fio máquina. A terceira forma foi construída baseando-se nos limites de ovalização admissíveis para as barras trefiladas de 1% do diâmetro, com comprimento retilíneo e seção transversal ovalizada. Para a quarta geometria atribui-se um defeito superficial a estrutura de comprimento retilíneo e seção circular. O defeito possui forma esférica com 3mm de raio e seu centro foi posicionado à 10,25mm do centro da seção. A Figura 4.4 apresenta os desenhos das quatro geometrias investigadas.

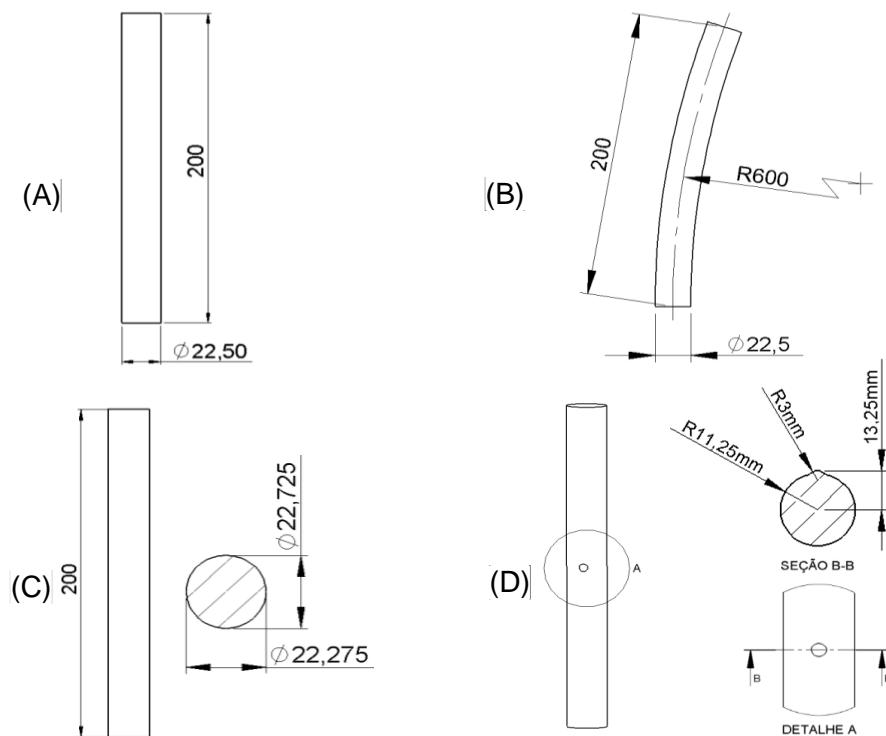


Figura 4.4 – Formas do fio máquina: (A) Reto com seção circular; (B) Curvo com seção circular; (C) Reto com seção ovalizada; (D) Reto com defeito superficial.

Os parâmetros do processo de trefilação foram baseados nos resultados apresentados por Couto (2011), sendo a geometria da fieira definida para ângulos (2α) de 12° , 18° , 30° e 40° e comprimento de paralelo de 8mm. A Figura 4.5 mostra o detalhe do furo cônico das fieiras desenhadas para as simulações.

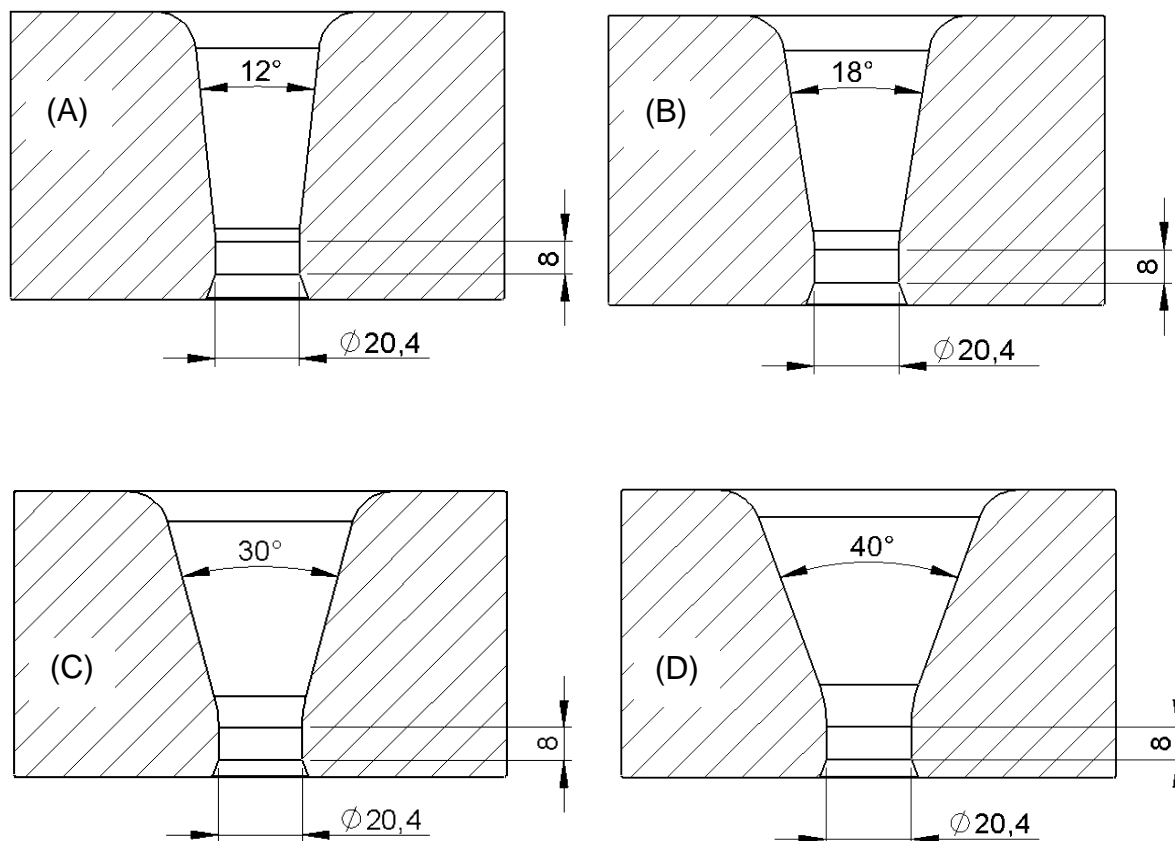


Figura 4.5 – Geometria das fieiras: a) $2\alpha=12^\circ$; b) $2\alpha =18^\circ$;
c) $2\alpha =30^\circ$; d) $2\alpha =40^\circ$

O coeficiente de atrito entre a fieira e o material foi um dos parâmetros variados, cujos valores adotados foram 0,1; 0,2 e 0,3, por serem valores geralmente atribuídos na literatura aos processos de conformação.

Finalmente, os últimos parâmetros atribuídos às simulações se relacionam ao posicionamento da fieira, considerando-se três situações, destacadas a seguir e na Figura 4.6:

- Feira centralizada com o fio máquina – situação idealizada de processo, na qual o fio máquina encontra-se alinhado e centralizado com a feira;
- Feira com desalinhamento transversal – feira deslocada em 5mm no eixo Y em relação ao centro do fio máquina;
- Feira com desalinhamento angular – feira rotacionada em 5°, em sentido horário, em relação ao eixo X.

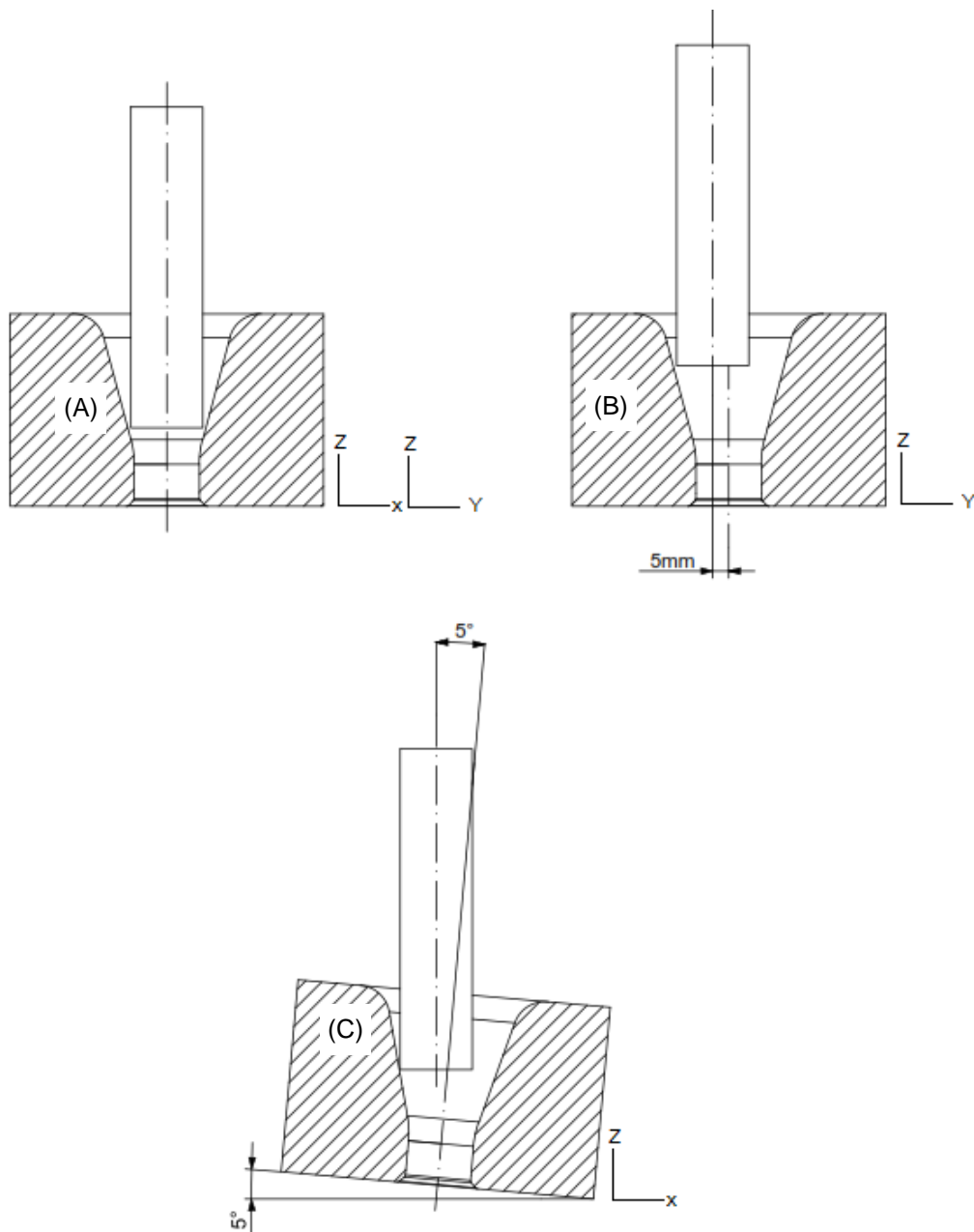


Figura 4.6 – Posicionamentos entre feira e barra: (A) Alinhamento centralizado; (B) Desalinhamento transversal; (C) Desalinhamento angular.

A Tabela IV.1 apresenta o detalhamento das simulações, conforme parâmetros estabelecidos.

Tabela IV.1 – Detalhamento das simulações

Processo	Geometria do fio máquina	Posicionamento da fieira	Coefficiente de atrito	Ângulo da fieira (2α)
1	Reta	Centralizada	0,1	12°
2				18°
3				30°
4				40°
5	Curva	Centralizada	0,2	30°
6	Oval			
7	Defeito superficial			
8	Reta	Transladada	0,3	30°
9			0,1	
10			0,1	
11	Reta (material fio máquina)	Rotacionada	0,1	30°
12		Centralizada	0,1	

Para simular o efeito do carrinho de tração, atribuiu-se velocidade de -100mm/s na direção Z (direção de trefilação) aos nós da face em contato com a fieira. A Figura 4.7 mostra um esquema das simulações realizadas, elucidando o posicionamento inicial entre a barra e a fieira e a direção de trefilação.

