

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**ANÁLISE DE ROTA DE FABRICAÇÃO DE FIO RETANGULAR DE
COBRE ELETROLÍTICO, COM SEÇÃO DE 3,5 x 8,8 mm, A PARTIR
DE VERGALHÃO CILÍNDRICO DE DIÂMETRO 8,0 mm**

Alisson Duarte da Silva

**Belo Horizonte
2009**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Alisson Duarte da Silva

**ANÁLISE DE ROTA DE FABRICAÇÃO DE FIO RETANGULAR DE
COBRE ELETROLÍTICO, COM SEÇÃO DE 3,5 x 8,8 mm, A PARTIR
DE VERGALHÃO CILÍNDRICO DE DIÂMETRO 8,0 mm**

**Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2009**

Alisson Duarte da Silva

**ANÁLISE DE ROTA DE FABRICAÇÃO DE FIO RETANGULAR DE
COBRE ELETROLÍTICO, COM SEÇÃO DE 3,5 x 8,8 mm, A PARTIR
DE VERGALHÃO CILÍNDRICO DE DIÂMETRO 8,0 mm**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Doutor Haroldo Béria Campos

Co-Orientador: Professor Doutor Paulo Roberto Cetlin

Área de concentração: Processos de Fabricação

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2009

Dedico a minha mãe, Lana, pela compreensão e apoio incondicional em todas as etapas de minha vida.

Aos meus irmãos, Alex e Adriano, que nunca hesitaram nem hesitarão em estender a mão.

AGRADECIMENTOS

Ao mais que Orientador, ao amigo e companheiro Professor Doutor Haroldo Béria Campos, pela orientação e dedicação durante todo o trabalho.

Ao Professor Doutor Paulo Roberto Cetlin, Co-Orientador de papel importantíssimo no direcionamento do trabalho, por acreditar e incentivar este Engenheiro neste grande desafio.

Ao Mestre Roberto de Souza Oliveira, pela atenção e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho, além de viabilizar o contato junto à Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil.

Ao Doutor Frederico de Castro Magalhães, pela auxílio na aplicação do método dos elementos finitos e nas simulações numéricas realizadas.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, que me auxiliaram nas decisões e caminhos tomados nesta minha trajetória.

A minha família, Alex, Adriano e Paulera, pelo simples fato de serem parte do meu lar, do porto seguro no qual eu me fortaleço para enfrentar a todos os desafios a que me disponho a vencer.

Ao meu pai Laerte, por estar sempre à disposição na figura também de amigo.

A minha namorada Letícia, por estar presente em momentos importantes da minha vida, e a sua mãe Maria Tereza, pelo apoio e incentivo.

Aos meus amigos pelos momentos de força e compreensão, importantes durante todo o processo de concentração no meu objetivo proposto.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para em diversos aspectos deste trabalho.

E, por fim, o meu agradecimento especial a minha mãe Lana, que sempre lutou pela minha formação, sempre me apoiou em minhas decisões, que sempre comemorou as minhas vitórias e que continua ao meu lado sempre.

RESUMO

A fabricação do fio de cobre eletrolítico retangular para utilização como componente na montagem de transformadores elétricos é realizada hoje na Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda, tipicamente, a partir de um vergalhão de seção circular. O processo de fabricação mais empregado para a obtenção do componente é composto por laminação a frio e trefilação. O presente trabalho propõe estudar rotas alternativas para a fabricação do fio retangular de cobre, além de buscar entender a influência dos diversos parâmetros envolvidos nestas novas rotas, bem como dimensão da matéria prima e formas das matrizes utilizadas na conformação mecânica. O estudo baseia-se na prática da simulação numérica dos processos propostos com base no Método dos Elementos Finitos através do software Deform 3D. A revisão bibliográfica busca caracterizar de forma completa a matéria prima a ser utilizada, apresentar os conceitos sobre o processo de fabricação por trefilação, detalhar o processo de fabricação empregado na Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda e discutir conceitos básicos sobre o método dos elementos finitos. A metodologia apresenta os sistemas propostos para a realização do estudo de diferentes rotas de fabricação do fio de cobre retangular, bem como os componentes utilizados em cada processo. Os resultados para cada sistema são analisados e comparados, considerando-se a tensão efetiva e a deformação efetiva sobre o material processado e principalmente as características dimensionais dos perfis obtidos. Conclui-se o trabalho definindo-se o melhor processo e os melhores parâmetros estudados para a fabricação do fio retangular de cobre. São sugeridos trabalhos a serem realizados a partir do presente estudo.

Palavras-chaves: Cobre Eletrolítico, Fio de Cobre, Conformação Mecânica, Trefilação, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

The electrolytic copper rectangular wire production in order to use it as an electric transformer component is nowadays processed at Toshiba Transmission and Distribution of Brazil Ltda (“Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil”), typically, using a circular wire rod material. The typical manufacturing process is composed for cold rolling and drawing. This job proposes studying new routes to produce the copper rectangular wire and to understand involved parameters influence of these new routes, like rod material dimension and matrices shapes used at the forming. The study is done through numeric simulations based on the Finite Element Method, using the software Deform 3D. The revision of the chosen bibliography, in this recent study, presents rod material characteristics, drawing process concepts, Toshiba Transmission and Distribution of Brazil Ltda process details and basic concepts on Finite Element Method (FEM). The methodology presents proposed systems to make the studies of different rectangular copper wire manufacturing routes, as well the used components on each analyzed process. The results for each system are analyzed and compared, considering stress effective and strain effective on processed material and mainly output material dimensional characteristics. It's finished concluding the better process and better parameters studied for producing the rectangular electrolytic copper wire. It's suggested works based on this study.

Keywords: Electrolytic Copper, Copper Wire, Forming, Drawing, Finite Element Method (FEM).

SUMÁRIO

Resumo

Abstract

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Anexos

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contexto.....	1
1.2. Objetivos do Trabalho.....	2
1.3. Conteúdo.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. A matéria prima.....	4
2.1.1. O cobre eletrolítico.....	4
2.1.2. Características dimensionais e mecânicas da matéria prima.....	7
2.2. Trefilação.....	10
2.2.1. O processo.....	10
2.2.2. Fieira.....	11
2.2.3. Deformação durante a trefilação.....	13
2.3. O produto arame retangular de cobre.....	15
2.3.1. O processo atual de fabricação dos fios retangulares de cobre eletrolítico.....	15
2.3.2. As tolerâncias do produto.....	19
2.4. O método dos elementos finitos.....	20

3. METODOLOGIA.....	22
3.1. Desenvolvimento do trabalho.....	22
3.2. Parâmetros para a simulação.....	23
3.2.1. O material.....	23
3.2.2. Parâmetros de processo.....	25
3.2.3. Tratamento da matéria prima.....	25
3.2.4. Análise dos resultados.....	26
3.3. Simulação numérica para a verificação das principais falhas utilizando apenas um passe de redução.....	27
3.3.1. Sistema proposto para a simulação com um passe de redução.....	28
3.3.2. Geometrias empregadas na simulação com um passe de redução.....	30
3.4. Simulação numérica para a verificação do comportamento do material sob conformação mecânica com espessura final definida sem restrição lateral.....	31
3.4.1. Sistema proposto para conformação mecânica com espessura final definida.....	31
3.4.2. Geometrias empregadas na simulação da conformação mecânica com espessura final definida.....	33
3.5. Simulação numérica utilizando dois passes de trefilação.....	34
3.5.1. Sistema proposto para a trefilação do primeiro passe.....	35
3.5.2. Geometrias empregadas na simulação do primeiro passe.....	36
3.5.3. Sistema proposto para a trefilação do segundo passe.....	36
3.5.4. Geometrias empregadas na simulação do segundo passe.....	37
3.6. Simulação numérica utilizando dois passes com perfil curvo no primeiro passe.....	37

3.6.1. Sistema proposto para a trefilação do primeiro passe com perfil modificado.....	37
3.6.2. Geometrias empregadas na simulação do primeiro passe com perfil modificado.....	40
3.6.3. Sistema proposto para a trefilação do segundo passe.....	41
3.6.4. Geometrias empregadas na simulação do segundo passe.....	41
3.7. Simulação numérica utilizando uma fieira não-convencional.....	41
3.7.1. Sistema proposto para o processo com a fieira não-convencional.....	41
3.7.2. Geometrias empregadas na simulação do primeiro passe com a fieira não-convencional.....	43
3.8. Simulação numérica utilizando vergalhão com diâmetro 9 mm.....	44
3.8.1. Sistema proposto para processo com vergalhão de diâmetro 9 mm.....	45
3.8.2. Geometrias empregadas na simulação com vergalhão de diâmetro 9 mm.....	46
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	47
4.1. Análise da simulação numérica em passe único.....	47
4.1.1. Vergalhão com diâmetro de 8 mm e fieira com 9° de semi-ângulo.....	47
4.1.2. Vergalhão com diâmetro de 8 mm e fieira com 4° de semi-ângulo.....	51
4.1.3. Relacionando os resultados.....	52
4.2. Análise da simulação numérica de conformação mecânica com espessura final definida.....	56

4.2.1. Vergalhão com 6 mm de diâmetro e matriz com 4° de semi-ângulo.....	56
4.2.2. Vergalhão com 6 mm de diâmetro e matriz com 6° de semi-ângulo.....	58
4.2.3. Vergalhão com 6 mm de diâmetro e matriz com 8° de semi-ângulo.....	59
4.2.4. Vergalhão com 7 mm de diâmetro e matriz com 4° de semi-ângulo.....	61
4.2.5. Vergalhão com 7 mm de diâmetro e matriz com 6° de semi-ângulo.....	62
4.2.6. Vergalhão com 7 mm de diâmetro e matriz com 8° de semi-ângulo.....	64
4.2.7. Vergalhão com 8 mm de diâmetro e matriz com 4° de semi-ângulo.....	65
4.2.8. Vergalhão com 8 mm de diâmetro e matriz com 6° de semi-ângulo.....	67
4.2.9. Vergalhão com 8 mm de diâmetro e matriz com 8° de semi-ângulo.....	68
4.2.10. Relacionando os resultados.....	69
4.3. Análise da simulação numérica de processo com dois passes.....	77
4.3.1. Primeiro passe com espessura de 4,0 mm.....	77
4.3.2. Segundo passe para o processo com espessura intermediária de 4,0 mm.....	79
4.3.3. Primeiro passe com espessura de 4,5 mm.....	80
4.3.4. Segundo passe para o processo com espessura intermediária de 4,5 mm.....	81

4.3.5. Primeiro passe com espessura de 5,0 mm.....	83
4.3.6. Segundo passe para o processo com espessura intermediária de 5,0 mm.....	84
4.3.7. Relacionando os resultados.....	85
4.4. Análise da simulação numérica de processo com dois passes e fieira curva no primeiro passe.....	91
4.4.1. Primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.....	92
4.4.2. Segundo passe para o processo com fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.....	93
4.4.3. Primeiro passe com curva de raio 9,0 mm.....	94
4.4.4. Segundo passe para o processo com fieira curva de raio 9,0 mm no primeiro passe.....	96
4.4.5. Relacionando os resultados.....	97
4.5. Análise da simulação com fieira não-convencional.....	102
4.6. Análise da simulação numérica com vergalhão de 9 mm.....	106
4.6.1. Primeiro passe com espessura de 5,0 mm.....	106
4.6.2. Segundo passe para o processo com espessura intermediária de 5,0 mm.....	107
4.6.3. Primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.....	108
4.6.4. Segundo passe para o processo com fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.....	110
4.6.5. Relacionando os resultados.....	111
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	119
5.1. Conclusões.....	119
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	121
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122

7. ANEXOS.....	125
ANEXO A – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 1.....	126
ANEXO B – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 2.....	127
ANEXO C – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 3.....	133
ANEXO D – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 4.....	137
ANEXO E – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 5.....	140
ANEXO F – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 6.....	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Embalagem da matéria prima - vergalhão de cobre eletrolítico..	8
Figura 2.2.	Ensaio de tração no vergalhão de cobre com diâmetro de 8 mm – Tensão x deformação efetivas na região de deformação uniforme.....	8
Figura 2.3.	Representação esquemática de um processo de trefilação de barras.....	9
Figura 2.4.	Esquema de uma máquina de trefilar com bloco rotativo.....	10
Figura 2.5.	Desenho da uma fieira em corte.....	12
Figura 2.6.	Representação esquemática dos esforços presentes no processo de trefilação.....	13
Figura 2.7.	Esquematização da deformação durante a trefilação.....	14
Figura 2.8.	Idealização do processo de geração de rupturas centrais.....	15
Figura 2.9.	Esquema do processo de fabricação do fio de cobre retangular realizado na TTDB.....	16
Figura 2.10.	Seção transversal do perfil: (a) matéria prima, (b) perfil laminado e (c) perfil trefilado.....	17
Figura 2.11.	Processo de laminação da TTDB.....	17
Figura 2.12.	Processo de trefilação na TTDB.....	18
Figura 3.1.	Dimensões do (a) vergalhão e do (b) produto final.....	22
Figura 3.2.	Aspecto físico da (a) matéria prima e do (b) produto final.....	22
Figura 3.3.	Gráfico tensão x deformação para o comportamento plástico do material a ser simulado.....	24
Figura 3.4.	Geometria simétrica discretizada em pequenos elementos.....	25

Figura 3.5.	Etapas definidas para a realização das simulações numéricas..	27
Figura 3.6.	Geometria simétrica discretizada em pequenos elementos.....	28
Figura 3.7.	Dimensões da matriz de trefilação com semi-ângulo de 9°	29
Figura 3.8.	Dimensões da matriz de trefilação com semi-ângulo de 4°	29
Figura 3.9.	Vista frontal mostrando a relação de simetria para a (a) matriz e para o (b) material de trabalho.....	30
Figura 3.10.	Sistema de montagem para o início do processo de simulação em relação à (a) vista frontal e à (b) vista em perspectiva.....	30
Figura 3.11.	Perspectiva dimétrica da matriz aberta lateralmente com um semi-ângulo de 4°	32
Figura 3.12.	Dimensões das matrizes para simulação de conformação mecânica unidirecional com semi-ângulo de (a) 4° , (b) 6° e (c) 8° e (d) espessura imposta pela matriz.....	32
Figura 3.13.	Variação dimensional das geometrias a serem utilizadas na simulação unidirecional: vergalhão com (a) 6 mm de diâmetro, (b) 7 mm de diâmetro e (c) 8 mm de diâmetro.....	33
Figura 3.14.	Vista frontal mostrando a relação de simetria para a (a) matriz e para o (b) material de trabalho.....	34
Figura 3.15.	Sistema de montagem para o início do processo de simulação em relação à (a) vista frontal e à (b) vista em perspectiva.....	34
Figura 3.16.	Dimensões das matrizes para o primeiro passe com semi-ângulo de 8° espessura de saída de (a) 4,0 mm, (b) 4,5 mm e (c) 5,0 mm. Matriz em perspectiva isométrica.....	35
Figura 3.17.	Dimensões da fieira a ser utilizada no segundo passe da simulação com 2 passes.....	36
Figura 3.18.	Matriz genérica para o primeiro passe.....	38

Figura 3.19.	Perspectiva dimétrica da matriz de perfil modificado.....	38
Figura 3.20.	Dimensões da matriz com perfil modificado de raio 4,5 mm.....	39
Figura 3.21.	Dimensões da matriz com perfil modificado de raio 9 mm.....	39
Figura 3.22.	Vista frontal mostrando a relação de simetria para a (a) matriz de perfil modificado e para o (b) material de trabalho.....	40
Figura 3.23.	Sistema de montagem para o início do processo de simulação do primeiro passe em relação à (a) vista frontal e à (b) vista em perspectiva.....	40
Figura 3.24.	Fieira curva para passe único.....	42
Figura 3.25.	Dimensões da matriz com faces laterais curvas.....	43
Figura 3.26.	Vista frontal mostrando a relação de simetria para a (a) matriz de faces laterais curvas e para o (b) material de trabalho.....	44
Figura 3.27.	Sistema de montagem para o início do processo de simulação utilizando fieira com faces laterais curvas em relação à (a) vista frontal e à (b) vista em perspectiva.....	44
Figura 3.28.	Seção transversal da matéria prima a ser simulada.....	45
Figura 4.1.	Deformação efetiva ocorrida no vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 9°.....	48
Figura 4.2.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 9° na região da ocorrência da conformação.....	49
Figura 4.3.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 9° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	49

Figura 4.4.	Força sobre a fieira de semi-ângulo 9° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 8 mm.....	50
Figura 4.5.	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com diâmetro 8 mm em uma fieira com 9° de semi-ângulo de contato.....	51
Figura 4.6.	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com diâmetro 8 mm em uma fieira com 4° de semi-ângulo de contato.....	52
Figura 4.7.	Distribuição da tensão efetiva sobre o material durante a trefilação para o processo de passe único.....	53
Figura 4.8.	Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo em passe único.....	55
Figura 4.9.	Relação entre o dimensional obtido pelo processo em passe único e o semi-ângulo de contato da trefila.....	55
Figura 4.10.	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 6 mm de diâmetro em uma matriz com 4° de semi-ângulo de contato.....	58
Figura 4.11.	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 6 mm de diâmetro em uma matriz com 6° de semi-ângulo de contato.....	59
Figura 4.12.	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 6 mm de diâmetro em uma matriz com 8° de semi-ângulo de contato.....	61
Figura 4.13.	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 7 mm de diâmetro em uma matriz com 4° de semi-ângulo de contato.....	62

Figura 4.14.	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 7 mm de diâmetro em uma matriz com 6° de semi-ângulo de contato.....	64
Figura 4.15.	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 7 mm de diâmetro em uma matriz com 8° de semi-ângulo de contato.....	65
Figura 4.16.	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 8 mm de diâmetro em uma matriz com 4° de semi-ângulo de contato.....	66
Figura 4.17	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 8 mm de diâmetro em uma matriz com 6° de semi-ângulo de contato.....	68
Figura 4.18.	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 8 mm de diâmetro em uma matriz com 8° de semi-ângulo de contato.....	69
Figura 4.19.	Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 6 mm durante a trefilação para o processo com espessura final definida.....	70
Figura 4.20.	Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 7 mm durante a trefilação para o processo com espessura final definida.....	70
Figura 4.21.	Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 8 mm durante a trefilação para o processo com espessura final definida.....	72
Figura 4.22.	Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura definida com vergalhão de diâmetro 6 mm.....	73

Figura 4.23.	Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura definida com vergalhão de diâmetro 7 mm.....	74
Figura 4.24.	Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura definida com vergalhão de diâmetro 8 mm.....	74
Figura 4.25.	Relação entre o dimensional obtido pelo processo de espessura definida a partir do vergalhão de diâmetro 6 mm e o semi-ângulo de contato da trefila.....	75
Figura 4.26.	Relação entre o dimensional obtido pelo processo de espessura definida a partir do vergalhão de diâmetro 7 mm e o semi-ângulo de contato da trefila.....	76
Figura 4.27	Relação entre o dimensional obtido pelo processo de espessura definida a partir do vergalhão de diâmetro 8 mm e o semi-ângulo de contato da trefila.....	76
Figura 4.28.	Dimensional do perfil de saída para o primeiro passe com espessura de 4,0 mm.....	78
Figura 4.29.	Dimensional do perfil de saída do segundo passe para o processo de espessura intermediária de 4,0 mm.....	80
Figura 4.30.	Dimensional do perfil de saída para o primeiro passe com espessura de 4,5 mm.....	81
Figura 4.31.	Dimensional do perfil de saída do segundo passe para o processo de espessura intermediária de 4,5 mm.....	82
Figura 4.32.	Dimensões do perfil de saída para o primeiro passe com espessura de 5,0 mm.....	84
Figura 4.33.	Dimensões do perfil de saída do segundo passe para o processo de espessura intermediária de 5,0 mm.....	85

Figura 4.34.	Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 8 mm no primeiro passe do processo em 2 passes.....	86
Figura 4.35.	Distribuição da tensão efetiva sobre o material no segundo passe do processo em 2 passes.....	86
Figura 4.36.	Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura intermediária de 4,0 mm.....	88
Figura 4.37.	Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura intermediária de 4,5 mm.....	89
Figura 4.38.	Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura intermediária de 5,0 mm.....	89
Figura 4.39.	Relação entre as dimensões obtidas no primeiro passe para diferentes espessuras intermediárias.....	90
Figura 4.40.	Relação entre as dimensões obtidas no segundo passe para diferentes espessuras intermediárias.....	90
Figura 4.41.	Dimensões do perfil de saída para o primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.....	93
Figura 4.42	Dimensões do perfil de saída para o segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.....	94
Figura 4.43.	Dimensões do perfil de saída para o primeiro passe com curva de raio 9,0 mm.....	96
Figura 4.44.	Dimensões do perfil de saída para o segundo passe após a fieira curva de raio 9,0 mm.....	97
Figura 4.45.	Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 8 mm no primeiro passe com fieira não-convencional.....	98

Figura 4.46.	Distribuição da tensão efetiva sobre o material no segundo passe do processo com fieira não-convencional no primeiro passe.....	98
Figura 4.47.	Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo com a fieira com raio de 4,5 mm da curva.....	100
Figura 4.48.	Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo com a fieira com raio de 9,0 mm da curva.....	101
Figura 4.49.	Relação entre as dimensões obtidas no primeiro passe dos processos com fieira não-convencional.....	101
Figura 4.50.	Relação entre as dimensões obtidas no segundo passe dos processos com fieira não-convencional no primeiro passe.....	102
Figura 4.51.	Progressão do processo de trefilação em passe único com fieira não-convencional.....	103
Figura 4.52.	Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com diâmetro 8 mm em uma fieira curva.....	104
Figura 4.53.	Dimensional do perfil de saída sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm para o primeiro passe com espessura de 5,0 mm.....	107
Figura 4.54.	Dimensional do perfil de saída sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm para o segundo passe com espessura intermediária de 5,0 mm.....	108
Figura 4.55.	Dimensões do perfil de saída para o primeiro passe com curva de raio 4,5 mm sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm.....	109
Figura 4.56.	Dimensões do perfil de saída para o segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm.....	111

Figura 4.57	Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe.....	113
Figura 4.58.	Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe.....	113
Figura 4.59.	Relação entre a tensão efetiva no ponto crítico da conformação e a deformação efetiva sobre o material para o processo com espessura intermediária de 5,0 mm a partir do vergalhão de diâmetro 9 mm.....	114
Figura 4.60.	Relação entre a tensão efetiva no ponto crítico da conformação e a deformação efetiva sobre o material para o processo com espessura intermediária de 4,0 mm a partir do vergalhão de diâmetro 9 mm.....	115
Figura 4.61.	Relação entre as dimensões obtidas no primeiro passe dos processos para vergalhão de diâmetro 9 mm.....	116
Figura 4.62.	Relação entre as dimensões obtidas no segundo passe dos processos para vergalhão de diâmetro 9 mm.....	116
Figura 4.63.	Relação entre as dimensões finais obtidas para processos de espessura intermediária de 5,0 mm utilizando vergalhões de diâmetro 8 e 9 mm.....	117
Figura 4.64.	Relação entre as dimensões finais obtidas para processos de espessura intermediária mínima de 5,0 mm, com curva de raio 4,5 mm, utilizando vergalhões de diâmetro 8 e 9 mm.....	118
Figura A.1.	Regiões de deformação efetiva ocorrida no vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 4°	126
Figura A.2.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 4° na região da ocorrência da conformação.....	126

Figura A.3.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 4° no ponto mais crítico da região de ocorrência da conformação.....	126
Figura A.4.	Força sobre a fieira de semi-ângulo 4° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 8 mm.....	126
Figura B.1.	Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4°.....	127
Figura B.2.	Regiões de Tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° na ocorrência da deformação.....	127
Figura B.3	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	127
Figura B.4.	Força sobre a matriz de semi-ângulo 4° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 6 mm.....	127
Figura B.5.	Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6°.....	127
Figura B.6.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° na região da ocorrência da deformação.....	127
Figura B.7.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	128
Figura B.8.	Força sobre a matriz de semi-ângulo 6° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 6 mm.....	128

Figura B.9.	Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8°	128
Figura B.10.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° na região da ocorrência da deformação.....	128
Figura B.11.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	128
Figura B.12.	Força sobre a matriz de semi-ângulo 8° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 6 mm.....	128
Figura B.13.	Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4°	129
Figura B.14.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° na região da ocorrência da deformação.....	129
Figura B.15.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	129
Figura B.16.	Força sobre a matriz de semi-ângulo 4° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 7 mm.....	129
Figura B.17.	Região de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6°	129
Figura B.18.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° na região da ocorrência da deformação.....	129

