



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

MIRELA OLIVEIRA DE CASTRO

MODELAGEM NÃO LINEAR DE ELEMENTOS FINITOS DO PROCESSO
DE TREFILAÇÃO INCLUINDO FRICÇÃO

FORTALEZA

2015

MIRELA OLIVEIRA DE CASTRO

MODELAGEM NÃO LINEAR DE ELEMENTOS FINITOS DO PROCESSO DE
TREFILAÇÃO INCLUINDO FRICÇÃO

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Metalurgista.

Orientador: Prof. Dr. Peter Zoltán Berke.

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C352m Castro, Mirela Oliveira de.
Modelagem não linear de elementos finitos do processo de trefilação incluindo fricção / Mirela Oliveira de Castro. – 2015.
36 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2015.
Orientação: Prof. Dr. Peter Zoltán Berke.

1. Elementos finitos não lineares. 2. Trefilação. 3. Fricção. 4. (Visco)plasticidade. I. Título.

CDD 669

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e todas as bênçãos e dificuldades que me moldaram até este momento.

Aos meus pais, Célio Campos e Maria Josilene, pelos ensinamentos, educação, companheirismo confiança e, principalmente, amor em todos os momentos.

Aos meus irmãos, Manuela, Victor e Jordano, pelas alegrias e confusões, brincadeiras e discussões que nos une a cada dia.

Ao meu companheiro de lutas e alegrias, Jardel de Souza Belo, que me apoia sempre e me chama a atenção quando necessário.

Ao amigo Dr. Eng. Luis Flávio Gaspar Herculano, pelos conselhos amáveis, carinho e compreensão.

Ao Prof. Dr. Peter Zoltán Berke, que aceitou o desafio de me orientar nesta empreitada e confiou em meu potencial. Mesmo tendo trabalhado juntos apenas neste trabalho (até agora), tive grande aprendizado e amadurecimento para a vida acadêmica.

Ao Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, que me acolheu em seu meio de pesquisa e me proporcionou incontáveis oportunidades de obter experiência em projetos de pesquisa, trabalho em equipe e liderança, através do LACAM - Laboratório de Caracterização de Materiais. Também agradeço pelos conselhos, orientação e ajuda durante minha formação.

Ao Prof. Dr. Willys Machado Aguiar, a quem conheço pouco pessoalmente, mas que se mostra um professor engajado em sua vocação até mesmo longe da sala de aula, paciente, solícito e sábio.

Ao Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva, pela convivência saudável, pela ajuda diante dos problemas comuns da vida acadêmica e pela orientação em pesquisas de Iniciação Científica.

Aos meus colegas de sala, de intercâmbio e de laboratório, pelos momentos inesquecíveis e marcantes que vivemos juntos, pelo companheirismo, pela descontração e pela determinação de cada um.

À Universidade Federal do Ceará, por ser o lar de quase todos os momentos importantes de minha vida acadêmica, e onde se iniciou uma grande jornada que ainda reserva muitos desafios.

Que a conduta de vocês não seja inspirada pelo amor ao dinheiro. Cada um fique satisfeito com o que tem, pois Deus disse: "Eu nunca deixarei você, nunca o abandonarei".

Hebreus 13:5

RESUMO

A trefilação é comumente utilizada na indústria, principalmente na produção em massa de fios, arames e vergalhões, pois garante um aumento da resistência mecânica devido à deformação à frio durante conformação e aliando eficiência a uma boa qualidade superficial do produto final. O trabalho numérico aqui apresentado possui foco na simulação por elementos finitos do procedimento de trefilação real aplicado numa empresa metalmeccânica. A principal motivação para este trabalho é a compreensão mais aprofundada do processo de trefilação e futura predição dos parâmetros de trefilação e qualidade do produto como uma função das propriedades mecânicas do material medidas in loco. Um modelo não linear preexistente, usando o método de elementos finitos, foi adaptado para entender melhor o processo de trefilação, identificando os parâmetros dominantes. O modelo de elementos finitos inclui os seguintes componentes não lineares: tratamento contato/fricção através do método Lagrangeano aumentado, formulação corotacional de deformações finitas, comportamento elasto-(visco)plástico do material com endurecimento não linear isotrópico. Utiliza-se um modelagem com simetria de rotação em relação ao eixo longitudinal do sistema matriz-peça, considerando-se uma peça de trabalho com forma cilíndrica. Este modelo permite observar, em detalhes, os fenômenos que ocorrem durante a trefilação e é utilizado para uma investigação computacional dos parâmetros de trefilação e suas influências.

Palavras-chave: Elementos finitos não lineares, trefilação, fricção, (visco)plasticidade.

ABSTRACT

Wire drawing is commonly used in industry, mainly for the mass fabrication of wires and rods. It couples production efficiency with a good superficial quality of the final product and it provides an increase of the material strength through the plastic straining during the metal cold forming. The numerical work presented here focuses on the finite element simulation of the real life wire drawing procedure implemented at a metal working factory. The main motivations of the work are a deeper understanding of the wire drawing procedure and the future prediction of the wire drawing parameters and product quality as a function of the material properties of the raw material measured on site. A pre-existing nonlinear model, using the finite element method, was adapted to better understand the wire drawing process, identifying the dominating parameters. The finite element model includes the following nonlinear ingredients: contact/friction treatment through the augmented Lagrangian method, co-rotational finite strain formulation, elastic-(visco)plastic material behavior with isotropic nonlinear hardening. It uses an axisymmetric modeling assumption, considering the cylindrical shape of the work piece. This model allows for observing in details the phenomena occurring during the wire drawing and it is used for a computational investigation of the wire drawing parameters (friction between die and work piece, die semi-angle, material properties, etc) and their influences.

Keywords: Nonlinear finite element, wire drawing, friction, (visco)plasticity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama tensão x deformação obtido por ensaio de tração convencional.	12
Figura 2 - Gráfico tensão x deformação evidenciando o comportamento elástico e plástico.....	13
Figura 3 - Gráfico tensão x deformação considerando a taxa de deformação.....	13
Figura 4 - Esquema do sistema arame/fieira estudado.....	14
Figura 5 - Esquematisação do sistema axial simétrico utilizado no modelo.....	17
Figura 6 - Malha e contorno da fieira com os três ângulos de trefilação estudados.....	19
Figura 7 - Comportamento do material estudado em testes de compressão a diferentes velocidades.....	21
Figura 8 - Distribuição das tensões, em MPa, nos eixos (a) X, (b) Y e (c) Z, (d) de cisalhamento (XY) e (e) de von Mises, para um deslocamento de 7mm.....	22
Figura 9 - Deformações nos eixos (a) X, (b) Y e (c) Z e (d) de cisalhamento, (e) deformação plástica escalar (κ) e (f) taxa de deformação plástica escalar ($\dot{\kappa}$), para um deslocamento de 7mm.....	24
Figura 10 - Curvas Força x Deslocamento do material, resultantes dos testes com limite de escoamento inicial de 330MPa e 275MPa.....	25
Figura 11 - Tensões nos eixos radial, (a) para $\sigma_0=330\text{MPa}$ e (b) para $\sigma_0=275\text{MPa}$, e longitudinal, (c) para $\sigma_0=330\text{MPa}$ e (d) para $\sigma_0=275\text{MPa}$	25
Figura 12 - Distribuição das tensões de Von Mises (em MPa) para teste a 5, 7 e 9°, a), b) e c), respectivamente, para deslocamento de 7mm.....	26
Figura 13 - Tensões no eixo radial para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, para deslocamento de 7mm.....	26
Figura 14 - Tensões no eixo longitudinal para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, para deslocamento de 7mm.....	27
Figura 15 - Tensões no eixo circunferencial para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, para deslocamento de 7mm.....	27
Figura 17 - Tensões de cisalhamento para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, para deslocamento de 7mm.....	27
Figura 18 - Curvas Força x Deslocamento do material, resultantes dos testes com e sem fricção, para os ângulos 5°, 7° e 9° e limite de escoamento inicial 275MPa, com deslocamento de 7mm.....	28

Figura 19 - Distribuição das deformações por cisalhamento do sistema, com e sem fricção, para os ângulos 5° e 9° e limite de escoamento inicial 275MPa, com deslocamento de 7mm.....	29
Figura 20 - Curvas Força x Deslocamento do material, resultantes dos testes com fricção, para α igual a 5° , limite de escoamento inicial 275MPa, para diferentes velocidades.....	30
Figura 21 - Taxa de deformação (em s^{-1}) do arame durante a passagem pela fieira, para α igual a 5° , a $1 \cdot 10^5$ m/s (a), 1m/s (b) e 4m/s (c) e deslocamento de 7mm.....	31
Figura 22 - Distribuição das tensões de Von Mises (em MPa) para os testes para $\alpha=5^\circ$ a $1 \cdot 10^{-5}$ m/s (a) e a 4m/s (b) com fricção, e a $1 \cdot 10^{-5}$ m/s (c) e 4m/s (d) sem fricção, com deslocamento de 7mm.....	32
Figura 23 - Limite de escoamento aparente do arame durante e após o processo de trefilação para $\alpha=5^\circ$, a velocidades de (a) $1 \cdot 10^{-5}$ m/s , (b) 1m/s e (c) 4m/s...	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Comportamento mecânico dos materiais	12
3.2 Trefilação	14
3.3 Aplicação de modelos de elementos finitos.....	15
4 MATERIAIS E METODOLOGIA	17
4.1 Modelo numérico de único passe desenvolvido para o estudo	17
4.2 Malha para elementos finitos	18
4.3 Modelos utilizados para o material	19
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5.1 Elastoplasticidade	25
5.2 Elasto-viscoplasticidade	30
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
7 CONCLUSÃO	34
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	34
REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de conformação mecânica, comumente utilizados em metais, o processo de trefilação se destaca por realizar, de forma simples e econômica, a produção de barras, fios e arames com os mais variados diâmetros, até mesmo menores que um milímetro. É um processo amplamente aplicado na fabricação de vergalhões utilizados na construção civil, de arames para eletrodo de soldagem etc.

Com a chegada da Companhia Siderúrgica do Pecém, espera-se que o setor metalúrgico cresça em virtude da produção de mais materiais semi-acabados. A CSP, por meio do Programa de Desenvolvimento Regional (PDR) trabalha para alavancar os investimentos e instalação de novas empresas do segmento em seu entorno para suprir as demandas geradas pela siderúrgica, gerando integração e desenvolvimento da cadeia produtiva (CSP News).

Segundo dados do IBGE, o custo médio da construção civil por metro quadrado no Ceará, em junho deste ano, foi de R\$913,57, o segundo menor valor do país. Neste segmento, um dos materiais mais importantes é o aço, indispensável na sustentação de estruturas. Produtos de aço ao carbono trefilados são bastante utilizados para este fim, como os vergalhões CA-60. Assim, um estudo do processo de trefilação e seus parâmetros dominantes, a fim de otimizar o processo, pode contribuir para manter o custo da construção baixo, com boa qualidade do produto.

Aliando este estudo à análise computacional, tem-se uma arma poderosa a favor da inovação e do desenvolvimento de soluções para processos industriais. Isto porque esta técnica permite a realização de vários testes, simulando o processo real em diversas condições, sem que haja desperdício de material e tempo em tentativas experimentais.