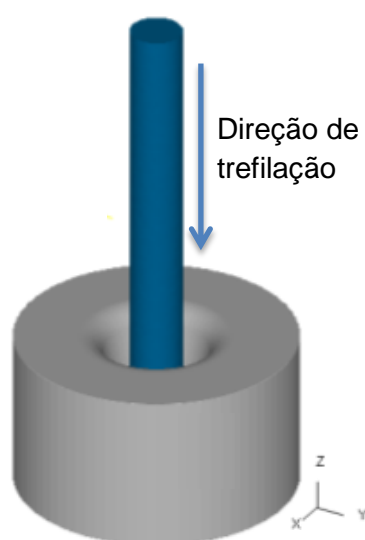


Figura 4.7 – Esquema da simulação de trefilação de uma barra

A sequência para um passe de redução foi dividido em quatro etapas, segundo as condições de contorno apresentadas na Tabela IV.2.

Tabela IV.2 – Condições de contorno para a simulação de trefilação

Etapa	Descrição	Condições de contorno
1	Trefilação da ponta da barra	a) Nós da face em contato com a fieira com movimento em Z ($v=-100\text{mm/s}$); b) Nós da face oposta travados nas direções X e Y;
2	Trefilação total da barra	a) Nós da face inferior com movimento em Z ($v=-100\text{mm/s}$) e travados em X e Y; b) Nós da face oposta destravados,
3	Finalização da trefilação	a) Nós da face inferior travados em X, Y e Z (removido movimento); b) Barra permanece em contato com a fieira;
4	Retorno elástico e distorção do material	a) Nós da face inferior travados em X, Y e Z; b) Nós da face superior permanecem com movimento livre em X e Y; remoção da fieira. c) Nesta etapa, atribui-se deslocamento nulo para todos os nós, a fim de medir somente os deslocamentos devido à distorção dos elementos.

Cada processo para um passe de trefilação gerou quatro simulações, sendo uma para cada etapa, totalizando quarenta e oito simulações. As simulações foram avaliadas quanto ao perfil de tensão longitudinal residual, nos planos XZ e YZ, bem como quanto à distorção das barras trefiladas. Para a análise do primeiro item, foram feitos cortes longitudinais nas barras, segundo cada plano longitudinal, para visualização dos perfis de tensões longitudinais. A mensuração das tensões longitudinais foi realizada ao longo do diâmetro, para cada plano, através de uma ferramenta disponibilizada no software.

A avaliação da distorção foi realizada pela medida do deslocamento dos nós, após o retorno elástico, considerando-se o comprimento final de 220mm. Os dados foram extraídos para os nós ao longo do eixo da barra, considerando-se nulos os deslocamentos iniciais. O resultado para distorção apresentado pela

barra reta na simulação com geometria reta, alinhamento centralizado e coeficiente de atrito 0,1 foi considerado como referência para a avaliação da distorção percentual para as demais condições de trefilação.

Couto (2011) apresentou resultados do ensaio de retilineidade para avaliação do empeno em hastes de amortecedor. Este ensaio consiste em medir a flecha máxima de uma haste de 100mm de comprimento, através de relógio comparador. O valor máximo encontrado é dividido por 2 e indica a retilineidade da peça em milímetros ou em percentual, dividindo-se este valor pelo comprimento de medição. O cálculo da distorção percentual, neste trabalho, foi definida com base neste resultado de retilineidade, sendo a diferença do deslocamento total de cada resultado e o deslocamento total de referência considerada como a flecha máxima da barra trefilada, resultando na equação 4.1, para termos percentuais

$$Distorção \% = \frac{(Deslocamento\ total\ da\ barra - deslocamento\ total\ de\ referência)/2}{Comprimento\ final} \quad (4.1)$$

V RESULTADOS E DISCUSSÃO

V.I Curvas de fluxo do Aço AISI 1045 do DEFORM® e do fio máquina

A Tabela V.1 apresenta os dados do material AISI 1045 da biblioteca do programa de elementos finitos para curva de fluxo, segundo taxa de deformação de $1,6s^{-1}$.

Tabela V.1 – Dados da Curva de Fluxo do Aço AISI 1045

Deformação	Tensão [MPa]
0,002	614,2858
0,05	701,4286
0,1	788,5714
0,15	842,8571
0,2	885,7143
0,3	930,7143
0,4	951,4286
0,6	976,4286
0,8	989,2857
1	989

Fonte: Biblioteca de materiais do DEFORM®3D

A curva de fluxo foi determinada pelos pontos fornecidos pelo software, informados na Tabela V.I, e extrapolada segundo o modelo da equação de Hollomon, mostrada a seguir.

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (5.1)$$

Aplicando-se tratamento logarítmico aos dados, obtiveram-se os valores dos parâmetros k e n , sendo $k=999,54$ e $n=0,0858$ para o material do DEFORM®. A Figura 5.1 representa os dados sob a forma gráfica.

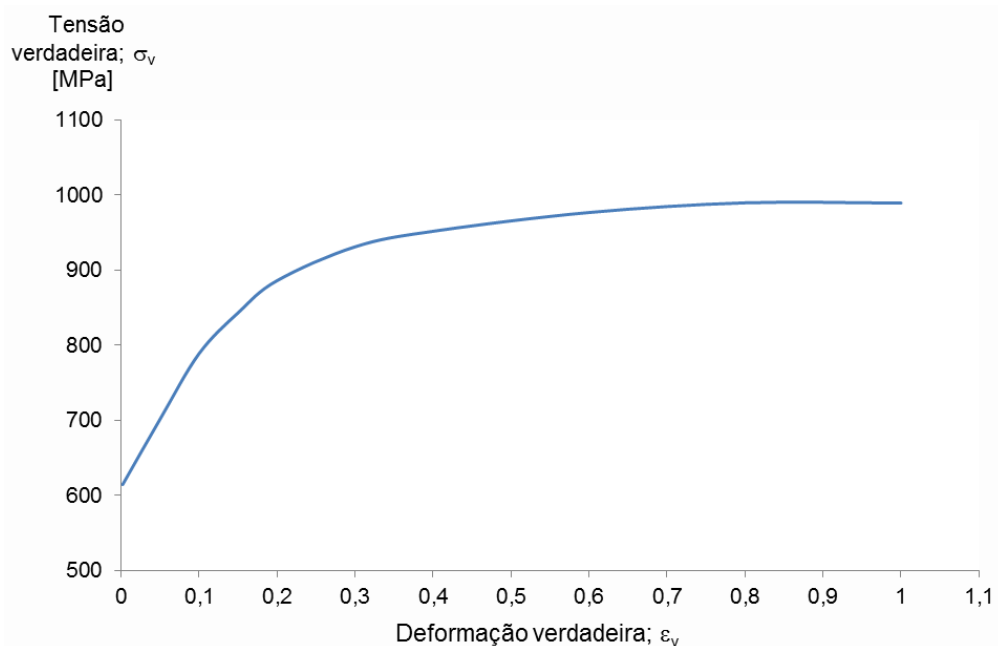


Figura 5.1 – Curva de fluxo do material da biblioteca do software DEFORM

Os dados extraídos dos ensaios válidos de tração do fio máquina geraram a curva de engenharia, mostrada na Figura 5.2. Estes dados foram convertidos em tensão verdadeira e deformação verdadeira e também sofreram tratamento logarítmico para obtenção dos parâmetros da equação de Hollomon para este material. As curvas de tensão verdadeira e de fluxo são apresentadas na Figura 5.3.

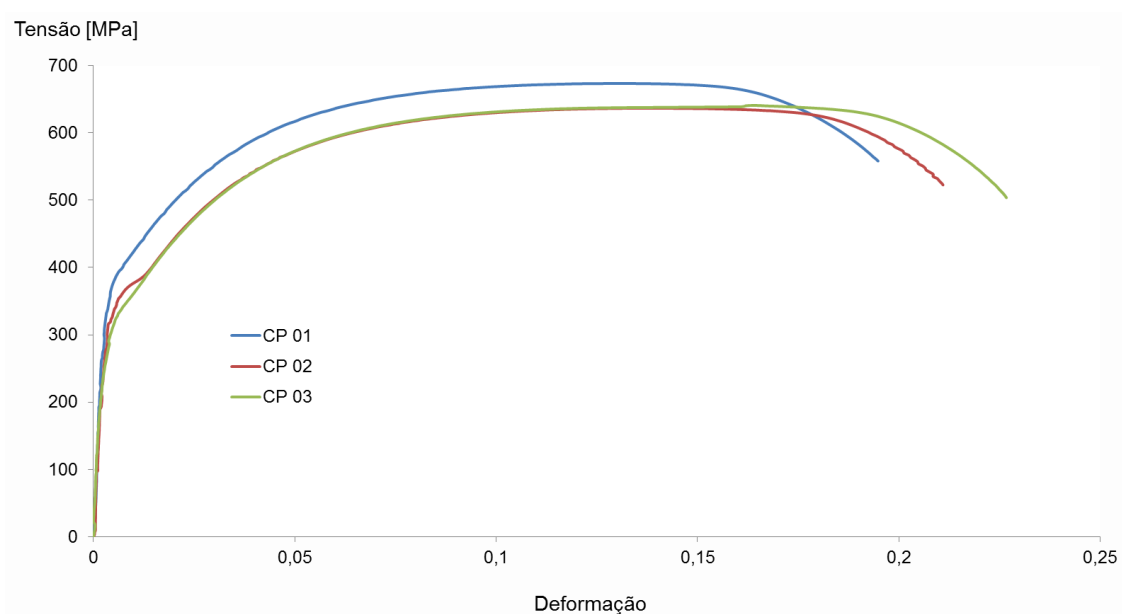


Figura 5.2 – Curva de engenharia obtida pelos resultados dos ensaios de tração

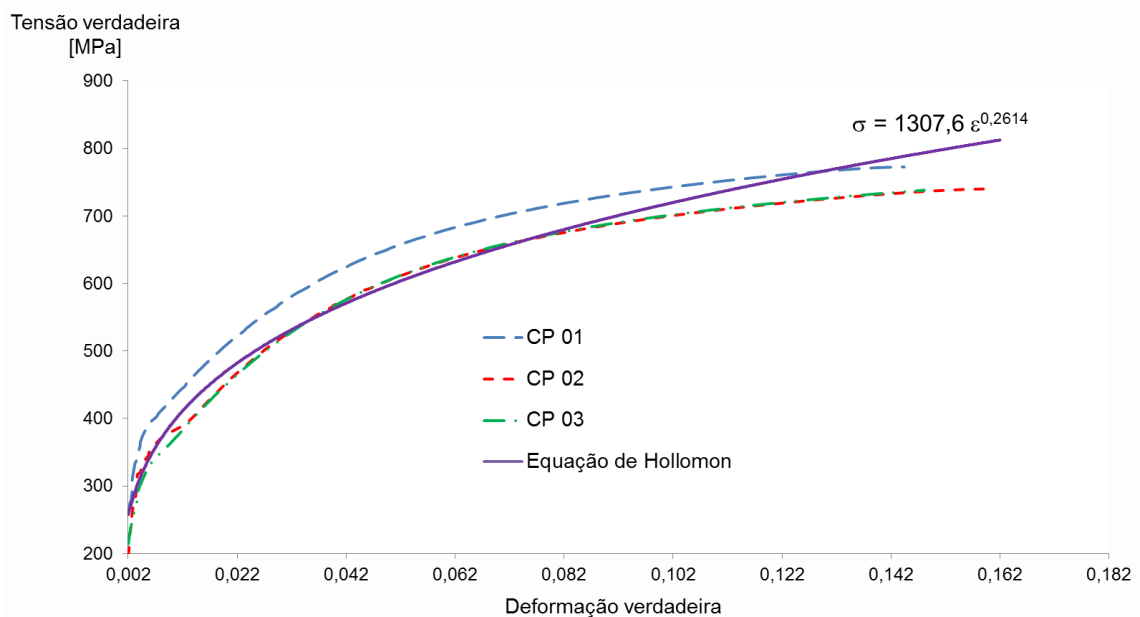


Figura 5.3 – Curva de fluxo obtida pelos resultados dos ensaios de tração

A Figura 5.4 mostra a comparação entre as curvas de fluxo do material do Fio máquina e do material do DEFORM.