Figura B.19.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	130
Figura B.20.	Força sobre a matriz de semi-ângulo 6° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 7 mm.....	130
Figura B.21.	Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8°.....	130
Figura B.22.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° na região da ocorrência da deformação.....	130
Figura B.23.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	130
Figura B.24.	Força sobre a matriz de semi-ângulo 8° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 7 mm.....	130
Figura B.25.	Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4°.....	131
Figura B.26.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° na região da ocorrência da deformação.....	131
Figura B.27.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	131
Figura B.28.	Força sobre a matriz de semi-ângulo 4° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 8 mm.....	131

Figura B.29.	Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6°.....	131
Figura B.30.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° na região da ocorrência da deformação.....	131
Figura B.31.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	132
Figura B.32.	Força sobre a matriz de semi-ângulo 6° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 8 mm.....	132
Figura B.33.	Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8°.....	132
Figura B.34.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° na região da ocorrência da deformação.....	132
Figura B.35.	Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	132
Figura B.36.	Força sobre a matriz de semi-ângulo 8° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 8 mm.....	132
Figura C.1.	Regiões de deformação efetiva no primeiro passe para espessura de 4,0 mm.....	133
Figura C.2.	Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 4,0 mm.....	133

Figura C.3.	Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 4,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	133
Figura C.4.	Força sobre a matriz em função da trefilação do quarto do vergalhão para o processo com espessura intermediária de 4,0 mm.....	133
Figura C.5.	Regiões de deformação efetiva no segundo passe após espessura intermediária de 4,0 mm.....	133
Figura C.6.	Regiões de tensão efetiva no segundo passe a partir da espessura intermediária de 4,0 mm.....	133
Figura C.7.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão para o segundo passe do processo com espessura intermediária de 4,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	134
Figura C.8.	Regiões de deformação efetiva no primeiro passe para espessura de 4,5 mm.....	134
Figura C.9.	Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 4,5 mm.....	134
Figura C.10.	Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 4,5 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	134
Figura C.11.	Força sobre a matriz em função da trefilação do quarto do vergalhão para o processo com espessura intermediária de 4,5 mm.....	134
Figura C.12.	Regiões de deformação efetiva no segundo passe após espessura intermediária de 4,5 mm.....	134
Figura C.13.	Regiões de tensão efetiva no segundo passe a partir da espessura intermediária de 4,5 mm.....	135

Figura C.14.	Tensão efetiva sobre o vergalhão para o segundo passe do processo com espessura intermediária de 4,5 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	135
Figura C.15.	Regiões de deformação efetiva no primeiro passe para espessura de 5,0 mm.....	135
Figura C.16.	Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 5,0 mm.....	135
Figura C.17.	Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 5,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	135
Figura C.18.	Força sobre a matriz em função da trefilação do quarto do vergalhão para o processo com espessura intermediária de 5,0 mm.....	135
Figura C.19.	Regiões de deformação efetiva no segundo passe após espessura intermediária de 5,0 mm.....	136
Figura C.20.	Tensão efetiva no segundo passe a partir da espessura intermediária de 5,0 mm.....	136
Figura C.21.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão para o segundo passe do processo com espessura intermediária de 5,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	136
Figura D.1.	Deformação efetiva no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.....	137
Figura D.2.	Regiões de tensão efetiva no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.....	137
Figura D.3.	Regiões de tensão efetiva no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	137

Figura D.4.	Força sobre a matriz em função da trefilação da quarta parte do vergalhão para o processo em dois passes com matriz curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.....	137
Figura D.5.	Regiões de deformação efetiva no segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.....	137
Figura D.6.	Regiões de tensão efetiva no segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.....	137
Figura D.7.	Regiões de tensão efetiva no segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	138
Figura D.8.	Regiões de deformação efetiva no primeiro passe com curva de raio 9,0 mm.....	138
Figura D.9.	Regiões de tensão efetiva no primeiro passe com curva de raio 9,0 mm.....	138
Figura D.10.	Regiões de tensão efetiva no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	138
Figura D.11.	Força sobre a matriz em função da trefilação da quarta parte do vergalhão para o processo em dois passes com matriz curva de raio 9,0 mm no primeiro passe.....	138
Figura D.12.	Regiões de deformação efetiva no segundo passe após a fieira curva de raio 9,0 mm no primeiro passe.....	138
Figura D.13.	Regiões de tensão efetiva no segundo passe após a fieira curva de raio 9,0 mm no primeiro passe.....	139
Figura D.14.	Regiões de tensão efetiva no segundo passe após a fieira curva de raio 9,0 mm no primeiro passe no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	139

Figura E.1.	Regiões de deformação efetiva ocorrida no vergalhão com diâmetro 8 mm com a fieira curva.....	140
Figura E.2.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm com fieira curva.....	140
Figura E.3.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 4° com fieira curva no ponto mais crítico da região de ocorrência da conformação.....	140
Figura E.4.	Força sobre a matriz em função da trefilação da quarta parte do vergalhão para o processo com matriz não-convencional.....	140
Figura F.1.	Regiões de deformação efetiva Sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe para espessura de 5,0 mm.....	141
Figura F.2.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe para espessura de 5,0 mm.....	141
Figura F.3.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe para espessura de 5,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	141
Figura F.4.	Força sobre a matriz em função da trefilação do quarto do vergalhão de diâmetro 9,0 mm para o processo com espessura intermediária de 5,0 mm.....	141
Figura F.5.	Regiões de deformação efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe para espessura intermediária de 5,0 mm.....	141
Figura F.6.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe a partir da espessura intermediária de 5,0 mm.....	141

Figura F.7.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm para o segundo passe do processo com espessura intermediária de 5,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	142
Figura F.8.	Regiões de deformação efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.....	142
Figura F.9.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.....	142
Figura F.10.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	142
Figura F.11.	Força sobre a matriz em função da trefilação da quarta parte do vergalhão de diâmetro 9,0 mm para o processo em dois passes com matriz curva de raio 4,5 mm no primeiro.....	142
Figura F.12.	Regiões de deformação efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.....	142
Figura F.13.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.....	143
Figura F.14.	Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela II.1 -	Composição química do cobre eletrolítico.....	6
Tabela II.2 -	Características elétricas e mecânicas do cobre eletrolítico.....	6
Tabela II.3 -	Propriedades do cobre eletrolítico.....	7
Tabela II.4 -	Propriedades mecânicas do vergalhão de cobre de acordo com as curvas tensão x deformação.....	9
Tabela II.5 -	Tolerâncias dimensionais para espessuras de fios retangulares	19
Tabela II.6 -	Tolerâncias dimensionais para larguras de fios retangulares....	20
Tabela IV.1 -	Características do perfil obtido pela simulação em passe único do vergalhão com diâmetro 8 mm.....	54
Tabela IV.2 -	Características do material das simulações numéricas para a conformação mecânica a frio com espessura definida.....	71
Tabela IV.3 -	Características do material para processo com 2 passes e semi-ângulo de 8° a partir do vergalhão de diâmetro 8 mm.....	87
Tabela IV.4 -	Características do material para processo com 2 passes e semi-ângulo de 8° a partir do vergalhão de diâmetro 8 mm utilizando uma matriz curva no primeiro passe.....	99
Tabela IV.5 -	Características do material para processo com fieira não-convencional a partir do vergalhão de diâmetro 8 mm.....	105
Tabela IV.6 -	Características do material para processo de 2 passes a partir do vergalhão de diâmetro 9 mm e semi-ângulo de 8°.....	112

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A transmissão de energia elétrica em todo o mundo depende da utilização de diversos equipamentos e componentes específicos nesta área. Um desses equipamentos é o transformador elétrico. O transformador elétrico é um aparelho estático que transporta energia elétrica por indução eletromagnética.

Conforme MARTIGNONI (1983), as exigências técnicas e econômicas da sociedade impõem a construção de grandes usinas elétricas, em geral situadas muito longe dos centros de aproveitamento, pois devem utilizar a energia hidráulica dos lagos e rios das montanhas. Ocorre então a necessidade do transporte da energia elétrica por meio de linhas de grande comprimento. Por motivos econômicos e de construção, as seções dos condutores devem ser mantidas dentro de determinados limites, o que torna necessária a limitação da intensidade das correntes nas mesmas. Assim sendo, as linhas devem ser construídas para funcionar com tensão elevada, que em certos casos atinge a centenas de milhares de volts. Estas realizações são possíveis em virtude de a corrente alternada poder ser transformada facilmente de baixa para alta tensão e vice-versa, por meio de uma máquina estática, de construção simples e rendimento elevado, que é o transformador elétrico.

O transformador elétrico é um equipamento constituído por vários componentes. São eles: um núcleo magnético composto tipicamente por chapas prensadas de aço elétrico de grão orientado, facilitando o fluxo magnético; enrolamentos ou bobinas compostas por fios metálicos dispostos em um número variado de espiras sobre o núcleo magnético; tanques com a finalidade de propiciar a montagem dos componentes; e buchas para permitir a passagem isolada da corrente elétrica através das paredes do transformador.

Visando otimizar o custo/benefício do produto transformador elétrico, através do processo de fabricação do componente enrolamento, busca-se utilizar um material

de alta condutividade elétrica, minimizando-se as perdas dielétricas pela Lei Joule. Os materiais mais utilizados são o cobre e o alumínio, disposto mais comumente em chapas ou fios. Assim, baseando-se no projeto de um determinado transformador, considera-se as características específicas necessárias ao material condutor e o seu custo.

De acordo com OLIVEIRA (2009), para a fabricação dos enrolamentos, a Toshiba possui uma linha de trefilação completa, fabricando fios em perfis redondos e retangulares a partir do vergalhão de cobre eletrolítico de diâmetro 8 mm, comercialmente disponível no mercado. As características principais dos fios, para fins de utilização em enrolamentos são a dureza, a condutividade e dimensões. A dureza dos fios é importante, pois define o grau de conformação mecânica dos mesmos, uma vez que estes são processados através de dobramento e enrolados em várias espiras umas sobre as outras, podendo ser isolados entre si através de papel ou verniz. A dureza dos fios é definida através do tratamento de recozimento após a trefilação. A condutividade é propriedade intrínseca do material devido à sua composição química, sendo controlada basicamente através do monitoramento da matéria prima (medição da condutividade do vergalhão de cobre eletrolítico Ø8 mm). Os fios retangulares, devido ao arranjo dimensional possível, permitindo montagens radiais e axiais de mais de um fio para condução de corrente, são usados em reguladores monofásicos, transformadores e reatores de potência. As dimensões são definidas durante os processos de laminação e trefilação. As tolerâncias dimensionais para os fios retangulares de cobre, conforme padrão de fabricação da Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda (TTDB).

1.2 Objetivos do trabalho

O foco principal deste trabalho é analisar diferentes rotas de fabricação do fio de cobre eletrolítico retangular na Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda para a montagem de transformadores elétricos. Utilizando-se um vergalhão de cobre de diâmetro 8 mm, serão realizadas simulações de diferentes rotas de processo no software de modelamento matemático Deform 3D. Baseando-se no processo de fabricação por trefilação serão variados parâmetros do processo como

dimensões da fieira, número de passes a serem utilizados e variação das dimensões da matéria prima do produto final.

1.3 Conteúdo

A Revisão Bibliográfica engloba, primeiramente, a descrição das características do vergalhão de cobre eletrolítico utilizado como matéria prima para o processo de fabricação do fio retangular e as características principais a serem obtidas no fio retangular final. Descreve as diferentes opções de equipamentos e componentes para realizar-se o processo de fabricação como trefilas, cassetes e turk-heads, ressaltando as características impostas ao material em função de cada opção. O método dos elementos finitos é abordado e descrito, sendo a base da simulação realizada pelo software Deform 3D. Define-se o atual processo de fabricação de fios de cobre retangulares na TTDB ressaltando as suas principais características. E por último faz-se uma abordagem ao cálculo do custo de um processo de fabricação.

A Metodologia demonstra como são realizados os testes baseando-se no objetivo do trabalho. Descreve a forma com que serão realizadas as simulações em cada caso proposto. Demonstra como são utilizados os diversos equipamentos e componentes mostrando as suas implicações.

No capítulo Apresentação e Discussão dos Resultados são apresentados os resultados para cada etapa da simulação numérica e a discussão acerca da interpretação dos dados fornecidos na simulação. São definidas as principais variáveis para o cálculo dos custos e efetuado de forma criteriosa esse cálculo, atendendo ao processo atual e aos processos propostos.

Finalizando, conclui-se o trabalho com base nos resultados e nas análises dos resultados, além de se sugerir estudos complementares.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A matéria prima

2.1.1 O cobre eletrolítico

A Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil (TTDB) é fabricante de produtos para utilização elétrica. Um desses produtos é o transformador elétrico. Para a fabricação do transformador elétrico, um dos componentes é o fio metálico que forma uma bobina no primário e outra bobina no secundário do transformador. O fio bobinado no primário é o responsável por receber a corrente elétrica, criar o campo magnético conduzido pelo núcleo do transformador e fornecer a corrente elétrica de saída a partir do secundário do transformador. Neste processo existe uma transformação de tensões, a qual ocorre proporcionalmente ao número de espiras enroladas no primário e no secundário. Assim, por exemplo, se o secundário possuir o dobro de espiras em relação ao primário, a tensão de saída será respectivamente o dobro em relação à tensão de entrada.

Para que este processo ocorra com a maior eficiência possível, é necessário minimizar as perdas sofridas durante o processo de transformação. No caso dos fios, a perda a ser minimizada é a perda por efeito Joule. Para tanto, o material deve possuir elevada condutividade elétrica. É igualmente importante levar-se em consideração a trabalhabilidade do material a ser empregado na produção de fios elétricos, ou seja, a viabilidade de se conformar o material a frio nesse caso específico. Esse fator irá afetar diretamente o custo de fabricação do mesmo. Os materiais mais comumente empregados são o cobre e o alumínio, dependendo da finalidade dos fios e do custo benefício do produto. No caso da TTDB, o material empregado na fabricação dos fios para utilização em transformadores elétricos é o cobre eletrolítico.

O cobre comumente produzido possui impurezas, sendo caracterizado por 98 a 99% de seu elemento puro. Entre as impurezas podemos citar elementos como o manganês, o cobalto, o zinco, o estanho, o antimônio, o arsênio e outros. Já o cobre eletrolítico, utilizado na fabricação de fios condutores de eletricidade da TTDB, é um

material refinado eletroliticamente que pode atingir um grau de 99,99% de cobre em sua composição. De fato, o valor mínimo para se considerar o cobre um material eletrolítico é de 99,3%. Basicamente é realizada uma reação química de eletrólise entre o cobre bruto, funcionando como o anodo, e folhas de cobre muito puras, atuando como o catodo, tudo viabilizado pela solução aquosa de sulfato de cobre, o eletrólito. Esse refinamento aumenta a capacidade de atendimento aos pré-requisitos de um material para fabricação e condutividade elétrica. Incrementa-se então a condutividade térmica e elétrica do cobre, além de sua facilidade em ser trabalhado a frio e a quente, ser usinado e resistir à corrosão atmosférica.

A mensuração da condutividade elétrica baseia-se em uma escala baseado no cobre padrão, ou seja, um material com 100% de cobre a uma temperatura de 20°C. Assim, a medição da condutividade elétrica de um determinado material ocorre em percentual relativo à capacidade de um material 100% cobre a 20°C realizar uma condução elétrica. O valor da condutividade elétrica é expresso em percentagem de IACS (International Annealed Cooper Standard). O IACS representa então o valor de condutividade elétrica de um cobre padrão, variando de acordo com a liga e com a temperatura de trabalho.

A Tabela II.1, obtida através do fornecedor de vergalhões de cobre, fornece a composição química do cobre eletrolítico do vergalhão utilizado como matéria prima, bem como a concentração de cada um dos elementos. Em função desta composição, considerando-se um cobre eletrolítico com 99,92% de pureza, A Tabela II.2 mostra as características elétricas e mecânicas do cobre, conforme explicitado na Encyclopedia of Materials Science and Engineering. E completando as informações sobre o cobre eletrolítico, a Termomecânica São Paulo AS fornece a Tabela II.3 com as principais propriedades físicas, químicas, mecânicas e elétricas do cobre eletrolítico.

Tabela II.1 – Composição química do cobre eletrolítico

Elemento	Limite (ppm)
Se	1,0
Te	1,0
Bi	0,5
Sb	1,0
As	3,0
Pb	1,0
S	10,0
Sn	1,0
Ni	5,0
Fe	10,0
Zn	1,5
Ag	12,0
Co	1,0
Cr	1,0
Mn	1,0

Fonte: ABNT NBR 14733

Tabela II.2 – Características elétricas e mecânicas do cobre eletrolítico

Composição química nominal (%)					Resistência à tração mínima (Mpa)		Alongamento (% em 2")		Limite de escoamento mínimo a 0,5% deformação (ksi)		Dureza Rockwell B		Ponto de fusão (F)	Densidade (kgf/mm ³)
Cu	Zn	Pb	Sn	Outros	Hard	Soft	Hard	Soft	Hard	Soft	Hard	Soft		
99,92	--	--	--	0,04	303	221	16	55	303	69	47	F40	1082	8,9 x 10 ⁻⁶

Fonte: Encyclopedia of Materials Science and Engineering

Tabela II.3 – Propriedades do cobre eletrolítico

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade a 20°C	8,89	[g/cm ³]
Ponto de fusão	1083	[°C]
Coefficiente médio de expansão térmica (20-300°C)	17,7	[10 ⁻⁶ °C]
Condutibilidade elétrica volumétrica a 20°C	100 – 101,5	[%I.A.C.S.]
Condutibilidade térmica a 20°C	0,93	[cal/cm*s*°C]
Calor específico a 20°C	0,092	[cal/g °C]
Resistividade elétrica	0,017 – 0,01724	[ohm*mm ² /m]
Módulo de elasticidade a 20°C	115000	[MPa]
Módulo de rigidez a torção a 20°C	44000	[MPa]
Dureza (máximo)	50	[HRF]
Limite de resistência à tração	195 – 255	[MPa]
Limite de escoamento ⁽¹⁾	55 (mínimo)	[MPa]
Alongamento (mínimo) ⁽²⁾	25	[%]
Faixa de temperatura de recozimento	475 – 750	[°C]
(1) O valor indicado corresponde à carga unitária capaz de provocar uma deformação permanente de 0,5%.		
(2) O valor indicado corresponde ao alongamento em 4 (quatro) vezes o diâmetro ou a espessura da amostra.		

Fonte: Termodinâmica São Paulo S.A.

2.1.2 Características dimensionais e mecânicas da matéria prima

O cobre eletrolítico, adquirido no mercado nacional do fornecedor Caraíba Metais (Grupo Paranapanema), a ser trabalhado para a obtenção de um fio retangular é disposto em lotes de bobinas embaladas. São vergalhões bobinados de diâmetro 8 mm. Os lotes podem ser visualizados na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Embalagem da matéria prima - vergalhão de cobre eletrolítico (OLIVEIRA, 2009).

O cobre eletrolítico do vergalhão utilizado como matéria prima para a produção de fios retangulares de 3,5 x 8.8 mm de seção transversal foi caracterizado em um ensaio de tração por OLIVEIRA (2009). Foram recolhidas amostras de dois lotes de matéria prima, denominando-os de Lote A e Lote B, usinados os corpos de prova e realizados os ensaios. Como resultado obteve-se os gráficos com a curva tensão convencional x deformação efetiva mostrada na Figura 2.2.

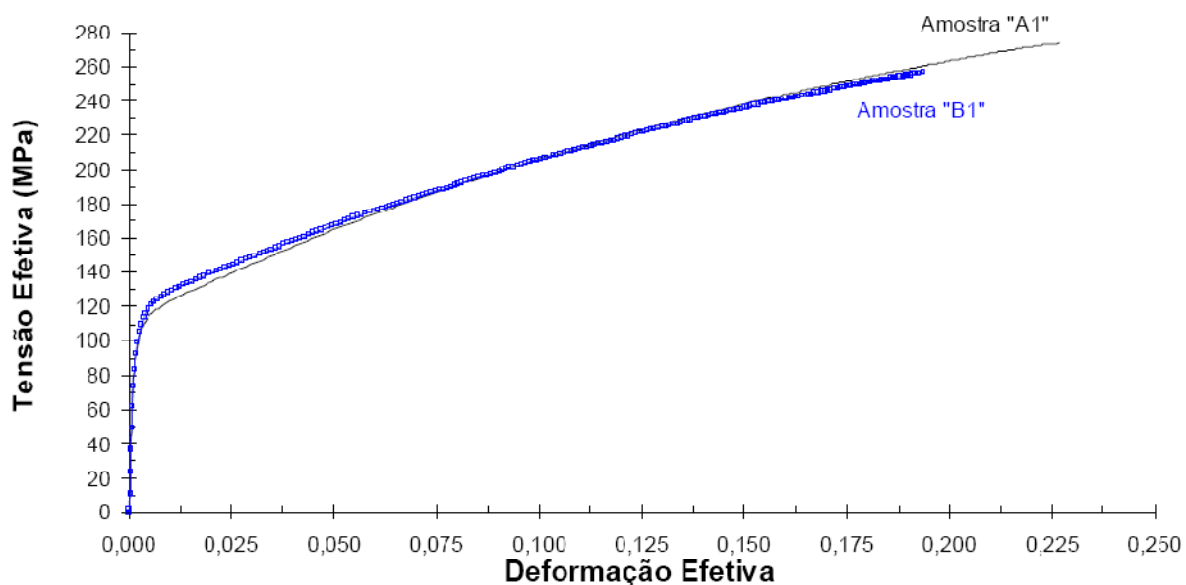


Figura 2.2 – Ensaio de tração no vergalhão de cobre com diâmetro de 8 mm – Tensão x deformação efetivas na região de deformação uniforme (OLIVEIRA, 2009).

Tabela II.4 – Propriedades mecânicas do vergalhão de cobre de acordo com as curvas tensão x deformação

Propriedade mecânica	Valor	Unidade
Limite de escoamento convencional (0,5%)	112,2	MPa
Limite de resistência a tração	214,8	MPa
Alongamento uniforme	19,6	%
Alongamento não-uniforme	11,0	%
Alongamento total	30,6	%

Fonte: OLIVEIRA (2009)

2.2 Trefilação

2.2.1 O processo

A trefilação é uma das operações de conformação mecânica mais antigas e possui grande importância industrial, permitindo a produção de barras, arames e tubos, entre outras formas, com excelente acabamento superficial e rígido controle dimensional. “O processo de trefilação consiste em “forçar a passagem de uma barra através de uma fieira mediante a aplicação de uma força de tração à saída desta fieira” (CETLIN E HELMAM, 2005). A Figura 2.3 mostra a redução de área de uma barra circular através de uma fieira.

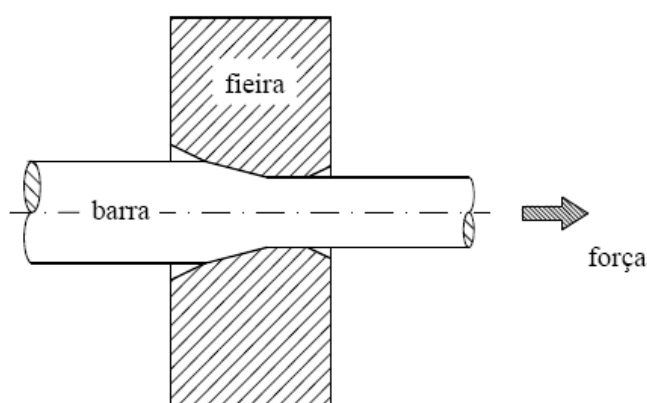


Figura 2.3 – Representação esquemática de um processo de trefilação de barras (CORRÊA, 2004).

A redução ocorrida durante um passe de trefilação pode ser calculada a partir da equação abaixo:

$$r = (A_i - A_f)/A_i \quad (2.1)$$

onde A_i representa a área da seção transversal do perfil antes de ser trefilado e A_f representa a área da seção transversal do perfil após ser trefilado.