Um trabalho anterior realizado (Belo, 2014) utilizou o método de elementos finitos para a simulação de trefilação de seção circular para aço baixo carbono. O referido estudo apresenta resultados qualitativos, porém não quantitativos, devido ao baixo grau de refinamento da malha, que não permite uma boa precisão dos valores obtidos.

Em continuação ao trabalho supracitado, que utilizou uma malha grosseira e modelo de elementos finitos simplificado como primeiro passo, este estudo utiliza o mesmo método computacional e realiza um estudo paramétrico detalhado com análise quantitativa dos efeitos da variação de parâmetros do material, ferramenta e processo. São eles: o limite de escoamento do material (tabelado e com aumento de 20%), o semi-ângulo de trefilação (variando até 4°), a fricção, a velocidade de trefilação (utilizando um modelo de material viscoplástico).

Uma das novidades do presente trabalho é a construção de uma malha com refinamento ótimo, que permite uma análise mais precisa dos valores das tensões e deformações obtidas e conclusões mais acuradas. Outra originalidade da pesquisa é a inclusão de um comportamento dependendo da taxa de deformação do material no modelo, que proporciona uma maior aproximação do processo real por levar o efeito da velocidade de trefilação em consideração.

O foco deste trabalho consiste no desenvolvimento e uso de um modelo de elementos finitos para trefilação. Isto motivado pela capacidade de observar, em detalhes, como as tensões e as deformações se distribuem no material durante e após a redução (produto). Assim, é possível compreender melhor o fenômeno da inomogeneidade das deformações e não-linearidade no comportamento mecânico do arame. O estudo pretende mostrar como o ângulo de trefilação, o limite de escoamento, a fricção e a velocidade de trefilação influenciam a distribuição das tensões e das deformações no material através da análise de imagens obtidas através de simulação computacional.

O modelo numérico é descrito a seguir, bem como informações sobre a malha e o modelo do comportamento do material de referência utilizado. Os resultados das simulações são apresentados na seção 3 deste trabalho, seguidos de um estudo comparativo das diversas condições testadas, uma breve discussão e sucinta conclusão.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

- Apresentar e analisar numericamente os fenômenos presentes durante o processo de trefilação.

2.2 Específicos

- Utilizar a modelagem computacional por elementos finitos como ferramenta de estudo;
- Realizar um estudo paramétrico das principais variáveis da trefilação;
- Observar o efeito da variação do limite de escoamento;
- Observar a influência da fricção;
- Analisar a variação do semi-ângulo de trefilação;
- Estudar a influência da velocidade do processo e no material;
- Identificar os parâmetros dominantes e quantificar sua influência.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Comportamento mecânico dos materiais

O aço é a liga metálica mais utilizada no mundo. Características como boa ductilidade e resistência mecânica abrem um leque de aplicações para este material. Os aços ao carbono são as ligas mais simples, em composição química, e os mais comuns utilizados em indústrias metalmeccânicas para a fabricação de tubos, chapas, arames, barras etc. A aplicabilidade dos materiais depende, entre outros aspectos, do comportamento mecânico apresentado. No caso do aço, por exemplo, uma boa ductilidade é requerida em processos de fabricação por conformação mecânica, pois o material deve sofrer deformações permanentes e sem sofrer ruptura. Outro exemplo é o material com elevada dureza, este pode ser aplicado em ferramentas de corte de materiais menos duros ou em instrumentos que sofrem alto impacto, mas que não devem se deformar facilmente.

O comportamento mecânico dos metais é observado através de um ensaio de tração uniaxial, onde um corpo de prova, de dimensões específicas, é tracionado por uma máquina. A força utilizada para tracionar o material e a deformação sofrida pelo mesmo são plotadas em um gráfico tensão x deformação. Através deste gráfico, pode-se estimar alguns parâmetros característicos do material, no estado em que se encontra, como seu limite de escoamento, limite de ruptura, limite de resistência à tração, módulo de elasticidade, alongação máxima entre outros. A curva de fluxo resultante do teste de tração é, de modo simplificado, esquematizado na Fig. 1.

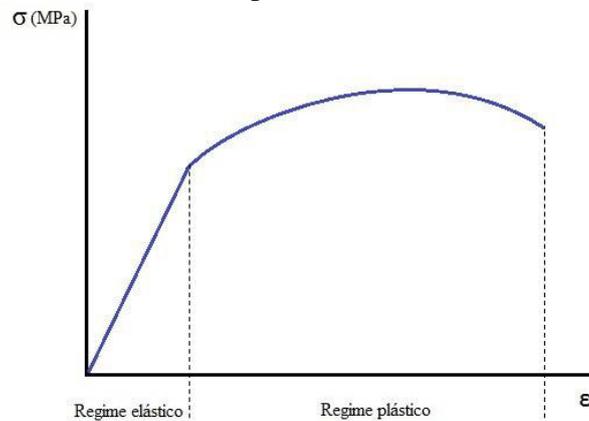


Fonte: Tigrinho (2008).

Figura 1. Diagrama tensão x deformação obtido por ensaio de tração convencional.

O limite de escoamento do material corresponde à tensão (σ) cuja deformação do material, por convenção, seja de 0,002 (Fig. 1). Uma linha paralela à curva na região elástica, traçada a partir da deformação estabelecida, indica o limite de escoamento na sua interseção com a curva tensão x deformação (Callister, 2008). A partir deste limite, com o aumento da

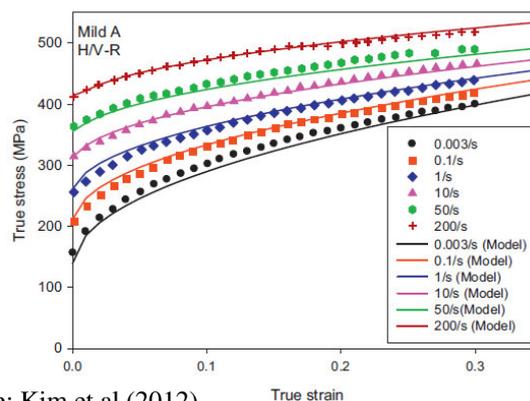
carga, as deformações passam a ser permanentes (comportamento plástico). O limite de resistência à tração é a tensão máxima que o material suporta, em regime plástico, antes de sofrer estrição. Este comportamento é classificado como elasto-plástico, pois ora o material apresenta comportamento elástico e ora plástico.



Fonte: Próprio autor.

Figura 2. Gráfico tensão x deformação evidenciando o comportamento elástico e plástico.

A viscoplasticidade é a combinação do comportamento plástico e viscoso do material. Neste modelo, o material se comporta plasticamente, ou seja, sofre deformações irreversíveis, porém agora o efeito da taxa de deformação plástica influencia as tensões. Outra característica deste modelo é a fluência, o relaxamento das tensões, sob um intervalo de tempo característico, a uma deformação constante. A Fig. 3 exibe um gráfico tensão x deformação levando em consideração a taxa de deformação.



Fonte: Kim et al (2012).

Figura 3. Gráfico tensão x deformação considerando a taxa de deformação.

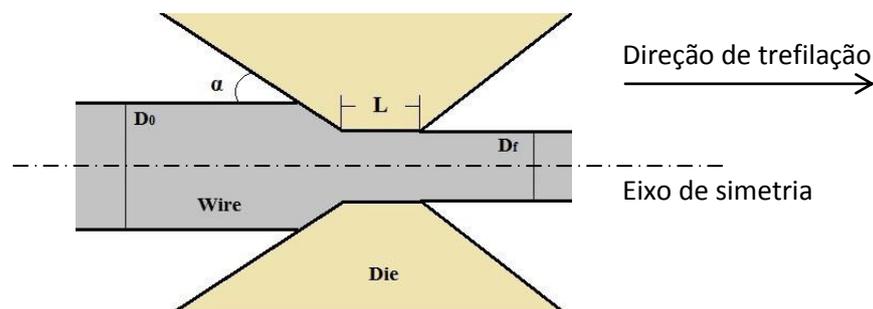
Quando os metais são deformados a altas taxas, as tensões atingem valores superiores às obtidas em movimento quase estático. Este aumento pode elevar o limite de escoamento do material, como mostra a Fig. 3. O princípio da viscoplasticidade pode ser descrito, em essência, como um aumento do limite de escoamento, pelo aumento de

sobretensão, que varia para cada ponto do material, como uma função da taxa de deformação plástica.

3.2 Trefilação

A trefilação é um processo de conformação mecânica e consiste em reduzir o diâmetro de um fio metálico (provocando alteração em suas propriedades mecânicas através da deformação plástica sofrida) ao passar pelo orifício da ferramenta fieira. A fieira possui formato cônico em sua parte dianteira, por onde o fio entra, para reduzir continuamente a seção transversal do arame até o diâmetro desejado. No centro da fieira há uma zona cilíndrica (medida L da Fig. 4), que tem por função estabilizar as novas dimensões do fio, impedindo que a precisão das dimensões seja diminuída pelo relaxamento do material após a compressão (fluência viscosa). A parte traseira da ferramenta, que corresponde à região de saída do arame, possui aspecto cônico para proporcionar uma suave expansão do arame ao sair da fieira sem causar abrasão (Dieter, 1988). É um processo geralmente multi-passes, isto é, o fio (matéria-prima que é transformada pelo processo) sofre várias reduções de seção, passando por várias fieiras em sequência.

A Fig. 4 representa esquematicamente o processo de redução da seção transversal do arame, sob uma perspectiva em corte no centro do sistema. A medida α mostrada na Fig. 3 representa o semi-ângulo de entrada da fieira, L corresponde ao comprimento da região cilíndrica no centro da ferramenta, D_0 e D_f representam os diâmetros inicial e final, respectivamente. A faixa de redução de seção para o aço, por passe, fica entre 10 e 30%, enquanto sua redução, ao longo de 8 a 15 passos chega a 95% (Cunningham, 2008).



Fonte: Próprio autor.

Figura 4. Esquema do sistema arame/fieira estudado.

Por se tratar de um processo de conformação plástica, o material sofre alteração em suas propriedades mecânicas devido ao encruamento. A ductilidade é reduzida e a resistência mecânica aumenta. Assim, em um processo multi-passes é comum a peça passar por

tratamento térmico de recozimento para recuperar alguma ductilidade e dar continuidade às reduções de diâmetro (Filho *et al*, 2011).

Segundo Chin e Steif, (1995), o processo de trefilação vem sendo estudado pelo menos desde 1927. Muito já se tem descoberto a respeito do processo, como parâmetros que definem o ângulo de entrada adequado para trefilação a altas velocidades (Cristecu, 1980), a predição de fratura do arame através de modelo elasto-plástico, (Chevalier, 1992), e a inomogeneidade das deformações na trefilação (Chin e Steif, 1995). Atualmente, vem se destacando pesquisas que abordam otimização do processo através de estudos paramétricos, como a evolução de defeitos durante a trefilação (Baek *et al*, 2012), causas e efeitos do aumento da temperatura do processo (Toribio *et al* (2014) e El-Domiaty e Kassab (1998)), os efeitos da taxa de deformação nas propriedades do material durante o processo (Huh *et al*, 2013), tipos de defeitos apresentados no material antes e durante a redução (Magalhães *et al*, 2012), estudo do desgaste da ferramenta (Kim *et al*, 1997), entre outros.

