



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

SIMULAÇÃO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TREFILAÇÃO EM
AÇOS APLICADOS À CONSTRUÇÃO CIVIL, ATRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS

Jardel de Souza Belo

Fortaleza – CE
Dezembro de 2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

**SIMULAÇÃO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE
TREFILAÇÃO EM AÇOS APLICADOS À CONSTRUÇÃO CIVIL, ATRAVÉS
DE ELEMENTOS FINITOS.**

Jardel de Souza Belo

Monografia apresentada à
Coordenação do curso de
Engenharia Metalúrgica como parte
dos requisitos para a obtenção do
título de Engenheiro Metalurgista.

Orientador: Prof. Dr. Péter Zoltán Berke

Fortaleza – CE
Dezembro de 2014

“Mas você não trabalha, só estuda?!”.

(Autor desconhecido)

Ao meu amado avô Jorge Moreira de
Sousa.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais Francisco José Bezerra Belo e Maria dos Prazeres de Souza Belo, por todo o amor, carinho, ensinamentos, dedicação e sacrifícios.

Aos meus irmãos Daniel de Souza Belo, Rafael de Souza Belo e Laila Maria de Souza Belo por todo o apoio que me foi dado durante toda a vida.

Às minhas tias Maria Aparecida, Maria Luísa e Cleine Freire pelo suporte.

Aos meus padrinhos José de Arimatéia e Lucia Santiago pelo incentivo.

À minha companheira de todas as horas Mirela Oliveira por estar sempre com a mão estendida.

Aos meus amigos de infância Ricardo César, Dnescleiton Sousa, Anderson Luiz, Stênio Sobrinho e Rafael Delano por nunca desistirem de mim.

Aos meus amigos de universidade Luís Fernando, Daniel Lucena, Yuri Soares, Nathanael Wagner, Giovani Gonçalves, Arthur Colares, Alfredo Leão, Gerbson Queiroz, Cléber Iuri, Leonardo Martins e Demontier Vieira por tantos momentos de risadas e de desespero.

Ao Engenheiro Dr. Luís Flávio Gaspar Herculano por tantos ensinamentos e amizade.

Aos amigos da pós-graduação Jorge Luis Cardoso, Arquimedes Fortes, Oliveira Júnior e Neuman Viana.

Aos meus amigos de intercâmbio Rafael Linhares, Guilherme Soares, Leandro Vanderley, Liana Moreira, Pedro Salgado, Nayra Souza, Stefanie Böhme (Danke sehr für dein Geduld) e todos os outros que dedicaram sua paciência à minha impaciência.

Aos Professores Rodrigo Freitas, Francisco Nélio e Lorena Braga.

Aos professores do departamento Marcelo José Gomes da Silva, Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, Elineudo Pinho de Moura, Ênio Pontes de Deus, Jeferson Leandro Klug, Ricardo Emílio, Marcelo Ferreira Mota, Cleiton Carvalho, Hélio Cordeiro de Miranda, Francisco Marcondes, Igor Frota de Vasconcelos, Raimundo Leite, Walney Silva Araújo, Walmick Vieira e Lindberg Lima Gonçalves.

Ao meu orientador Péter Zoltán Berke, köszönöm a segítséget, odaadás és türelem.
(Muito obrigado pela sua ajuda, dedicação e paciência).

RESUMO

O processo de trefilação consiste em tracionar um material por meio de uma matriz com dimensões conhecidas e controladas. Este processo também é caracterizado por ser um trabalho multi-passes a frio em metais, sendo ele amplamente utilizado na indústria metal-mecânica. Durante o processo de trefilação, o material terá suas propriedades mecânicas alteradas, isso porque, devido à deformação plástica imposta no processo, o material sofrerá encruamento, levando ao aumento dos limites de resistência e escoamento. O presente trabalho tem por objetivo a simulação do processo de trefilação e avaliação através de um modelo não linear em elementos finitos, realização de um estudo paramétrico das principais variáveis de trefilação, analisar e quantificar sua influência no processo e nos resultados da qualidade do produto e identificar os parâmetros dominantes na trefilação. Foram realizadas simulações utilizando como parâmetro o aço AISI 1015 e alterando suas propriedades mecânicas em 10%, bem como o coeficiente de atrito e a geometria da fiação. Concluiu-se que o limite de escoamento inicial do material e a fricção são os fatores dominantes no processo.

Palavras-chave: Trefilação, elementos finitos, deformações plásticas.

ABSTRACT

The wire-drawing process consists in pulling material through a tool of known and controlled dimensions. This process is also characterized by being a multi-pass cold metal work, it is widely used in the metal industry. During the drawing process, the material will change its mechanical properties, because, due to plastic deformation imposed in the process, the material will undergo work hardening, leading to increased tensile and flow. This study aims to simulate the drawing process and evaluate through a nonlinear finite element model, conducting a parametric study of the main parameters of drawing, analyze and quantify the influence of these parameters on the process and quality of results product and identifying dominant parameters in the drawing. Simulations were carried out using the AISI 1015 steel parameter and altering its mechanical properties at 10%, the friction coefficient and the tool geometry. It was concluded that the initial yield strength of the material and friction are the dominant factors in the process.

Key-words: Wire drawing, finite elements, plastic deformations.

LISTA DE FIGURAS

Figura	1.	Diagrama Tensão nominal x Deformação nominal.....	17
Figura	2.	Fio-máquina utilizado para a produção do CA-60. (Aço Cearense website).....	18
Figura	3.	Fio passando pela fieira. (https://www.youtube.com/watch?v=ZYjhA2pDwyM).....	19
Figura	4.	Ângulos e regiões da fieira.....	20
Figura	5.	CA-60 (Aço Cearense website).....	21
Figura	6.	Regiões de contorno: a) Tensão de trefilação, b) Contato com o corpo rígido e c) o eixo de simetria.....	23
Figura	7.	Estado de tensões inicial da matéria prima.....	24
Figura	8.	Variação da força em função da variação do coeficiente de atrito.....	26
Figura	8.	Variação da Força em função da variação do Módulo de Elasticidade.....	26
Figura	10.	Variação da Força em função da variação do Coeficiente de Encruamento.....	27
Figura	11.	Variação da Força em função da variação do Limite de escoamento.....	27
Figura	12.	Tensão de Von Mises durante o processo.....	28
Figura	13.	Variação da tensão de Von Mises em função de um aumento em 10% no: a) Módulo de Elasticidade, b) Coeficiente de Fricção, c) Coeficiente de encruamento e d) Limite de escoamento.....	28
Figura	14.	Encruamento durante o processo.....	29
Figura	15.	Variação do encruamento em função da variação de 10% no: a) Módulo de Elasticidade, b) Coeficiente de Fricção, c) Coeficiente de encruamento e d) Limite de escoamento.....	29
Figura	16.	Tensão de Von Mises após o processo sem fricção.....	30
Figura	17.	Variação da tensão de Von Mises em função da variação de 10% no: a) Módulo de Elasticidade, b) Coeficiente de encruamento e c) Limite de escoamento.....	31
Figura	18.	Encruamento durante o processo sem fricção.....	31

Figura 19. Variação do encruamento em função da variação de 10% no: a) Módulo de Elasticidade, b) Coeficiente de encruamento e c) Limite de escoamento.....	32
Figura 20. Variação da força em função da variação do semi-ângulo da fieira.....	32
Figura 21. Variação da Tensão de Von Mises em função da variação do semi-ângulo da fieira.....	33
Figura 22. Variação do Encruamento em função da variação do semi-ângulo da fieira.....	
Figura 23. Variação do Encruamento em função da variação do semi-ângulo da fieira.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas do aço AISI 1015.....	23
Tabela 2. Simulações realizadas.....	24

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
ÍNDICE.....	xi
1 - Introdução	1
2 - Objetivos	4
3 - Revisão Bibliográfica.....	5
<i>3.1 – Conformação de metais.....</i>	<i>6</i>
<i>3.2 - Trefilação</i>	<i>7</i>
3.2.1 - Análise do processo de trefilação de barras de seção circular	10
<i>3.3 – Método dos elementos finitos.....</i>	<i>10</i>
4 - Materiais e Métodos.....	11
<i>4.1 - Material (modelo do material).....</i>	<i>11</i>
<i>4.2 - Método (modelo numérico).....</i>	<i>12</i>
5 - Resultados e Discussão.....	13
<i>5.1. Estudo da força de trefilação em função do coeficiente de atrito.....</i>	<i>14</i>
<i>5.2. Sistema com fricção.....</i>	<i>14</i>
<i>5.3. Sistema sem fricção.....</i>	<i>19</i>
<i>5.4. Variação da angulação da fieira.....</i>	<i>23</i>
<i>5.5. Novo Limite de Escoamento.....</i>	<i>25</i>
<i>5.6. Refinamento da malha.....</i>	<i>26</i>
6 - Conclusões.....	29
7 - Referências bibliográficas.....	30

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores índices de crescimento da economia de um país é o setor da construção civil. Nos últimos anos os investimentos na economia gerados pelo governo (Programa de Aceleração do Crescimento – PAC e programa Minha casa minha vida) e capital estrangeiro fizeram o setor da construção civil ter um crescimento vertiginoso. Esse aumento foi impactado principalmente pelo acesso ao crédito e ao crescimento da renda do brasileiro. Segundo dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) o crescimento do setor nos últimos 10 anos é maior que o crescimento do PIB brasileiro (CBIC).

Junto com o cimento, o aço é um dos principais insumos para a construção civil. A produção de aços longos no Brasil é aquecida devido à tamanha demanda. Esta produção pode ser a de barras CA-50 (aços com limite de escoamento igual ou superior a 500MPa) ou a de fio-máquina, matéria prima para a produção do CA-60 (aços com limite de escoamento igual o superior a 600MPa) (NBR 7480).

A produção do CA-60 é feita através de conformação mecânica, geralmente trefilação. Este processo consiste em tracionar um material por meio de uma matriz com dimensões conhecidas e controladas (BUTTON, 2001). Este processo também é caracterizado por ser um trabalho multi-passes a frio em metais, sendo ele amplamente utilizado na indústria metal-mecânica. Cada passe corresponde a uma redução ao qual o material será submetido, até que no ultimo passe, o diâmetro desejado seja alcançado (WRIGHT, 2002). Durante o processo de trefilação, o material terá suas propriedades mecânicas alteradas, isso porque, devido à deformação plástica imposta no processo, o material sofrerá encruamento, levando ao aumento dos limites de resistência e escoamento. No entanto, o material perde boa parte de sua capacidade de alongar antes de romper (EDER, 2006).