O material a ser trefilado, como uma barra, por exemplo, deve ser apontado e inserido através da fieira onde será preso por garras de tração responsáveis pelo contato com o material e assim pela transmissão da força de tração realizada sobre o material na saída da fieira. Normalmente o apontamento é realizado através de esmagamento ou desbastamento, pelo processo de usinagem ou de abrasão. Assim o material é conformado através da fieira de forma que o seu perfil de saída adquira as mesmas dimensões da fieira, sendo mais comumente os formatos circular e retangular. A Figura 2.4 mostra o diagrama esquemático do processo de trefilação. É forçada a passagem do material através da fieira, o qual irá adquirir o seu formato no perfil de saída e também terá o seu comprimento alongado, mantendo o fluxo conservativo de massa durante o processo.

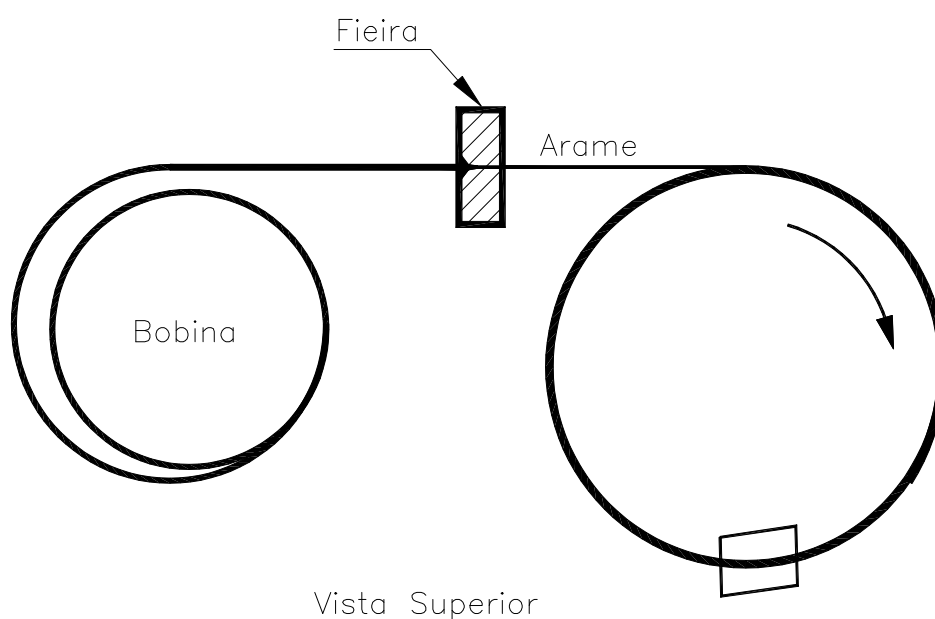


Figura 2.4 – Esquema de um máquina de trefilar com bloco rotativo (CETLIN E HELMAM, 2005).

2.2.2 Fieira

De acordo com OLIVEIRA (2009), A fieira ou matriz de trefilação é o componente responsável pela realização da deformação plástica do material. As mesmas são construídas em materiais variados, dependendo do tipo de produto a ser trefilado, sendo normalmente fabricadas com núcleo de alta resistência ao desgaste em carboneto de tungstênio (metal duro) em uma carcaça de aço ou latão. O núcleo em diamante pode ser utilizado para fabricação de arames finos.

Segundo CORRÊA (2004), A geometria da matriz de trefilação, conforme pode ser visualizado na Figura 2.5, está associada aos principais aspectos da operação: redução de área r e semi-ângulo de trefilação α . É constituída de quatro regiões distintas: zonas de entrada (região 1), de trabalho (região 2), cilíndrica (região 3) e de saída (região 4). A zona de entrada apresenta como finalidade guiar a barra e facilitar o processo de fabricação da mesma. A região ou cone de trabalho é o local onde ocorre a deformação plástica do material, sendo caracterizada pelo seu semi-ângulo, cujo valor é de extrema importância tanto para o processo de trefilação como para o comportamento mecânico final do produto, fato que será evidenciado nas seções seguintes. A zona cilíndrica tem o objetivo de preservar as dimensões de trabalho da matriz, conferindo-lhe maior vida útil. A região de saída proporciona saída livre do material sem danos à fieira e à barra.

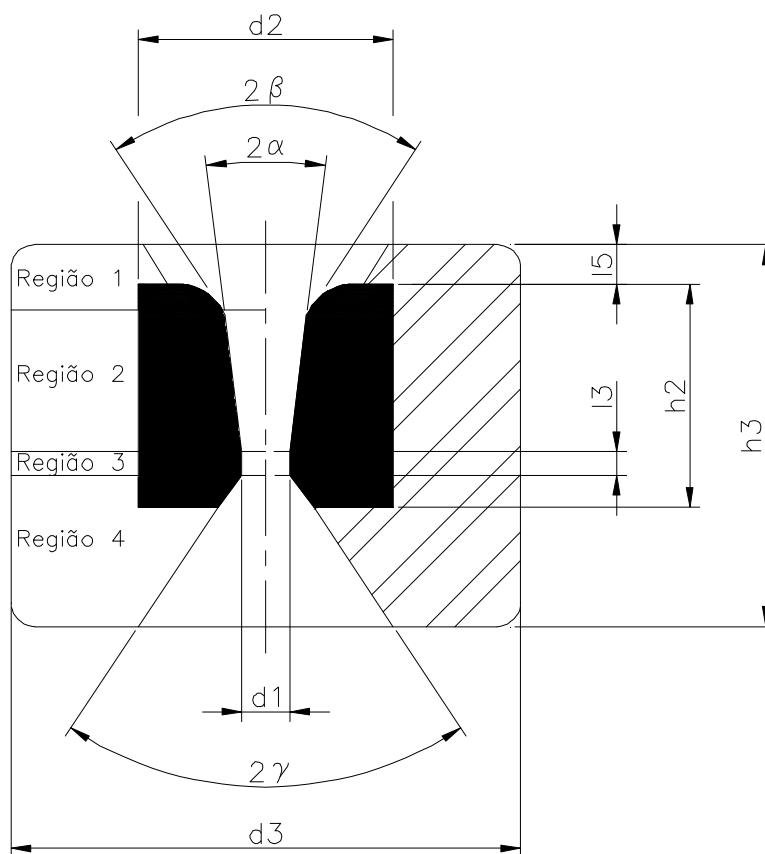


Figura 2.5 – Desenho da uma fieira em corte (OLIVEIRA, 2009).

onde,

- $d1$ Seção de calibragem
- $d2$ Diâmetro do núcleo
- $d3$ Diâmetro da carcaça
- $h2$ Altura do núcleo
- $h3$ Altura da carcaça
- $l3$ Cilindro de calibragem
- $l5$ Altura de entrada
- 2β Ângulo de entrada
- 2α Ângulo de redução
- 2γ Ângulo de saída

2.2.3 Deformação durante a trefilação

Na trefilação a deformação plástica ocorre em função da combinação de esforços trativos externos, responsáveis pela movimentação do material na direção axial, e de esforços compressivos realizados pelas paredes da trefila sobre o material, causando a sua deformação na direção radial. A Figura 2.6 mostra de forma esquemática os esforços presentes durante o processo de trefilação.

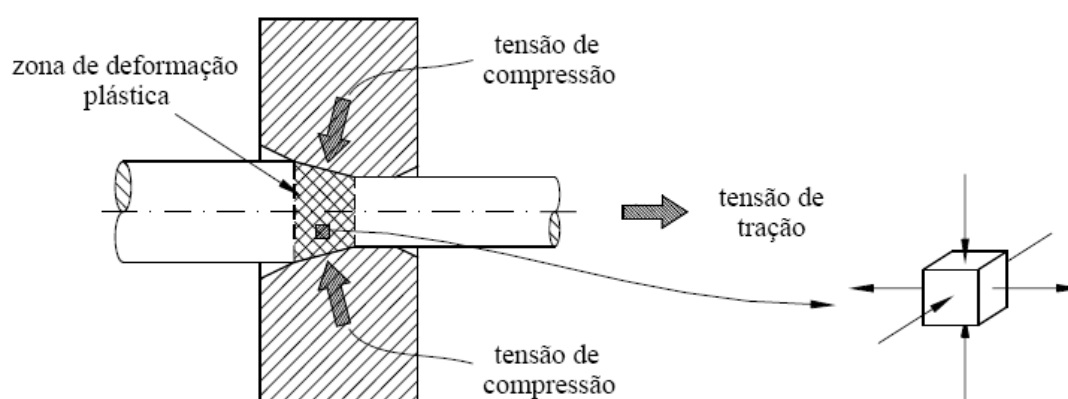


Figura 2.6 – Representação esquemática dos esforços presentes no processo de trefilação (CORRÊA, 2004).

Os esforços presentes durante a trefilação são responsáveis pela deformação do material não apenas nas direções axial e radial, mas também deformações cisalhantes. Conforme CETLIN E HELMAM (2005), ao entrar em contato com a matriz adiciona-se à velocidade inicial do material uma componente perpendicular ao eixo (radial). Ao abandonar a matriz, segue, novamente, seu movimento paralelo ao eixo. Como se deduz da Figura 2.7, o material sofre um processo interno de deformações cisalhantes (ou distorção), além daquele necessário para a sua deformação homogênea, e que não contribui para as mudanças dimensionais da barra trefilada. Essa deformação extra é chamada de “deformação redundante” ou, também, desde que envolva um trabalho de deformação plástica, “trabalho redundante”.

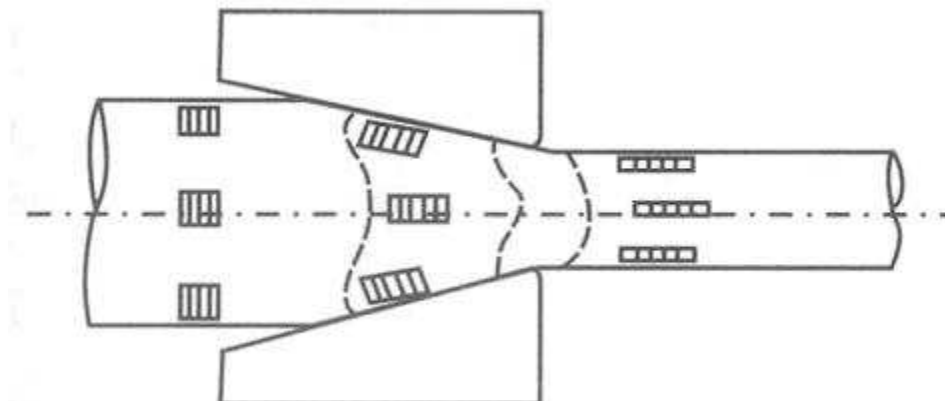


Figura 2.7 – Esquemática da deformação durante a trefilação (CETLIN E HELMAM, 2005).

Ainda de acordo com CETLIN E HELMAM (2005), um modo de deformação que às vezes ocorre na prática de trefilação é denominado de rupturas centrais. Seu aparecimento é motivo de preocupação devido ao fato de que resulta na formação de pequenos buracos no interior do produto. Este fenômeno pode ser estudado a partir de uma deformação do campo esférico de velocidades. À medida que se aumenta o ângulo da matriz, as duas superfícies que delimitam a zona de deformação plástica tendem a abandonar a forma esférica e a se aproximar uma da outra (Figura 2.8.1). Para certas reduções e determinados valores de atrito, essas superfícies chegam a tocar-se (Figura 2.8.2). Quando a parte rígida da barra ligada à entrada toca a parte rígida ligada à saída, devido ao fato de que suas velocidades normais são diferentes, inicia-se uma fratura no ponto de contato (Figura 2.8.3). Essa trinca crescerá à medida que a barra atravessa a matriz, adquirindo a sua geometria particular por causa da distribuição de velocidades existente (Figura 2.8.4). Quando a barra abandona a matriz, o processo recomeça ciclicamente (Figura 2.8.5).

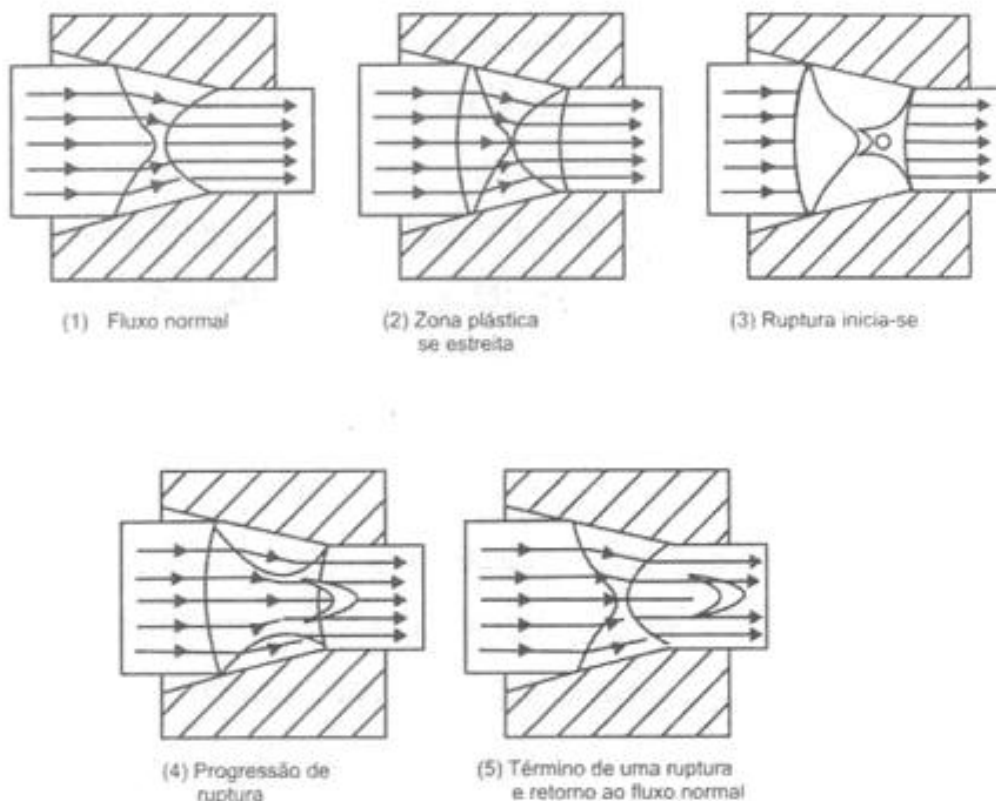


Figura 2.8 – Idealização do processo de geração de rupturas centrais (CETLIN E HELMAM, 2005).

2.3 O produto arame retangular de cobre

2.3.1 O processo atual de fabricação de fios retangulares de cobre eletrolítico

A fabricação de fios retangulares de cobre para uso em transformadores elétricos possui como uma de suas possíveis rotas a realizada hoje na Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil (TTDB). O processo de fabricação ocorre utilizando-se dois estágios: uma laminação e uma trefilação. Assim sendo, conforme esquema na Figura 2.9, a bobina de vergalhão de cobre eletrolítico alimenta o laminador, passando em sequência pela trefila, sendo bobinado novamente no carretel. O processo é contínuo desde o desbobinamento até o carretel.

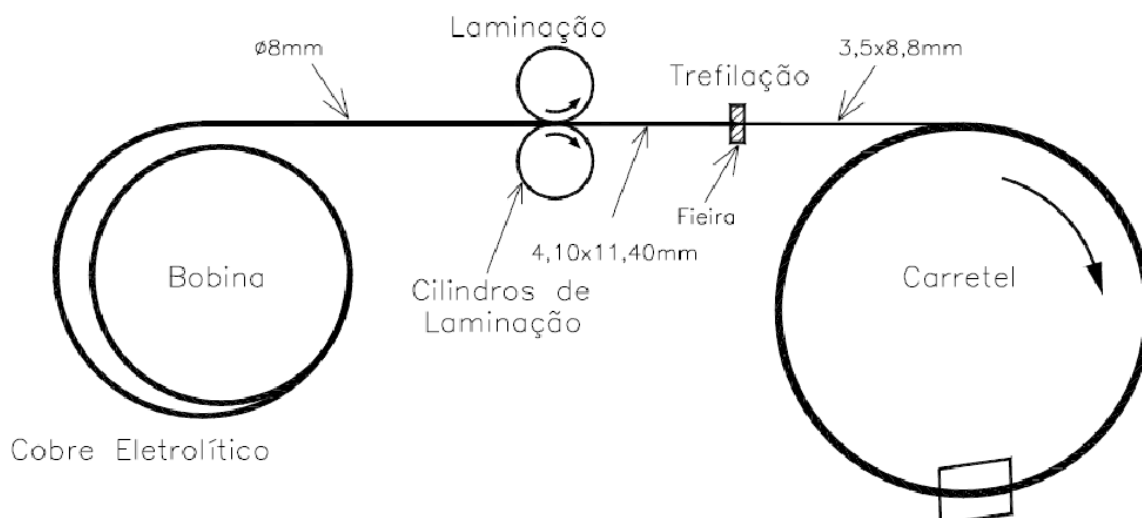


Figura 2.9 – Esquema do processo de fabricação do fio de cobre retangular realizado na TTDB (OLIVEIRA, 2009).

O processo na TTDB utiliza como matéria prima o cobre eletrolítico exposto na seção 2.1. Tomando como exemplo um dos produtos processados na Toshiba, o fio retangular de cobre com dimensão 3,5 x 8,8 mm, estuda-se o processo de fabricação típico empregado na planta. Adquiri-se um vergalhão de diâmetro 8 mm do material. No primeiro estágio realiza-se sobre o vergalhão uma laminação com rolos planos na qual ocorrerá uma redução da seção no sentido transversal e um incremento da seção no sentido horizontal, obtendo-se uma seção transversal aproximadamente retangular, abaulada nas duas laterais, com as dimensões de 4,15 x 11,3 mm e raio de abaulamento de 4 mm. Com o novo perfil laminado, realiza-se o segundo estágio do processo que é a trefilação. Nesta etapa o perfil laminado é apontado no seu início e forçado de maneira a passar por dentro de uma fieira que possui as dimensões finais desejadas no produto fio de cobre retangular, que são 3,5 x 8,8 mm, com as quinas arredondadas em um raio de 0,5 mm. A Figura 2.10 mostra a evolução da seção transversal do perfil ao longo do processo completo.

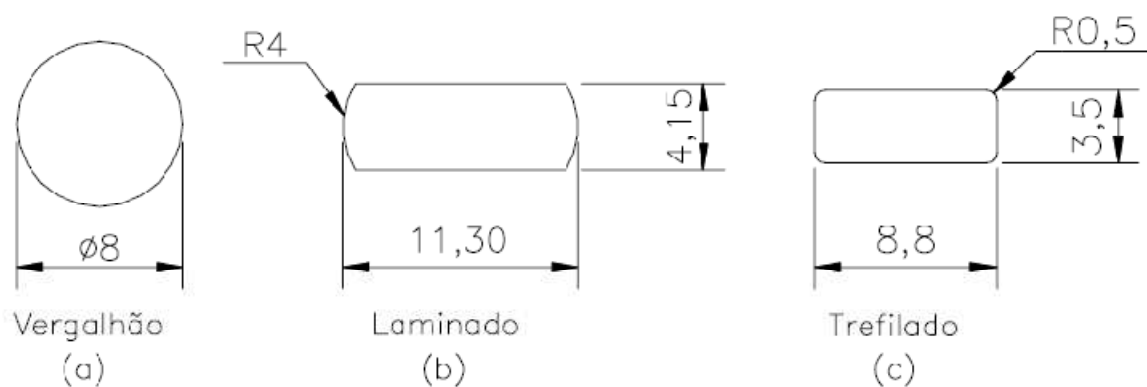


Figura 2.10 – Seção transversal do perfil: (a) matéria prima, (b) perfil laminado e (c) perfil trefilado (OLIVEIRA, 2009).

OLIVEIRA (2009) fotografou os processos de laminação do vergalhão de cobre eletrolítico e de trefilação do perfil laminado. A Figura 2.11 mostra a etapa laminação e a Figura 2.12 mostra a etapa de trefilação.



Figura 2.11 – Processo de laminação da TTDB (OLIVEIRA, 2009).



(a)



(b)

Figura 2.12 – Processo de trefilação na TTDB (OLIVEIRA, 2009).

O rolo de laminação possui um diâmetro de 162,4 mm e a velocidade de laminação utilizada é de 50 m/min. Já na trefilação a velocidade de entrada é de 50 m/min e a velocidade de saída é de 55 m/min. A fieira utilizada possui o núcleo de trabalho do material em metal duro de dureza 90,5 a 92,5 HRA. As suas dimensões estão abaixo relacionadas:

Seção de calibragem (SI)..... 3,8 x 8,5 mm (+0,01/-0)

Diâmetro do núcleo (d2)..... 25,00 $\pm$ 0,02 mm

Diâmetro da carcaça (d3)..... 20,0 $\pm$ 0,1 mm

Altura do núcleo (h2)..... 20,00 $\pm$ 0,02 mm

Altura da carcaça (h3)..... 40,0 $\pm$ 0,1 mm

Cilindro de calibragem (I3)..... 3,5 mm

Altura de entrada (I5)..... 11 mm

Ângulo de entrada (2 β)..... 60° $\pm$ 5°

Ângulo de redução (2 α).....18° $\pm$ 1°

Ângulo de saída (2 γ)..... 90° $\pm$ 5°

2.3.2 As tolerâncias do produto

O controle das dimensões finais do fio de cobre é muito importante. As medidas influenciarão diretamente na viabilidade de montagem do produto elétrico e na qualidade de funcionamento desse. A exemplo de um transformador elétrico, todos os seus componentes internos e inclusive a sua carcaça são dimensionados para uma determinada dimensão final. O fio de cobre é disposto no transformador enrolado em forma de espiras, no qual uma variação da dimensão do fio provocaria folgas nestas espiras ou dimensão inapropriada do arranjo. Uma vez ocorridas essas falhas, as folgas provocariam perda de qualidade do produto como perda de rendimento ou aumento de vibração e ruído do transformador. Já a variação da dimensão do arranjo impossibilitaria a montagem do equipamento, impossibilitando a finalização do produto.

As dimensões do produto são definidas ao longo do processo, sendo dependentes do processo de laminação e do processo de trefilação. Assim, a TTDB definiu tolerâncias padrão para o fio de cobre retangular conforme Tabela II.5 e Tabela II.6.

Tabela II.5 – Tolerâncias dimensionais para espessuras de fios retangulares

Espessura E (mm)	Tolerância (mm)
$E < 3,15$	$\pm 0,03$
$3,15 \leq E < 5,60$	$\pm 0,05$
$E \geq 5,60$	$\pm 0,07$

Fonte: TTDB

Tabela II.6 – Tolerâncias dimensionais para larguras de fios retangulares

Largura L (mm)	Tolerância (mm)
$L \leq 3,15$	$\pm 0,03$
$3,15 < L \leq 6,30$	$\pm 0,05$
$6,30 < L \leq 12,50$	$\pm 0,07$
$12,50 < L \leq 16,00$	$\pm 0,10$
$16,00 < L$	$\pm 0,13$

Fonte: TTDB

2.4 O método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (FEM) foi criado para resolver equações complexas relacionadas à elasticidade e à plasticidade de estruturas mecânicas. Sabendo-se que a geometria é um fator importante no estudo de estruturas mecânicas e que a potência dos computadores possibilita não apenas resolver sistemas de equações, mas também formular e construir uma aproximação discreta, o método dos elementos finitos torna-se uma ferramenta extremamente útil. Outras aplicações do método estão relacionadas ao estudo da mecânica dos sólidos e fluídos, transferência de calor, vibrações, potencial elétrico, campos magnéticos, comportamentos de materiais em processos de conformação, entre outras.

Conforme OLIVEIRA (2009), o método utiliza o princípio de subdividir um corpo contínuo em um número finito de elementos, denominada discretização geométrica ou espacial, interligados entre si através de nós. Dessa forma, os efeitos do fenômeno em estudo são transferidos a cada elemento da malha. Para uso desta ferramenta, são necessários cuidados dos seguintes pontos:

a) Identificação dos princípios físicos básicos que serão adotados como governantes do fenômeno em estudo;

- b) Aplicação dos princípios físicos no desenvolvimento das equações governantes e do modelamento matemático;
- c) Seleção da ferramenta apropriada para análise das equações governantes e do modelamento matemático;
- d) Solução das equações governantes;
- e) Interpretação dos resultados.