El-Domiaty e Kassab (1998) fizeram um estudo paramétrico analisando a influência da fricção, do semi-ângulo da fiação, da velocidade de trefilação e da taxa de redução na temperatura de saída da ferramenta, para dez materiais diferentes, através de um modelo analítico. Este foi validado, com baixo erro, por experimentos práticos. Haddi *et al* (2011) conduziram procedimentos experimentais para analisar os efeitos das condições de processo na temperatura e na força de trefilação para liga de cobre. Os resultados mostraram um aumento na temperatura, devido à combinação de fricção e óleo lubrificante; um pico de temperatura na região próxima à interface ferramenta/peça, por conta da deformação plástica ali ser maior e; a dependência da distribuição das tensões no material em função da velocidade de trefilação.

3.3 Aplicação de modelos de elementos finitos

O método de elementos finitos é uma técnica de análise computacional que permite determinar tensões e deformações que são muito complexas para se analisar apenas analiticamente. Esta técnica consiste em criar uma malha correspondente ao formato da peça a ser analisada e dividi-la em vários elementos conectados um ao outro através de nós (Dieter, 1988). Os cálculos são então realizados a partir dos nós, que devem estar o mais próximo possível para uma maior aproximação do resultados da simulação ao real comportamento do material.

A análise computacional tem contribuído substancialmente para um aprofundamento no estudo do processo de trefilação, uma vez que permite observar os fenômenos que ocorrem

durante o processo, sob uma perspectiva diferente da experimental. É possível verificar, com boa aproximação do processo real, como material e ferramenta se comportam durante a redução da seção transversal.

Chin e Steif (1995) estudaram, por modelagem computacional, a inhomogeneidade da deformação plástica em trefilação de um único passe e seu impacto na força de trefilação, concluindo que o trabalho redundante (além do necessário) no material é função da redução de área e do ângulo de entrada da ferramenta e que a fricção entre ferramenta e arame e o encruamento não influenciam significativamente nas deformações. Já Felder *et al* (2012) estudaram uma nova forma de calcular a tensão causada pela fricção sem a necessidade de conhecimento prévio da curva característica de tensão-deformação do material, através de um modelo termomecânico computacional cujos parâmetros principais foram a força de trefilação e a temperatura. Esta pesquisa mostrou que há uma relação linear entre a força de trefilação e a temperatura do processo, para diferentes coeficientes de fricção. Um estudo paramétrico computacional realizado por Filice *et al* (2013) para trefilação de cobre, analisando força de trefilação, desgaste da ferramenta, redução e danos no material, variando o semi-ângulo do cone de entrada e deformação sofrida (D_f/D_0), a fim de otimizar o processo, concluiu que os parâmetros ótimos para o processo podem ser calculados em função do parâmetro chave (força de trefilação), que depende da exigência do analista do processo.

Baek *et al* (2012) observaram a evolução de defeitos superficiais de diversos formatos em arames trefilados através de simulações 3D, comparando os resultados computacionais com os resultados reais obtidos de amostras de aço médio carbono com defeitos arredondados, em função da tensão de trefilação e da forma final dos defeitos encontrados na superfície do arame. Percebeu-se que a forma final das imperfeições se dá segundo a distribuição das tensões radial e circunferencial.

Celentano *et al* (2009) construíram um modelo computacional por elementos finitos para um processo de trefilação para o aço ER70S-6 com 12 passes, a baixas velocidades de trefilação (entre 1 e 80 mm/min), confirmando que modelos relativamente simples podem, representativamente, descrever o comportamento da resposta de um material sob condições complexas de deformação como acontece na trefilação. Bihanta *et al* (2011) propõem um novo modelo de trefilação para tubos de alumínio, combinando os modelos sem mandril e com mandril fixo, para obter tubos com variação de espessura na direção radial. O modelo foi testado numericamente e validado experimentalmente. Foi concluído que as dimensões finais do tubo dependem principalmente do diâmetro externo e da espessura iniciais do tubo. Toribio *et al* (2015) apresenta um modelo inovativo de geometria para fieira, com dois

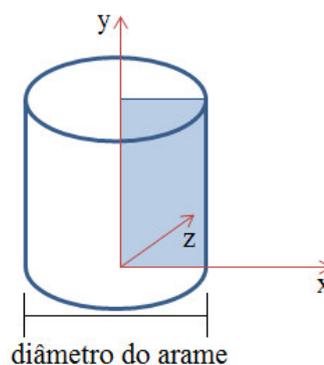
ângulos de entrada, para reduzir tensões residuais e melhorar a resistência do material à fragilização pro hidrogênio. Um modelo numérico foi construído para comparar a distribuição das tensões residuais e da deformação com a geometria convencional e a nova. A partir dos resultados, foi percebido que a redução das tensões residuais depende, principalmente, do ângulo utilizado para a segunda redução, que deve ser o menor possível.

Muito já se tem estudado e discutido a respeito do processo de trefilação, embora ainda haja muito a ser compreendido sobre o assunto. Fenômenos e relações paramétricas na trefilação carecem de análises mais detalhadas, necessitando de mais estudos a respeito deste processo simples, mas de entendimento complexo. Este trabalho, portanto, visa contribuir sobre este assunto.

4 MATERIAIS E METODOLOGIA

4.1 Modelo numérico de único passe desenvolvido para o estudo

Para simular o processo de trefilação, um programa de elementos finitos em linguagem MATLAB foi adaptado para este estudo. Todo o processo é representado de maneira axial simétrica, ou seja, apenas uma secção planar do sistema fio/ferramenta, com simetria axial no eixo que passa no centro deste sistema, é utilizada para os cálculos. Esta escolha reduz o tempo de cálculo por solucionar menor quantidade de variáveis nas simulações. Neste modelo, considerou-se a ferramenta como um corpo rígido e o fio um corpo deformável. Isto se justifica pela elevada dureza da fieira em relação ao fio. Os eixos, conforme ilustra a Fig. 5, foram definidos como radial (X), que representam o sentido do movimento de compressão e relaxamento do fio ao sofrer redução de área da secção transversal, longitudinal (Y), correspondente ao sentido da trefilação e circunferencial (Z), referente seção circular do fio.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5. Esquematização do sistema axial simétrico utilizado no modelo.

O arame construído para o modelo possui 5,5mm de diâmetro e 8mm de comprimento, suficientes para analisar o processo sem observar efeitos de borda, utilizando como deslocamento máximo para os plots 7mm. Esta escolha se deve à necessidade de reduzir o tempo de cálculo e utilizar menos variáveis para discretizar um corpo menor. O fio possui extremidade inicial com diâmetro 5mm, representando a região onde a força de trefilação é aplicada para passar o arame pela fieira e corresponde à redução de 10% do fio, aplicada para as simulações. Essa ponta dianteira com diâmetro menor é comumente utilizada na indústria para facilitar a entrada do arame na fieira. A fieira, por sua vez possui ângulo de trefilação α , com valores de 5°, 7° e 9°, que são próximos aos utilizados em processos industriais (Toribio *et al*, 2014). A ferramenta possui ainda comprimento da região cilíndrica (medida L da Fig. 3) de cerca de 1 mm, e corresponde a 20% do diâmetro inicial.

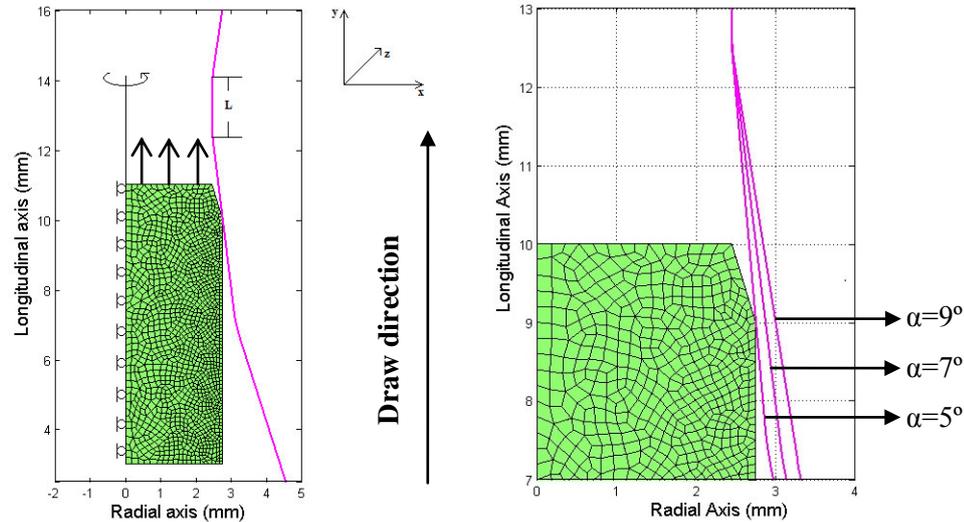
Além dos três ângulos de trefilação acima citados, alguns parâmetros do processo e do material também foram variados, a fim de se estudar seus efeitos. Sabe-se que a geometria da ferramenta tem influência direta na homogeneidade da deformação ao longo do raio do arame (Toribio *et al*, 2014). Além disso, o coeficiente de fricção é outro parâmetro que influencia a resposta do material ao esforço ao qual é submetido e é um fator dominante no desgaste da ferramenta, induzindo à ruptura do arame (Filice *et al*, 2013). O modelo de fricção de Coulomb, que trata do contato entre dois corpos (sem lubrificação), foi adotado e é uma escolha comum entre pesquisadores (El-Domiaty e Kassab, 1998 e Filice *et al*, 2013).

4.2 Malha para elementos finitos

O fio possui malha com grau de refinamento ótimo, pois apresenta resultados semelhantes a testes com malha mais refinada. Possui 1348 elementos, 4197 nós e 8394 graus de liberdade (variáveis a calcular), para uma peça de oito milímetros de comprimento e 2,75 milímetros de raio inicial. A malha foi criada em programa GMSH, utilizando um arquivo parametrizado e linguagem própria do programa. Os elementos da malha são do tipo quadrilátero, com oito nós por elemento, respeitando uma formulação co-rotacional de deformação finita (desacoplamento natural de rotação e deformação do corpo rígido (Ponthot, 2002).

As condições de contorno para o sistema ferramenta/arame são tratadas pelo método Lagrangeano aumentado (Pietrzak e Curnier, 1999). O tempo real de cálculos para cada simulação de movimento quase estático foi, em média, de 5 horas, e para as simulações a 4m/s foi cerca de 3 horas. Isto se deve ao refinamento da malha e ao tratamento de todas as não linearidades envolvidas.

A Fig. 6 apresenta (a) as condições de contorno do sistema e o esquema da malha e os contornos internos da ferramenta, de acordo com (b) o ângulo de trefilação α , apresentados em zoom para melhor visualização.



Fonte: Próprio autor.

Figura 6. Malha e contorno da ferra com os três ângulos de trefilação estudados.