Os Fios-Máquina trefilados, que são usadas como produtos na construção civil, devem cumprir requisitos tais como: tolerâncias dimensionais, boa rugosidade superficial além de boas propriedades mecânicas (dureza, tração, alongamento e escoamento) (SANTOS, 2007). Alguns dos parâmetros que mais influenciam nas propriedades finais depois da trefilação são: velocidade de trefilação, coeficiente de atrito (entre fio e fieira) e as propriedades mecânicas do material.

Essa elevada demanda de produção leva a uma busca maior por elementos que tornem o processo mais produtivo e que permaneça com a qualidade necessária para que a norma NBR 7480 seja atendida. Para isso, setores da indústria, tais como qualidade e pesquisa e desenvolvimento além dos institutos de

pesquisa e universidades, trabalham em métodos que promovam uma melhoria na qualidade aliada a ótimos índices de produtividade.

Pesquisas no âmbito da conformação mecânica podem ser realizadas por meios analíticos, experimentais e numéricos (DOS SANTOS, 2007).

Métodos analíticos são caracterizados por fornecer análises limitadas em questões de geometria e parâmetros de saída, fornecendo apenas valores de carga de conformação (DOS SANTOS, 2007).

Métodos experimentais geralmente exigem um grande número de experimentos, o que pode acarretar em altos custos quando comparado a outros métodos (DOS SANTOS, 2007).

O método de elementos finitos apresentam boas características tais como: avaliação de um grande número de geometrias de processos, maior número de informações sobre o processo (fluxo do material, distribuição de deformação e tensão, dano, entre outras), rapidez na geração dos resultados (DOS SANTOS, 2007).

A literatura fornece inúmeras formulações nas quais elementos finitos são aplicados. Em algumas destas formulações são apresentadas análises dos processos de conformação (DOS SANTOS, 2007). Em uma análise que leva em consideração fatores rígidos e plásticos, a deformação da peça conformada é considerada apenas de ordem plástica e, para a outra abordagem, a deformação é dividida em duas partes: elástica e plástica (DOS SANTOS, 2007). Essas formulações têm como ponto principal a definição de uma curva de fluxo do material conformado (curva tensão x deformação), a qual muitas vezes é obtida por meio de ensaios de tração. Essas curvas de fluxo fornecem parâmetros para a formulação da equação de escoamento que descreve o encruamento isotrópico do material (DOS SANTOS, 2007).

O Método dos Elementos finitos constitui-se de um procedimento numérico embasado na transformação de um problema complexo na soma de vários problemas simples, sendo assim necessário alcançar soluções locais, cujas propriedades possam garantir uma convergência para os problemas globais. A ideia é aplicada à análise de estruturas (PAVANELO, 2004).

Devido ao grande número de formulações do método dos elementos finitos, a verificação da proximidade dos resultados numéricos em relação aos dados experimentais do processo é uma prática importante, tal como a comparação com outros métodos aplicados em trabalhos anteriores, com a finalidade de que o método aplicado seja validado (DOS SANTOS, 2007).

A motivação desse trabalho vem do fato de haver uma expansão no segmento de produção do CA-60 e o estado do Ceará ser um dos maiores produtores da região nordeste do Brasil. Assim, as exigências para que haja um estudo sobre a influência dos principais parâmetros de trefilação sobre o produto final se fazem necessárias. Este estudo pode levar a criação de critérios de produção que aliem velocidade de produção e qualidade do produto. E para a execução desse projeto, a utilização de simulações por elementos finitos pode se mostrar bastante eficiente devido principalmente ao fato de apresentar baixos custos de aplicabilidade e velocidade de resposta bem maior, se comparado com o método experimental e o método analítico. O trabalho apresenta o primeiro passo do processo, incluindo simulações não lineares usando elementos finitos para a trefilação, isso inclui alguns fenômenos físicos importantes, i. e., comportamento elasto-plástico do material, influência da fricção e o limite de escoamento do material após o processo.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivos:

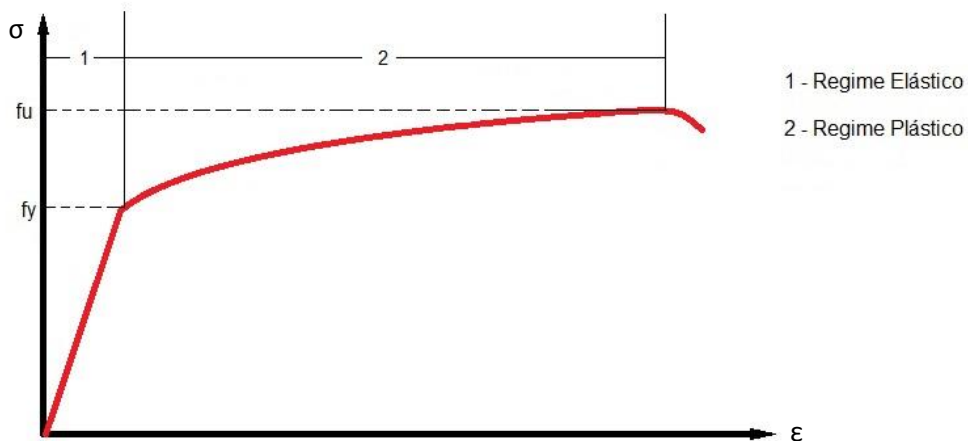
- Uso de um modelo não linear em elementos finitos para a trefilação do aço AISI 1015;
- Um estudo paramétrico das principais variáveis da trefilação, como: propriedades mecânicas do material, geometria da fieira e a fricção;
- Analisar e quantificar a influência desses parâmetros no processo (força de trefilação) e nos resultados da qualidade da peça (tensões residuais e deformação);
- Identificar os parâmetros dominantes na trefilação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O comportamento mecânico dos aços é descrito usando o diagrama tensão-deformação proveniente do ensaio de tração do mesmo. Nele é possível observar as fases elástica, plástica e de encruamento. Dentro da fase elástica, a deformação da peça tracionada é proporcional ao esforço aplicado, atendendo à lei de Hooke. A constante de proporcionalidade é denominada de módulo de elasticidade ou módulo de deformação longitudinal (E), e corresponde à tangente do ângulo α , ou seja, à inclinação da reta. Caso ocorra um descarregamento, a deformação desaparece totalmente. O limite de escoamento do aço (f_y) é o valor constante da tensão (característica de grande importância para o projeto estrutural) e é calculado através da divisão da carga máxima que o material suporta antes de escoar pela área da seção transversal inicial do corpo de prova durante o ensaio de tração. Na fase plástica a estrutura interna do material é rearranjada, o que gera o encruamento (processo que acontece após o escoamento) ocorrendo variações de tensões com a deformação, geralmente, de forma não linear. Nessa fase o aço atinge o valor máximo da tensão, conhecido por limite de resistência do aço (f_u) (TEOBALDO, 2004).

Diz-se que a elasticidade do aço é a capacidade dele de voltar à forma original após sucessivos ciclos de carregamento e descarregamento. O aço sofre deformações devido ao efeito de tensões de tração ou de compressão. Essas deformações podem ser elásticas ou plásticas, devido à natureza cristalina dos metais através de planos de deslizamento ou de menor resistência no interior do reticulado. Para a deformação elástica, o material retorna ao seu estado inicial quando a tensão é removida, sendo essa deformação reversível. O módulo de elasticidade é uma característica dos materiais que possuem fase elástica relacionada à rigidez e é gerada através da relação entre a tensão e a deformação linear específica. Está também diretamente relacionado às forças de atração interatômicas, de modo que quanto mais intensas forem essas forças, maior será o módulo de elasticidade. Isso acontece porque a deformação elástica é consequência da movimentação dos átomos constituintes da rede cristalina do material, porém os átomos mantêm suas posições relativas. Os aços estruturais possuem um módulo de elasticidade da ordem de 200 GPa, a uma temperatura ambiente (TEOBALDO, 2004).

Figura 1. Diagrama Tensão nominal x Deformação nominal.



Fonte: Próprio autor

A ductilidade do aço é a capacidade que ele tem de se deformar plasticamente sem se romper. Nas estruturas metálicas, esta característica é extremamente importante principalmente pelo fato de permitir a redistribuição de tensões locais elevadas. Assim, as peças fabricadas em aço sofrem grandes deformações antes de se romper, constituindo um aviso da presença de tais tensões (TEOBALDO, 2004).

3.1. Conformação mecânica de metais

Define-se a conformação mecânica como uma operação onde se aplicam solicitações mecânicas, que respondem com uma mudança permanente de dimensões: a deformação plástica. Além da mudança de dimensões, outro resultado obtido comumente através da conformação mecânica é a alteração das propriedades do metal em relação àquelas anteriores ao processamento (HELMAN, 1993).

O controle das propriedades mecânicas dos materiais por processos de conformação mecânica possui importância idêntica à criação de formas úteis através destas técnicas. Em diversos produtos as propriedades mecânicas dependem do controle do encruamento durante o processamento, enquanto em outros casos é necessário manter controle preciso de deformação, temperatura e taxa de deformação durante a operação para desenvolver características ótimas de microestrutura e propriedades (MEYERS, *et. al.*, 1982).

Os processos de conformação podem ser classificados em algumas categorias como, por exemplo, em operações de trabalho a quente e trabalho a frio. O trabalho a quente ocorre numa faixa de temperatura acima da recristalização

fazendo com que haja uma pequena taxa de encruamento. Por outro lado, o trabalho a frio é a deformação realizada sob condições em que os processos de recuperação não são efetivos (DIETER, 1988).

No trabalho a frio à proporção que o metal é deformado, ocorre o encruamento. O encruamento é atribuído à redução da mobilidade média das discordâncias que, por sua vez, estão associadas ao principal mecanismo de deformação plástica do material, o deslizamento. Essa resistência à movimentação se dá pela formação de barreiras, decorrentes da interação direta das discordâncias entre si e com outras imperfeições, tais como contornos de grão, ou indireta, com campos de tensões também relativos a defeitos. Dessa forma, diversos processos deverão contribuir para o encruamento do metal: multiplicação de discordâncias, interseção das mesmas resultando em discordâncias bloqueadas e degraus, falhas de empilhamento, refino de grão, adição de átomos de soluto e transformações de fase. Essas interações levam a uma redução na mobilidade média das discordâncias, dessa forma a tensão imposta, necessária para deformar um metal, aumenta com o aumento do encruamento (DIETER, 1988).

3.2. Trefilação

Dentre os processos de conformação de metais, a trefilação é um dos mais antigos. Os adornos de ouro em forma de arame trabalhado foram utilizados como adornos pessoais dos faraós egípcios, quase 3.000 anos antes de Cristo. No século XIV, a indústria teve o seu primeiro equipamento mecânico de trefilação, que era movido à água. De 1850 a 1870, deu-se o grande salto da trefilação, devido à difusão do telégrafo e à demanda por fios condutores (MACHADO, 2008).