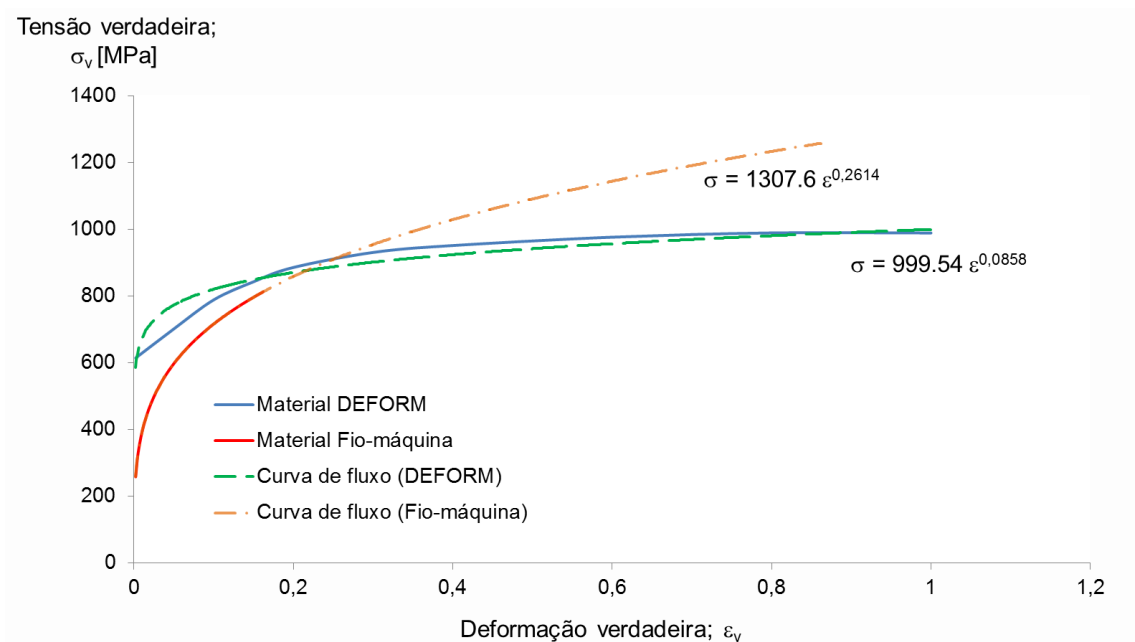


Figura 5.4 – Comparação das Curvas de fluxo do material do DEFORM e do fio máquina

Observa-se, na comparação, que a curva de fluxo do material real se sobrepõe inteiramente à curva gerada pela equação de Hollomon para este material, enquanto que a curva do material do DEFORM discrepa da curva da equação de Hollomon, especialmente para o intervalo inicial de deformação. A curva de fluxo do material real apresentou melhor adequação à equação de Hollomon, em função da quantidade de pontos extraídos do ensaio de tração, o que não foi observado para o material do DEFORM, em consequência da quantidade limitada de dados de tensão/deformação.

VII. Resultados das simulações

Os resultados obtidos pelas simulações foram organizados de forma a permitir a comparação das simulações para um mesmo parâmetro, mantendo-se fixas as demais variáveis do processo.

V.II.1 Ângulo de trabalho (α)

As Figuras 5.5 e 5.6 destacam os perfis de tensões residuais longitudinais (σ_z) no plano XZ e YZ, respectivamente, para cada ângulo de trabalho investigado. Os parâmetros de geometria e processo foram mantidos constantes, sendo, neste caso, a geometria reta com seção transversal circular, atrito de 0,1 e posicionamento relativo entre fiara e barra centralizado.

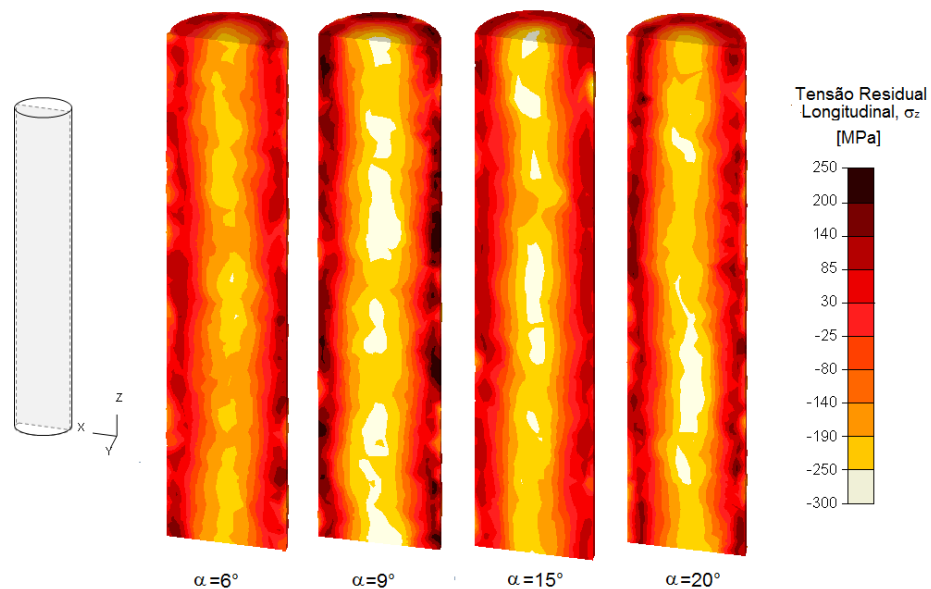


Figura 5.5 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano XZ para diferentes ângulos de trabalho

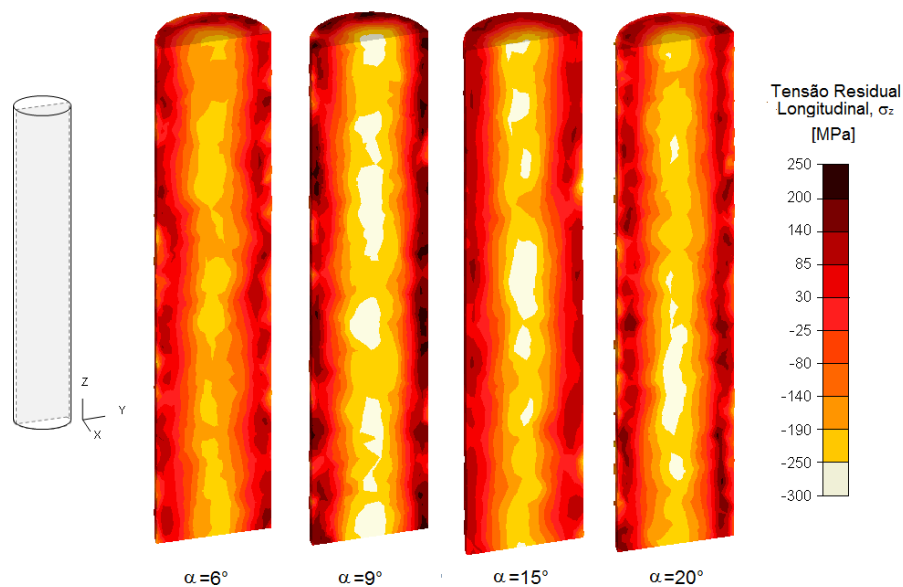


Figura 5.6 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano YZ para diferentes ângulos de trabalho

Os perfis apresentados informam que o incremento no ângulo de trabalho altera o nível de tensões no componente conformado, no entanto, verifica-se há as tensões superficiais e centrais para o semiângulo de 9° são mais acentuadas que para os demais semiângulos. Nota-se que não há variação significativa entre os níveis de tensão para os planos XZ e YZ, que apresentaram perfis muito semelhantes.

A Figura 5.7 mostra o perfil de distorção apresentado pelas barras, para cada ângulo de trabalho, sendo avaliado o deslocamento total dos nós em relação à posição de repouso após trefilação.

Deslocamento total da barra após distorção

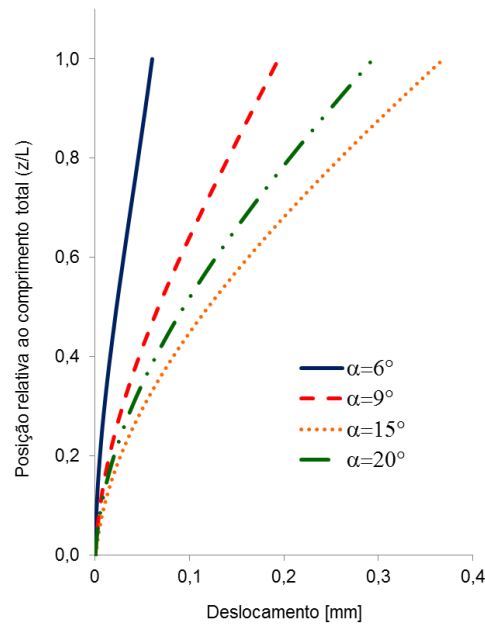


Figura 5.7 – Perfis de distorção para diferentes ângulos de trabalho

Identifica-se na figura apresentada que a distorção altera-se com a variação no ângulo da fieira, destacando-se os maiores ângulos de trabalho pelo aumento relativo de distorção em relação aos menores.

O parâmetro de ângulo de trabalho mostrou que a variação de tensão longitudinal residual apresenta um comportamento semelhante ao parabólico com o aumento do ângulo da fieira, apresentando valor mais elevado de tração para a fieira com semiângulo de 9° , decrescendo para os demais valores. A geometria trabalhada nestas simulações foi a reta e verifica-se que não há variação significativa entre os valores para os planos XZ e YZ, indicando simetria da barra após retorno elástico. A distorção final dos elementos da barra indica o nível de empeno sofrido pelo material após o retorno elástico. Observa-se para este parâmetro que o semiângulo de trabalho de 15° apresentou maior valor de distorção e o menor valor de distorção foi o de 6° . É interessante ressaltar que a distorção está intimamente ligada ao perfil de distribuição de tensões antes e após o retorno elástico. Infere-se, portanto, que o

semiângulo de trabalho de 15° apresentou maior ajuste da distribuição de tensões no retorno elástico. Deve-se ressaltar que, mesmo tendo apresentado valor de distorção mais elevado, o nível de empeno é considerado baixo, haja visto que atingiram valores abaixo de 1% do comprimento útil. Em função da geometria e do alinhamento destas simulações, não era esperado a ocorrência de empeno nas barras trefiladas, devido à simetria das tensões residuais. No entanto, os resultados evidenciaram a distorção apresentada que está possivelmente correlacionada a fatores numéricos, como a densidade de elementos de malha.

V.II.II Coeficiente de atrito (m)

O parâmetro investigado nestes resultados foi o coeficiente de atrito. Considerou-se, para tais simulações, o comprimento da barra reto, seção circular, ângulo de trabalho de 30° e posicionamento relativo entre fieira e barra centralizado. Os perfis de tensões residuais longitudinais (σ_z) nos planos XZ e YZ são mostrados nas Figuras 5.8 e 5.9, respectivamente, para cada ângulo de trabalho investigado.

O nível de tensão longitudinal entre as barras trefiladas varia linearmente com o aumento do coeficiente de atrito, tanto para o plano XZ quanto para o plano YZ, que mostraram comportamentos muito semelhantes.

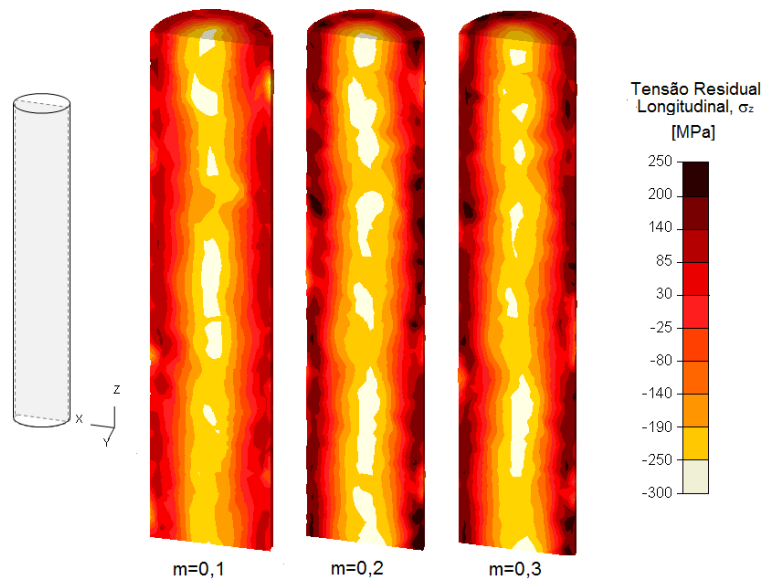


Figura 5.8 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano XZ para diferentes coeficientes de atrito

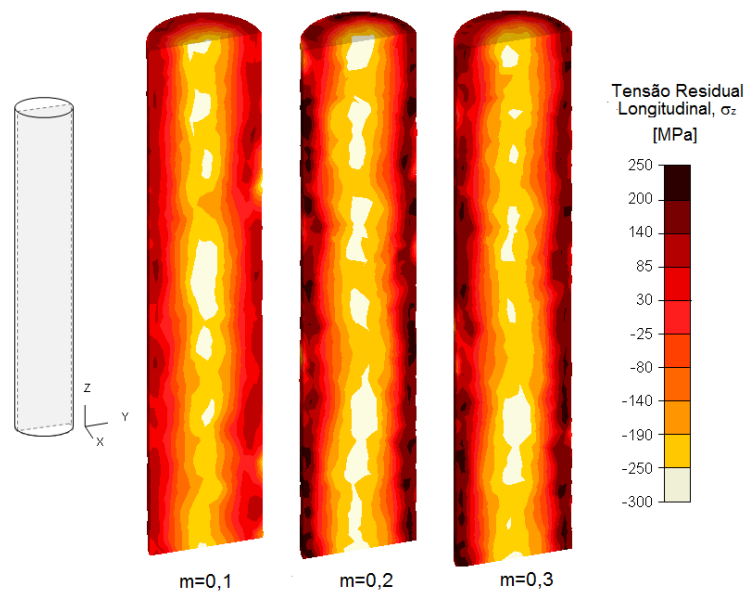


Figura 5.9 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano YZ para diferentes coeficientes de atrito

A Figura 5.10 mostra o perfil de distorção apresentado pelas barras, para cada coeficiente de atrito trabalhado.

