



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL
DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE FIOS
APLICADOS A CABOS CONDUTORES**

João Pedro Taborda Lottermann

Brasília, junho de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Departamento de Engenharia Mecânica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL
DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE FIOS
APLICADOS A CABOS CONDUTORES**

João Pedro Taborda Lottermann

*Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para obtenção
do grau de Mestre em Ciências Mecânicas*

Banca Examinadora

Prof. Lucival Malcher, Ph.D, FT/UnB

Orientador

Prof. Thiago de Carvalho Rodrigues Doca, Dr.,

FT/UnB

Examinador interno

Prof. Henrique Gomes de Moura, Dr., Gama/UnB

Examinador externo

FICHA CATALOGRÁFICA

LOTTERMANN, JOÃO PEDRO TABORDA

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE FIOS APLICADOS A CABOS CONDUTORES [Distrito Federal] 2017.

xvi, 111 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2017).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica

1. Trefilação

2. Análise numérica

3. Métodos de Elementos Finitos

4. Abaqus

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOTTERMANN, J.P.T. (2017). *ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE FIOS APLICADOS A CABOS CONDUTORES*. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Publicação ENM.DM - 257/2017, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: João Pedro Taborda Lottermann

TÍTULO: ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE FIOS APLICADOS A CABOS CONDUTORES.

GRAU: Mestre em Ciências Mecânicas ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa Dissertação de Mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

João Pedro Taborda Lottermann

Depto. de Engenharia Mecânica (ENM) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao Prof. Dr. Lucival Malcher pela orientação e amizade que recebi ao longo desses últimos anos, vem me orientando durante toda caminhada acadêmica de maneira honrosa desde momentos durante a Graduação, muito obrigado por ter feito tanto por mim. A todo corpo docente, técnicos e colaboradores envolvidos na Pós Graduação em Ciências Mecânicas da Universidade de Brasília. Aos meus pais, João Carlos Lottermann e Elizete Taborda Lottermann, meus irmãos Muriele e Carlos Eduardo, que estiveram comigo sempre, me dando todo o apoio necessário para superar qualquer barreira. Vocês são parte fundamental de todas as minhas realizações e conquistas. Aos colegas de área acadêmica Felipe Canut e Lucas Machado, meu muito obrigado pela ajuda e dicas para o correto desenvolvimento deste trabalho e aos demais companheiros de curso que estiveram juntos durante esse período.

RESUMO

Neste trabalho, é feito um estudo sobre o processo de fabricação nomeado Trefilação, o qual é utilizado na indústria para a concepção de fios, arames e vergalhões com procedimento de deformação à frio durante conformação. O trabalho aqui é dividido em duas etapas, experimental e numérica, apresentando foco na obtenção das propriedades do material (curva de encruamento) através da dureza Brinell e simulação por elementos finitos do procedimento de trefilação real aplicado a uma empresa especializada no ramo. O objetivo é encontrar as propriedades mecânicas dos fios em cada etapa da trefilação a partir das propriedades no vergalhão antes da conformação mecânica. A principal motivação para este trabalho é a compreensão mais aprofundada do processo de trefilação e futura predição das propriedades mecânicas e qualidade do produto medidas em cada etapa. Para obtenção dos dados experimentais com agilidade e buscando comparar casos que envolvam sistemas no regime compressivo, é realizado um ensaio de dureza Brinell, sendo o mesmo modelado através de método dos elementos finitos, realizando rotina de identificação paramétrica e simulação numérica do ensaio de dureza para a determinação da marca da impressão deixada pelo perfurador no corpo de prova. Esses dados encontrados no material em seu estado inicial (vergalhão) são tidos como base para inserção no programa ABAQUS na realização da simulação do processo de trefilação, já os dados nos fios pós feira 1, 2 e 3 servirão de comparação com os resultados numéricos. Seguindo o modelo matemático viscoplástico para o caso multiaxial, considerando o critério de escoamento de von Mises e endurecimento isotrópico com efeito viscoplástico, foi criado um modelo usando o método de elementos finitos para simular o processo de trefilação, identificando os parâmetros dominantes. Utiliza-se uma modelagem com simetria de rotação em relação ao eixo longitudinal do sistema fio/feira, considerando-se uma peça de trabalho com forma cilíndrica. Este modelo permite observar, em detalhes, os fenômenos de acúmulo de tensões residuais, deformações plásticas equivalente e tensões trativas e compressivas que podem ocorrer durante a trefilação, sendo os resultados utilizados para uma investigação computacional dos parâmetros e suas influências durante o processo. Os efeitos obtidos através de elementos finitos são comparados com os experimentais (pós feira 1, 2 e 3) através de modelo também proposto neste trabalho.

ABSTRACT

In this report, a study is made on the manufacturing process named Wire Drawing, which is used in the industry for the design of wire and rebar with cold deformation during conformation. The work here is divided in two stages, experimental and numerical, presenting a focus on obtaining the properties of the material (hardening curve) through Brinell hardness and simulation by finite elements of the real drawing process applied to a company specialized in the field. The objective is to find the mechanical properties of the wires at each step of the wire drawing from properties in the rebar before the mechanical conformation. The main motivation for this report is the more in-depth understanding of the wire drawing process and future prediction of the mechanical properties and product quality measured at each stage. To obtain the experimental data with agility and seeking to compare cases involving systems in the compressive regime, a Brinell hardness test is performed, being it modeled by finite element method, performing parametric identification routine and numerical simulation of the hardness test for the determination of the imprint mark left by the punch on the specimen. The data found in the material in its initial state (rebar) are taken as the basis for insertion in the ABAQUS program in the realization of the simulation of the wire drawing process, since the data in the die post 1, 2 and 3 will serve as a comparison with the numerical results. Following the viscoplastic mathematical model for the multiaxial case, considering the von Mises flow criterion and isotropic hardening with viscoplastic effect, a model was created using the finite element method to simulate the wire drawing process, identifying the dominant parameters. A model with rotation symmetry is used with respect to the longitudinal axis of the wire/die system, considering a workpiece with a cylindrical shape. This model allows to observe, in detail, the phenomena of accumulation of residual stresses, equivalent plastic deformations and tensile and compressive stresses that can occur during wire drawing, being the results used for a computational investigation of the parameters and their influences during the process. The effects obtained through finite elements are compared with the experimental ones (post 1, 2 and 3) through a model also proposed in this report.

LISTA DE SÍMBOLOS

α_e	Semi-ângulo de entrada da feira
r	Raio da barra
L	Comprimento da região cilíndrica no centro da ferramenta
l	Comprimento de redução
p_n	Pressão normal à interface do fio
F	Força realizada para provocar o deslocamento da barra
N	Força normal
Δ	Parâmetro delta
D_0	Diâmetros inicial do fio
D_f	Diâmetros final do fio
D_m	Diâmetros médio na região de redução
σ	Tensor tensão de Cauchy
τ	Tensor tensão de Kirchhoff
Φ	Função de escoamento do material
p	Tensão hidrostática
α	Conjunto de variáveis internas associadas ao endurecimento do material
I	Tensor identidade de segunda ordem
$J_{1,2,3}$	Primeiro, segundo e terceiro invariantes do tensor tensão desviador
$\mathbf{I}_{1,2,3}$	Primeiro, segundo e terceiro invariantes do tensor tensão
ψ	Tensão de energia elástica armazenada
G	Constante de Lamé/Módulo de cisalhamento
\mathbf{S}	Tensor das tensões desviadoras
K	Constante de Lamé/Módulo volumétrico
q	Tensão equivalente de von Mises
ϕ	Ângulo de atrito interno ou o ângulo de atrito
p	Pressão hidrostática de Cauchy ou Kirchhoff
$\sigma_{1,2,3}$	Tensões principais
η	Parâmetro do material
a, b, c	Constantes materiais
ξ	Coordenadas isoparamétricas de um elemento finito
ϵ^p	Tensor deformação plástico
ϵ^e	Tensor deformação elástico
ϵ^{vp}	Tensor deformação viscoplástico
$\bar{\epsilon}^p$	Tensor deformação plástica acumulada
$\bar{\epsilon}^{vp}$	Tensor deformação viscoplástico equivalente

$\dot{\bar{\epsilon}}^p$	Taxa de evolução da deformação plástica acumulada
$\dot{\epsilon}^p$	Taxa de evolução da deformação plástica
σ_y	Lei de endurecimento plástico do material
σ_{y0}	Limite de escoamento inicial
H	Módulo de endurecimento isotrópico
E	Módulo de Young/Elasticidade
$\dot{\gamma}$	Multiplicador plástico
σ_{eq}	Tensão equivalente
σ_{eq}^G	Tensão equivalente de Gao et al. (2011)
N	Vetor de fluxo plástico
λ	Uma das constantes Lamé da elasticidade linear; alongamento axial; fator de carga no carregamento proporcional
$\Delta\epsilon$	Incremento de deformação
ϵ_{n+1}^{eT}	Tensor deformação elástico tentativa
t_n	Pseudo-tempo
\mathbb{D}^e	Tensor elástico isotrópico
$\bar{\epsilon}^{vpT}$	Tensor deformação viscoplástico equivalente tentativa
σ_{n+1}^T	Tensor das tensões tentativas
S_{n+1}^T	Tensor das tensões desviadoras tentativa
R_*	Equação residual
k	Módulo volumétrico do material
φ_A	Deformação verdadeira
α_{otimo}	Semiângulo ótimo
k_{fm}	Tensão de escoamento média
μ_C	Atrito de Coulomb
A_1	Área final do fio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO ASSUNTO	1
1.2	OBJETIVO	4
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	PROCESSO DE TREFILAÇÃO	6
2.1.1	TREFILAÇÃO COMBINADA	7
2.1.2	PARÂMETROS DA TREFILAÇÃO	8
2.2	TENSÕES RESIDUAIS	11
2.2.1	TENSÕES RESIDUAIS NA TREFILAÇÃO	12
2.3	CONCEITOS DE VISCOPLASTICIDADE	13
2.3.1	CRITÉRIO DE ESCOAMENTO	15
2.3.2	LEI DE FLUXO VISCOPLÁSTICO	23
2.3.3	LEI DE ENCRUAMENTO	26
2.4	MODELO MATEMÁTICO VISCOPLÁSTICO	29
2.5	MODELO NUMÉRICO VISCOPLÁSTICO	31
2.6	ALGORITMO DE ATUALIZAÇÃO	32
2.7	MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	34
2.8	MÉTODO DE OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS MATERIAIS	36
2.8.1	MÉTODO DA SEÇÃO ÁUREA	37
3	ANÁLISE EXPERIMENTAL	39
3.1	ENSAIO DE DUREZA	39
3.1.1	CORPO DE PROVA	39
3.1.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	42
3.2	IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MATERIAL	44
4	ANÁLISE NUMÉRICA	50
4.1	GEOMETRIA DO PROBLEMA E MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	50
4.1.1	GEOMETRIA DO FIO/FIEIRA	51
4.1.2	MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	52
4.2	RESULTADOS NUMÉRICOS	55
4.2.1	DESCRIÇÃO DO CAMPO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	55
4.2.2	DESCRIÇÃO DO CAMPO DE TENSÃO EQUIVALENTE	58
4.2.3	DESCRIÇÃO DO CAMPO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA RESIDUAL	60

4.2.4	DESCRIÇÃO DO CAMPO DE TENSÃO EQUIVALENTE PÓS TREFILAÇÃO ...	63
4.2.5	DESCRIÇÃO DO CAMPO DE TENSÃO RESIDUAL	66
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	71
5.1	COMPARAÇÃO NUMÉRICO x EXPERIMENTAL	71
5.1.1	TENSÃO DE ESCOAMENTO INICIAL	72
5.1.2	TENSÃO EQUIVALENTE.....	73
5.1.3	TENSÃO RESIDUAL	75
6	CONCLUSÕES	78
6.1	TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
	APÊNDICES.....	84
I.1	ROTINA DE OTIMIZAÇÃO - PARFINDER.M	85
I.2	MODELO DE SIMULAÇÃO - DUREZA.PY.....	94
I.3	POS PROCESSAMENTO - POSPROCESS.PY	99
I.4	MODELO DE SIMULAÇÃO - TREFILACAO.PY	103

LISTA DE FIGURAS

1.1	Evolução da demanda da energia e da taxa de crescimento econômico brasileiro estimado [Energética 2007].	1
1.2	Rede de transmissão do Brasil [(ONS) 2015].	2
1.3	Processo de trefilação com várias reduções.	3
2.1	Fio/fieira estudado.	6
2.2	Principais etapas do processo de trefilação combinada [Metz, Santos e Rocha 2007].	7
2.3	Parâmetro Δ na trefilação.	10
2.4	Curva tensão x deformação típica.	11
2.5	Exemplo de Tensões Residuais provenientes do processo de trefilação.	12
2.6	Ensaio de tração uniaxial em alta temperatura. Dependência da taxa de deformação [Neto, Peric e Owen 2008].	14
2.7	Gráfico para visualização de testes uniaxiais em diferentes taxas de deformação, Fluência [Neto, Peric e Owen 2008].	14
2.8	Fluxo plástico em tensão constante, Alongamento. Decaimento da tensão em função do tempo [Neto, Peric e Owen 2008].	15
2.9	Representação gráfica das superfícies de escoamento considerando Tresca.	16
2.10	Representação do plano Π na superfície de escoamento considerando Tresca.	17
2.11	Representação gráfica da superfície de escoamento considerando von Mises.	19
2.12	Representação do plano π na superfície de escoamento considerando von Mises.	19
2.13	Representação do círculo de Mohr [Neto, Peric e Owen 2008].	20
2.14	Delimitação do critério de Mohr-Coulomb no espaço das tensões principais.	21
2.15	Representação de Drucker-Prager, no espaço das tensões principais.	22
2.16	Comparação das superfícies de escoamento no plano das tensões principais dos modelos de von Mises e Gao et al [Cavalheiro].	23
2.17	Gráfico tensão versus deformação considerando a taxa de deformação para um mesmo material [KIM T.H. 1997].	24
2.18	Vetor de fluxo N considerando plasticidade associativa para a superfície de escoamento de von Mises no espaço das tensões principais (esquerda) e no plano π (direita) [Neto, Peric e Owen 2008].	25
2.19	Representação do endurecimento ideal [Neto, Peric e Owen 2008].	27
2.20	Representação do endurecimento isotrópico [Neto, Peric e Owen 2008].	28
2.21	Representação do endurecimento cinemático [Neto, Peric e Owen 2008].	29
3.1	Corpos de prova provenientes de linha de produção da indústria especializada.	40
3.2	Corpo de prova após corte e procedimento de acabamento superficial utilizando lixas.	40
3.3	Máquina Zwick/Roell ZHU250 utilizada para o ensaio de dureza.	41

3.4	Corpos de prova pós teste, exemplo com diâmetro inicial - 9,53mm.	41
3.5	Exemplo de montagem da simulação do teste de dureza Brinell - 3D.	42
3.6	Modelo axissimétrico do ensaio de dureza.	43
3.7	Representação da malha ao corpo de prova axissimétrico.	43
3.8	Processo de otimização seguido para parametrização.	45
3.9	Curva de reação resultante do processo de otimização em comparação com os dados experimentais estimados a partir do ensaio de dureza (material estado inicial).	46
3.10	Curva de encruamento do vergalhão em seu estado original.	47
3.11	Curva de reação resultante do processo de otimização em comparação com os dados experimentais estimados a partir do ensaio de dureza pós feira 1.	47
3.12	Curva de reação resultante do processo de otimização em comparação com os dados experimentais estimados a partir do ensaio de dureza pós feira 2.	48
3.13	Curva de reação resultante do processo de otimização em comparação com os dados experimentais estimados a partir do ensaio de dureza pós feira 3.	48
3.14	Curvas de encruamento geradas a partir de dados experimentais pós feira 1, 2 e 3..	49
4.1	Eixos de referência utilizado na barra.	50
4.2	Condições de contorno e pontos de referência para aplicação de deslocamentos.	51
4.3	a) Ambiente Abaqus com modelo geométrico definido para simulação. b) Geometria definida para a feira. c) Geometria definida para a barra.	52
4.4	Modelo bidimensional axissimétrico com dimensões em milímetros e graus.	52
4.5	Caminho definido para tomada de resultados e análise da malha de elementos finitos.	53
4.6	Gráfico Deformação Plástica Equivalente (PEEQ) versus Distância ao longo do caminho pós feira 2.	54
4.7	Gráfico Tensão von Mises (S) versus Distância ao longo do caminho pós feira 2. ..	54
4.8	Descrição do campo de deformação na barra pós feiras 1.	56
4.9	Descrição do campo de deformação na barra pós feiras 2.	56
4.10	Descrição do campo de deformação na barra pós feiras 3.	57
4.11	Descrição do campo de deformação na barra pós feiras 1, 2 e 3.	57
4.12	Descrição do campo de tensão na barra pós feiras 1.	58
4.13	Descrição do campo de tensão na barra pós feiras 2.	59
4.14	Descrição do campo de tensão na barra pós feiras 3.	59
4.15	Descrição do campo de tensão na barra pós feiras 1, 2 e 3.	60
4.16	Descrição do campo de deformação na barra após o alívio das feiras 1, 2 e 3.	61
4.17	Média das tensões calculadas a partir da deformação plástica equivalente pós feira 1, 2 e 3.	62
4.18	Curva de encruamento na barra pós feiras 1, 2 e 3 considerando a média das tensões calculadas a partir da deformação plástica equivalente.	63
4.19	Descrição do campo de tensão equivalente (von Mises - "S") na barra pós feiras 1, 2 e 3.	64

4.20	Média das tensões equivalente ao longo da barra pós feiras 1, 2 e 3 assim que finalizado o processo de trefilação.....	65
4.21	Curva de encruamento na barra pós feiras 1, 2 e 3 considerando a tensão equivalente média pós processo de trefilação.....	66
4.22	Descrição do campo de tensão residual na componente "Y" da barra pós feiras 1, 2 e 3.....	67
4.23	Média das tensões na componente Y pós feiras 1, 2 e 3.....	68
4.24	Curva de encruamento na barra pós feiras 1, 2 e 3 considerando a tensão residual média na componente Y.....	69
4.25	Comportamento das tensões residuais ao longo do fio pós feira 1, 2 e 3 considerando eixo axial "Y".	70
5.1	Comparação da curva de encruamento numérica versus experimental pós feira 1... ..	72
5.2	Comparação da curva de encruamento numérica versus experimental pós feira 2... ..	72
5.3	Comparação da curva de encruamento numérica versus experimental pós feira 3... ..	73
5.4	Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões equivalentes) versus experimental pós feira 1.....	74
5.5	Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões equivalentes) versus experimental pós feira 2.....	74
5.6	Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões equivalentes) versus experimental pós feira 3.....	75
5.7	Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões residuais) versus experimental pós feira 1.....	76
5.8	Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões residuais) versus experimental pós feira 2.....	76
5.9	Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões residuais) versus experimental pós feira 3.....	77

LISTA DE TABELAS

3.1	Condições de Teste e Recomendações de Intervalo de Dureza para penetrador com $D = 2,5\text{mm}$ [Highway et al. 2004].	41
3.2	Resultados de dureza Brinell e altura da calota para cada material e força aplicada.	42
3.3	Propriedades mecânicas obtidas com processo de otimização via ensaio de dureza para material em seu estado inicial.	46
3.4	Propriedades mecânicas obtidas com processo de otimização via ensaio de dureza para material estudado em cada etapa do processo.	49
4.1	Características de cada malha simulada.	55
4.2	Resultados para o campo de Deformação Plástica Equivalente.	58
4.3	Resultados para o campo de Tensão	60
4.4	Resultados para o campo de Deformação Plástica Equivalente Residual.	61
4.5	Média das tensões encontradas utilizando-se das deformações plásticas ao longo do caminho.	62
4.6	Resultados para o campo de Tensões Equivalentes pós trefilação considerando von Mises.	64
4.7	Média das tensões equivalentes encontradas numericamente através de elementos finitos.	65
4.8	Resultados para o campo de Tensões Residuais	68
4.9	Média das tensões encontradas numericamente através de elementos finitos.	68
4.10	Média das tensões encontradas numericamente através de elementos finitos.	69
5.1	Resultados encontrados numericamente e experimentalmente.	71

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo fazer a introdução e contextualização do assunto principal deste trabalho. Apresenta de forma clara os objetivos que busca alcançar durante o desenvolvimento das metodologias aqui aplicadas além de fazer uma breve exposição da estrutura do trabalho com uma pequena descrição de cada capítulo.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ASSUNTO

O desenvolvimento social e econômico de uma nação tem alta ligação com a expansão do setor elétrico, o que torna este fator e suas diversas aplicações indispensáveis à sociedade atual. O progresso de uma região é acompanhado pelo aumento na demanda por eletricidade, tanto pelos fornecedores, que necessitam de mais energia para poderem produzir, quanto por parte dos consumidores, que adquirem mais produtos como eletrodomésticos e eletroeletrônicos. Este crescimento no consumo implica na expansão da oferta e torna necessário o investimento em infraestrutura, que carece de ainda mais energia. [Pêgo e Neto 2008]

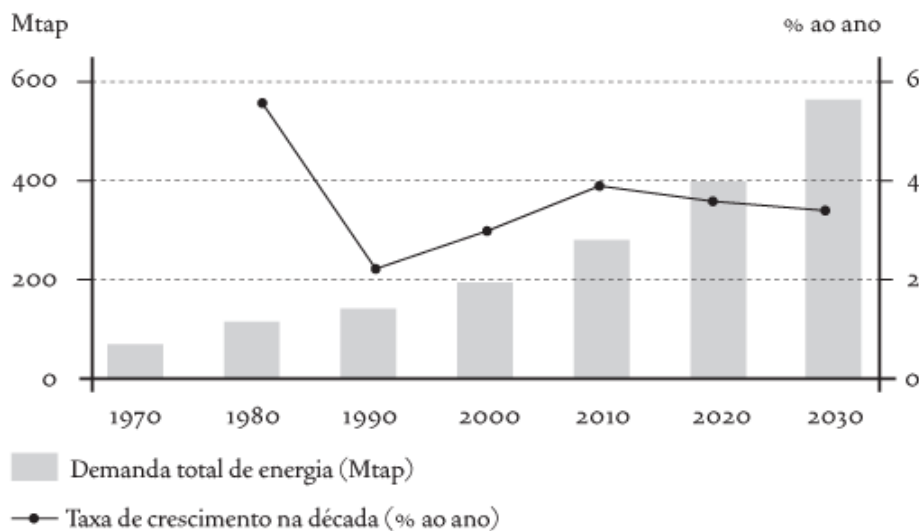


Figura 1.1: Evolução da demanda da energia e da taxa de crescimento econômico brasileiro estimado [Energética 2007].

Assim como mostrado na Figura 1.1, vem crescendo o consumo de energia elétrica que representa um dos indicadores de crescimento de uma nação. Para que haja o suprimento energético no país, procura-se aumentar a geração da energia através de diversas fontes. Porém, não basta gerar energia sem que faça a entrega desta aos consumidores. Linhas de transmissão e de distribuição têm este propósito.

Para enfrentar esse desafio e aproveitar essa oportunidade, é necessário orientar e catalisar esforços de investidores, empreendedores e consumidores do setor energético, visando uma adequada interação entre esses setores. Nesse sentido, é fundamental a contribuição das instituições de pesquisa, antecipando as situações, mapeando as alternativas, sugerindo estratégias, enfim, propondo soluções aos problemas gerados pela demanda.

As linhas de transmissão de energia aérea, assim como as demais partes do sistema de energia, necessitam de grandes investimentos, sendo que as especialistas e atuantes no mercado, portanto, as donas desses empreendimentos, as que mais buscam métodos para a redução dos custos. O objetivo principal é a obtenção de um custo mínimo com valores competitivos de mercado, sem fugir das normas que devem ser seguidas e mantendo uma boa qualidade do serviço.

Em um projeto de linha de rede aérea, um dos principais elementos são os cabos condutores. Estes influenciam vários outros aspectos do projeto, tais como estruturas, fundações e fixações dos cabos nas estruturas [Brasil 2008]. Sendo este um dos elementos de maior impacto financeiro no projeto, buscar-se-á prever o comportamento do material na fabricação dos cabos condutores com o objetivo de prever alguma futura falha evitando acidentes indesejáveis.

Além do custo ser alto, a rede de transmissão de energia elétrica no Brasil é de 107,4 mil quilômetros de extensão – distância equivalente a mais de duas vezes e meia a circunferência da Terra. A grande extensão do sistema brasileiro (Figura 1.2) se explica pela dimensão continental do País e pelas características de sua evolução, com as maiores e mais importantes usinas hidrelétricas localizadas a distâncias consideráveis dos centros consumidores [Brasil 2014].

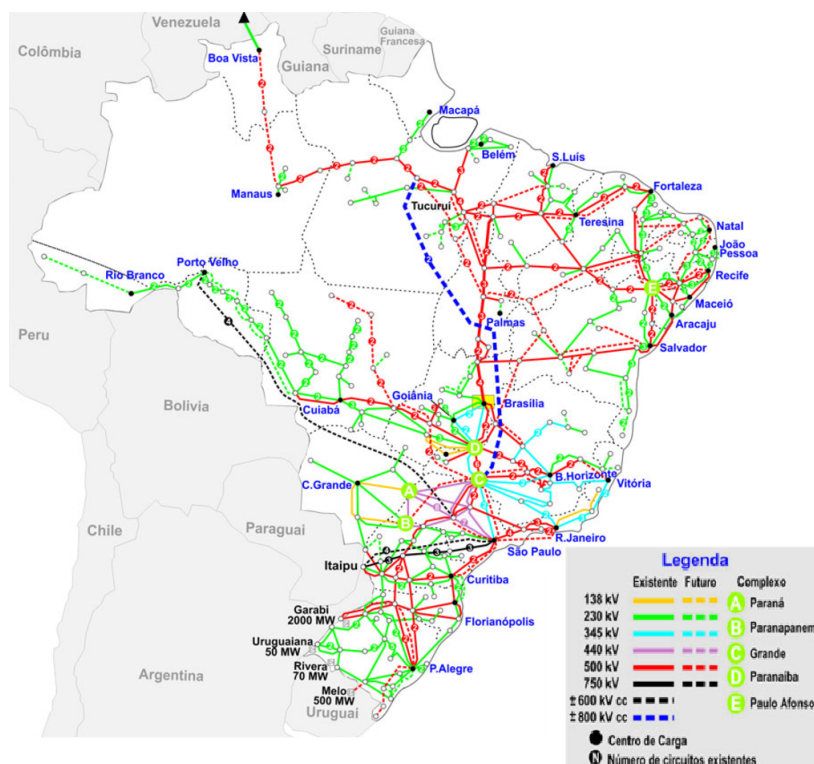


Figura 1.2: Rede de transmissão do Brasil [(ONS) 2015].

Partindo da motivação apresentada pelos pontos citados acima, buscou-se estudar o fenômeno da conformação mecânica de materiais utilizado para a fabricação de fios (elemento de estudo), arames e barras cilíndricas ou tubulares que são altamente utilizados em cabos condutores de alta tensão para a transmissão de energia elétrica. O estudo realizado no processo de fabricação de fios condutores (trefilação) torna-se fundamental para um aumento produtivo considerando uma boa qualidade e predição das propriedades mecânicas do material durante e pós processo de conformação.

Quando um material é transformado por deformação plástica, como é o caso do processo de trefilação (Figura 1.3), originam-se tensões residuais, que podem alterar dimensões, propriedades mecânicas e o comportamento do material em distorção, algumas vezes podendo levar a falhas catastróficas de um componente em serviço. As tensões residuais também interferem em etapas posteriores ao processo de fabricação de um determinado componente, tendo em vista que a cada etapa ocorre uma redistribuição dessas tensões, como resultado dos carregamentos mecânicos, térmicos e de transformações metalúrgicas.



Figura 1.3: Processo de trefilação com várias reduções.

A utilização do método de elementos finitos como ferramenta de análise e otimização de processos de conformação mecânica, incluindo análise de tensões residuais, é importante para a indústria devido à redução de custos e aumento da qualidade na execução e no desenvolvimento de novos produtos em menos tempo, bem como no aumento do "know-how", auxílio em treinamentos e aumento na eficácia dos produtos [Löhe et al. 2003][Tekkaya 2000][Arbak et al.].

Este trabalho surge como parte de um projeto de pesquisa do Grupo de Fadiga Fratura e Materiais - GFFM. O projeto de pesquisa tem como principal objetivo constatar as propriedades mecânicas do material em cada etapa da trefilação, ou seja, em cada redução de diâmetro busca-se encontrar a curva de encruamento fazendo comparações entre resultado numérico e experimental para enfim poder avaliar se o material obtido como produto é apto às exigências mecânicas solicitadas.

No primeiro momento é encontrado as propriedade do material antes de se iniciar o processo

de trefilação para que enfim se inicie a simulação numérica com a inserção dessas propriedades em seu estado inicial.

Para realizar a simulação do processo de trefilação, desenvolveu-se uma rotina (UMAT) compilada utilizando o pacote comercial de elementos finitos dentro da plataforma ABAQUS/CAE 6.14-1, com licença disponível dentro do laboratório GFFM. O programa de elementos finitos em questão soluciona problemas planos, axissimétricos e 3D, considerando modelos constitutivos viscoplásticos em pequenas e grandes deformações. Supõe-se que os processos de conformação se deem por meio de um carregamento monotônico, o que incentiva o uso de regras de endurecimento isotrópico, não necessitando o emprego de uma lei de endurecimento cinemático.

Existem diversos modelos de viscoplasticidade, Bingham, Perzyna, Norton, Lemaitre-Chaboche sendo que neste trabalho, é empregado o modelo viscoplástico com equações constitutivas baseadas em von Mises com endurecimento isotrópico e lei de fluxo proposta por Perić (1993). Ao longo do trabalho são discutidas as particularidades de alguns dos mais comuns modelos viscoplásticos existentes.

1.2 OBJETIVO

Diante do exposto acima, é proposto um modelo de estudo baseado na formulação matemática envolvendo a viscoplasticidade com endurecimento isotrópico para a devida previsão dos fenômenos presentes durante e após o processo de trefilação. É utilizada modelagem computacional através de elementos finitos fazendo a utilização do programa ABAQUS/CAE 6.14-1 como ferramenta de análise.

Inicialmente, antes da simulação do processo de trefilação, busca-se a determinação da curva de encruamento do material Al 1120 em seu estado inicial através de um ensaio de dureza, utilizando uma rotina de identificação paramétrica baseada em métodos numéricos associados. Com este intuito, busca-se realizar a comunicação entre a rotina de otimização, construída em MatLab, e a simulação do ensaio de dureza em elementos finitos, no ABAQUS. Para que se tenha dados a serem comparados com os resultados numéricos, foram encontradas as propriedades mecânicas para cada etapa da trefilação utilizando-se do mesmo método experimental abordado acima.

As propriedades mecânicas encontradas para o material em sua forma original, são inseridas dentro do programa do ABAQUS para que se inicie a simulação do processo de trefilação. A validação da simulação é realizada baseando-se em trabalhos prévios paramétricos onde foram mapeadas as principais variáveis da trefilação e seu comportamento.

Como resultado final, é feito um comparativo entre os dados encontrados nos procedimentos numérico e experimental, identificando os parâmetros dominantes e quantificando as variações entre os resultados buscando dar uma explicação aos fenômenos encontrados.

Além de todo o estudo realizado, o material aqui deixado servirá de base e continuidade para

outros trabalhos que tendem a aprofundar os estudos para otimização do processo de fabricação em destaque.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Buscando manter a organização e um bom entendimento do que será apresentado, a estrutura deste trabalho é dividida em capítulos descritos a seguir:

- Capítulo 2, será apresentada uma breve revisão bibliográfica, buscando-se de conceitos em referências renomadas no assunto exposto nessa dissertação. É explanado sobre trefilação e suas derivações sendo apresentado os parâmetros que interferem no processo de fabricação. É feita também uma abordagem sobre o assunto de tensões residuais inclusive dentro da trefilação. Os conceitos de viscoplasticidade são apresentados a partir a seção 2.3, já na seção 2.4 é mostrado o modelo matemático viscoplástico utilizado como referência nessa dissertação. Para finalizar o assunto do capítulo, será apresentado o modelo numérico viscoplástico adotado neste trabalho, mostrando o algoritmo de atualização e a solução resumida dos sistemas de equações não lineares utilizando o método de Newton-Raphson.
- Capítulo 3 aborda sobre a determinação dos parâmetros de encruamento obtida por meio de ensaio de dureza. Neste, estão contidas as características do corpo de prova, procedimentos de testes e os dados experimentais. Apresenta de maneira clara os resultados dos ensaios experimentais em corpos de prova retirados de linha de fabricação na indústria especializada em seu estado inicial, pós fieira 1, 2 e 3. Mostra os resultados em forma de tabelas e gráficos retirados das análises em todos os casos.
- Capítulo 4 será mostrado os passos realizados para promoção das simulações do modelo teórico, apresentando os resultados provenientes das simulações no ambiente ABAQUS/CAE 6.14-1 pelo método de elementos finitos. Promove a geração das curvas de encruamento a partir dos resultados obtidos após o término da simulação.
- Capítulo 5 apresenta a comparação entre os resultados fornecidos via experimento (ensaio de dureza Brinell) e método de elementos finitos através do programa ABAQUS. Exibe uma discussão após ser feito o confronto entre os resultados obtidos ao longo do trabalho mostrando os pontos positivos e negativos do modelo empregado.
- Capítulo 6, são expostas as conclusões, enfatizando os principais resultados, deficiência e observações do presente trabalho, também sendo propostas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE TREFILAÇÃO

Trefilação é um processo realizado em metais para fabricação de barras, arames e tubos em que uma força trativa faz com que uma barra, um arame ou um tubo de metal, normalmente com uma geometria circular, atravesse uma ferramenta cônica (denominada fieira), feita de um material duro causando redução de diâmetro [Dieter 1967]. A trefilação é utilizada como método de produção de fios há cerca de 1200 anos, existindo evidências de sua existência desde o início da utilização de metais como ouro e prata [Newbury e Notis 2004].

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. No centro da fieira há uma zona cilíndrica (medida L da Figura 2.1), 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 e Bacon 1988].

A Figura 2.1 representa, esquematicamente, o processo de redução da seção transversal do arame, sob uma perspectiva em corte no centro do sistema. A medida α_e e α_s mostrada na Figura 2.1 representam o semi-ângulo de entrada e saída da fieira respectivamente, 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].

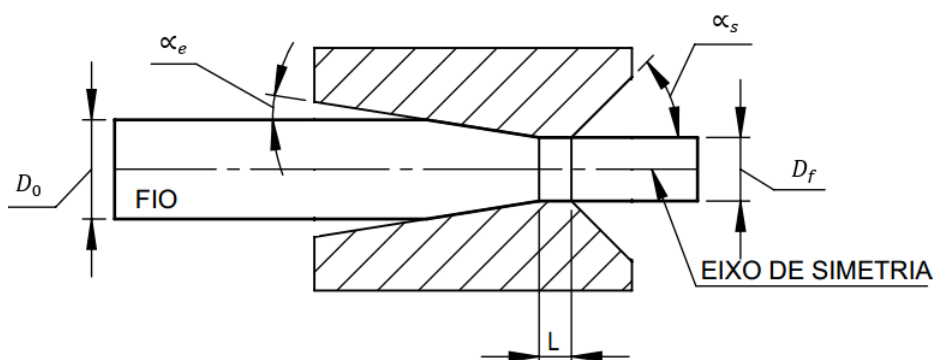


Figura 2.1: Fio/fieira estudado.

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 [KIM T.H. 1997].

Segundo Chin e Steif [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 [Cristescu 1980], a predição de fratura do arame através de modelo elasto-plástico, 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, Huh e Lee 2013], tipos de defeitos apresentados no material antes e durante a redução [Magalhães et al. 2012], estudo do desgaste da ferramenta [KIM T.H. 1997], entre outros.

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

2.1.1 Trefilação Combinada

É um processo geralmente multi-passes (combinada), isto é, o fio (matéria-prima que é transformada pelo processo) sofre várias reduções de seção, passando por várias fieiras em sequência. A trefilação combinada foi desenvolvida com base em análises empíricas de fabricantes europeus e japoneses [Neves et al. 2003] de empresas produtoras de barras trefiladas para componentes automotivos. O processo de trefilação combinada é apresentado esquematicamente na Figura 2.2 e exemplificado logo abaixo.

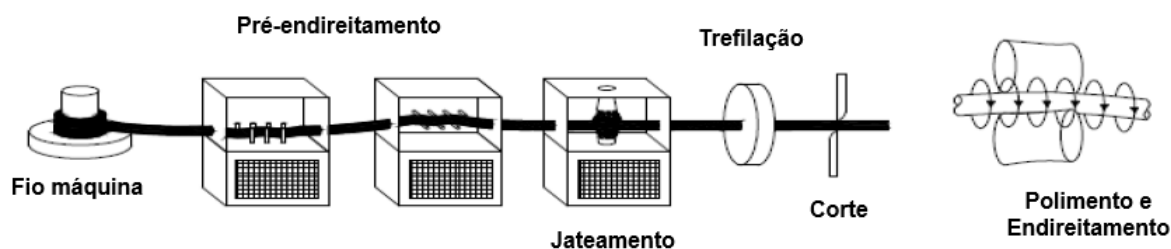


Figura 2.2: Principais etapas do processo de trefilação combinada [Metz, Santos e Rocha 2007].

- Pré-endireitamento

O processo de pré-endireitamento consiste na passagem da barra por rolos dispostos na posição horizontal vertical, com o objetivo de retirar a curvatura causada pela laminação a quente e pelo desbobinamento das barras. Apesar de ter sido pouco estudada, esta etapa tem extrema importância na qualidade do produto final, em função das deformações iniciais envolvidas no

processo de enrolamento [Nastran e Kuzman 2002].

- Jateamento

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

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

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

- Trefilação

Consiste no processo de Trefilação propriamente dito, o qual já foi discutido no tópico 2.1 por ser o objeto de estudo deste trabalho.

A deformação é alcançada através da combinação de tensões trativas e compressivas, que são criadas pela força de tração na saída da fieira e pela geometria da mesma. Considerando as tensões principais representadas por σ_1 , σ_2 e σ_3 , podem ser utilizados diferentes critérios de falha [Akikazu, Takaki e Maszuri 2001] e [Wang e Gong 2002]. O escoamento de um metal é determinado pela movimentação entre os grãos da microestrutura o que é regido pelas tensões cisalhantes. Portanto, o início da deformação plástica pode ser determinado pela tensão máxima cisalhante baseada no critério determinado para solução do problema.

- Endireitamento

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

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

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

2.1.2 Parâmetros da Trefilação

O estudo da trefilação tem aumentado consideravelmente, um grande esforço tem sido feito para entender quais as consequências das variações de alguns parâmetros da trefilação nas pro-

priedades do material (fio) quando o mesmo passa pela fieira, para evitar a fratura do material durante o processo e para otimizar a geometria da fieira. Parâmetros como a força de trefilação, a lubrificação, a temperatura, a transferência de calor e a curva de escoamento, entre outros, tem sido muito investigados. Entretanto, a ciência da trefilação está longe de controlar todas as variáveis do processo [Filho 1976] e , [Altan e Vazquez 1996].

- Força de extrusão

A força de extrusão é a responsável por fazer o material atravessar a fieira executando o processo de trefilação. É um parâmetro básico do processo que tem uma forte relação com a porcentagem de redução do material, quanto maior é a redução, maior a força necessária. Existe um limite máximo de porcentagem de redução que depende das características da máquina, das propriedades do material e da qualidade da lubrificação. Na prática, a máxima redução de área por passe de trefilação está na margem entre 30-35% [KIM T.H. 1997].

Uma das formas mais tradicionais de se relacionar matematicamente a força trativa que provoca o deslocamento da barra dentro da fieira é expressa pela equação de Siebel [Siebel 1947], que calcula a força de tração necessária para que a barra atravesse a fieira:

$$F = A_1 \varphi_A k_{fm} \left(1 + \frac{\mu_C}{\alpha_e} + \frac{2}{3} + \frac{\alpha_e}{\varphi_A} \right) \quad (2.1)$$

Onde: k_{fm} é a tensão de escoamento média, φ_A é a deformação verdadeira em área do material, μ_C é o coeficiente de atrito, α_e é o semi-ângulo de entrada da fieira e A_1 é a área final da barra.

- Ângulo de fieira

O ângulo da fieira será relacionado com o percentual de redução de área do fio pelo qual a força trativa necessária para que a barra atravesse a fieira será mínima [Vega, Haddi e Imad 2009].