O Processo de trefilação é caracterizado pela passagem de um fio através de uma fiação mediante a aplicação de uma força de tração à saída desta fiação (HELMAN, 2005).

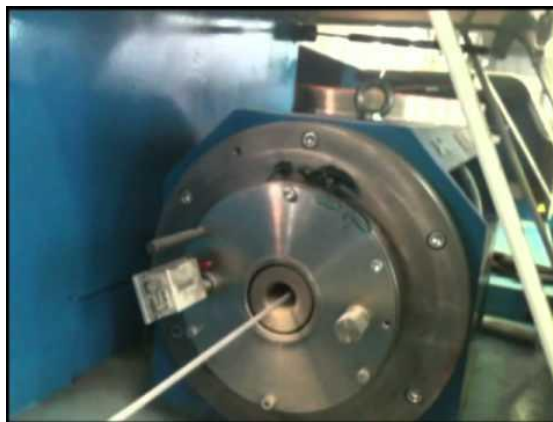
Figura 2. Fio-máquina utilizado para a produção do CA-60.



Fonte: Aço Cearense website

A barra é apontada e inserida através da fieira, sendo, em seguida, presa por garras de tração usualmente impulsionadas. A tração pode chegar a 100 toneladas e a velocidade chegar até a ordem de 100m/min. As fieiras de trefilação são geralmente construídas de carboneto de tungstênio, devido à sua durabilidade. Estas são caracterizadas por seu diâmetro de cone (ângulo de trefilação) (figura 4). A zona de entrada é formada por um ângulo maior que o de trefilação, para que o processo de lubrificação seja facilitado. Na saída, existe uma zona cilíndrica devido à fabricação e manutenção de matriz, além de ser útil para que a velocidade de desgaste do diâmetro de saída da fieira seja reduzida. (HELMAN, 2005).

Figura 3. Fio passando pela fieira.



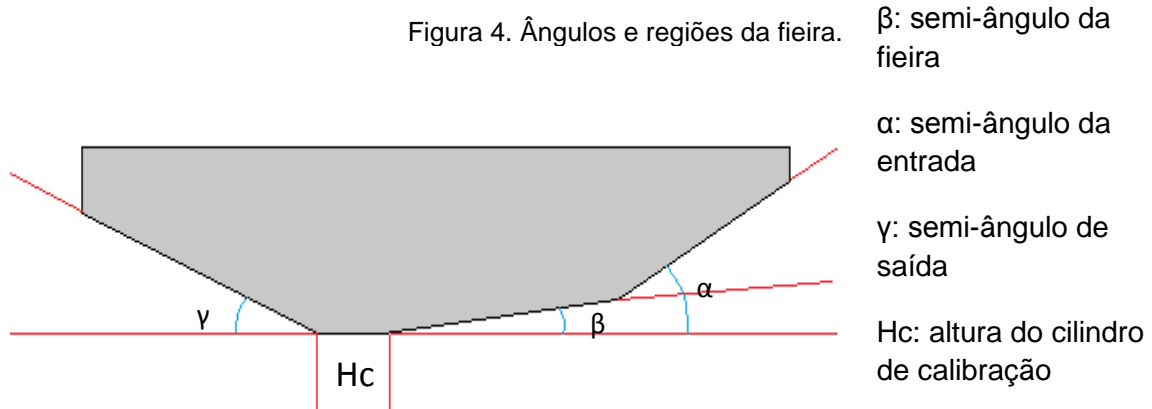
Fonte: <<https://www.youtube.com/watch?v=ZYjhA2pDwyM>>

Em processos por conformação, o movimento entre duas superfícies ocasiona deformações plásticas, aquecimento e desgaste, o que resulta em perda da eficiência e solicitação de maior potência. Isso se deve ao fato de que as superfícies, ainda que cuidadosamente trabalhadas, quando examinadas ao microscópio, apresentam-se constituídas de saliências e reentrâncias que ocasionam interação e intertravamento superficial (MARTINEZ, 1988).

Se as superfícies dos corpos em contato são previamente cobertas com um material de baixa resistência ao cisalhamento, o processo de atrito tenderá a localizar-se neste material, e só afetará parcialmente os corpos em contato. Este material interposto, que pode ser sólido, líquido ou gasoso, denomina-se lubrificante. Nestas circunstâncias, as forças de atrito estarão fundamentalmente determinadas pelas características mecânicas da película lubrificante (HELMAN, 1993).

São várias as funções de um lubrificante em processos de conformação: reduzir a carga de deformação, aumentar o limite de deformação que antecede a

fratura, controlar o acabamento da superfície, minimizar a absorção de metal da peça pelas ferramentas e o desgaste da ferramenta e proporcionar um isolamento térmico para a peça e as ferramentas (GIORGINI, 2013).



Fonte: Próprio autor

As alterações ocorridas no material se dão no sentido da redução da ductilidade e aumento da resistência mecânica (MACHADO, 2008).

Portanto, o processo de trefilação é geralmente um trabalho de conformação mecânica, realizado a frio, ou seja, a uma temperatura de trabalho menor que a temperatura de recristalização (MACHADO, 2008).

Na produção de pequenos diâmetros, tais como o arame, pode-se aplicar o tipo de máquina rotativa. Existe a possibilidade de que vários conjuntos deste tipo possam operar em série para obter arames de diâmetros menores (HELMAN, 2005).

O material deforma-se à medida que passa a fieira e, tendo assim, seu diâmetro reduzido. Como isso, é possível obter um produto de seção menor e comprimento maior, com boa qualidade superficial e ótimo controle dimensional. Geralmente, a matéria prima quanto o produto final possuem simetria axial, mesmo esta condição não sendo uma estritamente necessária (HELMAN, 2005).

Os produtos trefilados são classificados conforme a sua função:

- Barras: quando possui um diâmetro maior que 25 mm.
- Arames ou fios: quando possui diâmetros menores que 25 mm, mas superiores a 0,7 mm. Também existem que podem chegar a 0,07 mm de diâmetro, no entanto, estes são considerados especiais.
- Tubos: podem ser trefilados de diferentes formas, o que não foi levado em consideração no trabalho.

Figura 5. CA-60



Fonte: Aço Cearense website

3.2.1. Análise do processo de trefilação de barras de seção circular

A análise do processo de trefilação considera uma série de problemas, tais como: esforço necessário para executar a operação, lubrificação na interface fieira/metal, acabamento e propriedades mecânicas finais do produto, evolução térmica do produto sob processamento, etc (HELMAN, 2005).

Os esforços são analisados em função dessas quatro variáveis: redução de área, ângulo da matriz, o atrito entre o fio e a fieira, além das propriedades mecânicas do material (HELMAN, 2005).

3.3. Métodos dos elementos finitos

O método dos Elementos Finitos é um procedimento numérico para a análise de estruturas e meios contínuos. Este método é baseado no conceito da discretização espacial. A ideia consiste em transformar um problema complexo na soma de diversos problemas simples (PAVANELO, 2004).

A abordagem do equilíbrio de uma estrutura pode ser efetuada considerando-a um sistema discreto, ou seja, considerar a divisão da estrutura em partes separadas distintas, conectadas por pontos discretos e as condições de continuidade no campo de deslocamentos (FILHO, 2006).

Do ponto de vista prático, os softwares de elementos finitos oferecem uma biblioteca de elementos do programa, contendo diversos elementos, cada qual tentando representar um diferente comportamento físico conhecido de mecânica

estrutural (estado plano de tensões, placas, cascas, membranas, sólidos, etc.) (FILHO, 2006).

Cook, et al incrementaram uma sequencia envolvida na análise por elementos finitos:

- Criar a malha de elementos finitos na estrutura a ser analisada;
- Definir as propriedades dos elementos para determinar as condições de carregamento nos nós em conformidade com a deformação permitida para os elementos é necessário para que a análise de tensões seja aplicada;
- Fazer a montagem dos elementos de maneira a construir os alicerces para a criação do modelo por elementos finitos;
- Carregamentos nodais conhecidos são aplicáveis de modo a solucionar a mecânica do modelo;
- As condições de contorno são definidas de modo que sejam condizentes com o que está sendo reproduzido, ou seja, atribuído aos nós;
- Os *solvers* solucionam as equações algébricas, dimensionando os deslocamentos, conforme a análise que se esteja fazendo;
- Pós-processadores são empregados para que as interpolações de saída sejam efetuadas e possibilitem a interface gráfica dos resultados.

A utilização de simulações por elementos finitos pode se mostrar bastante eficiente devido principalmente ao fato de apresentar baixos custos de aplicabilidade e tempo de resposta bem maior, se comparado com o método experimental e o método analítico, além de apresentar uma maior precisão para estudos de trefilação (LUIS, *et al*).

4. MATERIAIS E METODOLOGIA

Ajustes nos parâmetros de um processo de trefilação podem ser feitos na fábrica, no entanto isso pode demandar tempo, pessoal e dinheiro, ainda correndo o risco de não obter o êxito previsto. Para isso utiliza-se de técnicas computacionais no intuito de economizar os recursos citados anteriormente.

Para que isso seja possível é necessário que se conheça o comportamento do material que está sendo analisado, qual ajuste se deseja simular e qual modelo se deve construir.

4.1. Modelo do material (material)

A norma NBR 7480 (normatiza a produção de CA-60) não se refere à composição química do material, apenas quanto aos valores de limites de resistência e de escoamento do material. É sabido que as empresas implementadoras deste processo utilizam aços que tem teores de carbono entre 0,1% e 0,18%.

As simulações foram realizadas com a intenção de se aproximar ao máximo possível do processo de trefilação de arames metálicos para a produção de CA-60, para isso foram utilizadas as mesmas propriedades mecânicas iniciais do material, ou seja, da forma como recebido da planta siderúrgica. Neste trabalho optou-se por utilizar o aço AISI 1015, conforme a tabela 1 (DIXIT *et al*, 2008).

Tabela 3. Propriedades mecânicas do aço AISI 1015.
Propriedades mecânicas AISI 1015

Módulo de Elasticidade (E)	208 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3
Limite de Escoamento (σ_0)	275 MPa
Coefficiente de Encruamento (K)	515,23 MPa
Expoente de Encruamento (n)	0,6

Equação de Ludwig (Total Materia): $\sigma_h = \sigma_0 + K \cdot \epsilon^n$, onde ϵ é a deformação plástica.