O Método dos Elementos Finitos desenvolve-se passando por 4 passos: construção das geometrias, pré-processamento, simulação e pós-processamento. No caso de uma conformação mecânica, a construção das geometrias engloba o ato de desenhar o material a ser conformado, bem como a(s) matriz(es) necessária(s) ao processo de simulação. Com as geometrias preparadas, no pré-processamento configura-se o sistema a ser simulado. Divide-se o modelo em malhas definindo-se o número de elementos que satisfaçam a convergência aos resultados favoráveis, além das condições de contorno, restrições e esforços aplicados. Na etapa de simulação utiliza-se uma ferramenta computacional efetuando-se a simulação do processo proposto no pré-processamento. São então gerados resultados que serão analisados no pós-processamento, interpretando-se e analisando-se os resultados do aplicativo numérico. É possível analisar todo o progresso da etapa de simulação, verificando fenômenos físicos e mecânicos como, por exemplo, geometria, tensão efetiva, deformação efetiva, danos, etc.

O tipo de formulação utilizada na simulação numérica é de suma importância para que o resultado seja realmente representativo. Ela pode ser rígido-plástica ou elasto-plástica. Na formulação rígido-plástica o sistema considera apenas o fenômeno de deformação plástica, não considerando influência de esforços abaixo da tensão de escoamento do material. Já a formulação elasto-plástica considera, durante a conformação, efeitos na zona de deformação elástica sobre o material.

3 METODOLOGIA

3.1 Desenvolvimento do trabalho

Pretende-se neste trabalho realizar o estudo de possíveis rotas de fabricação do fio de cobre eletrolítico de seção retangular, dimensionada em 3,5 x 8,8 mm, a partir da matéria prima com dimensão circular de diâmetro 8,0 mm chamada de vergalhão. A Figura 3.1 mostra, com base na seção transversal, a dimensão inicial do material e a dimensão final a ser obtida no material. O aspecto físico do vergalhão e do produto a ser obtido a partir desse é previsto de acordo com a Figura 3.2.

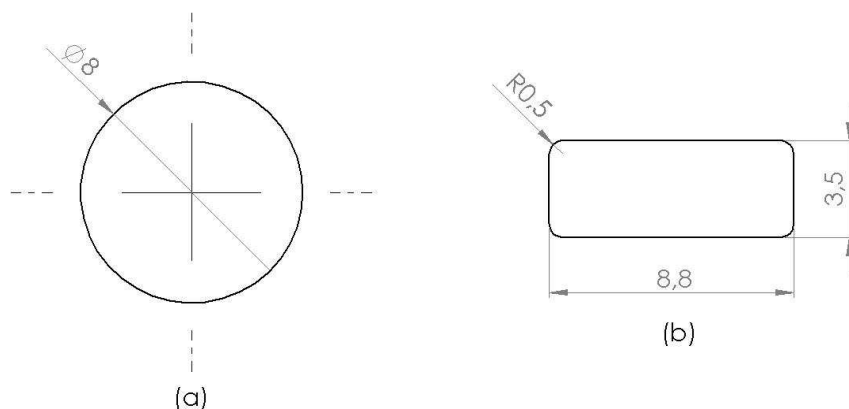


Figura 3.1 – Dimensões do (a) vergalhão e do (b) produto final

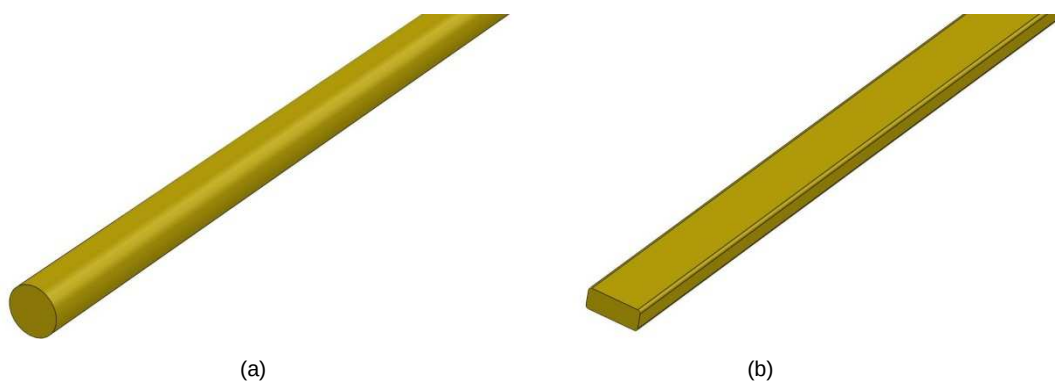


Figura 3.2 – Aspecto físico da (a) matéria prima e do (b) produto final

Para que se verifique a possibilidade de diferentes rotas de fabricação utilizar-se-á o método dos elementos finitos. Com o auxílio de uma ferramenta computacional, o software Deform 3D, implementa-se o método dos elementos finitos para se realizar

simulações computacionais das possibilidades de processo de fabricação com o objetivo de se obter o fio de cobre retangular final.

Para definir uma possível rota de fabricação deverão ser realizados testes utilizando-se diferentes tipos de fieiras combinadas com variações na quantidade de estágios de fabricação durante o processo de produção do fio retangular e com a variação dimensional ao longo do processo.

Será eliminado o estágio de laminação incorporado na linha de fabricação da TTDB e será testada uma linha de processo composta apenas por trefilas. Para isso configurar-se-á todo o sistema computacional considerando-se as geometrias da matéria prima e da matriz responsável pela conformação mecânica e os diversos parâmetros do processo.

3.2 Parâmetros para a simulação

Visando estabelecer um conjunto constante de parâmetros para se realizar as simulações numéricas propostas neste trabalho, define-se a configuração do software Deform 3D atendendo-se todos os pontos necessários à realização de uma simulação que retrate um ambiente real. Este tópico é dedicado a predizer este conjunto de parâmetros.

3.2.1 O material

Para a realização das simulações com variação dimensional do material circular de cobre eletrolítico com a matriz aberta lateralmente variando-se o ângulo de contato com a peça deve-se configurar todos os parâmetros de inserção necessários à ocorrência da simulação de forma mais real possível.

Com base no ensaio de tração no vergalhão de cobre eletrolítico realizado por Oliveira (2009), cria-se um arquivo de dados com os respectivos valores de tensão x deformação de extensão *.db. Os dados compreendem a região plástica do ensaio de tração do vergalhão, já que se considera a trefilação como um processo

puramente plástico. A informação criada é então utilizada pelo software Deform 3D caracterizando-se o material da peça de trabalho, que é o cobre eletrolítico. A figura 3.6 mostra o gráfico de tensão x deformação fornecido pelo Deform 3D a partir da informação criada com base no ensaio de tração.

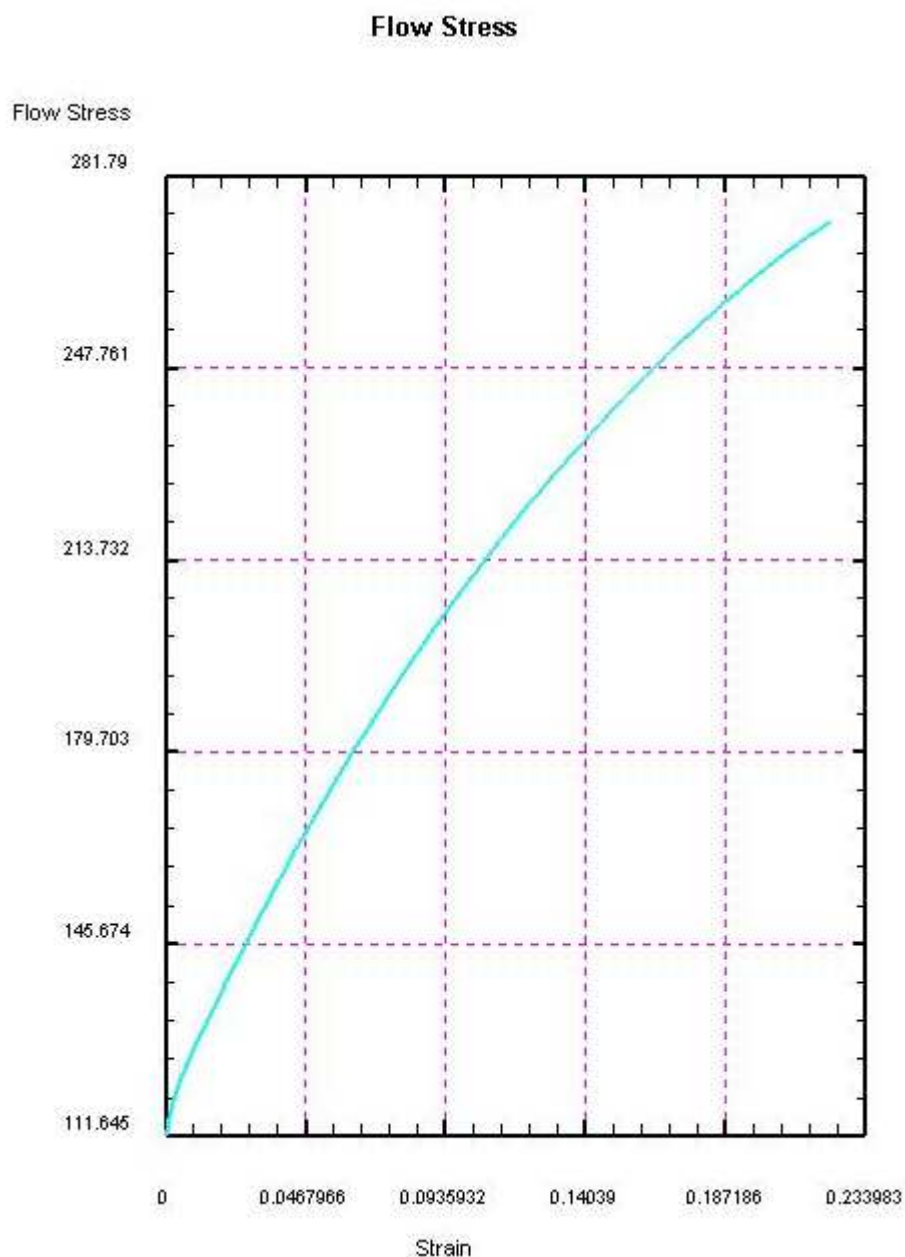


Figura 3.3 – Gráfico tensão x deformação para o comportamento plástico do material a ser simulado.

Considera-se ainda a caracterização das peças no software Deform 3D. Para a peça de trabalho faz-se o seu comportamento como plástico. Já para a matriz, o comportamento é feito como um objeto rígido, desconsiderando qualquer deformação elástica que esse pudesse vir a sofrer durante o processo.

3.2.2 Tratamento da matéria prima

Para que ocorra uma simulação confiável, existem alguns parâmetros de configuração importantes a serem ressaltados. O primeiro deles é a discretização da geometria da peça de trabalho. É realizada a divisão da peça sólida em vários elementos. Quanto maior o número de elementos e menor a dimensão desses, mais precisos serão os resultados da simulação. Contudo, maior será o tempo necessário para realizar a simulação, pois o volume de equações a serem resolvidas computacionalmente aumenta consideravelmente. A discretização pode ser visualizada na Figura 3.4. Para o caso do presente trabalho, o número de elementos obtidos na discretização é de 3.453. E são obtidos também 1.057 nós.

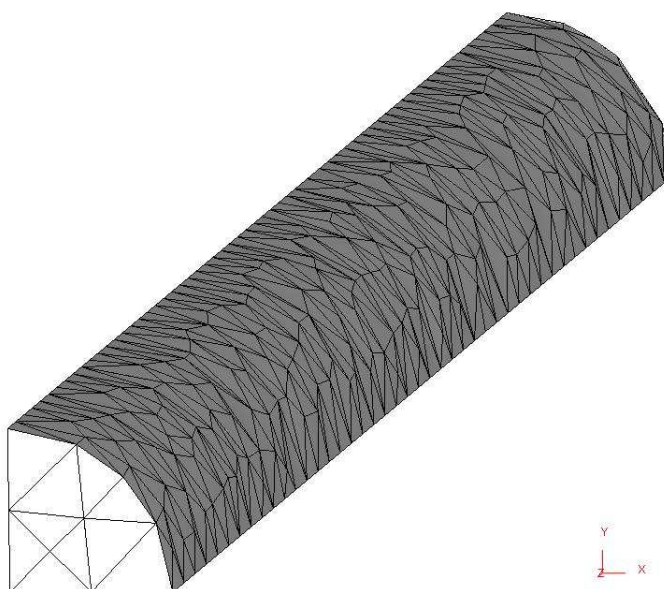


Figura 3.4 – Geometria simétrica discretizada em pequenos elementos.

3.2.3 Parâmetros de processo

Configurando-se o sistema de simulação no software Deform 3D, defini-se as geometrias da peça de trabalho e da matriz. A matriz será estabelecida como um objeto rígido, ou seja, sem a possibilidade de se deformar, elástica ou plasticamente. A matéria prima será definida como um objeto de comportamento plástico, conferindo a ela as características de um cobre eletrolítico, conforme explicitado na seção 3.2.1.

Com a quarta parte do vergalhão discretizada, define-se as suas duas faces em corte como sendo as faces entre as relações de simetria. Confere-se também um movimento na direção axial (eixo z, sentido positivo), conforme eixo de direções na Figura 3.4, deslocando-se de encontro à matriz. Utilizar-se-á uma velocidade de 3 mm/s, valor baseado em algumas simulações prévias, onde se notou uma variação irrelevante dos resultados da simulação em função da magnitude da velocidade.

Buscando reproduzir numericamente o processo de fabricação do fio de cobre produzido na TTDB, verificou-se um valor ideal para o coeficiente de atrito entre a peça de cobre eletrolítico e a fiação de 0,09, conforme valor levantado por HENSEL e SPITTEL (1978). Assim sendo, será utilizado o valor de $\mu = 0,09$ no contato entre peça e matriz para as simulações.

Outro fator a ser observado é o fluxo térmico no sistema durante o processo. Para o presente trabalho, considerar-se-á o processo isotérmico, no qual o material irá se comportar estritamente em relação à sua curva tensão efetiva x deformação efetiva, desconsiderando qualquer variação possível de temperatura.

3.2.4 Análise dos resultados

Após efetuar a simulação será o momento de realizar uma análise criteriosa dos resultados observando-se as isolinhas e as regiões homogêneas do perfil conformado indicando a magnitude dos fenômenos mecânicos. Entre elas serão consideradas as isolinhas que demonstram a distribuição dos danos (*damage*) ocorridos na peça, a distribuição da deformação efetiva (*strain-effective*) no material e a distribuição da tensão efetiva (*stress-effective*) no material no momento da conformação. O dimensional da peça é outro fator importante e que também será medido.

3.3 Simulação numérica para a verificação das principais falhas utilizando apenas um passe de redução

A evolução dos testes a serem realizados neste trabalho, baseados em simulações numéricas do processo de conformação do cobre eletrolítico, se desenvolve passando por seis principais etapas. O sistema proposto para cada uma delas é detalhada neste item. A Figura 3.5 mostra a sequência das etapas a serem trabalhadas. Na Etapa 1 é simulado o processo em passe único de trefilação, utilizando-se apenas uma fieira, buscando compreender melhor as falhas ocorridas em função do processo descartando a etapa de laminação. Na Etapa 2 objetiva-se continuar a aquisição de conhecimento acerca do comportamento do material quando submetido a um passe de trefilação através de uma fieira sem restrições laterais, modificando-se a dimensão de saída da fieira e do diâmetro da matéria prima. Após estudadas variações de parâmetros de trefilação, a Etapa 3 faz o primeiro teste utilizando-se dois passes de trefilação. A Etapa 4 busca a mesma combinação realizada na Etapa 3, porém modifica a fieira no primeiro passe. A Etapa 5 Busca testar uma fieira não-convencional para o processo. E finalmente, na Etapa 6 é testada uma matéria prima de dimensão diferente, utilizado os processos mais satisfatórios das Etapas 3 e 4.

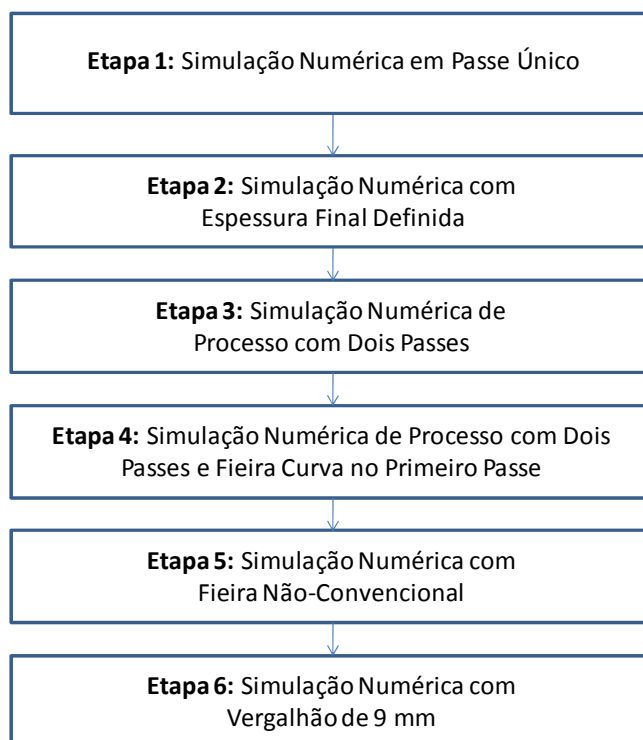


Figura 3.5 – Etapas definidas para a realização das simulações numéricas.

3.3.1 Sistema proposto para a simulação com um passe de redução

Objetivando compreender as principais falhas que impossibilitam a ocorrência do processo de trefilação utilizando-se apenas um passe de redução, realizar-se-á a simulação numérica do processo de trefilação a partir de um vergalhão de cobre eletrolítico de diâmetro 8 mm e uma fieira com seção de saída retangular de dimensões 3,5 x 8,8 mm. A partir deste ponto pretende-se sedimentar o entendimento de ocorrência de falhas em função da redução proposta e da variação brusca de seção proposta.

De fato, pretende-se efetuar duas simulações numéricas nesta etapa. Será utilizado o vergalhão padrão adquirido para processo na TTDB, com diâmetro da seção transversal 8 mm. Para a primeira simulação, adotar-se-á uma fieira com semi-ângulo de 9° . Na segunda simulação a fieira utilizada será outra, tendo o seu semi-ângulo modificado para 4° .

Como não há na simulação numérica a preocupação com todos os detalhes de uma fieira, mas sim com as dimensões necessárias para a realização da conformação mecânica, será utilizada uma matriz com as dimensões otimizadas de uma fieira padrão para o processo numérico. A Figura 3.6 mostra a matriz do presente problema. Os detalhes dimensionais para a matriz de 9° são mostrados na Figura 3.7. Para a matriz de 4° , os detalhes são definidos de acordo com a Figura 3.8.

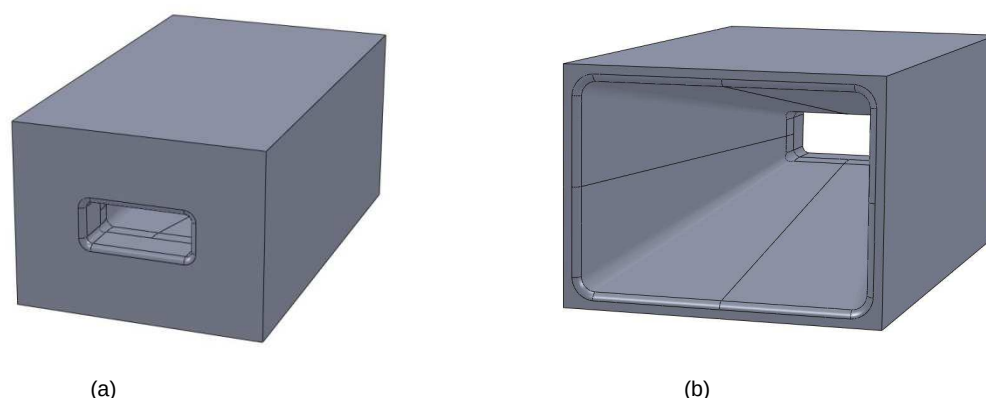


Figura 3.6 – Matriz genérica para passe único.

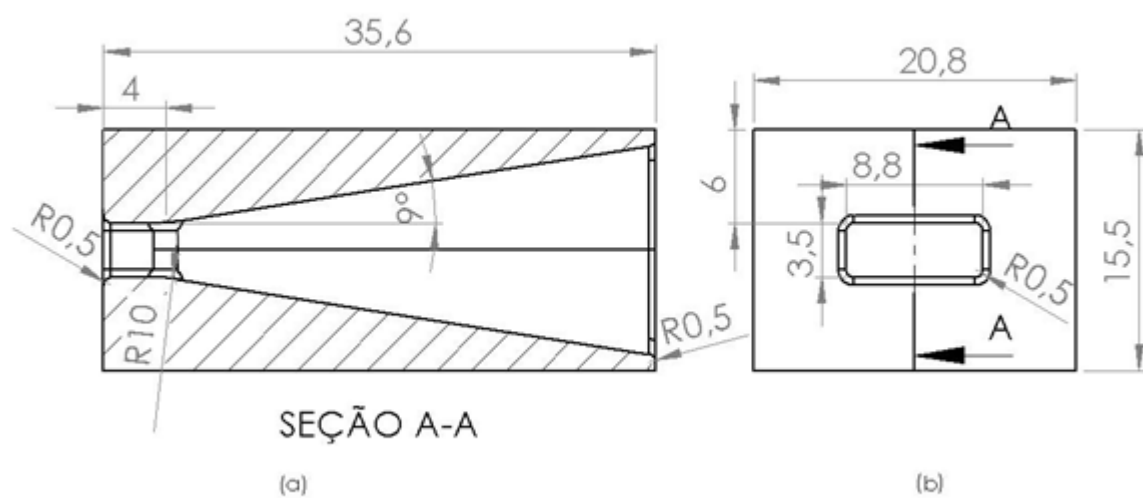


Figura 3.7 – Dimensões da matriz de trefilação com semi-ângulo de 9° .

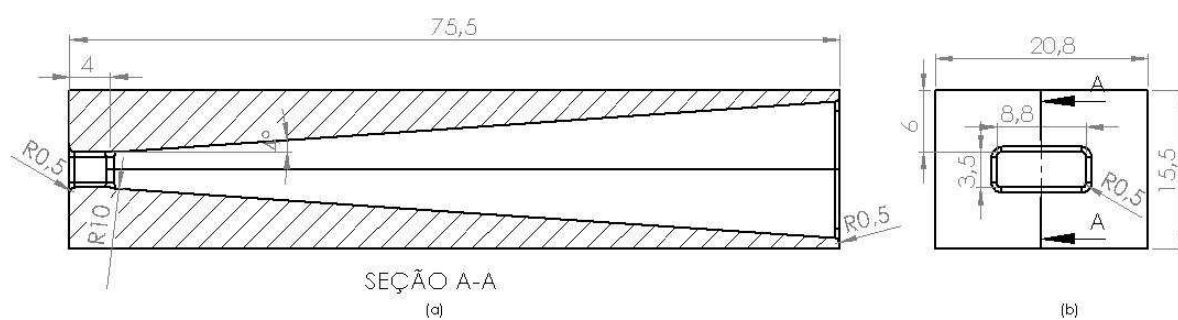


Figura 3.8 – Dimensões da matriz de trefilação com semi-ângulo de 4° .

3.3.2 Geometrias empregadas na simulação com um passe de redução

Visando obter uma simulação mais efetiva, com um menor tempo de duração e menor complexidade de cálculo computacional, utiliza-se o critério de simetria. Assim, divide-se a geometria da peça a ser trefilada e a matriz, trabalhando-se com apenas $\frac{1}{4}$ da geometria. Efetua-se o mesmo processo para cada simulação a ser realizada. A Figura 3.9 mostra a relação de simetria para a matriz e a peça de trabalho de acordo com a vista frontal do desenho. A geometria do primeiro quadrante, tanto para a matriz quanto para o cobre circular, será a utilizada na simulação.

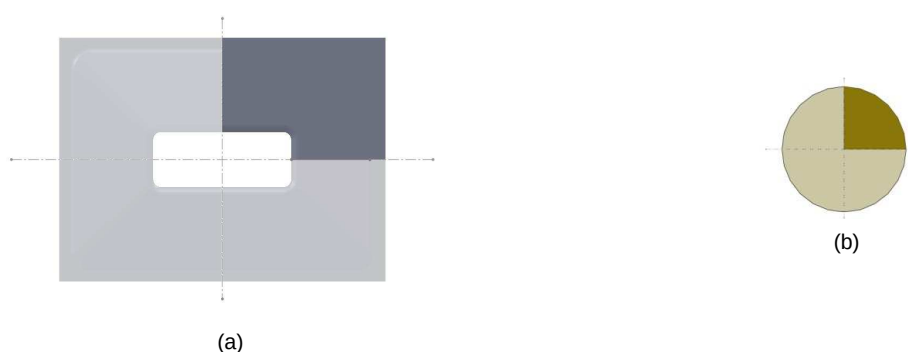


Figura 3.9 – Vista frontal mostrando a relação de simetria para a (a) matriz e para o (b) material de trabalho.