4.3 Modelos utilizados para o material

O material estudado neste artigo é um aço baixo carbono, comumente utilizado em indústrias metalmeccânicas na fabricação de vergalhões para a construção civil. Foi considerado, para efeito de cálculo, material isotrópico, com comportamento de endurecimento não linear elasto-plástico (independente das taxas de deformação) e elasto-viscoplástico (dependente das taxas de deformação). A Eq. (1) corresponde à função de escoamento do material de referência, que possui comportamento elasto-viscoplástico não linear. Esta função retorna valores negativos em regime elástico, ou seja, a tensão de von Mises (σ_{eq}) é menor que o limite de escoamento (σ_y). Valores positivos indicam comportamento viscoplástico do material. A Eq. (2) apresenta a evolução do limite de escoamento do material como função da deformação plástica acumulada, κ , e sua taxa $\dot{\kappa}$, dependente do tempo. Nesta, σ_0 corresponde ao limite de escoamento inicial (para $\kappa=0$), enquanto o segundo termo da Eq. (2) descreve o comportamento de endurecimento não linear (para $n \neq 0$ e 1). O terceiro termo é ativo para $\eta \neq 0$ e descreve a sobretensão (tensão excedente) devido à dependência da taxa de deformação. Aumentando o valor de $\dot{\kappa}$, este termo também aumenta, seguindo o modelo de Perzyna (Jorge, 2005).

$$f(\sigma, \kappa, \dot{\kappa}) = \sigma_{eq}(\sigma) - \sigma_y(\kappa, \dot{\kappa}) \quad (1)$$

$$\sigma_y(\kappa, \dot{\kappa}) = \sigma_0 + K\kappa^n + \sigma_0\eta \dot{\kappa}^{nvp}. \quad (2)$$

Nas equações acima, e para este trabalho, σ , κ e $\dot{\kappa}$ correspondem, respectivamente, às tensões no material, à medida de deformação plástica escalar do material e à taxa de κ . σ_{eq} representa a tensão equivalente que, neste caso, corresponde à tensão de von Mises. Para observar o comportamento do material durante o processo, alguns parâmetros inerentes a este foram utilizados no modelo, sendo eles o módulo de elasticidade ($E=208\text{GPa}$), o coeficiente de Poisson ($\nu=0,3$), o expoente de encruamento ($n=0,6$), o coeficiente de encruamento ($K=515,23\text{MPa}$), o limite de escoamento inicial ($\sigma_0=275\text{MPa}$), o coeficiente de viscoplasticidade (η) e o expoente de viscoplasticidade (n_{vp}). O valor de η é diferente de zero apenas para as simulações viscoplásticas. O valor 0,01 foi adotado para este parâmetro a fim de proporcionar um limite de escoamento aparente aproximadamente duas vezes maior nos testes a 4m/s, em relação aos testes quase estáticos. O valor de n_{vp} , que controla fluência do material, foi mantido igual a 1 em todas as simulações para manter a linearidade da função $\dot{\kappa}$ e manter o cálculo simplificado. A Tabela 1 apresenta as combinações de parâmetros utilizadas em cada simulação realizada, onde σ_0 é o limite de escoamento inicial, cujos valores são o limite de escoamento tabelado (275 MPa) e este valor aumentado 20% (330MPa). O limite de escoamento inicial do material é um parâmetro relevante no estudo de processos de conformação, visto que a partir deste parâmetro observa-se o comportamento plástico dos materiais. μ é o coeficiente de atrito adotado, obedecendo a lei de Coulomb, e V é a velocidade de trefilação, que corresponde a valores utilizados na indústria (Haddi et al, 2011).

Tabela 1. Combinações de parâmetros em cada simulação

Simulação n°	Ângulo α (°)	σ_0 (MPa)	μ	η	V (m/s)
1	5	275	0,1	0	~ 0
2	5	275	0	0	~ 0
3	5	330	0,1	0	~ 0
4	5	330	0	0	~ 0
5	5	275	0,1	0,01	4
6	5	275	0	0,01	4
7	7	275	0,1	0	~ 0
8	7	275	0	0	~ 0
9	9	275	0,1	0	~ 0
10	9	275	0	0	~ 0
11	9	275	0,1	0,01	4
12	9	275	0	0,01	4

As simulações nº 1, 7 e 9 foram utilizadas para estudar a influência do ângulo de trefilação α . As comparações entre os testes 1 e 2, 7 e 8, e 9 e 10, respectivamente, permitem observar a influência da fricção. As simulações nº 5, 6, 11 e 12 foram utilizadas no estudo da influência do comportamento dependente da taxa de deformação, e a partir dos testes de nº 3 e 4, estudou-se o efeito do aumento do limite de escoamento.

A Fig. 7 ilustra as curvas Força x Deslocamento para o mesmo material, em taxas diferentes de deformação, em um teste de compressão. A propriedade elástica do material foi apresentada como um fator de baixa influência neste procedimento dominado pelo comportamento plástico da peça (Belo, 2014). Portanto, sua variação não foi considerada neste trabalho.

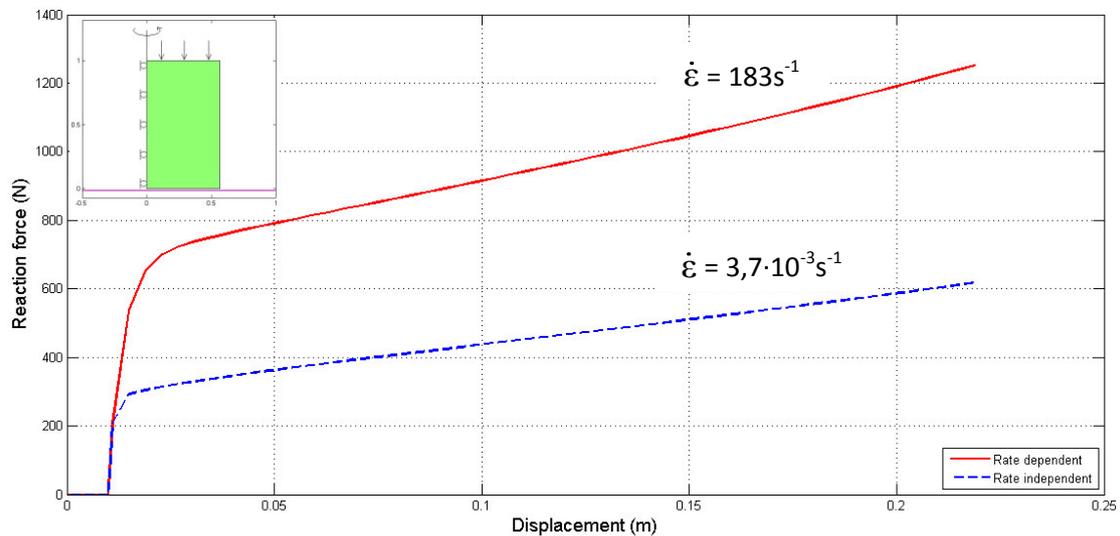


Figura 7. Comportamento do material estudado em testes de compressão a diferentes velocidades.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

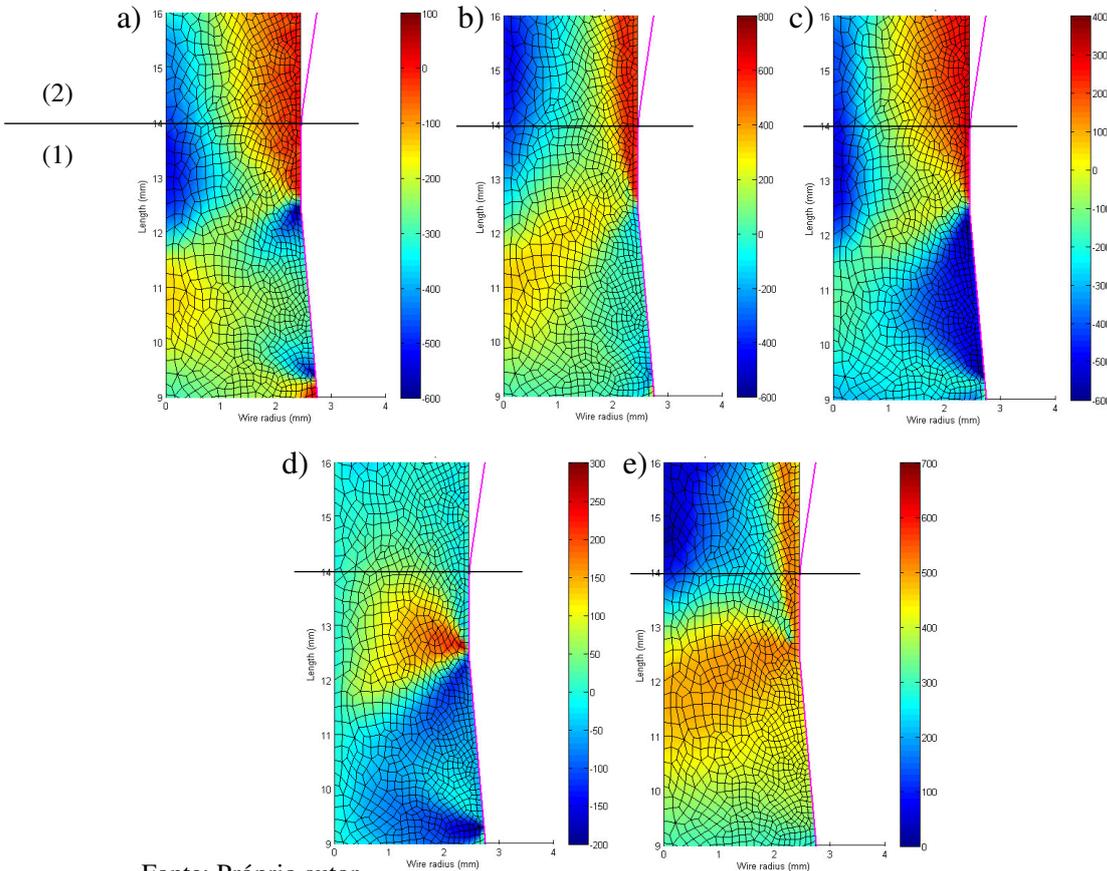
Os testes realizados com movimento quase estático são apresentados no tópico a seguir, seguidos dos resultados dos teste com viscoplasticidade no tópico 3.2. Utilizou-se a primeira simulação listada na Tabela 1 como caso de referência.

CASO DE REFERÊNCIA

Para o teste de referência, o limite de escoamento possui valor 275MPa, semi-ângulo de trefilação $\alpha=5^\circ$, coeficiente de fricção 0,1, $\eta=0$ e velocidade de $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

A Fig. 8 apresenta o resultado do teste para as tensões nos eixos radial (X), longitudinal (Y) e circunferencial (Z), o cisalhamento (XY) e a tensão equivalente de von

Mises. A linha que separa as zonas 1 e 2 na Fig. 8(a) marcam as zonas de tensões durante o trabalho, região de contato entre ferramenta e peça, e de tensões residuais, região de saída do contato ferramenta/peça, respectivamente, em todos os casos. Note que os valores exibidos na barra de cores de cada resultado mostram os valores mínimo e máximo como uma função da componente da tensão.



Fonte: Próprio autor.

Figura 8. Distribuição das tensões, em MPa, nos eixos (a) X, (b) Y e (c) Z, (d) de cisalhamento (XY) e (e) de von Mises, para um deslocamento de 7mm.