4.2. Modelo numérico (método)

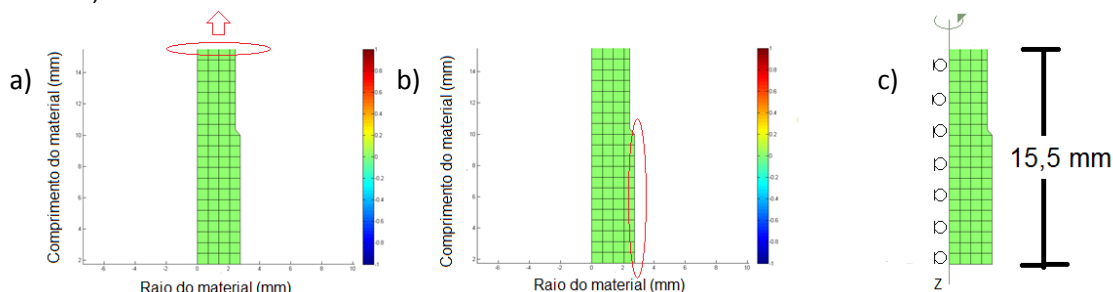
O método utilizado para a realização do trabalho, primeiramente foi a criação da modelagem por meio de elementos finitos, utilizando o software comercial MATLAB® o modelo foi construído pelo Professor Berke e gentilmente cedido pelo mesmo. No entanto algumas alterações precisaram ser feitas, tais como a região de aplicação de tensão, a de contato com a fieira e o eixo de revolução, conforme as figuras 16 a), b) e c), respectivamente.

Como citado anteriormente, a trefilação trata-se de um processo multi-passes, no entanto este trabalho contém apenas um passe.

A geometria da peça foi criada com as mesmas dimensões do fio-máquina, ou seja possui um diâmetro de 5,5mm, mas como o considerou-se o processo como axial e simétrico (RUBIO *et al*), utilizou-se a dimensão de 2,75mm.

Assim como no processo real, também foi criada uma “ponta” no fio com a finalidade de produzir uma angulação que facilita sua passagem pela fieira. Esta foi definida como um corpo rígido que não sofre deformação.

Figura 6. Regiões de contorno: a) Tensão de trefilação, b) Contato com o corpo rígido e c) o eixo de simetria.



Fonte: Próprio autor

A partir daí foram realizadas 13 simulações no intuito de descobrir os efeitos na Tensão de von Mises, Deformação plástica e Força de Trefilação da variação de parâmetros tais como: propriedades mecânicas (Módulo de elasticidade, Limite de escoamento e Coeficiente de encruamento) do material em 10%, coeficiente de fricção e variação da angulação da fieira de 7° para 7,5° e de 7,5° para 8°. A tabela 2 exhibe as simulações realizadas.

- O critério de von Mises define que o escoamento tem início quando a energia de distorção atinge um valor crítico, ou seja, quando o mesmo atinge o limite de escoamento ;
- O modelo de fricção de Coulomb considera que existe apenas o atrito proveniente da natureza das superfícies de contato, ou seja, é considerado a existência uma força de oposição à velocidade do movimento.

O modelo de fricção levado em consideração foi o modelo de Coulomb e não o uso de lubrificantes fluidos ou sólidos.

Tabela 4. Simulações realizadas.

	Simulações			
	Módulo de Elasticidade (E)	208 GPa	187,2 GPa	228,8 GPa
Coeficiente de encruamento (K)	515,23 MPa	453,71 MPa	566,75 MPa	-
Limite de escoamento (σ_0)	273 MPa	247,5 MPa	302,5 MPa	-
Semi-ângulo da fieira (β)	7°	7,5°	8°	-
Coeficiente de fricção	0,05	0,1	0,125	0,15

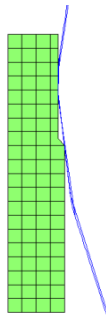
As hipóteses geradas pelo trabalho dizem respeito à:

- Fricção de Coulomb, considerando-se apenas o coeficiente de atrito do material, esse fricção também pode ser chamada de atrito seco.
- Um modelo elásto-plástico, sendo a plasticidade um fator predominate.
- A isotropia do material, ou seja, o mesmo foi considerado com características homogêneas e sua microestrutura não foi levada em consideração.
- A velocidade de trefilação não foi levada em consideração e a simulação é dependente apenas do deslocamento sem velocidades.
- Malha quadrada com 8 nós e 9 pontos de integração.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 7 mostra o material antes da simulação. Nela é o possível observar que ainda não há variações na estrutura do material, ou seja, as forças ainda não foram aplicadas.

Figura 7. Estado de tensões inicial da matéria prima.



Fonte: Próprio autor

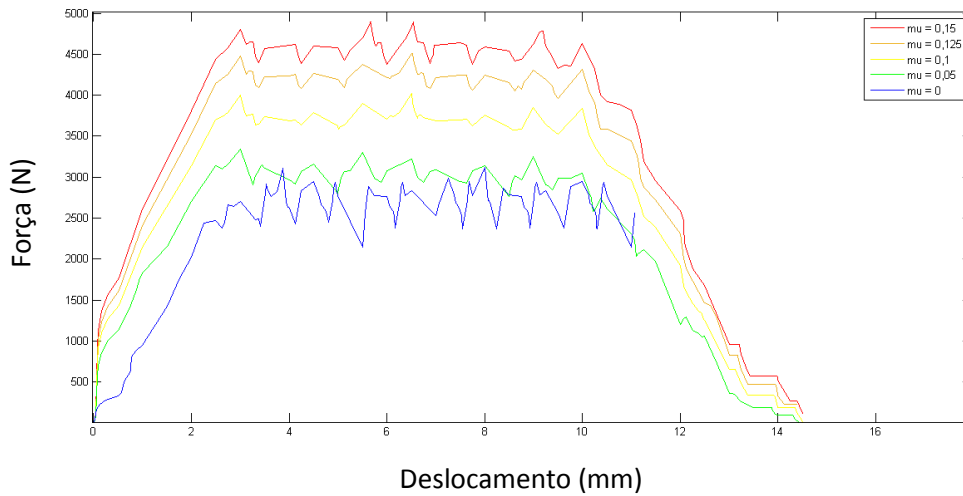
O corpo na cor verde representa o fio e o corpo rígido é definido pela linha em azul. Vale ressaltar que se trata de um processo em que o volume é conservado.

5.1. Estudo da força de trefilação em função do coeficiente de atrito.

A figura 8 mostra a influência da variação do coeficiente de atrito na força máxima durante o processo de fabricação.

Com esta análise torna-se evidente que conforme o coeficiente de atrito é reduzido, menor é a força necessária para que o processo seja realizado. Tal fato pode ser importante em termos industriais para que o lubrificante usado no processo reduza o atrito, pois assim uma menor força deve ser aplicada e isso é refletido na energia que a máquina exigirá. Estudos experimentais para o aço AISI 1015, mostram que para um ângulo fixo de fieira, o aumento do coeficiente de atrito está diretamente ligado com o aumento da força de trefilação (GERBASE FILHO, 1976).

Figura 8. Variação da força em função da variação do coeficiente de atrito.

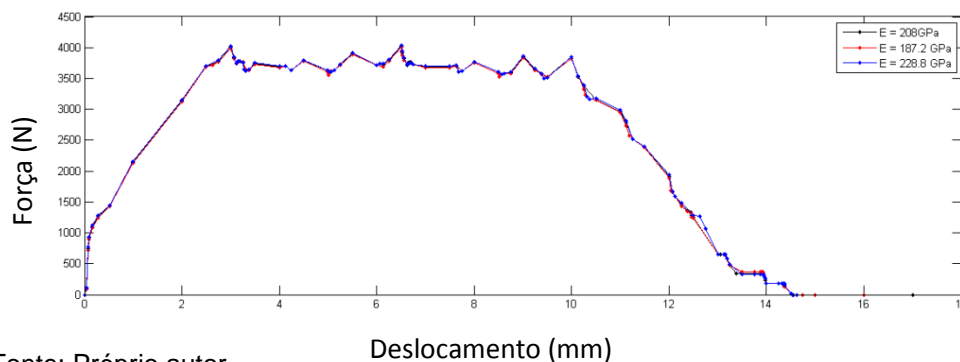


Fonte: Próprio autor

5.2. Sistema com fricção

A figura 9 exibe a variação da força necessária durante o processo de trefilação para uma variação de 10% do Módulo de Elasticidade (E).

Figura 9. Variação da Força em função da variação do Módulo de Elasticidade.

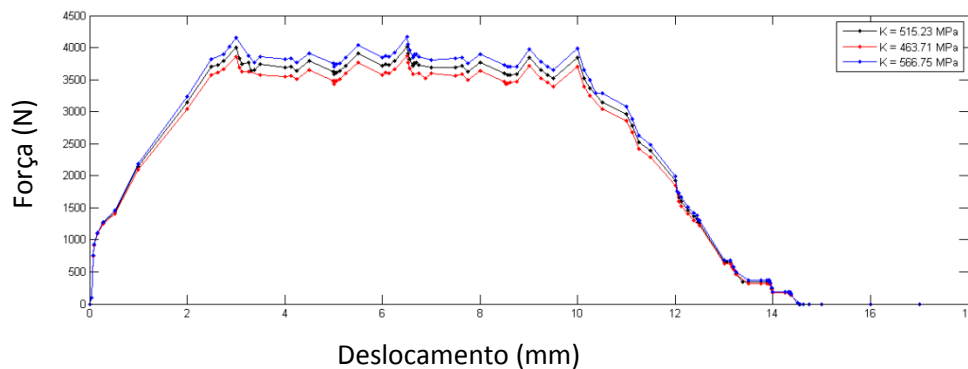


Fonte: Próprio autor

Para uma variação de 10% para mais e para menos, a variação da força permaneceu a mesma, mostrando que a variação de E não é significativa na força aplicada. Isso se deve principalmente pelo fato de o processo ser principalmente plástico.

A figura 10 exibe a variação da força necessária durante o processo de trefilação para uma variação de 10% do Coeficiente de Encruamento (K).

Figura 10. Variação da Força em função da variação do Coeficiente de Encruamento.