É de interesse encontrar o ângulo de fieira que minimiza a força de trefilação, denominado semiângulo ótimo (α_{otimo}), permitindo redução com os gastos de energia, os valores das tensões envolvidas e o risco de rompimentos da barra. Para isso, deriva-se a Equação 2.1 em função do ângulo ótimo e iguala-se a zero, o que indicará matematicamente o ponto em que o trabalho realizado pela força de atrito e o trabalho realizado pela força de trabalho redundante são iguais, chegando a Equação 2.2, deduzida a seguir [Norasethasopon e Yoshida 2006].

$$\alpha_{otimo} = \sqrt{\varphi_A \frac{3}{2} \mu_C} \quad (2.2)$$

- Parâmetro Δ

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

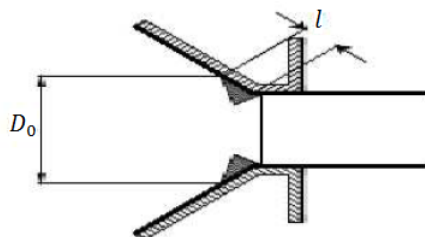


Figura 2.3: Parâmetro Δ na trefilação.

$$\Delta = \frac{\text{sen}\alpha_e(1 + \sqrt{1-r})^2}{r} \quad (2.3)$$

onde α_e é o semi-ângulo de entrada da feira, e r o raio da barra.

Um valor de Δ menor sugere uma longa zona de deformação e aumenta o contato com a feira [Totten 2002]. Isto resulta atrito em excesso durante a trefilação e conseqüentemente geração de calor necessitando boa lubrificação e um menor coeficiente de atrito. Em compensação, estes valores menores possibilitam uma redução nos esforços para a feira e maior durabilidade, além de diminuir o trabalho redundante e excesso de tensão no centro do material prevenindo defeitos internos. Diversos projetos comerciais de feira sugerem o parâmetro delta próximo a 3 para minimizar as tensões de trefilação[Totten 2002].

- Curva de encruamento

Outro importante fator de influência no processo de trefilação é a curva de encruamento do material, ou seja, a forma como o material se comporta na presença de deformações plásticas irreversíveis.

Todo objeto metálico quando submetido a algum esforço sofre deformação. Ele pode retornar às dimensões originais após a retirada do esforço ou não recuperar suas dimensões originais, sofrendo uma deformação irreversível. No primeiro caso, diz-se que o objeto sofreu uma deformação elástica e no segundo, uma deformação plástica. Na Figura 2.4 é apresentado uma curva tensão x deformação típica para um material dúctil.

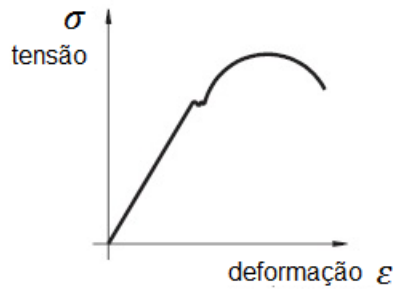


Figura 2.4: Curva tensão x deformação típica.

A região elástica é descrita matematicamente pela lei de Hooke generalizada, equação 2.4.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbb{D} : \boldsymbol{\varepsilon}^e = \mathbb{D} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}) \quad (2.4)$$

onde $\boldsymbol{\sigma}$ expressa o tensor tensão de Cauchy, \mathbb{D} o tensor constitutivo da matriz elástica do material, $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ a parcela elástica do tensor das deformações, $\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$ a parcela viscoplástica do tensor das deformações e $\boldsymbol{\varepsilon}$ o tensor das deformações.

- Atrito

Atrito é a resistência ao movimento das superfícies de dois corpos em contato, durante o deslizamento de um sobre o outro [Handbook 1988]. O atrito influencia significativamente a deformação do material [Avitzur 1968], alterando os valores de forças e desgaste na relação ferramenta-peça.

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

2.2 TENSÕES RESIDUAIS

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

No caso estudado, trefilação de barras, por não haver grandes mudanças de temperatura, o fator mais importante no surgimento das tensões residuais são as grandes deformações que o material sofre. Pois o perfil das tensões residuais é basicamente uma resposta à profundidade da conformação exercida. Quando a mesma é superficial (para baixas reduções), as tensões são compressivas na superfície e trativas no interior, no entanto este perfil pode ser invertido dependendo do nível de redução (Figura 2.5) [Metz 2007] [Cheng e Finnie 2007].

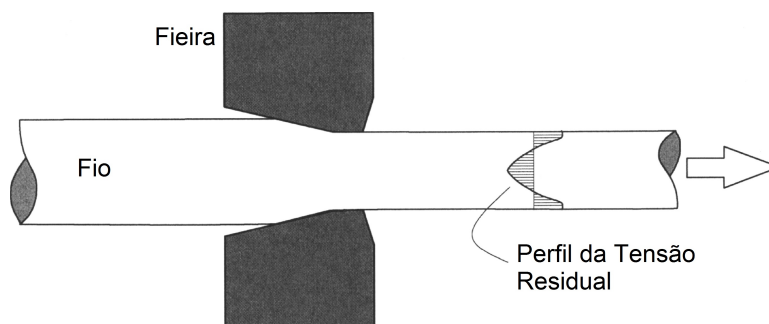


Figura 2.5: Exemplo de Tensões Residuais provenientes do processo de trefilação.

Não são muito bem conhecidos os efeitos das tensões residuais, o que normalmente se percebe são conseqüências de sua presença: fraturas devidas a corrosão a baixa tensão, inexatidões dimensionais, fratura, empenamento, onde as tensões residuais aparecem em quase todos os materiais e se somam ao estado de tensões produzido por forças externas [Atienza e Elices 2003]. Apesar de muitas vezes a presença de tensões residuais ser negativa e desejar-se sua eliminação, em alguns casos elas são desejadas e introduzidas propositalmente nos materiais [Wang e Gong 2002]. Uma tensão de compressão na superfície pode ser benéfica para o comportamento em fadiga e pode atrasar a velocidade de propagação de fissuras superficiais. Por exemplo, introduzir tensões superficiais de compressão é o objetivo principal do jateamento superficial [Lu 1996] [Kennedy, Vahey e Hanney 2005].

2.2.1 Tensões Residuais na Trefilação

Dependendo da quantidade de redução, podem ser encontrados dois tipos distintos de distribuição das tensões residuais nas barras trefiladas. Para reduções por passes inferiores a 1%, as tensões residuais longitudinais são compressivas na superfície e trativas no eixo e as tensões radiais são trativas no eixo e aproximam-se de zero na superfície, enquanto que as tensões tangenciais seguem a mesma tendência das tensões residuais axiais [Atienza e Elices 2003]. Para reduções maiores, de significância comercial, a distribuição de tensões é o inverso do explicado anteriormente. Neste caso as tensões axiais são trativas na superfície e compressivas no centro da barra, as tensões radiais são compressivas no eixo e as tensões tangenciais seguem o comportamento das axiais.

No caso das tensões serem trativas na superfície, isso pode ser prejudicial para a vida em fadiga. As análises realizadas com modelos de simetria axial apresentaram tensões residuais

trativas na superfície e compressivas no núcleo para deformações da ordem de 20% em fios de diâmetro de 20 mm. Recentemente foram realizados estudos comparando a geometria usual de feira com o formato cônico e seu efeito nas tensões residuais em barras de aço [Metz 2007].

Pode-se distinguir basicamente 3 tipos de tensões residuais. As de primeira ordem, macroscópicas, de fácil medição, que podem se estender por diversos grãos do material. As de segunda ordem, microscópicas, também conhecidas como microtensões estruturais, encontram-se na distância de um grão ou parte dele. As de terceira ordem são encontradas em nível atômico em apenas uma pequena parte do grão [Walton 2002].

2.3 CONCEITOS DE VISCOPLASTICIDADE

As teorias constitutivas elastoplásticas comuns são classificados como independente de taxa ou independente do tempo, isto é, a resposta do material é considerada como independente da taxa de aplicação de cargas e/ou a escala de tempo dos problemas considerados. O tempo é usado unicamente para descrever a sequência de eventos que define o histórico de carregamentos. Para tais teorias, soluções idênticas são produzidas quando uma determinada carga (ou sequência de cargas) é aplicada a taxas diferentes.

No entanto, o comportamento observado dos materiais reais é geralmente dependente do tempo, isto é, a resposta à tensão sempre depende da taxa de carregamento e/ou a escala de tempo considerado. A extensão de tal dependência pode ou não ser significativa de acordo com as condições físicas do problema. Em situações em que as taxas de carregamento e/ou a escala de tempo da análise permanecem dentro de uma gama em que o fenômeno dependente do tempo pode ser negligenciado, modelos de elastoplasticidade independentes da taxa podem fornecer boas descrições do comportamento do material [Lemaitre e Chaboche 1990],[Oliver et al. 1990], [Skrzypek 1993]. Se essas condições não forem satisfeitas, então previsões precisas só podem ser obtidas se a taxa de dependência está adequadamente explicada pelo modelo constitutivo. Efeitos com dependência de taxas são descritos por meio dos chamados modelos de viscoplasticidade (ou plasticidade dependente da taxa), assunto desse tópico.

Este capítulo apresenta uma breve introdução aos aspectos fenomenológicos da viscoplasticidade. Tem o objetivo de motivar a criação de um modelo matemático de viscoplasticidade. Serão apresentadas algumas soluções analíticas simples para demonstrar a capacidade do modelo multiaxial em capturar as características fundamentais fenomenológicas do comportamento viscoplástico.

Em metais, por exemplo, os efeitos fenomenológicos de mecanismos dependentes do tempo tornam-se aparentes tipicamente a altas temperaturas, maiores do que cerca de um terço do ponto de fusão e podem ser claramente identificados por alguns procedimentos experimentais [Neto, Peric e Owen 2008]. Para ilustrar este fato, os resultados típicos dos testes de tensão uniaxial simples com barras metálicas a temperaturas mais elevadas estão representados esquemati-

camente nas Figuras 2.6, 2.7 e 2.8. A Figura 2.7 mostra as curvas de tensão-deformação obtidas em ensaios de tração uniaxial realizados sob diferentes taxas de deformação. Em geral, o módulo de elasticidade é independente da taxa de carregamento, mas, claramente, o limite de elasticidade aparente inicial, bem como a curva de endurecimento dependem da taxa de carregamento.

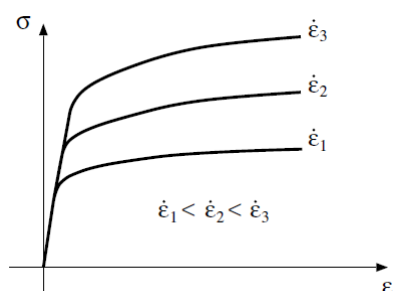


Figura 2.6: Ensaios de tração uniaxial em alta temperatura. Dependência da taxa de deformação [Neto, Peric e Owen 2008].

Outro aspecto da dependência do tempo é o fenômeno conhecido como fluência, ilustrado na Figura 2.7. As curvas da Figura 2.7 mostram a evolução das deformações plásticas ao longo do tempo em experimentos onde corpos de prova tracionados foram carregados com diferentes níveis de tensão durante curtos e longos períodos de tempo. O material sofre uma deformação plástica contínua que é acelerada para níveis de tensão mais elevados. As elevadas taxas de deformação indicadas para o fim das curvas esquemáticas para tensões moderadas e elevadas é o fenômeno conhecido como fluência terciária (estágio terciário). No estágio terciário ocorre a aceleração na taxa de fluência, estrição levando à ruptura final do material e está associada com a evolução do dano interno.

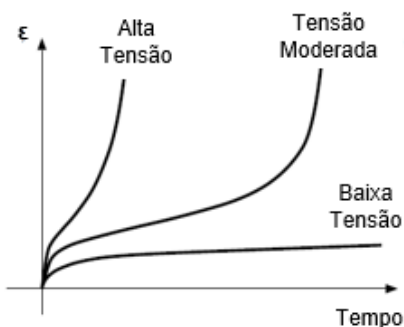


Figura 2.7: Gráfico para visualização de testes uniaxiais em diferentes taxas de deformação, Fluência [Neto, Peric e Owen 2008].

O terceiro aspecto da dependência de taxa, ilustrada na Figura 2.8, é o fenômeno do alongamento. O gráfico da Figura 2.8 mostra a evolução da tensão em um teste de alongamento. O teste consiste em esticar o espécime (praticamente instantaneamente) a uma deformação axial prescrita e mantendo-o esticado (em tensão constante) por um longo período de tempo. A resposta dependente de tempo, neste caso, é caracterizada pela diminuição contínua da tensão no tempo.

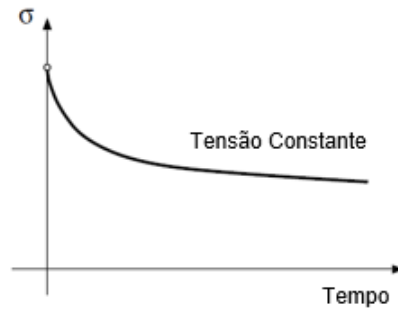


Figura 2.8: Fluxo plástico em tensão constante, Alongamento. Decaimento da tensão em função do tempo [Neto, Peric e Owen 2008].

2.3.1 Critério de Escoamento

Nesta seção, alguns dos critérios de escoamento mais importantes dentro da teoria da plasticidade serão descritos em pormenor, ou seja, os critérios de Tresca, von Mises, Mohr-Coulomb e Drucker-Prager, GAO.

2.3.1.1 Tresca

Este critério foi proposto por Tresca (1868) para descrever o escoamento plástico produzindo em metais. O critério de escoamento de Tresca assume que o efeito plástico produzido, começa quando a tensão máxima de cisalhamento atinge um valor crítico.

De acordo com o critério de Tresca, o aparecimento de escoamento plástico é definido pela condição:

$$\frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min}) = \tau_y(\alpha) \quad (2.5)$$

onde τ_y é a tensão de cisalhamento, aqui assumida como sendo uma função de uma variável interna de endurecimento α , σ_{max} e σ_{min} são as tensões principais máximas e mínimas respectivamente.

A função de escoamento associado ao critério de Tresca pode ser representado como:

$$\Phi(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min}) - \tau_y(\alpha) \quad (2.6)$$

Devido à sua definição exclusivamente em termos de tensão de cisalhamento, o critério de Tresca é insensível à pressão, isto é, o componente de pressão hidrostática,

$$p \equiv \frac{1}{3}tr[\boldsymbol{\sigma}] = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.7)$$

onde p representa a pressão hidrostática e σ_1 , σ_2 e σ_3 as tensões principais.

De fato, note que a superposição de uma pressão arbitrária, p^* , no tensor não afeta o valor da função de escoamento associado à Tresca

$$\Phi(\boldsymbol{\sigma} + p^* \mathbf{I}) = \Phi(\boldsymbol{\sigma}) \quad (2.8)$$

onde \mathbf{I} é o tensor identidade de segunda ordem.

Um aspecto muito importante do critério de Tresca é a sua isotropia. Note-se que, uma vez que em Φ é definida como uma função das tensões principais, a função de escoamento de Tresca é uma função isotrópica do tensor tensão, ou seja, para todas as rotações do estado de tensão não existe interferência no valor da função de escoamento.

Uma vez que qualquer função escalar isotrópica de um tensor simétrico pode ser descrita como uma função dos principais valores de seu argumento, segue-se que qualquer iso-superfície de tal função pode ser representada graficamente como uma superfície no espaço de valores principais do argumento. Isto permite, em particular, que a superfície de escoamento de qualquer critério de escoamento isotrópico possa ser representada no formato de uma superfície tridimensional simples no espaço das tensões principais.

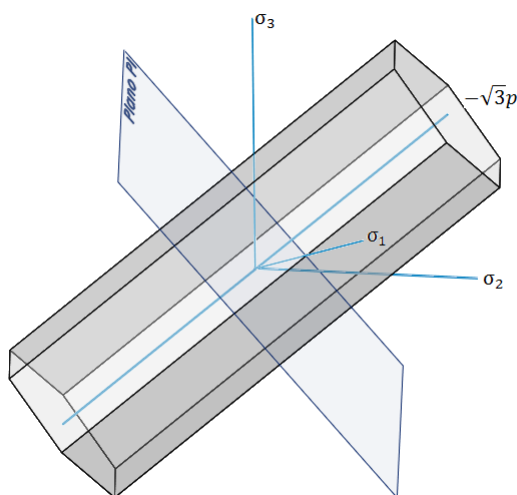


Figura 2.9: Representação gráfica das superfícies de escoamento considerando Tresca.

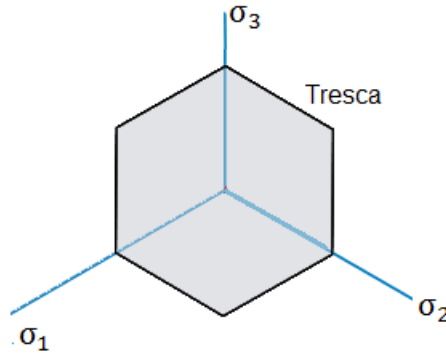


Figura 2.10: Representação do plano II na superfície de escoamento considerando Tresca.

2.3.1.2 von Mises

Também apropriado para descrever comportamento plástico em metais, este critério foi proposto por von Mises (1913). De acordo com o critério de von Mises, o comportamento plástico começa quando o invariante de tensão J_2 atinge um valor crítico. Esta condição é matematicamente representada pela equação:

$$J_2 = R(\alpha) \quad (2.9)$$

sendo J_2 segundo invariante do tensor tensão e R o valor crítico aqui assumido como sendo uma função de uma variável interna de endurecimento α .

A interpretação física do critério de von Mises é dada a seguir. Uma vez que o comportamento elástico dos materiais descritos nesta seção é assumido como sendo linear elástico. Esse critério apresenta dependência distorcional e volumétrica, sendo independente da tensão hidrostática. A tensão de energia elástica armazenada pode ser decomposta como o somatório a seguir:

$$\psi^e = \psi_d^e + \psi_v^e \quad (2.10)$$

onde ψ^e representa a tensão de energia elástica armazenada, ψ_d^e a parcela distorcional e ψ_v^e a volumétrica, sendo a contribuição distorcional:

$$\bar{\mathbf{p}}\psi_d^e = \frac{1}{2G} \mathbf{S} : \mathbf{S} = \frac{1}{G} J_2, \quad (2.11)$$

e a contribuição volumétrica:

$$\bar{\mathbf{p}}\psi_v^e = \frac{1}{K} \mathbf{p}^2 \quad (2.12)$$

sendo G e K , respectivamente, o módulo de cisalhamento e volumétrico e \mathbf{S} o tensor das tensões desviadoras. O valor crítico correspondente da energia distorcional é:

$$\frac{1}{G}R \quad (2.13)$$

Em um estado de cisalhamento puro, ou seja, estado tensor tensão:

$$[\boldsymbol{\sigma}] = \begin{bmatrix} 0 & \tau & 0 \\ \tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

tendo, $\mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}$ e

$$J_2 = \tau^2. \quad (2.15)$$

Assim, a função de escoamento para o critério de von Mises pode ser definida como

$$\Phi(\boldsymbol{\sigma}) = \sqrt{J_2(\mathbf{S}(\boldsymbol{\sigma}))} - \tau_y \quad (2.16)$$

onde $\tau_y \equiv \sqrt{R}$ é a tensão de escoamento cisalhante. Considerando um estado de tensão uniaxial:

$$[\boldsymbol{\sigma}] = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Neste caso, temos:

$$[\mathbf{s}] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\sigma & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}\sigma & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}\sigma \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

e

$$J_2 = \frac{1}{3}\sigma^2. \quad (2.19)$$

A expressão acima para o invariante J_2 sugere a seguinte definição alternativa da função de escoamento von Mises:

$$\Phi(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_y) = q(\mathbf{S}(\boldsymbol{\sigma})) - \sigma_y, \quad (2.20)$$

onde $\sigma_y \equiv \sqrt{3R}$ é a tensão de escoamento uniaxial e

$$q \equiv \sqrt{3J_2(\mathbf{S}(\boldsymbol{\sigma}))}, \quad (2.21)$$

é chamado de tensão equivalente. As tensões de escoamento uniaxiais e de cisalhamento para o critério de von Mises são relacionadas por:

$$\sigma_y = \sqrt{3\tau_y}. \quad (2.22)$$

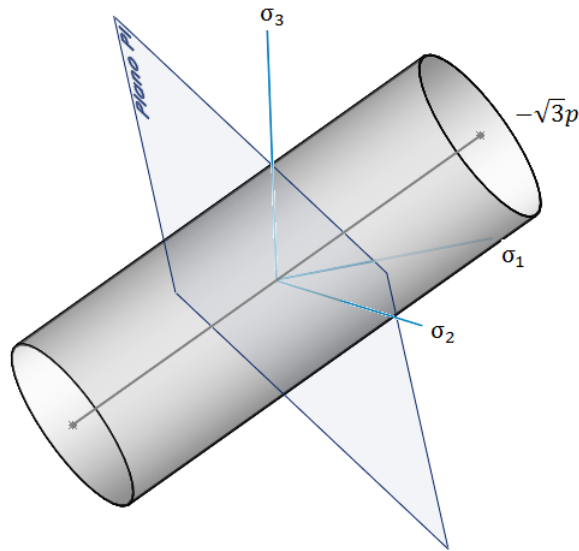


Figura 2.11: Representação gráfica da superfície de escoamento considerando von Mises.

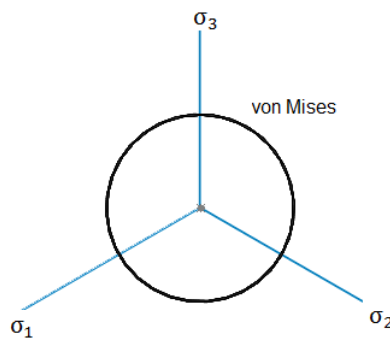


Figura 2.12: Representação do plano π na superfície de escoamento considerando von Mises.

2.3.1.3 Mohr-Coulomb

Os critérios apresentados até agora são insensíveis à pressão e adequado para descrever metais. Para materiais tais como solos, rochas e concreto, cujo comportamento é geralmente caracterizado por uma forte dependência do limite de escoamento na pressão hidrostática, a descrição apropriada do escoamento plástico exige a introdução de sensibilidade à pressão. Um exemplo clássico de uma lei sensível à pressão é determinada pelo critério de rendimento de Mohr-Coulomb descrito a seguir.

Este critério é baseado na suposição de que o fenômeno do escoamento plástico macroscópico é essencialmente o resultado do deslizamento entre as partículas do material. Generalizando, a lei de atrito de Coulomb, afirma que o escoamento plástico começa quando, a tensão de cisalha-

mento, τ , e a tensão normal, σ_n , alcançarem a combinação crítica [Neto, Peric e Owen 2008]:

$$\tau = c - \sigma_n \tan \phi \quad (2.23)$$

onde c representa uma constante do material.

A representação do critério de escoamento de Mohr-Coulomb pode ser facilmente visualizada na representação do círculo de Mohr (Figura 2.13). É o conjunto de todas as tensões cujo maior círculo de Mohr, isto é, o círculo que está relacionado com as tensões principais máximas e mínimas (σ_{max} e σ_{min} , respectivamente), é tangente à linha crítica definida pela Eq. 2.23. O domínio elástico para a lei de Mohr-Coulomb é o conjunto de tensões cujos os três círculos de Mohr estão abaixo da linha crítica. A partir da Figura 2.13, a condição de escoamento é encontrada para ser equivalente à seguinte forma, em termos de tensões principais:

$$(\sigma_{max} - \sigma_{min} + \sigma_{max} + \sigma_{min}) \text{sen}(\phi) = 2c * \text{cos} \phi \quad (2.24)$$

Considerando a equação acima, a função de escoamento expressa em termos das tensões principais pode ser imediatamente definida para o critério de Mohr-Coulomb como:

$$\Phi(\sigma, c) = (\sigma_{max} - \sigma_{min} + \sigma_{max} + \sigma_{min}) \text{sen}(\phi) - 2c * \text{cos} \phi \quad (2.25)$$

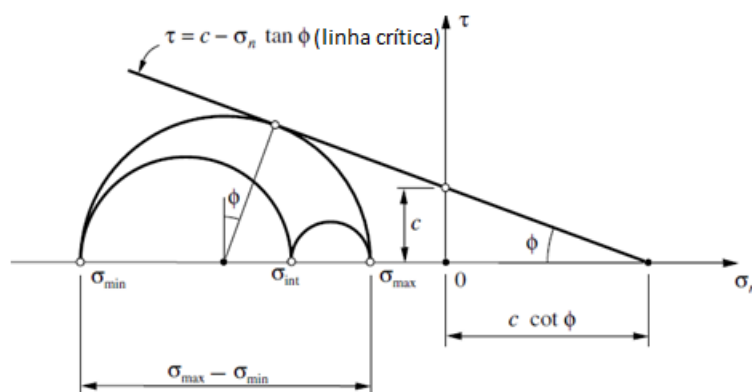


Figura 2.13: Representação do círculo de Mohr [Neto, Peric e Owen 2008].

Devido à sua definição em termos de tensões principais, esta função de escoamento é uma função isotrópica de σ . A superfície de escoamento correspondente ($\phi = 0$) é uma pirâmide hexagonal alinhado com o eixo hidrostático e cujo vértice está localizado na:

$$p = c * \text{cot} \phi \quad (2.26)$$

no lado da tração do eixo hidrostático, sendo ϕ a angulação da linha crítica. A superfície de Mohr-Coulomb é ilustrada na Figura 2.14. A sua forma piramidal, em oposição à forma prismática da

superfície de Tresca, é uma consequência do critério de Mohr-Coulomb apresentar sensibilidade à pressão. Deve notar-se, no entanto, que ambos os critérios coincidem na ausência de atrito interno, ou seja, quando $\sigma = 0$. Como nenhum estado de tensão é permitido no lado de fora da superfície de escoamento, o vértice da pirâmide (ponto A na Figura 2.14) define o limite de resistência do material quando submetido a pressões de tração. Força limitada sob pressão de tração é uma característica típica de materiais como concreto, pedra e solos, para os quais o critério de Mohr-Coulomb é mais aplicável.

Analogamente à representação multiaxial do critério de Tresca, o critério de Mohr-Coulomb também pode ser expresso por meio de seis funções:

$$\Phi_1(\boldsymbol{\sigma}, c) = \sigma_1 - \sigma_3 + (\sigma_1 + \sigma_3)\text{sen}\phi - 2c * \text{cos}\phi \quad (2.27)$$

$$\Phi_2(\boldsymbol{\sigma}, c) = \sigma_2 - \sigma_3 + (\sigma_2 + \sigma_3)\text{sen}\phi - 2c * \text{cos}\phi \quad (2.28)$$

$$\Phi_3(\boldsymbol{\sigma}, c) = \sigma_2 - \sigma_1 + (\sigma_2 + \sigma_1)\text{sen}\phi - 2c * \text{cos}\phi \quad (2.29)$$

$$\Phi_4(\boldsymbol{\sigma}, c) = \sigma_3 - \sigma_1 + (\sigma_3 + \sigma_1)\text{sen}\phi - 2c * \text{cos}\phi \quad (2.30)$$

$$\Phi_5(\boldsymbol{\sigma}, c) = \sigma_3 - \sigma_2 + (\sigma_3 + \sigma_2)\text{sen}\phi - 2c * \text{cos}\phi \quad (2.31)$$

$$\Phi_6(\boldsymbol{\sigma}, c) = \sigma_1 - \sigma_2 + (\sigma_1 + \sigma_2)\text{sen}\phi - 2c * \text{cos}\phi \quad (2.32)$$

cujas raízes, $\Phi_i(\boldsymbol{\sigma}, c) = 0$ (para c fixo), definem seis planos no espaço das tensões principais. Cada plano contém uma face da pirâmide de Mohr-Coulomb representada na Figura 2.14.

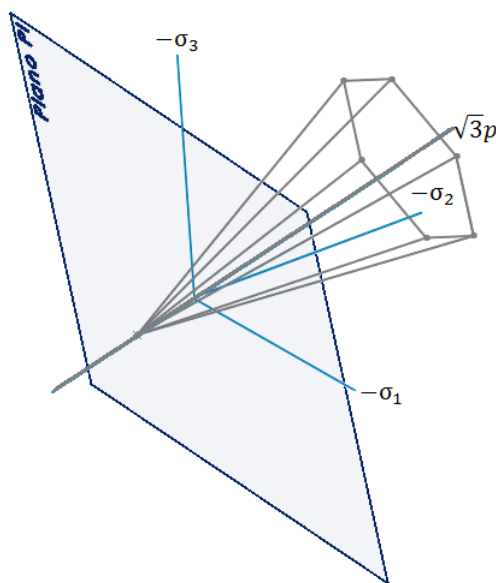


Figura 2.14: Delimitação do critério de Mohr-Coulomb no espaço das tensões principais.

2.3.1.4 Drucker-Prager

Este critério foi proposto por Drucker e Prager (1952) como uma aproximação suave para a lei de Mohr-Coulomb. É constituída por uma modificação do critério de von Mises em que é inserido um termo extra para introduzir sensibilidade à pressão. O critério de Drucker-Prager afirma que o aparecimento de escoamento plástico ocorre quando a equação:

$$\sqrt{J_2(\mathbf{S})} + \eta p = \bar{c} \quad (2.33)$$

é satisfeita, em que η e \bar{c} são parâmetros do material. Representado no espaço das tensões principais, a representação deste critério gera um cone circular cujo eixo é a linha hidrostática.

A fim de aproximar a superfície de escoamento de Mohr-Coulomb, é conveniente definir a função de escoamento de Drucker-Prager como:

$$\Phi(\boldsymbol{\sigma}, c) = \sqrt{J_2(\mathbf{S}(\boldsymbol{\sigma}))} + \eta p(\boldsymbol{\sigma}) - \xi c \quad (2.34)$$

onde percebe-se a influência da pressão hidrostática com p inserido no equacionamento em função de $\boldsymbol{\sigma}$.

O cone Drucker-Prager é ilustrado na Figura 2.15:

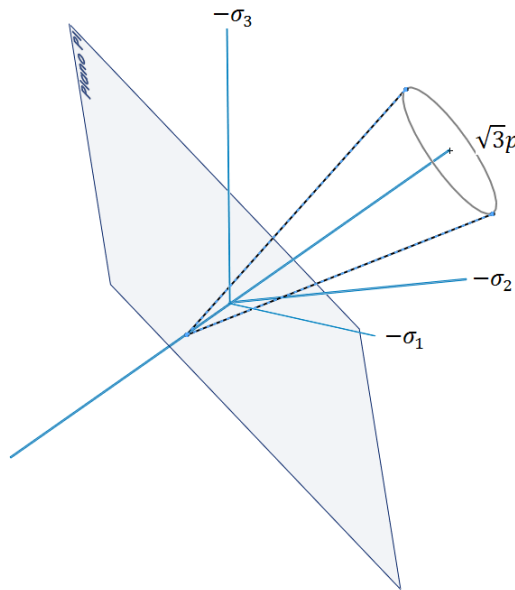


Figura 2.15: Representação de Drucker-Prager, no espaço das tensões principais.

2.3.1.5 GAO

Gao et al. (2011), utilizando-se de teorias para materiais isotrópicos, foi feita a proposição de um critério de escoamento baseado nos invariantes dos tensores de tensão: I_1 , J_2 e J_3 . A função de escoamento em sua forma mais geral é dada por:

$$\Phi = \sigma_{eq}^G - \sigma_y(\bar{\varepsilon}^p) \quad (2.35)$$

com $\sigma_{eq}^G = c(aI_1^6 + 27J_2^3 + bJ_3^2)^{\frac{1}{6}}$, I_1 representa o primeiro invariante do tensor tensão de Cauchy, σ , e é igual ao traço deste tensor ($I_1 = tr(\sigma)$). J_2 e J_3 são respectivamente o segundo e terceiro invariantes do tensor das tensões desviadoras com $J_2 = \frac{1}{2}\mathbf{S} : \mathbf{S}$ e $J_3 = det(\mathbf{S})$. a , b e c são constantes materiais, sendo o valor de $c = (a + \frac{4}{729}b + 1)^{-\frac{1}{6}}$, encontrado através da análise desta função de escoamento para o caso uniaxial de tração. Quando $a = b = c$, este modelo de plasticidade recupera a clássica formulação de von Mises, pois a tensão equivalente de Gao et al. (σ_{eq}^G), definida acima, se iguala a tensão equivalente de von Mises, $\sigma_{eq}^G = q = \sqrt{3J_2}$. Por fim, $\sigma_y(\bar{\varepsilon}^p)$ representa a lei de endurecimento do material, definida como função da deformação plástica acumulada.

Para este critério em estudo, a função de escoamento é dada por:

$$\Phi = c(aI_1^6 + 27J_2^3 + bJ_3^2)^{\frac{1}{6}} - \sigma_y(\bar{\varepsilon}^p) \quad (2.36)$$

onde, novamente, a lei de endurecimento isotrópico é dada por $\sigma_y(\bar{\varepsilon}^p) = \sigma_{y0} + H(\bar{\varepsilon}^p)\bar{\varepsilon}^p$.

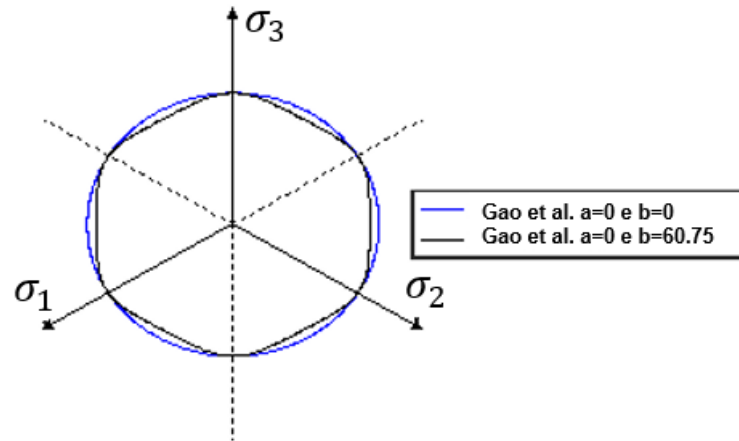


Figura 2.16: Comparação das superfícies de escoamento no plano das tensões principais dos modelos de von Mises e Gao et al [Cavalheiro].

2.3.2 Lei de Fluxo Viscoplastico

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, e o alongamento, sob um intervalo de tempo característico, a uma deformação constante. A Figura 12 exhibe um gráfico tensão versus deformação levando em consideração a taxa de deformação.

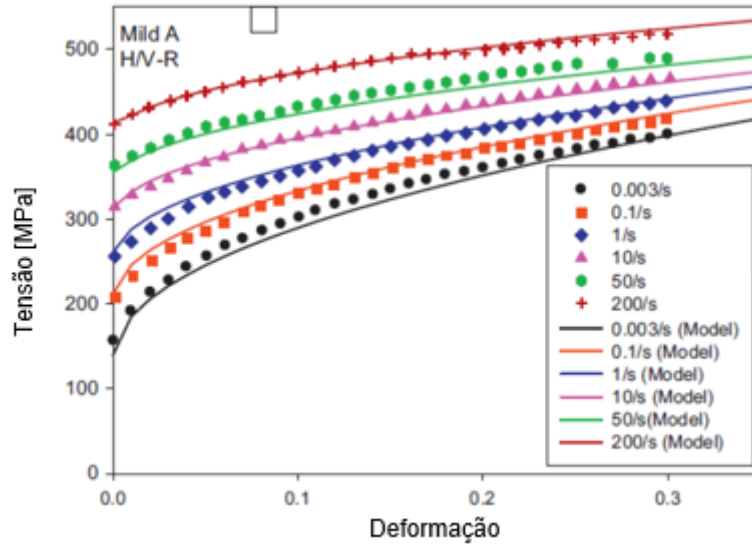


Figura 2.17: Gráfico tensão versus deformação considerando a taxa de deformação para um mesmo material [KIM T.H. 1997].

A diferença crucial entre o modelo elastoplástico e o modelo de viscoplasticidade reside na definição da regra de fluxo, que descreve a evolução do ϵ^p . A regra de fluxo viscoplástico pode ser postulada com um formato semelhante ao do processo independente da taxa:

Apesar de sua semelhança com a regra de fluxo independente da taxa, a equação constitutiva difere fundamentalmente comparando-se com a independente de taxa. Em primeiro lugar, é preciso enfatizar que, no modelo independente de taxa, a taxa de deformação plástica é, de fato, uma taxa de pseudo-tempo, isto é, na teoria $\dot{\epsilon}_p$ independente de taxa, a derivada da deformação plástica em relação a um parâmetro de pseudo-tempo é utilizada unicamente para descrever a sequência de eventos. Nesse caso, a escala de tempo real é irrelevante. Em contraste, a taxa de deformação plástica dependente de taxa é a derivada do tempo real de ϵ_p . Além desta diferença conceitual, $\dot{\gamma}$ - chamado de multiplicador plástico - é aqui uma dada função explícita de q e σ_y . Essencialmente, a função explícita para $\dot{\gamma}$ deve modelar como a taxa de deformação plástica varia com o nível de tensão. Nesse tópico será feita a definição do modelo viscoplástico multidimensional adotando a seguinte definição particular:

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{q}{\sigma_y} \right)^{\frac{1}{\epsilon}} - 1 \right] & \text{se } \Phi(\sigma, \sigma_y) \geq 0 \\ 0 & \text{se } \Phi(\sigma, \sigma_y) < 0 \end{cases} \quad (2.37)$$

onde as constantes materiais são os parâmetros relacionados à viscosidade μ , cuja dimensão é o tempo, e ϵ é o parâmetro de taxa de sensibilidade não-dimensional. Ambos os parâmetros são estritamente positivos. Esta forma particular, tem sido introduzida por Perić (1993) de modo semelhante à forma proposta por Perzyna (1963). É importante ressaltar que os parâmetros do material μ e ϵ dependem da temperatura. De maneira geral, como a temperatura aumenta (diminui) μ e ϵ diminui (aumenta). Para muitos metais, $\mu, \epsilon \rightarrow 0$ para temperaturas suficientemente baixas, quando o comportamento do material pode ser assumido como independente de taxa.

A função explícita para $\dot{\gamma}$ que se encontra na definição da equação de fluxo de plástico geralmente é assumida como sendo da forma proposta por Perić (1993). Claramente, cada forma de $\dot{\gamma}$ define um modelo diferente de viscoplasticidade. No entanto, no âmbito da viscoplasticidade de von Mises, o formato do fluxo segue:

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\gamma}N \quad (2.38)$$

com o vetor de fluxo associativo definido por N

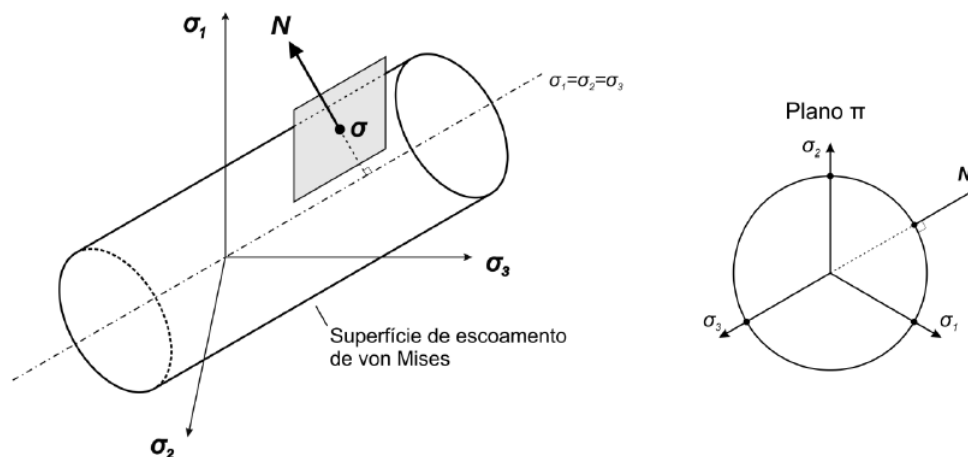


Figura 2.18: Vetor de fluxo N considerando plasticidade associativa para a superfície de escoamento de von Mises no espaço das tensões principais (esquerda) e no plano π (direita) [Neto, Peric e Owen 2008].