Com base nas considerações da geometria, montar-se-á o sistema peça-matriz levando-se em consideração a simetria desse e o alinhamento necessário à ocorrência do processo. Assim o sistema deverá estar disposto como na Figura 3.10.

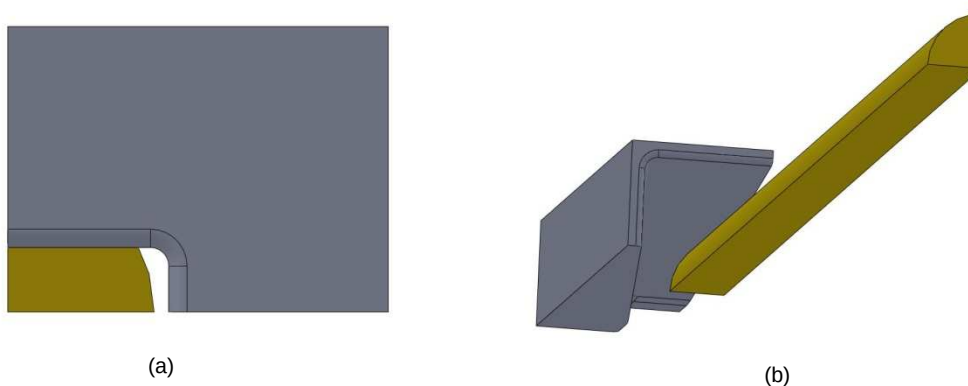


Figura 3.10 – Sistema de montagem para o início do processo de simulação em relação à (a) vista frontal e à (b) vista em perspectiva.

3.4 Simulação numérica para a verificação do comportamento do material sob conformação mecânica com espessura final definida sem restrição lateral

Considerando-se o resultado obtido na simulação com passe único, conforme seção 4.1, propõe-se o estudo do comportamento do material sob trefilação quando da variação da dimensão de entrada do material e do ângulo de trabalho da fieira. Este estudo fornecerá dados iniciais para que se busque melhores parâmetros para o processo de trefilação.

3.4.1 Sistema proposto para a conformação mecânica com espessura final definida

Para entender os esforços e as deformações que ocorrem no material sobre a influência de uma redução transversal com esforço na direção vertical para uma espessura final de 3,5 mm, iniciar-se-á o trabalho fazendo-se a simulação de um processo de conformação mecânica com esse objetivo. Para tanto, serão utilizadas matrizes de trefilação abertas lateralmente, criando-se um esforço apenas na direção vertical. Variar-se-á o semi-ângulo da matriz abrangendo os valores de 4°, 6° e 8°. Além de se utilizar matrizes aberta lateralmente e com diferentes valores para os ângulos de contato com o material, também será variada a dimensão transversal do material a ser utilizado no processo, variando-se o diâmetro de entrada em 6, 7 e 8 mm. A figura 3.11 mostra a geometria de uma matriz com 4° de semi-ângulo a ser utilizada na simulação numérica. A variação da matriz de acordo com o seu ângulo pode ser conferida pela Figura 3.12. Pode ser conferida também a variação da geometria de entrada com o auxílio da Figura 3.13.

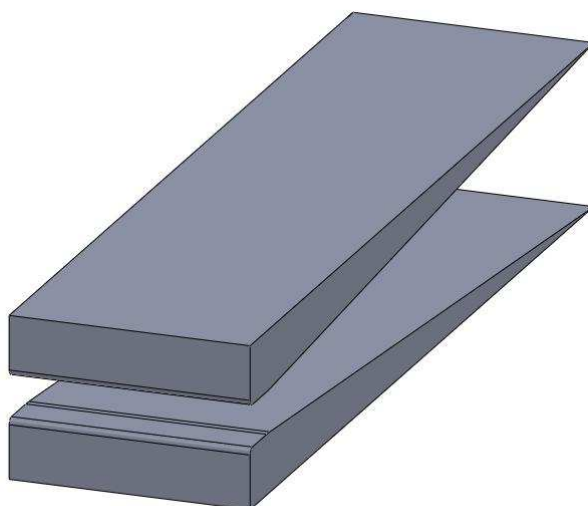


Figura 3.11 – Perspectiva dimétrica da matriz aberta lateralmente com um semi-ângulo de 4° .

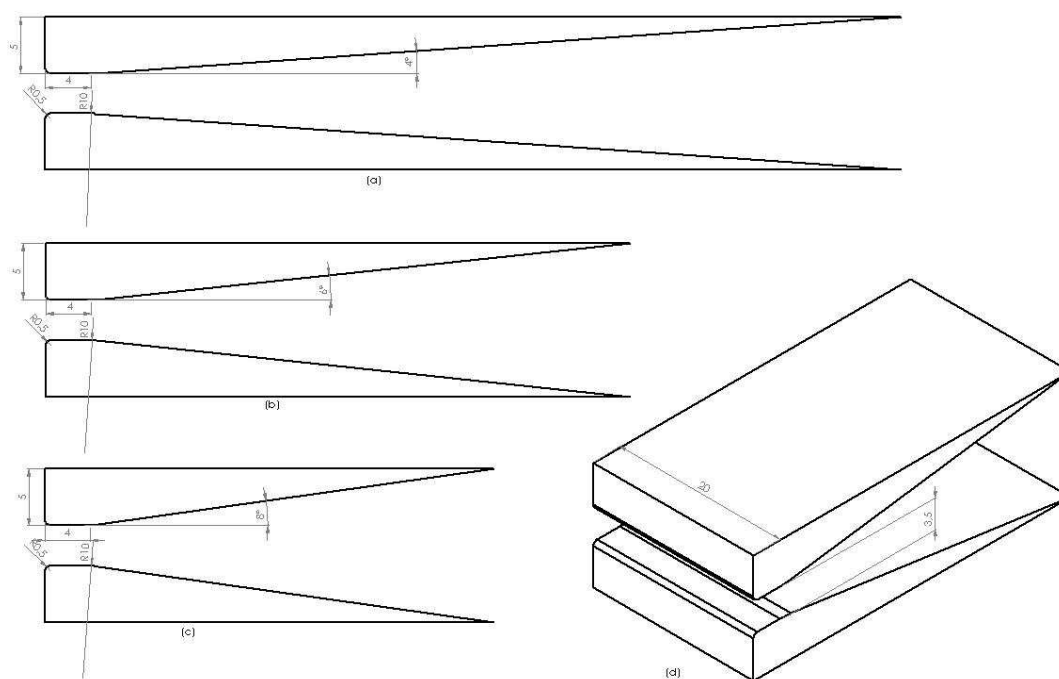


Figura 3.12 – Dimensões das matrizes para simulação de conformação mecânica unidirecional com semi-ângulo de (a) 4° , (b) 6° e (c) 8° e (d) espessura imposta pela matriz.

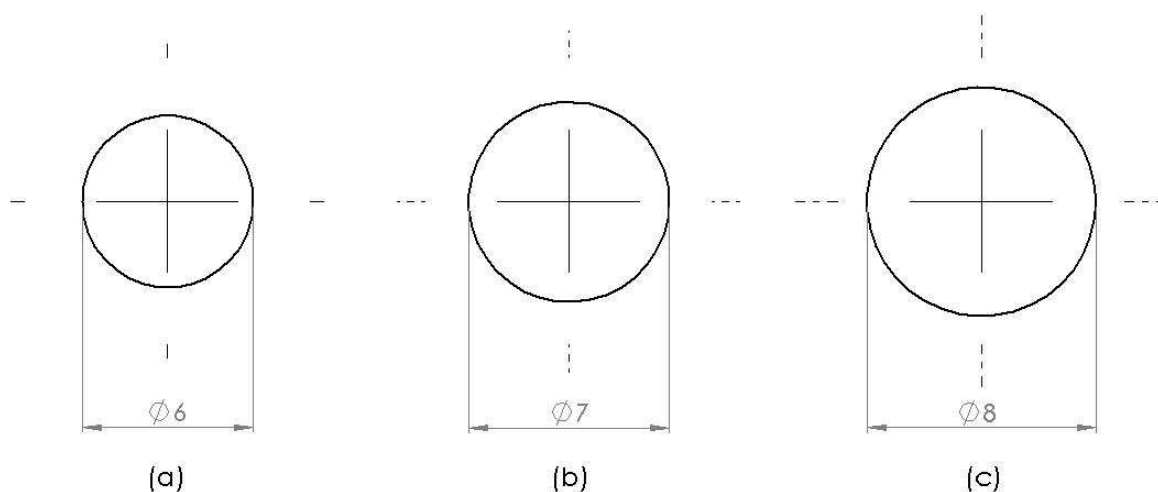


Figura 3.13 – Variação dimensional das geometrias a serem utilizadas na simulação unidirecional: vergalhão com (a) 6 mm de diâmetro, (b) 7 mm de diâmetro e (c) 8 mm de diâmetro.

3.4.2 Geometrias empregadas na simulação da conformação mecânica com espessura final definida

Visando obter uma simulação mais efetiva, com um menor tempo de duração e menor complexidade de cálculo computacional, utiliza-se o critério de simetria. Assim, divide-se a geometria da peça a ser trefilada e a matriz, trabalhando-se com apenas $\frac{1}{4}$ da geometria. Efetua-se o mesmo processo para cada simulação ser realizada. A Figura 3.14 mostra a relação de simetria para a matriz e peça de trabalho de acordo com a vista frontal do desenho. A geometria do primeiro quadrante, tanto para a matriz quanto para o cobre circular, será a utilizada na simulação.

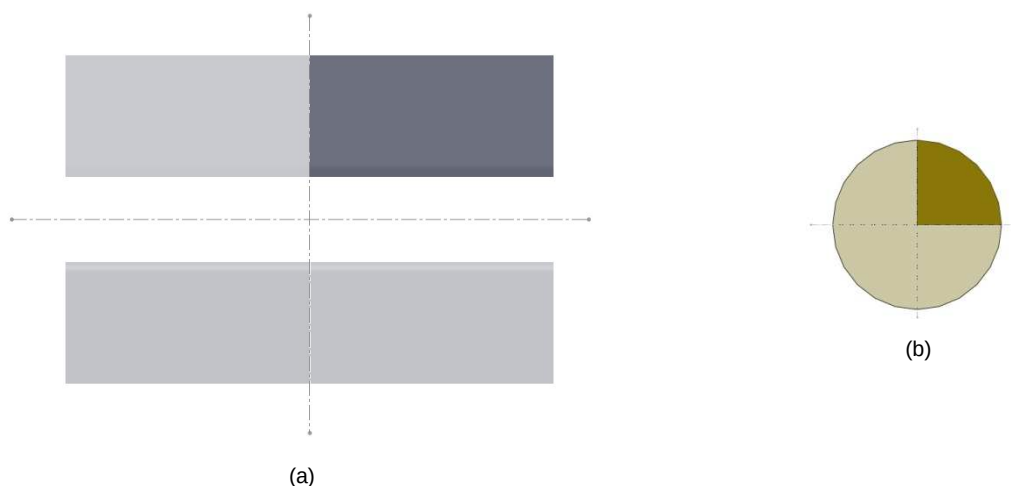


Figura 3.14 – Vista frontal mostrando a relação de simetria para a (a) matriz e para o (b) material de trabalho.

Com base nas considerações da geometria, montar-se-á o sistema peça-matriz levando-se em consideração a simetria desse e o alinhamento necessário à ocorrência do processo. Assim o sistema deverá estar disposto como na Figura 3.15.

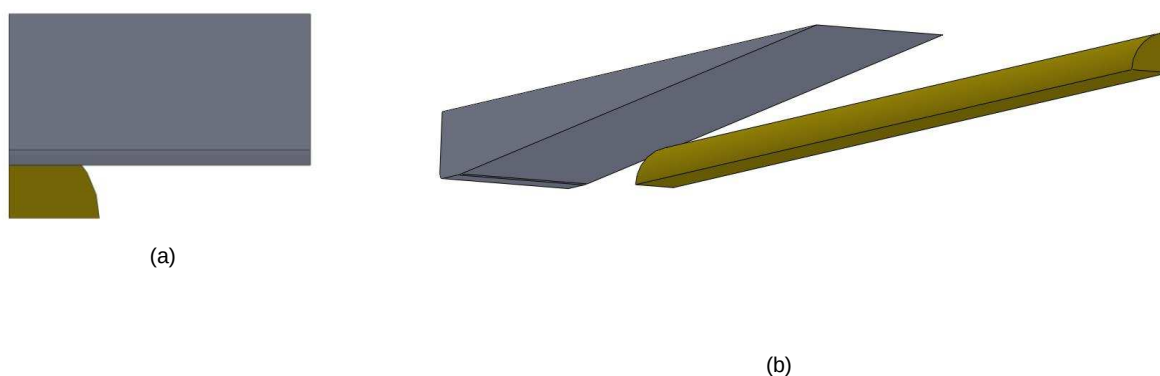


Figura 3.15 – Sistema de montagem para o início do processo de simulação em relação à (a) vista frontal e à (b) vista em perspectiva.

3.5 Simulação numérica utilizando 2 passes de trefilação

Obtendo-se os resultados de simulação expostos na seção 4.2, faz-se a tentativa de trefilar o vergalhão de cobre eletrolítico com 8 mm de diâmetro utilizando-se 2

passos. Objetiva-se verificar a viabilidade de se realizar este processo através de 3 testes variando a espessura de saída no primeiro passo para cada um.

3.5.1 Sistema proposto para a trefilação do primeiro passo

Com o vergalhão de cobre eletrolítico de diâmetro 8 mm, Figura 3.1 (a), como matéria prima, utilizar-se-á as espessuras de saída no valor de 4,0, 4,5 e 5,0 mm para as matrizes no primeiro passo. O semi-ângulo de trefilação será de 8° , uma vez que esse forneceu resultados mais satisfatórios na simulação anterior.

Para o primeiro passo serão utilizadas matrizes de espessura definida sem restrição lateral. As matrizes terão a forma genérica de uma cunha, conforme visto na Figura 3.10. As dimensões para cada uma das três matrizes é explicitada na Figura 3.16. Com exceção da dimensão de abertura das matrizes, todas as outras dimensões são comuns para os três modelos.

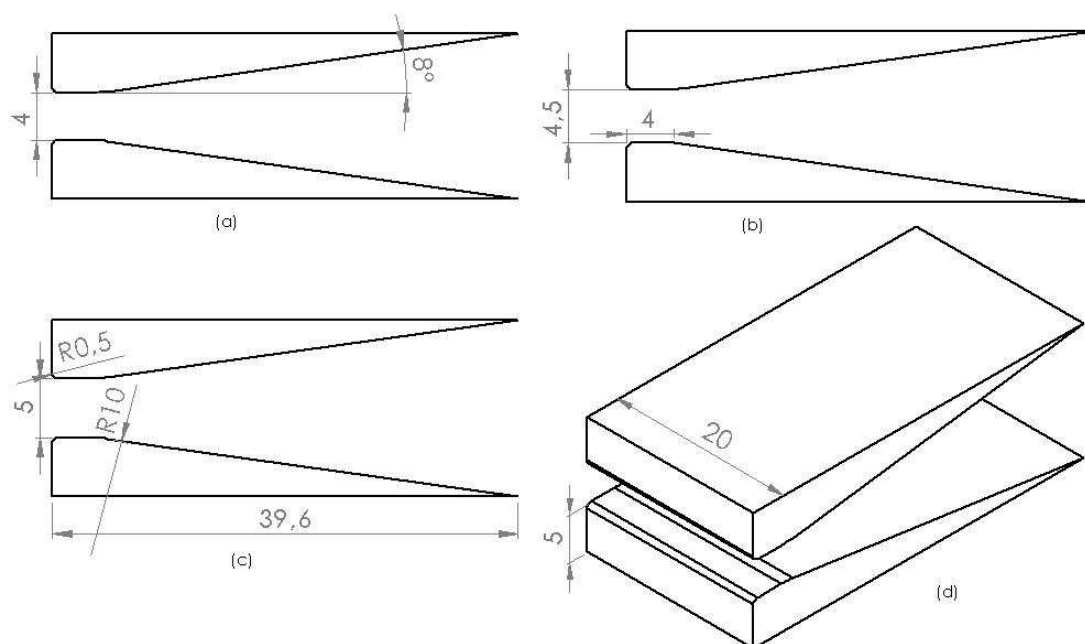


Figura 3.16 – Dimensões das matrizes para o primeiro passo com semi-ângulo de 8° espessura de saída de (a) 4,0 mm, (b) 4,5 mm e (c) 5,0 mm. Matriz em perspectiva isométrica.

3.5.2 Geometrias empregadas na trefilação do primeiro passe

Novamente será utilizado o critério de simetria com o objetivo de otimizar o processo de simulação. Assim, serão utilizados $\frac{1}{4}$ dos modelos citados na seção 3.5.1. Desta forma, o sistema ocorrerá em uma configuração muito semelhante à demonstrada na Figura 3.15.

3.5.3 Sistema proposto para a trefilação do segundo passe

O segundo passe será o último no processo proposto. A matriz final deverá ser dimensionada nas medidas do produto final desejado. O material a ser utilizado no segundo passe será o material obtido numericamente no primeiro passe através do software Deform 3D. O programa computacional, ao gerar a geometria no primeiro passe, confere a ela todas as informações dimensionais e de propriedades mecânicas adquiridas com o processo.

A matriz será semelhante à matriz empregada na primeira simulação, Figura 3.6. Contudo, o semi-ângulo de trabalho será de 8° , baseando-se nas simulações anteriores. A Figura 3.17 mostra o desenho da fiação a ser utilizada no segundo passe para todos os três processos aqui definidos.

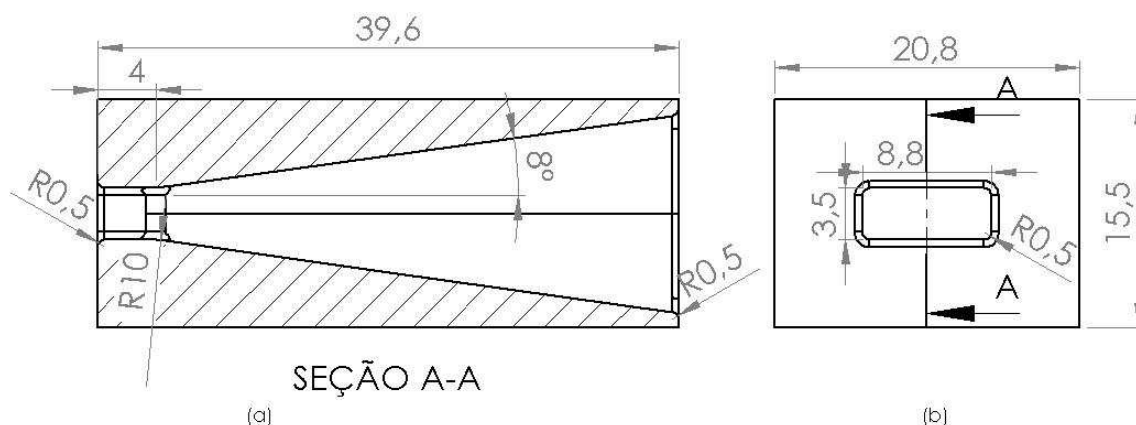


Figura 3.17 – Dimensões da fiação a ser utilizada no segundo passe da simulação com 2 passes.

3.5.4 Geometrias empregadas na trefilação do primeiro passe

Utilizado o critério de simetria com o objetivo de otimizar o processo de simulação, serão utilizados $\frac{1}{4}$ das geometrias geradas no primeiro passe e da fieira proposta na seção 3.5.3. A configuração do sistema ocorrerá de maneira semelhante à Figura 3.10, salvo as devidas diferenças de dimensão do material e do semi-ângulo de trabalho.

3.6 Simulação numérica utilizando dois passes com perfil curvo no primeiro passe

Após a análise da simulação do processo de trefilação em 2 passes, variando-se a espessura de saída no primeiro passe, conforme seção 4.3, propõe-se modificar o perfil de saída do primeiro passe.

3.6.1 Sistema proposto para a trefilação do primeiro passe com perfil modificado

Tendo em mente que a principal falha ocorrida durante as simulações foi a não obtenção do perfil final desejado, propõe-se modificar o perfil de saída da matriz no primeiro passe. Objetiva-se obter um perfil no primeiro passe que possibilite um maior preenchimento no segundo passe dos pontos de falha mais críticos, os cantos do perfil retangular final.

Propõe-se, então, a utilização de uma matriz que propicie durante a conformação o fluxo de material no sentido diagonal a partir do centro do perfil. Em outras palavras, pretende-se prover o maior volume de material possível durante o primeiro passe próximo à região em que ocorre a falha dimensional no segundo passe. Para tanto, modela-se uma fieira curvilínea nas bordas superior e inferior, conforme Figura 3.18. A matéria prima é a mesma, o vergalhão de diâmetro 8 mm da Figura 3.1 (a).

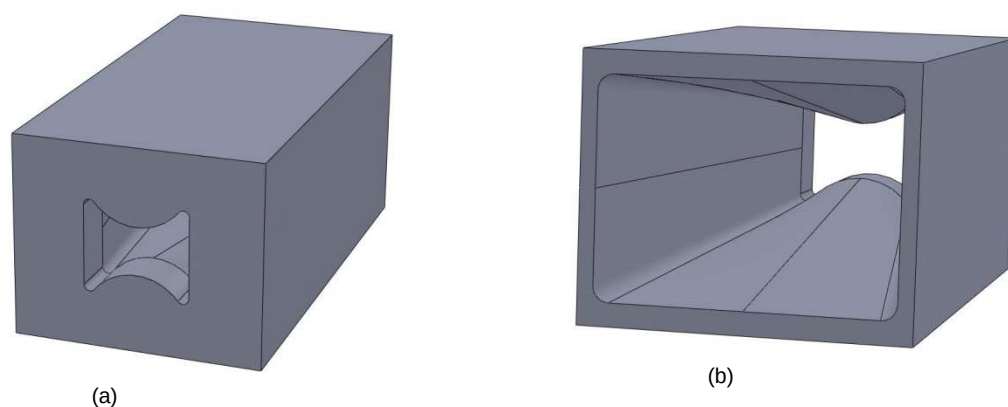


Figura 3.18 – Matriz genérica para o primeiro passe.

A matriz da Figura 3.17 ainda não é a matriz a ser utilizada no primeiro passe da presente proposta. Trata-se de uma geometria idealizada para que seja definida a matriz de simulação. Buscando não impedir a deformação do material na direção horizontal e também entender a relação com essa deformação, retira-se a restrição lateral da matriz proposta, optando-se por trabalhar com a matriz da Figura 3.19. Ela possui as mesmas dimensões, porém é aberta lateralmente.

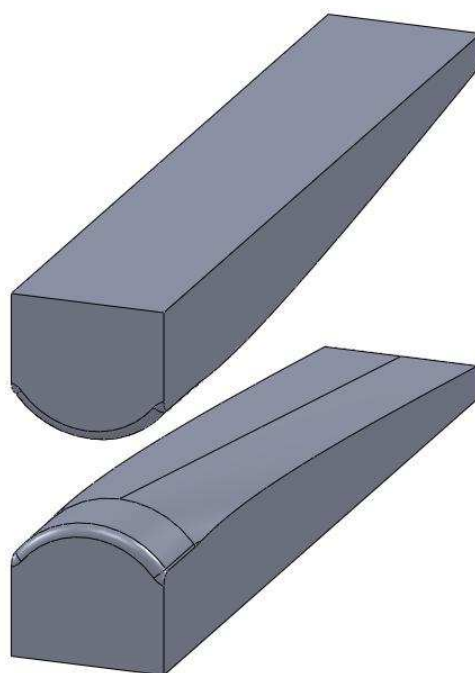


Figura 3.19 – Perspectiva dimétrica da matriz de perfil modificado.

Para avaliar se haverá dependência significativa à nova dimensão proposta da matriz, serão realizados dois testes variando o raio inserido no novo perfil. Uma

matriz terá o raio no valor de 4,5 mm, conforme a Figura 3.20. A outra, de acordo com a Figura 3.21, terá um raio das bordas superior e inferior de 9 mm.