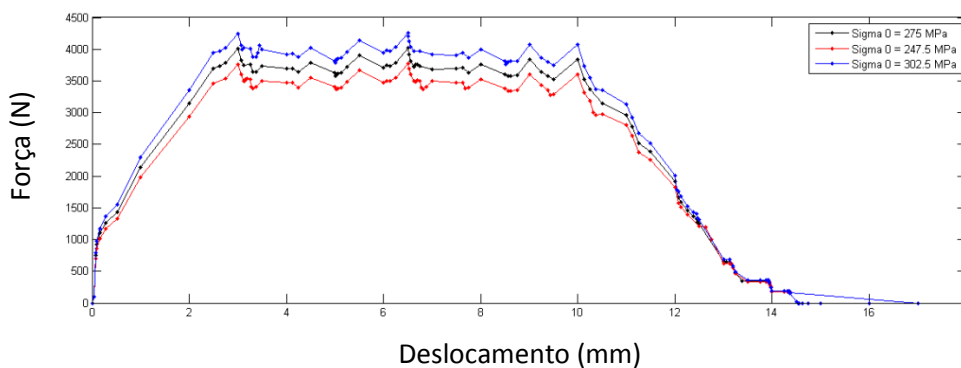


Fonte: Próprio autor

Para uma variação de 10% para mais e para menos, a variação da força mostrou uma leve alteração, sendo que para um coeficiente de encruamento 10% menor que o do material original apresentou uma força máxima de 3864 N, enquanto que para um coeficiente 10% maior, a força foi de 4157 N. Em termos de porcentagem, para um K maior, o aumento da força foi de 3,8% e para um K menor, houve uma redução de 3,4% na força, mostrando um comportamento praticamente linear.

A figura 11 exibe a variação da força necessária durante o processo de trefilação para uma variação de 10% do Limite de Escoamento (σ_0).

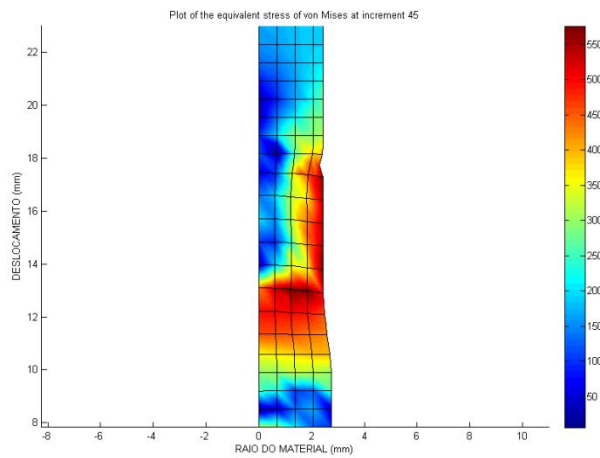
Figura 11. Variação da Força em função da variação do Limite de Escoamento.



Fonte: Próprio autor

Para uma variação de 10% para mais e para menos no Limite de Escoamento do material, a variação da força mostrou uma considerável alteração, mostrando-se ainda maior que a variação para o coeficiente de encruamento. Quando comparado com o Limite de escoamento original, o aumento foi de 6% na força de trefilação para o σ_0 igual a 302,5MPa e uma redução de 6% para 247,5MPa. Isso mostra que o limite de escoamento do material tem a maior influência sobre a força de trefilação.

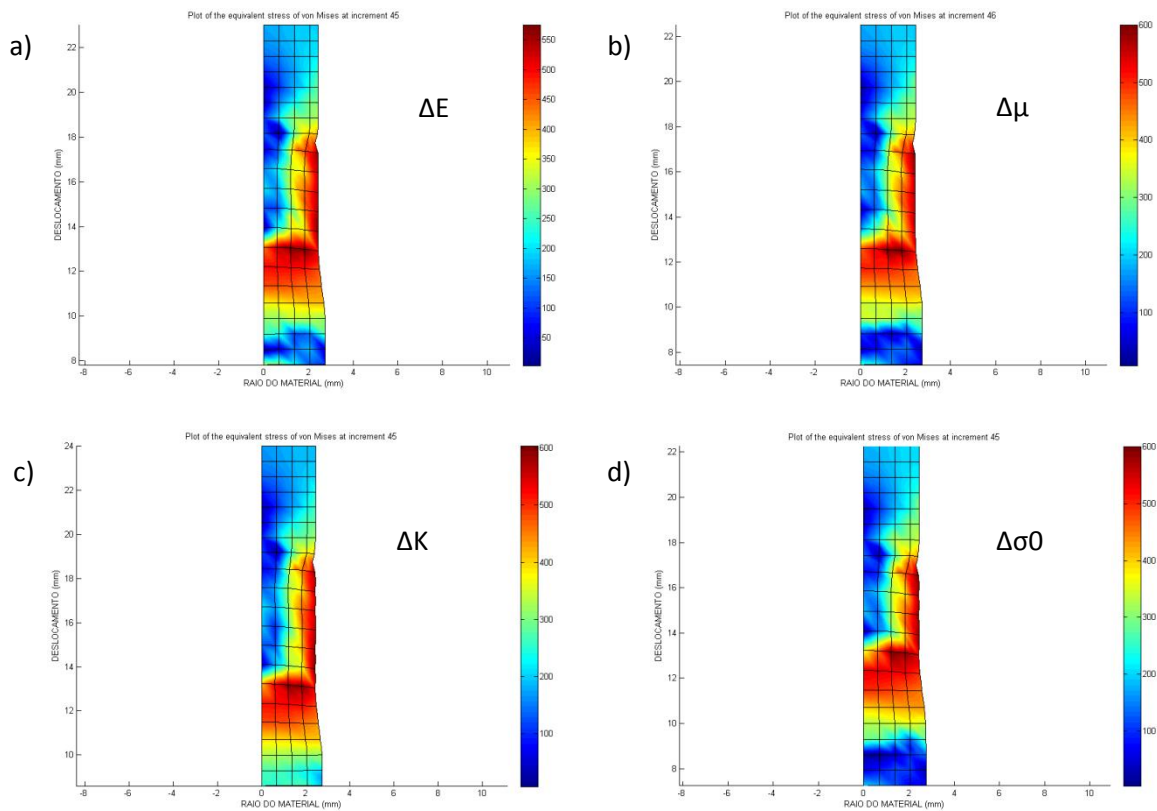
Figura 12. Tensão de von Mises durante o processo.



Fonte: Próprio autor

É possível observar que algumas regiões do fio as tensões chegaram a aproximadamente a 550MPa.

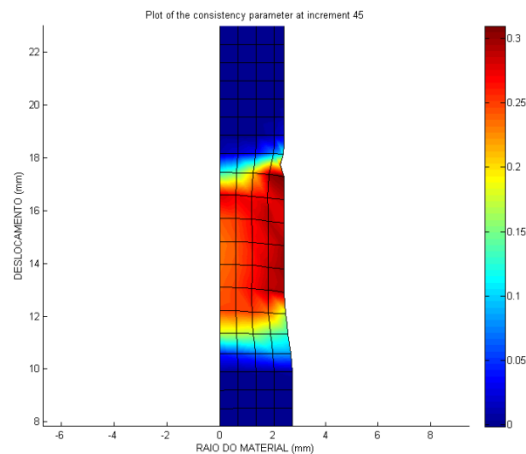
Figura 13. Variação da tensão de von Mises em função de um aumento no: a) 10% Módulo de Elasticidade, b) 25% Coeficiente de Fricção, c) 10% Coeficiente de encruamento e d) 10% Limite de escoamento.



Fonte: Próprio autor

Foi possível observar que a variação de 10% nas propriedades mecânicas da matéria prima a única variação perceptível foi a do coeficiente de atrito que fez a tensão alcançar um valor próximo a 550MPa enquanto que as outras alterações não foram suficientes para causar variações significativas na tensão de von Mises e permaneceram na ordem de 500MPa.

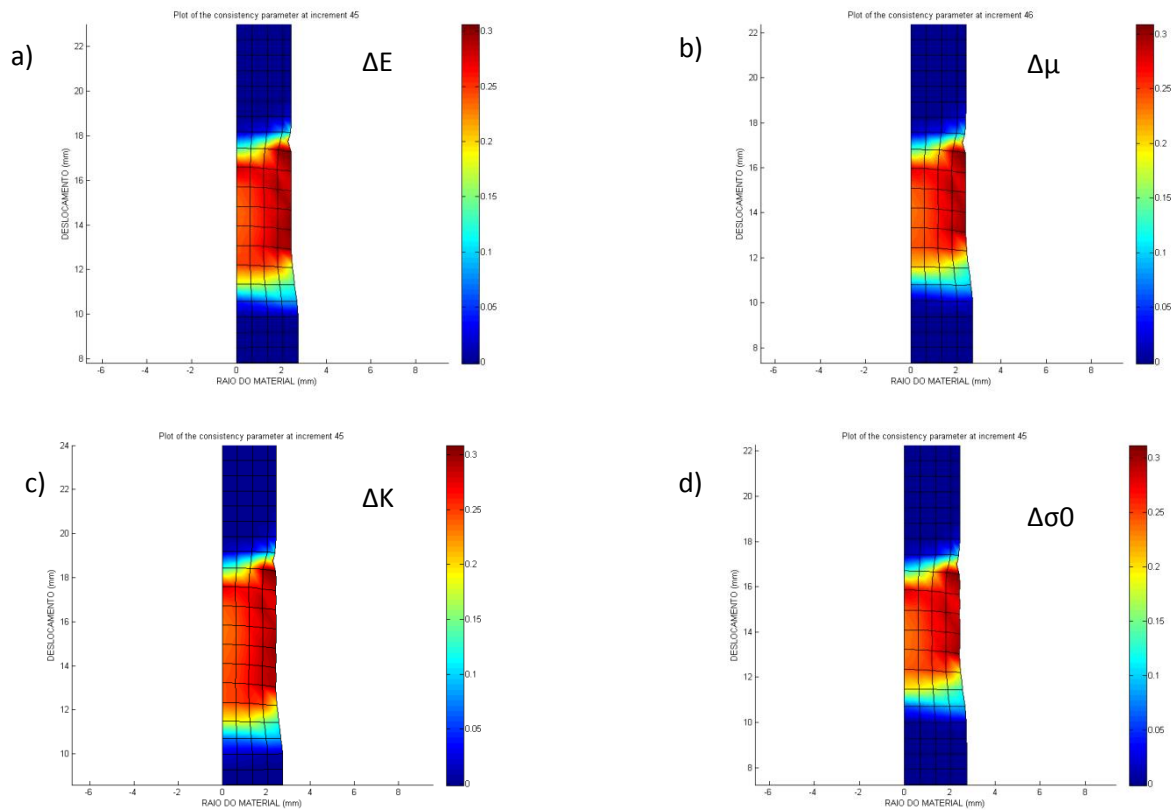
Figura 14. Deformação plástica durante o processo.



Fonte: Próprio autor

A figura 15 exibe o nível da deformação plástica durante o processo e quando as propriedades mecânicas tiveram uma variação.

Figura 15. Variação da deformação plástica em função do aumento em: a) 10% Módulo de Elasticidade, b) 25% Coeficiente de Fricção, c) 10% Coeficiente de encruamento e d) 10% Limite de escoamento.