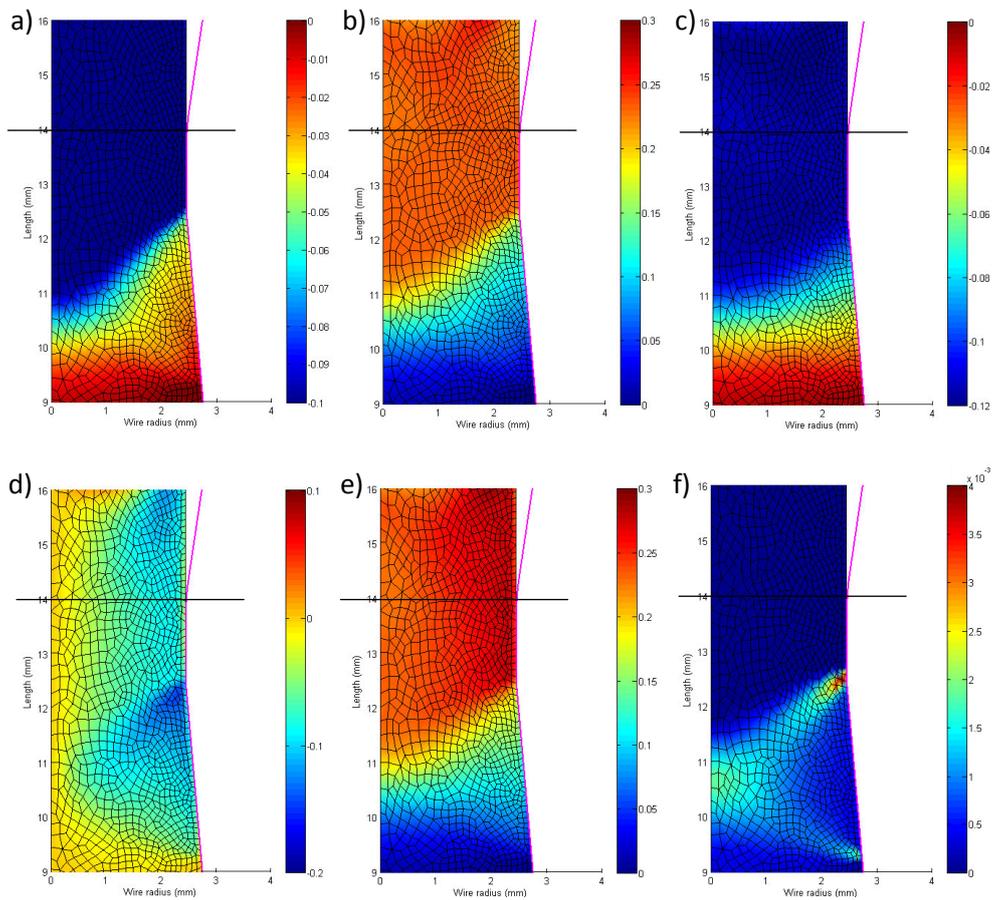
As tensões de trabalho compressivas ($\sigma_x > 0$) no eixo radial são predominantes, devido ao trabalho de redução da espessura do material neste eixo, e se concentram na superfície do fio no início do contato com a ferramenta e na parte mais estreita do cone de entrada. Há tensões compressivas também no centro do fio, quando este sai da região cônica de entrada e passa para a região cilíndrica da ferramenta. No eixo longitudinal, a zona 1 é dominada por tensões de tração. No eixo circunferencial, as tensões compressivas chegam a cerca de 500MPa e se concentram por toda a região de contato ferramenta/peça no cone de entrada, devido à compressão circunferencial causada pela redução da seção transversal, e se estende até metade do raio do arame. Já as tensões de cisalhamento geram pontos de concentração no início do contato e no fim do cone de entrada.

As tensões de tração em trabalho são predominantes no eixo longitudinal, e se concentram no centro do arame durante a redução, e se intensificam na superfície do fio quando este passa para a zona cilíndrica da ferramenta. As tensões de cisalhamento têm seu ponto de concentração na superfície no início da zona cilíndrica e se estendem, com valores gradualmente menores, até a região central do arame. As tensões de von Mises se apresentam relativamente uniformes ao longo do raio e atingem valor máximo de cerca de 500MPa.

As tensões residuais no eixo radial (zona 2) são essencialmente compressivas e decrescem até valores próximos a zero no sentido centro-borda do arame. No eixo longitudinal as tensões compressivas se encontram no centro do fio diminuindo gradativamente até dar lugar às tensões de tração, que chegam a 600MPa, causado pela fricção na superfície. Este comportamento é observado no sentido centro-borda do arame, como em X. No eixo circunferencial (Z) observa-se o mesmo fenômeno, embora a variação seja menor (entre -400 e 300MPa) do que no eixo longitudinal (entre -400 e 600MPa). A variação de tensões de tração é menor que a de compressão. Não foram observadas tensões de cisalhamento residuais. Já as tensões de von Mises residuais apresentaram um comportamento semelhante ao dos eixos Y e Z, porém valores extremos mais próximos (0 a 550MPa). No entanto percebe-se uma estreita faixa, logo abaixo da superfície do fio, onde se concentram as maiores tensões de von Mises (em torno de 550MPa), significando que uma deformação adicional se daria mais facilmente nesta camada próxima à superfície.

A Fig. 9 exhibe os resultados da simulação de referência para as deformações totais nos eixos X, Y e Z e de cisalhamento, juntamente à deformação plástica escalar (κ) e à taxa de deformação plástica escalar ($\dot{\kappa}$).

A Fig. 9 mostra que, nas direções radial e longitudinal, a deformação na superfície do arame se dá de forma mais suave que o centro, porém a deformação é a mesma em todo o diâmetro do fio. O eixo Z, ao contrário dos dois anteriores, possui maior uniformidade no gradiente de deformação, à medida que o fio avança pela fieira e atinge valor máximo de deformação por compressão de 12%. As deformações por cisalhamento tem como ponto de maior intensidade a região entre o fim do cone de entrada e início da zona cilíndrica. A deformação plástica foi de aproximadamente 30% a uma taxa ($\dot{\kappa}$) muito pequena, próxima de zero, devido ao movimento quase estático assumido.



Fonte: Próprio autor.

Figura 9. Deformações nos eixos (a) X, (b) Y e (c) Z e (d) de cisalhamento, (e) deformação plástica escalar (κ) e (f) taxa de deformação plástica escalar ($\dot{\kappa}$), para um deslocamento de 7mm.

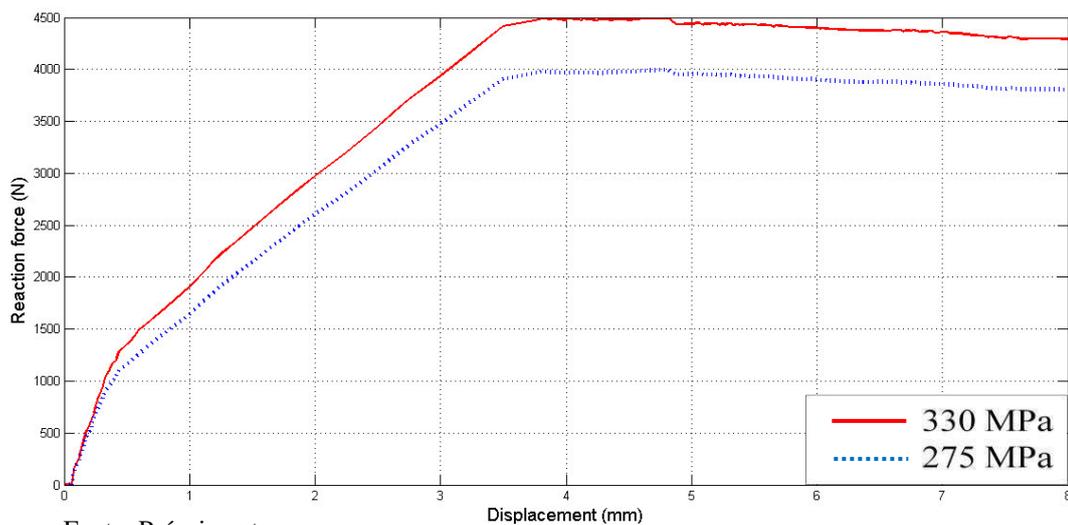
A Fig. 9 mostra que, nas direções radial e longitudinal, a deformação na superfície do arame se dá de forma mais suave que o centro, porém a deformação é a mesma em todo o diâmetro do fio. O eixo Z, ao contrário dos dois anteriores, possui maior uniformidade no gradiente de deformação, à medida que o fio avança pela fieira e atinge valor máximo de deformação por compressão de 12%. As deformações por cisalhamento tem como ponto de maior intensidade a região entre o fim do cone de entrada e início da zona cilíndrica. A deformação plástica total (κ) foi de aproximadamente 30% a uma taxa ($\dot{\kappa}$) muito pequena, próxima de zero, devido ao movimento quase estático assumido.

A geometria da ferramenta se mostra um parâmetro importante na distribuição das deformações sofridas pelo material, visto que apesar da uniformidade do produto final do ponto de vista das deformações totais (e este fenômeno se observa para todos os demais casos com mesmo semi-ângulo de trefilação), essa distribuição durante o trabalho de redução muda com o ângulo de entrada.

5.1 Elastoplasticidade

INFLUÊNCIA DO LIMITE DE ESCOAMENTO

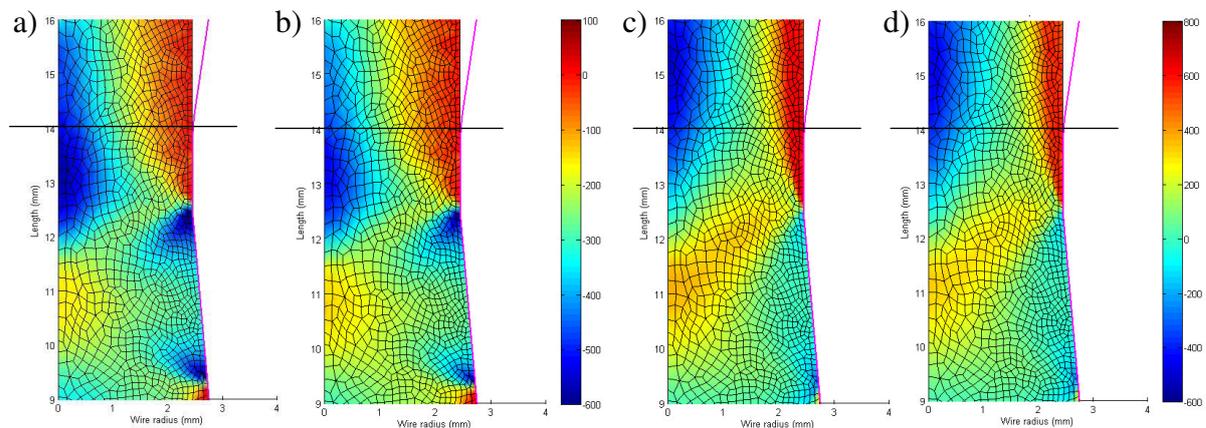
Nesta seção são apresentados os resultados dos testes computacionais realizados a velocidade de $1 \cdot 10^{-5}$ m/s (quase estático). Primeiramente é mostrada a influência do limite de escoamento sobre a distribuição das tensões e das deformações durante e após a redução. Em seguida, o efeito da variação do ângulo α é analisado e, por fim, se apresentam os resultados da variação da fricção no processo. Na Fig. 10 são mostradas as curvas Força x Deslocamento para os testes realizados com limites de escoamento iniciais de 330MPa e 275MPa.



Fonte: Próprio autor.

Figura 10. Curvas Força x Deslocamento do material, resultantes dos testes com limite de escoamento inicial de 330MPa e 275MPa.

A Fig. 11 exibe os resultados das tensões nas direções radial e longitudinal para os testes a 5° , com fricção e limites de escoamento iniciais de 330MPa e 275MPa.