Deslocamento total da barra após distorção

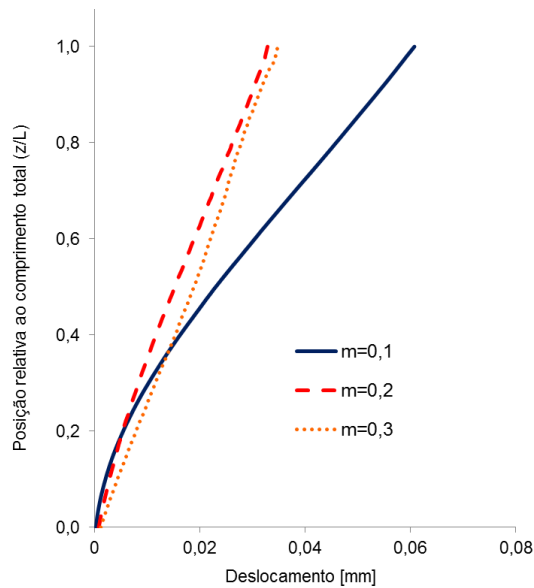


Figura 5.10 – Perfis de distorção para diferentes coeficientes de atrito

Observa-se, pela figura, que há pequena variação de distorção entre os atritos de 0,2 e 0,3, com destaque para a magnitude do atrito 0,1, que apresentou o maior valor de distorção da barra.

A distribuição de tensões longitudinais residuais para o parâmetro coeficiente de atrito elevou-se à medida que o coeficiente aumentava. No entanto, cabe salientar que a diferença entre os perfis é pequena e apresentou também diferença ínfima entre as tensões para os planos XZ e YZ. O perfil de distorções indicou valor mais elevado para o coeficiente de atrito mais baixo e pode ser associado à maior diferença entre as tensões antes e após o retorno elástico. Os coeficientes de atrito 0,2 e 0,3 apresentaram distorções semelhantes. Verifica-se para estas simulações que a simetria das tensões residuais longitudinais em virtude da geometria reta e do alinhamento centralizado não levaria ao empeno apresentado. Novamente, a distorção deve estar associada a problemas numéricos.

V.II.III Geometrias do fio máquina

O parâmetro investigado nestes resultados foi a geometria inicial do fio máquina, considerando-se quatro variações. As demais variáveis de processo foram mantidas constantes entre as simulações, sendo o ângulo de trabalho de 30°, posicionamento relativo entre fieira e barra centralizado e atrito de 0,1. As Figuras 5.11 e 5.12, respectivamente, ilustram os perfis de tensões residuais longitudinais (σ_z) nos planos XZ e YZ para cada geometria.

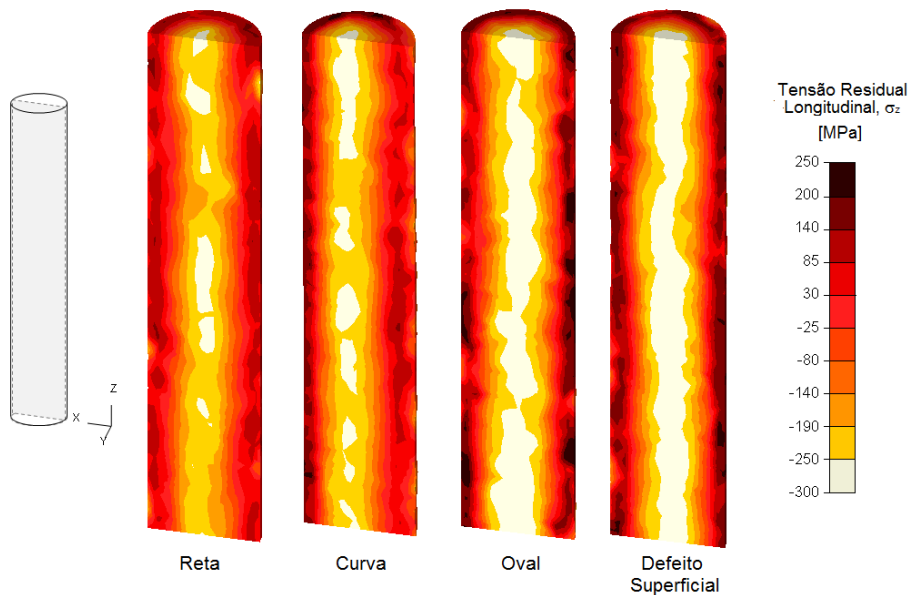


Figura 5.11 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano XZ para diferentes geometrias do fio máquina

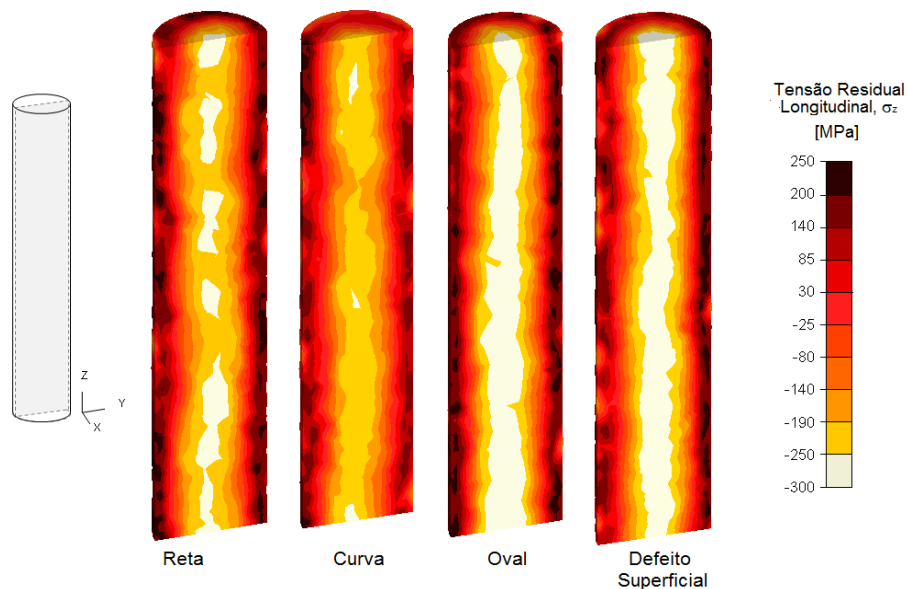


Figura 5.12 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano YZ para diferentes geometrias do fio máquina

A variação na geometria inicial do fio máquina ocasionou alteração relevante nos perfis de distribuição de tensões longitudinais, acentuando-se as tensões superficiais e centrais para os casos de barra oval e com defeito superficial e causando deslocamento transversal do perfil, no caso da barra curva, para o plano XZ, e para a barra com defeito superficial, no plano YZ. Os planos XZ e YZ não apresentam diferenças significativas em relação aos perfis para as barras reta e oval. Entretanto, é evidenciada a diferença entre os perfis dos dois planos para a barra curva e com defeito superficial, sendo mais discordante no primeiro caso.

Em função da particularidade dos resultados, destacam-se nas Figuras 5.13 e 5.14 as geometrias curva e de defeito superficial, magnificando sua visualização para avaliação dos detalhes. Na Figura 5.18, verifica-se nitidamente a assimetria da distribuição de tensões ao longo do eixo X, no plano XZ, eixo no qual a barra possuía o raio de curvatura. A Figura 5.19 destaca a região do defeito superficial, localizado pela diferença na magnitude das tensões geradas em sua decorrência.

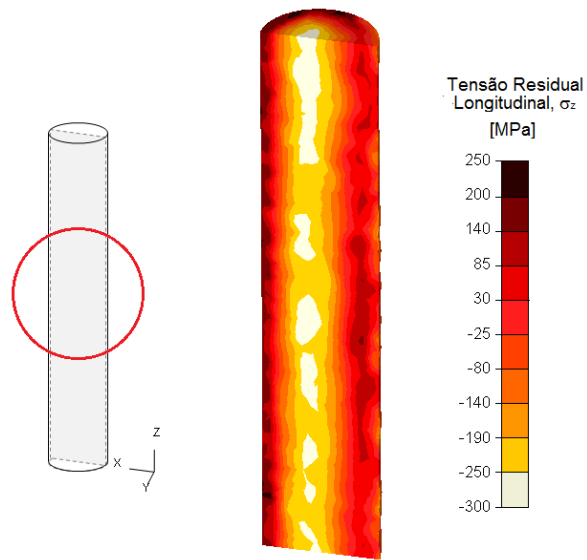


Figura 5.13 – Detalhe da assimetria de distribuição de tensões para barra curva

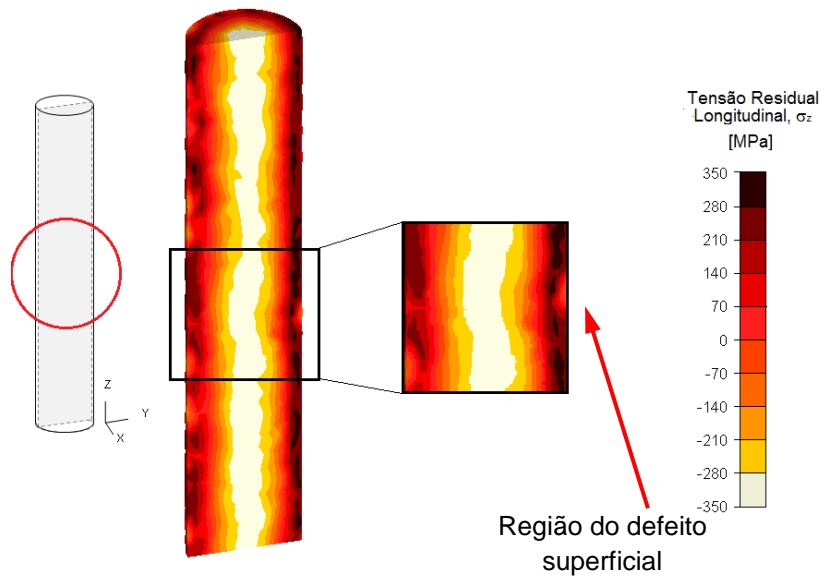


Figura 5.14 – Detalhe da região do defeito superficial

Os perfis gráficos de tensão longitudinal residual para os mesmos parâmetros anteriores são apresentados nas Figuras 5.15 e 5.16, para os planos XZ e YZ, respectivamente.