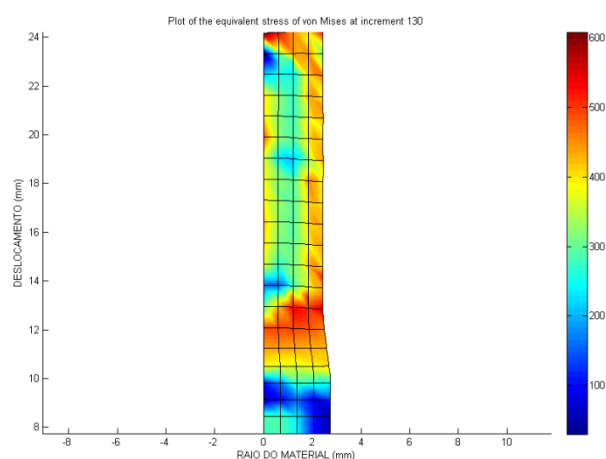
Fonte: Próprio autor

Foi possível observar que a variação de 10% nas propriedades mecânicas da matéria prima não foram suficientes para causar variações significativas na deformação plástica do material.

5.3. Sistema sem fricção

Optou-se por esse modelo devido ao fato de simular uma situação ideal, ou seja, o ponto ótimo do processo.

Figura 16. Tensão de von Mises após o processo sem fricção.

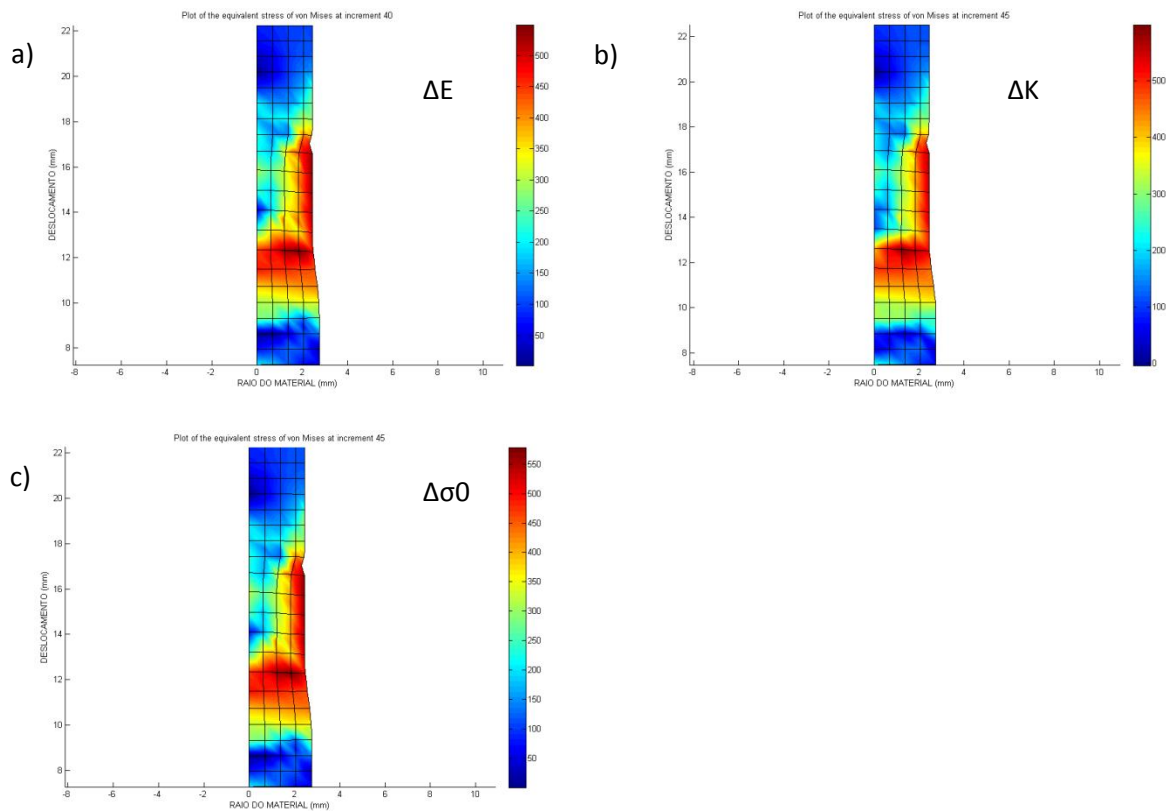


Fonte: Próprio autor.

Quando comparado com a figura 12, é possível observar uma significativa alteração nos pontos de tensão, pois quando o processo foi simulado com o coeficiente de atrito igual a zero, o material apresentou um gradiente de tensão menor que com o atrito igual a 0,1. Vale ressaltar que para esta simulação, o material não foi “apontado”, o que dá a impressão de que os resultados estão diferentes.

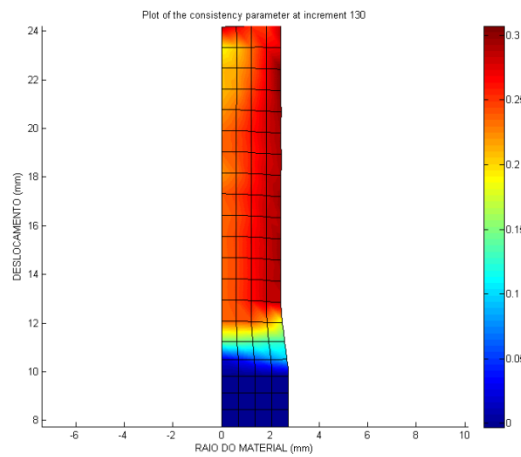
A figura 17 exibe a tensão de von Mises no material gerada após o processo ser realizado sem fricção e quando as propriedades mecânicas tiveram uma variação de 10%.

Figura 17. Variação da tensão de von Mises em função do aumento de 10% no: a) Módulo de Elasticidade, b) Coeficiente de encruamento e c) Limite de escoamento.



Foi possível observar que os níveis de tensão são praticamente os mesmos, todos estão na ordem de 500MPa, com exceção da alteração no limite de escoamento, mostrando que o mesmo é de total relevância para a tensão durante o processo. Em comparação com a figura 16, as simulações representadas pela figura 17 mostram que o contato com o corpo rígido iniciou a 7 mm da extremidade, enquanto que para a figura 16 a simulação inicia exatamente na extremidade.

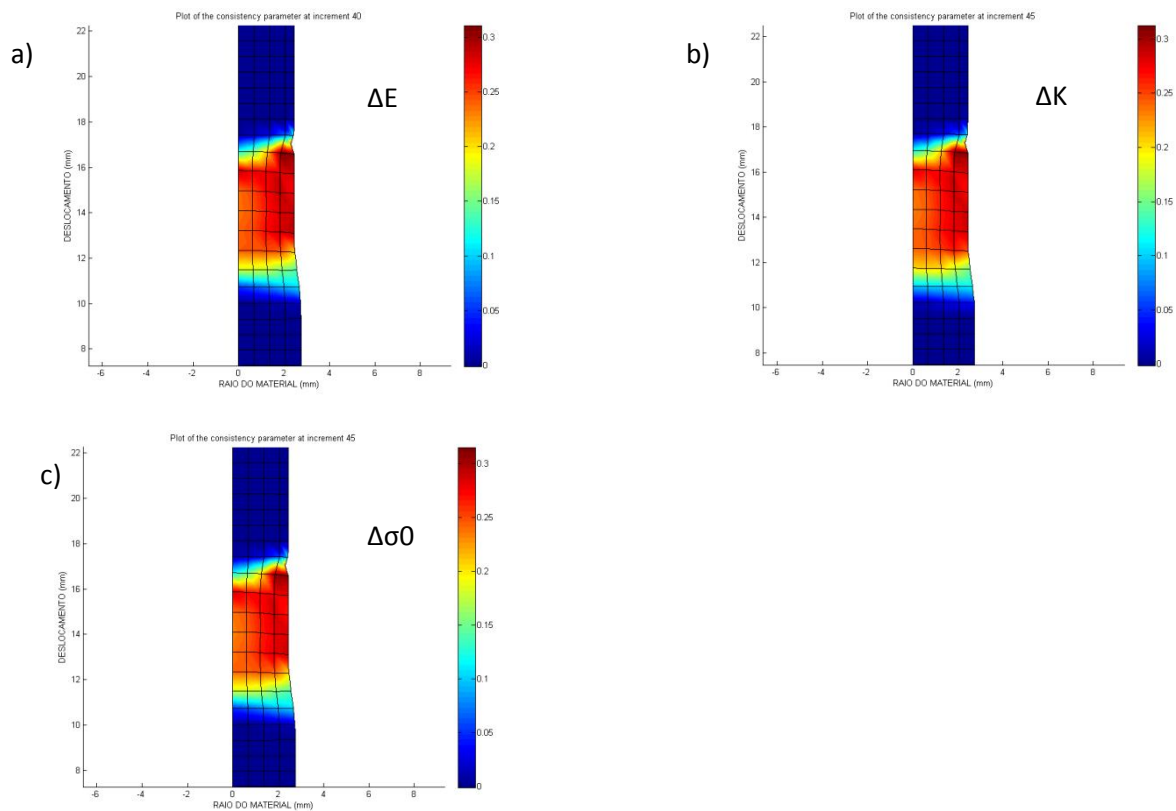
Figura 18. Deformação plástica durante o processo sem fricção.



Fonte: Próprio autor

Em comparação com o processo com fricção, o resultado para a deformação plástica sem fricção apresentou o mesmo valor de 30%. A figura 19 exhibe deformação plástica causada após o processo ser realizado sem fricção e quando as propriedades mecânicas tiveram uma variação de 10%.

Figura 19. Variação da deformação plástica em função da variação de 10% no: a) Módulo de Elasticidade, b) Coeficiente de encruamento e c) Limite de escoamento.



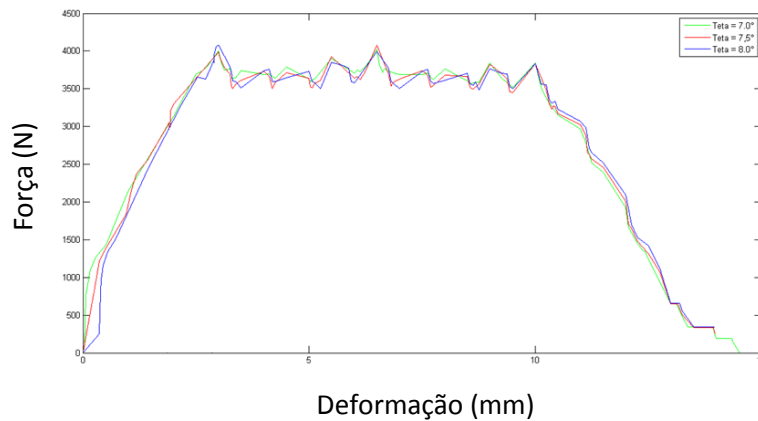
Fonte: Próprio autor

Assim como para um sistema onde a fricção é levada em consideração, nesse caso a variação das propriedades do material a deformação plástica apresenta uma magnitude de 30%.