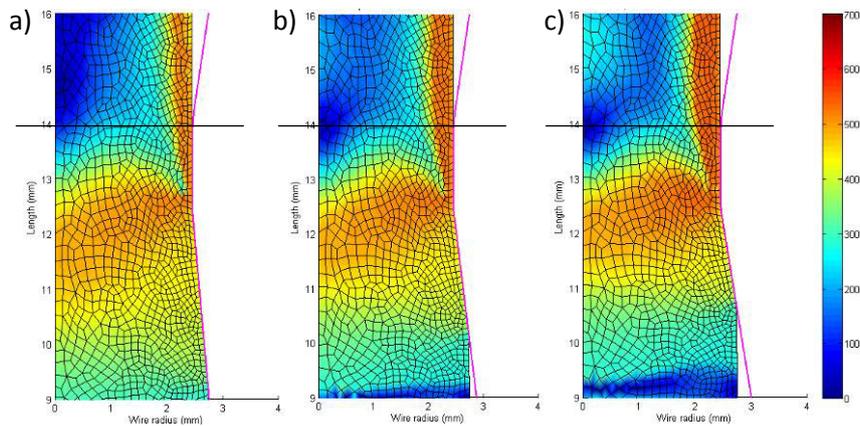
Fonte: Próprio autor.

Figura 11. Tensões nos eixos radial, (a) para $\sigma_0=330$ MPa e (b) para $\sigma_0=275$ MPa, e longitudinal, (c) para $\sigma_0=330$ MPa e (d) para $\sigma_0=275$ MPa.

O comportamento do material com um acréscimo de 20% em seu limite de escoamento inicial e com os demais parâmetros inalterados, apresentou força máxima de trefilação cerca de 12,5% maior que o valor máximo de força com o limite de escoamento inicial característico do material. Isto indica que este parâmetro é um fator de influência direta na força de trefilação e que a influência da viscoplasticidade será um ponto importante neste sentido. Contudo, esta diferença pode ser considerada suave, do ponto de vista industrial, pois uma diferença de 26MPa é perfeitamente suportável para o maquinário de trefilação.

INFLUÊNCIA DO SEMI-ÂNGULO DE TRFILAÇÃO

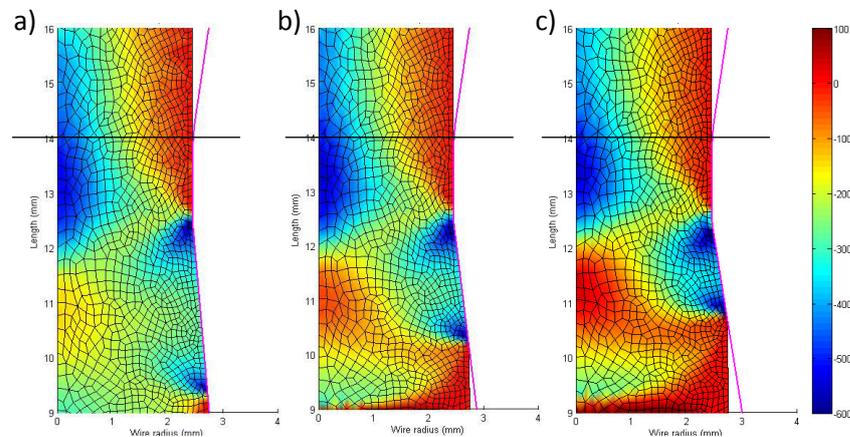
A Fig. 12 apresenta a distribuição das tensões de Von Mises no arame, durante a redução de seção transversal, para os ângulos de entrada de 5° (a), 7° (b) e 9° (c), limite de escoamento inicial de 275MPa, e coeficiente de fricção μ igual a 0,1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 12. Distribuição das tensões de Von Mises (em MPa) para teste a 5, 7 e 9°, a), b) e c), respectivamente, para deslocamento de 7mm.

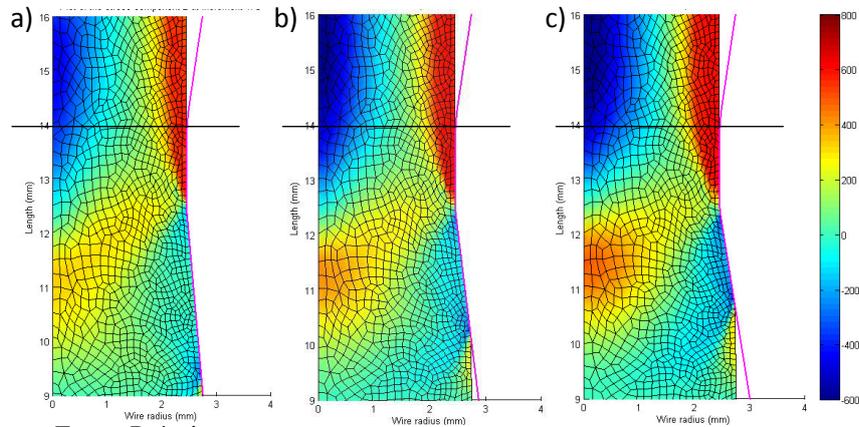
A Fig. 13 exibe os resultados para a distribuição das tensões na direção radial, para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, com fricção e limite de escoamento 275MPa.



Fonte: Próprio autor.

Figura 13. Tensões no eixo radial para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, para deslocamento de 7mm.

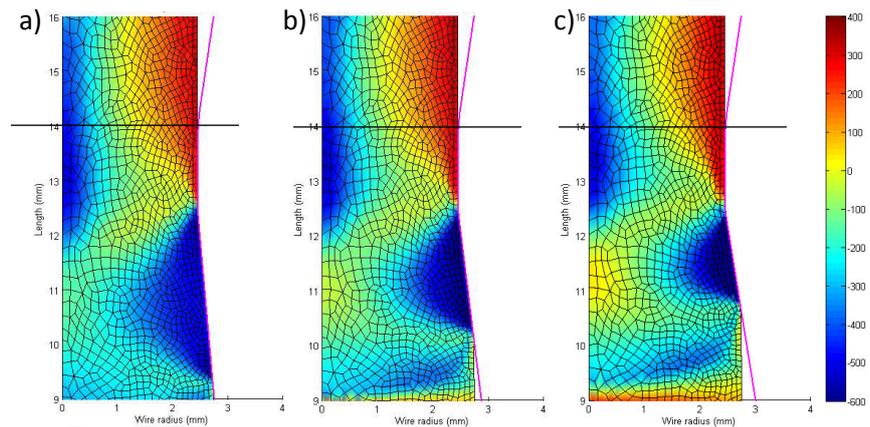
A Fig. 14 exibe os resultados para a distribuição das tensões na direção longitudinal, para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, com fricção e limite de escoamento 275MPa.



Fonte: Próprio autor.

Figura 14. Tensões no eixo longitudinal para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, para deslocamento de 7mm.

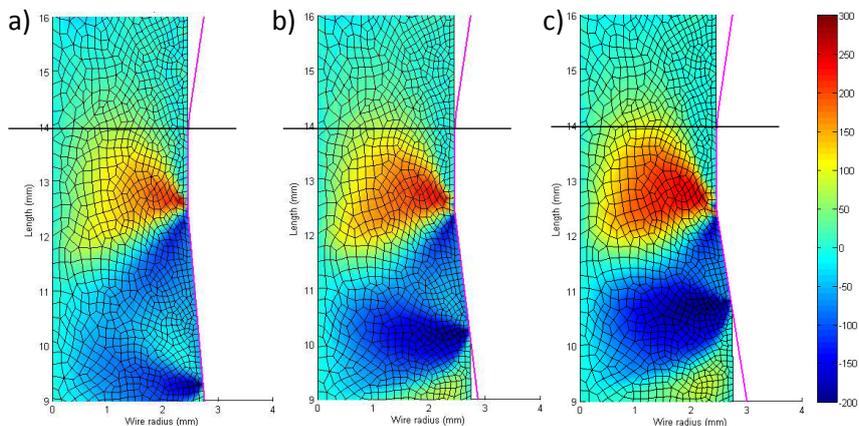
A Fig. 15 exibe a distribuição das tensões na direção circunferencial, para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, com fricção e limite de escoamento 275MPa.



Fonte: Próprio autor.

Figura 15. Tensões no eixo circunferencial para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, para deslocamento de 7mm.

A Fig. 16 exibe a distribuição das tensões de cisalhamento, para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, com fricção e limite de escoamento 275MPa.



Fonte: Próprio autor.

Figura 17. Tensões de cisalhamento para (a) $\alpha=5^\circ$, (b) $\alpha=7^\circ$ e (c) $\alpha=9^\circ$, para deslocamento de 7mm.

A partir das figuras 12 a 17, observa-se uma maior suavidade no gradiente de distribuição das tensões ao longo do raio do arame e um decréscimo das tensões residuais na direção borda-centro do arame na simulação com ângulo α igual a 5° . Entretanto, esta última característica não prevalece para as simulações com α igual a 7° e 9° , indicando uma maior inhomogeneidade das tensões residuais, resultando em menor homogeneidade do produto. As duas últimas simulações mencionadas apresentam maiores espessuras das camadas de máximas tensão (região de cor laranja, após o contato do arame com a fieira) e compressão (faixa azul no centro do arame) do que a primeira simulação. É possível verificar, ainda, que o teste a 5° apresenta tensões menores que os demais, sendo o teste a 9° o que apresenta tensões maiores, chegando a valores próximos a 600MPa. O mesmo ocorre para as tensões no eixo longitudinal do sistema. Já para as tensões nas direções radial e circunferencial o gradiente de tensões se apresenta de modo crescente do centro do arame para a sua superfície. Durante a redução, a tensão máxima no teste com α igual a 5° possui valor menor que nos testes com os outros dois ângulos, sendo o teste com α igual a 9° o que alcançou tensões maiores de tração e de compressão. O processo apresenta ponto de concentração de tensões de tração próximo à superfície, ao passar da região cônica de entrada para a região cilíndrica da ferramenta. Concentradores de tensão de compressão foram observados no início do contato do arame com a ferramenta e no fim da região cônica de entrada. Assim, sob o ponto de vista do ângulo α , a configuração com 5° resulta em menores tensões residuais.

INFLUÊNCIA DA FRICÇÃO

A Fig. 18 mostra as curvas Força x Deslocamento como resultados dos teste realizados com α igual a 5° , 7° e 9° , σ_0 igual a 275MPa, com e sem fricção.