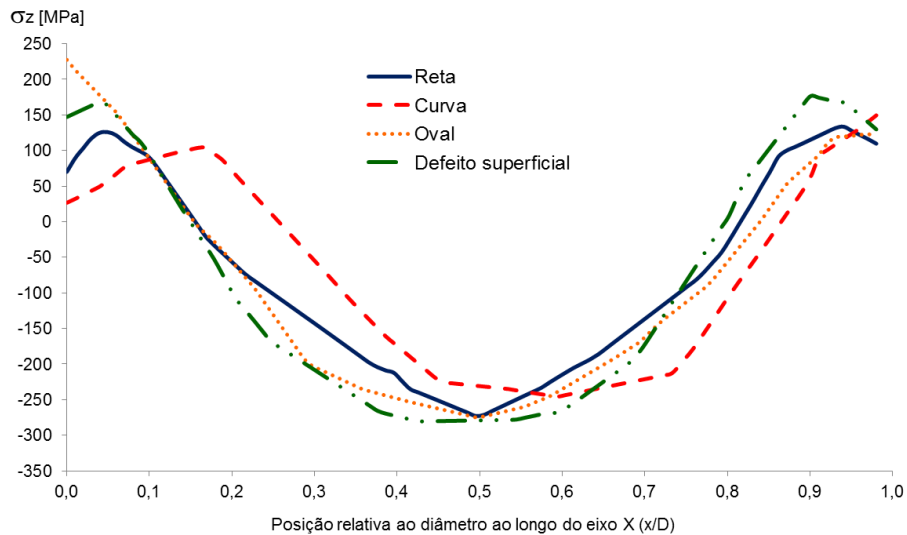


Figura 5.15 – Distribuição de tensões longitudinais residuais ao longo do plano XZ para diferentes geometrias

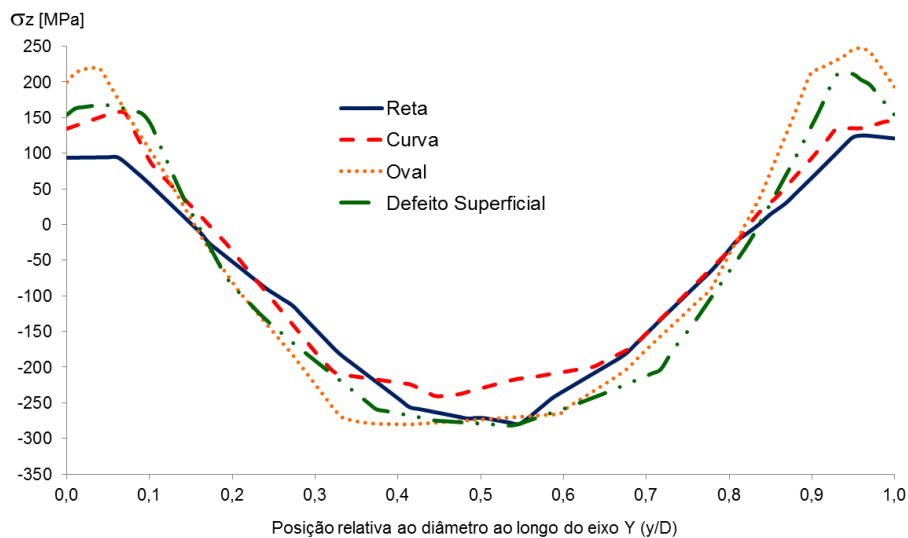


Figura 5.16 – Distribuição de tensões longitudinais residuais ao longo do plano YZ para diferentes geometrias

O gráfico de distribuição de tensão longitudinal para o plano XY evidencia a distorção apresentada pela geometria curva. As demais

variações geométricas apresentam perfis semelhantes para estes planos, praticamente simétricos em relação ao eixo da barra ($x/D=0,5$), diferenciando-se ligeiramente nas tensões superficiais.

A distribuição de tensão longitudinal no plano YZ apresentou perfis muito semelhantes para todas as geometrias. O destaque, neste plano, foi para o nível de tensão na superfície mais elevado para a barra oval (maior diâmetro no eixo Y), seguida da barra com defeito superficial (pronunciado transversalmente ao eixo Y), barra curva e barra reta. Outro detalhe interessante evidenciado é a simetria entre os perfis com relação ao eixo da barra ($y/D=0,5$).

A Figura 5.17 mostra o perfil de distorção diferencial apresentado pelas barras, para cada geometria, tomando a barra reta como referência.

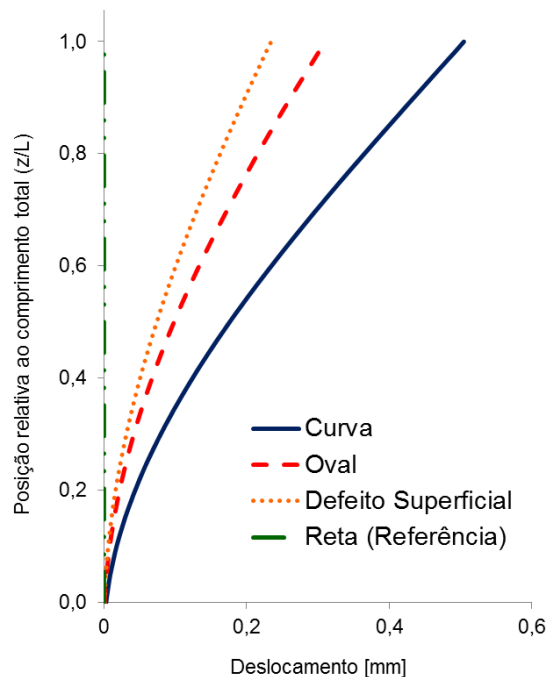


Figura 5.17 – Perfis de distorção diferencial para diferentes geometrias do fio máquina

Os perfis de distorção diferencial apresentados na Figura 5.17 ilustram a influência da geometria inicial da barra na distorção final após trefilação completa. A distorção da barra reta foi considerada como referência para

medição dos deslocamentos para as demais geometrias. O deslocamento causado pela geometria curva destacou-se em magnitude dos valores das outras geometrias.

A geometria das barras foi um parâmetro que apresentou diferença relevante entre os níveis de tensões de cada variante. O plano XY mostrou um perfil simétrico para todas as simulações, com exceção da barra curva, devido à curvatura pronunciada neste plano. Nitidamente, o perfil desta barra deslocou-se integralmente para uma das extremidades, afastando-se do eixo central da barra. A geometria com defeito superficial apresentou níveis de tensões semelhantes aos das demais simulações, à exceção da curva, mas destaca-se uma região de tensões diferenciadas devido à presença do defeito durante a trefilação. Percebe-se, entretanto, que as dimensões do defeito não foram suficientes para determinar uma diferença relevante no nível de tensões, a não ser de forma localizada. A barra ovalizada apresentou valores de tensões residuais muito próximos aos da geometria reta, mas observa-se que estas tensões foram um pouco mais elevadas, especialmente para o plano YZ, onde ocorreu o maior diâmetro. O perfil de distorções para a geometria curva foi o mais elevado, apresentando valor de 0,3%, o que também pode ser considerado baixo. As demais geometrias apresentaram valores ainda menores, comparativamente à geometria reta, que é a situação ideal de processo. Evidencia-se, com este fato, que a barra curva não apresentou níveis de empeno consideráveis que justificassem as etapas de desempenho anteriores à trefilação.

V.II.IV Posicionamento relativo entre fieira e barra

O último parâmetro avaliado foi o posicionamento relativo entre o fio máquina e a ferramenta. Como destacado na metodologia, consideraram-se três situações, sendo o posicionamento centralizado, a fieira desalinhada transversalmente e a fieira desalinhada angularmente. Assim como nas simulações anteriores, os demais valores de processo foram mantidos fixos, a saber, o atrito de 0,1; fio máquina com comprimento reto e seção circular e ângulo de trabalho de 30°. Os perfis de tensões residuais longitudinais (σ_z) nos planos XZ e YZ são mostrados nas Figuras 5.18 e 5.19, respectivamente, para cada situação.

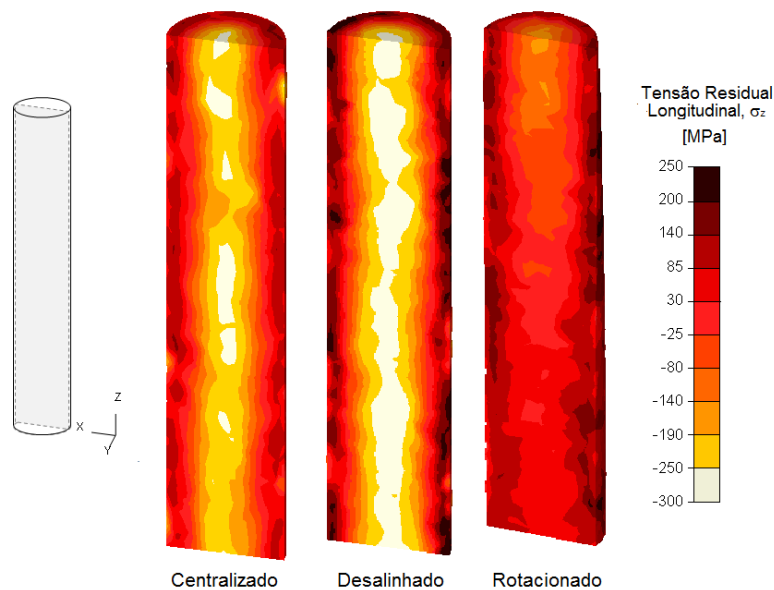


Figura 5.18 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano XZ para diferentes alinhamentos do fio máquina e fieira

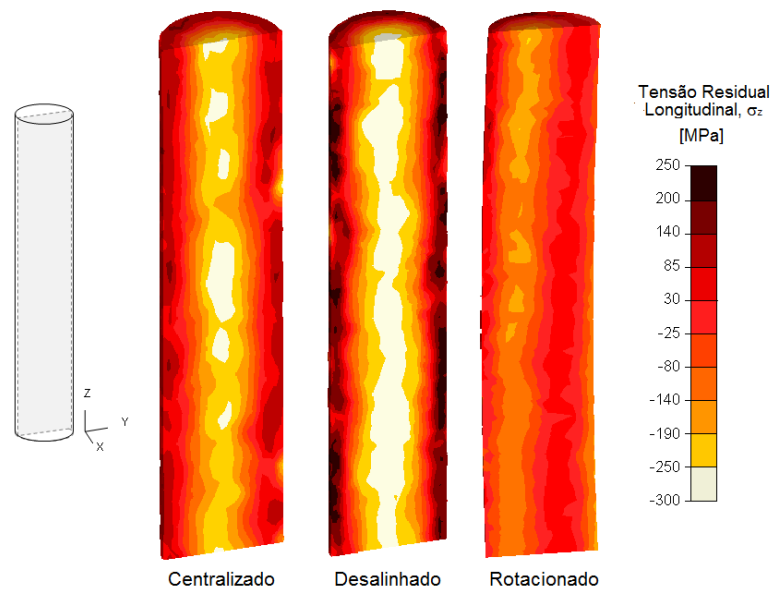


Figura 5.19 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano YZ para diferentes alinhamentos do fio máquina e fieira

A alteração no posicionamento da ferramenta ocasionou elevada variação no perfil de tensões residuais longitudinais das barras, principalmente no caso em que a fieira foi rotacionada. A fim de destacar algumas especificidades deste caso, as Figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23 apresentam detalhes dos resultados de tensão longitudinal para a barra trefilada na fieira rotacionada.