Foram postuladas uma série de modelos que são amplamente utilizados na academia ao redor do mundo. O modelo apresentado anteriormente foi postulado por Perić, sendo que alguns outros modelos serão mostrados logo abaixo:

- Modelo de Bingham

O modelo de Bingham [Neto, Peric e Owen 2008] é o modelo de viscoplasticidade mais simples. O multiplicador $\dot{\gamma}$, neste caso, é definido como:

$$\dot{\gamma}(\sigma, \sigma_y) = \begin{cases} \frac{1}{\eta} \Phi(\sigma, \sigma_y) = \frac{q(\sigma) - \sigma_y}{\eta} & \text{se } \Phi(\sigma, \sigma_y) \geq 0 \\ 0 & \text{se } \Phi(\sigma, \sigma_y) < 0 \end{cases} \quad (2.39)$$

A única constante de material neste caso é a forma (dependente da temperatura) parâmetro de viscosidade η e a taxa de deformação é modelada como uma função linear da tensão efetiva de von Mises. Nota-se que esta lei é obtida a partir do modelo de Perić (também do modelo Perzyna), definindo:

$$\epsilon = 1; \quad \mu = \frac{\eta}{\sigma_y} \quad (2.40)$$

- Modelo Perzyna

Este modelo foi introduzido por Perzyna e é definido pela seguinte função [Perzyna 2011]:

$$\dot{\gamma}(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_y) = \begin{cases} \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{q(\boldsymbol{\sigma})}{\sigma_y} \right) - 1 \right]^{\frac{1}{\epsilon}} & \text{se } \Phi(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_y) \geq 0 \\ 0 & \text{se } \Phi(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_y) < 0 \end{cases} \quad (2.41)$$

Como no modelo de Perić, as constantes são o parâmetro relacionado com a viscosidade μ , e a sensibilidade à taxa ϵ . É observado que, apesar de sua semelhança com a definição de Perić, o modelo Perzyna não reproduz a tensão uniaxial independente de taxa. Como mostrado por Perić, neste limite, o modelo Perzyna produz uma curva com $\sigma = 2\sigma_y$. No entanto, para o desaparecimento de viscosidade ($\mu \rightarrow 0$) ou da taxa de deformação, a resposta de ambos os modelos Perzyna e Perić coincidem com o modelo independente da taxa normal com σ_y sendo o limite de escoamento.

- Lei de fluência por Norton

A lei de fluência por Norton é usada principalmente na descrição da fluência secundária. A regra de fluxo multidimensional, por vezes referido como a lei de Odqvist's é dada pela formulação a seguir [Robinson, Binienda e Ruggles 2003]:

$$\dot{\gamma}(\boldsymbol{\sigma}) = \left[\frac{q(\boldsymbol{\sigma})}{\lambda} \right]^N \quad (2.42)$$

onde N e λ são constantes do material dependentes da temperatura. O escoamento plástico é adotado para que ocorra sempre $\boldsymbol{\sigma} \neq 0$. Note-se que, fazendo $\sigma_y = 0$ o modelo de Bingham se assemelha à lei Norton com $N = 1$ e $\lambda = \eta$.

- Lei de Lemaitre-Chaboche

A lei de Lemaitre-Chaboche é composta por uma modificação da lei de Norton, a fim de melhorar a sua capacidade de modelar a fluência secundária sobre uma ampla gama de tensões e taxas de deformação [Lemaitre e Chaboche 1990]. A função $\dot{\gamma}$ neste caso é representada por:

$$\dot{\gamma}(\boldsymbol{\sigma}) = \left[\frac{q(\boldsymbol{\sigma})}{\lambda} \right]^N \exp \left[\alpha q(\boldsymbol{\sigma})^{N+1} \right] \quad (2.43)$$

Além dos parâmetros dos materiais N e λ exigidos pela lei de Norton, o presente modelo apresenta uma terceira (também dependente da temperatura), o parâmetro α .

2.3.3 Lei de Encruamento

A ocorrência do encruamento (endurecimento) foi identificada inicialmente em experimentos uniaxiais. O endurecimento é caracterizado por uma dependência do nível de tensão de escoamento após a deformação plástica a que o corpo tenha sido submetido. No modelo uniaxial,

este fenômeno é incorporado, permitindo que o limite de elasticidade aparente uniaxial a variar (como uma função da deformação plástica axial acumulada) durante o fluxo plástico. Nas situações bidimensionais e tridimensionais, o endurecimento é representado por mudanças na força termodinâmica, obtendo durante o escoamento plástico. Essas alterações podem, em geral, afetar o tamanho, forma e orientação de superfície de escoamento.

Serão apresentadas, de forma sucinta, os três fenômenos mais conhecidos de encruamento, sendo eles:

- Perfeitamente plástico

Um modelo só é dito ser perfeitamente plástico se não permite o endurecimento, ou seja, o nível de tensão de ruptura não depende de qualquer forma com o grau de plastificação. Neste caso, a superfície de rendimento permanece fixa independentemente de qualquer processo de deformação do material. A Figura 2.19 mostra a curva tensão deformação de um teste uniaxial perfeitamente plástico com modelo de von Mises, juntamente com a correspondente representação no plano π da superfície de escoamento.

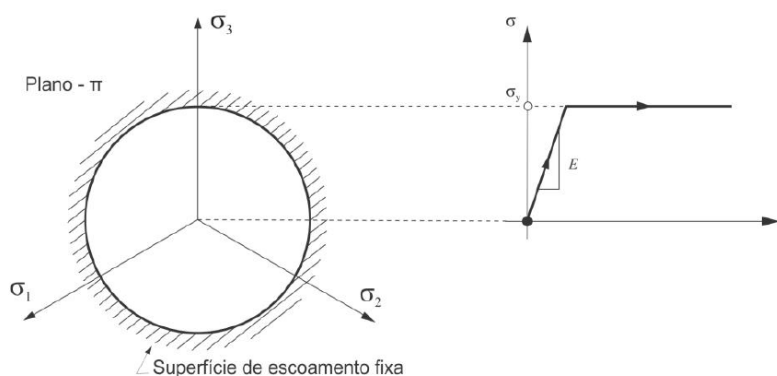


Figura 2.19: Representação do endurecimento ideal [Neto, Peric e Owen 2008].

- Isotrópico

Um modelo de plasticidade só pode ser considerado como endurecimento isotrópico se a evolução da superfície de escoamento é de tal forma que, em qualquer estado de endurecimento, corresponde a uma expansão da superfície de escoamento inicial uniforme (isotrópico), sem a translação. Isto, em conjunto com uma típica curva de tensão-deformação para um teste uniaxial com modelo de endurecimento isotrópico de von Mises é ilustrado na Figura 2.20.

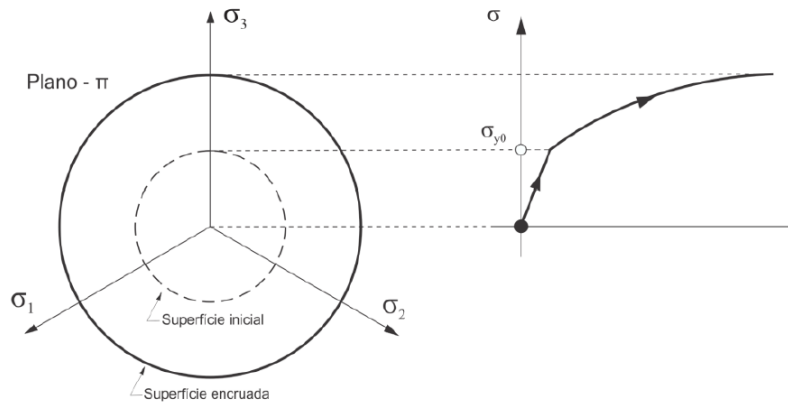


Figura 2.20: Representação do endurecimento isotrópico [Neto, Peric e Owen 2008].

No caso independente de taxa, o fenômeno do endurecimento descreve as mudanças na tensão de escoamento que resultam do esforço plástico. No modelo viscoplástico, o endurecimento pode ser incorporado da mesma maneira como no caso elastoplástico, permitindo que o limite de elasticidade aparente, σ_y , seja:

$$\sigma_y = \sigma_y(\bar{\epsilon}^p) \quad (2.44)$$

da deformação plástica acumulada:

$$\bar{\epsilon}^p = \int_0^t |\dot{\epsilon}^p| dt \quad (2.45)$$

Se σ_y é uma constante, o modelo é designado por perfeitamente viscoplástico.

- Cinemático

Quando um corpo é carregado além do limite de escoamento inicial em uma direção (sofrendo, então, endurecimento), há uma diminuição no limite de escoamento na direção oposta ao carregamento [Drucker e Prager 1952]. Esse fenômeno é conhecido como efeito de Bauschinger, podendo ser modelado matematicamente pelo endurecimento cinemático. Tal efeito é especialmente evidenciado em carregamentos cíclicos, pois a reversão do carregamento influencia o limite de escoamento na direção contrária e assim sucessivamente em cada mudança de direção, o que faz com que a superfície de escoamento esteja constantemente transladando. A Figura 2.21 ilustra uma curva tensão-deformação uniaxial e representação no plano π da superfície de escoamento cinemática.

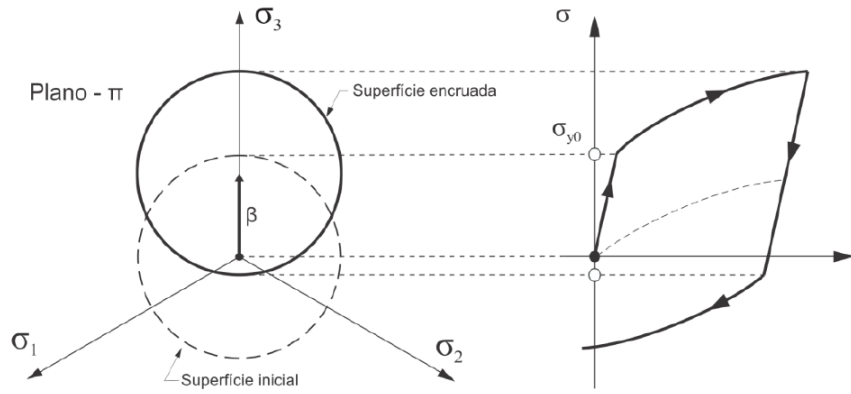


Figura 2.21: Representação do endurecimento cinemático [Neto, Peric e Owen 2008].

2.4 MODELO MATEMÁTICO VISCOPLÁSTICO

Nesta seção será desenvolvida a formulação do modelo matemático viscoplástico para o caso multiaxial, considerando o critério de escoamento de von Mises e endurecimento isotrópico sendo o efeito viscoplástico proposto por Perić.

A generalização multiaxial do modelo viscoplástico uniaxial segue os mesmos passos básicos da generalização para a teoria independente de taxa. A função de escoamento é redefinida em função de variáveis de ordem tensoriais apropriadas.

A função de escoamento e a regra de fluxo de plástico (incluindo a variável interna de endurecimento) terão o mesmo formato que o modelo padrão de von Mises independente da taxa. O modelo resultante é uma versão viscoplástica com endurecimento isotrópico do modelo de von Mises independente de taxa. As equações constitutivas baseadas em von Mises estão exemplificadas no modelo matemático proposto neste trabalho. Sendo assim, é dado início na descrição do modelo matemático utilizado como base deste trabalho.

A Equação 2.20, apresentada anteriormente, descreve a função de escoamento para o critério de von Mises, sendo que deve ser acrescentado o módulo de endurecimento isotrópico (H^I) e o componente da deformação plástica equivalente ($\bar{\epsilon}^p$) que faz o papel de variável interna associada ao endurecimento isotrópico:

$$\Phi(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_y) = q(\mathbf{S}(\boldsymbol{\sigma})) - \sigma_{y0} - H^I \bar{\epsilon}^{vp} \quad (2.46)$$

q_σ representa a tensão equivalente de von Mises, sendo apresentada na equação 2.21

O vetor de fluxo é definido como a derivada parcial da função de escoamento em relação ao tensor tensão:

$$\mathbf{N} \equiv \frac{\partial \Phi}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\sigma}} [\sqrt{3J_2(\mathbf{S})}] = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\mathbf{S}}{\|\mathbf{S}\|} \quad (2.47)$$

onde N representa o vetor de fluxo.

O próximo passo é a definição da lei de fluxo viscoplástico que é responsável por determinar a taxa de evolução da deformação plástica, sendo definida segundo a Equação abaixo para plasticidade associativa, na qual $\dot{\gamma}$ representa o multiplicador plástico.

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\gamma}N \quad (2.48)$$

Em seguida, é necessário definir a taxa de evolução da tensão de endurecimento isotrópico, a qual sofre alteração comparada com o modelo uniaxial somente pela substituição de σ (tensão axial em modelos unidimensionais) pelo q (tensão efetiva de von Mises (Cauchy ou Kirchhoff)), gerando então a Equação 2.49 representando o modelo multiaxial:

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{q}{\sigma_y} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] & \text{se } \Phi(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_y) \geq 0 \\ 0 & \text{se } \Phi(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_y) < 0 \end{cases} \quad (2.49)$$

Substituindo o vetor de fluxo pelo resultado do equacionamento 2.47, temos:

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\gamma} \frac{\partial \Phi}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \dot{\gamma} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\mathbf{S}}{\|\mathbf{S}\|} \quad (2.50)$$

Para a determinação da lei de evolução da deformação plástica equivalente, a primeira variável interna a ser analisada é a deformação plástica equivalente $\bar{\epsilon}^p$, cuja evolução é definida como:

$$\dot{\bar{\epsilon}}^p = \sqrt{\frac{3}{2} \dot{\epsilon}^p : \dot{\epsilon}^p} \quad (2.51)$$

Substituindo a taxa de deformação plástica, obtem-se a Equação 2.52, a qual descreve a taxa de variação (evolução) da deformação plástica equivalente.

$$\dot{\bar{\epsilon}}^p = \dot{\gamma} \quad (2.52)$$

Resumindo, o modelo resultante é uma versão viscoplástica com endurecimento isotrópico do modelo de von Mises independente de taxa. As equações constitutivas baseadas em von Mises estão listadas no quadro 2.1 abaixo:

Quadro 2.1 - resumo do modelo constitutivo viscoplástico de von Mises.

1 - Decomposição aditiva do tensor deformação

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$$

2 - Lei elástica

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbb{D} : \boldsymbol{\varepsilon}^e = \mathbb{D} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{vp})$$

3 - Função de Escoamento

$$\Phi(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_y) = q(\mathbf{s}(\boldsymbol{\sigma})) - \sigma_{y0} - H^I \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}$$

onde,

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}}$$

4 - Lei de fluxo viscoplástico (Perić)

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} \equiv \dot{\gamma} \mathbf{N}$$

onde,

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{q}{\sigma_y} \right)^{\frac{1}{\epsilon}} - 1 \right] & \text{se } \Phi(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_y) \geq 0 \\ 0 & \text{se } \Phi(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_y) < 0 \end{cases}$$

e

$$\mathbf{N} = \frac{\partial \Phi}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\mathbf{S}}{\|\mathbf{S}\|}$$

5 - Evolução da deformação plástica acumulada

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \dot{\gamma}$$

6 - Regra de complementaridade

$$\dot{\gamma} \geq 0; \quad \Phi \leq 0; \quad \dot{\gamma} \Phi = 0$$

2.5 MODELO NUMÉRICO VISCOPLÁSTICO

Nesta seção, será apresentado a estratégia de solução numérica adotada no presente trabalho para a realização das simulações numéricas. O uso de modelos constitutivos dependentes da trajetória, como é o caso dos modelos aqui apresentados, invariavelmente leva à necessidade de formular algoritmos para integração numérica das equações de evolução das variáveis de estado. O problema então consiste em formular procedimentos de integração numérica que sejam capazes de atualizar as variáveis internas conhecidas, geralmente denominadas por α_n , no instante de tempo t_n , para se obter as variáveis internas α_{n+1} no tempo t_{n+1} , onde o incremento de

deformação $\Delta\varepsilon$ se assume conhecido.

Em continuidade ao processo, deve-se estabelecer a concepção de um pseudo-intervalo de tempo $[t_n, t_{n+1}]$, onde o estado n é conhecido e o estado $n + 1$ é o qual se busca encontrar, sendo este uma tentativa dentro do algoritmo. A partir desse chamado “estado-tentativa”, é aplicada uma discretização das equações constitutivas no pseudo-tempo, com base na metodologia de Euler implícita.

Pra o procedimento de atualização das tensões, o qual é baseado na chamada metodologia da decomposição do operador [Simo e Hughes 2006] [Neto, Peric e Owen 2008], é especialmente adequado para a integração numérica do problema de evolução e tem sido amplamente utilizado na plasticidade computacional. Esse método consiste em dividir o problema em duas partes: um preditor elástico, onde o problema é assumido como completamente elástico e um corretor viscoplástico, no qual um sistema de equações residuais formado pela lei elástica, a função de escoamento e as equações de evolução é resolvido, tomando os valores obtidos na construção do preditor elástico como valores iniciais do problema.

Seguindo nessa implementação, uma vez que a função de escoamento for violada, o corretor viscoplástico será iniciado junto ao método de Newton-Rapshon, o qual foi utilizado para resolver o conjunto de equações não lineares discretizado.

2.6 ALGORITMO DE ATUALIZAÇÃO

Após a apresentação do conceito prévio neste capítulo, inicia-se, nesta seção, o desenvolvimento do algoritmo de atualização do modelo viscoplástico de von Mises com endurecimento isotrópico, o qual utiliza como base as equações de atualização das variáveis a seguir.

- Para o tensor deformação elástica:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^e = \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{eT} - \Delta\varepsilon^{vp} \quad (2.53)$$

onde $\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{eT}$ é o tensor deformação elástico tentativa no pseudo-tempo $[t_n, t_{n+1}]$ e $\Delta\varepsilon^{vp}$ um incremento de deformação viscoplástica que, durante o regime elástico, será nulo. Substituindo a Equação 2.48 na 2.53, reescreve-se abaixo como sendo:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^e = \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{eT} - \Delta\gamma \mathbf{N}_{n+1} \quad (2.54)$$

$\Delta\gamma$ representa o multiplicador plástico

- Para o tensor tensão:

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \mathbb{D}^e : \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^e = \mathbb{D}^e : \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{eT} - \Delta\gamma \mathbb{D}^e : \mathbf{N}_{n+1} = \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^T - 2G\Delta\gamma \mathbf{N}_{n+1} \quad (2.55)$$

onde σ_{n+1}^T representa o tensor das tensões tentativa, a constantes G representa a constante de Lamé e é denominada de módulo de cisalhamento.

- Para a deformação viscoplástica equivalente:

$$\bar{\epsilon}^{vpT} = \bar{\epsilon}_n^{vp} + \Delta \bar{\epsilon}^{vp} = \bar{\epsilon}_n^{vp} + \Delta \gamma \quad (2.56)$$

onde $\Delta \bar{\epsilon}^{vp}$ é o incremento de deformação viscoplástica equivalente, $\bar{\epsilon}_{n+1}^{vpT}$ é o tensor de deformação viscoplástico equivalente tentativa, representando a variável interna associada ao endurecimento isotrópico tentativa.

- Para a função de escoamento de von Mises:

Por fim, definidas as funções de atualização, estabelece-se a atualização da função de escoamento de von Mises dentro dos parâmetros do estado tentativa, resultando em:

$$\Phi_{n+1} = q_{n+1} - \sigma_{y0} - H^I \bar{\epsilon}_{n+1}^{vp} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S}_{n+1} : \mathbf{S}_{n+1}} - \sigma_{y0} - H^I \bar{\epsilon}_{n+1}^{vp} \quad (2.57)$$

Conhecidos os valores da deformação elástica, ϵ_n^e e do conjunto das variáveis internas do problema, no início do intervalo do pseudo-tempo $[t_n, t_{n+1}]$, e dado também o incremento de deformação prescrito, $\Delta \epsilon$, para este intervalo, o chamado estado tentativa elástico pode ser então construído, como:

$$\epsilon_{n+1}^{eT} = \epsilon_n^e - \Delta \epsilon \quad (2.58)$$

$$\sigma_{n+1}^T = \mathbb{D}^e : \epsilon_{n+1}^{eT} \quad (2.59)$$

$$\epsilon^{vpT} = \epsilon_n^{vp} \quad (2.60)$$

$$\bar{\epsilon}^{vpT} = \bar{\epsilon}_n^{vp} \quad (2.61)$$

$$\Phi_{n+1}^T = q_{n+1}^T - \sigma_{y0} - H^I \bar{\epsilon}_{n+1}^{vp} \quad (2.62)$$

onde as Equações 2.58, 2.59, 2.60, 2.61, 2.62 representam o estado tentativa para o tensor deformação elástico, tensor tensão, deformação viscoplástica, deformação viscoplástica equivalente e função de escoamento respectivamente.

Se $\Phi_{n+1}^T \leq 0$, então o processo é de fato elástico $[(*)_{n+1} = (*)_{n+1}^T]$ dentro do intervalo sendo atribuído os valores das variáveis experimentais nas variáveis em t_{n+1} . Caso contrário é possível constatar que o material se encontra dentro do regime viscoplástico e que o incremento de deformação prescrito, que inicialmente foi considerado como totalmente elástico, possui na realidade uma parcela viscoplástica. Desta forma, há a necessidade de se corrigir o estado tentativa construído anteriormente.

Quadro 2.2 - resumo do modelo numérico de von Mises com endurecimento isotrópico.

1 - Determinação de um estado tentativa e um incremento $\Delta\varepsilon$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{eT} = \boldsymbol{\varepsilon}_n^e + \Delta\boldsymbol{\varepsilon} \quad \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^T = \mathbb{D} : \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{eT}$$

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vpT} = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_n^{vp} \quad q^T = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S}_{n+1}^T : \mathbf{S}_{n+1}^T}$$

2 - Verificar a admissibilidade Plástica

$$\Phi^T = q^T - \sigma_{y0} - H^I \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}$$

onde se $\Phi^T \leq 0$, então (passo elástico): $(*)_{n+1} = (*)_{n+1}^T$;

caso contrário, então (passo viscoplástico): algoritmo de retorno.

3 - Corretor plástico, algoritmo de retorno: resolver o sistema de equações não-lineares

(Newton-Raphson), tendo como variáveis: $\boldsymbol{\sigma}_{n+1}$, $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vpT}$ e $\Delta\gamma$

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^T - 2G\Delta\gamma\mathbf{N}_{n+1}$$

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vp} = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_n^{vp} + \Delta\gamma$$

$$\Phi = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S}_{n+1} : \mathbf{S}_{n+1}} - \sigma_{y0} - H^I \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vp}$$

4 - FIM

2.7 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

Na resolução do sistemas não-linear descrito no Quadro 2.2, apresentado na seção anterior, o método de Newton-Raphson é adotado. Como ponto de partida, tal sistema necessita ser escrito na forma linearizada. Assim, o sistema anterior é inicialmente reescrito na forma de equações residuais, como se segue:

$$R_{\boldsymbol{\sigma}_{n+1}} = \boldsymbol{\sigma}_{n+1} - \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^T + 2G\Delta\gamma\mathbf{N}_{n+1} \quad (2.63)$$

$$R_{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vp}} = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vp} - \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_n^{vp} - \Delta\gamma \quad (2.64)$$

$$R_{\Delta\gamma} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S}_{n+1} : \mathbf{S}_{n+1}} - \sigma_{y0} - H^I \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vp} \quad (2.65)$$

Em seguida, o sistema é reescrito na forma linearizada da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial R_{\sigma_{n+1}}}{\partial \sigma_{n+1}} & \frac{\partial R_{\sigma_{n+1}}}{\partial \bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}} & \frac{\partial R_{\sigma_{n+1}}}{\partial \Delta\gamma} \\ \frac{\partial R_{\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}}}{\partial \sigma_{n+1}} & \frac{\partial R_{\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}}}{\partial \bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}} & \frac{\partial R_{\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}}}{\partial \Delta\gamma} \\ \frac{\partial R_{\Delta\gamma}}{\partial \sigma_{n+1}} & \frac{\partial R_{\Delta\gamma}}{\partial \bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}} & \frac{\partial R_{\Delta\gamma}}{\partial \Delta\gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta\sigma_{n+1} \\ \delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp} \\ \delta\Delta\gamma \end{bmatrix}^{k+1} = - \begin{bmatrix} R_{\sigma_{n+1}} \\ R_{\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}} \\ R_{\Delta\gamma} \end{bmatrix}^k \quad (2.66)$$

Seguindo o objetivo de resumir a aplicação do método de Newton-Raphson para resolução do sistema linear exposto acima, Equação 2.66, o Quadro 2.3 a seguir, é apresentado tomando o estado tentativa como parâmetro inicial do problema.

Quadro 2.3 - resumo do algoritmo de retorno (Newton-Raphson).

<p>1 - Tomado o estado tentativa como parâmetros iniciais:</p> $\sigma_{n+1}^{(0)} = \sigma_{n+1}^T \quad \Delta\gamma^{(0)} = \Delta\gamma \quad \bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp(0)} = \bar{\varepsilon}_n^{vp}$ <p>2 - Resolver o sistema de equações para: σ_{n+1}, $\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vpT}$ e $\Delta\gamma$</p> $\begin{bmatrix} \frac{\partial R_{\sigma_{n+1}}}{\partial \sigma_{n+1}} & \frac{\partial R_{\sigma_{n+1}}}{\partial \bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}} & \frac{\partial R_{\sigma_{n+1}}}{\partial \Delta\gamma} \\ \frac{\partial R_{\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}}}{\partial \sigma_{n+1}} & \frac{\partial R_{\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}}}{\partial \bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}} & \frac{\partial R_{\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}}}{\partial \Delta\gamma} \\ \frac{\partial R_{\Delta\gamma}}{\partial \sigma_{n+1}} & \frac{\partial R_{\Delta\gamma}}{\partial \bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}} & \frac{\partial R_{\Delta\gamma}}{\partial \Delta\gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta\sigma_{n+1} \\ \delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp} \\ \delta\Delta\gamma \end{bmatrix}^{k+1} = - \begin{bmatrix} R_{\sigma_{n+1}} \\ R_{\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp}} \\ R_{\Delta\gamma} \end{bmatrix}^k$ <p>3 - Calcular:</p> $\sigma_{n+1}^{(k+1)} = \sigma_{n+1}^{(k)} + \delta\sigma_{n+1}^{(k+1)} \quad \Delta\gamma^{(k+1)} = \Delta\gamma^{(k)} + \delta\Delta\gamma^{(k+1)}$ $\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp(k+1)} = \bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp(k)} + \delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp(k+1)}$ <p>4 - Verificar convergência:</p> $erro = \frac{\Phi^{k+1}}{[\sigma_{y0} + HI \bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp(k+1)}]} \leq tolerância$ <p>5 - FIM</p>

- Derivadas do sistema de equações residuais

Por fim, solucionam-se as derivadas do sistema de equações residuais resultando em:

i. primeira equação residual;

$$\frac{\partial R_{\sigma_{n+1}}}{\partial \sigma_{n+1}} = \mathbb{I} + 2G\Delta\gamma \frac{\partial N_{n+1}}{\partial \sigma_{n+1}} \quad (2.67)$$

$$\frac{\partial R_{\boldsymbol{\sigma}_{n+1}}}{\partial \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vp}} = 0 \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial R_{\boldsymbol{\sigma}_{n+1}}}{\partial \Delta\gamma} = 2GN_{n+1} \quad (2.69)$$

ii. segunda equação residual

$$\frac{\partial R_{\boldsymbol{\sigma}_{n+1}}}{\partial \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vp}} = 0 \quad (2.70)$$

$$\frac{\partial R_{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vp}}}{\partial \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vp}} = 1 \quad (2.71)$$

$$\frac{\partial R_{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vp}}}{\partial \Delta\gamma} = -1 \quad (2.72)$$

iii. terceira equação residual;

$$\frac{\partial R_{\Delta\gamma}}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{n+1}} = \mathbf{N}_{n+1} \quad (2.73)$$

$$\frac{\partial R_{\Delta\gamma}}{\partial \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^{vp}} = -H^I \quad (2.74)$$

$$\frac{\partial R_{\Delta\gamma}}{\partial \Delta\gamma} = 0 \quad (2.75)$$

iv. outras derivadas:

$$\frac{\partial \mathbf{N}_{n+1}}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{n+1}} = \frac{3}{2q_{n+1}} \left[\left(\mathbb{I} - \frac{1}{3} \mathbf{I} \otimes \mathbf{I} \right) - \frac{3}{2(q_{n+1})^2} \mathbf{S}_{n+1} \otimes \mathbf{S}_{n+1} \right] \quad (2.76)$$

2.8 MÉTODO DE OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS MATERIAIS

Nas seções prévias, desenvolveu-se a fundamentação teórica sobre a qual o modelo visco-plástico é formulado. O material analisado neste trabalho, Al 1120, aplicado à indústria fabril de cabos condutores de alta tensão, com aplicações *offshore*, tem seu comportamento descrito por este modelo descrito anteriormente. Para caracterização dos parâmetros materiais, usa-se a lei de endurecimento de potência, como descrita na Equação 2.77.

$$\sigma = \sigma_{y0} + H\bar{\varepsilon}^{pn} \quad (2.77)$$

onde σ_{y0} é a tensão de escoamento inicial, H é o módulo de encruamento e n é o expoente de encruamento, sendo as três propriedades materiais a serem extraídas.

A determinação dos parâmetros materiais é realizada por meio de um processo iterativo, desenvolvido utilizando uma técnica de otimização baseada no método dos mínimos quadrados. À princípio, valores arbitrários são selecionados dentro de um intervalo de incerteza e, a seguir, o algoritmo de otimização é utilizado para encontrar os valores ótimos, a partir dos quais há melhor relação entre as curvas experimental e numérica.

2.8.1 MÉTODO DA SEÇÃO ÁUREA

Quando se fala em otimização, de uma perspectiva matemática, lidamos com a determinação de um máximo ou mínimo de uma função com uma ou mais variáveis. Valendo-se desta ferramenta, busca-se então encontrar o valor mínimo para a função $f(\mathbf{p})$, denominada função objetivo, que é nada menos que um recurso com a função de minimizar a diferença entre uma resposta calculada em Método de Elementos Finitos e uma resposta experimental, levando-se em conta um erro. De acordo com Kleinermann (2003), a função que efetua essa redução na diferença entre as respostas é definida baseando-se nos mínimos quadrados e expressa-se da seguinte forma:

$$f(\mathbf{p}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\mathbf{R}_i^{FEM}(\mathbf{p}) - \mathbf{R}_i^{exp}}{\mathbf{R}_i^{exp}} \right)^2} \quad (2.78)$$

onde \mathbf{R}_i^{FEM} é a força em cada iteração calculada pelo método de elementos finitos e \mathbf{R}_i^{exp} são as forças medidas experimentalmente.

O método da seção áurea é simples e de uso geral para determinação do ponto ótimo de uma função. Para tanto, admite-se que a função objetivo $f(\mathbf{p})$, cujo valor mínimo deseja-se determinar, é unimodal e unidimensional, ou seja, depende de uma única variável e não possui mínimos locais, mas apenas um mínimo global compreendido dentro do denominado intervalo de incerteza $[x_{inf}, x_{sup}]$, onde x_{inf} é o ponto inferior e x_{sup} é o ponto superior.

A escolha dos pontos intermediários $[x_1, x_2]$, dentro do intervalo, de incerteza está intimamente relacionada à qualidade e eficiência do processo de otimização. Para o método da Seção Áurea, esses pontos são definidos a partir da razão áurea:

$$x_1 = x_{inf} + 0.382I \quad (2.79)$$

$$x_2 = x_{inf} + 0.618I \quad (2.80)$$

onde $I = x_{sup} - x_{inf}$.

Quadro 2.4 - algoritmo do método da seção áurea:

1 - Determinar os limites do intervalo de incertezas $[x_{inf}, x_{sup}]$:

2 - Determinar os pontos intermediários x_1 e x_2 a partir das Equações 2.79 e 2.80

3 - Calcular e comparar $f(x_1)$ e $f(x_2)$ e proceder de acordo com passos 4, 5 e 6:

4 - Se $f(x_1) < f(x_2)$ - o ponto ótimo estará no intervalo $[x_{inf}, x_2]$.

reduza o intervalo de incerteza para $I = x_2 - x_{inf}$

5 - Se $f(x_1) > f(x_2)$ - o ponto ótimo estará no intervalo $[x_1, x_{sup}]$

reduza o intervalo de incerteza para $I = x_{sup} - x_1$

6 - Se $f(x_1) = f(x_2)$

faça $x_{inf} = x_1$ e $x_{sup} = x_2$ e volte ao passo 2.

7 - Se $I < tolerancia$, o processo é encerrado. O ponto de mínimo será:

$$x_{min} = (x_{sup} + x_{inf})/2$$

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

O objetivo principal deste capítulo é determinar as propriedades do material Al 1120 durante as diversas etapas do processo de trefilação. Para alcançar o objetivo, é feita a utilização de um modelo já validado experimentando o material estudado cujas propriedades e curva de encruamento são desconhecidas [Machado 2016]. Neste caso, é feita a determinação da curva de encruamento do material através de um ensaio de dureza, utilizando uma rotina de identificação paramétrica baseada em métodos numéricos associados (Anexo I.1). Com este intuito, busca-se realizar a comunicação entre a rotina de otimização, construída em MatLab, e a simulação do ensaio de dureza em elementos finitos, no ABAQUS utilizando da programação em Python (Anexo I.2 e I.3).

3.1 ENSAIO DE DUREZA

Devido às limitações laboratoriais, foi proposto como Ensaio de Dureza Brinell foi o método usado para aquisição das informações preliminares quanto à dureza e formato da calota esférica impressa no corpo de prova. O método aplicado seguiu as diretrizes padrões definidas pela ASTM E10 – 12. As vantagens deste método alternativo são várias quando comparado ao ensaio de tração, a começar pelos custos com usinagem e tempo de ensaio superiores que esta última requer, tornando vantajoso o investimento no método alternativo. A possibilidade de uso do mesmo corpo de prova para realização de diversos ensaios, com diferentes cargas é outro ponto positivo

3.1.1 CORPO DE PROVA

Os corpos de prova utilizados no ensaio de dureza foram obtidos através da doação de material proveniente da linha de produção de empresa especializada no ramo da fabricação de fios (Figura 3.1).

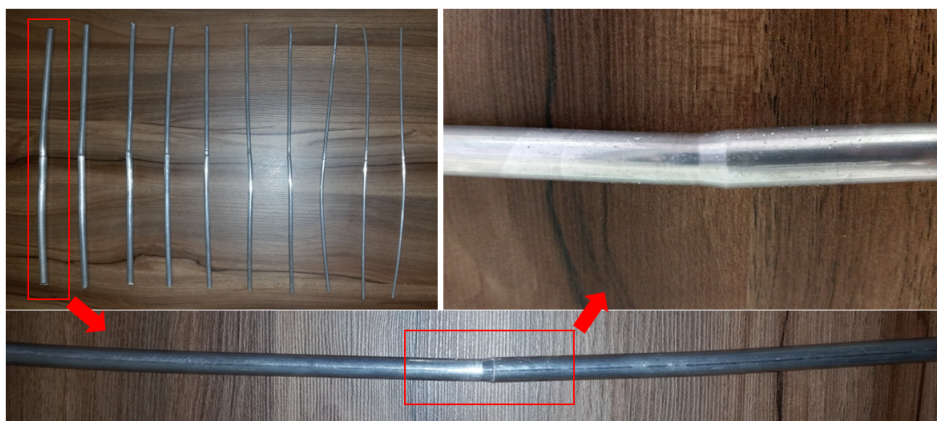


Figura 3.1: Corpos de prova provenientes de linha de produção da industria especializada.

Após o corte, cada peça é lixada usando lixas d'água, passando pelas numerações 240, 600, 800 e 1200, dando acabamento superficial regular e plano, como estabelecido pela norma. Isso permite uma medição do diâmetro de acordo com a tolerância especificada e minimiza alterações da dureza superficial. A Figura 3.2 mostra como ficou um dos corpos de prova antes a execução do ensaio de dureza.

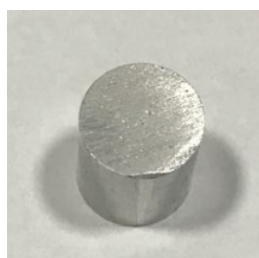


Figura 3.2: Corpo de prova após corte e procedimento de acabamento superficial utilizando lixas.

3.1.1.1 PROCEDIMENTO DE TESTE

Os ensaios de dureza foram realizados utilizando a máquina *Zwick/Roell ZHU250* (Figura 3.3). Esse modelo adquirido pela Universidade de Brasília apresenta aplicação para cinco variedades de testes: Vickers, Knoop, Rockwell e Brinell. Para este trabalho selecionou-se o ensaio de dureza Brinell, de acordo com as normas ISO 6506 e ASTM E10-12. Foram utilizados 2 corpos de prova para cada um dos casos (vergalhão, pós feira 1, 2 e 3) totalizando 8 corpos de prova, sendo ensaiado 4 vezes cada, 2 vezes em cada um dos lados com cada uma das cargas (Figura 3.4).

Tabela 3.1: Condições de Teste e Recomendações de Intervalo de Dureza para penetrador com $D = 2,5\text{mm}$ [Highway et al. 2004].

Escala de Dureza Brinell	Fator de Carga F/D^2	Valor Nomila de Força		Intervalo de dureza recomendado
		[N]	[kgf]	
HBW 2,5/187,5	30	1839	187,5	95,5 - 650
HBW 2,5/62,5	10	612,9	62,5	31,8 - 218
HBW 2,5/31,25	5	306,5	31,25	15,9 - 109
HBW 2,5/15,625	2,5	153,2	15,625	7,96 - 54,6
HBW 2,5/7,8125	1,25	76,61	7,8125	3,98 - 27,2
HBW 2,5/6,25	1	61,29	6,25	3,18 - 21,8

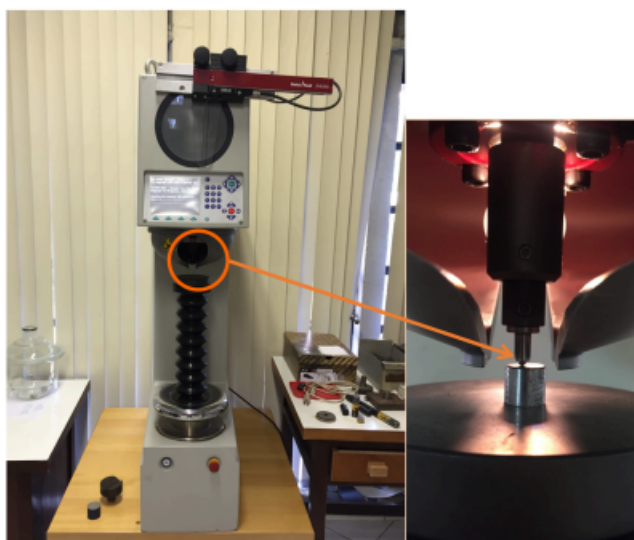


Figura 3.3: Máquina Zwick/Roell ZHU250 utilizada para o ensaio de dureza.

A Figura 3.4 mostra corpo de prova pós ensaio de dureza realizado no vergalhão antes do processo de trefilação. Como referência às forças utilizadas para ensaio de dureza, toma-se como base a Tabela 3.1. Foram empregadas os casos HBW 2,5/6,25, HBW 2,5/15,625, HBW 2,5/31,25 e HBW 2,5/62,5. Vale ressaltar que não foi utilizado o caso HBW 2,5/7,8125 pois a máquina utilizada não apresenta esta opção. Este mesmo procedimento foi realizado para o material pós feira 1, 2 e 3.

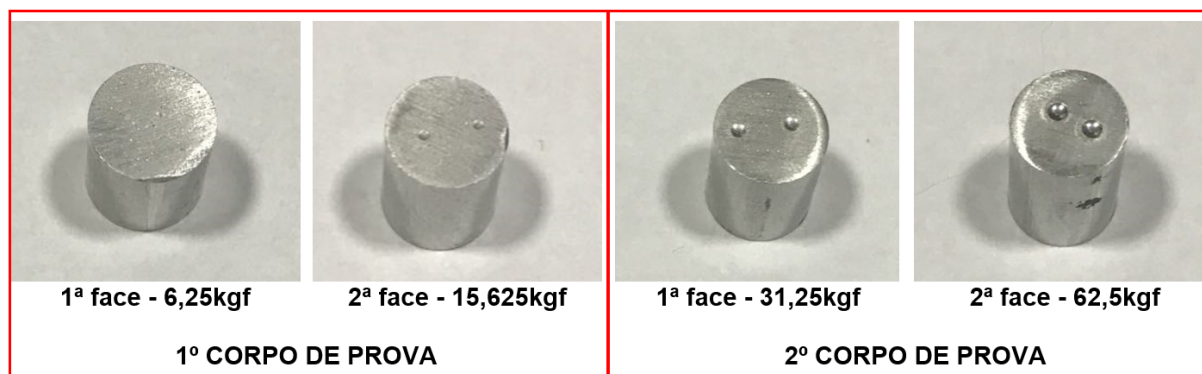


Figura 3.4: Corpos de prova pós teste, exemplo com diâmetro inicial - 9,53mm.

A Tabela 3.2 resume os resultados obtidos através do ensaio de dureza Brinell realizado em laboratório da UnB. Esses dados são inseridos dentro do programa de otimização de curvas para que enfim seja encontrado a sugestão para os parâmetros fundamentais a partir da lei de endurecimento de potência para a obtenção da curva encruamento característica.

Tabela 3.2: Resultados de dureza Brinell e altura da calota para cada material e força aplicada.