5.4. Variação da angulação da Fieira

A figura 20 mostra a influência da variação do semi-ângulo da fieira na fora aplicada ao processo.

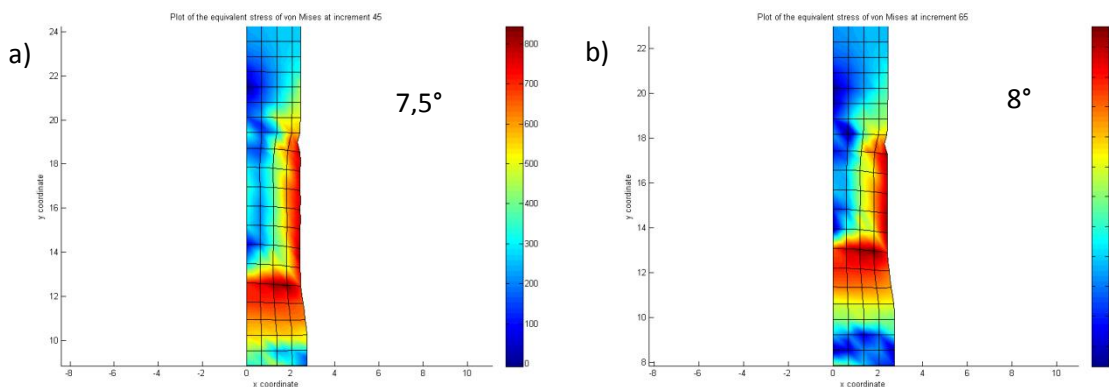
Figura 20. Variação da força em função da variação do semi-ângulo da fieira.



Fonte: Próprio autor

É possível observar que a alteração em até 1° não apresentou grande influência sobre a força de trefilação.

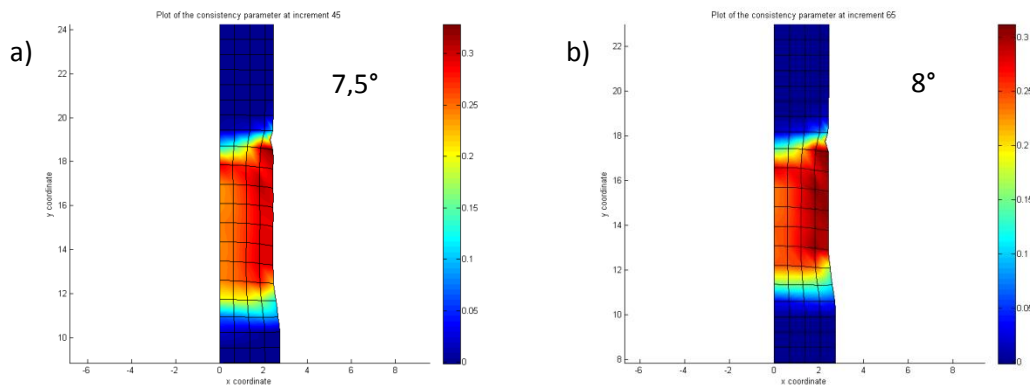
Figura 21. Variação da Tensão de von Mises em função da variação do semi-ângulo da fieira a) $7,5^\circ$ e b) 8° .



Foi possível observar que os níveis de tensão para o ângulo de 7° são muito maiores que para um ângulo de 8° . Também é possível observar que para possibilitar ter uma comparação em instantes parecidos são necessários mais incrementos para o ângulo de 8° , o que indica que o tempo de simulação foi bem maior para esse estado.

A figura 22 mostra o efeito das variações sobre a deformação absoluta.

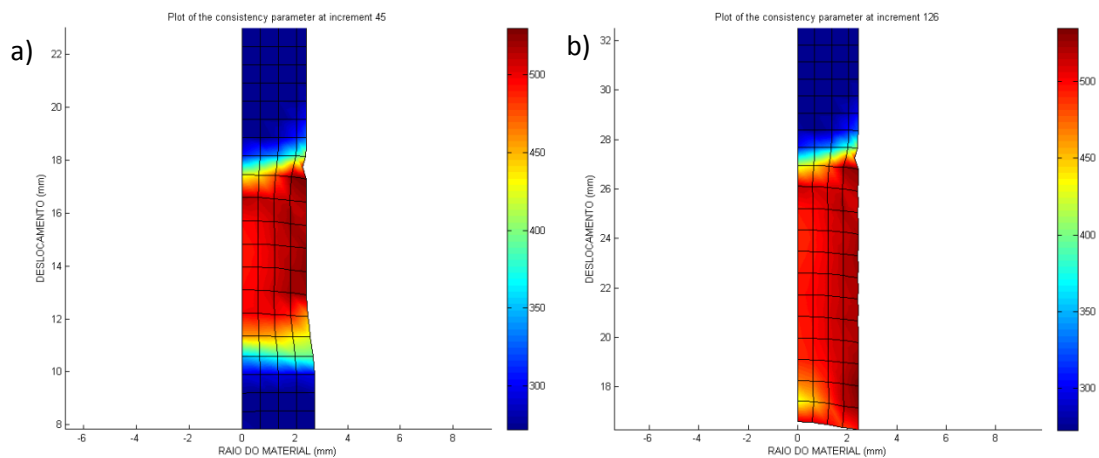
Figura 22. Variação da deformação plástica em função da variação do semi-ângulo da fierra.



É possível observar que a variação também não causou grandes variações nos parâmetros. A tensão de von Mises teve uma variação insignificante quando o ângulo foi variado em 1° , já para a deformação plástica, não houve qualquer tipo de alteração nos valores, permanecendo em 30%. A questão do número de incrementos também se repete para o valor da deformação plástica efetiva.

5.5. Novo limite de escoamento do material

Figura 23. Novo limite de escoamento do material a) durante o processo e b) após o processo.



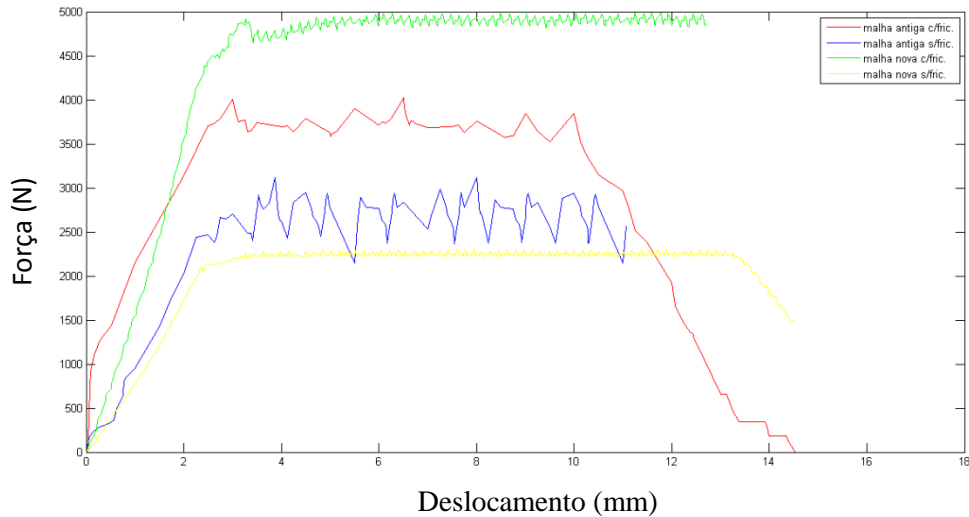
A figura 23 a) exibe o fio no momento do processo, neste, é possível observar que o fio-máquina teve seu limite de escoamento alterado devido ao encruamento (BELO, 2012). A figura 23) mostra o fio máquina já com a nova dimensão e totalmente transformada, pois antes o limite de escoamento era de 275 MPa e agora apresenta um valor na ordem de 500MPa. No entanto para que se obtenha o limite de escoamento de 600 MPa é necessário até 3 passes de trefilação e o presente trabalho apresenta apenas simulações para um passe.

Alguns parâmetros importantes não foram avaliados, tais como o uso de lubrificante específico, a aplicação do processo multi-passes, a velocidade de

trefilação e a simulação da aplicação dos recartilhadores. Ficando como uma sugestão para trabalhos futuros.

5.6. Refinamento da malha

Figura 24. Força de trefilação em função da fricção e do refinamento de malha.

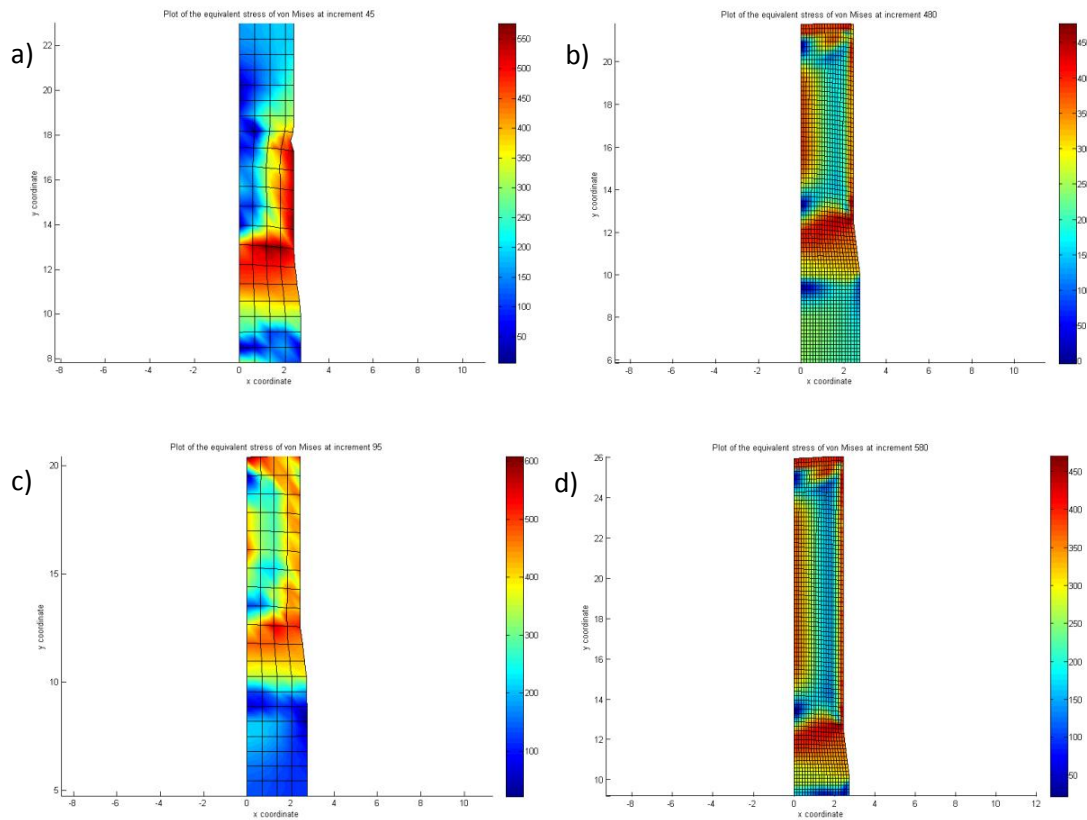


Fonte: Próprio autor

A figura 24 exibe a variação da força de trefilação quando o tamanho da malha e a fricção são alterados. É possível observar uma grande discrepância nos resultados quando o tamanho de malha foi variado (aproximadamente 1000N para a malha refinada contra a malha grosseira para um processo com fricção e aproximadamente 800N para uma um processo sem fricção). A malha refinada apresenta valores com poucas distorções.