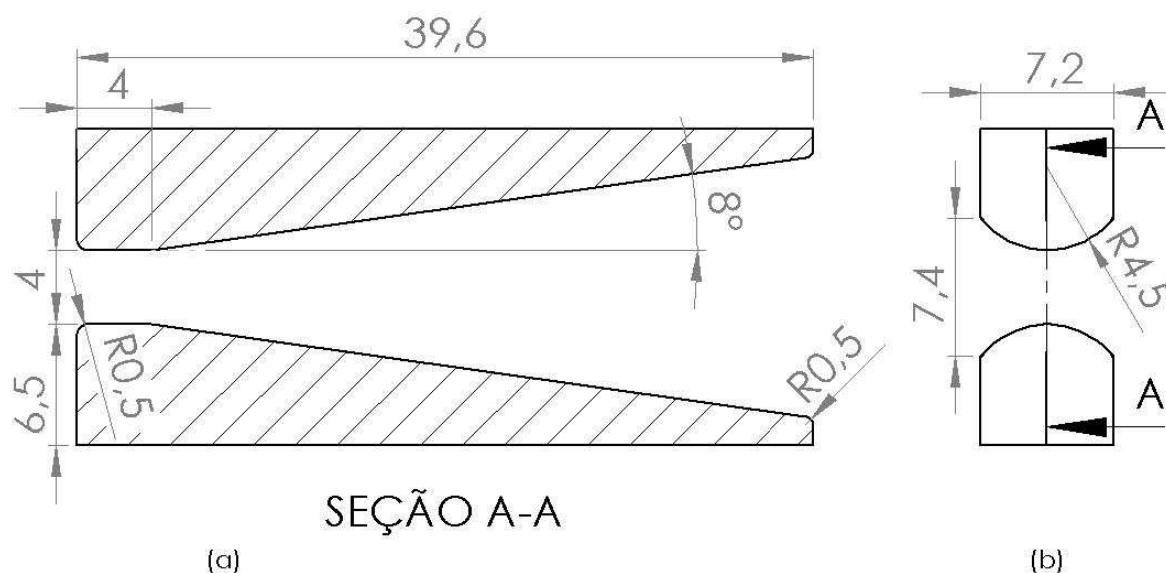


Figura 3.20 – Dimensões da matriz com perfil modificado de raio 4,5 mm.

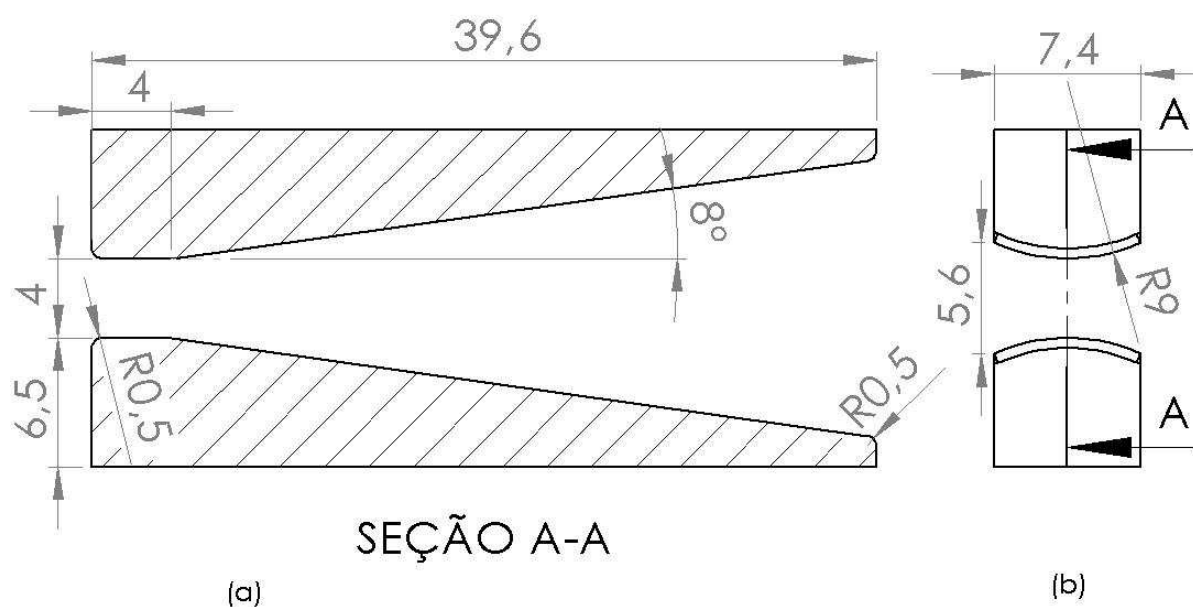


Figura 3.21 – Dimensões da matriz com perfil modificado de raio 9 mm.

3.6.2 Geometrias empregadas no primeiro passe da simulação com perfil modificado

Como foi feito em todas as simulações até o momento, serão utilizadas $\frac{1}{4}$ das geometrias na simulação visando otimizar o trabalho computacional. A Figura 3.22 mostra a relação de simetria para os objetos a serem simulados.

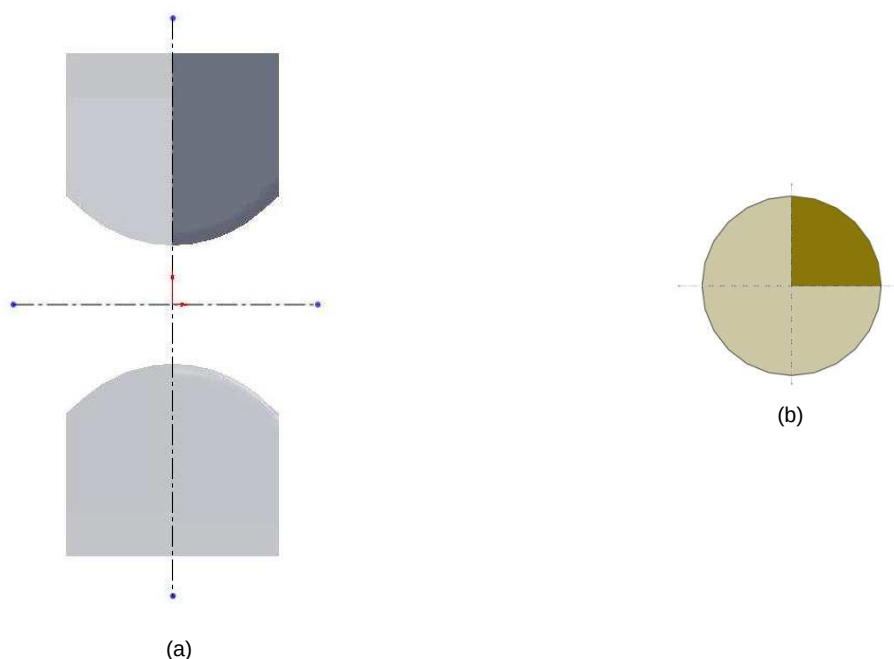


Figura 3.22 – Vista frontal mostrando a relação de simetria para a (a) matriz de perfil modificado e para o (b) material de trabalho.

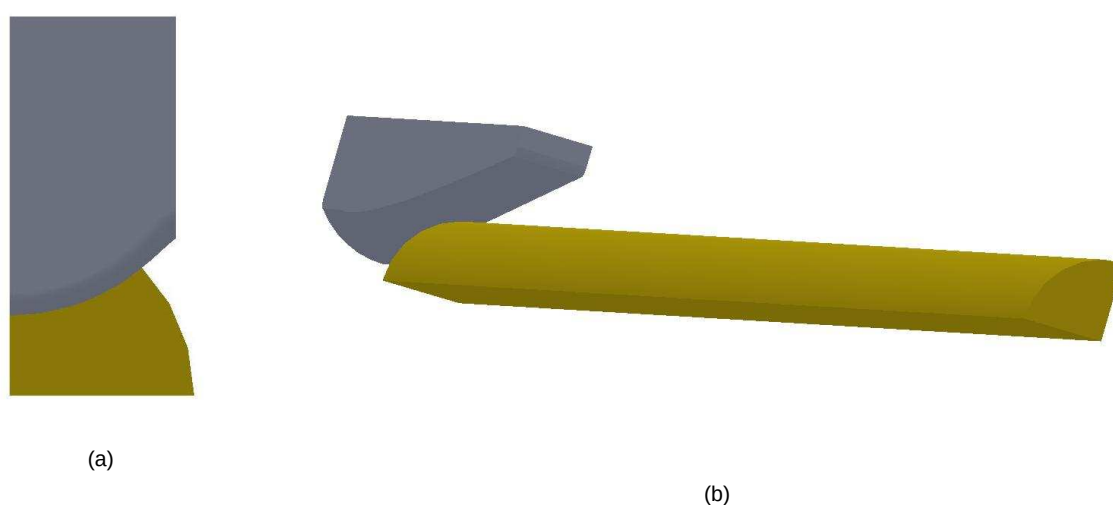


Figura 3.23 - Sistema de montagem para o início do processo de simulação do primeiro passe em relação à (a) vista frontal e à (b) vista em perspectiva.

3.6.3 Sistema proposto para a trefilação do segundo passe

Utilizando a geometria obtida a partir do primeiro passe, realiza-se o segundo passe de trefilação utilizando-se uma fieira com as dimensões finais do produto desejado. As dimensões da fieira do segundo passe podem ser visualizadas conforme Figura 3.17.

3.6.4 Geometrias empregadas na trefilação do segundo passe

Objetivando-se a otimização do processo computacional, utiliza-se o quarto das geometrias propostas. O esquema de montagem para a realização da simulação é semelhante à Figura 3.10, somente diferindo as dimensões do material a ser trefilado que, neste caso, será o obtido no primeiro passe.

3.7 Simulação numérica utilizando uma fieira não-convencional

Após os resultados obtidos com a execução da simulação anterior, retratada e discutida no item 4.4, sugere-se uma segunda fieira modificada. Alteram-se as faces laterais da fieira acrescentando a elas um perfil curvo.

3.7.3 Sistema proposto para o processo com a fieira não-convencional

Uma vez que, para o vergalhão com diâmetro 8 mm, não foi alcançado o objetivo de se obter um produto final com as dimensões objetivadas, Figura 3.1 (b), com o uso de uma fieira modificada nas faces superior e inferior, busca-se verificar o comportamento do material em um processo no qual a trefila possui as faces laterais modificadas para um perfil curvo. Como pode ser visto pela Figura 3.24, as faces laterais de trabalho da fieira se iniciam curvas convexas até um determinado ponto em que retorna para o formato reto. Já as faces de trabalho superior e inferior mantêm-se retas.

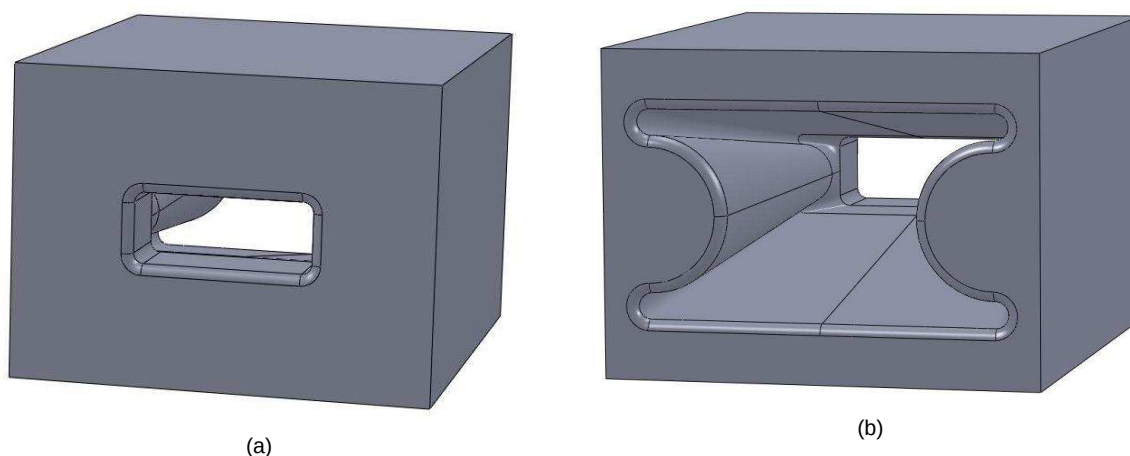


Figura 3.24 – Fieira curva para passe único.

A Figura 3.25 mostra o desenho da matriz proposta. Observa-se que as faces laterais, ao contrário das matrizes anteriores, possui um semi-ângulo diferente em relação às faces superior e inferior. Ela é ajustada de forma que possibilite a modelagem do perfil nas regiões laterais desde o início do trabalho de compressão vertical realizado pela matriz. O perfil curvo segue uniforme até a espessura de 4 mm dentro da fieira, tomando de maneira gradual, a partir deste ponto, a forma reta até a espessura final de 3,5 mm. As faces superior e inferior se mantêm sempre com semi-ângulo de 8° até a espessura final.

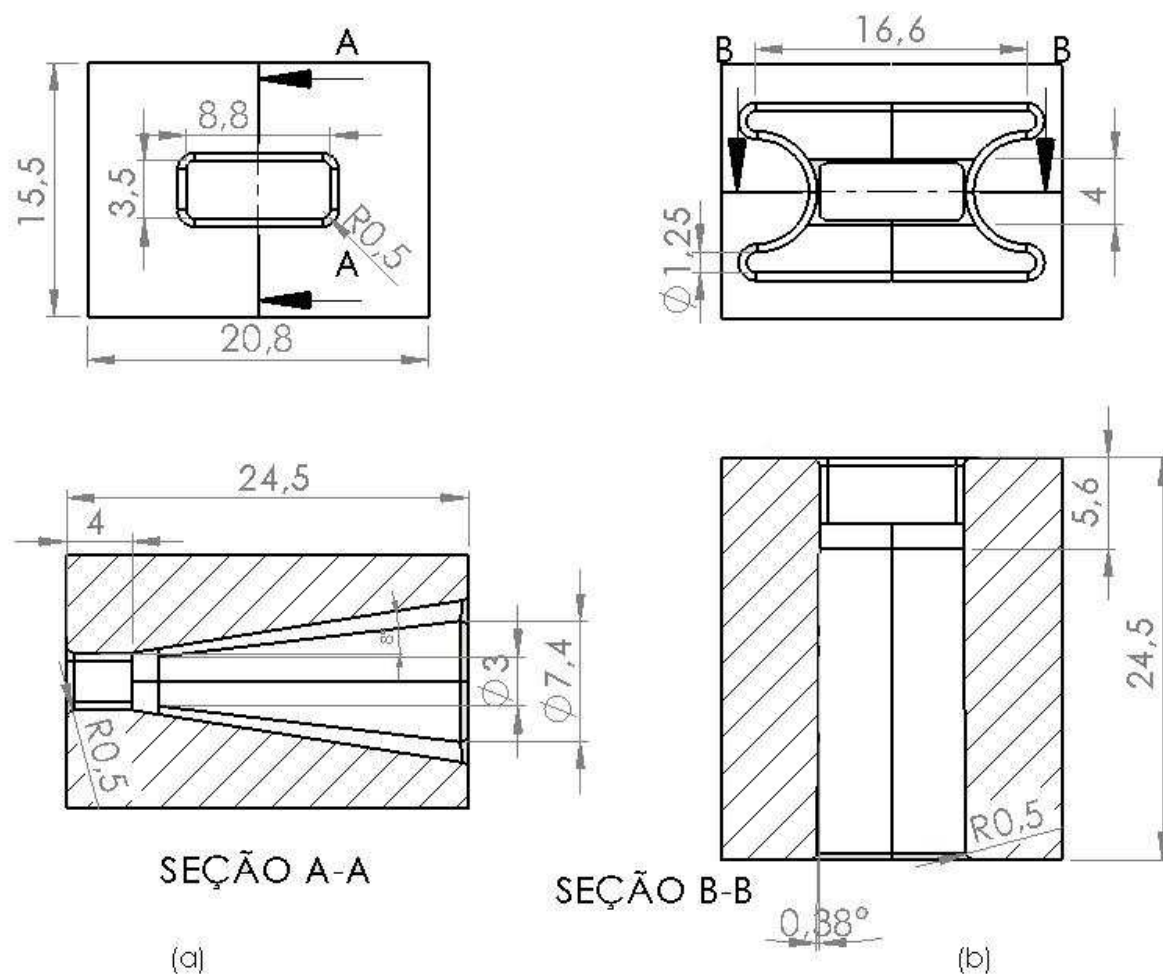


Figura 3.25 – Dimensões da matriz com faces laterais curvas

3.7.2 Geometrias empregadas no processo com a fieira não-convencional

Utilizando $\frac{1}{4}$ das geometrias projetadas fica favorecido o processo computacional como um todo. Exemplificando, a Figura 3.26 mostra a quarta parte da matriz proposta e do vergalhão de cobre eletrolítico a ser trabalhado. A figura 3.27 mostra como será montado o sistema para efetuar a simulação.

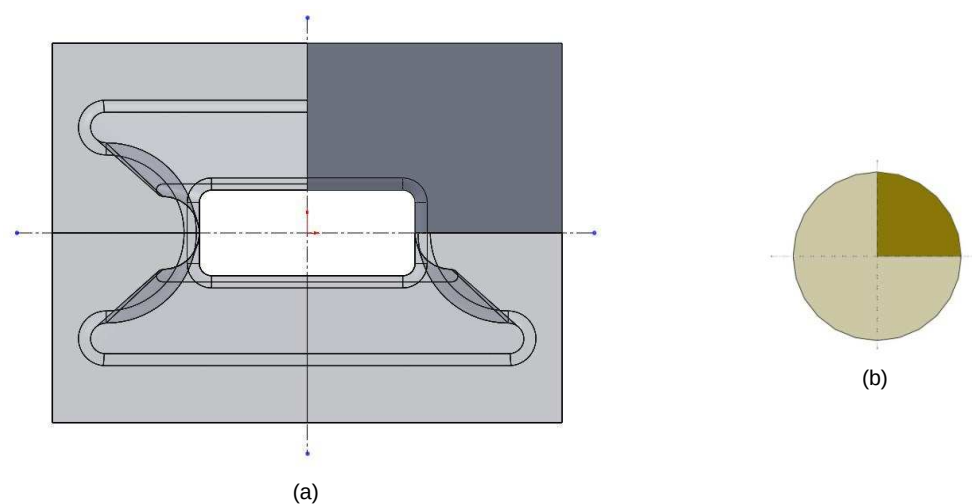


Figura 3.26 – Vista frontal mostrando a relação de simetria para a (a) matriz de faces laterais curvas e para o (b) material de trabalho.

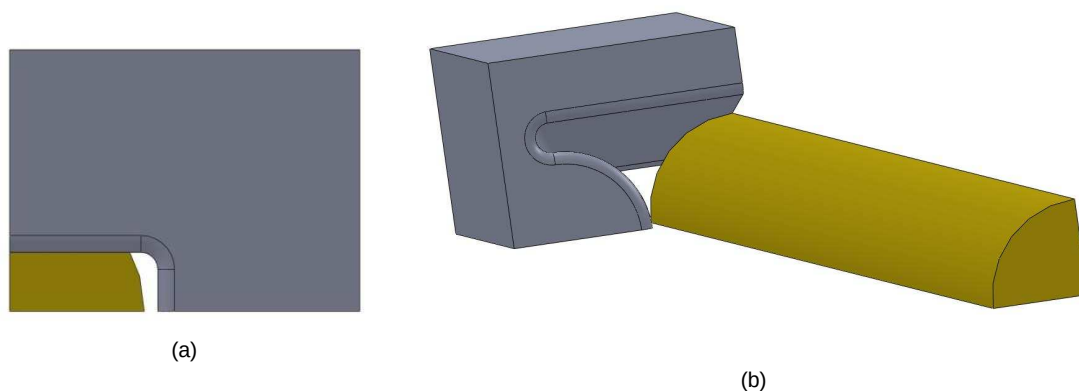


Figura 3.27 – Sistema de montagem para o início do processo de simulação utilizando fieira com faces laterais curvas em relação à (a) vista frontal e à (b) vista em perspectiva.

3.8 Simulação numérica utilizando vergalhão com diâmetro 9 mm

Após vários estudos de parâmetros de trefilação para a produção de fio retangular de cobre eletrolítico a partir de um vergalhão, decidiu-se analisar a influência da dimensão da matéria prima no processo.

3.8.1 Sistema proposto para processo com vergalhão de diâmetro 9 mm

Observando os resultados das simulações com dois passes, na qual variou-se a espessura de saída no primeiro deles, e o com faces superior e inferior modificadas, retratadas e discutidas nas seções 4.3 e 4.4, é proposto uma simulação modificando a dimensão da matéria prima para o diâmetro de 9 mm, conforme Figura 3.28. Verificou-se durante a análise e a discussão dos resultados que o processo com espessura de saída de 5,0 mm no primeiro passe forneceu um melhor resultado com relação às dimensões da seção transversal obtida no fim do processo. E na simulação com faces curvas, determina-se o teste com a matriz com 4,5 mm de raio da curva.

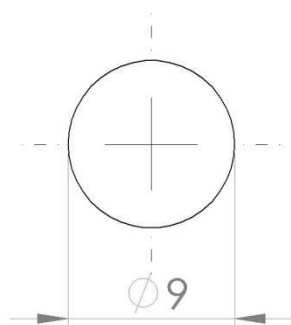


Figura 3.28 – Seção transversal da matéria prima a ser simulada.

Para a simulação com faces retas, as Figuras 3.16 (c) e (d) mostram as dimensões da matriz a ser utilizada no primeiro passe. Da mesma forma a Figura 3.17 mostra as dimensões da fiação utilizada no segundo passe.

Já na simulação com faces superior e inferior curvas para o passe 1, a Figura 3.20 mostra as dimensões da matriz utilizada. Para o segundo passe também será utilizada uma fiação com as dimensões mostradas na Figura 3.17.

3.8.2 Geometrias empregadas na simulação com vergalhão de diâmetro 9 mm

Para que a simulação ocorra da forma mais efetiva possível, do ponto de vista do trabalho computacional, utiliza-se a quarta parte das geometrias definidas na seção anterior.

Para a simulação com a matriz reta no primeiro passe, utiliza-se o esquema mostrado na Figura 3.15. O segundo passe se montado conforme a Figura 3.6.

E, por fim, na simulação com a matriz curva no primeiro passe, o esquema de montagem para o processo se dá conforme a Figura 3.23. O segundo passe, semelhante à simulação de faces retas, ocorrerá a partir do esquema mostrado na Figura 3.6.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo visa relatar todos os resultados adquiridos a partir dos processos e simulações propostos na metodologia. Tem o objetivo também de interpretar, refletir e dispor os resultados de maneira clara e baseada em gráficos, tabelas e figuras, lançando mão de correlações e de informações que fornecerão conclusões apuradas.

4.1 Análise da simulação numérica em passe único

Visando estabelecer as principais falhas ocorridas durante a tentativa de se realizar um processo de trefilação com uma alta redução e uma variação brusca de geometria, realizou-se a simulação numérica com apenas um passe de trefilação a partir de um vergalhão de diâmetro 8 mm buscando um perfil de saída retangular com dimensões 3,5 x 8,8 mm. Para tanto, realizou-se duas simulações, a primeira com uma fieira com o semi-ângulo de 9° e a segunda com o semi-ângulo de 4° . Este tópico descreve e interpreta os resultados obtidos.

4.1.1 Vergalhão com diâmetro de 8 mm e fieira com 9° de semi-ângulo

Realizou-se a simulação da conformação do vergalhão de 8 mm de diâmetro através da fieira com 9° de semi-ângulo. As deformações efetivas ocorridas ao longo da seção transversal do perfil de saída podem ser visualizadas conforme a Figura 4.1. A maior deformação efetiva ocorreu na região central do perfil de saída com o valor de 0,974. À medida em que a região se aproxima das extremidades laterais, obtém-se uma diminuição da deformação efetiva onde o valor é de 0,557.