Corpo de prova	Carga [kgf]	6,25	15,625	31,25	62,5
Vergalhão inicial	Dureza Brinell [HBW]	39,55	42,90	41,00	37,95
	Altura da calota [mm]	0,02012	0,04637	0,09705	0,20969
Pós feira 1	Dureza Brinell [HBW]	44,90	43,75	41,55	37,90
	Altura da calota [mm]	0,01772	0,04547	0,09576	0,20997
Pós feira 2	Dureza Brinell [HBW]	59,00	52,95	47,10	42,80
	Altura da calota [mm]	0,01349	0,03757	0,08448	0,18593
Pós feira 3	Dureza Brinell [HBW]	60,20	54,30	48,90	47,80
	Altura da calota [mm]	0,01322	0,03664	0,08137	0,16648

3.1.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Além do ensaio de dureza, foi também realizado uma simulação por meio de ferramenta computacional de elementos finitos usando o software Abaqus.

Com o objetivo de simular o ensaio de dureza Brinell, foram criadas duas partes: uma meia casca esférica, como corpo rígido, representando o penetrador, e um cilindro deformável, representando o corpo de prova a ser ensaiado como pode ser visto na Figura 3.5. A definição de rigidez para o penetrador se da ao fato de a esfera utilizada no procedimento de ensaio ser composta de material com dureza muito superior ao corpo de prova testado. As propriedades do material são inseridas inicialmente através de chute e feitas iterações computacionais com o objetivo de se encontrar parâmetros e características ideais.

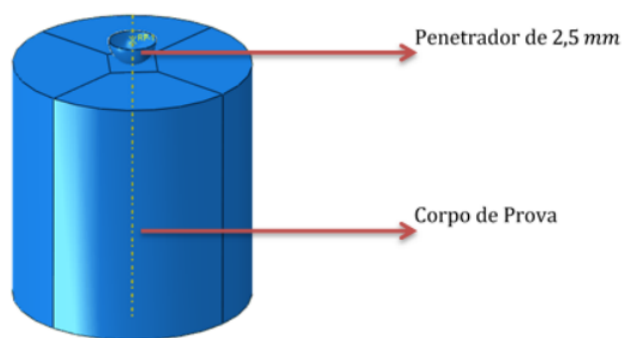


Figura 3.5: Exemplo de montagem da simulação do teste de dureza Brinell - 3D.

Devido à grande quantidade de iterações necessária para convergência dos resultados no processo para determinação da curva de encruamento, surgiu a necessidade da simplificação do modelo considerando a axissimetria do problema para a realização da simulação (Figura 3.6)

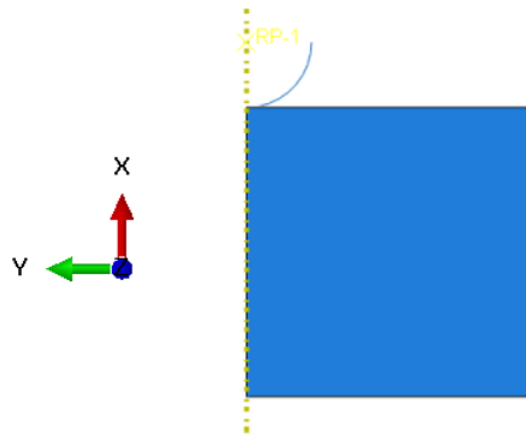


Figura 3.6: Modelo axissimétrico do ensaio de dureza.

Como mostrado na Figura 3.7, utilizou-se uma malha com 841 elementos finitos axissimétricos bilineares quadrilaterais, com integração reduzida.

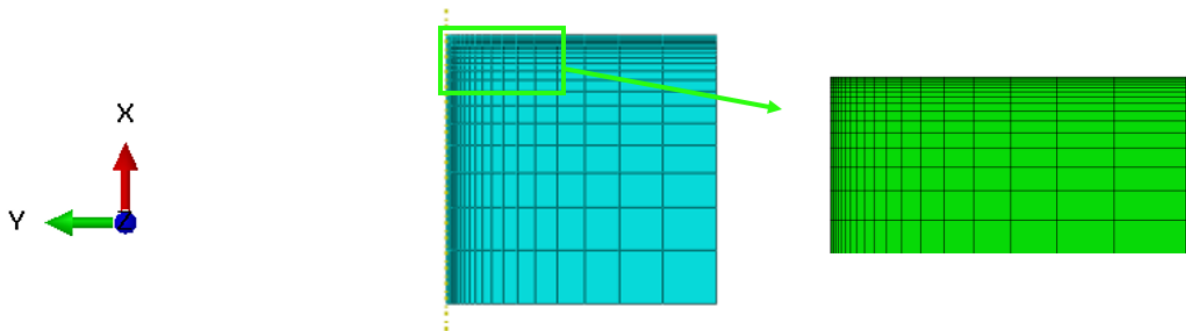


Figura 3.7: Representação da malha ao corpo de prova axissimétrico.

3.1.2.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Há três passos pelos quais a simulação ocorre, definindo, assim, a simulação do ensaio de dureza. No passo inicial são definidas a interação entre a esfera e o corpo de prova (contato) e a condição de contorno que estabelece o estado engastado do corpo de prova em sua base. Num segundo momento, definido como passo 1, é estabelecido um deslocamento vertical do penetrador com relação ao corpo de prova, imprimindo-lhe uma deformação. Esse deslocamento vertical é estimado a partir da profundidade h da calota obtida por meio do ensaio de dureza Brinell. Por conseguinte, o passo 2 estabelece a volta da esfera à sua posição inicial com consequente recuperação plástica da deformação. As condições estabelecidas em cada passo são propagadas para o seguinte, com exceção do deslocamento definido no passo 1, que não é propagado para o passo 2. O coeficiente de atrito entre as superfícies do penetrador e do corpo de prova são desprezadas. Uma relação “mestre-escravo” é estabelecida entre as partes, sendo o penetrador o mestre e o corpo de prova o escravo.

3.2 IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MATERIAL

O material utilizado para a fabricação dos fios é o AAAC(1120) - condutor CAL 1120 do tipo concêntrico. A utilização da liga 1120 na fabricação de condutores para linhas de transmissão está fundamentada na maior resistência mecânica quando comparada aos condutores com liga 1350 e menor resistividade quando comparada com os condutores com liga 6201, o que é alcançado com adições controladas de cobre e magnésio no material combinado também com o controle do ferro. Como grande vantagem econômica a liga Al 1120 não necessita dos processos de solubilização e tratamento térmico como ocorre com a liga 6201. [Alubar 2015]

A identificação paramétrica foi realizada através de técnica de otimização, baseando-se em informações fornecidas de força versus deslocamento. Três parâmetros, a partir da lei de endurecimento de potência, são fundamentais para a obtenção da curva de encruamento do material, são eles: tensão de escoamento inicial σ_{y0} , módulo de encruamento H e o expoente de encruamento n . Inicialmente faz-se necessário estipular valores arbitrários para os parâmetros avaliados. Os valores ótimos são obtidos no processo de otimização utilizando o método da seção áurea (subseção 2.8.1). A cada iteração do processo de otimização novos parâmetros materiais são sugeridos. Destes, uma nova curva de encruamento é gerada e inserida no modelo para simulação do ensaio de dureza no ABAQUS, conforme apresentado no diagrama esquemático da Figura 3.8. O procedimento de otimização é baseado em um processo de ajuste de curva guiado pelo gradiente de avaliação repetindo até atingir convergência.

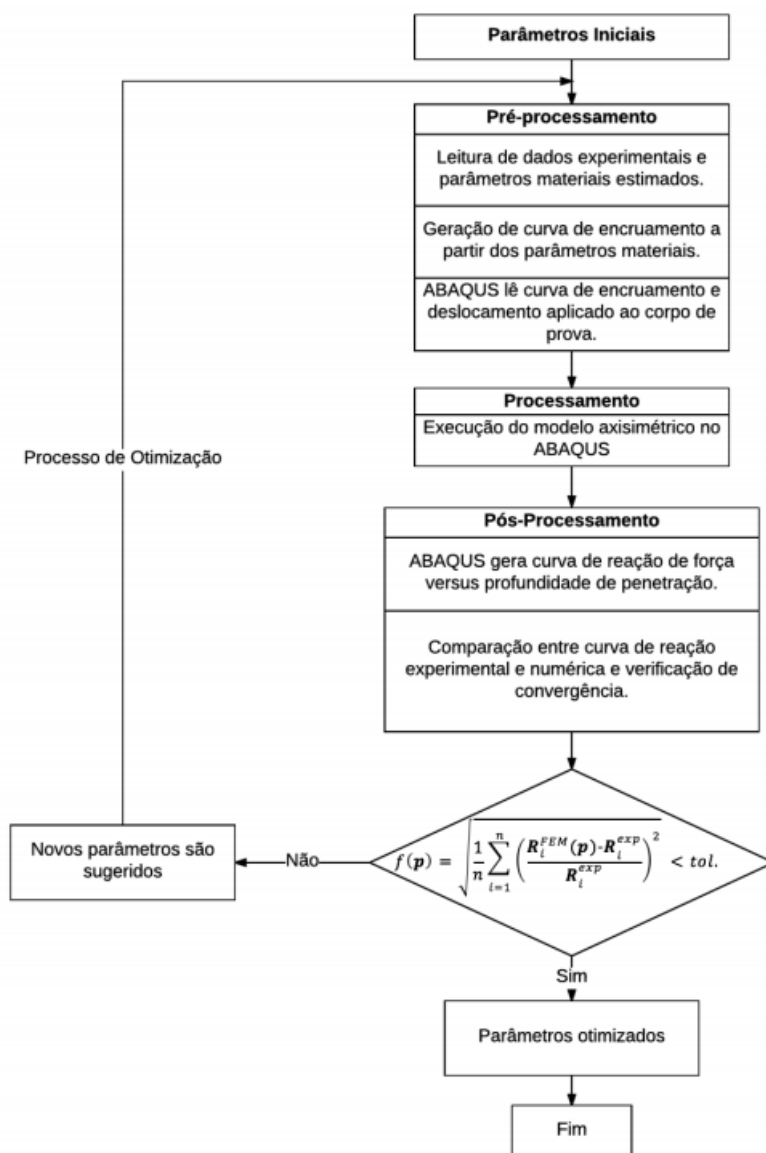


Figura 3.8: Processo de otimização seguido para parametrização.

A otimização é um processo de ajuste de curvas, conforme pode ser observado no fluxograma da Figura 3.8. Quando comparado ao ensaio de tração que produz automaticamente uma rica fonte de dados, cada ensaio de dureza Brinell produz somente um ponto em sua curva de reação. Portanto, para que o processo de otimização produzisse melhores resultados, quatro ensaios de dureza Brinell nas configurações HBW 2,5/62,5, HBW 2,5/31,25, HBW 2,5/15,625 e HBW 2,5/6,25 foram realizados para o material. Assim, a curva de reação experimental foi composta de quatro pontos. Da simulação em elementos finitos, uma curva de reação numérica é gerada e comparada com os dados experimentais. Do processo de otimização obteve-se a curva de reação do ensaio de dureza, mostrado na Figura 3.9

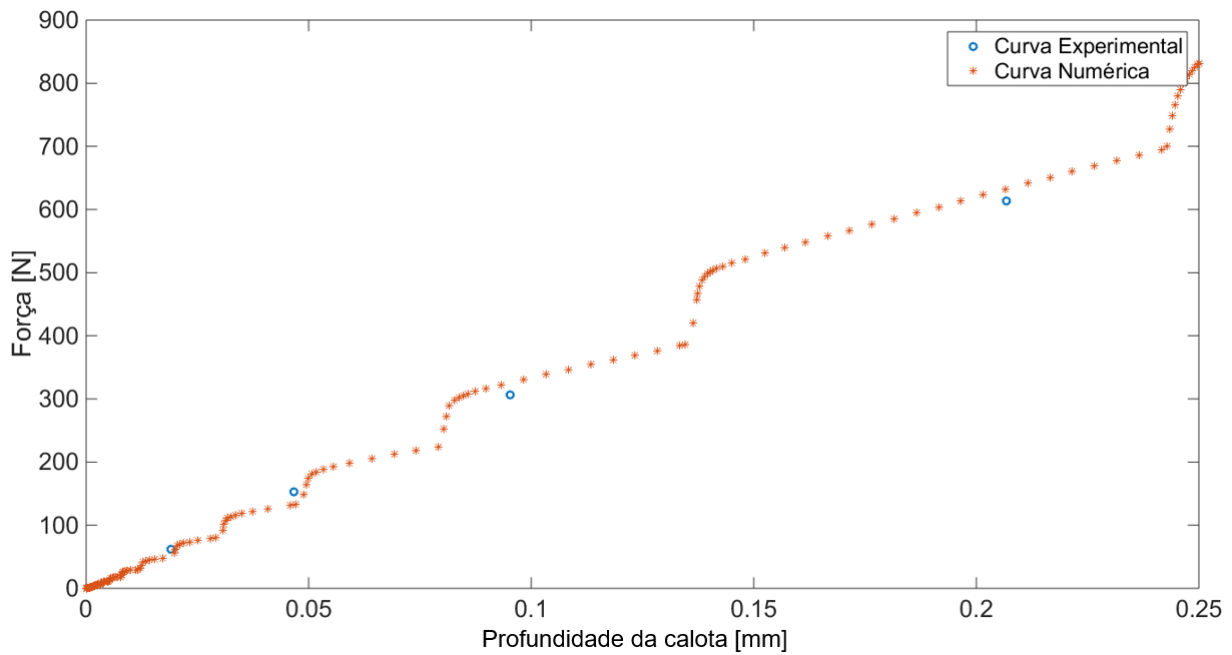


Figura 3.9: Curva de reação resultante do processo de otimização em comparação com os dados experimentais estimados a partir do ensaio de dureza (material estado inicial).

Os parâmetros de encruamento encontrados para o material (vergalhão inicial) estudado ao fim do processo de otimização encontram-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Propriedades mecânicas obtidas com processo de otimização via ensaio de dureza para material em seu estado inicial.

Material	σ_{y0} [MPa]	H [MPa]	n
AISI 1120	124,91	197,24	1,7002

A partir dos resultados gerados e com a utilização da equação 2.77 descrita na seção 2.8, foram obtidos os dados para a criação da curva de encruamento proveniente do material assim como mostrado na Figura 3.10 a seguir, lembrando que esse dados foram obtidos para o material em sua forma original antes da execução do procedimento de trefilação independente de qualquer etapa.

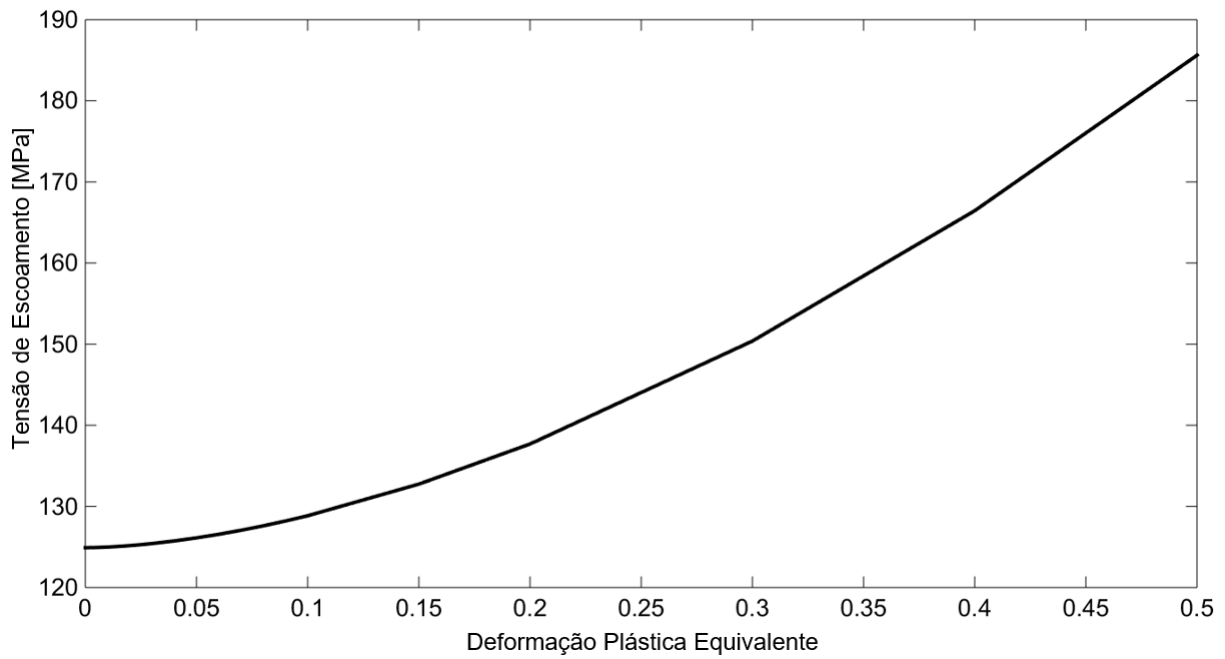


Figura 3.10: Curva de encruamento do vergalhão em seu estado original.

Após encontrar a curva de encruamento característica para o vergalhão em seu estado original, foram feitos os ensaios para cada etapa da trefilação, ou seja, pós feira 1, 2 e 3, sendo os resultados apresentados nas Figuras 3.11, 3.12 e 3.13.

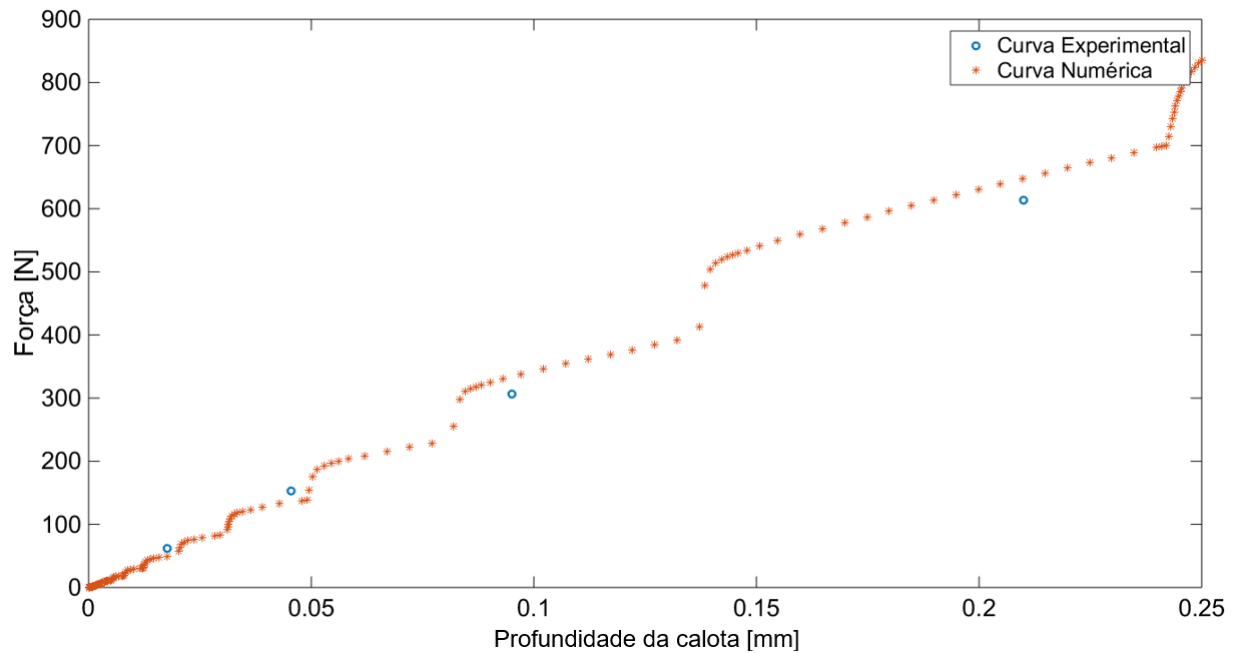


Figura 3.11: Curva de reação resultante do processo de otimização em comparação com os dados experimentais estimados a partir do ensaio de dureza pós feira 1.

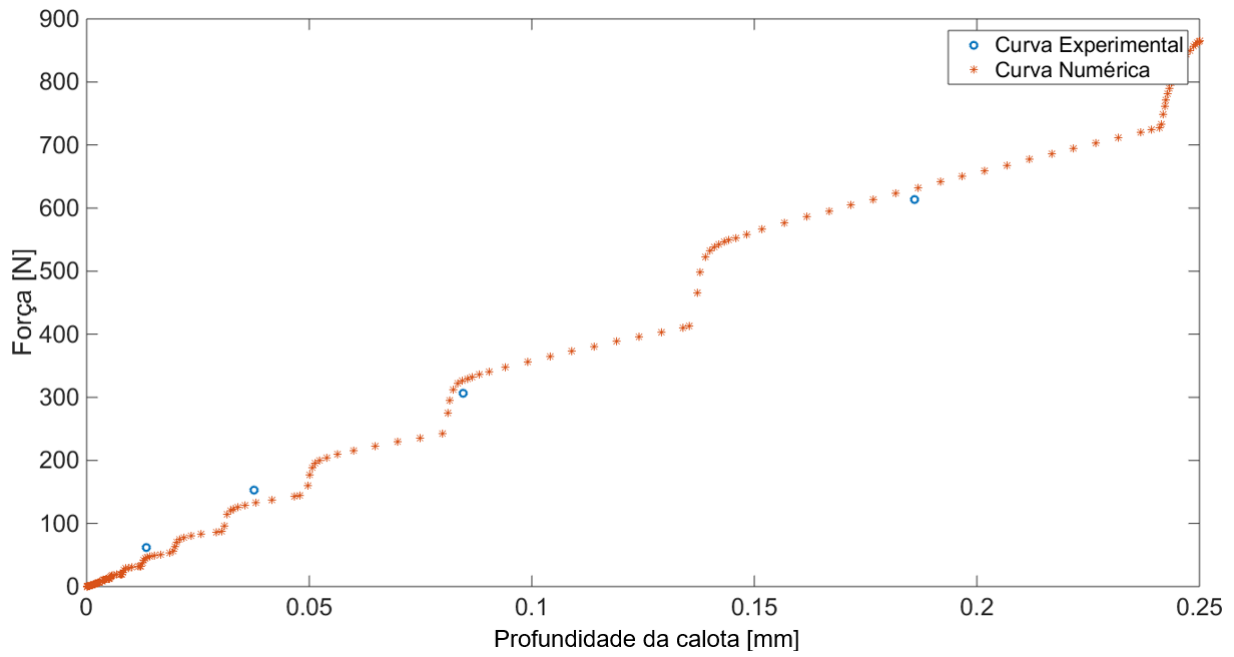


Figura 3.12: Curva de reação resultante do processo de otimização em comparação com os dados experimentais estimados a partir do ensaio de dureza pós feira 2.

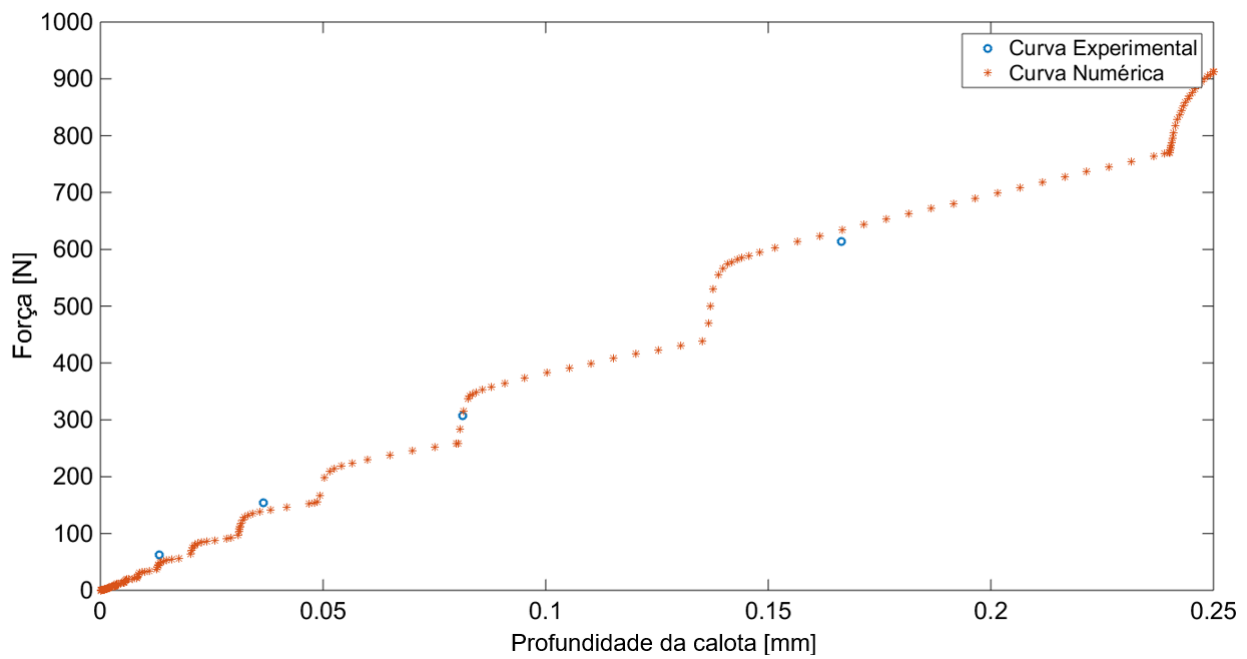


Figura 3.13: Curva de reação resultante do processo de otimização em comparação com os dados experimentais estimados a partir do ensaio de dureza pós feira 3.

Os parâmetros de encruamento encontrados para cada um dos casos (pós feira 1, 2 e 3) ao fim do processo de otimização no programa MATLAB, se encontram na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Propriedades mecânicas obtidas com processo de otimização via ensaio de dureza para material estudado em cada etapa do processo.

Pós feira	σ_{y0} [MPa]	H [MPa]	n
1	123,30	120,69	0,9533
2	132,10	117,17	1,0500
3	143,10	109,70	1,0500

Para finalizar a análise experimental, a partir dos resultados gerados e com a utilização da Equação 2.77, foram obtidos os dados para a criação da curva de encruamento proveniente do material pós feira 1, 2 e 3 assim como mostrado na Figuras 3.14 a seguir:

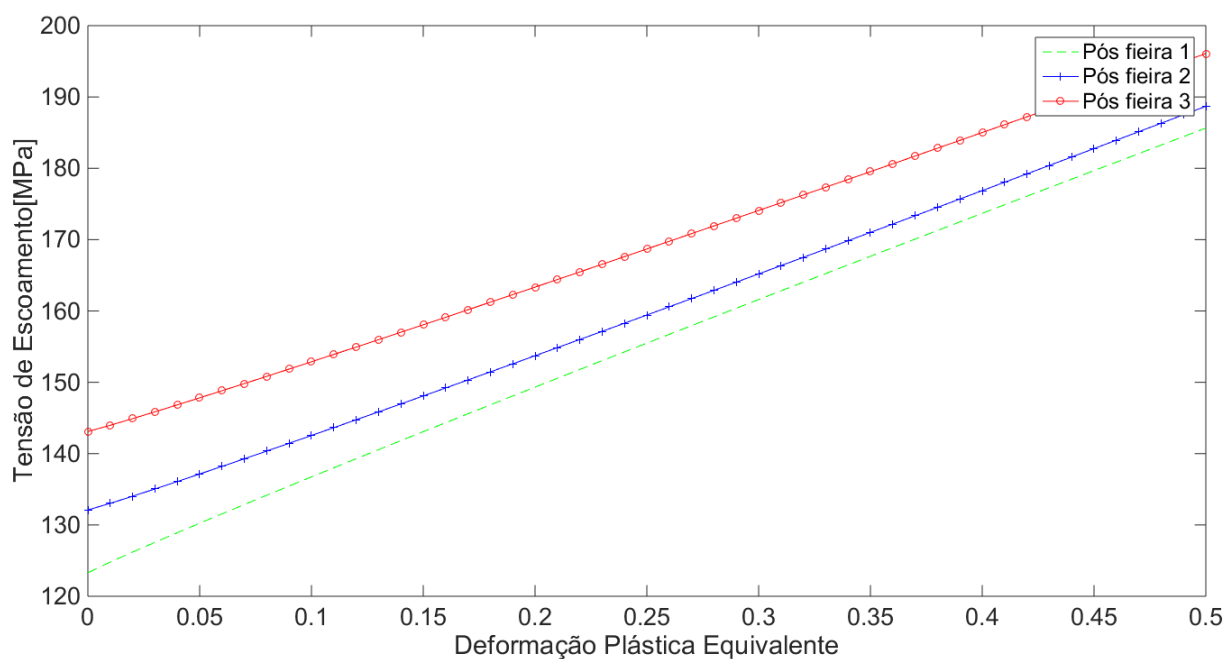


Figura 3.14: Curvas de encruamento geradas a partir de dados experimentais pós feira 1, 2 e 3.

Os resultado apresentados na Tabela 3.3 e na Figura 3.10 serão utilizados como dados de entrada para a simulação numérica do processo de trefilação. Contudo os dados apresentados na Tabela 3.4 e na Figura 3.14 servirão de base de comparação com os resultados numéricos apresentados no Capítulo 4.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

Este capítulo do trabalho consiste na realização de simulação numérica que busca reproduzir de maneira real as condições apresentadas no processo de trefilação utilizado comercialmente. A modelagem foi feita através de programação em Python (Anexo I.4) Assim, este capítulo é dividido em três etapas. Na primeira, são demonstrados os parâmetros do material adquiridos através de ensaios experimentais de corpos de prova fornecidos por empresa do seguimento com o intuito de gerar informação para aplicação em ambiente computacional, na segunda seção é apresentada a análise por elementos finitos que resulta na determinação e validação do comportamento do material durante procedimento de ensaio e por fim é feita a apresentação dos dados gerados pelo experimento computacional em elementos finitos.

4.1 GEOMETRIA DO PROBLEMA E MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

O modelo desenvolvido para descrever o processo de trefilação foi um modelo axissimétrico utilizando como base para cálculos apenas uma seção plana do fio/fieira, com simetria axial no eixo central deste modelo. Esta escolha reduz o tempo de cálculo por solucionar menor quantidade de variáveis (repetidas) nas simulações e que os resultados sejam extrapolados para o restante da geometria. 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 Figura 4.1, foram definidos como radial (X) que representam o sentido do movimento de compressão e relaxamento do fio ao sofrer redução de área da seção transversal, longitudinal (Y) correspondente ao sentido da trefilação e circunferencial (Z) referente seção circular do fio.

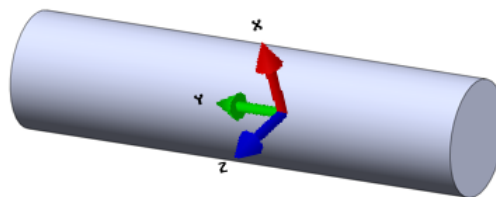


Figura 4.1: Eixos de referência utilizado na barra.

Para simular o processo de trefilação, foi empregado o software comercial de elementos finitos ABAQUS/CAE em sua versão 6.14-1 utilizando-se da linguagem Python para parametrização dos dados de entrada do processo de estudo neste trabalho.

A simulação numérica foi dividida em duas etapas, onde cada etapa constitui um passo (*step*)

do modelo. No primeiro passo, é aplicado um deslocamento na barra em sua face frontal de 60mm no sentido negativo do eixo Y, sendo as feiras mantidas engastadas durante todo esse deslocamento inicial. No segundo passo é aplicado um deslocamento nas feiras em 2mm no sentido do eixo X com o objetivo de manter somente as tensões residuais presentes no sistema. O deslocamento nas feiras foi aplicado nos pontos de referência RP1, RP2 e RP3 que fazem parte da superfície das feiras 1, 2 e 3 respectivamente. Esse procedimento foi definido para facilitar a retirada dos dados necessários após a execução da simulação.

As condições de contorno (Figura 4.2) foram inseridas no modelo levando-se em conta o procedimento utilizado na indústria e a simetria apresentada pelo problema. A adoção do módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) foram 65[GPa] e 0.3 respectivamente [Arnold 1996].

O intervalo para o coeficiente de atrito utilizado na trefilação com lubrificação é estimado entre 0.03 e 0.06 [Filho et al. 1997]. O processo de trefilação do qual foi retirado o material de teste na indústria fornecedora, é dado de maneira totalmente submerso à lubrificantes com fluxo contínuo de rotação. Devido à essa condição pré posta, foi desconsiderado o efeito do atrito e temperatura na simulação numérica em MEF.

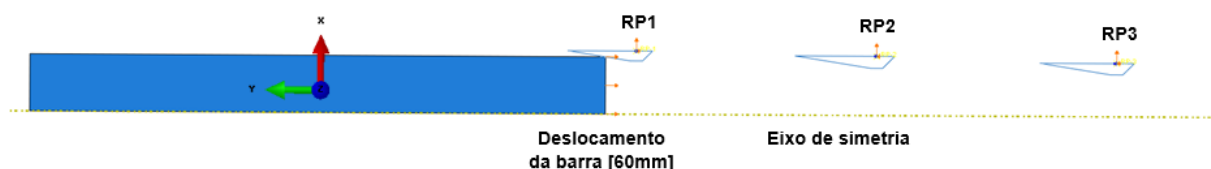


Figura 4.2: Condições de contorno e pontos de referência para aplicação de deslocamentos.

4.1.1 Geometria do Fio/Fieira

A Figura 4.3 apresenta o modelo desenvolvido para simulação juntamente com o detalhamento de todas as partes. Foi modelado somente a metade da barra, com raio inicial (R_i) antes da trefilação de 4,765 mm passando por três reduções (feiras) até chegar em 3,497 mm. O comprimento da barra (C) está estipulado no valor de 50 mm com tamanho suficiente para apresentar, após a simulação, parte sem deformação plástica, com redução da primeira fieira, segunda e terceira sucessivamente. A distância entre as feiras foi setada para 15 mm, distância essa suficiente para provocar uma região de estabilização das tensões nos casos que serão estudados.

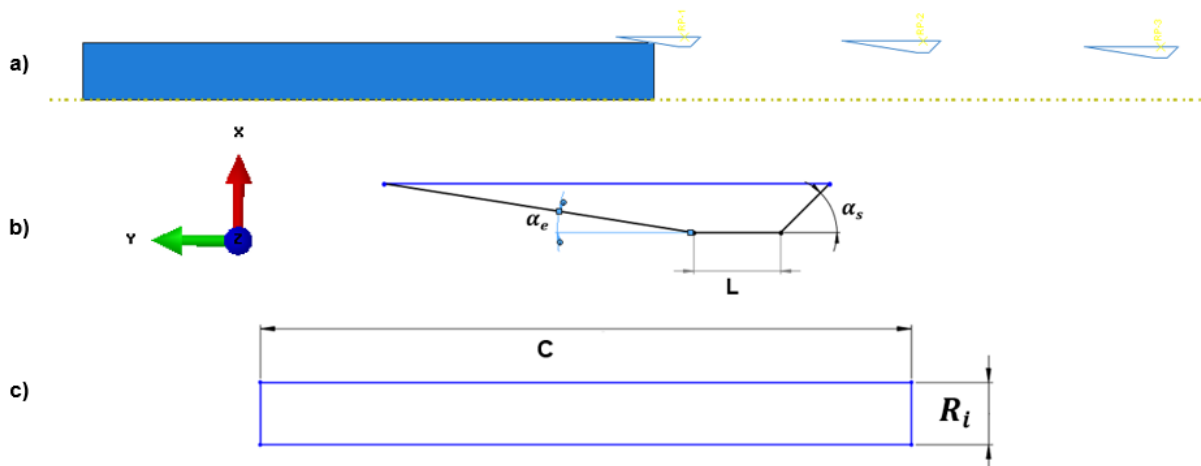


Figura 4.3: a) Ambiente Abaqus com modelo geométrico definido para simulação. b) Geometria definida para a fieira. c) Geometria definida para a barra.

L - paralelo ($1/3$ do diâmetro da redução);

α_e - ângulo de entrada (9°);

α_s - ângulo de saída (45°);

C - comprimento da barra (50mm);

R_i - raio inicial.

Foi criado modelo bidimensional (Figura 4.4) para uma melhor visualização das dimensões, mostrando as medidas que foram utilizadas na análise de elementos finitos. Lembrando que todas essas variáveis estão programadas para serem modificadas dentro de rotina em Python criada para execução deste trabalho.

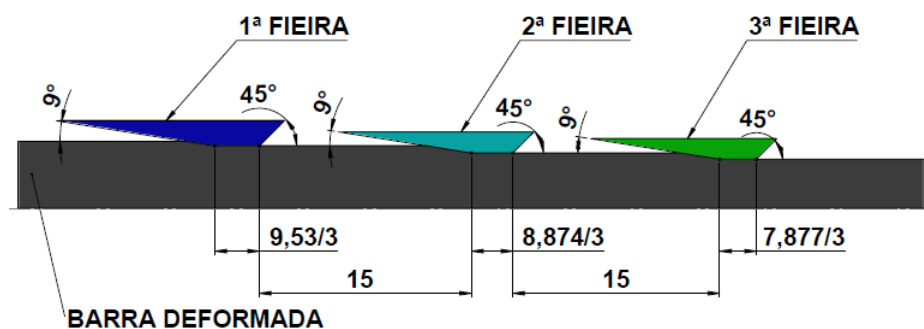


Figura 4.4: Modelo bidimensional axissimétrico com dimensões em milímetros e graus.

4.1.2 Malha de Elementos Finitos

A malha de elementos finitos é constituída de elementos bidimensionais, com quatro nós, integração reduzida (CAX4R) por duas justificativas, menor custo computacional (menor número de pontos de Gauss) e a tendência de tornar os elementos mais flexíveis. Para a barra, a malha

foi construída de forma estruturada para aumentar o nível de discretização na área de interesse. Por ter sido definida como elemento rígido, a feira não apresenta controle de malha considerando essa aplicação, sendo que não haveria influência nos resultados. Para a barra, foram testados quatro tamanhos diferentes de elemento: 0.4 mm, 0.3 mm, 0.2 mm e 0.1 mm.

Para o estudo de convergência da malha foram utilizados os valores das deformações plásticas equivalentes (PEEQ) (Figura 4.6) e tensões de von Mises (Figura 4.7) lidas ao longo de um caminho na superfície da barra mostrado na Figura 4.5.

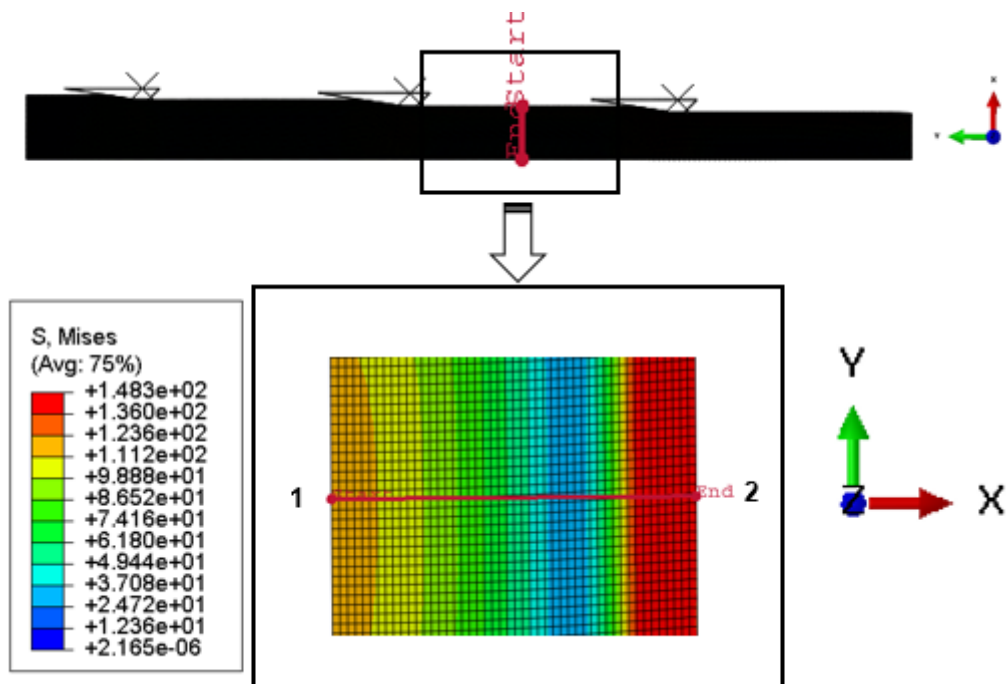


Figura 4.5: Caminho definido para tomada de resultados e análise da malha de elementos finitos.

O caminho definido na seção tem como objetivo captar os pontos que serão estudados ao longo desse trabalho, ou seja, local de estabilidade de tensões após e antes do contato com a feira mais próxima. Neste caso, foi escolhido um local de referência para que possa ser comparado o nível de convergência dos resultados com a utilização do refinamento de malha. O caminho se inicia no ponto "1" (lado interno - eixo de simetria) seguindo ao ponto "2" (lado externo da barra), fazendo a coleta de informações ao longo da seção da barra por completo. É feito o armazenamento dos dados os quais são mostrados em gráfico Tensão x Distância, ou seja, foram colhidos aproximadamente 60 pontos ao longo da barra com valores de tensão e deformação plástica equivalente para cada um dos pontos.