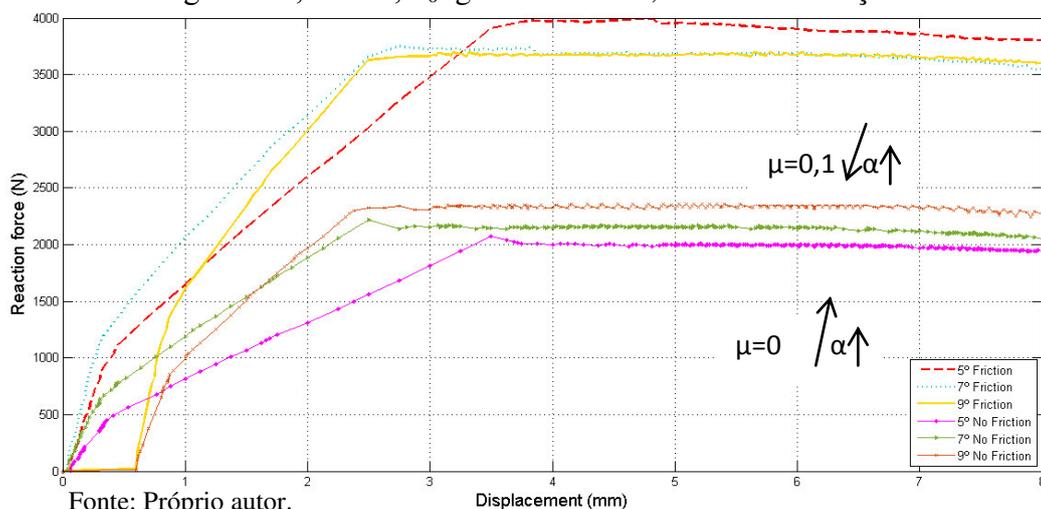
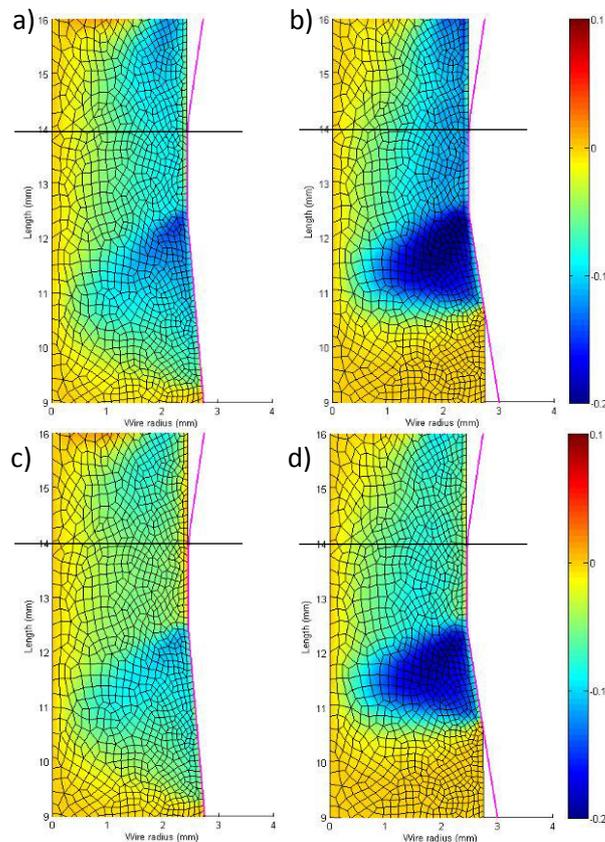


Figura 18. Curvas Força x Deslocamento do material, resultantes dos testes com e sem fricção, para os ângulos 5° , 7° e 9° e limite de escoamento inicial 275MPa, com deslocamento de 7mm.

A Fig. 19 apresenta a distribuição de deformações por cisalhamento do sistema, durante a redução de seção, para os ângulos de entrada de 5° (a) e (c) e 9° (b) e (d), com e sem fricção e limite de escoamento igual a 275MPa.



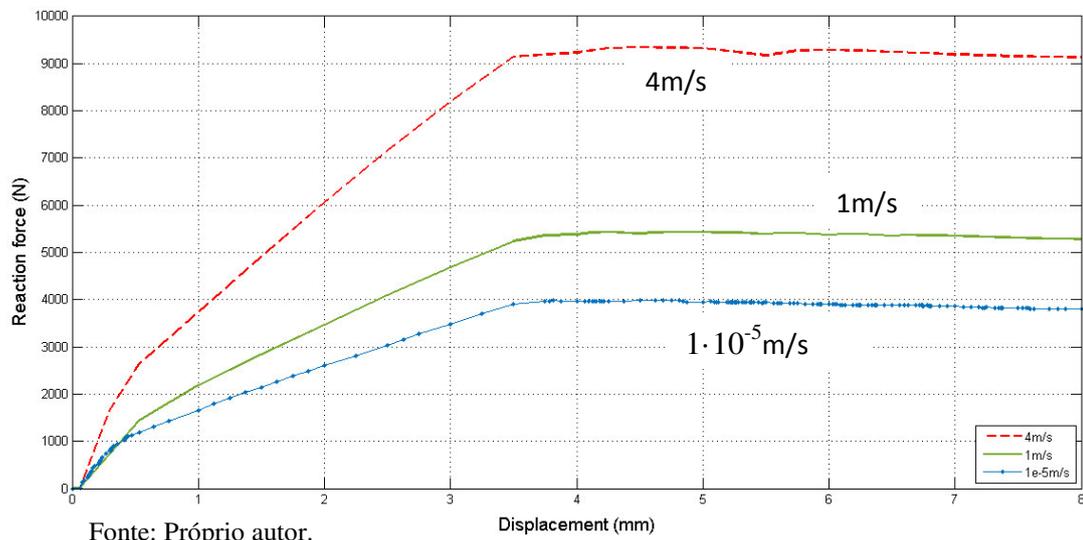
Fonte: Próprio autor.

Figura 19. Distribuição das deformações por cisalhamento do sistema, com e sem fricção, para os ângulos 5° e 9° e limite de escoamento inicial 275MPa, com deslocamento de 7mm.

Os testes realizados com fricção e sem fricção mostraram que as deformações sofridas pelo arame são amplificadas pela fricção, visto que a distribuição de tensões é semelhante em ambos os casos (com e sem fricção). Porém, os testes com fricção apresentam maior deformação em relação aos sem fricção, o que implica dizer que o coeficiente de fricção é um intensificador de deformações causadas por outros parâmetros, como as tensões de compressão devido à redução do diâmetro do arame. Uma justificativa para a força de trefilação ser maior no teste com α igual a 5° e $\mu=0,1$ é o fato de o comprimento do arame que fica em contato com a ferramenta durante a trefilação ser maior quanto menor o valor de α , necessitando uma força de trefilação maior para vencer a barreira da fricção e fazer o arame passar pela fieira (Haddi et al, 2011). Entretanto, esse aumento, sob o ponto de vista industrial, é pouco representativo.

5.2 Elasto-Viscoplasticidade

Nesta seção, os resultados obtidos para os testes de viscoplasticidade, a 1m/s e 4m/s, são revelados juntamente aos resultados do teste de referência. Primeiramente, faz-se uma comparação dos testes quanto à força de trefilação, seguido da análise das simulações quanto à taxa de deformação, finalizando com o estudo da variação da fricção em relação à velocidade de trefilação. Os valores mínimo e máximo de cada resultado a diferentes velocidades mostra o quanto este parâmetro influencia na intensidade das tensões e das taxas de deformação. A Fig. 20 apresenta as curvas Força x Deslocamento para os testes realizados a α igual a 5°, 275MPa de limite de escoamento inicial, coeficiente de fricção de 0,1 e velocidades de 4m/s, 1m/s e $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

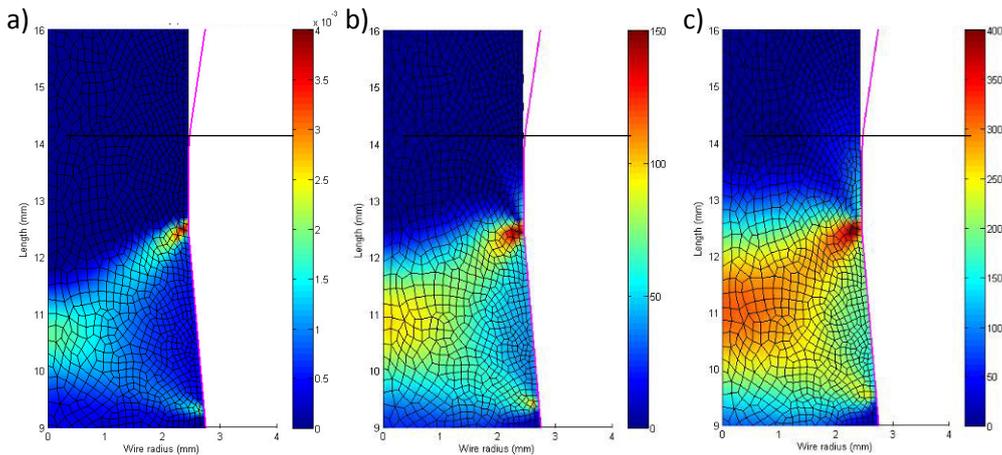


Fonte: Próprio autor.

Figura 20. Curvas Força x Deslocamento do material, resultantes dos testes com fricção, para α igual a 5°, limite de escoamento inicial 275MPa, para diferentes velocidades.

A partir da Fig. 20, pode-se perceber que há um acréscimo na força de trefilação conforme aumenta a velocidade de trefilação, de modo não linear. Isso implica em uma maior força de trefilação para o processo e, por consequência, maior potência requerida para a máquina. Além disso, condições mais severas de trefilação causam um maior desgaste da ferramenta, diminuindo sua vida útil e aumentando a frequência de parada na produção para manutenção do equipamento.

A Fig. 21 mostra a taxa de deformação (em s^{-1}) do arame durante a redução em condições quase estática, a 1m/s e a 4m/s.



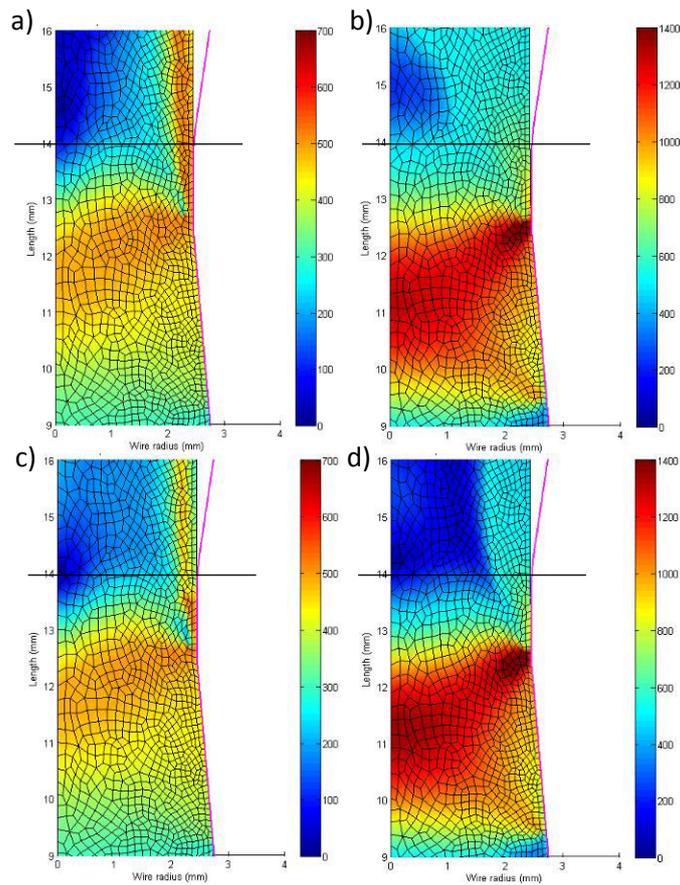
Fonte: Próprio autor.

Figura 21. Taxa de deformação (em s^{-1}) do arame durante a passagem pela fieira, para α igual a 5° , a $1 \cdot 10^5$ m/s (a), 1m/s (b) e 4m/s (c) e deslocamento de 7mm.