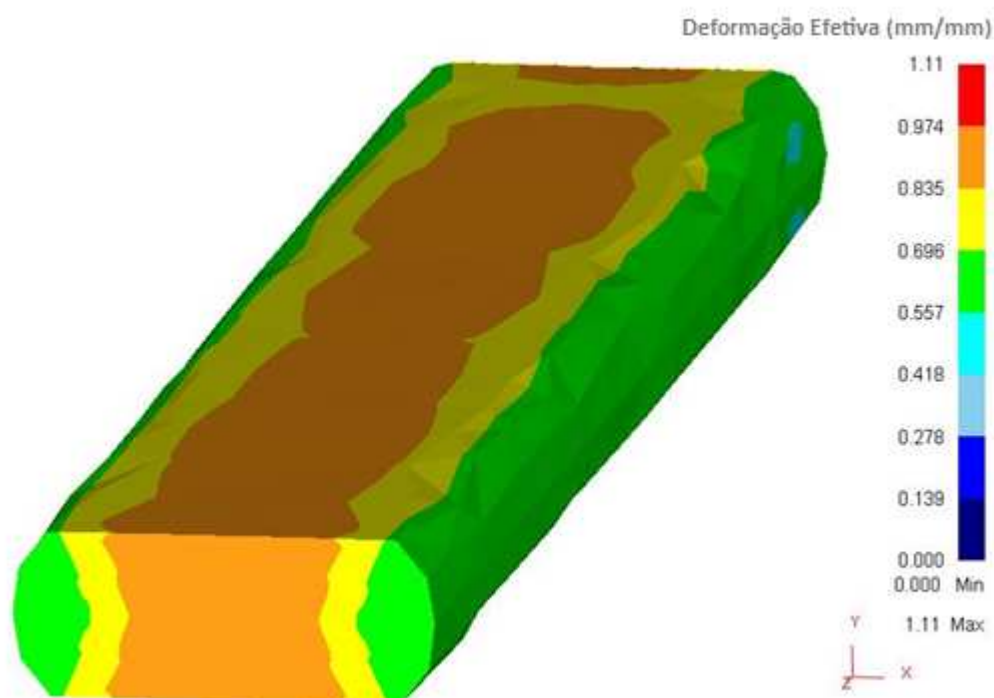


Figura 4.1 – Deformação efetiva ocorrida no vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 9°.

A tensão efetiva sofrida pelo material é disposta conforme na Figura 4.2. O perfil de saída mantém-se tracionado com uma tensão efetiva máxima de 411 MPa e uma um tensão efetiva mínima de 205 MPa. A Figura 4.3 mostra a seção transversal o ponto mais crítico. A região central sofre o maior esforço, com uma tensão efetiva de 547 MPa, obtendo-se valores mínimos para as extremidades laterais de 342 MPa.

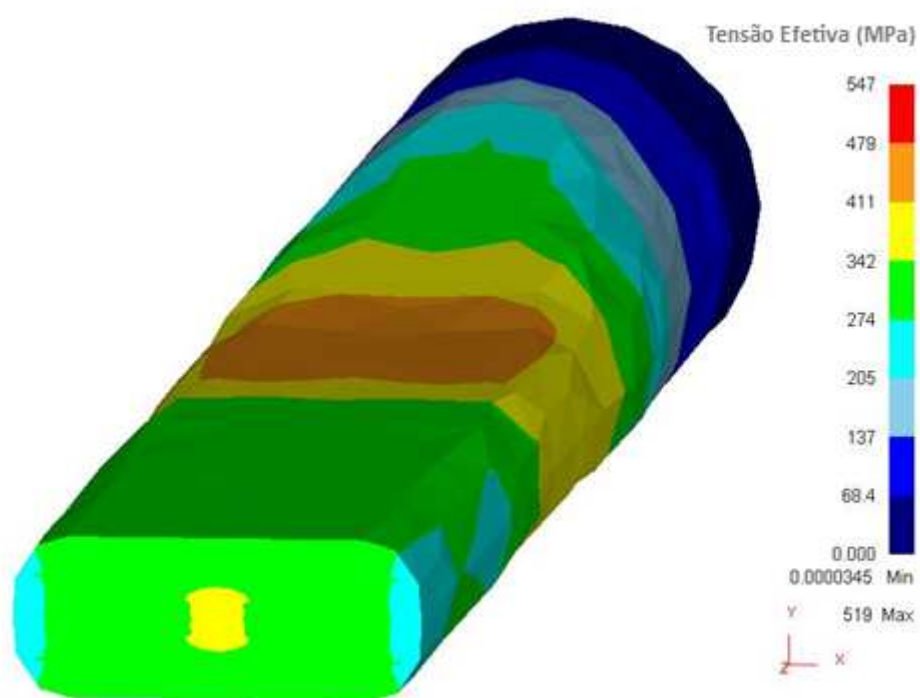


Figura 4.2 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 9° na região da ocorrência da conformação.

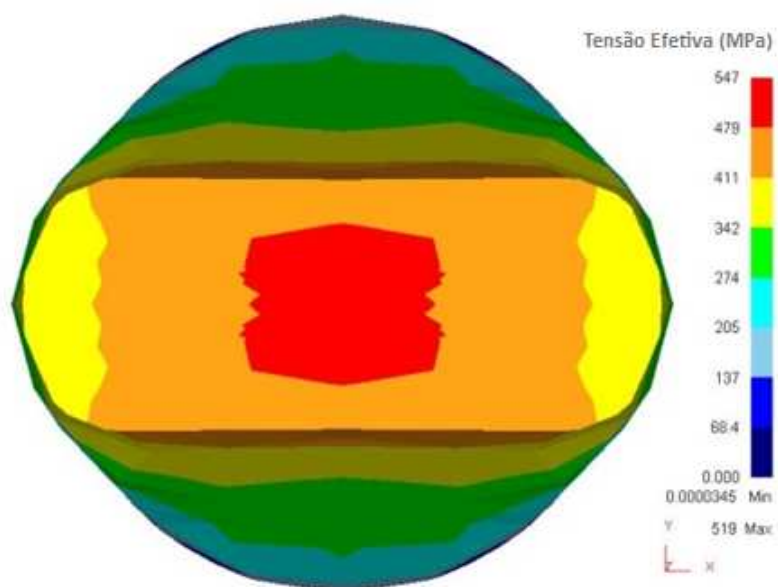


Figura 4.3 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 9° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

A Figura 4.4 mostra o gráfico da variação da força exercida sobre a fieira utilizada no processo, na direção da trefilação, em função da conformação da quarta parte do vergalhão de diâmetro 8 mm. A força obtida é em torno de 2,3 kN.



Figura 4.4 – Força sobre a fieira de semi-ângulo 9° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 8 mm.

Observa-se na Figura 4.5, na qual o perfil de saída é medido e comparado com o quarto da geometria da fieira, que a espessura e a largura de saída tem dimensões inferiores às dimensões da fieira. Em função da forte redução, ocorre uma tração excessiva na saída diminuindo a área da seção do perfil. Nesse caso tem se as dimensões de 3,45 mm de espessura e 8,72 mm de largura. Nota-se ainda que o perfil não consegue preencher os vértices da fieira, obtendo não só dimensões menores que as desejadas como também uma seção com falhas no seu formato. A distância entre o perfil e o vértice da fieira foi mensurado e é de 0,42 mm. A área do perfil obtido tem o valor de 27,68 mm².

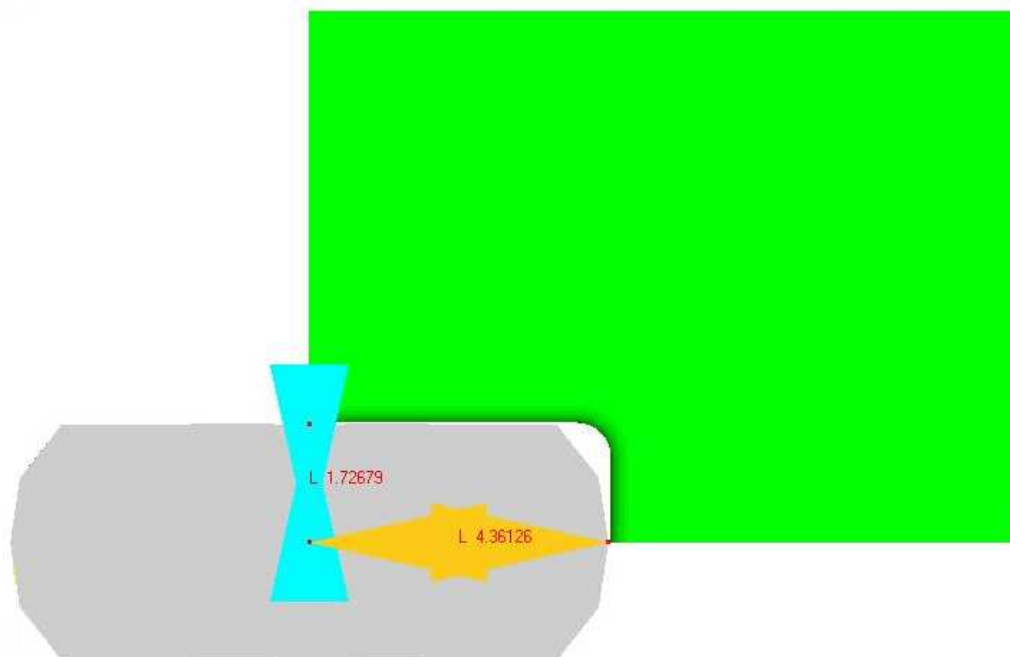


Figura 4.5 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com diâmetro 8 mm em uma fieira com 9° de semi-ângulo de contato.

4.1.2 Vergalhão com diâmetro de 8 mm e fieira com 4° de semi-ângulo

Realizou-se a simulação da conformação do vergalhão de 8 mm de diâmetro através da fieira com 4° de semi-ângulo. A Figura A.1 mostra as deformações efetivas ocorridas ao longo da seção transversal do perfil. A maior deformação efetiva ocorreu na região central do perfil de saída com o valor de 1,01. Ocorre uma diminuição da deformação efetiva à medida em que a região se aproxima das extremidades laterais, onde o valor é de 0,572.

A tensão efetiva sofrida pelo material é disposta conforme na Figura A.2. O perfil de saída mantém-se tracionado com uma tensão efetiva máxima de 402 MPa e uma um tensão efetiva mínima de 311 MPa. A Figura A.3 mostra a seção transversal no ponto mais crítico. A região central sofre o maior esforço, com uma tensão efetiva de 500 MPa, obtendo-se valores mínimos para as extremidades laterais de 375 MPa.

A carga sofrida pela fieira na direção da trefilação em função da deformação da quarta parte do vergalhão ao longo do tempo está demonstrada na Figura A.4. A carga de trefilação é aproximadamente 2,5 kN.

Observa-se na Figura , na qual o perfil de saída é medido e comparado com o quarto da geometria da fieira, que a espessura e a largura de saída tem dimensões inferiores às dimensões da fieira. Em função da forte redução, ocorre uma tração excessiva na saída diminuindo a área da seção do perfil. Nesse caso tem se as dimensões de 3,44 mm de espessura e 8,72 mm de largura. Nota-se ainda que o perfil não consegue preencher os vértices da fieira, obtendo não só dimensões menores que a desejada como também uma seção com falhas no seu formato. A distância entre o perfil e o vértice da fieira é de 0,50 mm. A área do perfil obtido foi calculada e é de 27,28 mm².

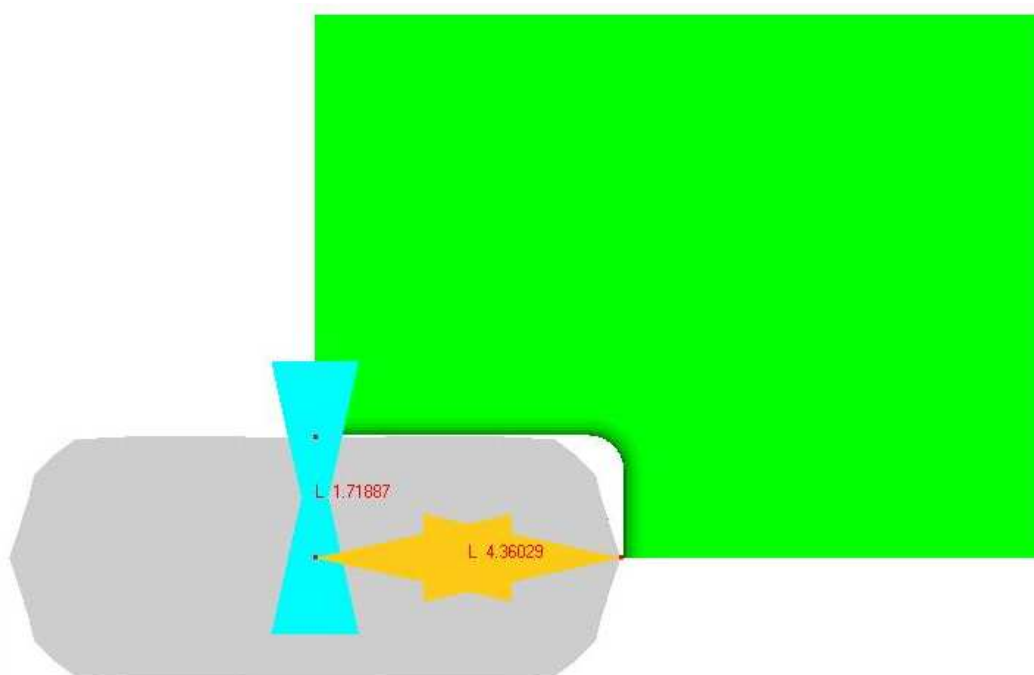


Figura 4.6 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com diâmetro 8 mm em uma fieira com 4° de semi-ângulo de contato.

4.1.3 Relacionando os resultados

Os resultados obtidos para as duas simulações numéricas, conformando um vergalhão de diâmetro 8 mm através das trefilas com 9° e 4° de semi-ângulo, foram

resumidos e dispostos na Tabela IV.1. Notoriamente a forma do perfil não atingiu a objetivada, não formando de maneira regular os cantos desse. Contudo, a conformação utilizando a fieira com 9° de semi-ângulo obteve uma aproximação maior em relação à dimensão desejada.

São apresentados três gráficos correlacionando os dados da tabela. A Figura 4.7 mostra as tensões efetivas no ponto mais crítico da deformação e no perfil de saída em função do semi-ângulo utilizado. A Figura 4.8 correlaciona a tensão no ponto mais crítico da deformação com a deformação imposta ao perfil de saída. E a Figura 4.9 mostra o comportamento da área do perfil de saída e da distância do perfil ao vértice da matriz.

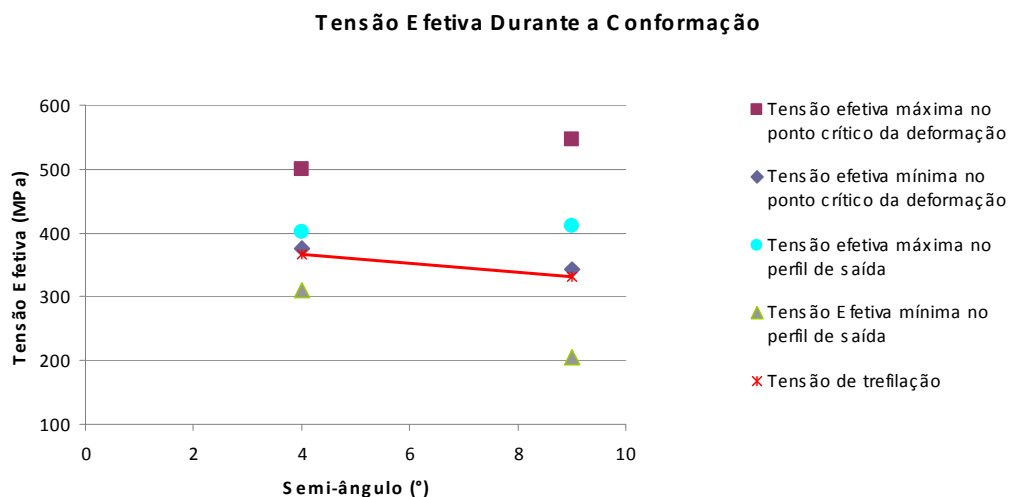


Figura 4.7 – Distribuição da tensão efetiva sobre o material durante a trefilação para o processo de passe único.

Tabela IV.1 – Características do perfil obtido pela simulação em passe único do vergalhão com diâmetro 8 mm

Diâmetro do vergalhão	Semi-ângulo de contato	Tensão Efetiva na deformação (Mpa)		Tensão efetiva na saída (Mpa)		Deformação Efetiva		Carga de Trefilação (kN)	Dimensões do perfil de saída (mm)		Distância do perfil ao vértice da matriz (mm)	Área do perfil de saída (mm ²)	Redução	Tensão de Trefilação (MPa)
		Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		Espessura	Largura				
8 mm	9°	342	547	205	411	0,557	0,974	9	3,45	8,72	0,42	27,68	0,449	332
	4°	375	500	311	402	0,572	1,01	10	3,44	8,72	0,50	27,28	0,457	367

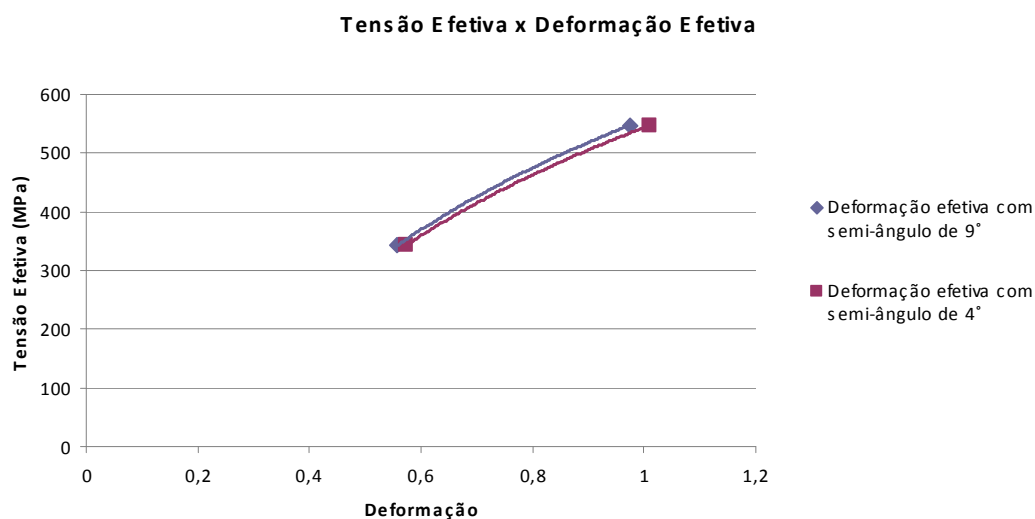


Figura 4.8 – Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo em passe único.

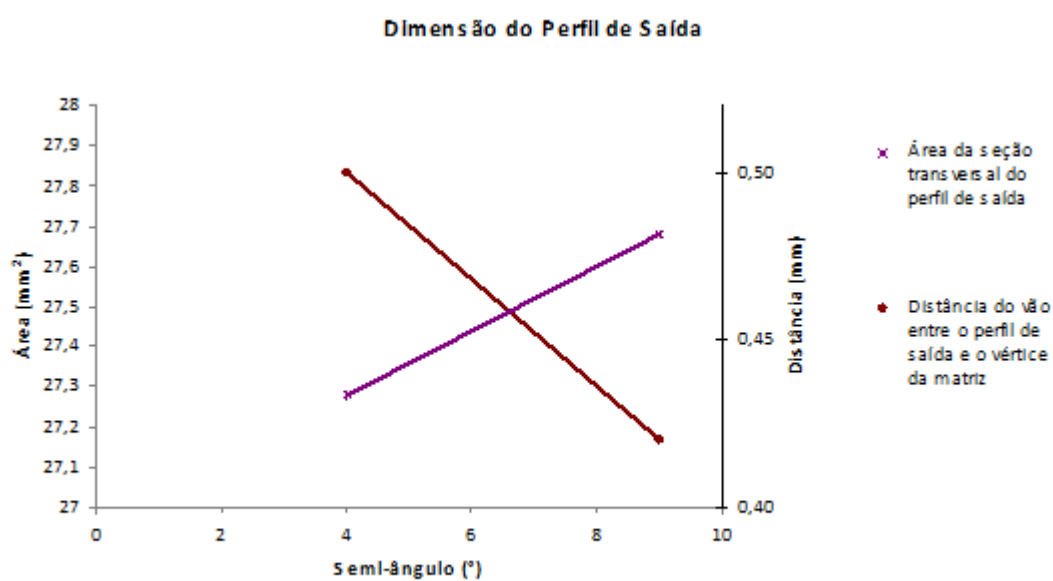


Figura 4.9 – Relação entre o dimensional obtido pelo processo em passe único e o semi-ângulo de contato da trefila.

Observa-se a partir do gráfico de tensão efetiva durante a conformação que a variação da tensão entre a mínima e a máxima, tanto no ponto crítico quanto no perfil de saída, é menor ao se utilizar o semi-ângulo de 4° em relação ao de 9°. Assim, as tensões máximas para 9° são sempre maiores e as mínimas sempre menores do que para 4°. Esse fato implica em uma deformação maior sobre o

material quando utilizado semi-ângulo de 9° , alargando mais o perfil, o que fornece uma tensão mínima menor nas regiões laterais e uma tensão máxima maior nas regiões centrais. Outra informação importante é o fato de que a tensão média de trefilação encontra-se abaixo da mínima no ponto crítico, confirmando que a não ocorrência de falhas no processo procede.

O gráfico de tensão x deformação obtido através das tensões e deformações máximas e mínimas no ponto mais crítico da deformação nos asseguram da equivalência das simulações e da comparação entre elas. As curvas são muito próximas. A diferença é muito pequena e se dá apenas em função de algumas variações de pontos coletados para tensões e deformações.

Por fim, o gráfico de relação dimensional do perfil na saída da trefilação comprova tudo o que foi analisado e discutido. A área da seção transversal para semi-ângulo de 9° é maior do que para 4° . Medindo a distância do vão entre o perfil e o vértice da fieira, para semi-ângulo de 9° ela é menor, já que a área do seu perfil é maior.

4.2 Análise da simulação numérica da conformação mecânica com espessura final definida

Com o objetivo de entender o comportamento da peça de trabalho sujeita a um processo de conformação mecânica com uma espessura de saída definida em 3,5 mm, sem restrição lateral, foram simulados alguns sistemas variando-se o diâmetro de entrada do vergalhão e o ângulo de contato da matriz. Foram associados para cada diâmetro pré-suposto, 6, 7 e 8 mm, semi-ângulos de contato diferentes, 4° , 6° e 8° . Este item se propõe a relatar os resultados das simulações numéricas e fazer uma análise levando-se em consideração a relação entre os resultados.

4.2.1 Vergalhão com 6 mm de diâmetro e matriz com 4° de semi-ângulo

A Figura B.1 mostra as deformações causadas ao vergalhão com 6 mm de diâmetro sujeito a uma conformação em uma matriz de espessura 3,5 mm, sem restrição lateral e com 4° de semi-ângulo. As deformações são mais severas no centro do

material atingindo a valores de 0,603. Em contraponto, as bordas laterais sofrem uma deformação menor, obtendo uma valor mínimo de 0,262 em alguns pontos ao longo do comprimento.

As tensões efetivas impostas ao material quando está sendo processado auxiliam no entendimento dos resultados dimensionais e de deformação do perfil de saída. A Figura B.2 mostra o comportamento da tensão efetiva sobre o material ao longo do seu comprimento no momento em que ocorre a deformação. Após a deformação da peça não restam tensões efetivas significativas e que poderiam influenciar negativamente no dimensionamento do perfil desejado. Contudo, o vergalhão mantém-se tensionado na região central após a trefilação com um valor de 197 MPa e de 142 MPa nas extremidades.

Tomando a visão transversal no ponto mais crítico de tensão efetiva aplicada, conforme Figura B.3, verifica-se que a maior tensão efetiva é 384 MPa. A menor tensão efetiva ocorre nas extremidades, sendo de 284 MPa.

A carga de trefilação exercida sobre a matriz na direção da trefilação pelo quarto do vergalhão de cobre é mostrada na Figura B.4. O valor da carga é de aproximadamente 885 N.

O processo com a presente configuração fornece um perfil de acordo com a Figura 4.10. A espessura é de 3,49 mm, estando completamente dentro do valor esperado. A largura obteve um valor de 6,70 mm. O perfil obtido possui uma área da seção transversal de 21,02 mm².