Também foi avaliada a variação da Tensão de von Mises em função do refinamento da malha, conforme exibe a figura 25 a) malha grosseira e b) malha refinada com fricção e c) malha grosseira e d) malha refinada sem fricção.

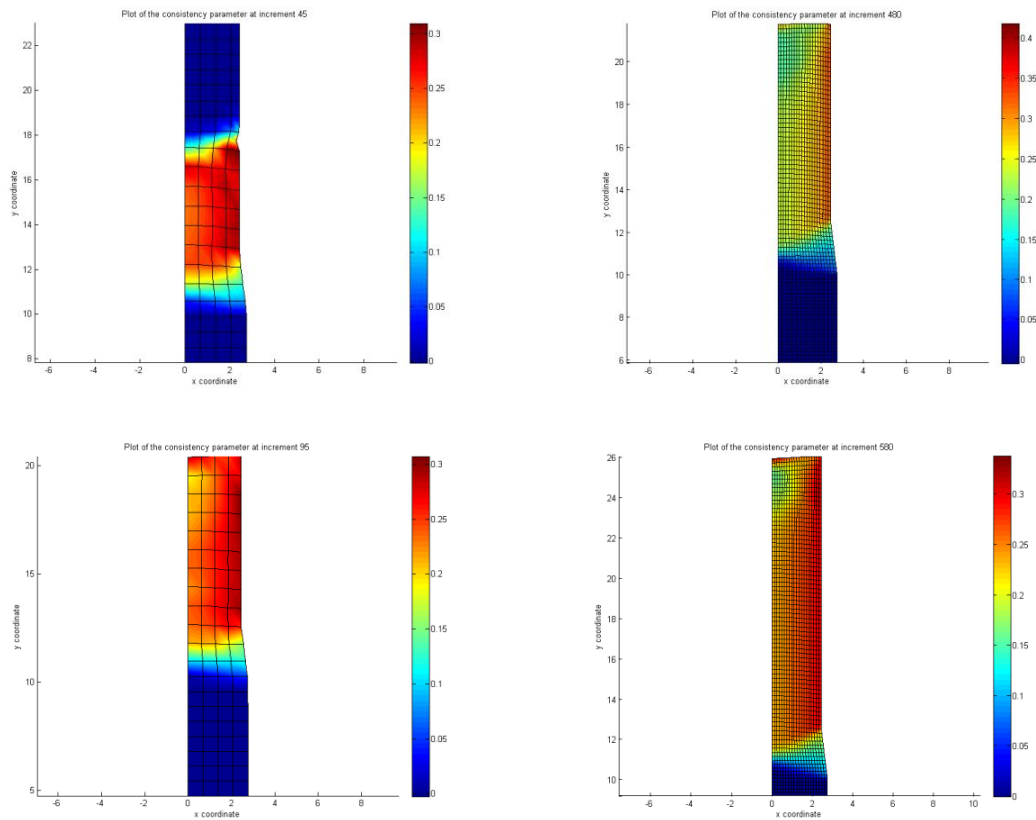
Figura 25. Variação da Tensão de von Mises em função do refinamento da malha e da fricção
a) malha grosseira com fricção, b) malha refinada com fricção, c) malha grosseira sem fricção e
d) malha refinada sem fricção.



Fonte: Próprio autor

Com as simulações representadas pela figura 25 é possível observar que também existe uma variação na tensão de von Mises quando o tamanho da malha é alterado (100 MPa para uma simulação com fricção e 150 MPa para um sistema sem fricção). A coordenada x indica o raio do material em mm e a coordenada y o deslocamento durante o processo em mm.

Figura 26. Variação da deformação plástica em função do refinamento da malha e da fricção a) malha grosseira com fricção, b) malha refinada com fricção, c) malha grosseira sem fricção e d) malha refinada sem fricção.



Fonte: Próprio autor

Para a análise da deformação plástica causada ao material, também foi possível observar uma alteração nos resultados. Com uma malha refinada os valores chegaram a 40% de deformação, enquanto que com uma malha grosseira os valores não passam de 30%.

Por questões de tempo, não foi possível fazer uma análise mais apurada sobre o estudo com uma malha mais refinada, ficando este como uma sugestão para trabalhos futuros.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e apresentados no trabalho sobre os efeitos da variação dos parâmetros de trefilação através de elementos finitos, foi possível concluir que:

- Mesmo não levando alguns aspectos em consideração, o modelo se apresentou eficiente, pois conseguiu mostrar com clareza os pontos de maior influência no processo;
- O Módulo de Elasticidade do material não é um fator de maior influência no processo de trefilação;
- Para processos com e sem fricção, as propriedades mecânicas do material não são fundamentais para que mudanças na deformação efetiva causado ao material;
- Em um processo em que a fricção é considerada, o Limite de escoamento tem um impacto maior na força máxima de trefilação;
- A variação da fricção é de fato, determinante para que seja aplicada uma força maior, ou menor durante o processo;
- Uma variação de 1° no semi-ângulo da fieira não causou grandes alterações nos parâmetros analisados.
- Dos parâmetros avaliados, o limite de escoamento inicial do material e a fricção são os fatores dominantes no processo.
- O refinamento da malha mostrou valores diferentes quando comparado com uma malha mais grosseira.

7. BIBLIOGRAFIA

1. BELO, J. S. Identificação das alterações mecânicas causadas por deformação plástica em fios-máquina. 65º Congresso anual da ABM, Rio de Janeiro, 2012.
2. BUTTON, S. T. Trefilação: Programa de educação continuada. São Paulo, ABM, 2001.
3. BUTTON, S. T. Apostila de Métodos de Cálculos de Tensões. UNICAMP, Campinas, 2000. Disponível em: < <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/im465/apostila/8%20M%E9todos%20de%20C%E1lculo%20de%20Tens%F5es%20e%20Deforma%E7%F5es.doc> >, Acessado em: 08.12.2014 às 20:51.
4. CBIC (Câmara Brasileira da Indústria da Construção). Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>>, Acessado em: 11.11.2014 às 18:09.
5. CELETRANO, D. J., PALACIOS, M.A., Rojas, E.L., CRUCHAGA, M. A, ARTIGAS, A. A., MONSALVE, A. E., Simulation and experimental validation of multiple-step wire drawing processes, Finite Elements and Design, Santiago, 2008.
6. COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. Concepts and application of finite elements analysis, pp 630, EUA, 1989
7. DIETER, G. E. Mechanical Metallurgy. 2. ed. pp 751, London: SI Metric, 1988.
8. Die weltweit umfangreichste Werkstoffdatenbank. Disponível em: < <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=DE&NM=279> >, Acessado em: 08.12.2014 às 21:38.
9. DIXIT, P. M., DIXIT, U. S., Modeling of metal forming and machine processes, pp 384, Londres, 2008
10. DOS SANTOS, C. A. "Avaliação de abordagens distintas do método de elementos finitos para a previsão de carga de trefilação". Belo Horizonte, 2007.
11. EDER, A. E. "Influência do teor de nitrogênio na trefilação de aço equivalente ao ABNT 1013." Dissertação de mestrado, UFRGS, 2006.
12. FILHO, A. A., Elementos finitos: a base da tecnologia CAE, pp.14, São Paulo, 2006.

13. GERBASE FILHO, J. Método de medição de força de trefilação de arames: avaliação da variação do coeficiente de atrito em trefilação de arames de aço. Dissertação de mestrado, UFRGS, 1976.
14. GIORGINI, D. G., Otimização do processo de trefilação através da proposição de um modelo de previsão da força de trefilação adequado às condições reais da V & M do Brasil. Dissertação de mestrado, UFMG 2013.
15. HELMAN, H.; CETLIN, P. R. Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais. 2. Ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1993.
16. HELMAN, H.; CETLIN, P. R. Fundamentos da conformação mecânica do metais, São Paulo, 2005.
17. LUIS, C. J., LEÓN, J., LURI, R., Comparison between finite element method and analytical methods for studying wire drawing processes, Journal of Materials Processing and Technology, Pamplona, 2005.
18. MACHADO, M. L. P. Apostila: Conformação dos metais: fundamento e aplicação, Vitória 2008
19. MARTINEZ, G. A. S., Comportamento da Lubrificação no Tribo-sistema de Trefilação a Altas Velocidades. São Paulo: UNICAMP, 1998.
20. MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. Princípios de Metalurgia Mecânica. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1982.
21. MORAES, W. A., Apostila Conformação dos metais, Santos, 2011.
22. NBR 7480 (Norma Brasileira Regulamentadora)
23. PAVANELO, R. Introdução aos Elementos Finitos, pp.8, Campinas, 2004.
24. SANTOS, C.; METZ, M.; AZEVEDO, J. A.; ROCHA, A., Influência dos Parâmetros do Processo de Trefilação no Empenamento de Barras do Aço SAE 9254. Cusco, 2007.
25. RUBIO, E. M.; CAMACHO, A. M.; SEVILLA, L.; SEBASTIÀN, M. A., Calculation of the forward tension in drawing processes, Journal of Materials Processing and Technology, Madrid, Málaga, 2005.
26. TEOBALDO, I. N. C. Estudo do aço como objeto de reforço estrutural em edificações antigas, Belo Horizonte, 2004.

27. WRIGHT, R. Tips from Wiredrawing 101SM. Wire and Cable Technology International, pp. 128, 2002.

28. Zeilmann, A. P. Teoria e experimentação no estudo sobre atritos em atuadores robóticos, Associação Argentina de Mecânica Computacional, Mecánica Computacional Vol XXIX, pp. 2689-2708, Buenos Aires, 2010.