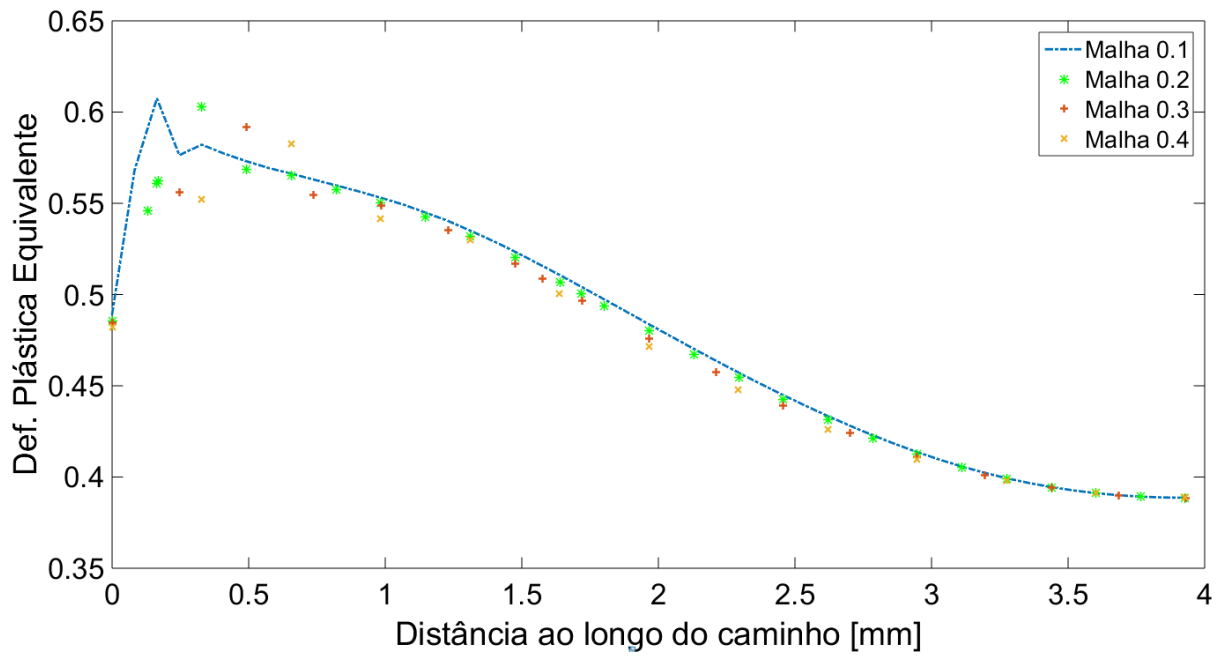


Figura 4.6: Gráfico Deformação Plástica Equivalente (PEEQ) versus Distância ao longo do caminho pós feira 2.

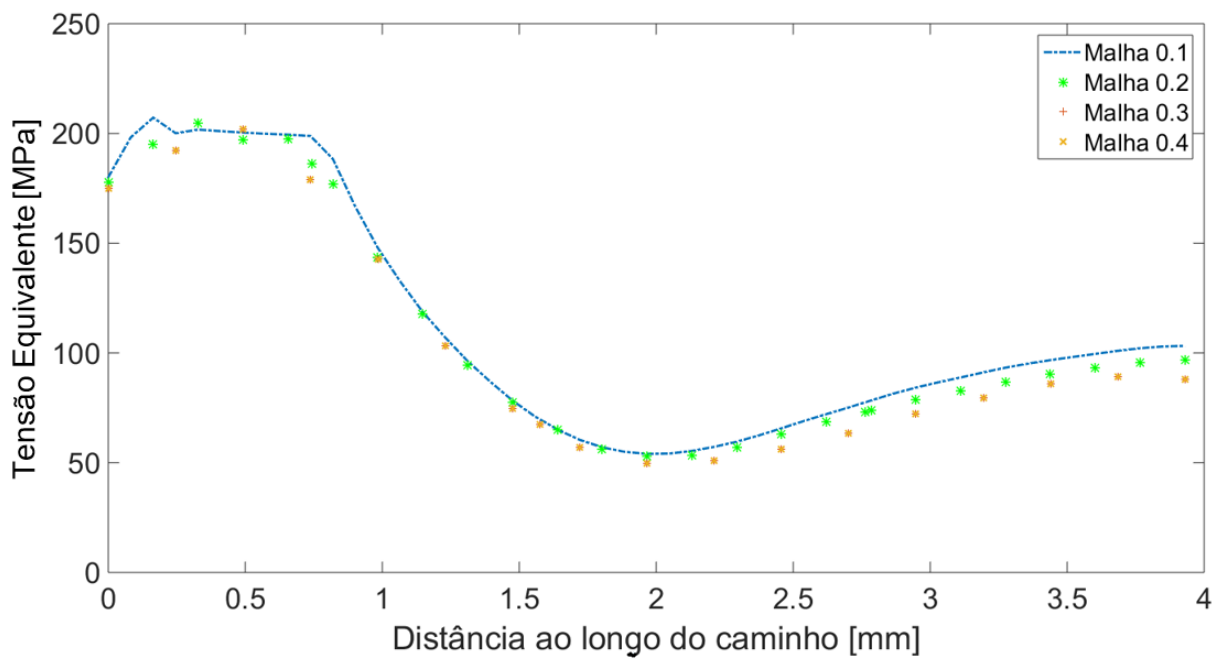


Figura 4.7: Gráfico Tensão von Mises (S) versus Distância ao longo do caminho pós feira 2.

Tabela 4.1: Características de cada malha simulada.

Tamanho do elemento finito [mm]	0.1	0.2	0.3	0.4
Deformação Plástica Equivalente	0.9626	0.9460	0.9223	0.8975
Tensão de von Mises [MPa]	304.2	295.6	287	274
Tempo de Processamento	7h, 19min e 52s	56min e 4s	19min e 36s	10min e 24s
Número de elementos	22992	5760	2560	1440
Número de nós	23520	6025	2737	1573

Ao fazer o estudo da malha, observa-se que existe influência nos resultados obtidos devido ao refinamento aplicado na malha, especialmente por ter optado pela utilização de integração reduzida e malha com poucos elementos. Foi registrada uma diferença de 6.8% entre os valores obtidos através dos elementos 0.4mm e 0.1mm para a deformação plástica equivalente (PEEQ). Já para a Tensão de von Mises, a diferença foi um pouco superior na ordem de 9.9% para os mesmos tamanhos de elementos considerados. Sendo assim conclui-se que a malha utilizada influencia de maneira significativa nos resultados obtidos.

Após a análise de convergência da malha estudada, optou-se por utilizar o elemento 0.1mm pois ele gera resultados que se mostram próximos à convergência final que se daria a partir da escolha de elementos entre 0.02mm e 0.1mm que se assemelha com a dimensão dos grãos encontrados em ligas de alumínio [Alumínio 2004]. Com esse estudo, foi tomada iniciativa de não simular um menor refinamento evitando um maior custo computacional sendo que os resultados se mostraram satisfatórios e sempre convergindo para um valor comum.

Nesta análise utilizou-se uma estação de trabalho do Laboratório de Mecânica Computacional da Universidade de Brasília pertencente ao GFFM. A estação de trabalho é equipada com dois processadores físicos e de 32 núcleos de processamento. Durante as simulações a unidade de processamento gráfico NVIDIA Quadro K4200 também foi habilitada.

4.2 RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações computacionais para o campo de deformação, campo de tensão e campo de tensão residual do modelo desenvolvidos para reproduzir o processo real. Foi gerado um esforço para retratar os campos citados em regime permanente verificado durante simulação. Utilizou-se a malha 0.1mm como referência para representação dos resultados.

4.2.1 Descrição do Campo de Deformação Plástica

Na Figura 4.11 é mostrado o campo de deformação plástica equivalente (PEEQ) gerado durante o processo de trefilação. A Tabela 4.2 mostra de forma resumida os pontos de máximo e mínimo para cada caso, lembrando que os valores atribuídos para a deformação plástica equiva-

lente são independentes de unidade de medida.

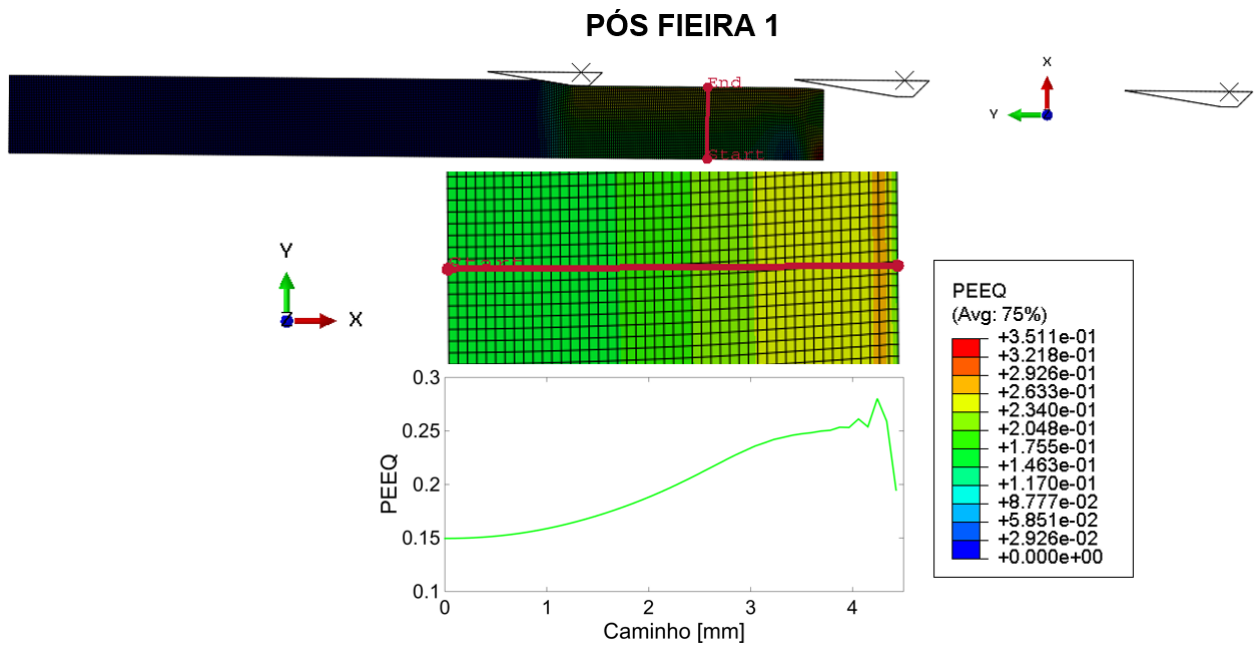


Figura 4.8: Descrição do campo de deformação na barra pós fieiras 1.

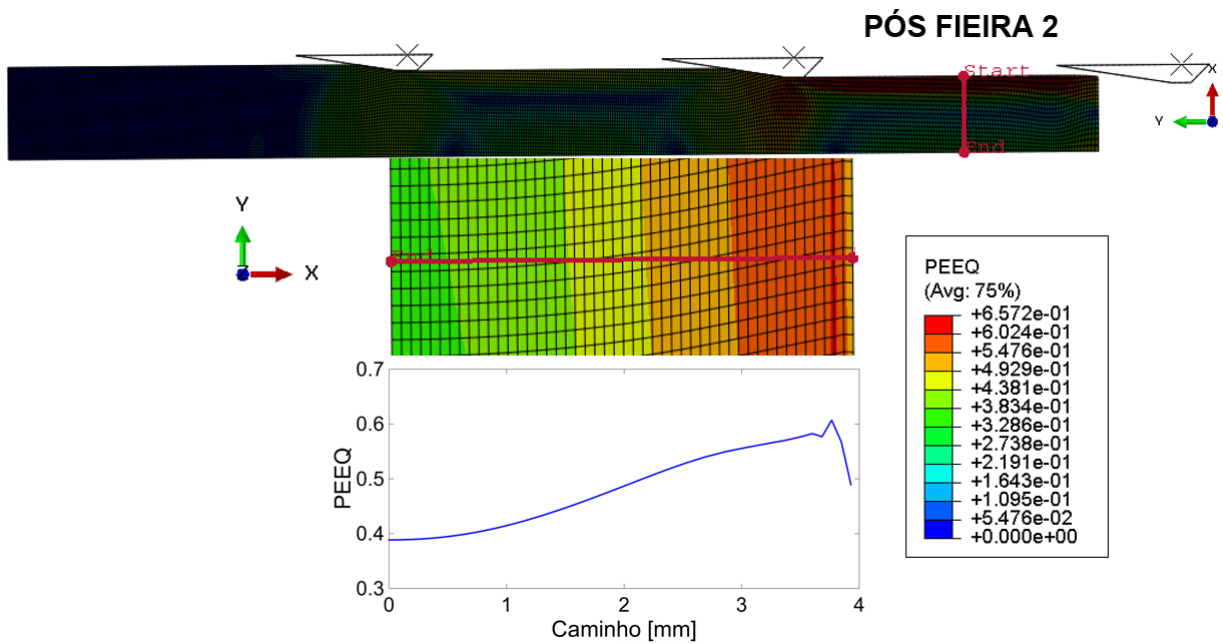


Figura 4.9: Descrição do campo de deformação na barra pós fieiras 2.

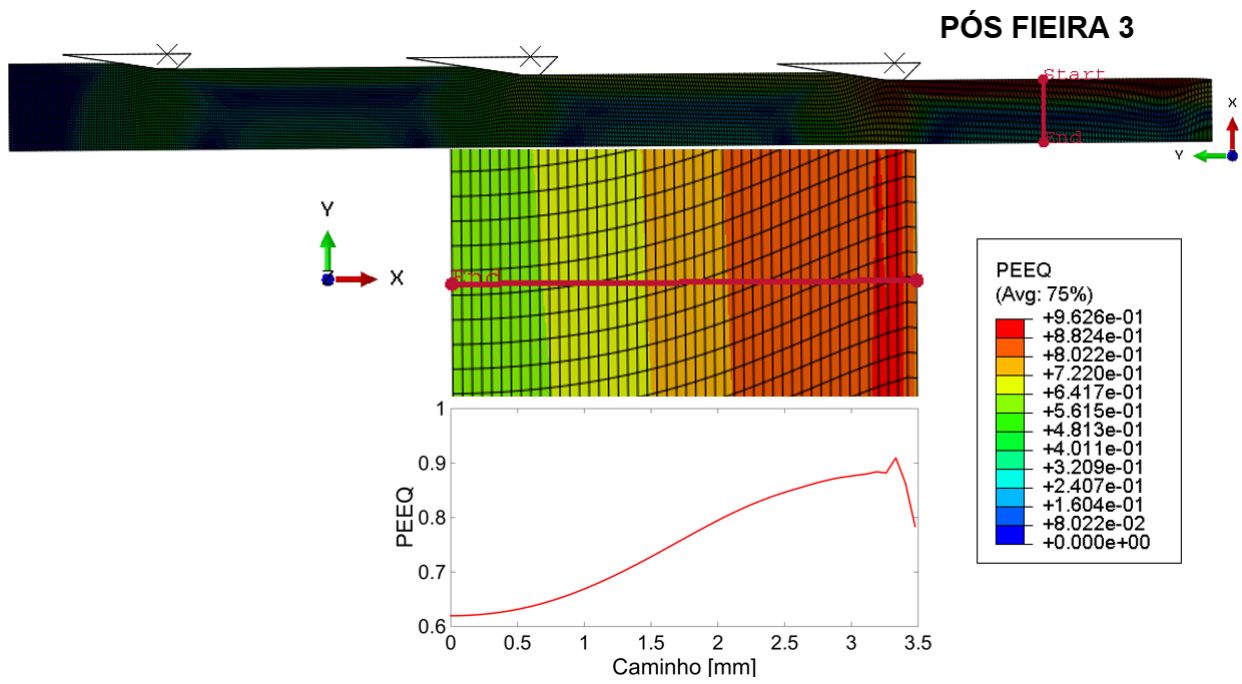


Figura 4.10: Descrição do campo de deformação na barra pós fieiras 3.

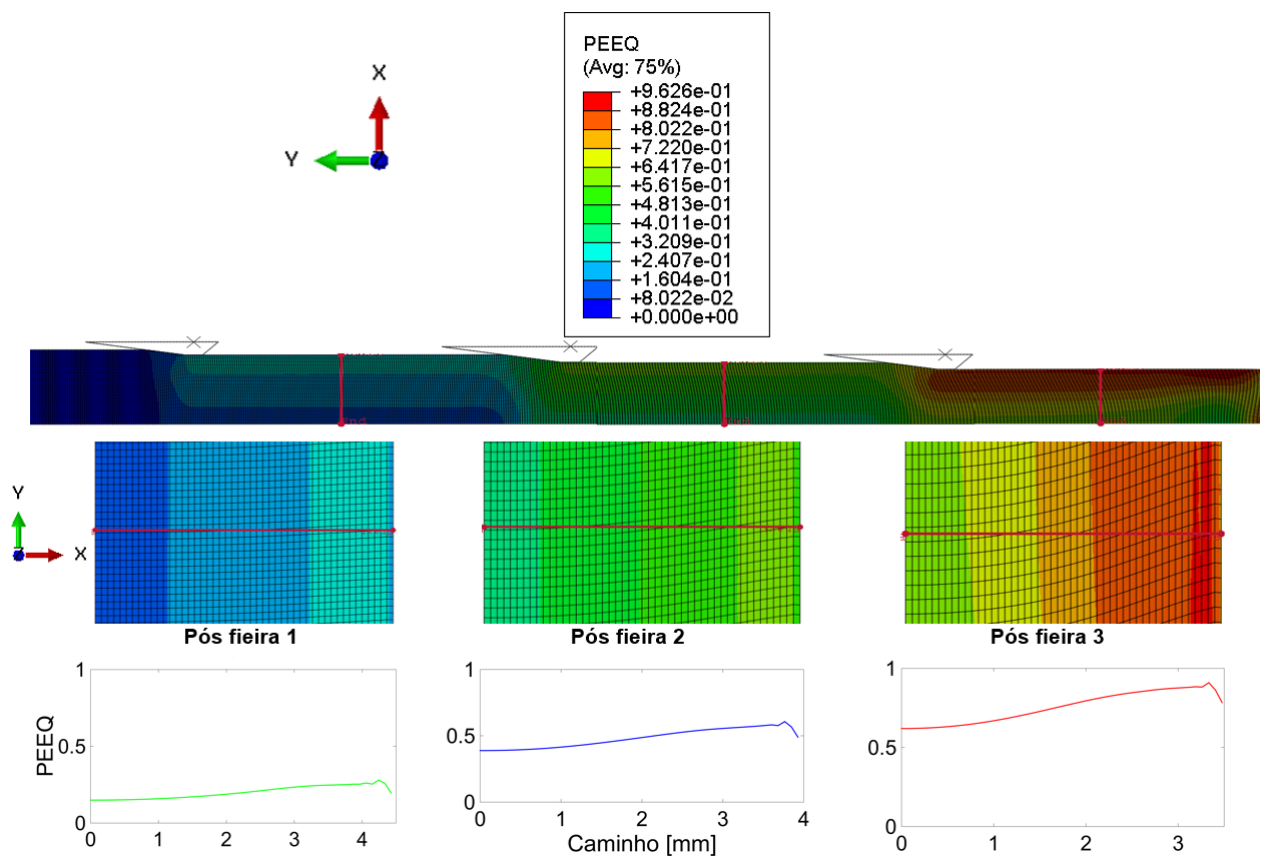


Figura 4.11: Descrição do campo de deformação na barra pós fieiras 1, 2 e 3.

Tabela 4.2: Resultados para o campo de Deformação Plástica Equivalente.

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EQUIVALENTE - PEEQ						
Pós fieira	1		2		3	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
PEEQ	0.2802	0.1496	0.6070	0.3886	0.9097	0.6197

A Figura 4.11 mostra que a área de maior taxa de deformação se encontra na borda da barra diminuindo gradativamente no sentido borda-centro. O valor máximo de deformação encontra-se na ordem de 90% (Tabela 4.2) após a redução na terceira fieira próximo da borda da barra.

4.2.2 Descrição do Campo de Tensão Equivalente

Na Figura 4.15 é mostrado o campo de tensão através do critério de von Mises (S) gerado durante o processo de trefilação. A Tabela 4.3 mostra de forma resumida os pontos de máximo e mínimo para cada caso.

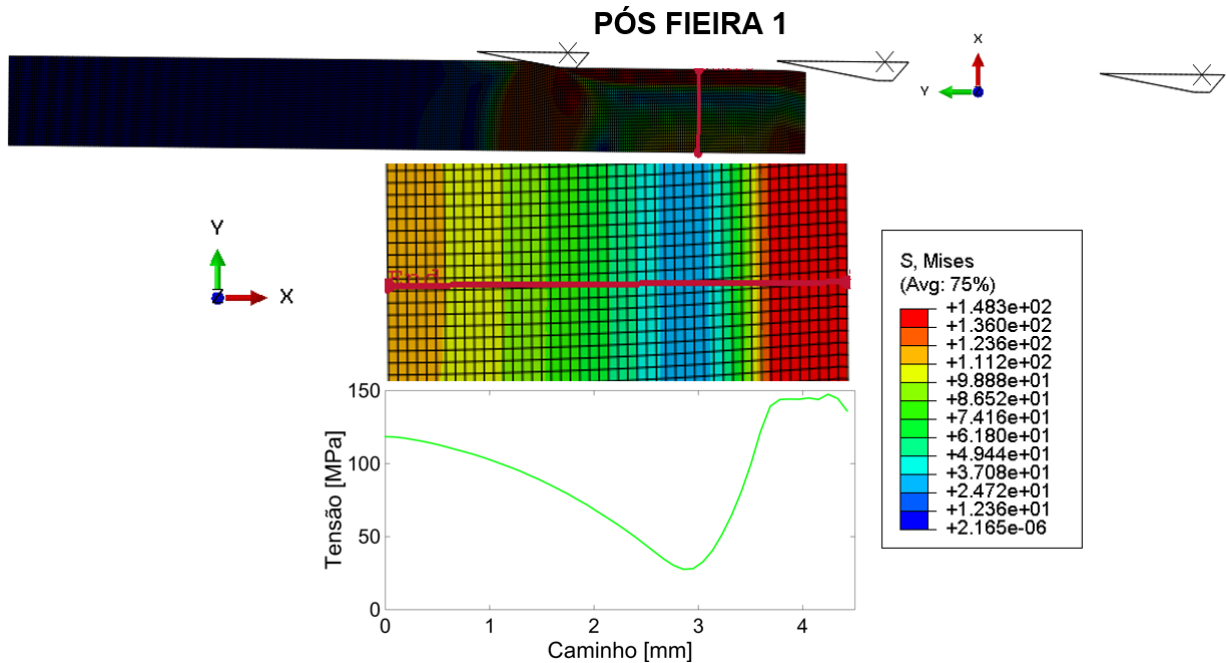


Figura 4.12: Descrição do campo de tensão na barra pós feiras 1.

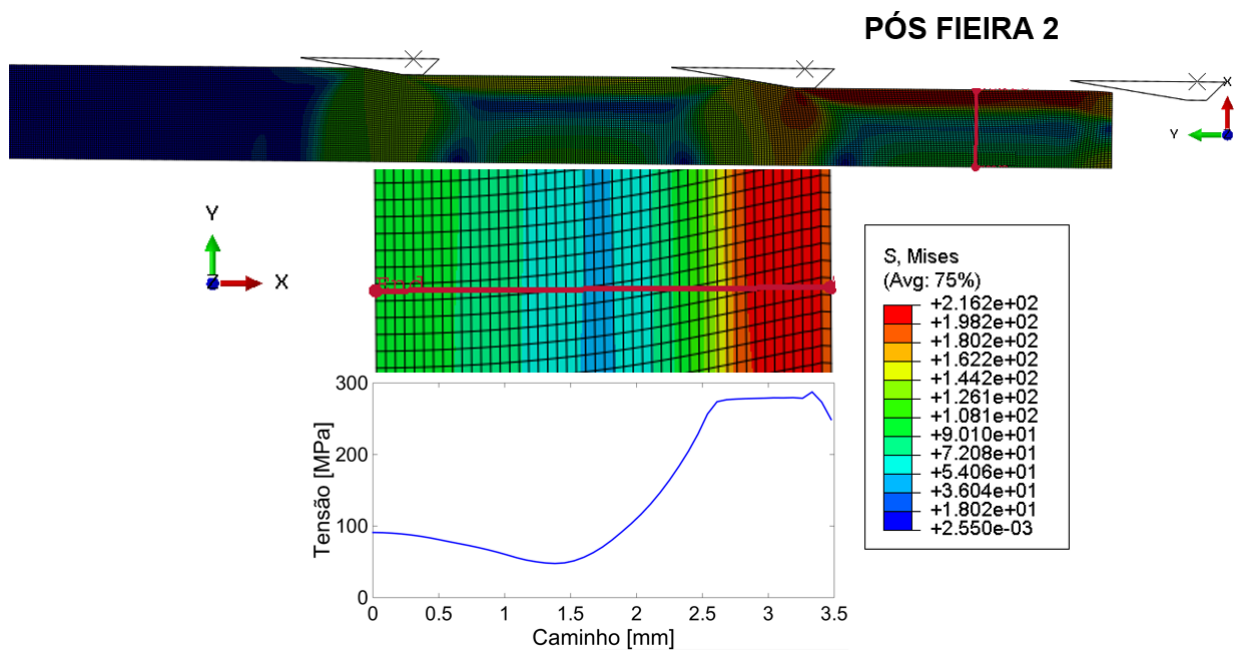


Figura 4.13: Descrição do campo de tensão na barra pós fieiras 2.

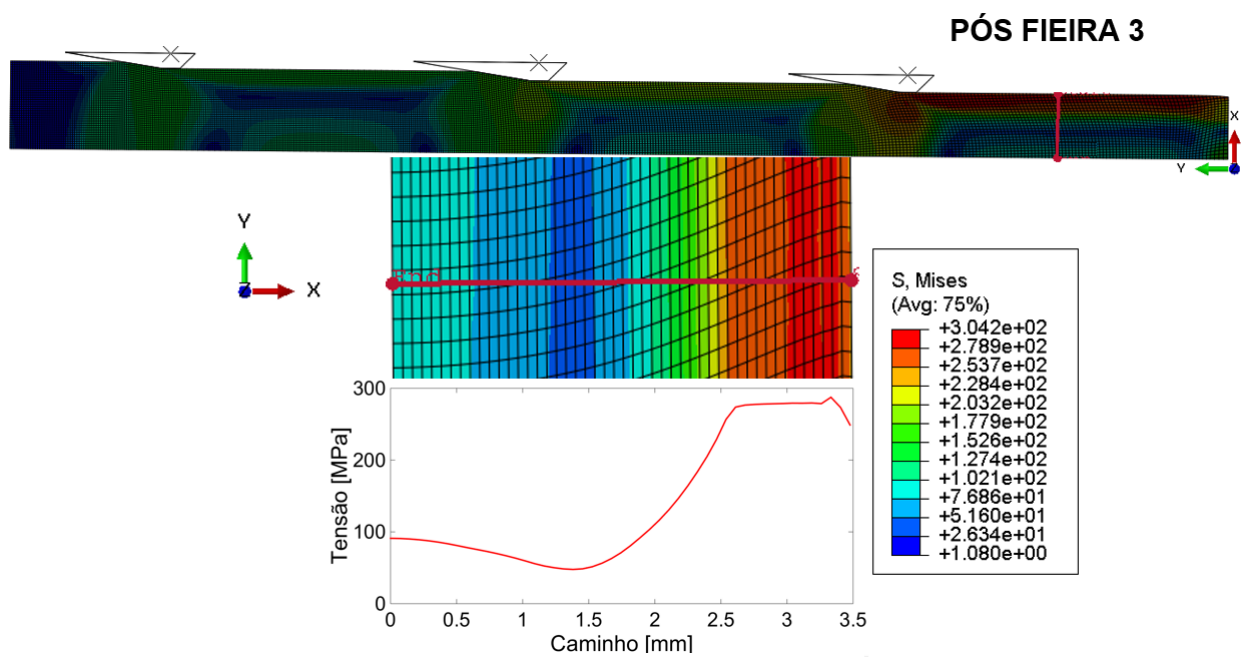


Figura 4.14: Descrição do campo de tensão na barra pós fieiras 3.

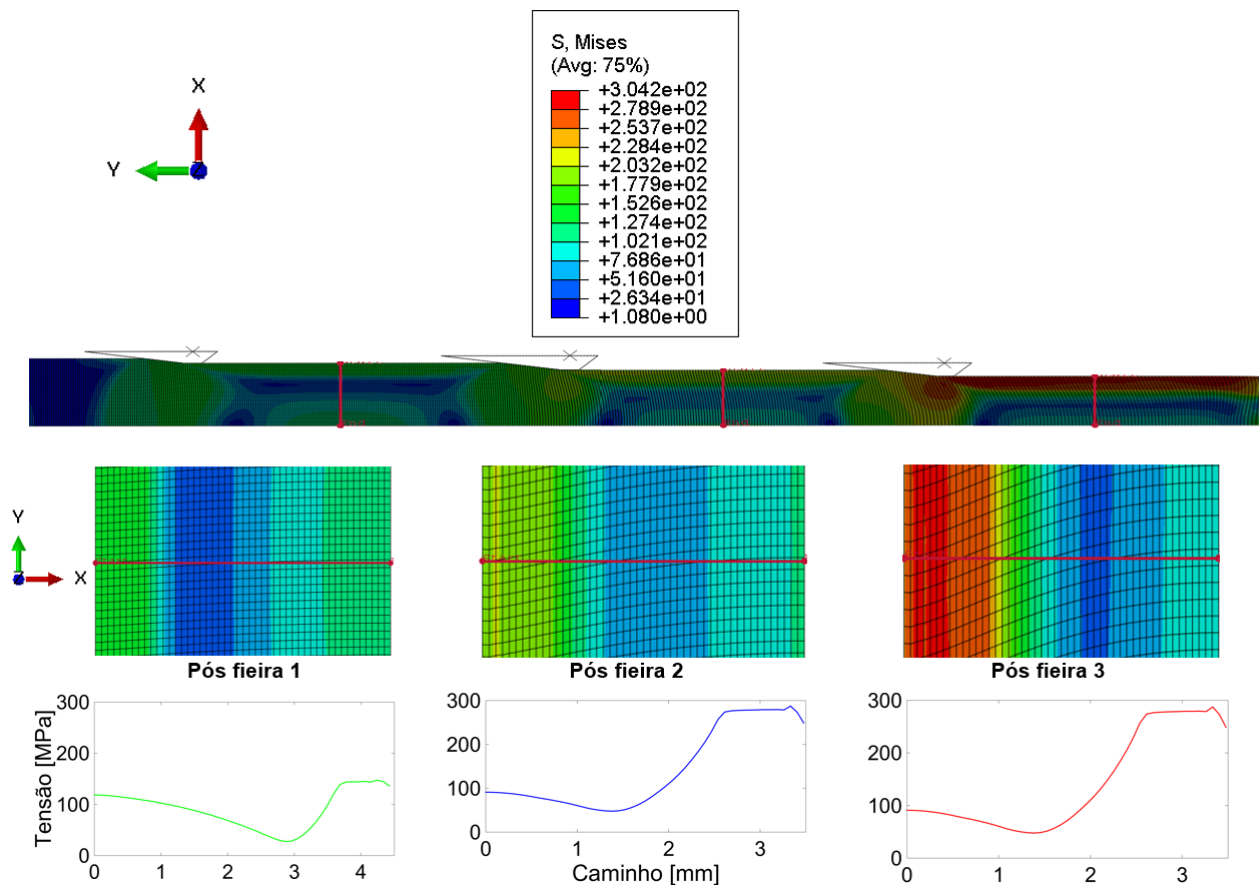


Figura 4.15: Descrição do campo de tensão na barra pós feiras 1, 2 e 3.

Tabela 4.3: Resultados para o campo de Tensão

CAMPO DE TENSÃO - VON MISES						
Pós fieira	1		2		3	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
σ_{eq}	147.4700	27.6312	206.7100	53.9775	287.4500	47.7283

As tensões de von Mises se apresentam em um período inicial relativamente uniformes, sendo que, após o percurso de aproximadamente 1mm no sentido borda-centro, acontece uma queda brusca nos valores de tensão, atingindo seu ponto mínimo logo após este fato. As tensões voltam a crescer, porém esse crescimento apresenta uma inclinação diferente para cada redução.

4.2.3 Descrição do Campo de Deformação Plástica Residual

A Figura 4.16 representa o comportamento das deformações residuais ao longo dos caminhos definidos pós fieira 1, 2 e 3. Para colhimento dos dados nos pontos, foi criado um novo passo (*step*) o qual permite a retirada do contato das feiras com a barra, proporcionando a leitura do campo de tensões e deformações residuais.

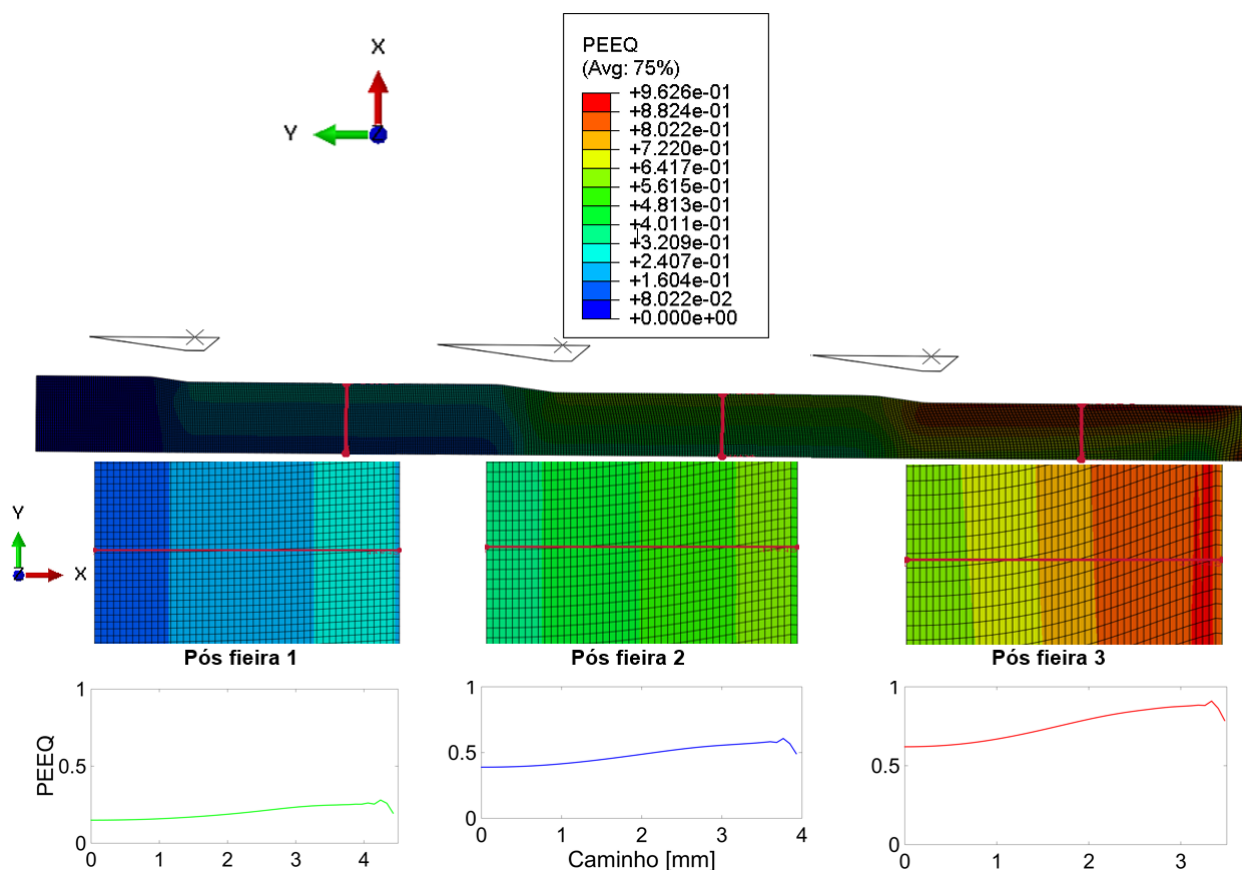


Figura 4.16: Descrição do campo de deformação na barra após o alívio das feiras 1, 2 e 3.

Tabela 4.4: Resultados para o campo de Deformação Plástica Equivalente Residual.

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EQUIVALENTE RESIDUAL - PEEQ						
Pós fieira	1		2		3	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
PEEQ Após Alívio	0.2802	0.1496	0.6070	0.3886	0.9097	0.6197

Percebe-se, fazendo a comparação entre Tabela 4.2 e 4.4, que não há diferença na taxa de deformação plástica após a retirada do contato da fieira com a barra, sendo o valor máximo de deformação encontrando-se na ordem de 90% (Tabela 4.4) após a redução na terceira fieira próximo à borda da barra.

O primeiro passo para realização da comparação experimental x numérica, foi a geração dos gráfico mostrado na Figura 4.17. De forma genérica, foram retirados os valores para a deformação plástica equivalente (PEEQ) ao longo dos caminhos definidos e aplicados na equação 2.77, sendo o resultado gerado apresentado no gráfico abaixo com suas respectivas médias.

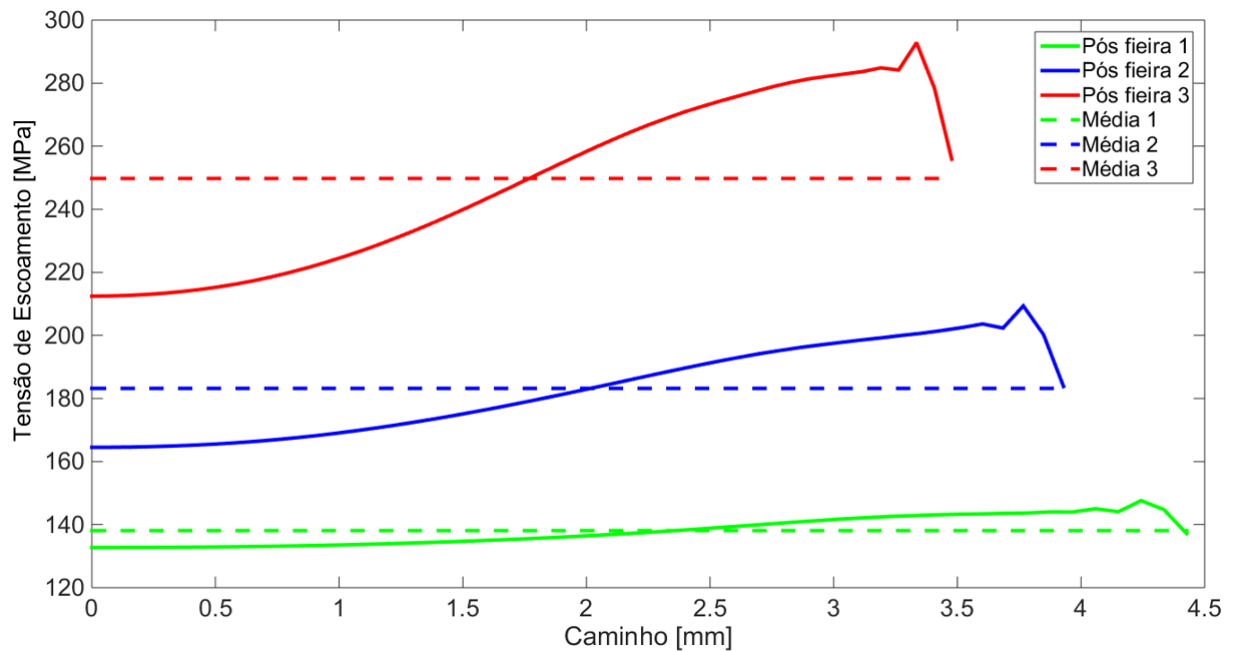


Figura 4.17: Média das tensões calculadas a partir da deformação plástica equivalente pós feira 1, 2 e 3.

O resultado das médias das tensões apresentadas acima, é resumido na Tabela 4.5 abaixo.

Tabela 4.5: Média das tensões encontradas utilizando-se das deformações plásticas ao longo do caminho.

MÉDIA DAS TENSÕES [MPa] - σ_{y0}			
Após feira	1	2	3
σ_{y0}	138,08	183,19	249,76

Para a criação da primeira curva de encruamento numérica, foram considerados os valores das médias encontradas no gráfico acima como valor para a Tensão de Escoamento inicial em cada etapa. Sendo assim, utilizou-se novamente a equação 2.77 para gerar o gráfico a seguir (Figura 4.18) que mostra a curva de encruamento numérica para o alumínio 1120.