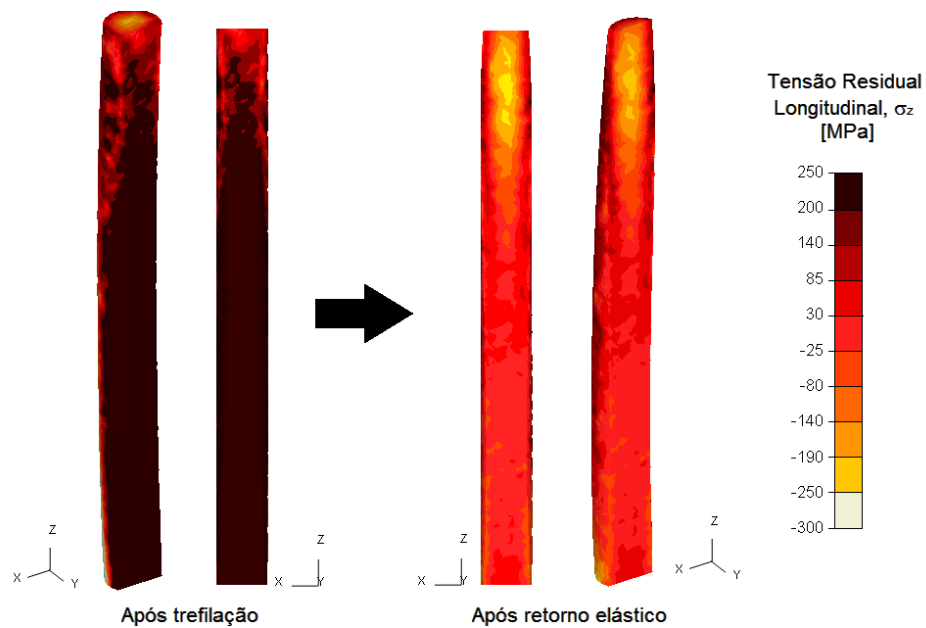


Figura 5.20 – Diferença no perfil de tensões residuais longitudinais no plano XZ após trefilação e após retorno elástico, para desalinhamento angular

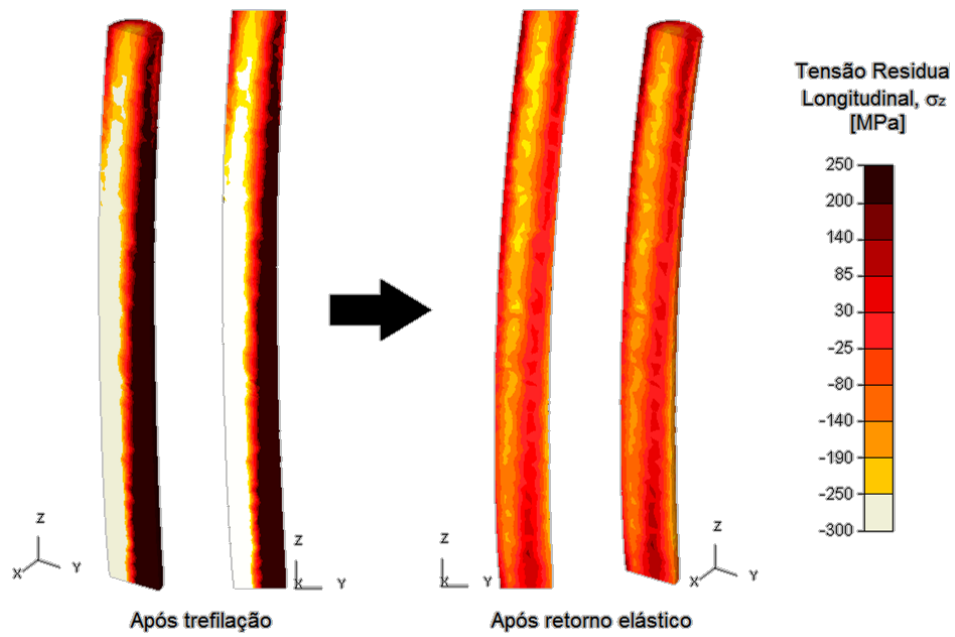


Figura 5.21 – Diferença no perfil de tensões residuais longitudinais no plano YZ após trefilação e após retorno elástico, para desalinhamento angular

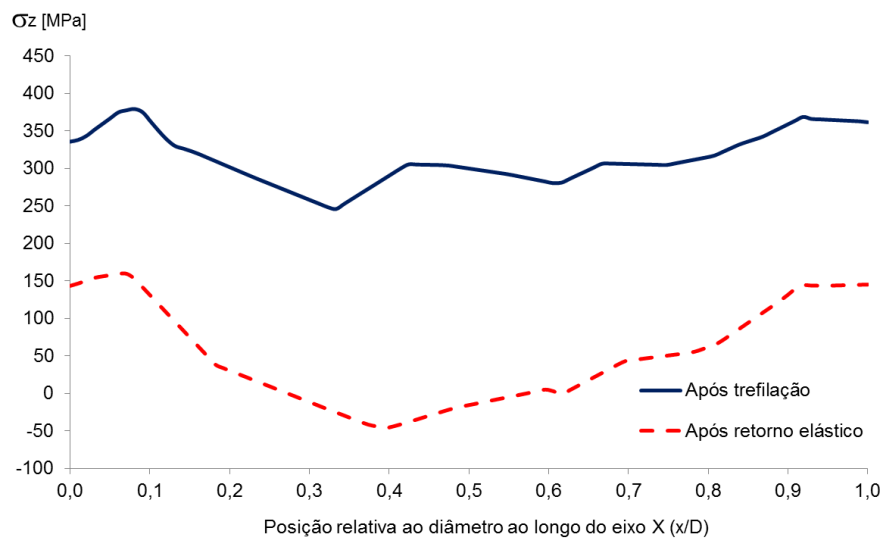


Figura 5.22 – Distribuição de tensões longitudinais ao longo do plano XZ após trefilação e após retorno elástico, para desalinhamento angular

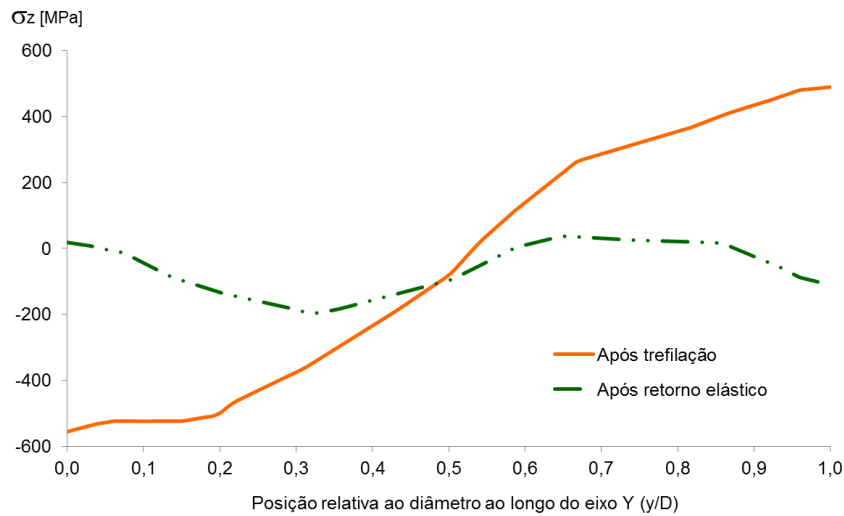


Figura 5.23 – Distribuição de tensões longitudinais ao longo do plano YZ após trefilação e após retorno elástico, para desalinhamento angular

Nota-se que o desalinhamento angular da fieira promoveu maior distorção na barra trefilada, alterando, inclusive sua forma para curva. O retorno elástico permitiu um alívio considerável das tensões geradas na trefilação, no caso do plano XY, e alteração substancial na distribuição das tensões, para o plano YZ.

As Figuras 5.24 e 5.25 apresentam a distribuição de tensão longitudinal após retorno elástico, para os planos XZ e YZ, respectivamente.

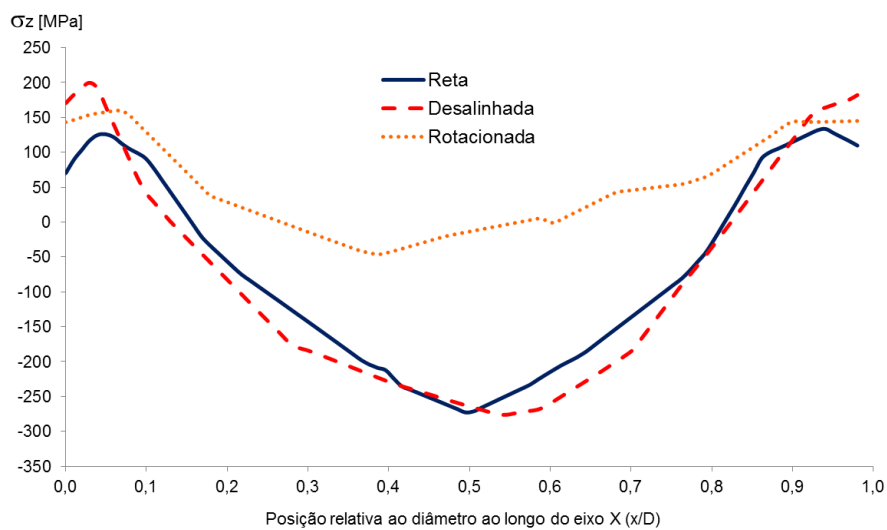


Figura 5.24 – Distribuição de tensões longitudinais residuais ao longo do plano XZ para diferentes alinhamentos entre fieira e barra

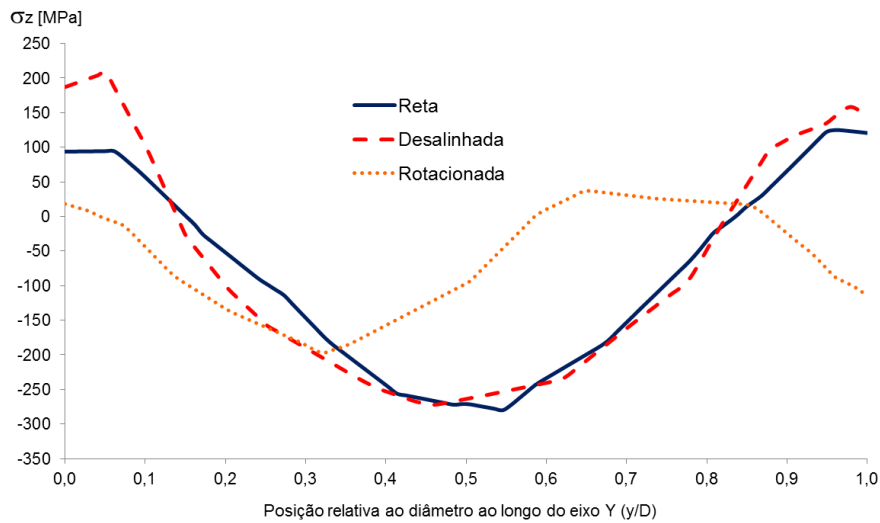


Figura 5.25 – Distribuição de tensões longitudinais ao longo do plano YZ para diferentes alinhamentos entre fierra e barra

A distorção verificada para a condição de ferramenta rotacionada destacou-se em relação às demais condições pela magnitude e distribuição das tensões. Para a condição reta e desalinhada transversalmente, os perfis de tensões mantiveram-se simétricos para os dois planos.

A Figura 5.26 mostra o perfil de distorção diferencial apresentado pelas barras, para cada geometria, tomando a barra reta como referência.

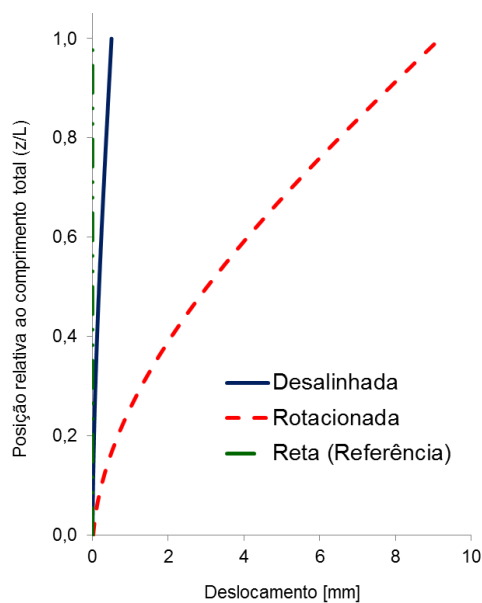


Figura 5.26 – Perfis de distorção diferencial para diferentes alinhamentos de fierra e barra

A Figura 5.26 evidencia que a distorção causada pelo desalinhamento angular da fieira foi o de maior magnitude. O desalinhamento transversal apresentou comportamento pouco expressivo para o perfil de distorção.

O alinhamento entre fieira e barra foi um dos parâmetros com maior destaque. Os resultados apontam que o desalinhamento transversal, para os valores simulados, não compromete o perfil de tensões residuais, nem a simetria da peça, uma vez que os perfis foram muito semelhantes ao da barra centralizada com a fieira, para os planos XZ e YZ. O desalinhamento angular mostrou-se muito crítico, ocasionando discrepância significativa com o resultado para ferramenta centralizada e, mais ainda, antes e após o retorno elástico. De fato, para os dois casos de desalinhamento, o retorno elástico proporcionou grande alívio de tensões. Para o desalinhamento transversal, o alívio de tensões reduziu significativamente as tensões apresentadas. Em contrapartida, no desalinhamento angular, o alívio de tensões após retorno elástico mudou drasticamente o perfil de tensões, passando de compressivo-trativo para uma distribuição mais próxima às das demais simulações. O perfil de distorções evidenciou a influência do posicionamento para o empeno das barras, sendo que o deslocamento devido ao desalinhamento transversal foi próximo da condição centralizada, enquanto que o desalinhamento angular apresentou valor muito elevado, da ordem de 4,5% em relação ao comprimento total útil.

V.II.V Material Real versus Material DEFORM®

A simulação do material real gerou resultados que puderam ser contrapostos aos do material do DEFORM®, conforme visualizado nas Figuras 5.27 e 5.28, para os perfis de tensões residuais longitudinais (σ_z) nos planos XZ e YZ, respectivamente. Complementarmente, as Figuras 5.29 e 5.30 os perfis de tensão sob a forma gráfica.