As deformações totais, em todas as direções, apresentaram valores próximos, já que este parâmetro depende da geometria da ferramenta. Portanto a velocidade do processo não é um fator determinante para o aumento deste parâmetro, embora tenha bastante influência nas taxas de deformação. Observou-se, também, que a velocidades próximas a zero, a distribuição das deformações na zona de transição entre a região cônica de entrada e a região cilíndrica se dá de forma menos uniforme que a 4m/s. Isto indica que as deformações ao longo do raio do arame se dão mais uniformemente quanto maior a velocidade aplicada no processo. Um ponto interessante a ser considerado é a relação custo-benefício entre maior velocidade e vida útil da ferramenta. Isto porque, à velocidade de 1m/s, a força de trefilação necessária para deslocar o arame pela fieira fica em torno de 5500N, enquanto a uma velocidade quarto vezes maior este valor não chega a dobrar (~9300N).

A Fig. 22 mostra a distribuição das tensões de von Mises no arame durante a redução em condições quase estática, a 1m/s e a 4m/s.

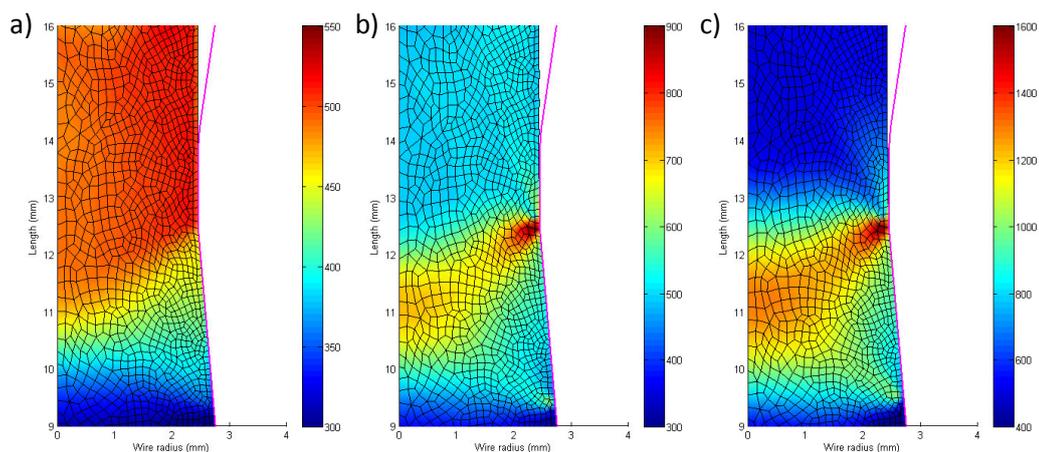
A velocidade de trefilação alterou significativamente os valores de tensões, bem como das taxas de deformação no material durante o processo de redução da seção transversal do arame. As tensões de Von Mises, por exemplo, dobrou, à velocidade de 4m/s. Outro ponto interessante é que as tensões residuais, apesar de altas, se distribuíram com menor inhomogeneidade ao longo de todo o raio do arame, garantindo uma variação de tensão ligeiramente menor e mais suave nas simulações a 4m/s (entre 100 e 500MPa), o que não ocorreu nas simulações de movimento quase estático (entre 0 e 550MPa) e a 1m/s. Todas as simulações revelaram a presença de tensões de compressão e de tração residuais. As tensões residuais de compressão se concentraram na região central do arame.



Fonte: Próprio autor.

Figura 22. Distribuição das tensões de Von Mises (em MPa) para os testes para $\alpha=5^\circ$ a $1\cdot 10^{-5}$ m/s (a) e a 4m/s (b) com fricção, e a $1\cdot 10^{-5}$ m/s (c) e 4m/s (d) sem fricção, com deslocamento de 7mm.

Apesar das altas tensões residuais, o limite de escoamento do material, após a redução, para todas as velocidades, atingiu valor médio de 500MPa. A Fig.23 apresenta o limite de escoamento aparente durante e após o trabalho de redução.



Fonte: Próprio autor.

Figura 23. Limite de escoamento aparente do arame durante e após o processo de trefilação para $\alpha=5^\circ$, a velocidades de (a) $1\cdot 10^{-5}$ m/s, (b) 1m/s e (c) 4m/s.

O limite de escoamento aparente do produto final permanece em torno de 500MPa, apesar da distribuição e da intensidade das tensões durante a redução diferirem. Isto indica

que a viscoplasticidade não influi diretamente no limite de escoamento do material após a redução.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo utilizado neste trabalho possui algumas limitações que não permitem maiores aproximações dos resultados obtidos com os do processo real aplicado na indústria. A variação de temperatura durante a trefilação é um fator que não foi considerado nas simulações, uma vez que para uma redução de 10% do fio, e baixo ângulo semi, o aumento da temperatura não é elevada (cerca de 20°C), de acordo com El-Domiaty e Kassab (1998). Outro fator negligenciado foi a não linearidade da função $\dot{\kappa}$, cujo expoente (n_{vp}) deve corresponder a um valor mais realístico (com maior domínio de validade). O coeficiente de viscosidade e de fricção foram mantidos constantes para os testes, contudo, estes parâmetros variam de acordo com a taxa de deformação e a temperatura, respectivamente. Essas considerações ficaram fora do escopo do trabalho tendo em vista o prazo disponível para a conclusão deste.

Alguns parâmetros também importantes no processo, como a representação da evolução de defeitos e da ruptura do material e a ação dos lubrificantes não foram abordados nesta pesquisa por não fazerem parte do escopo do trabalho. Defeitos são melhor representados em simulações que consideram toda a seção do arame pois não possuem a mesma simetria do próprio fio, o que altera o desenho da peça e a malha para simulação. O modelo de fricção de Coulomb não é totalmente válido na presença de lubrificantes.

7 CONCLUSÃO

A presente pesquisa conduziu um estudo comparativo, entre diversas combinações de parâmetros de material e processo, do efeito destes ingredientes e suas relações entre cada um. Assim, a partir do exposto, concluiu-se que:

- α é importante na a distribuição das tensões durante e após o processo de redução;
- O aumento de $\dot{\kappa}$ intensifica as tensões e diminui sua inhomogeneidade ao longo do raio do fio; não contribui significativamente para o aumento do limite de escoamento aparente.
- μ é fator intensificador de tensões e influi na força de trefilação;
- Variação de σ_0 influencia na força de trefilação;
- Parâmetros dominantes:
 - μ - indesejável no processo;
 - $\dot{\kappa}$ – eleva tensões e a força de trefilação;
 - α – quanto maior, concentração de tensões maiores;

Os parâmetros ótimos de trefilação dependem da requisição do analista do processo.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Faz-se necessário, ainda, estudar os efeitos da viscoplasticidade, considerando fatores adicionais, como temperatura e coeficiente de fricção variável para a obtenção de resultados mais próximos aos reais. Uma das opções para tal é calcular um valor para n_{vp} característico do material estudado, bem como para o coeficiente η de acordo com as taxas de deformação. Pretende-se, como continuidade a este trabalho, analisar experimentos práticos para validar o modelo numérico apresentado e estudar os efeitos da redução da seção transversal do fio.

REFERÊNCIAS

- BAEK, H.M., YOUNG, G.J., SUN, K.H., YONG-TAEK, I., IL-HEON, S., DUK-LAK, L. 2012. **Numerical study on the evolution of surface defects in wire drawing**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 212, pp. 776-785.
- BELO, J.S. 2014. **Simulação do efeito da variação dos parâmetros de trefilação em aços aplicados à construção civil, através de elementos finitos**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Ceará.
- BIHAMTA, R., BUI, Q.H., GUILLOT, M., D'AMOURS, G., RAHEM, A., FAFARD, M. 2011. **A new method for production of variable thickness aluminium tubes: Numerical and experimental studies**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 211, pp. 578-589.
- CALLISTER, W. D. Jr. 2008. **Ciência e Engenharia dos Materiais, uma introdução**. 8 ed. pp. 107.
- CELENTANO, D.J., PALACIOS, M.A., ROJAS, E.L., CRUCHAGA, M.A., ARTIGAS, A.A., MONSALVE, A.E. 2009. **Simulation and experimental validation of multiple-step wire drawing processes**. Finite Elements in Analysis and Design. vol. 45, pp. 163-180.
- CHIN, R.K., STEIF, P.S. 1995. **A Computational study of strain inhomogeneity in wire drawing**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. vol. 35, n. 8, pp. 1087-1098.
- CRISTECU, N. 1980. **On the optimum die angle in fast wire drawing**. Journal of Mechanical Working Technology. vol. 3, pp. 275-287.
- CUNNINGHAM, D.J. 2008. **Optimization of high speed wire drawing using finite element analysis**. Dissertação de mestrado. The Pennsylvania State University.
- DIETER, G. E. 1988. **Mechanical Metallurgy**. SI metric ed.
- EL-DOMIATY, A., KASSAB, S.Z. 1988. **Temperature rise in wire-drawing**. Journal of Materials Processing Technology. vol. 83, pp. 72-83.
- FELDER, E., LEVRAU, C., MANTEL, M., DINH, N.G.T. 2012. **Identification of the work of plastic deformation and the friction shear stress in wire drawing**. Wear. vol. 286-287, pp. 27-34.
- FILICE, L., AMBROGIO, G. GUERRIERO, F. 2013. **A multi-objective approach for wire-drawing process**. Procedia CIRP. 8th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. vol. 12, pp. 294-299.
- HADDI, A., IMAD, A., VEGA, G. 2011. **Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process**. Materials and Design. vol.12, pp. 4310-4315.

HEEGAARD, J.-H. & CURNIER, A. 1993. **An augmented Lagrangian method for discrete large-slip contact problems** *Int. J. Numer. Methods Eng.*, John Wiley and Sons Ltd., 36, 569-593.

HUH, J., HUH, H., LEE, C.S. 2013. **Effect of strain rate on plastic anisotropy of advanced high strength steel sheets**. *International Journal of Plasticity*. vol. 44, pp. 23-46.

JORGE, R. M. N. 2005. **Viscoplasticidade**. Universidade do Porto. pp. 15 - 20.

KIM, T.H., KIM, B.M., CHOI, J.C. 1997. **Prediction of die wear in the wire-drawing process**. *Journal of Materials Processing and Technology*. vol. 65, pp. 11-17.

MAGALHÃES, F.C., PERTENCE, A.E.M., CAMPOS, H.B., AGUILAR, M.T.P, CETLIN, P.R. 2012. **Defects in axisymmetrically drawn bars caused by longitudinal superficial imperfections in the initial material**. *Journal of Materials Processing and Technology*. vol. 212, pp. 237-248.

TORIBIO, J., LORENZO, M., VERGARA, D., KHARIN, V. 2014. **Influence of the die geometry on the hydrogen embrittlement susceptibility of cold drawn wires**. *Engineering Failure Analysis*. vol. 36, pp. 215-225.

PIETRZAK, G. & CURNIER, A. **Large deformation frictional contact mechanics: continuum formulation and augmented Lagrangian treatment**. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Elsevier Science S.A., 1999, 177, 351-381.

PONTHOT, J. **Unified stress update algorithms for the numerical simulation of large deformation elasto-plastic and elasto-viscoplastic processes** *Int. J. Plas.*, 2002, 18, 91-126.

TORIBIO, J., LORENZO, M., VERGARA. 2015. **On the use of varying die angle for improving the resistance to hydrogen embrittlement of cold drawn prestressing steel wires**. *Engineering Failure Analysis*. vol. 45, pp. 273-282.