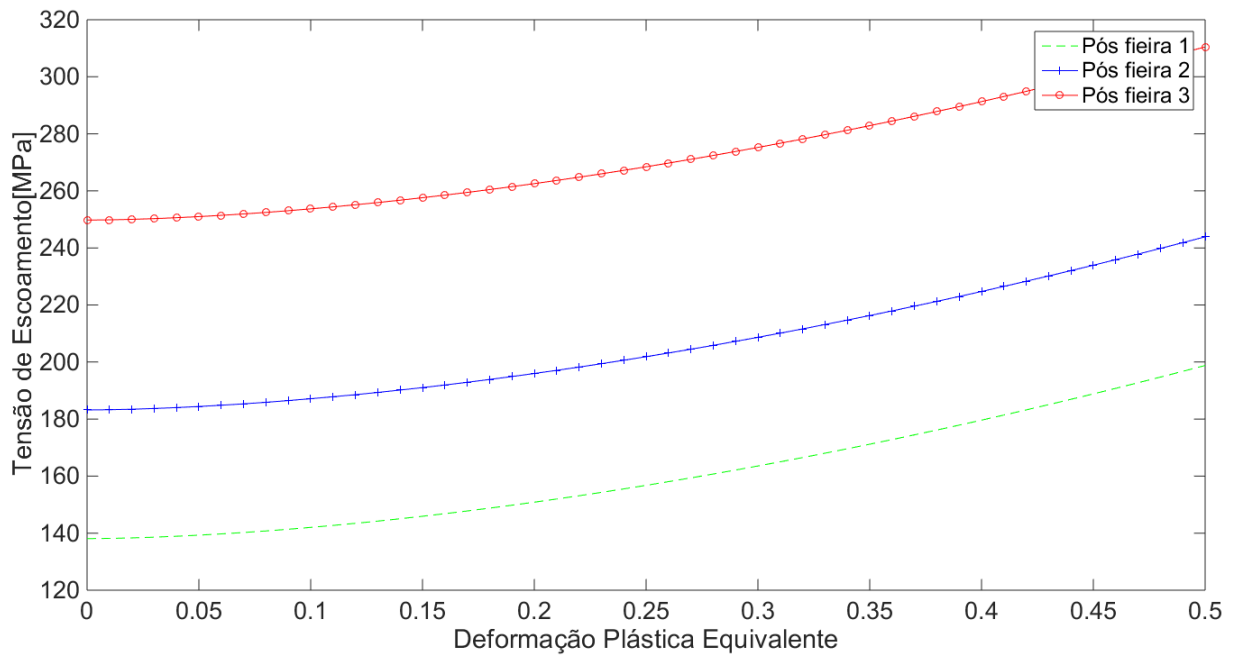


Figura 4.18: Curva de encruamento na barra pós fieiras 1, 2 e 3 considerando a média das tensões calculadas a partir da deformação plástica equivalente.

4.2.4 Descrição do Campo de Tensão Equivalente pós Trefilação

Esta subseção apresenta os resultados para as tensões equivalentes pós processo de trefilação considerando o critério de escoamento de von Mises onde os valores de tensão foram determinados a partir do tensor tensão de Cauchy. Na Figura 4.19 é mostrado o campo de tensão equivalente acumulado após o processo de trefilação ao longo dos caminhos definidos.

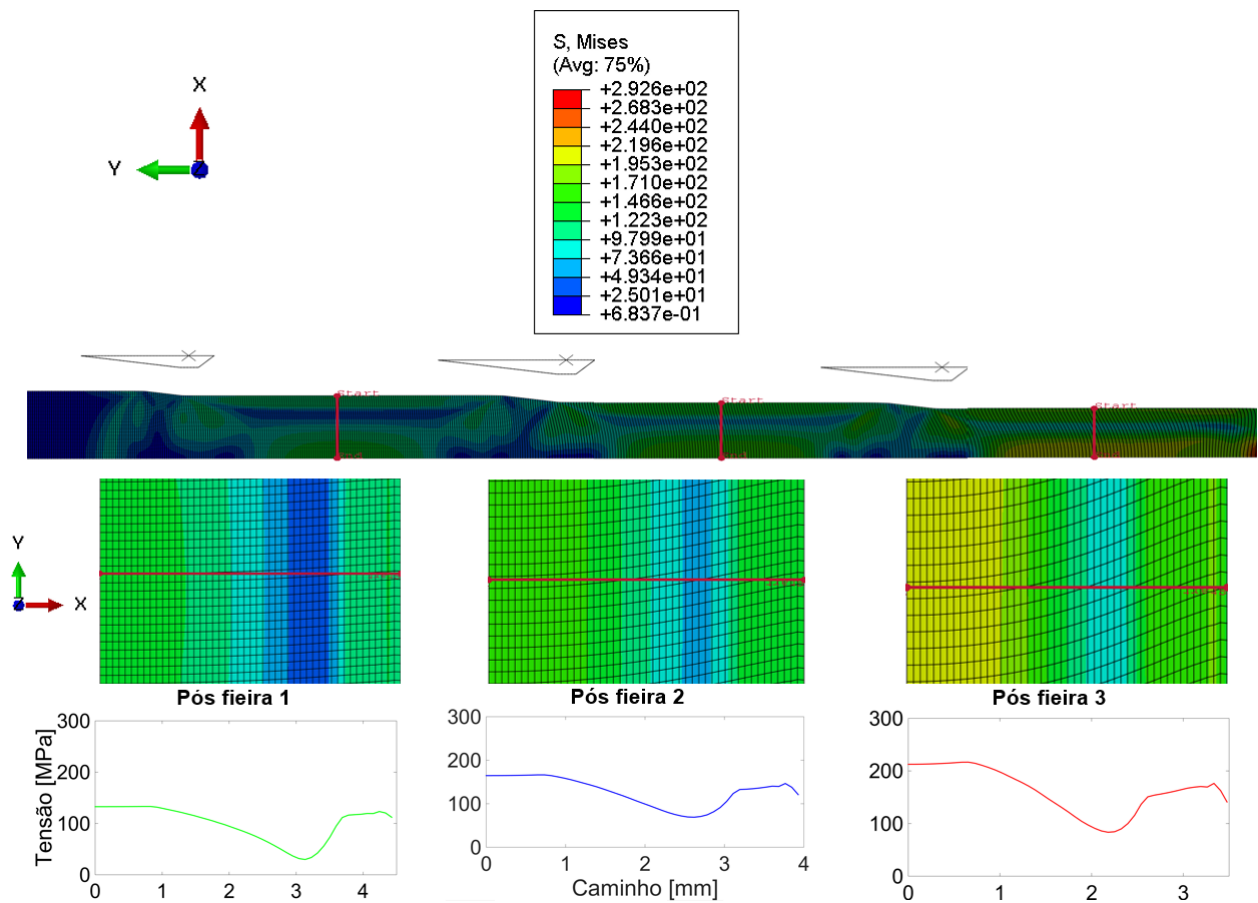


Figura 4.19: Descrição do campo de tensão equivalente (von Mises - "S") na barra pós fieiras 1, 2 e 3.

A Tabela 4.6 mostra de forma resumida os pontos de máximo e mínimo para cada caso estudado considerando as tensões equivalentes pós processo de trefilação.

Tabela 4.6: Resultados para o campo de Tensões Equivalentes pós trefilação considerando von Mises

TENSÕES EQUIVALENTES RESIDUAIS						
Pós fieira	1		2		3	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
σ_{eq} [MPa]	133.1980	29.7122	166.3660	68.9949	216.7090	83.4439

Dando continuidade à lógica anterior, é calculada a média das tensões equivalentes para os casos pós fieira 1, 2 e 3, podendo ser visualizada na Figura 4.20 abaixo:

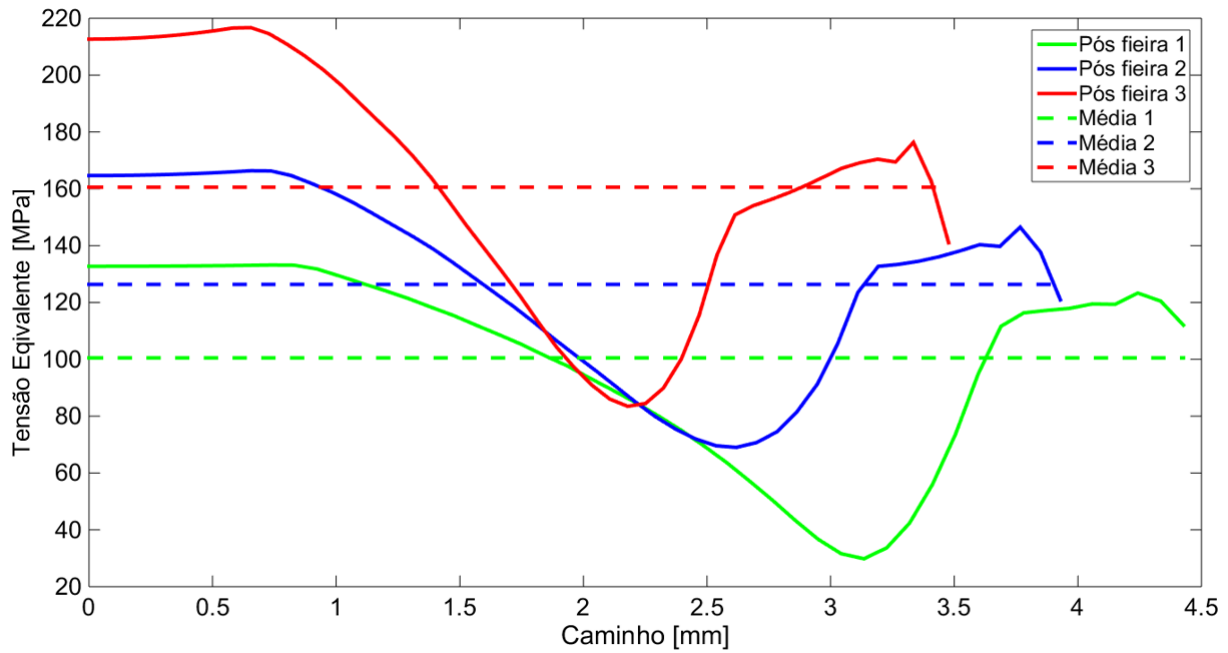


Figura 4.20: Média das tensões equivalente ao longo da barra pós feiras 1, 2 e 3 assim que finalizado o processo de refinação.

O resultado das médias das tensões apresentadas acima, é resumido na Tabela 4.7 abaixo.

Tabela 4.7: Média das tensões equivalentes encontradas numericamente através de elementos finitos.

MÉDIA DAS TENSÕES [MPa] - σ_{eq}			
Após feira	1	2	3
σ_{eq}	100,48	126,79	160,68

Sendo assim é utilizada as médias calculadas seguindo a mesma metodologia anterior para a criação das próximas curvas de encruamento representadas pela Figura 4.21 a seguir:

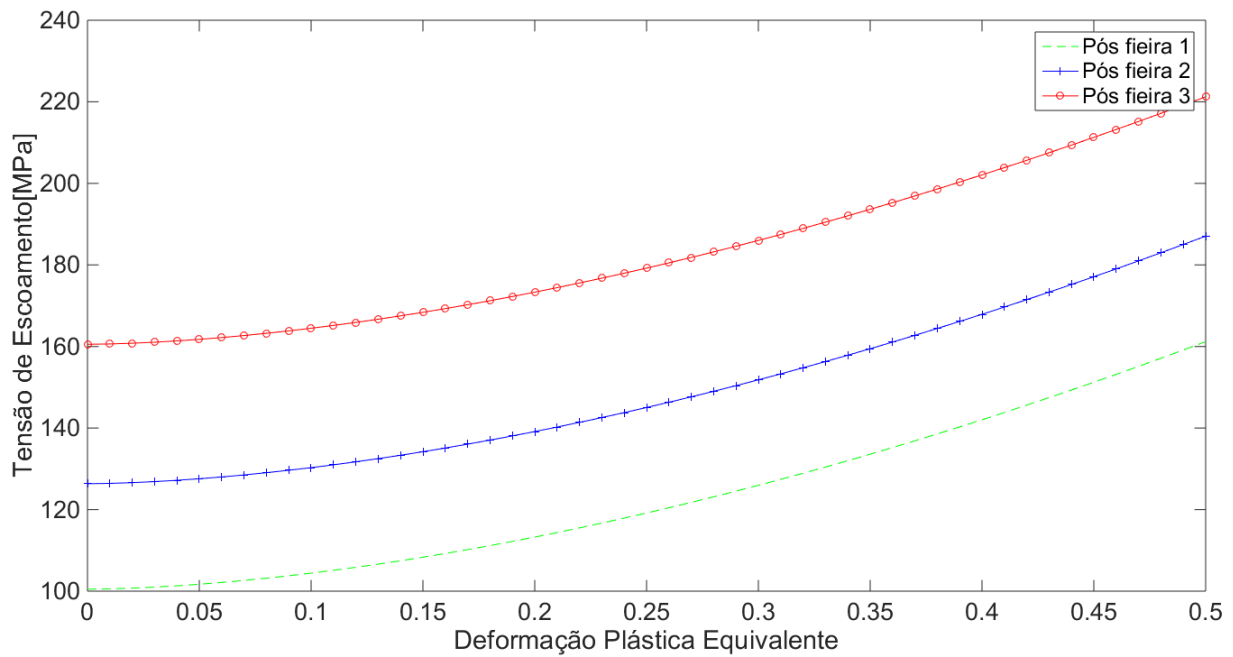


Figura 4.21: Curva de encruamento na barra pós feiras 1, 2 e 3 considerando a tensão equivalente média pós processo de trelição.

4.2.5 Descrição do Campo de Tensão Residual

Nesta subseção são apresentadas as tensões residuais acumuladas pós processo de trelição. Por definição, tensões residuais são as tensões existentes em um corpo sem a manutenção de carregamentos externos ou gradientes de temperatura. Todo sistema de tensões residuais está em equilíbrio. A Figura 4.22 mostra o campo de tensão residual nos caminhos definidos anteriormente.

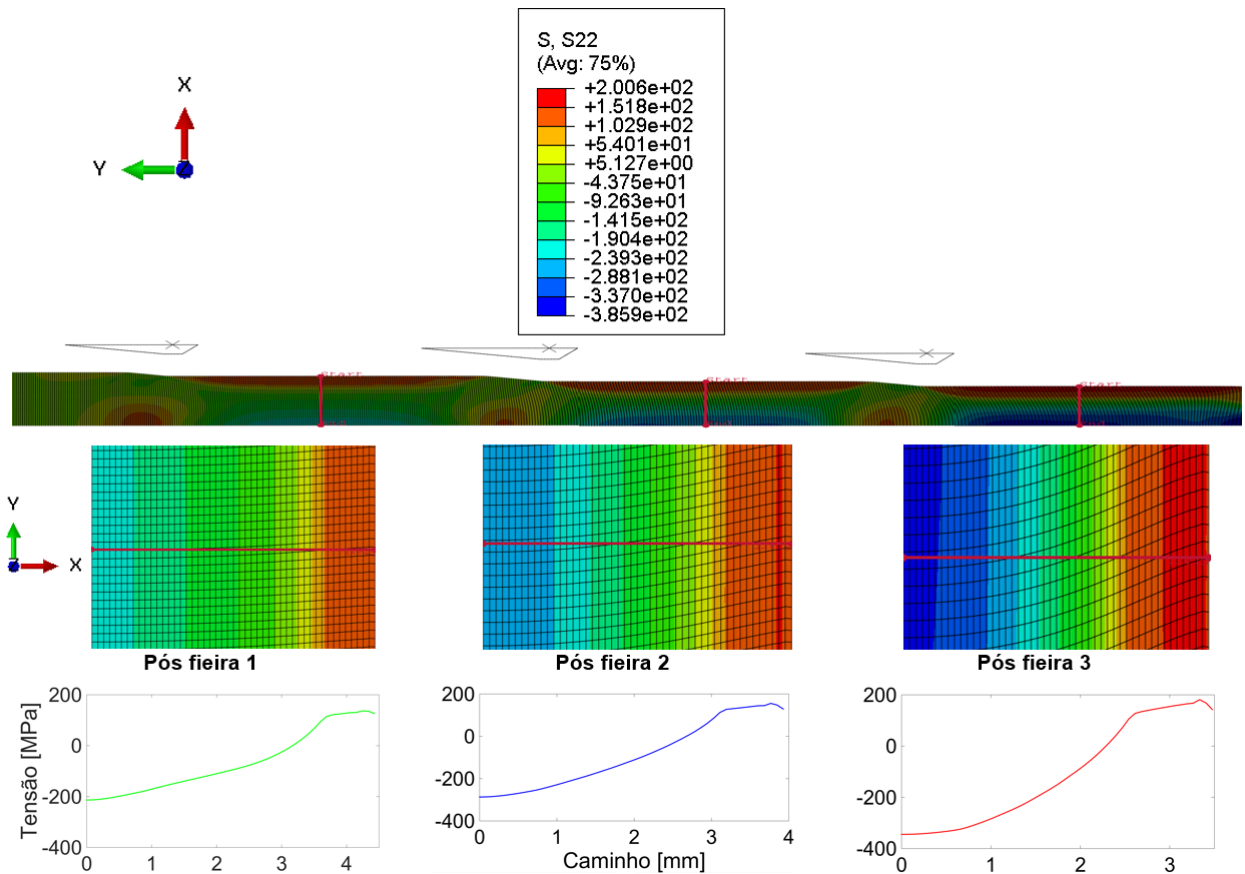


Figura 4.22: Descrição do campo de tensão residual na componente "Y" da barra pós feiras 1, 2 e 3.

No eixo longitudinal "Y", o campo de tensões residuais varia entre tensões de compressão e tração, sendo que as tensões de compressão se encontram no centro do fio diminuindo gradativamente até dar lugar às tensões trativas localizadas na borda do fio.

Por fim, é calculada a média das tensões na componente Y para os casos pós fieira 1, 2 e 3. Neste circunstância, foram considerados os valores absolutos para todas as tensões compressivas (negativas). A Figura 4.23 mostra as tensões residuais ao longo do caminho com suas respectivas médias.

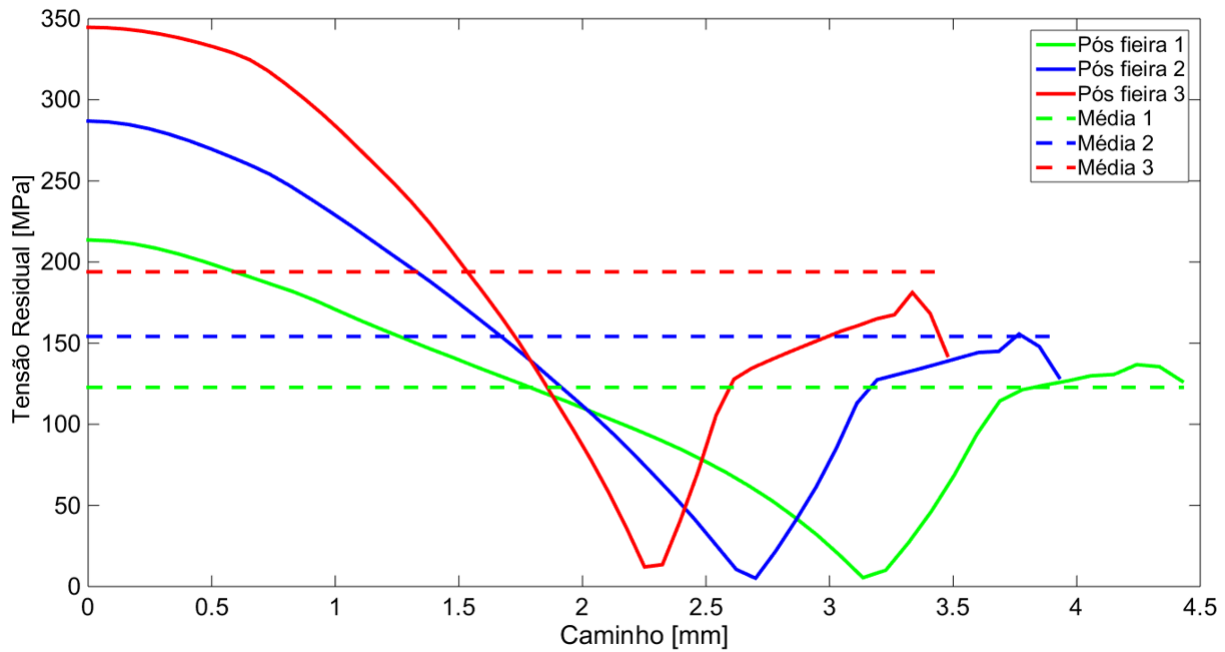


Figura 4.23: Média das tensões na componente Y pós feiras 1, 2 e 3.

A Tabela 4.8 mostra de forma resumida os pontos de máximo e mínimo para cada caso estudado considerando as tensões residuais acumuladas pós processo de trefilação.

Tabela 4.8: Resultados para o campo de Tensões Residuais

TENSÕES RESIDUAIS NA COMPONENTE Y						
Pós feira	1		2		3	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
S22 [MPa]	136.7210	-213.5650	155.5900	-286.9130	181.2020	-344.6380

O resultado das médias das tensões na componente Y apresentadas acima, é resumido na Tabela 4.9 abaixo.

Tabela 4.9: Média das tensões encontradas numericamente através de elementos finitos.

MÉDIA DAS TENSÕES [MPa] - S22			
Após feira	1	2	3
S22	122,75	154,12	194,48

Sendo assim, utilizou-se novamente a equação 2.77 para gerar as curvas de encruamento estimativas para o caso das tensões residuais numérica para o alumínio 1120 (Figura 4.18).

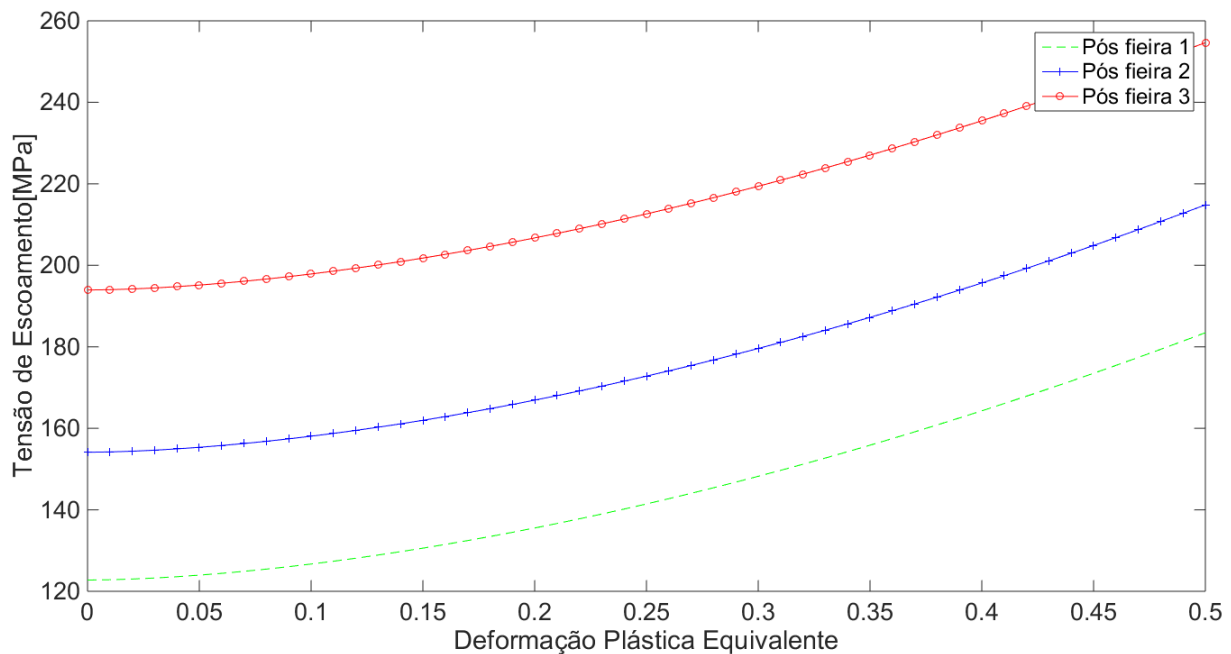


Figura 4.24: Curva de encruamento na barra pós feiras 1, 2 e 3 considerando a tensão residual média na componente Y.

A Tabela 4.10 trás o resumo de todas as médias das tensões acumuladas pós processo de trefilação resultantes do método de elementos finitos realizado neste trabalho.

Tabela 4.10: Média das tensões encontradas numericamente através de elementos finitos.

MÉDIA DAS TENSÕES [MPa]			
Após feira	1	2	3
σ_{y0}	138,08	183,19	249,76
σ_{eq}	100,48	126,79	160,68
S22	122,75	155,16	194,48

4.2.5.1 COMPORTAMENTO DAS TENSÕES RESIDUAIS

O Figura 4.25 abaixo representa o comportamento das Tensões Residuais provenientes do processo de trefilação no eixo axial do fio estudado. Assim como apresentado na seção 2.2, o resultado gerado pelo método de elementos finitos foi compatível à teoria. Vale ressaltar que o eixo na cor preta representa o limiar entre tensões compressivas (negativas) e trativas (positivas). O valor referente à "0" no eixo "X" representa o centro do fio, isso nos mostra que as tensões se iniciam em compressão (X=0) sofrendo alteração ao longo do fio até chegarem em tração. Esse comportamento dos perfis de tensões residuais é obtido devido à redução de área ser maior que 1% (entre 6% e 12% neste trabalho), caso contrário, o sentido das tensões poderiam ser invertidos.

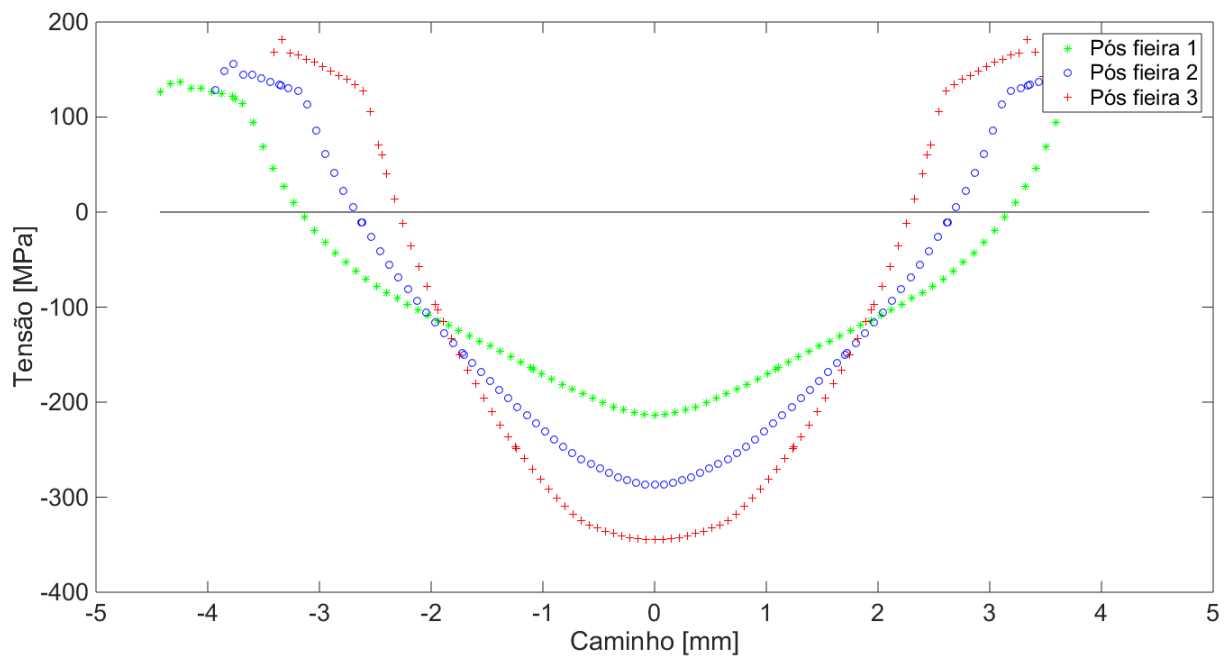


Figura 4.25: Comportamento das tensões residuais ao longo do fio pós feira 1, 2 e 3 considerando eixo axial "Y".

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o objetivo de validar o processo de simulação numérica, buscou-se executar em plataforma computacional, modelo que se assemelha ao utilizado na indústria. Devido a obtenção dos corpos de prova ter sido promovida de acordo com o explicado na seção 3.2, o sistema criado na plataforma ABAQUS/CAE 6.14-1 visa provocar a geração de dados importantes para critérios de estudos dentro do processo de trefilação.

5.1 COMPARAÇÃO NUMÉRICO X EXPERIMENTAL

Com o intuito de se obter as propriedades do material nas etapas pós processo de trefilação, buscou-se realizar a comparação entre os dados obtidos experimentalmente via ensaio de dureza Brinell e as estimativas para as curvas de encruamento retiradas de dados numéricos promovidos pelo ABAQUS.

A Tabela 5.1 a seguir, mostra de forma resumida os resultados numéricos e experimentais obtidos neste trabalho.

Tabela 5.1: Resultados encontrados numericamente e experimentalmente.

Pós feira	1	2	3
Exp - σ_{y0}	123,3	132,1	143,1
Num - σ_{y0}	138,08	183,19	249,76
Desvio Padrão	2,82	26,88	95,05
Cof. Desvio ótimo	5,23	1,90	1,12
σ_{eq}	100,49	126,36	160,54
Desvio Padrão	152,24	149,36	243,68
Cof. Desvio ótimo	0,15	0,04	0,07
S22	122,76	154,13	193,94
Desvio Padrão	454,24	961,37	1358,73
Cof. Desvio ótimo	0,0012	0,0229	0,0374

O coeficiente de desvio ótimo foi encontrado fazendo a subtração do valor numérico e experimental dividindo o resultado pelo desvio padrão encontrado, ou seja, para tensão de escoamento inicial numérico e experimental no pós feira 1: $\frac{138,08 - 123,3}{2,82} = 5,23$. A seguir, serão apresentados gráficos os quais mostram os resultados obtidos de maneira experimental e numérica utilizando tensão de escoamento inicial (5.1.1), tensão equivalente (5.1.2) e tensões residuais (5.1.3) como critério de comparação com os dados obtidos experimentalmente. Para representação do intervalo de incertezas nos gráficos, foi utilizado o coeficiente de desvio ótimo com o acréscimo de 10% para critério de visualização, ou seja para o caso pós feira 1: $138,08 \pm 1,1 * 5,23 * 2,82$

5.1.1 TENSÃO DE ESCOAMENTO INICIAL

Nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 a seguir, são mostradas as curvas de encruamento encontradas de maneira experimental e numérica para cada um dos casos estudados (pós fieira 1, 2 e 3).

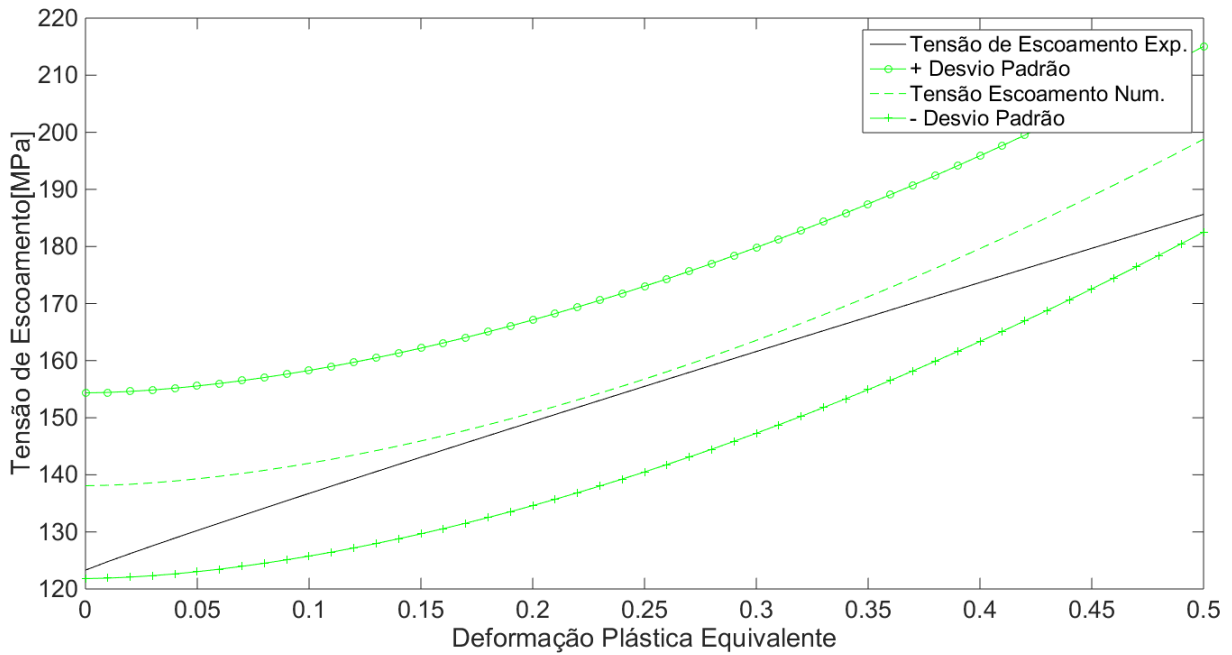


Figura 5.1: Comparação da curva de encruamento numérica versus experimental pós fieira 1.

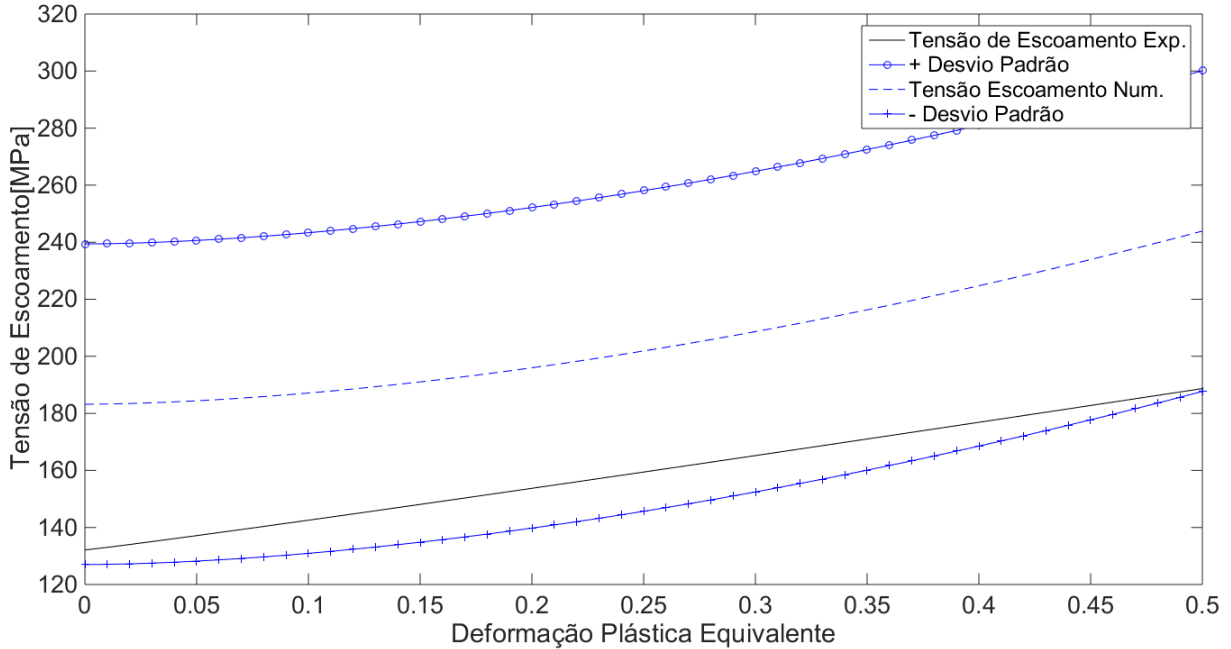


Figura 5.2: Comparação da curva de encruamento numérica versus experimental pós fieira 2.

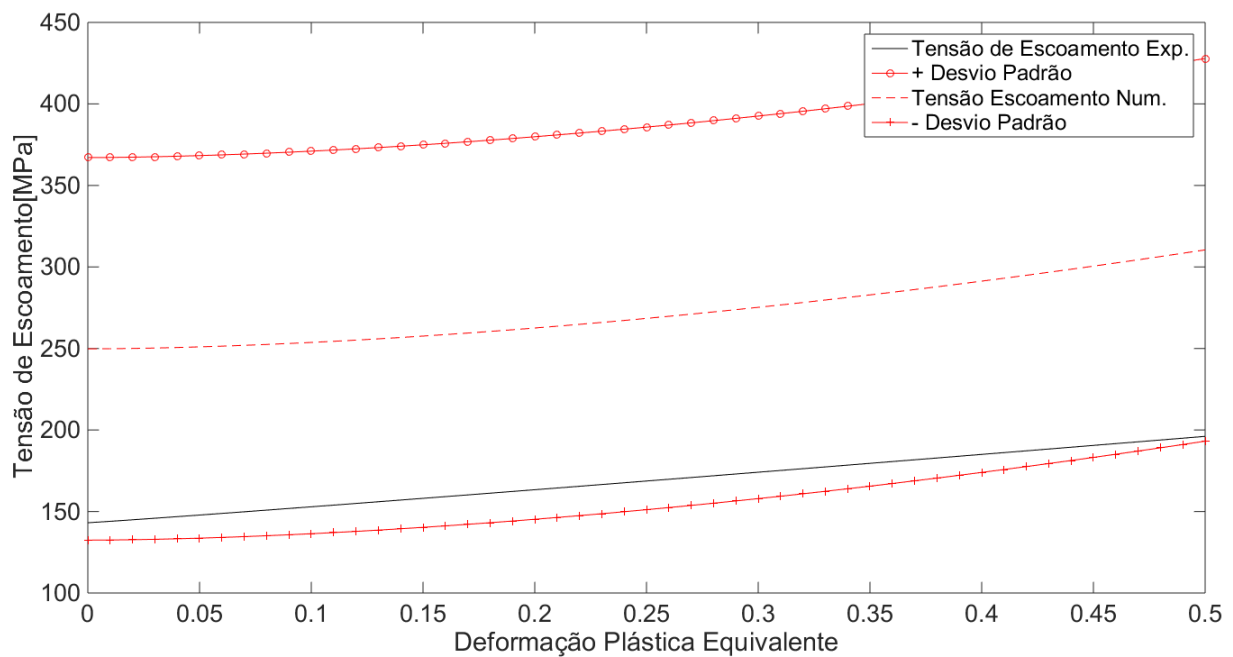


Figura 5.3: Comparação da curva de encruamento numérica versus experimental pós feira 3.

Como pode ser visto, fazendo o emprego das tensões de escoamento inicial numérica para o caso pós feira 1, 2 e 3, o resultado experimental ficou dentro do limite utilizando a metodologia empregada de 10% a mais do coeficiente de desvio padrão ótimo. Percebe-se que o desvio padrão está crescendo de maneira gradativa com o aumento das reduções, porém o coeficiente de desvio ótimo reduz.

5.1.2 TENSÃO EQUIVALENTE

Nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 a seguir, são mostradas as curvas de encruamento encontradas de maneira experimental e numérica para cada um dos casos estudados (pós feira 1, 2 e 3).

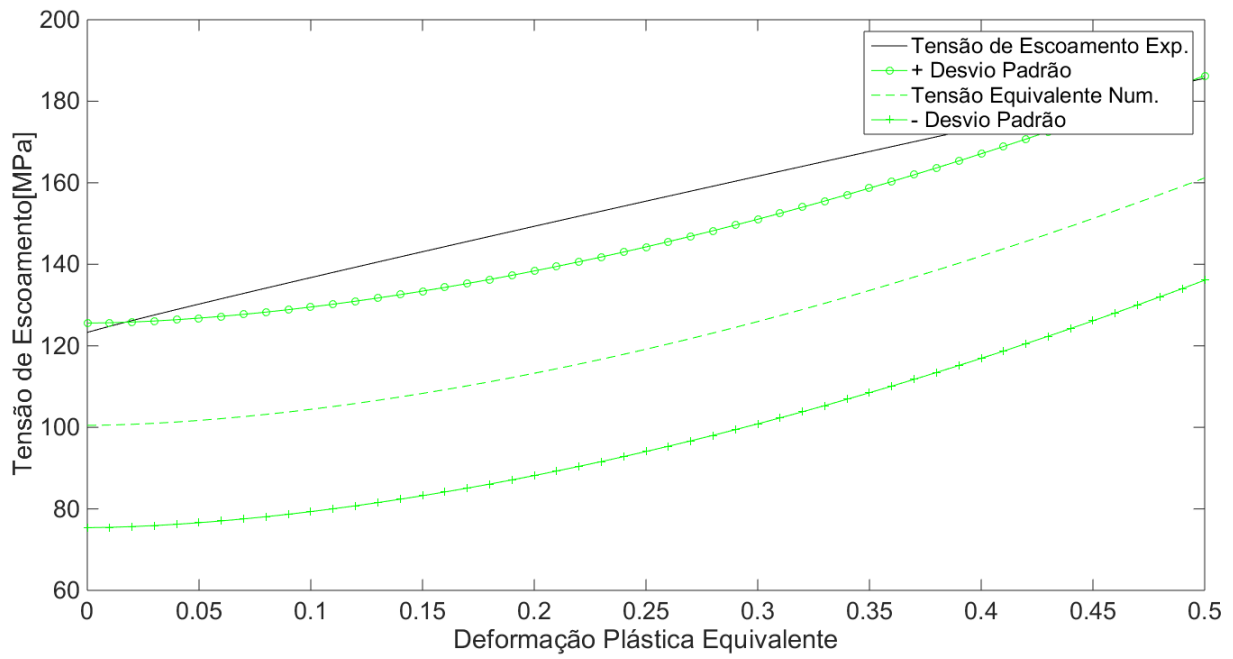


Figura 5.4: Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões equivalentes) versus experimental pós feira 1.