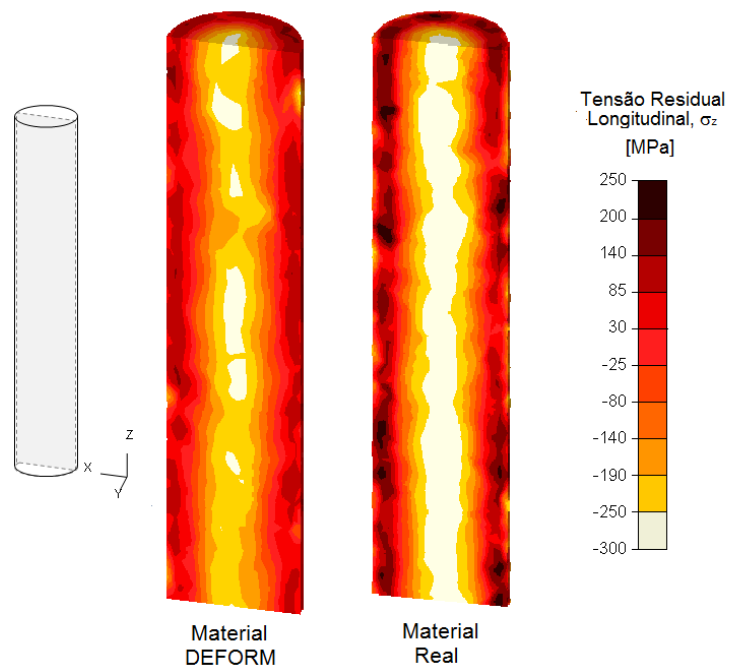


Figura 5.27 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano XZ para material DEFORM e material Real, alinhamento centralizado, coeficiente de atrito 0,01 e geometria reta

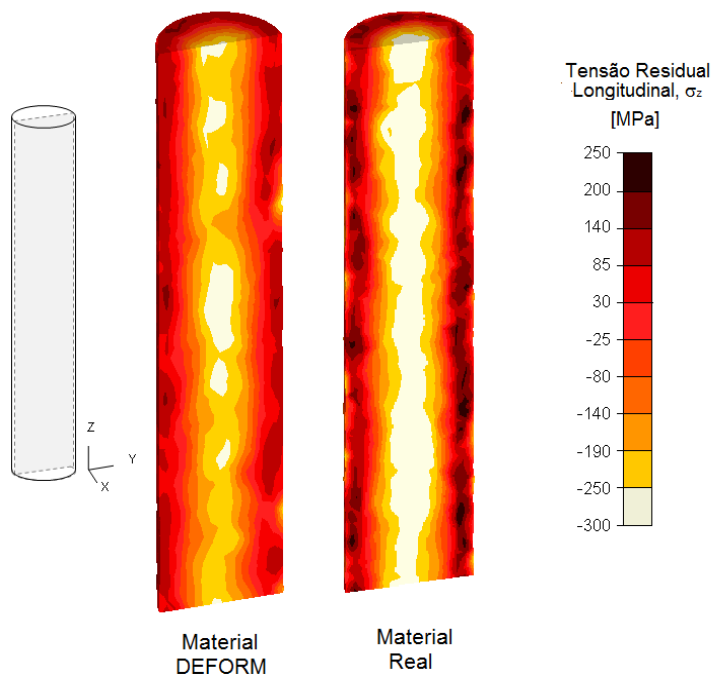


Figura 5.28 – Perfis de tensão longitudinal residual no plano YZ para material DEFORM e material Real, alinhamento centralizado, coeficiente de atrito 0,01 e geometria reta

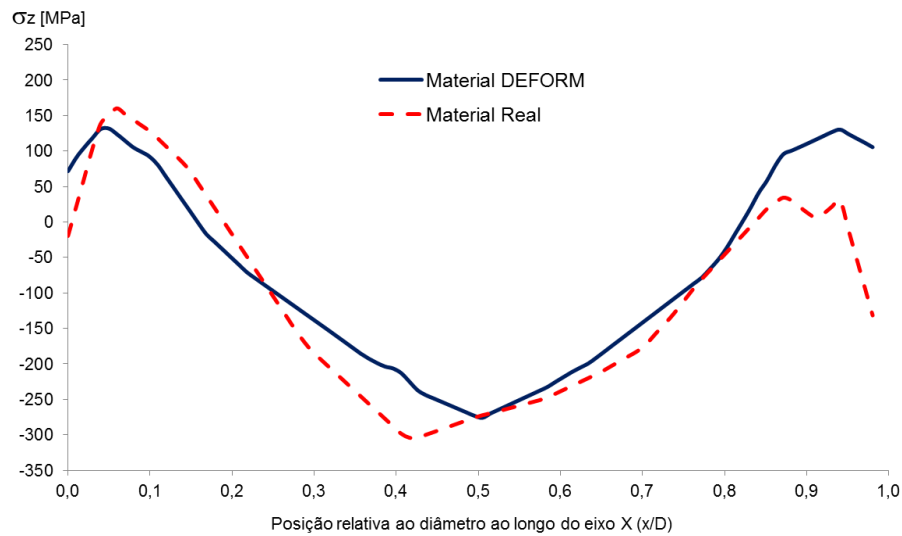


Figura 5.29 – Distribuição de tensões longitudinais ao longo do plano XZ para material DEFORM e material Real, alinhamento centralizado, coeficiente de atrito 0,01 e geometria reta

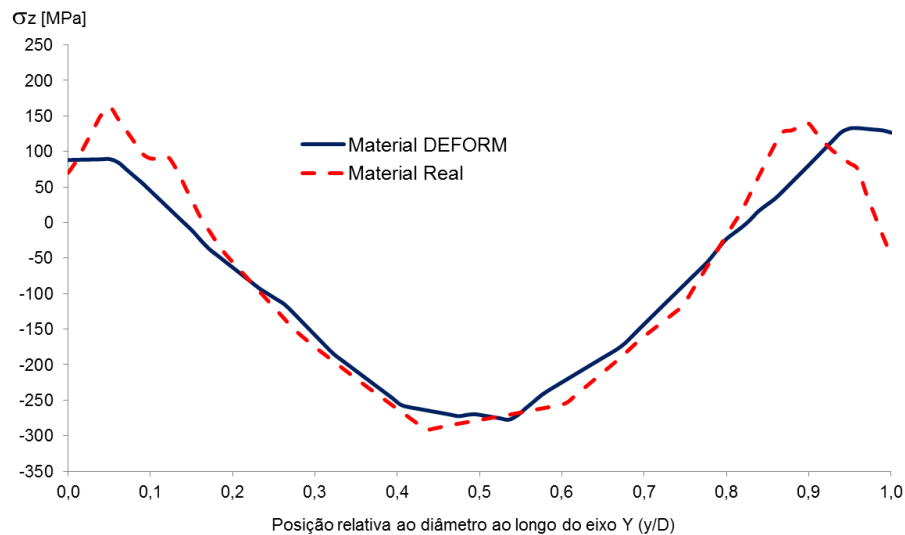


Figura 5.30 – Distribuição de tensões longitudinais ao longo do plano YZ para material DEFORM e material Real, alinhamento centralizado, coeficiente de atrito 0,01 e geometria reta

As figuras anteriores destacam que o material real possui uma distribuição de tensões um pouco mais acentuada nos extremos, isto é, suas tensões superficiais são menores, as tensões abaixo da superfície mais elevadas e as tensões centrais, menores, porém maiores em módulo, tendo em vista que as superficiais são trativas e as centrais, compressivas.

O perfil de distorção para os dois materiais é apresentado na Figura 5.31.

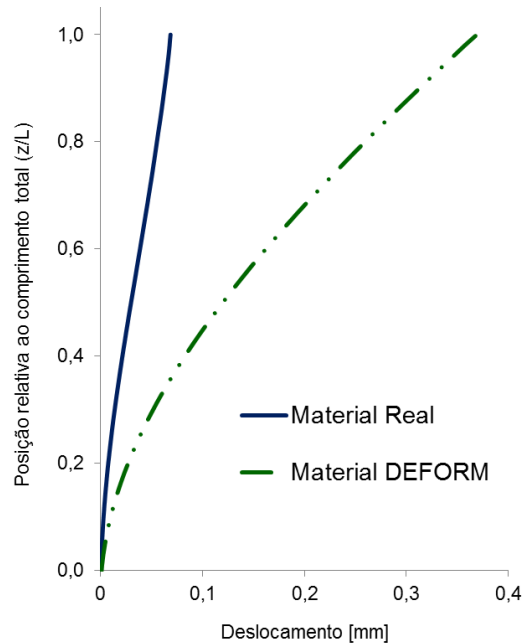


Figura 5.31 – Perfis de distorção para Material do DEFORM e Material Real, alinhamento centralizado, coeficiente de atrito 0,01 e geometria reta

Ressalta-se da figura que o material do DEFORM apresentou maior distorção que o material real, sendo o valor máximo de deslocamento de 0,4mm em 220mm de comprimento, que, em termos percentuais seria 0,2% de distorção contra 0,05% do material real.

A simulação com o material real corroborou os dados obtidos com as simulações do material do DEFORM, pois apresentou valores semelhantes tanto para o perfil de tensões longitudinais quanto para distorção. Nas regiões com o nível mais acentuado de deformação, o material real exibiu tensões mais elevadas, em módulo, condizente com a curva de fluxo obtida dos ensaios de tração. Para a distorção, o material do DEFORM apresentou maior valor que o real, ainda que ambos sejam desprezíveis devido à ordem de grandeza. Tal fato pode ser atribuído à quantidade de pontos da curva de fluxo deste material que exige mais interpolações e extrapolações do que na simulação

realizada com os dados reais, em que se utilizou a equação de Hollomon.

VI.III.VI Resultados gerais

Apresenta-se, na Figura 5.32, o mapeamento da distorção das barras para todos os parâmetros investigados.

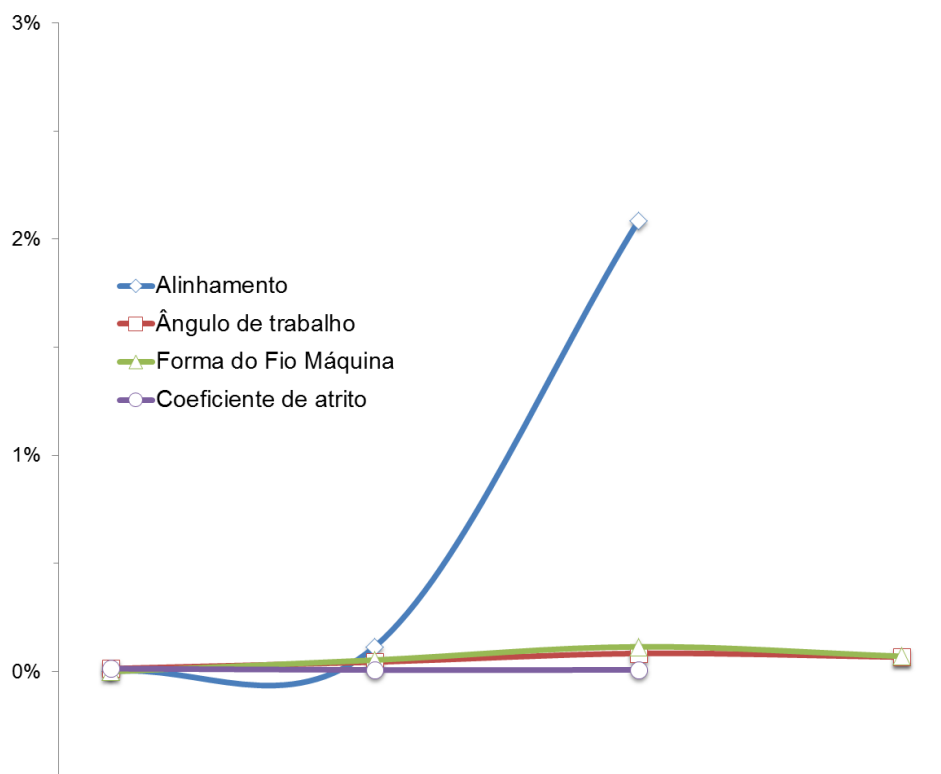


Figura 5.32 – Percentual de distorção para cada parâmetro simulado

Os dados visualizados na figura anterior estão representados sob a mesma escala. Em decorrência do elevado valor para o desalinhamento angular, a representação da distorção para as demais séries ficou muito próxima, evidenciando a diferença dos níveis de empeno para o desalinhamento angular e os demais parâmetros simulados.