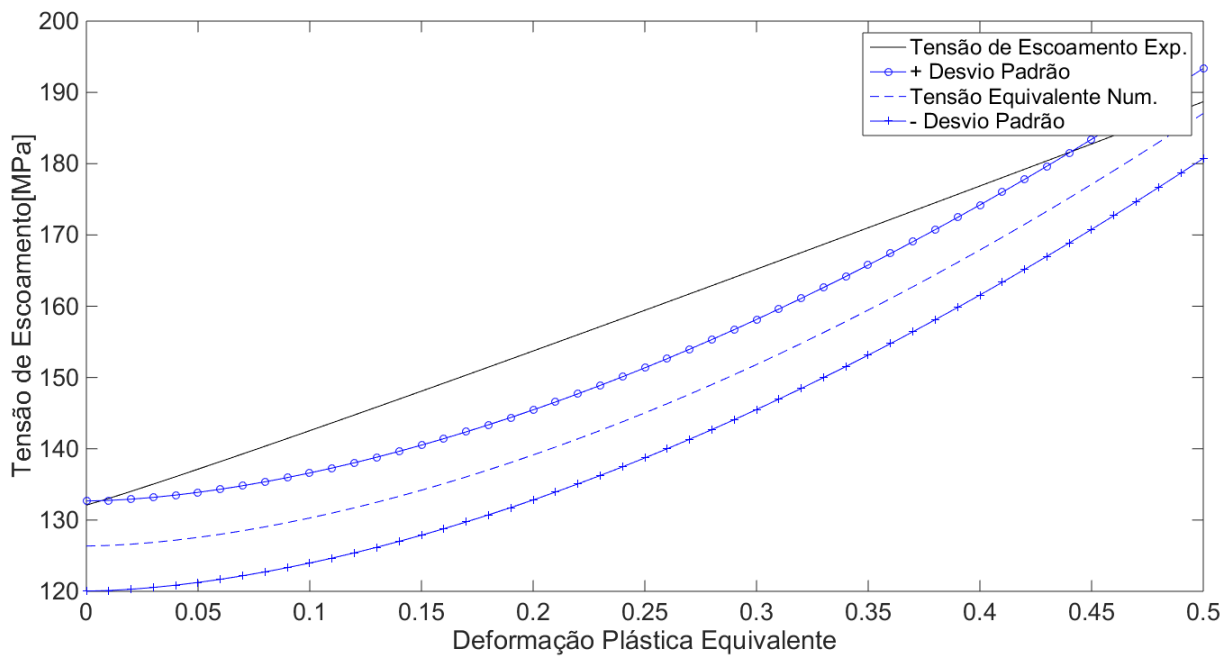


Figura 5.5: Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões equivalentes) versus experimental pós feira 2.

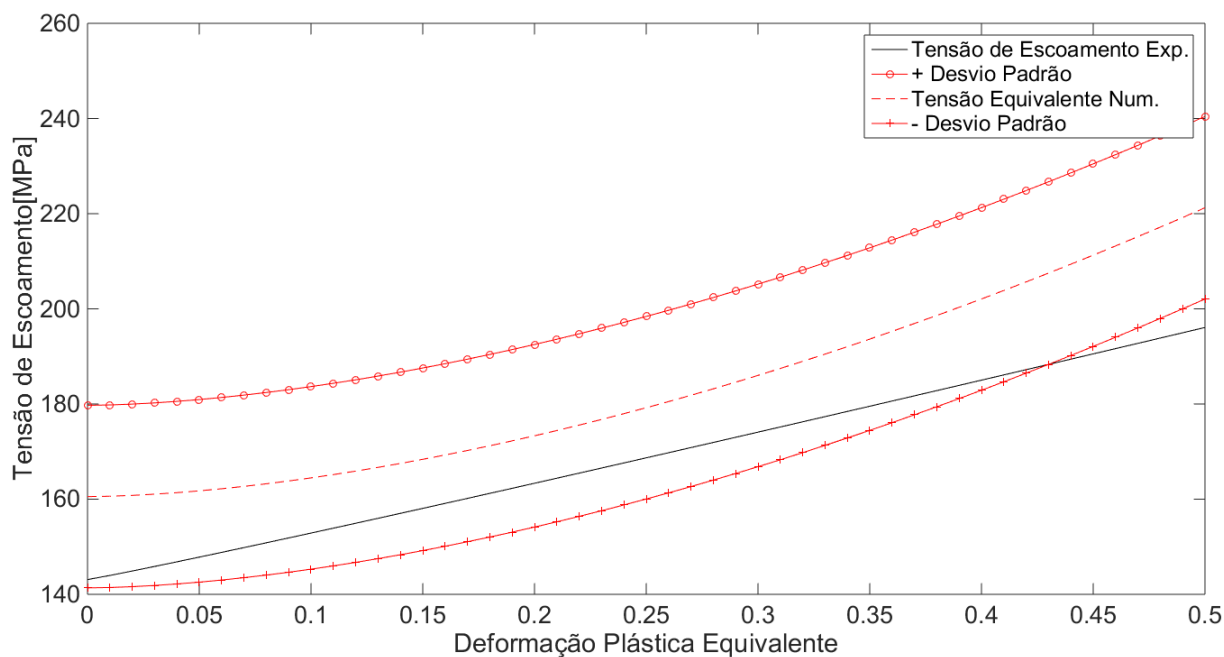


Figura 5.6: Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões equivalentes) versus experimental pós feira 3.

Fazendo o emprego das tensões equivalentes numérica, para o caso pós feira 3, praticamente todos os pontos do resultado experimental ficaram dentro do limite utilizando a metodologia empregada de 10% a mais do coeficiente de desvio padrão ótimo, porém para o caso pós feira 1 e 2, o resultado experimental ficou quase totalmente fora do intervalo encontrado.

5.1.3 TENSÃO RESIDUAL

Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 a seguir, são mostradas as curvas de encruamento encontradas de maneira experimental e numérica para cada um dos casos estudados (pós feira 1, 2 e 3).

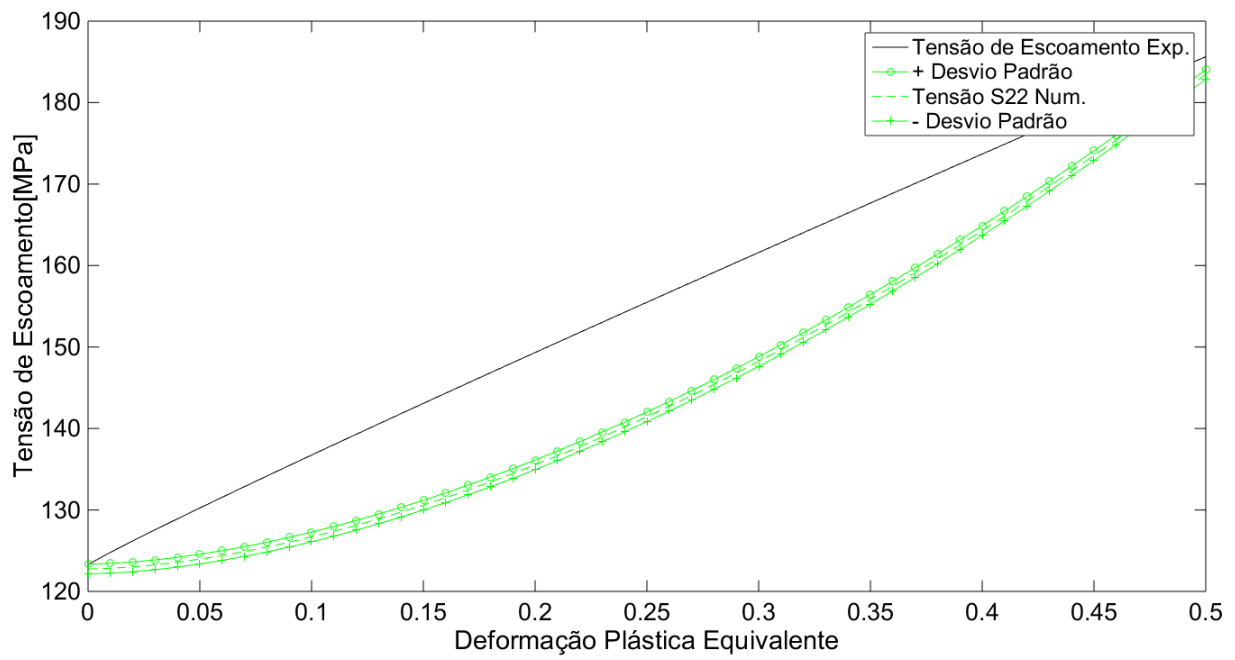


Figura 5.7: Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões residuais) versus experimental pós feira 1.

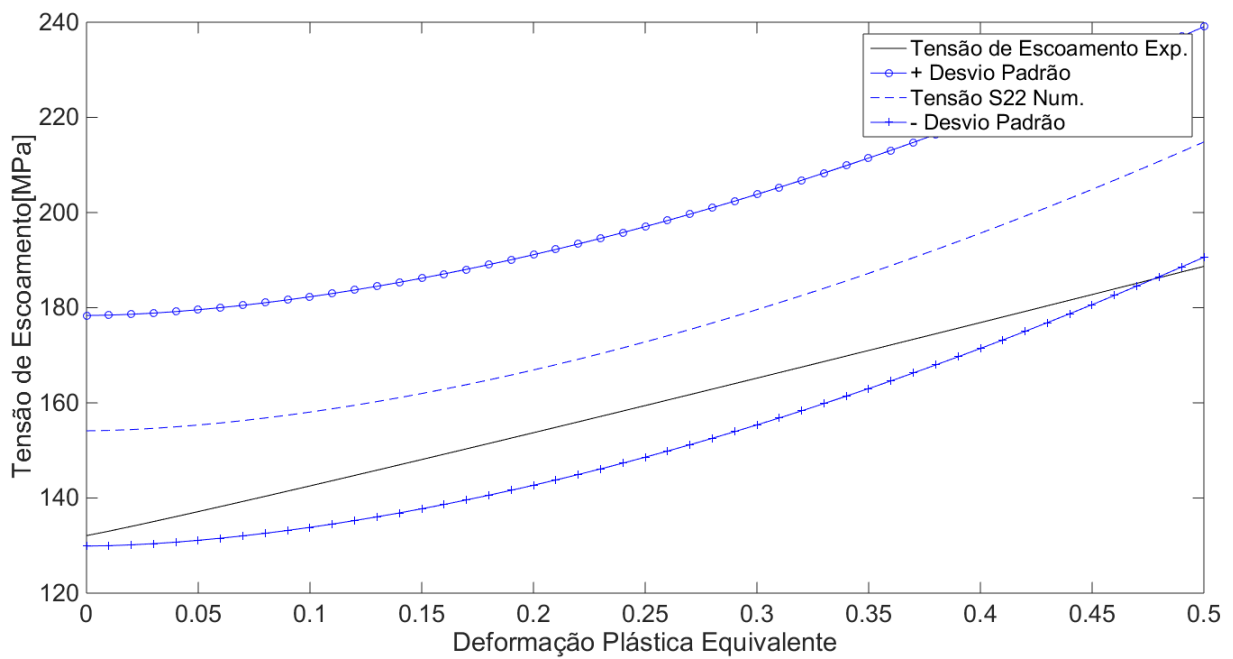


Figura 5.8: Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões residuais) versus experimental pós feira 2.

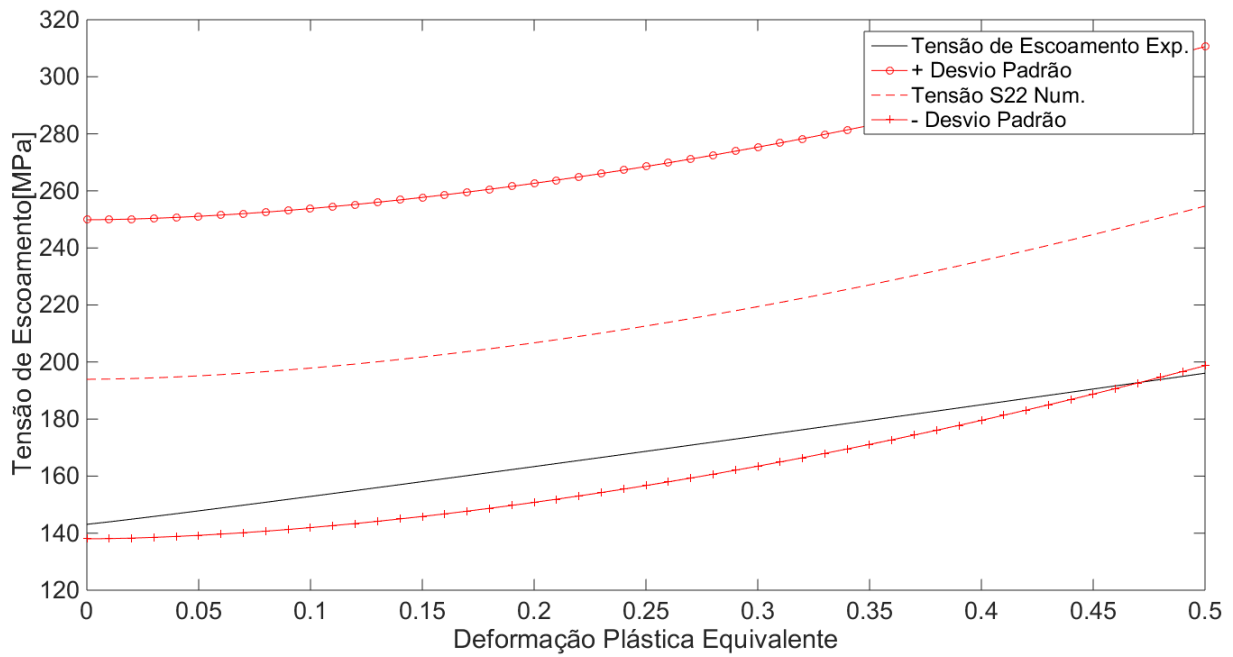


Figura 5.9: Comparação da curva de encruamento numérica (média das tensões residuais) versus experimental pós feira 3.

Finalmente quando é feito o emprego das tensões residuais numéricas, para o caso pós feira 2 e 3, o resultado experimental ficou dentro do limite utilizando a metodologia empregada de 10% a mais do coeficiente de desvio padrão ótimo, porém para o caso pós feira 1, o resultado experimental ficou fora do intervalo encontrado.

De maneira geral, os resultados obtidos para tensão de escoamento inicial numérica apresentaram um menor desvio padrão, além disso, fazendo a utilização da metodologia empregada para a demonstração gráfica do intervalo de incertezas foram os únicos a abranger, os resultados experimentais, em todos os casos (pós feira 1, 2 e 3).

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho, tendo como principal objetivo, conduzir um estudo comparativo entre resultados experimentais e numéricos buscando a previsão do comportamento do material durante processo de trefilação, apresentou êxito. A obtenção da curva de encruamento do material Al 1120 de maneira experimental em seu estado inicial, se deu a partir da análise de dureza Brinell para geração de dados iniciais, sendo sua aplicação através de métodos numéricos utilizando-se de elementos finitos a partir do programa ABAQUS.

O comportamento do material durante o processo de trefilação foi mostrado através do procedimento representado pela coleta de pontos em um caminho definido radialmente ao longo do fio nos três casos simulados, pós fieira 1, 2 e 3. Para isso, foi considerada a deformação plástica equivalente, tensão equivalente e tensões na componente axial (Y) durante o processo de trefilação e após o alívio, ou seja, depois da retirada do contato fio/fieira. Os efeitos observados durante a aplicação da sistemática citada, se comportaram de acordo com a bibliografia padrão a qual indica tensões compressivas no centro do fio, evoluindo, no sentido radial, até chegar em tensões trativas próximas da borda externa.

Observou-se que para os resultados obtidos para tensão de escoamento inicial numérico apresentaram aumento gradativo no desvio padrão com o aumento das reduções. Além disso, foi o único resultado que conseguiu abranger os resultados experimentais (pós fieira 1, 2 e 3) dentro do limite de incertezas a partir da metodologia empregada. O aumento progressivo dos desvios padrões, podem estar relacionados ao acúmulo das tensões residuais e a uma série de fatores que não foram considerados tanto na modelagem dentro do ABAQUS como na obtenção dos dados através do ensaio de dureza Brinell.

As vantagens da utilização do método alternativo (ensaio de dureza) para a estimativa das propriedades do material são várias quando comparado ao ensaio de tração, a começar pelos custos com usinagem e tempo de ensaio superiores que esta última requer, tornando vantajoso o investimento no método alternativo. A possibilidade de uso do mesmo corpo de prova para realização de diversos ensaios com diferentes cargas, é outro ponto positivo. Ao passo que cada corpo de prova do ensaio de tração é ensaiado apenas uma vez, no ensaio de dureza realizou-se para cada corpo de prova, quatro ensaios com aplicação de quatro diferentes carregamentos. Com os dados de quatro diferentes carregamentos, quatro pontos experimentais foram gerados, os quais foram utilizados para determinar os parâmetros de encruamento no material em sua forma inicial. Os demais ensaios, pós fieira 1, 2 e 3, foram realizados e comparados com os resultados numéricos.

Dentre os objetivos, não foi possível constatar a determinação dos parâmetros do material nos casos pós fieira 1, 2 e 3, ou seja, estimar a curva de encruamento a partir de dados experimentais obtidos via ensaio de dureza. Otimizações em ambos os processos devem ser feitas para que seja

alcance este objetivo em específico.

Foi concretizada a intenção de utilizar ensaios compressivos (ensaio de dureza) para a parametrização do material em seu estado inicial, servindo como base para inserção dos dados dentro da plataforma ABAQUS, sendo que o problema em questão está totalmente relacionado com forças compressivas durante a passagem da barra pelas feiras redutoras de diâmetro.

A análise de convergência de malha realizada no Capítulo 4, mostrou que o tamanho dos elementos finitos ao longo do caminho definido, gera influência nos valores das deformações plásticas equivalentes e tensões equivalentes (von Mises) neste caminho. Houve um custo computacional considerável na obtenção dos históricos, porém foi importante para se ter uma constatação da convergência dos resultados.

A utilização da ferramenta Python facilita a inserção e modificação dos parâmetros que podem vir a interferir nos resultados numéricos, sendo que para ser feita alterar qualquer um dos dados basta haver a modificação de pequenos comandos no código base (Anexo I.2, I.3 e I.4).

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para continuidade do trabalho, é apresentado na forma de tópicos alguns passos que podem ser seguidos para se chegar em um resultado mais próximo entre numérico x experimental:

- Identificação de todas as variáveis no processo de trefilação, buscando inseri-las no programa comercial Abaqus realizando aperfeiçoamento da solução numérica;
- Realizar um melhor tratamento das tensões residuais após o processo de trefilação nos casos pós feiras 1, 2 e 3;
- Aperfeiçoar a simulação considerando uma melhor estimativa da modelagem do contato entre fio/feira;
- Determinar o coeficiente de atrito entre fio/feira durante o processo de trefilação considerando a utilização de diferentes materiais;
- Apesar de ter sido feita a validação dos resultados experimentais que foram realizados a partir do ensaio de dureza Brinell para outros materiais (ligas U2 550°C, U2 450°C, U2 350°C e R4 650°C), busca-se validar para a liga Al 1120;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akikazu, Takaki e Maszuri 2001 AKIKAZU, N.; TAKAKI, Y.; MASZURI, K. Behaviour of residual stress and srawing stress in conicaltype and cauch-type die drawing by fem simulation and improvement. *Wire Journal International*, v. 72, 2001.
- Altan e Vazquez 1996 ALTAN, T.; VAZQUEZ, V. Numerical process simulation for tool and process design in bulk metal forming. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 45, n. 2, p. 599–615, 1996.
- Alubar 2015 ALUBAR, A. *Catálogo Técnico Condutores Elétricos de Alumínio*. [S.l.]: Catálogo, 2015.
- Alumínio 2004 ALUMÍNIO, F. do. suas aplicações. *Associação Brasileira do Alumínio*, 2004.
- Arbak et al. ARBAK, E.; ÜNAL, S.; BOYLU, L.; ERZINCANLI, İ.; TEKKAYA, A. Forging simulation at izeltas. In: *4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds–CESME*. [S.l.: s.n.]. v. 4.
- Arnold 1996 ARNOLD, K. Standard handbook of petroleum & natural gas engineering. Gulf Pub. Co, 1996.
- Atienza e Elices 2003 ATIENZA, J.; ELICES, M. Influence of residual stresses in the tensile test of cold drawn wires. *Materials and Structures*, Springer, v. 36, n. 8, p. 548–552, 2003.
- Avitzur 1968 AVITZUR, B. Analysis of central bursting defects in extrusion and wire drawing. *journal of engineering for industry*, American Society of Mechanical Engineers, v. 90, n. 1, p. 79–90, 1968.
- Baek et al. 2012 BAEK, H. M.; JIN, Y. G.; HWANG, S. K.; IM, Y.-T.; SON, I.-H.; LEE, D.-L. Numerical study on the evolution of surface defects in wire drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 212, n. 4, p. 776–785, 2012.
- Brasil 2008 BRASIL, A. de energia elétrica do. Agência nacional de energia elétrica. *Brasília: Aneel*, 2008.
- Brasil 2014 BRASIL, P. *Rede de transmissão supera 107 mil quilômetros*. 2014. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/rede-de-transmissao-supera-107-mil-quilometros>>.
- Cavalheiro CAVALHEIRO, J. V. S. Estudo da fratura dúctil através de modelos dependentes do terceiro invariante do tensor desviador. In: . [S.l.: s.n.].
- Cheng e Finnie 2007 CHENG, W.; FINNIE, I. *Residual stress measurement and the slitting method*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.
- Chin e Steif 1995 CHIN, R.; STEIF, P. A computational study of strain inhomogeneity in wire drawing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 35, n. 8, p. 1087–1098, 1995.
- Cristescu 1980 CRISTESCU, N. On the optimum die angle in fast wire drawing. *Journal of Mechanical Working Technology*, Elsevier, v. 3, n. 3-4, p. 275–287, 1980.
- Cunningham 2008 CUNNINGHAM, D. J. *Optimization of High Speed Wire Drawing Using Finite Element Analysis*. Tese (Doutorado) — The Pennsylvania State University, 2008.
- Dieter 1967 DIETER, G. E. *Metalurgia mecânica*. Alsina,, 1967.

- Dieter e Bacon 1988 DIETER, G. E.; BACON, D. Elements of the theory of plasticity. *Mechanical metallurgy*, p. 76–79, 1988.
- Drucker e Prager 1952 DRUCKER, D. C.; PRAGER, W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics*, JSTOR, v. 10, n. 2, p. 157–165, 1952.
- El-Domiatty e Kassab 1998 EL-DOMIATY, A.; KASSAB, S. Z. Temperature rise in wire-drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 83, n. 1, p. 72–83, 1998.
- Energética 2007 ENERGETICA, E.-E. de P. Plano nacional de energia 2030. *Rio de Janeiro: EPE*, p. 1970–2010, 2007.
- Filho et al. 1997 FILHO, E. B.; ZAVAGLIA, C.; BUTTON, S.; GOMES, E.; NERY, F. *Conformação plástica dos metais*. [S.l.]: Ed da Unicamp, 1997.
- Filho 1976 FILHO, J. G. Método de medição de força de trefilação de arames: avaliação da variação do coeficiente de atrito em trefilação de arames de aço. 1976.
- Handbook 1988 HANDBOOK, M. Casting, vol. 15. *ASM International*, p. 238–241, 1988.
- Highway et al. 2004 HIGHWAY, A. A. of S.; OFFICIALS, T.; TESTING, A. S. for; MATERIALS. *E8M-04 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (Metric) 1*. [S.l.]: ASTM International, 2004.
- Huh, Huh e Lee 2013 HUH, J.; HUH, H.; LEE, C. S. Effect of strain rate on plastic anisotropy of advanced high strength steel sheets. *International Journal of Plasticity*, Elsevier, v. 44, p. 23–46, 2013.
- Kennedy, Vahey e Hanney 2005 KENNEDY, D.; VAHEY, J.; HANNEY, D. Micro shot blasting of machine tools for improving surface finish and reducing cutting forces in manufacturing. *Materials & design*, Elsevier, v. 26, n. 3, p. 203–208, 2005.
- KIM T.H. 1997 KIM T.H., K. B. C. J. *Prediction of die wear in the wire-drawing process*. *Journal of Materials Processing and Technology*. [S.l.: s.n.], 1997. v. 65.
- Lemaitre e Chaboche 1990 LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. *Mechanics of solid materials*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1990.
- Löhe et al. 2003 LÖHE, D.; LANG, K.; VÖHRINGER, O.; TOTTEN, G.; HOWES, M.; INOUE, T. Handbook of residual stress and deformation of steel. *ASM International, Materials Park, OH*, p. 27–53, 2003.
- Lu 1996 LU, J. *Handbook of measurement of residual stresses*. [S.l.]: Fairmont Press, 1996.
- Machado 2016 MACHADO, L. Q. *DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ENCRUAMENTO DE MATERIAIS DÚCTEIS ATRAVÉS DE UM ENSAIO DE DUREZA*. [S.l.]: Universidade de Brasília, 2016.
- Magalhães et al. 2012 MAGALHÃES, F.; PERTENCE, A.; CAMPOS, H.; AGUILAR, M.; CETLIN, P. Defects in axisymmetrically drawn bars caused by longitudinal superficial imperfections in the initial material. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 212, n. 1, p. 237–248, 2012.
- Metz 2007 METZ, M. *Caracterização Das Tensões Residuais Originadas No Processo De Trefilação Combinada Do Aço Sae 1048*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado, PPGEM-UFRGS, 2007, Porto Alegre, 2007.
- Metz, Santos e Rocha 2007 METZ, M.; SANTOS, C.; ROCHA, A. Análise qualitativa das tensões residuais longitudinais em barras trefiladas de aço sae 1045 através do método slliting. In: *8º Congresso Iberoamericano De Engenharia Mecânica. Cusco*. [S.l.: s.n.], 2007.

- Nastran e Kuzman 2002 NASTRAN, M.; KUZMAN, K. Stabilisation of mechanical properties of the wire by roller straightening. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 125, p. 711–719, 2002.
- Neto, Peric e Owen 2008 NETO, E. A. de S.; PERIC, D.; OWEN, D. R. J. *Computational methods for plasticity: theory and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- Neves et al. 2003 NEVES, F. O. et al. Análise das tensões residuais em tubos trefilados de aço inox abnt 304. Campinas, SP, 2003.
- Newbury e Notis 2004 NEWBURY, B. D.; NOTIS, M. R. The history and evolution of wire drawing techniques. *JOM*, Springer, v. 56, n. 2, p. 33–37, 2004.
- Norasethasopon e Yoshida 2006 NORASETHASOPON, S.; YOSHIDA, K. Influences of inclusion shape and size in drawing of copper shaped-wire. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 172, n. 3, p. 400–406, 2006.
- Oliver et al. 1990 OLIVER, J.; CERVERA, M.; OLLER, S.; LUBLINER, J. *Isotropic damage models and smeared crack analysis of concrete*. 1990.
- (ONS) 2015 (ONS), O. N. do S. E. *Sistema de Transmissão Horizonte*. 2015. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx>.
- Pêgo e Neto 2008 PÊGO, B.; NETO, C. Á. d. S. C. O pac e o setor elétrico: desafios para o abastecimento do mercado brasileiro (2007-2010). Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2008.
- Perzyna 2011 PERZYNA, P. Application of the thermodynamical theory of elasto-viscoplasticity in modern manufacturing processes. In: *Damage Mechanics and Micromechanics of Localized Fracture Phenomena in Inelastic Solids*. [S.l.]: Springer, 2011, p. 227–376.
- Robinson, Binienda e Ruggles 2003 ROBINSON, D.; BINIENDA, W.; RUGGLES, M. Creep of polymer matrix composites. i: Norton/bailey creep law for transverse isotropy. *Journal of engineering mechanics*, American Society of Civil Engineers, v. 129, n. 3, p. 310–317, 2003.
- Siebel 1947 SIEBEL, E. *Der derzeitige Stand der Erkenntnisse über die mechanischen Vorgänge beim Drahtziehen*. [S.l.]: Verlag Stahleisen, 1947.
- Simo e Hughes 2006 SIMO, J. C.; HUGHES, T. J. *Computational inelasticity*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006. v. 7.
- Skrzypek 1993 SKRZYPEK, J. *Plasticity and creep: theory, examples and problems*. 1993.
- Tekkaya 2000 TEKKAYA, A. E. State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 103, n. 1, p. 14–22, 2000.
- Toribio et al. 2014 TORIBIO, J.; LORENZO, M.; VERGARA, D.; KHARIN, V. Influence of the die geometry on the hydrogen embrittlement susceptibility of cold drawn wires. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, v. 36, p. 215–225, 2014.
- Totten 2002 TOTTEN, G. E. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. [S.l.]: ASM international, 2002.
- Vega, Haddi e Imad 2009 VEGA, G.; HADDI, A.; IMAD, A. Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing. *Materials & Design*, Elsevier, v. 30, n. 8, p. 3308–3312, 2009.
- Walton 2002 WALTON, H. Deflection methods chapter. *Handbook of Measurement of Residual Stress, GE Totten*, pg. p. 89–98, 2002.

Wang e Gong 2002 WANG, Z.; GONG, B. Residual stress in the forming of materials. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, s, p. 141–148, 2002.

Wu et al. 2000 WU, A.; REN, J.; PENG, Z.; MURAKAWA, H.; UEDA, Y. Numerical simulation for the residual stresses of stellite hard-facing on carbon steel. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 101, n. 1, p. 70–75, 2000.

Zoch 2006 ZOCH, H.-W. From single production step to entire process chain—the global approach of distortion engineering. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Wiley Online Library, v. 37, n. 1, p. 6–10, 2006.

APÊNDICES

I.1 ROTINA DE OTIMIZAÇÃO - PARFINDER.M

```
% Função 'parfinder'
%
% Descrição: Para um comportamento elasto-plástico descrito por n
% parâmetros, esta função identifica o vetor dos parâmetros (p) através do
% método dos mínimos quadrados, utilizando o método univariável e a seção
% áurea como intermediários, comparando uma resposta experimental a uma
% resposta numérica, obtida pelo Método dos Elementos Finitos.
function parfinder
clear all
close all
clc
%
%-----
% Número de parâmetros:
% title='Identificador de Parâmetros';
% prompt={'Informe o número de parâmetros a serem identificados:'};
%
% Menu do número de parâmetros:
% answer=inputdlg(prompt,title);
% [npar]=str2num(answer{1});
tstart=tic;
n=3;
psup=[640; 1800; 820];
pinf=[440; 1590; 620];
%psup=[800; 600; 400; 30];
%pinf=[500; 400; 250; 10];
%
%-----
% Resolução do problema:
p = univ(pinf,psup);
%
%-----
% Resultados:
disp('Após otimização, os parâmetros são:')
disp(' ');
for i=1:n
aux=horzcat('p(',num2str(i),') = ',num2str(p(i)));
disp(aux);
disp(' ');
end
t=toc(tstart);
thoras=t/3600;
tmin=t/60;
%
%-----
% Plotagem das curvas:
% Curva experimental:
% abrir arquivo e colocar o par Profundidade vs Força
% Abre arquivo
%% Verifica existência e lê arquivo de dados experimentais
if exist('DADOS_EXP_U2_550C.txt')==2
expID=fopen('DADOS_EXP_U2_550C.txt','r');
A=dlmread('DADOS_EXP_U2_550C.txt');
fclose(expID);
dexp=A(:,1); % deslocamento exp
fexp=A(:,2); % força exp
disp('Arquivo DADOS_EXP_U2_550C.txt acessado com sucesso')
else
error('parfinder.m não leu arquivo de entrada de dados')
```

```

end
% RETIRADO DO MAIN
% fid = fopen('output_U2_550C.txt','r');
% diametro = fscanf(fid, 'DIAMETRO=%f\n\n', 1);
% profundidade = fscanf(fid, 'PROFUNDIDADE=%f\n\n', 1);
% Forca_reacao_y = fscanf(fid, 'Forca_reacao_y=%f\n\n', 1);
%
% fclose(fid)
% CODIGO ORIGINAL
% expID=fopen('EXP_OPTARQ.cur','r');
% A=dlmread('EXP_OPTARQ.cur');
% fclose(expID);
% dexp=A(:,1); % deslocamento exp
% fexp=A(:,2); % força exp
figure(2)
plot(dexp,fexp,'o')
title('Comparação entre a Resposta Numérica e a Resposta Experimental');
xlabel('Deslocamento');
ylabel('Força');
hold on
%-----%
% GERAR CURVA DE ENCRUAMENTO A PARTIR DE p1 p2 e p3
% Dados de deformacao
XX = fopen('DEFORMACAO.txt', 'r');
XDATA = fscanf(XX, '%f');
fclose(XX);
% Gera curva de Encruamento
YY = p(1) + p(2)*power(XDATA, p(3)/1000);
% Escreve curva de encruamento para txt
pID=fopen('curva_U2_550.txt','w+');
for jj = 1:length(XDATA)
fprintf(pID,'%14.10f\t%14.10f\t\n', YY(jj), XDATA(jj));
end
fclose(pID);
disp('curva_U2_550.txt gerada com sucesso')
% CODIGO ORIGINAL
% % Curva numérica:
% % Construir a curva encruamento a partir de p1 p2 e p3/1000
% pID=fopen('FEM_OPTARQ.har','w+');
% fprintf(pID,'%14.10f\t',p(1),p(2), (p(3)/1000));
% fclose(pID);
%-----%
% Run Abaqus
mo='noGUI';
% mo='script';
% unix(['abaqus cae ',mo,'=Main.py']); %Unix system
system(['abaqus cae ',mo,'=Dureza2D_U2_550C.py']); %Windows system?
disp('Dureza2D_U2_550C.py executado')
% CODIGO ORIGINAL CHAMA HYPLAS
% % % ! FEM_OPT.bat
% mandar ele escrever profundidade e forca no .gnu (MAP PRECISA)
%% Le Output do Abaqus
% Verifica existencia do arquivo
if exist('CURVA_REACAO.txt')==2
% Abre Arquivo

```

```

mefID=fopen('CURVA_REACAO.txt','r');
B=dlmread('CURVA_REACAO.txt');
fclose(mefID);
% mudar os indices para 2 e 1 respect.
fmef=B(:,2); % força num
dmef=B(:,1); % deslocamento num
disp('CURVA_REACAO.txt acessado com sucesso')
else
error('parfinder.m nao leu arquivo CURVA_REACAO.txt gerado pelo Abaqus')
end
% CODIGO ORIGINAL
% mefID=fopen('FEM_OPTARQ.gnu','r');
% B=dlmread('FEM_OPTARQ.gnu');
% fclose(mefID);
% % mudar os indices para 2 e 1 respect.
% fmef=B(:,6); % força num
% dmef=B(:,3); % deslocamento num
% -----
plot(dmef,fmef,'+');
legend('Curva Experimental','Curva Numérica');
hold off
fmefin=interp1(dmef,fmef,dexp);
suma=0;
N1=length(dmef);
N2=length(dexp);
N=min(N1,N2);
for i=1:N
suma=suma+((fmefin(i)-fexp(i))/fexp(i))^2;
end
f=sqrt(suma/N);
% -----
% Arquivo de saída dos resultados:
% Título:
pID=fopen('PARFINDER_OUTPUT.par','w+');
aux=horzcat('\r\n','-----',...
'\r\n','\t\t\t PARFINDER','\r\n',...
'\r\n');
fprintf(pID,aux);
% Intervalo inicial:
aux=horzcat('\r\n','\t\t\t INTERVALOS INICIAIS','\r\n',...
'\r\n');
fprintf(pID,aux);
aux=horzcat('\tPAR-METRO\t\tP_SUP\t\t\t P_INF','\r\n',...
'\r\n');
fprintf(pID,aux);
for i=1:n
fprintf(pID,'\t %u\t\t\t\t%6.2f\t\t\t\t %6.2f\r\n',i,...
psup(i),pinf(i));
end
% Resultados:
aux=horzcat('\r\n','\t\t\t RESULTADOS','\r\n',...

```

```

'-----', '\r\n');
fprintf(pID, aux);
aux=horzcat('\tPAR-METRO\t\t\t\t\t P_"TIMO', '\r\n', ...
'-----', '\r\n');
fprintf(pID, aux);
for i=1:n
fprintf(pID, '\t %u\t\t\t \t\t\t %6.2f\r\n', i, ...
p(i));
end
fprintf(pID, '\r\nA funo objetivo  %1.8f\r\n', f);
fprintf(pID, '\r\nForam gastos %4.2f min (%2.2f h) de computao.\r\n', ...
tmin, thoras);
fclose(pID);
end
% Função 'univ'
%
% Descrição: Método univari-vel de minimização de funções. Dado um
% intervalo, esta função identifica os par,metros ótimos (pot) que
% minimizam a função objetivo (minquad).
%
% Uso: pot = univ(pinf,psup)
% pinf: vetor dos limites inferiores dos par,metros;
% psup: vetor dos limites superiores dos par,metros;
% pot: vetor dos par,metros identificados.
function pot = univ(pinf,psup)
n=length(pinf); % Número de par,metros
tol=1E-2; % Tolerância do método univari-vel
p0=(pinf+psup)./2; % Ponto inicial para o método
fb=minquad(p0); % Inicialização de fb
% Inicialização do arquivo das iterações:
iterID=fopen('PARFINDER_ITEROUT.out', 'w+');
aux=horzcat('\r\n', '\t\t\t REGISTRO DE ITERAÇÕES', '\r\n', ...
'-----', '\r\n');
fprintf(iterID, aux);
aux=horzcat('\tPAR-METRO\t\t\tGLOBAL_ITER\t\t\tLOCAL_ITER', '\r\n', ...
'-----', '\r\n');
fprintf(iterID, aux);
fclose(iterID);
% Primeira iteração:
pn=p0;
j=1;
erro=0;
for i=1:n
di=zeros(1,n); % Inicialização do vetor direção
di(i)=1;
pn(i)=secaoaurea(pn, di, pinf(i), psup(i), j);
end
globitername(j, erro);
fn=minquad(pn);
erro=abs(fn-fb);
if (erro<tol)
pot=pn;

```

```

else
while (erro>tol)
fb=fn;
j=j+1;
globitername(j,erro);
for i=1:n
di=zeros(1,n);
di(i)=1;
pn(i)=secaoaurea(pn,di,pinf(i),psup(i),j);
end
fn=minquad(pn);
erro=abs(fn-fb);
end
pot=pn;
end
end
% Função 'secaoaurea'
%
% Descrição: Para um dado conjunto de parâmetros e uma direção de
% otimização, esta função calcula o comprimento de passo ótimo segundo o
% método da seção aurea, analisando um parâmetro dentro um intervalo dado.
%
% Uso: a = secaoaurea(p,d,a_inf,a_sup)
% p: vetor dos parâmetros a serem identificados;
% d: vetor direção de busca;
% a_inf: limite inferior do intervalo de busca;
% a_sup: limite superior do intervalo de busca;
% globiter: valor atual da iteração global
% a: vetor dos parâmetros corrigido.
function a = secaoaurea(p,d,a_inf,a_sup,globiter)
I=a_sup-a_inf;
if d(3)==1
tol=1E-3;
else
tol=1E-2;
end
i=0;
while I>tol
% Caixa de dialogo com o numero da iteração:
i=i+1;
localitername(i,d);
% Cálculo de alpha_a e alpha_b:
a_a=a_inf+0.382*I;
a_b=a_inf+0.618*I;
% Cálculo de f(alpha_a) e f(alpha_b):
ind=find(d);
pa=p;
pb=p;
pa(ind)=a_a;
pb(ind)=a_b;
f_a=minquad(pa);
f_b=minquad(pb);
% Comparação para redução do intervalo:
if (f_a < f_b)
a_sup=a_b;

```

```

% Novo intervalo de incerteza:
I=a_sup-a_inf;
elseif (f_a > f_b)
a_inf=a_a;
% Novo intervalo de incerteza:
I=a_sup-a_inf;
else
a_inf=a_a;
a_sup=a_b;
end
end
iterfile(globiter,i,d);
a=(a_inf+a_sup)/2;
end
% Função 'minquad'
%
% Descrição: Calcula a função objetivo de acordo com o método dos mínimos
% quadrados para a diferença entre a resposta experimental e a resposta
% calculada pelo Método dos Elementos Finitos. Assim, dado o conjunto de
% parâmetros a serem identificados (p), a função cria um arquivo com os
% parâmetros para uso no programa do MEF, lê a curva experimental, chama o
% programa de elementos finitos e lê a curva do MEF, para, em seguida,
% calcular a função objetivo.
%
% Uso: f = minquad(p)
% p: vetor dos parâmetros a serem identificados;
% f: valor da função objetivo calculada por mínimos quadrados.
function f=minquad(p)
% Registro dos parâmetros para uso no programa do MEF:
pID=fopen('FEM_OPTARQ.har','w+');
fprintf(pID,'%14.10f\t',p(1),p(2),(p(3)/1000));
fclose(pID);
%-----
%*****PARTE ADICIONADA*****
%% GERAR CURVA DE ENCRUAMENTO A PARTIR DE p1 p2 e p3
% Dados de deformacao
XX = fopen('DEFORMACAO.txt','r');
XDATA = fscanf(XX, '%f');
fclose(XX);
% Gera curva de Encruamento
YY = p(1) + p(2)*power(XDATA, p(3)/1000);
% Escreve curva de encruamento para txt
pID=fopen('curva_U2_550.txt','w+');
for jj = 1:length(XDATA)
fprintf(pID,'%14.10f\t%14.10f\t\n', YY(jj), XDATA(jj));
end
fclose(pID);
disp('curva_U2_550.txt gerada com sucesso')
%-----
% Abre arquivo
%% Verifica existencia e le arquivo de dados experimentais
if exist('DADOS_EXP_U2_550C.txt')==2
expID=fopen('DADOS_EXP_U2_550C.txt','r');
A=dlmread('DADOS_EXP_U2_550C.txt');

```



```

fclose(expID);
dexp=A(:,1); % deslocamento exp
fexp=A(:,2); % força exp
disp('Arquivo DADOS_EXP_U2_550C.txt acessado com sucesso')
else
error('parfinder.m nao leu arquivo de entrada de dados')
end
% CODIGO ORIGINAL
% % % Leitura da curva experimental:
% % % Assume-se que o deslocamento está na coluna 3 e a força na
coluna 6
% % expID=fopen('EXP_OPTARQ.cur','r');
% % A=dlmread('EXP_OPTARQ.cur');
% % fclose(expID);
% % dexp=A(:,1); % deslocamento exp
% % fexp=A(:,2); % força exp
% -----
%% Run Abaqus
mo='noGUI';
% mo='script';
% unix(['abaqus cae ',mo,'=Dureza2D_U2_550C.py']); %Unix system
system(['abaqus cae ',mo,'=Dureza2D_U2_550C.py']); %Windows system?
disp('Dureza2D_U2_550C.py executado em minquad')
% CODIGO ORIGINAL
% Programa de Elementos Finitos:
% % % ! FEM_OPT.bat
% -----
%% Le Output do Abaqus
% Verifica existencia do arquivo
if exist('CURVA_REACAO.txt')==2
% Abre Arquivo
mefID=fopen('CURVA_REACAO.txt','r');
B=dlmread('CURVA_REACAO.txt');
fclose(mefID);
% mudar os indices para 2 e 1 respct.
fmef=B(:,2); % força num
dmef=B(:,1); % deslocamento num
disp('CURVA_REACAO.txt acessado com sucesso')
else
error('parfinder.m nao leu arquivo CURVA_REACAO.txt gerado pelo Abaqus')
end
% CODIGO ORIGINAL
% mefID=fopen('FEM_OPTARQ.gnu','r');
% B=dlmread('FEM_OPTARQ.gnu');
% fclose(mefID);
% % mudar os indices para 2 e 1 respct.
% fmef=B(:,6); % força num
% dmef=B(:,3); % deslocamento num
% -----
% CODIGO ORIGINAL
% % Leitura das forças do MEF:
% mefID=fopen('FEM_OPTARQ.gnu','r');
% B=dlmread('FEM_OPTARQ.gnu');
% fclose(mefID);
% fmef=B(:,6); % força num

```

```

% dmef=B(:,3); % deslocamento num
% Interpolação:
fmefin=interp1(dmef,fmef,dexp);
% Cálculo dos mínimos quadrados:
suma=0;
N1=length(dmef);
N2=length(dexp);
N=min(N1,N2);
for i=1:N
suma=suma+((fmefin(i)-fexp(i))/fexp(i))^2;
end
f=sqrt(suma/N);
figure(1)
plot(dexp,fexp,'o')
title('Comparação entre a Resposta Numérica e a Resposta Experimental');
xlabel('Deslocamento');
ylabel('Força');
hold on
plot(dmef,fmef,'*');
legend('Curva Experimental','Curva Numérica');
hold off
end
function globitername(i,err)
aux=horzcat('_____','...');
aux=horzcat(' | ','...');
disp(aux);
aux=horzcat(' | ','...');
disp(aux);
aux=horzcat(' | ITERAÇÃO DE NÚMERO ', num2str(i),' ','...');
disp(aux);
if i~=1
aux=horzcat(' | ERRO IGUAL A ', num2str(err),' ','...');
disp(aux);
end
disp(aux);
aux=horzcat(' | ','...');
disp(aux);
aux=horzcat(' | ','...');
disp(aux);
aux=horzcat('_____','...');
disp(aux);
pause(0.01);
end
function localitername(i,d)
par=find(d);
aux=horzcat('_____','...');
disp(aux);

```

```

disp(aux);
aux=horzcat(' | ',...
' |');
disp(aux);
aux=horzcat(' | ',...
' |');
disp(aux);
aux=horzcat(' | PAR-METRO ITERADO: ', num2str(par), ' ',...
' |');
disp(aux);
aux=horzcat(' | ITERA«?O DE N?MERO ', num2str(i), ' ',...
' |');
disp(aux);
aux=horzcat(' | ',... ' |');
disp(aux);
aux=horzcat(' | ',...
' |');
disp(aux);
aux=horzcat(' _____',...
' _____');
disp(aux);
pause(0.01);
end
function iterfile(globaliter,localiter,dir)
par=find(dir);
iID=fopen('PARFINDER_ITEROUT.out','a');
fprintf(iID,'\t %u\t\t\t %u\t\t\t %u\r\n',par,globaliter,...
localiter);
fclose(iID);
end

```

I.2 MODELO DE SIMULAÇÃO - DUREZA.PY

```
#####  
# Dureza 2D  
#####  
  
# ENTRADAS:  
nome = 'dureza'  
# Geometria do Corpo de Prova:  
H_CP = 5.0 #[mm]  
L_CP = 5.0 #[mm]  
# Geometria do Punch:  
R_P = 1.125 #[mm]  
# Nivel de refinamento da malha:  
#-----  
# Deslocamento:  
Deslocamento = 0.0848  
# 0.0848 #[mm] valor obtido da medicao  
# -0.0958109 obtido da iteracao anterior  
#-----  
# Propriedades do Material  
Nome_Material = 'U2_450C'  
ModuloDeElasticidade = 200000.0 # [MPa]  
Poisson = 0.3  
# Ler curva de encruamento de txt  
curva = []  
with open('curva_U2_450.txt') as inf:  
for line in inf:  
parts = map(float, line.split()) # split line into parts  
curva.append(tuple(parts))  
# if len(parts) > 1: # if at least 2 parts/columns  
# print parts[1] # print column 2  
# Curva de encruamento  
CurvaDeEncruamento= tuple(curva) # Converte list em tuple  
# #####  
from abaqus import *  
from abaqusConstants import *  
import regionToolset  
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=None)  
#-----  
# Modelo  
mdb.models.changeKey(fromName='Model-1', toName='Dureza')  
Dureza = mdb.models['Dureza']  
#-----  
#-----  
# Partes  
import sketch  
import part  
# Corpo de Prova:  
CPSketch = Dureza.ConstrainedSketch(name='CP Sketch', sheetSize=100)  
CPSketch.sketchOptions.setValues(viewStyle=AXISYM)
```

```

CPSketch.sketchOptions.setValues(viewStyle=AXISYM)
CPSketch.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
CPSketch.ConstructionLine(point1=(0.0, -100.0), point2=(0.0, 100.0))
g = CPSketch.geometry
CPSketch.FixedConstraint(entity=g[2])
# Geometria do CP -----
CPSketch.rectangle(point1=(0.0, 0.0), point2=(L_CP, -H_CP))
# -----
CPPart = Dureza.Part(name='CP', dimensionality=AXISYMMETRIC,
type=DEFORMABLE_BODY)
CPPart.BaseShell(CPSketch)
# Punch
PSketch = Dureza.ConstrainedSketch(name='Punch Sketch',
sheetSize=100)
PSketch.sketchOptions.setValues(viewStyle=AXISYM)
PSketch.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
PSketch.ConstructionLine(point1=(0.0, -100.0), point2=(0.0, 100.0))
g = PSketch.geometry
PSketch.FixedConstraint(entity=g[2])
# Geometria do Punch -----
PSketch.ArcByCenterEnds(center=(0.0, R_P), point1=(0.0, 0.0),
point2=(R_P, R_P),
direction=COUNTERCLOCKWISE)
# -----
PPart = Dureza.Part(name='Punch', dimensionality=AXISYMMETRIC,
type=ANALYTIC_RIGID_SURFACE)
PPart.AnalyticRigidSurf2DPlanar(PSketch)
#-----
#*****
#-----
# Material
Material = Dureza.Material(name=Nome_Material)
Material.Elastic(table=((ModuloDeElasticidade, Poisson),))
Material.Plastic(table=CurvaDeEncrramento)
#-----
#*****
#-----
# Secao
import section
DurezaSection =
Dureza.HomogeneousSolidSection(name='Secao1',material =
Nome_Material)
CPF = CPPart.faces.findAt(((L_CP/2, -H_CP/2, 0.0),))
CPF = regionToolset.Region(faces=(CPF))
CPPart.SectionAssignment(region=CPF, sectionName='Secao1')
#-----
#*****
#-----
import assembly
# Create the part instance

```

```

DurezaAssembly = Dureza.rootAssembly
CPInstance = DurezaAssembly.Instance(name='CP Instance',part =
CPPart, dependent=ON)
PInstance = DurezaAssembly.Instance(name='Punch Instance',part =
PPart, dependent=ON)
# Criando ponto de Referencia para o Punch
reference_point = DurezaAssembly.ReferencePoint(point= (0.0, R_P,
0.0))
RP_object = DurezaAssembly.referencePoints
# reference point Region
RP1 = DurezaAssembly.Set(referencePoints=(RP_object[5]), name = 'mSet-1')
#-----
#*****
#-----
# Criar Steps
import step
# Create a static general step
Dureza.StaticStep(name='Penetracao', previous='Initial',
maxNumInc=100000, initialInc=0.001, minInc=1e-09, maxInc=0.02,
nlgeom=ON)
Dureza.StaticStep(name='Alivio', previous='Penetracao',
maxNumInc=10000, initialInc=0.001, minInc=1e-09, maxInc=0.02,
nlgeom=ON)
#-----
#*****
#-----
# Contato
Dureza.ContactProperty('Punch-CP')
Dureza.interactionProperties['Punch-CP'].TangentialBehavior(
formulation=FRICITIONLESS)
Dureza.interactionProperties['Punch-CP'].NormalBehavior(
pressureOverclosure=HARD, allowSeparation=ON,
constraintEnforcementMethod=DEFAULT)
# Superficies em contato:
cp_contact_surface_point = (L_CP/2.0, 0.0, 0.0)
CPContactSurface =
CPInstance.edges.findAt(((cp_contact_surface_point),))
region1=Dureza.rootAssembly.Surface(side1Edges=CPContactSurface,
name='Slave')
punch_contact_surface_point = (R_P,R_P,0.0)
PContactSurface1 =
PInstance.edges.findAt((punch_contact_surface_point,))
region2=Dureza.rootAssembly.Surface(side2Edges=PContactSurface1,
name='Master1')
Dureza.SurfaceToSurfaceContactStd(name='Punch-CP',
createStepName='Initial', master=region2, slave=region1,
sliding=FINITE,
thickness=ON, interactionProperty='Punch-CP', adjustMethod=NONE,
initialClearance=OMIT, datumAxis=None, clearanceRegion=None)
#-----

```

```

#-----
#
from interaction import *
# Cria relacao de constraint entre o Punch e o ponto de referencia
Dureza.SurfaceToSurfaceContactStd(adjustMethod=NONE,
clearanceRegion=None, createStepName='Initial', datumAxis=None,
initialClearance=OMIT, interactionProperty='Punch-CP', master=
region2, name='Punch-CP',
slave=region1, sliding=FINITE,
thickness=ON)
surface_restricao = DurezaAssembly-surfaces['Master1']
Dureza.RigidBody(name='Constraint-1', refPointRegion=RP1,
surfaceRegion=surface_restricao)
#-----
#-----
# Malha
from mesh import *
# Aplicar Condicoes de Contorno
# west/east
cp_edge_west = Dureza.parts['CP'].edges.findAt((( 0.0, 0.0, 0.0),
(0.0, -H_CP/2, 0.0)))
cp_edge_east = Dureza.parts['CP'].edges.findAt(((L_CP, 0.0, 0.0),
(L_CP, -H_CP/2, 0.0)))
Dureza.parts['CP'].seedEdgeByBias(biasMethod=SINGLE, constraint=
FINER, end1Edges=cp_edge_west, end2Edges=cp_edge_east,
maxSize=1.0, minSize=0.002)
# north/south
cp_edge_north = CPInstance.edges.findAt(((L_CP/2, 0.0, 0.0), ))
cp_edge_south = CPInstance.edges.findAt(((0.0, -H_CP, 0.0), (L_CP/2,
-H_CP, 0.0)))
Dureza.parts['CP'].seedEdgeByBias(biasMethod=SINGLE, constraint=
FINER, end1Edges=cp_edge_south,
end2Edges=cp_edge_north, maxSize=1.0, minSize=0.002)
Dureza.parts['CP'].generateMesh()
# Condicoes de Contorno
# Aplicar Condicoes de Contorno
Dureza.EncastreBC(createStepName='Initial', localCsys=None, name= 'E
region=Region(edges=cp_edge_south))
Dureza.DisplacementBC(amplitude=UNSET, createStepName='Initial',
distributionType=UNIFORM, fieldName='', localCsys=None,
name='BC_Posicao_0',
region=RP1, u1=SET, u2=UNSET,
ur3=SET)
Dureza.DisplacementBC(amplitude=UNSET, createStepName=
'Penetracao', distributionType=UNIFORM, fieldName='', fixed=OFF,
localCsys=
None, name='BC_Penetracao', region=RP1, u1=UNSET, u2=
-Deslocamento, ur3=UNSET)
Dureza.DisplacementBC(amplitude=UNSET, createStepName=

```

```

'Alivio', distributionType=UNIFORM, fieldName='', fixed=OFF,
localCsys=
None, name='BC_Alivio', region=RP1, u1=UNSET, u2=
0.0, ur3=UNSET)
Dureza.boundaryConditions['BC_Penetracao'].deactivate('Alivio')
# Job
from job import *
mdb.Job(atTime=None, contactPrint=OFF, description='',
echoPrint=OFF,
explicitPrecision=SINGLE, getMemoryFromAnalysis=True,
historyPrint=OFF,
memory=90, memoryUnits=PERCENTAGE, model='Dureza',
modelPrint=OFF, name=
nome, nodalOutputPrecision=SINGLE, queue=None,
resultsFormat=ODB,
scratch='', type=ANALYSIS, userSubroutine='', waitHours=0,
waitMinutes=0)
mdb.jobs['dureza'].submit(consistencyChecking=OFF)
# Do not return control till job is finished running
mdb.jobs['dureza'].waitForCompletion()
# End of run job
#-----
# Call post processing
execfile('post_processing.py')

```


I.3 POS PROCESSAMENTO - POSPROCESS.PY

```
#####
# Dureza 2D
#-----
#***** Post Processing *****
#-----
# Enviar Dados de deslocamento em U2
import visualization
from odbAccess import *
dureza_odb_path = 'dureza.odb'
dureza_odb_object = session.openOdb(name=dureza_odb_path)
# o viewport principal deve ser definido para para o objeto odb
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=dureza_odb_object)
#-----
#*****
#-----
# SELECAO DOS NODES NA ARESTA SUPERIOR
# Ache o no com deslocamento maximo
DurezaAssembly.Set(edges=DurezaAssembly.instances['CP Instance'].edges.findAt
(((L_CP/2,0.0,0.0),)), name='myEdge')
# encontrar nos do edge
node_aresta_superior = DurezaAssembly.sets['myEdge'].nodes
element_aresta_superior = DurezaAssembly.sets['myEdge'].elements
# DurezaAssembly.Set(name='myNodes', nodes=mdb.models['Model-1'].rootAssembly.sets
# ['myEdge'].nodes)
#-----
#*****
#-----
# DESLOCAMENTO MAXIMO EM Y CONSIDERANDO SOMENTE OS NODES DA ARESTA
SUPERIOR
# Inicializa Variaveis
node_origem_deslocamento_y = 0 # deslocamento do node analisado
node_origem_label = 0 # label do node analisado
# DESLOCAMENTO DO NODE DA EXTREMIDADE ESQUERDA
# Sabe-se que o node situado na origem sera o ultimo
# pela forma como o seed foi aplicado
numero_nodos_aresta = len(node_aresta_superior) # Numero de nodes na aresta superior
# Deslocamento sofrido pelo node selecionado
node_origem_deslocamento_y =
abs(dureza_odb_object.steps['Alivio'].frames[-1].fieldOutputs['U'].values
[numero_nodos_aresta].data[1])
# Nome (label) do node selecionado
node_origem_label = dureza_odb_object.steps['Alivio'].frames[-1].fieldOutputs
['U'].values[numero_nodos_aresta].nodeLabel
# Imprime resultado na tela
print '\n\n'
print 'Node analisado: %d' % node_origem_label # Imprime nome do
node analisado
print 'Deslocamento node %d: %f' % (node_origem_label,
node_origem_deslocamento_y) # imprime deslocamento do node analisado
# ENCONTRAR NODE PARA O QUAL Y=0 POIS INDICA X=DIAMETRO
```

```

# sem considerar valores absolutos. Este node definira
# a posicao em x do diametro
# Inicializa Variavel
max_deslocamento = 0
node_position = 0
# for loop para encontrar o maior valor de deslocamento em Y
(positvo)
for x in range (len(node_aresta_superior)):
# Recebe deslocamento em y para cada node
node_y_deslocamento = (dureza_odb_object.steps['Alivio'].frames[-1].fieldOutputs
['U'].values[x].data[1])
# Recebe deslocamento em x para cada node
# node_x_deslocamento_diametro =
(dureza_odb_object.steps['Alivio'].frames[-1].fieldOutputs['U'].values[x].data[0])
# Verifica qual node possui maior deslocamento em Y
if node_y_deslocamento > max_deslocamento:
# Nome do node com maior deslocamento em Y
diametro_node_label =
dureza_odb_object.steps['Alivio'].frames[-1].fieldOutputs['U'].values[x].nodeLabel
# Encontra raio da impressao = coordenada x do node encontrado
acima
raio_impressao = node_aresta_superior[diametro_node_label-1].coordinates[0]
# diametro_node_label-1, pois list inicia em zero
# Calcula diametro da impressao
diametro_impressao = raio_impressao*2.0
# Recebe maximo deslocamento
max_deslocamento = node_y_deslocamento
# Imprime resultados para diametro da calota esferica
print '\n\n'
print 'diametro_node_label: %d' % diametro_node_label
print 'Deslocamento em y node %d: %f' % (diametro_node_label,
max_deslocamento)
print 'Diametro: %f' % (diametro_impressao)
#-----
#*****
#-----

# REACTION FORCE
# Odb reading and writing access
odb = session.openOdb('dureza.odb')
# Create a variable that refers to the last frame of the first
Object
lastFrame_Step1 = odb.steps['Penetracao'].frames[-1]
lastFrame_Step2 = odb.steps['Alivio'].frames[-1]
# Create a variable that refers to the displacement U in the
last frame of the first and second step
displacement_Step1 = lastFrame_Step1.fieldOutputs['RF']
displacement_Step2 = lastFrame_Step2.fieldOutputs['RF']
# CREATE A VARIABLE THAT REFERS TO THE NODE SET PUNCH
center = odb.rootAssembly.nodeSets['M-SET-1']
centerDisplacement_Step1 =

```

```

displacement_Step1.getSubset(region=center)
centerDisplacement_Step2 =
displacement_Step2.getSubset(region=center)
# Forca Resultante
Forca_reacao_y = abs(centerDisplacement_Step1.values[0].data[1])
#-----
#*****
#-----
# ARQUIVO DE DADOS NUMERICOS PARA COMPARACAO COM
# DADOS EXPERIMENTAIS
# Abre arquivo de saida
dispFile2 = open("output_U2_450C.txt",'w')
# Imprime valor do diametro da calora esferica no arquivo
dispFile2.write('DIAMETRO=%10.4E\n' % (diametro_impresao))
# Imprime valor da profundida da calota esferica no arquivo
dispFile2.write('PROFUNDIDADE=%10.4E\n' %
(node_origem_deslocamento_y))
# Imprime valor da profundida da calota esferica no arquivo
dispFile2.write('Forca_reacao_y=%10.4E\n' % (Forca_reacao_y))
# Fecha arquivo
dispFile2.close()
#-----
#*****
#-----
# XY DATA FORCE vs. DISPLACEMENT LOADING
force_list = []
displacement_list = []
# Abre arquivo de saida
dispFile3 = open("CURVA_REACAO.txt",'w')
for xx in range (len(dureza_odb_object.steps['Penetracao'].frames)):
displacement_list.append(abs(dureza_odb_object.steps['Penetracao'].frames
[xx].fieldOutputs['U'].values[node_origem_label].data[1]))
force_list.append(abs(dureza_odb_object.steps['Penetracao'].frames[xx].fieldOutputs
['RF'].getSubset(region=center).values[0].data[1]))
# IMPRIME CURVA DE REACAO DE DUREZA EM .TXT
dispFile3.write('%10.4E\t%10.4E\n' % (displacement_list[xx],
force_list[xx]))
# Fecha arquivo
dispFile3.close()
#-----
#*****
#-----
# XY DATA FORCE vs. DISPLACEMENT UNLOADING
force_list_alivio = []
displacement_list_alivio = []
# Abre arquivo de saida
dispFile4 = open("CURVA_REACAO_ALIVIO.txt",'w')
for xa in range (len(dureza_odb_object.steps['Alivio'].frames)):
displacement_list_alivio.append(abs(dureza_odb_object.steps['Ali
vio'].frames[xa].fieldOutputs['U'].values[node_origem_label].data[1]))

```

```

force_list_alivio.append(abs(dureza_odb_object.steps['Alivio'].f
rames[xa].fieldOutputs['RF'].getSubset(region=center).values[0].data[1]))
# IMPRIME CURVA DE REACAO DE DUREZA EM .TXT
dispFile4.write('%10.4E\t%10.4E\n' %
(displacement_list_alivio[xa], force_list_alivio[xa]))
# Fecha arquivo
dispFile4.close()
#-----
#*****
#-----
#-----
#*****
#-----
# ARQUIVO DE VERIFICACAO PARA MATLAB
# Assim que matlab le a palavra-chave 'DONE', a rotina prossegue com
# processo de otimizacao
# Escreve dados do Step 1 para arquivo ASCII
dispFile = open('verification.txt','w')
dispFile.write('DONE')
dispFile.close()
#-----
#*****
#-----
# QUIT ABAQUS
sys.exit()

```

I.4 MODELO DE SIMULAÇÃO - TREFILACAO.PY

```
*****
# Trefilacao
*****

# ENTRADAS:

nome = 'Teste'

# Geometria Barra:

R0 = 4.765      #[mm]
C = 50.0       #[mm]

Dy = 15        #[mm]

# Condições de Contorno:

DESLOCAMENTO = 60.0 #[mm]
ALIVIO = 2.0      #[mm]

# _____
# _____

Cte = 0.5

# Geometria Da Fieira 1

R1 = 4.437      #[mm]
alfa_e_1 = 0.15708 #[9 Graus]
alfa_s_1 = 0.78539 #[45 Graus]
L1 = R0/3      #[mm]
# _____
# _____

# Geometria Da Fieira 2

R2 = 3.9385     #[mm]
alfa_e_2 = 0.15708 #[9 Graus]
alfa_s_2 = 0.78539 #[45 Graus]
L2 = R1/3      #[mm]
# _____
# _____

# Geometria Da Fieira 3

R3 = 3.497      #[mm]
alfa_e_3 = 0.15708 #[9 Graus]
alfa_s_3 = 0.78539 #[45 Graus]
L3 = R2/3      #[mm]
# _____
# _____
```

```

# Atrito

fa = 0.00

# Nivel de refinamento da malha:

#-----

# Malha:

# Barra -----
ES1 = 0.1          # [mm]
ES2 = 0.1          # [mm]
ES3 = 0.1          # [mm]

# Fieira -----
ESF = 0.025       # [mm]

# -----
# Propriedades do material:

Nome_Material = 'AL 1120'
ModuloDeElasticidade = 65000 # [MPa]
Poisson = 0.3

# Curva de encruamento:

CurvaDeEncruamento = ((124.91,
    0.0), (124.91, 1e-06), (124.91, 2e-06), (124.91, 3e-06), (124.91, 4e-06), (
    124.91, 5e-06), (124.91, 6e-06), (124.91, 7e-06), (124.91, 8e-06), (
    124.910031, 0.0001), (124.910202, 0.0003), (124.910481, 0.0005), (
    124.910853, 0.0007), (124.911308, 0.0009), (124.911564, 0.001), (
    124.915083, 0.002), (124.920129, 0.003), (124.926518, 0.004), (124.93414,
    0.005), (124.942913, 0.006), (124.952775, 0.007), (124.963677, 0.008), (
    124.975578, 0.009), (124.988443, 0.01), (125.024637, 0.0125), (125.066296,
    0.015), (125.11313, 0.0175), (125.164901, 0.02), (125.282512, 0.025), (
    125.417886, 0.03), (125.738303, 0.04), (126.12048, 0.05), (126.560378,
    0.06), (127.054903, 0.07), (127.601576, 0.08), (128.198344, 0.09), (
    128.843462, 0.1), (132.747343, 0.15), (137.691806, 0.2), (150.377487, 0.3),
    (166.444543, 0.4), (185.608474, 0.5), (207.666728, 0.6), (232.464252, 0.7),
    (259.876707, 0.8), (289.801092, 0.9), (322.15, 1.0))
#-----

from abaqus import *
from abaqusConstants import *
import regionToolset

session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=None)

#-----

```

```

# Modelo
mdb.models.changeKey(fromName='Model-1', toName='Trefilacao')
Trefilacao = mdb.models['Trefilacao']

#-----
#*****
#-----
# Partes

import sketch
import part

#-----
# FIEIRA 1:

FSketch = Trefilacao.ConstrainedSketch(name='Fieira Sketch', sheetSize=100)
FSketch.sketchOptions.setValues(viewStyle=AXISYM)
FSketch.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
FSketch.ConstructionLine(point1=(0.0, -100.0), point2=(0.0, 100.0))
g = FSketch.geometry
FSketch.FixedConstraint(entity=g[2])

# Geometria da Fieira -----

y = (R0+Cte-R1)/(tan(alfa_e_1))

FSketch.Line(point1=(R1, 0.0), point2=(R0 + Cte, y))
FSketch.Line(point1=(R0 + Cte, y), point2=(R0 + Cte, - (L1 + R0 + Cte - R1)))
FSketch.Line(point1=(R0 + Cte, - (L1 + R0 + Cte - R1)), point2=(R1, -L1))
FSketch.Line(point1=(R1, -L1), point2=(R1, 0.0))
# -----

F1Part = Trefilacao.Part(name='Fieira 1', dimensionality=AXISYMMETRIC,
type=DISCRETE_RIGID_SURFACE)
F1Part.BaseWire(sketch=FSketch)

#-----
#-----
# FIEIRA 2:

FSketch = Trefilacao.ConstrainedSketch(name='Fieira Sketch', sheetSize=100)
FSketch.sketchOptions.setValues(viewStyle=AXISYM)
FSketch.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
FSketch.ConstructionLine(point1=(0.0, -100.0), point2=(0.0, 100.0))
g = FSketch.geometry
FSketch.FixedConstraint(entity=g[2])

# Geometria da Fieira -----

y = (R1+Cte-R2)/(tan(alfa_e_2))

```

```

FSketch.Line(point1=(R2, 0.0 -Dy), point2=(R1 + Cte, y -Dy))
FSketch.Line(point1=(R1 + Cte, y -Dy), point2=(R1 + Cte, - (L2 + R1 + Cte - R2 + Dy)))
FSketch.Line(point1=(R1 + Cte, - (L2 + R1 + Cte - R2 + Dy)), point2=(R2, -L2 -Dy))
FSketch.Line(point1=(R2, -L2 -Dy), point2=(R2, -Dy))
# -----

F2Part = Trefilacao.Part(name='Fieira 2', dimensionality=AXISYMMETRIC,
type=DISCRETE_RIGID_SURFACE)
F2Part.BaseWire(sketch=FSketch)
#
#
# FIEIRA 3:

FSketch = Trefilacao.ConstrainedSketch(name='Fieira Sketch', sheetSize=100)
FSketch.sketchOptions.setValues(viewStyle=AXISYM)
FSketch.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
FSketch.ConstructionLine(point1=(0.0, -100.0), point2=(0.0, 100.0))
g = FSketch.geometry
FSketch.FixedConstraint(entity=g[2])

# Geometria da Fieira -----

y = (R2+Cte-R3)/(tan(alfa_e_3))

FSketch.Line(point1=(R3, 0.0 -2*Dy), point2=(R2 + Cte, y -2*Dy))
FSketch.Line(point1=(R2 + Cte, y -2*Dy), point2=(R2 + Cte, - (L3 + R2 + Cte - R3 + 2*Dy)))
FSketch.Line(point1=(R2 + Cte, - (L3 + R2 + Cte - R3 + 2*Dy)), point2=(R3, -L3 -2*Dy))
FSketch.Line(point1=(R3, -L3 -2*Dy), point2=(R3, -2*Dy))
# -----

F3Part = Trefilacao.Part(name='Fieira 3', dimensionality=AXISYMMETRIC,
type=DISCRETE_RIGID_SURFACE)
F3Part.BaseWire(sketch=FSketch)
#
#

# Barra

BSketch = Trefilacao.ConstrainedSketch(name='Barra Sketch', sheetSize=100)
BSketch.sketchOptions.setValues(viewStyle=AXISYM)
BSketch.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
BSketch.ConstructionLine(point1=(0.0, -100.0), point2=(0.0, 100.0))
g = BSketch.geometry
BSketch.FixedConstraint(entity=g[2])

# Medidas Auxiliares
y1 = (R0-R1)/(tan(alfa_e_1))
y2 = (R1-R2)/(tan(alfa_e_2))

```



```

# Geometria do Barra -----

BSketch.Line(point1=(R0, y1), point2=(R0, C))
BSketch.Line(point1=(R0, C), point2=(0.0, C))
BSketch.Line(point1=(0.0, C), point2=(0.0, y1))
BSketch.Line(point1=(0.0, y1), point2=(R0, y1))

# -----

BPart = Trefilacao.Part(name='Barra', dimensionality=AXISYMMETRIC, type=DEFORMABLE_BODY)
BPart.BaseShell(sketch=BSketch)

# -----
# *****
# -----

# Material

Material = Trefilacao.Material(name=Nome_Material)
Material.Elastic(table=((ModuloDeElasticidade, Poisson),))
Material.Plastic(table=CurvaDeEncruamento)

# -----
# *****
# -----

# Secao

import section

BarraSection = Trefilacao.HomogeneousSolidSection(name='Secao1', material = Nome_Material)

Bf = BPart.faces.findAt(((R0/2,C/2,0.0),))
BF = regionToolset.Region(faces=(Bf))
BPart.SectionAssignment(region=BF, sectionName='Secao1')

# -----
# *****
# -----

# Criar Steps

Trefilacao.StaticStep(name='Trefilacao', previous='Initial',
    maxNumInc=100000, initialInc=1e-09, minInc=1e-15, maxInc=0.02, nlgeom=ON)

Trefilacao.StaticStep(name='Alivio', previous='Trefilacao',
    maxNumInc=100000, initialInc=1e-09, minInc=1e-15, maxInc=0.02, nlgeom=ON)

# Editar Field Output

```

```

mdb.models['Trefilacao'].fieldOutputRequests['F-Output-1'].setValues(
    variables=('S', 'MISES', 'MISESMAX', 'TSHR', 'CTSHR', 'ALPHA', 'TRIAx',
    'VS', 'PS', 'CS11', 'ALPHAN', 'SSAVG', 'MISESONLY', 'PRESSONLY', 'E', 'VE',
    'PE', 'VEEQ', 'PEEQ', 'PEEQT', 'PEEQMAX', 'PEMAG', 'PEQC', 'EE', 'IE',
    'THE', 'NE', 'LE', 'ER', 'SE', 'SPE', 'SEPE', 'SEE', 'SEP', 'SALPHA', 'U',
    'RF', 'CF', 'CSTRESS', 'CSTRESSETOS', 'CLINELOAD', 'CPOINTLOAD',
    'CDSTRESS', 'CDISP', 'CDISPETOS', 'CFORCE', 'CNAREA', 'CSTATUS', 'PPRESS',
    'ENER', 'ELEN', 'ELEDEN'), timeInterval=0.01)

#-----
#*****
#-----

# # Contato

Trefilacao.ContactProperty('Contato')

Trefilacao.interactionProperties['Contato'].TangentialBehavior(
    formulation=PENALTY, directionality=ISOTROPIC, slipRateDependency=OFF,
    pressureDependency=OFF, temperatureDependency=OFF, dependencies=0, table=((
    fa, ), ), shearStressLimit=None, maximumElasticSlip=FRACTION,
    fraction=0.005, elasticSlipStiffness=None)

Trefilacao.interactionProperties['Contato'].NormalBehavior(
    pressureOverclosure=HARD, allowSeparation=ON,
    constraintEnforcementMethod=DEFAULT)

mdb.models['Trefilacao'].ContactStd(name='Contato Geral', createStepName='Initial')
mdb.models['Trefilacao'].interactions['Contato Geral'].includedPairs.setValuesInStep(
    stepName='Initial', useAllstar=ON)
mdb.models['Trefilacao'].interactions['Contato Geral'].contactPropertyAssignments.appendInStep(
    stepName='Initial', assignments=((GLOBAL, SELF, 'Contato'), ))

#-----
#*****
#-----

import assembly

# Create the part instance
TrefilacaoAssembly = Trefilacao.rootAssembly

F1Instance = TrefilacaoAssembly.Instance(name='Fieira 1 Instance', part = F1Part, dependent=ON)
F2Instance = TrefilacaoAssembly.Instance(name='Fieira 2 Instance', part = F2Part, dependent=ON)
F3Instance = TrefilacaoAssembly.Instance(name='Fieira 3 Instance', part = F3Part, dependent=ON)
BInstance = TrefilacaoAssembly.Instance(name='Barra Instance', part = BPart, dependent=ON)

Trefilacao.rootAssembly.ReferencePoint(point=(R0 + Cte, -L1/2, 0.0))
Trefilacao.rootAssembly.ReferencePoint(point=(0.0, -S, 0.0))
Trefilacao.rootAssembly.ReferencePoint(point=(R1 + Cte, -L2/2 - Dv, 0.0))

```

```

Trefilacao.rootAssembly.ReferencePoint(point=(R2 + Cte, -L3/2 - 2*Dy, 0.0))

a = Trefilacao.rootAssembly
e1 = a.instances['Fieira 1 Instance'].edges
edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#f ]', ), )
region2=a.Set(edges=edges1, name='b_Set-1')
a = Trefilacao.rootAssembly
r1 = a.referencePoints
refPoints1=(r1[9], )
region1=regionToolset.Region(referencePoints=refPoints1)
Trefilacao.RigidBody(name='Constraint-1', refPointRegion=region1,
    bodyRegion=region2)

a = Trefilacao.rootAssembly
e1 = a.instances['Fieira 2 Instance'].edges
edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#f ]', ), )
region2=a.Set(edges=edges1, name='b_Set-2')
a = Trefilacao.rootAssembly
r1 = a.referencePoints
refPoints1=(r1[11], )
region1=regionToolset.Region(referencePoints=refPoints1)
Trefilacao.RigidBody(name='Constraint-2', refPointRegion=region1,
    bodyRegion=region2)

a = Trefilacao.rootAssembly
e1 = a.instances['Fieira 3 Instance'].edges
edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#f ]', ), )
region2=a.Set(edges=edges1, name='b_Set-3')
a = Trefilacao.rootAssembly
r1 = a.referencePoints
refPoints1=(r1[12], )
region1=regionToolset.Region(referencePoints=refPoints1)
Trefilacao.RigidBody(name='Constraint-3', refPointRegion=region1,
    bodyRegion=region2)

#-----
#-----
#-----

# Criar BCs

# Deslocamento Fio

Be = BInstance.edges.findAt(((R1/2,0.0,0.0)),)
Ber = regionToolset.Region(edges=(Be))

a = mdb.models['Trefilacao'].rootAssembly
e1 = a.instances['Barra Instance'].edges
edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
region = a.Set(edges=edges1, name='Set-12')
mdb.models['Trefilacao'].DisplacementBC(name='BC-5',

```

```

        createStepName='Trefilacao', region=region, u1=UNSET, u2=-DESLOCAMENTO, ur3=UNSE
        amplitude=UNSET, fixed=OFF, distributionType=UNIFORM, fieldName='',
        localCsys=None)

# Engaste Fieira

a = Trefilacao.rootAssembly
r1 = a.referencePoints
refPoints1=(r1[9], )
region = a.Set(referencePoints=refPoints1, name='Engaste1')
Trefilacao.EncastreBC(name='Engaste1', createStepName='Initial',
    region=region, localCsys=None)

a = Trefilacao.rootAssembly
r1 = a.referencePoints
refPoints1=(r1[11], )
region = a.Set(referencePoints=refPoints1, name='Engaste2')
Trefilacao.EncastreBC(name='Engaste2', createStepName='Initial',
    region=region, localCsys=None)

a = Trefilacao.rootAssembly
r1 = a.referencePoints
refPoints1=(r1[12], )
region = a.Set(referencePoints=refPoints1, name='Engaste3')
Trefilacao.EncastreBC(name='Engaste3', createStepName='Initial',
    region=region, localCsys=None)

mdb.models['Trefilacao'].boundaryConditions['Engaste1'].deactivate('Alivio')
mdb.models['Trefilacao'].boundaryConditions['Engaste2'].deactivate('Alivio')
mdb.models['Trefilacao'].boundaryConditions['Engaste3'].deactivate('Alivio')

# Alivio Fieiras

a = mdb.models['Trefilacao'].rootAssembly
r1 = a.referencePoints
refPoints1=(r1[9], r1[11], r1[12],)
region = a.Set(referencePoints=refPoints1, name='Set-11')
mdb.models['Trefilacao'].DisplacementBC(name='Alivio', createStepName='Alivio',
    region=region, u1=ALIVIO, u2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET, fixed=OFF,
    distributionType=UNIFORM, fieldName='', localCsys=None)
#-----
#*****
#-----

# Malha de Elementos Finitos

import mesh

# Malha - Barra

BPart = mdb.models['Trefilacao'].parts['Barra']

```

```

BPart.seedPart(size=ES3, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1)

BPart = mdb.models['Trefilacao'].parts['Barra']
BPart.generateMesh()

# Malha Fieira

F1Part.seedPart(size=ESF, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1)
F1Part = mdb.models['Trefilacao'].parts['Fieira 1']
F1Part.generateMesh()

F2Part.seedPart(size=ESF, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1)
F2Part = mdb.models['Trefilacao'].parts['Fieira 2']
F2Part.generateMesh()

F3Part.seedPart(size=ESF, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1)
F3Part = mdb.models['Trefilacao'].parts['Fieira 3']
F3Part.generateMesh()

#-----
#*****
#-----

# Job

import job

mdb.Job(name=nome, model='Trefilacao', type=ANALYSIS, explicitPrecision=SINGLE,
        nodalOutputPrecision=SINGLE, description='Simula a Trefilacao',
        parallelizationMethodExplicit=DOMAIN, multiprocessingMode=DEFAULT,
        numDomains=4, userSubroutine='', numCpus=4, memory=90, memoryUnits=PERCENTAGE,
        scratch='', echoPrint=OFF, modelPrint=OFF, contactPrint=OFF,
        historyPrint=OFF)

```