A Figura 5.33 apresenta os mesmos dados exibidos em dois eixos, o principal para a escala reduzida, que contempla a faixa das séries de atrito, geometria e ângulo de trabalho e o eixo secundário para a escala ampliada, para adequá-la à magnitude das distorções analisadas.

Segundo Couto (2011), a tolerância para o ensaio de retilidade, que avalia o empeno em hastes de amortecedores, é de 0,10mm em 100mm de comprimento, que, em termos percentuais, representaria 0,001% de empeno. Desta forma, todos os resultados apresentados para as simulações seriam considerados não conforme, pois indicaram valores superiores a 0,001% de empeno. O resultado geral para a distorção das barras revela que o desalinhamento entre ferramenta e barra foi o parâmetro mais severo para a ocorrência do empeno, destacando-se o desalinhamento angular, com valores da ordem de 2% de empenamento.

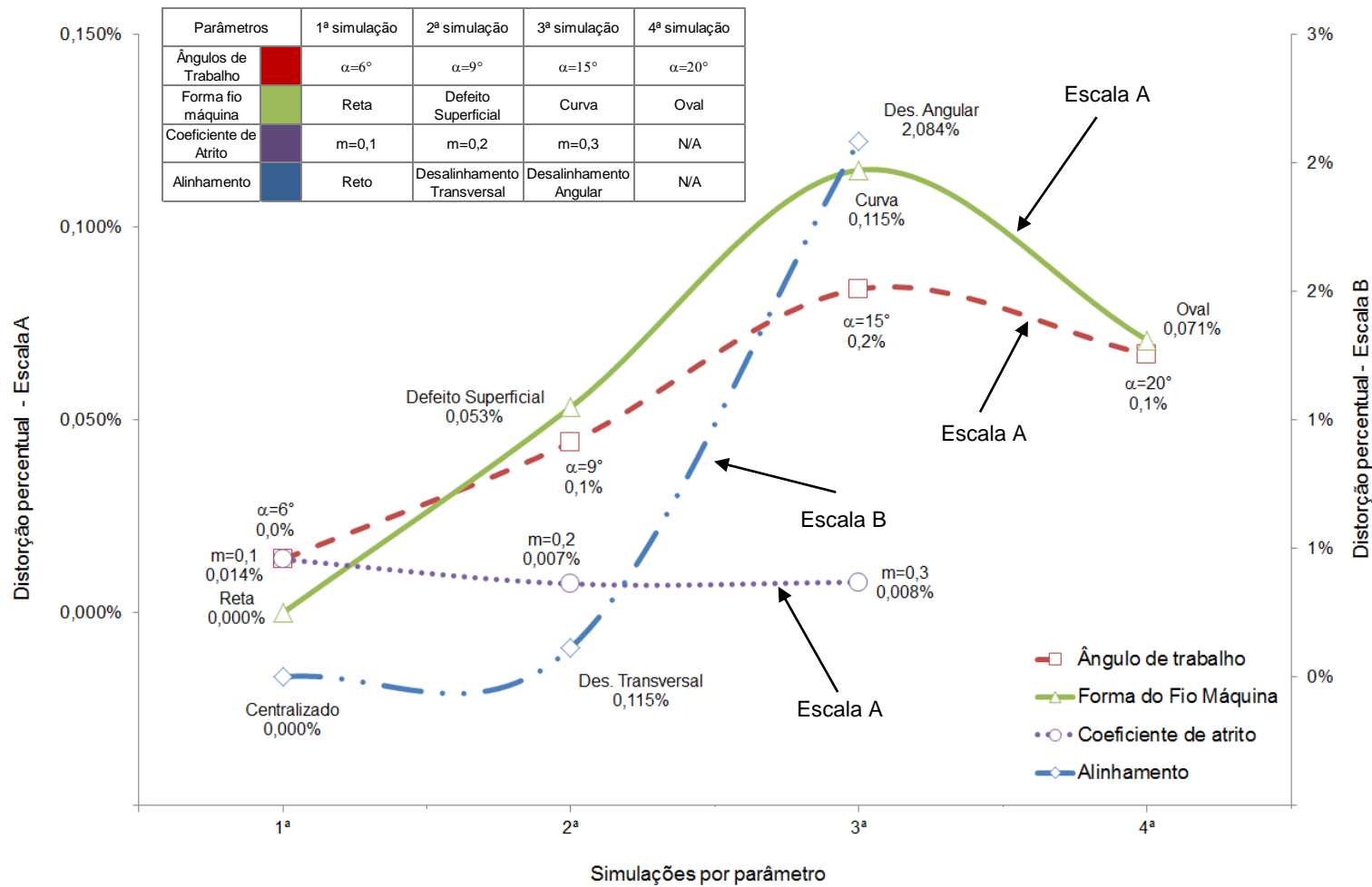


Figura 5.33 – Mapa de distorção por variável simulada

VI CONCLUSÕES

- Foi possível desenvolver um modelo por FEM para simulação do processo de trefilação de barras cilíndricas, envolvendo modificações dos parâmetros de processo.
- As simulações permitiram a previsão das tensões longitudinais residuais originadas em um processo de conformação mecânica por trefilação, assim como a alteração do perfil de tensões em função dos parâmetros avaliados.
- A utilização dos modelos numéricos permitiu também a avaliação do empeno das barras trefiladas pela quantificação da distorção gerada após a etapa de retorno elástico.
- Os resultados para a variação da geometria, do ângulo de trabalho e do atrito, separadamente, mostraram que estes parâmetros contribuem para a ocorrência do empeno, com valores superiores aos limites de retilineidade para hastes de amortecedores.
- O desalinhamento transversal da fieira em 5mm não foi significativo para a elevação da distorção da barra, obtendo-se resultados semelhantes aos da simulação com a geometria curva.
- O desalinhamento angular apresentou o maior valor de distorção, cerca de 2%, além de exibir um perfil de tensões particularmente diferente das demais simulações. Observou-se ainda, para este parâmetro, que a geometria da barra trefilada foi alterada, exibindo uma curvatura acentuada.

VII SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar, por simulação numérica, a influência de outros parâmetros construtivos da fieira, como comprimento de paralelo, raio de curvatura entre a região de entrada e o cone de trabalho, ângulo de saída, entre outros;
- Estender a avaliação do empeno e das tensões residuais para outros ângulos de trabalho;
- Simular e investigar outros valores de desalinhamento transversal e angular, avaliando a criticidade para o empeno;
- Investigar diferentes matérias primas para os casos de maior empeno e identificar sua relação com os resultados;
- Utilizar os dados do material da biblioteca do software, aplicando-se a curva de fluxo calculada, para investigar possíveis diferenças associadas às interpolações e/ou às extrapolações feitas pelo programa.
- Utilizar outros valores de densidade de malha de elementos para as simulações, verificando a influência deste parâmetro numérico nos resultados de distorção;
- Pesquisar outras formas de defeitos ocorridos em barras trefiladas e desenvolver modelos numéricos para avaliação de tensões residuais e distorção;
- Construir modelos para verificar o gradiente de distribuição de tensões longitudinais ao longo dos eixos X e Y, buscando correlacioná-lo a evidência de empeno.

VIII REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR ISO 6892: Materiais Metálicos – Ensaio de tração a temperatura ambiente*. Brasil, 2002.

ATIENZA, J.M.; MARTINEZ-PEREZ, M.L.; RUIZ-HERVIAS, J.; MOMPEAN, F.; GARCIA-HERNANDEZ, M.; ELICES, M.; *Residual stresses in cold drawn ferritic rods*. Scripta Materialia, Volume 52, Issue 4, February 2005, Pages 305-309, ISSN 1359-6462, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.10.010>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646204005871>)

AVITZUR, B. *Metal forming: processes and analysis*. Editora McGraw-Hill. 1968.

BHADESHIA, H. K. D. H. *Residual Stress: Material Factors*. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International, Materials Park, Ohio, 2002, 3-10.

BRESCIANI Filho, E.; ZAVAGLIA, C. A. C.; BUTTON, S. T.; GOMES, E.; NERY, F. A. C.. *Conformação Plástica dos Metais*. Campinas: Editora da Unicamp, 1997 (5ª edição), 383p.

CORRÊA, E. C. S. *Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio*. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Out. 2004. 233 p.

COUTO, G. A. *Efeito do ângulo da fieira na geometria e propriedades mecânicas de barras trefiladas*. Dissertação de mestrado. UFMG, março de 2011. 47 p.

COUTO G. A. CETLIN P. R.; LIMA A. B. 2011, *Efeito do ângulo da fieira na geometria e propriedades mecânicas de barras trefiladas*. Anais do 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos laminados e revestidos, ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Minerais e Mineração, Santos, SP, 24 a 27 de Outubro de 2011, ISSN 1983-4764, 908-919.

Da SILVA A. D., *Prediction and control of geometric distortion and residual stresses in hot rolled and heat treated large rings*. Tese de doutorado (doutorado sanduíche com co-orientação do Prof. T. Altan, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012, 150p.

DA SILVA ROCHA, A.; NUNES, R. M.; FERLAUTO, E. M. *Análise do “potencial de distorção” de barras cilíndricas de aço ABNT 1048*. Estudos Tecnológicos - Vol. 4, nº 3, (set/dez. 2008). p. 170-179. ISSN 1808-7310. doi: 10.4013/ete.20083.02

DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. Editora McGraw-Hill Kogakusha Ltd, 1ª ed. Tokio: 1961. p. 393-418.

_____ *Mechanical Metallurgy*. Editora McGraw-Hill. 3ª ed, New York: 1986.

GUIMARÃES, V. A. *Conformação plástica*. Universidade Federal de Passo Fundo: 2010. 30p.

HELMAN, H. e CETLIN, P. R. *Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais*. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

KABAYAMA, L. K.; TAGUCHI, S. P.; MARTINEZ, G. A. S. *The influence of die geometry on stress distribution by experimental and FEM simulation on electrolytic copper wire drawing*. Mat. Res., São Carlos, v. 12, n. 3, Sept. 2009. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392009000300006&lng=en&nrm=iso>. access on 04 Jun. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392009000300006>.

KUBOKI, T.; AKIYAMA, M.; NEISHI, Y.; KURODA, K. *Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing*. Ironmaking and Steelmaking. Vol. 28, N° 1, 2001. p. 65-71. ISSN 0301-9233.

LENARD, J. G. *Metal Forming Science and Practice: A State-of-the-Art*. Elsevier, 2002. 378 pg.

METZ, M.; SANTOS, C.; ROCHA, A. *Análise qualitativa das tensões residuais longitudinais em barras trefiladas de aço SAE 1045 através do método Slliting*. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cusco, out. 2007.

NUNES, R. M. *Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento*. Dissertação de mestrado. UFRGS, 2008. 110 pg.

ROCHA, A. S; NUNES, R. M.; FERLAUTO, E. M. *Avaliação dos efeitos de tensões residuais através da remoção de material*. Estudos Tecnológicos - Vol. 4, n° 3, (set/dez. 2008). p. 157-169. ISSN 1808-7310. doi: 10.4013/ete.20083.02

ROSSINI, N. S; DASSISTI, M; BENYOUNIS, K. Y. e OLABI, A.G. *Methods of measuring residual stresses in components*. Materials & Design, Volume 35, Mar. 2012. p. 572-588, ISSN 0261-3069, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911005887>)

SALCEDO, D.; LUIS, C. J.; LEÓN, J.; PUERTAS, I.; E PÉREZ, I. *Analysis of residual stress in wire drawing processes*. 14th International Research/Expert Conference, Mediterranean Cruise, 2010.

TADIC, N.; JELIC, M.; LUCIC, D. e MISOVIC M. *Relaxation of the residual stresses produced by plastic deformation*. Materials and technology. Vol. 45, n. 5, 2011. p. 467-475.

WANG, Z. e GONG, B. *Residual Stress in the Forming of Materials*. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International, Materials Park, Ohio, 2002, 141-149.

WITHERS, P.J.; BHADESHIA, H. K. D. H. *Residual stresses: Part 1 – Measurement techniques*. Materials Science and Technology, Vol. 17, April 2001, 355-365p, ISSN 0267-0836.

WITHERS, P.J.; BHADSHIA, H. K. D. H. *Residual stresses: Part 2 – Measurement techniques*. Materials Science and Technology, Vol. 17, April 2001, 366-375p, ISSN 0267-0836.