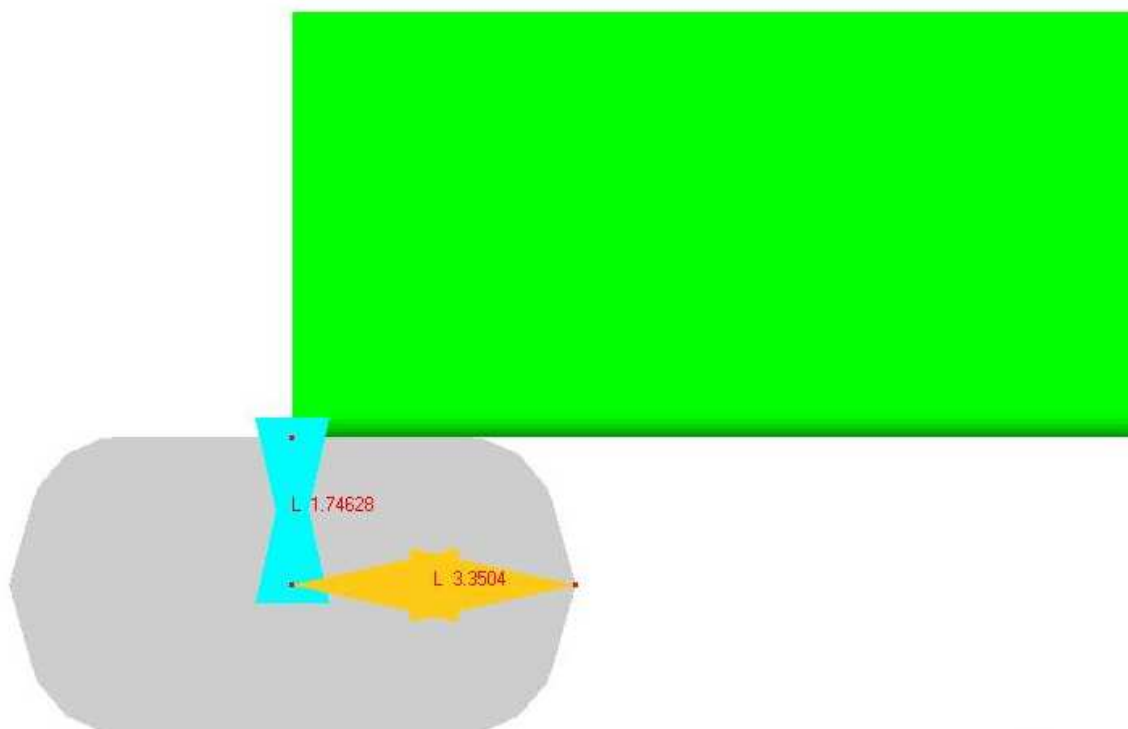


Figura 4.10 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 6 mm de diâmetro em uma matriz com 4° de semi-ângulo de contato.

4.2.2 Vergalhão com 6 mm de diâmetro e matriz com 6° de semi-ângulo

A segunda simulação numérica foi realizada com um vergalhão de 6mm de diâmetro e uma matriz com um semi-ângulo de 6°, abertura vertical de 3,5 mm e sem restrição lateral. Com essa configuração, acompanhando a Figura B.5, o cobre sofre uma maior deformação efetiva no centro da peça, sendo de 0,595. O menor valor ocorre nas bordas laterais, sendo 0,279 em alguns pontos ao longo do comprimento.

A Figura B.6 mostra as tensões efetivas ao longo do vergalhão de 6 mm de diâmetro sujeito à matriz com 6° de semi-ângulo. Ocorre uma tensão efetiva na saída, após a matriz, de 164 MPa no centro do perfil. O menor valor se encontra nas extremidades laterais sendo de 120 MPa.

A Figura B.7 mostra essa região de maior tensão efetiva através da seção transversal. A maior tensão efetiva ocorre na região central, a qual é de 380 MPa. A menor é de 284 MPa.

A força causada pela tração do quarto do vergalhão sobre a matriz na direção da trefilação ao longo do tempo é mostrada graficamente na Figura B.8. A força é de aproximadamente 790 N.

O processo com o sistema de vergalhão com 6 mm de diâmetro e semi-ângulo da matriz de 6° , fornece as dimensões mostradas na Figura 4.11. A espessura manteve um valor muito bom sendo de 3,49 mm. A largura se estendeu ao valor de 6,72 mm. A área da seção transversal do perfil é de $21,44 \text{ mm}^2$.

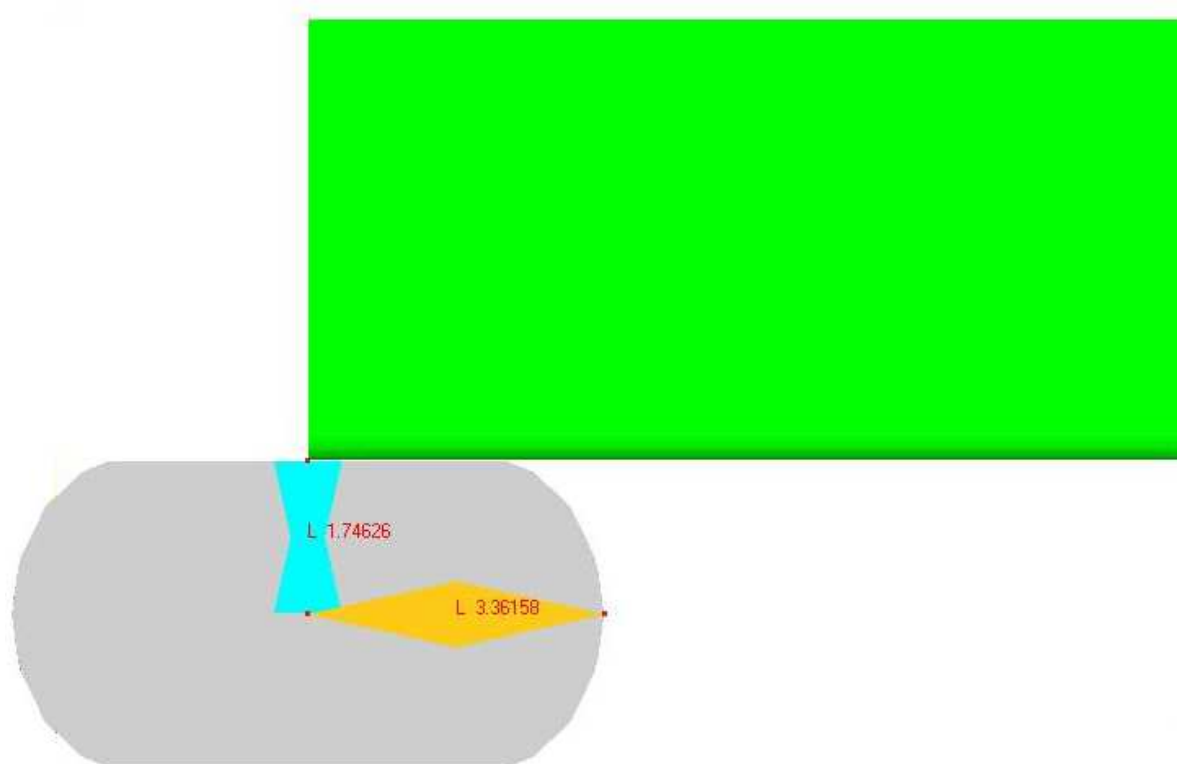


Figura 4.11 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 6 mm de diâmetro em uma matriz com 6° de semi-ângulo de contato.

4.2.3 Vergalhão com 6 mm de diâmetro e matriz com 8° de semi-ângulo

A terceira simulação foi realizada utilizando-se o vergalhão de 6 mm de diâmetro a ser conformado por uma matriz de 3,5 mm de espessura, sem restrições laterais e com um semi-ângulo de 8° . A deformação efetiva imposta ao material pode ser acompanhada através da Figura B.9. Os valores de deformação efetiva para este

caso são maiores na região central, com o valor máximo de 0,655, e menores nas bordas laterais, com o valor mínimo de 0,280.

A tensão efetiva ocorrida na região de deformação pode ser analisada a partir da figura B.10. O cobre se mantém tensionado na saída da matriz com uma tensão efetiva máxima de 182 MPa no centro do perfil e uma tensão efetiva mínima de 131 MPa nas extremidades laterais.

Analisando-se a seção transversal nesse ponto mais crítico da tensão efetiva, visualizada na Figura B11, verifica-se a magnitude das tensões efetivas responsáveis pela deformação do vergalhão. A maior tensão efetiva ocorre no centro do material, onde o valor é de 388 MPa. A tensão efetiva nas bordas é de 285 MPa.

A Figura B.12 mostra a carga sofrida pela matriz na direção da trefilação em função da tração realizada na quarta parte do vergalhão. O valor da carga é de aproximadamente 810 N.

O caso presente com o maior semi-ângulo entre os três propostos fornece um dimensional de saída com espessura de 3,48 mm e largura de 6,52 mm. Observa-se de acordo com a Figura 4.12. A área do perfil foi calculada e obtida a um valor de 21,95 mm².

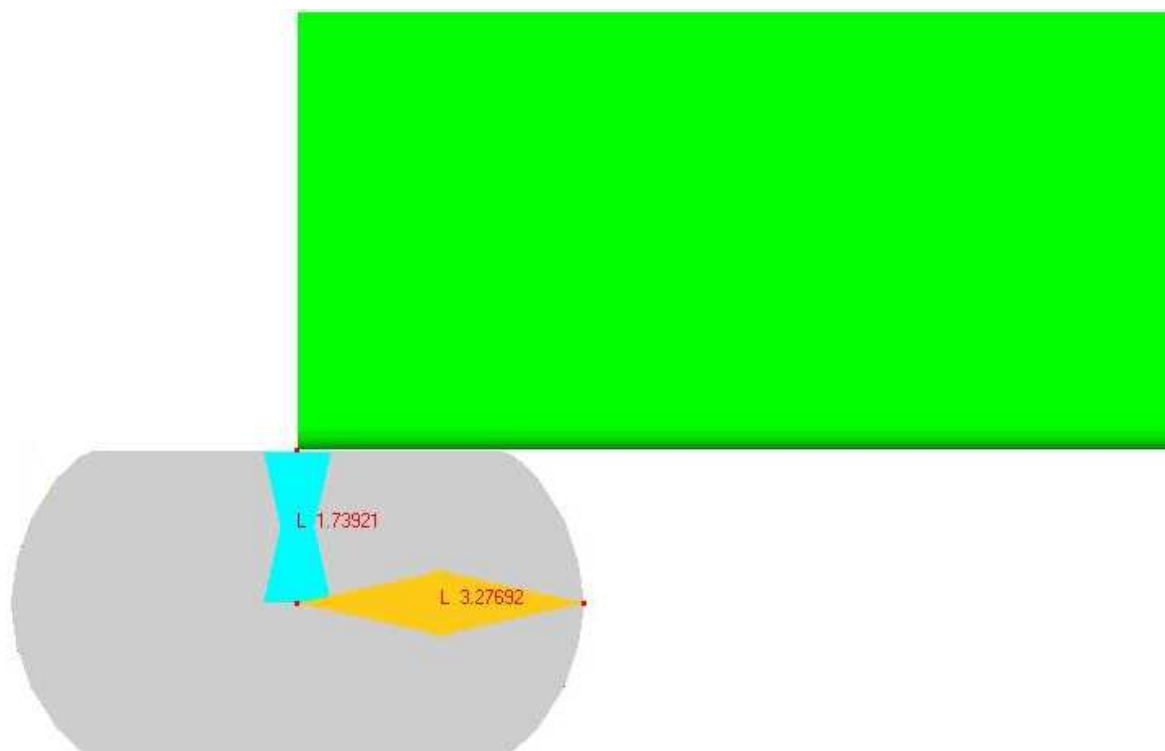


Figura 4.12 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 6 mm de diâmetro em uma matriz com 8° de semi-ângulo de contato.

4.2.4 Vergalhão com 7 mm de diâmetro e matriz com 4° de semi-ângulo

Após as simulações realizadas com vergalhão de 6 mm de diâmetro, foram simulados vergalhões de 7 mm de diâmetro. A primeira delas utilizou a matriz com 4° de semi-ângulo. A deformação efetiva variou entre 0,802 no centro do perfil e 0,381 nas laterais, de acordo com a Figura B.13.

A tensão efetiva ao longo do vergalhão pode ser visualizada na Figura B.14. Após a deformação o perfil mantém-se tracionado com uma tensão efetiva máxima de 289 MPa e uma mínima de 218 MPa. O aumento do diâmetro do vergalhão proporcionou uma resistência maior à passagem deste pela matriz. Isso fez com que ocorresse o aumento da tensão efetiva após a deformação causando uma tração mais acentuada no material de saída consequentemente uma variação dimensional ao longo do fio.

Fazendo-se um corte transversal no ponto mais severo de aplicação de tensão efetiva, assim como mostrado na Figura B.15, visualiza-se que a maior tensão efetiva ocorre no centro e é de 437 MPa, caindo para 332 MPa nas extremidades.

A carga de trefilação exercida pela conformação da quarta parte do vergalhão é demonstrada através do gráfico carga x tempo na Figura 4.32. O valor é de aproximadamente 1,6 kN.

Esta simulação forneceu um perfil de saída com variações no qual a espessura é de 3,47 mm e a largura é de 7,83 mm, conforme pode ser visto na medição feita via software na Figura 4.13. A área obtida pelo perfil é de 25,27 mm².

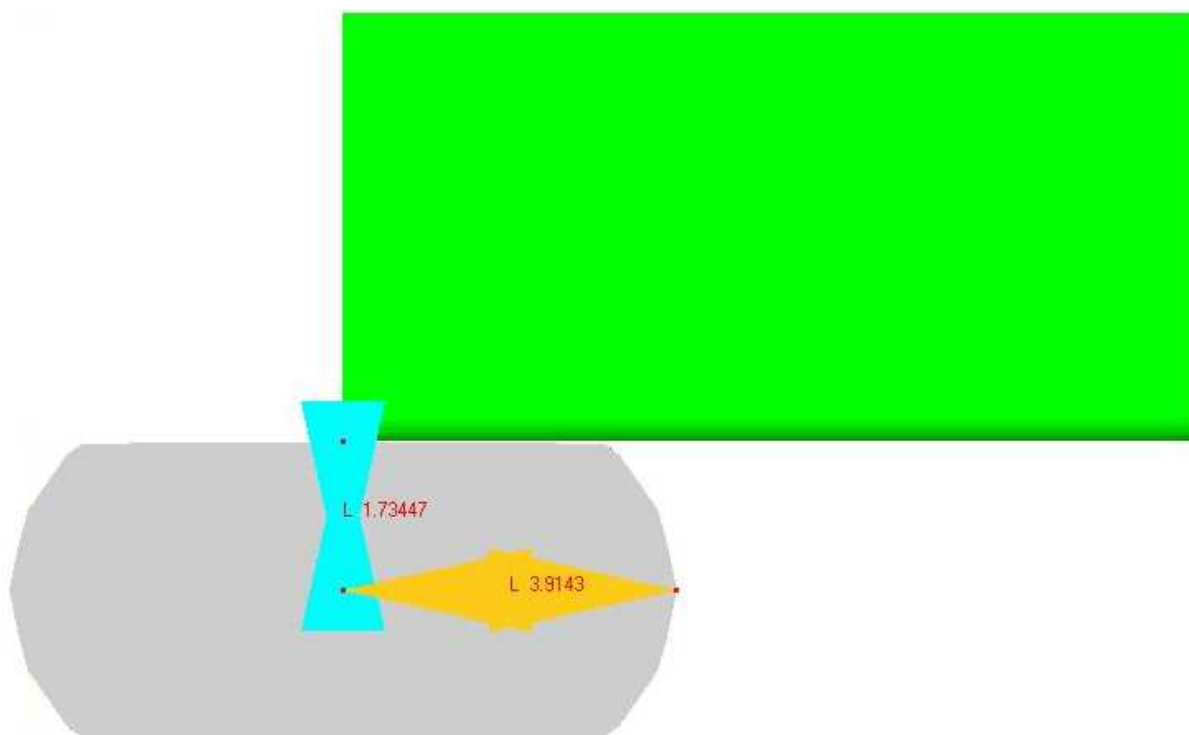


Figura 4.13 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 7 mm de diâmetro em uma matriz com 4° de semi-ângulo de contato.

4.2.5 Vergalhão com 7 mm de diâmetro e matriz com 6° de semi-ângulo

Continuando a trabalhar com o vergalhão de 7 mm de diâmetro, foi simulada a conformação também com uma matriz com 6° de semi-ângulo. A deformação efetiva configurada no perfil de saída é mais significativa na região central, com o valor de

0,822, e menor nas extremidades laterais sendo de 0,393. A Figura B.17 demonstra esta análise.

A Figura B.18 mostra a distribuição da tensão efetiva no material ao longo deste. Após a deformação, o perfil de saída se mantém tracionado com um máxima tensão efetiva de 253 MPa e uma mínima de 190 MPa.

Tomando a seção transversal naquele ponto mais crítico, observa-se que a maior tensão efetiva ocorre na região central da seção, sendo de 442 MPa, e a menor tensão efetiva ocorre nas extremidades laterais com o valor de 316 MPa, como é mostrado na Figura B.19.

A carga de trefilação imposta pela conformação do quarto do vergalhão é mostrada através do gráfico carga x tempo na Figura B.20. O valor é de aproximadamente 1,6 kN.

O dimensional do perfil de saída para esta simulação, com vergalhão de 7 mm de diâmetro e matriz com 6° de semi-ângulo, é formado com uma espessura de 3,46 mm e uma largura de 7,85 mm, avaliada com o auxílio do software de simulação numérica. A avaliação é demonstrada na Figura 4.14. A área foi calculada no valor de 25,56 mm².

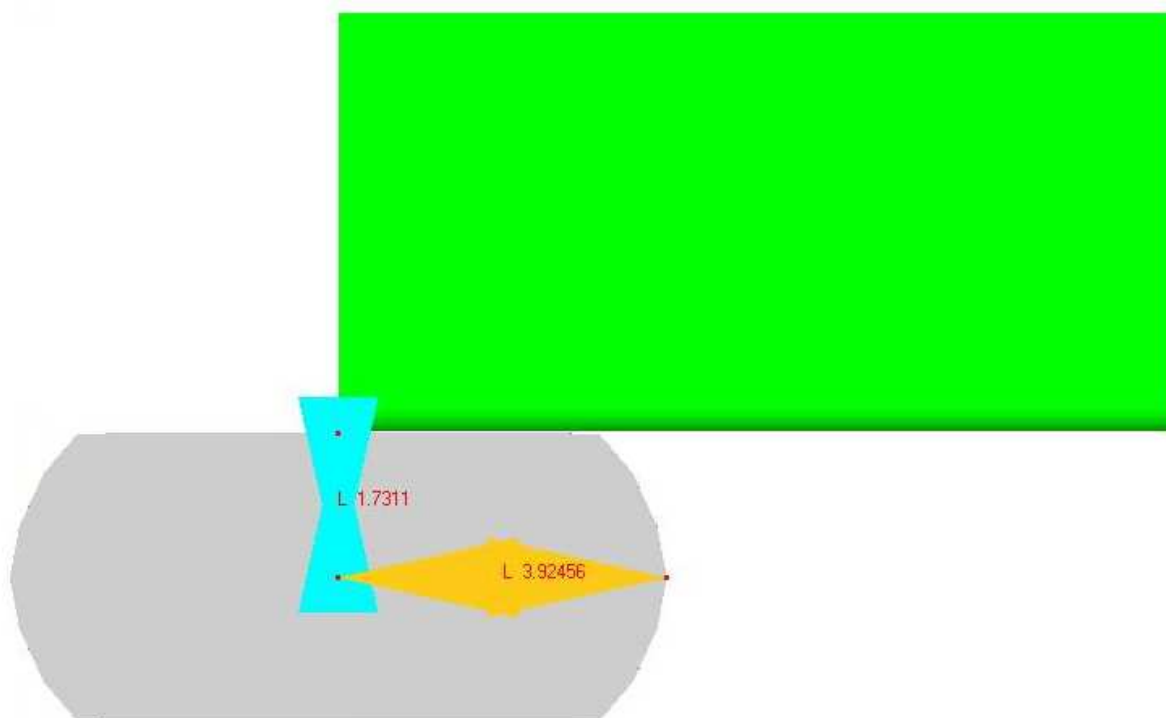


Figura 4.14 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 7 mm de diâmetro em uma matriz com 6° de semi-ângulo de contato.

4.2.6 Vergalhão com 7 mm de diâmetro e matriz com 8° de semi-ângulo

A última simulação com o vergalhão de 7 mm de diâmetro foi realizada com a matriz com 8° de semi-ângulo. As deformações efetivas ocorridas durante o processo simulado numericamente variam de 0,455 nas extremidades laterais até 0,797 no centro da seção. A variação da deformação efetiva no perfil de saída é demonstrada na Figura B.21.

A Figura B.22 mostra a variação da tensão efetiva ao longo do perfil no momento da deformação. Após a deformação o perfil mantém-se tracionado com uma tensão efetiva de 243 MPa no centro e 182 MPa nas extremidades.

Tomando a seção transversal no ponto mais crítico em relação à tensão efetiva e, vemos na Figura B.23 a variação da tensão efetiva no material, variando entre 303 e 424 MPa.

A carga de trefilação baseia-se no valor obtido da carga sobre a matriz em função da conformação do quarto do vergalhão. O gráfico carga x tempo pode ser visualizado na Figura B.24 e o valor constante é de aproximadamente 1,4 kN.

Por último analisou-se o dimensional do perfil obtido, conforme Figura 4.15, com uma espessura de 3,47 mm e uma largura de 7,86 mm. A área do perfil de saída possui o valor de 25,48 mm².

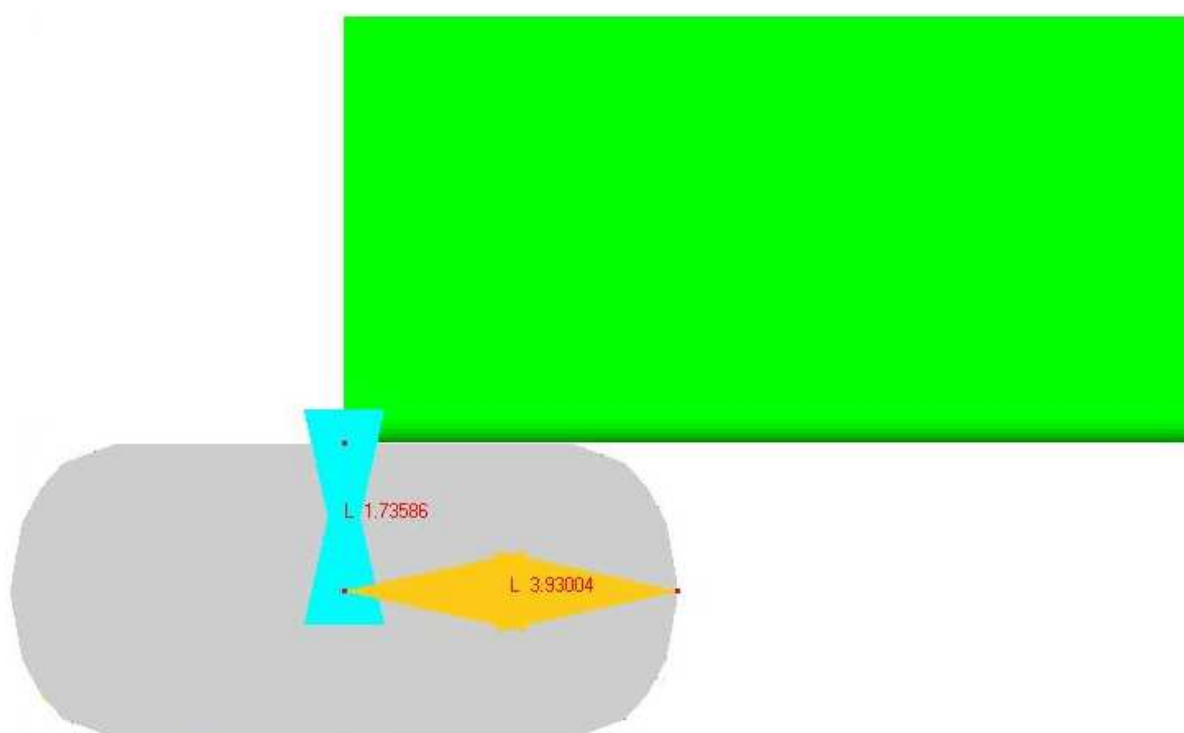


Figura 4.15 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 7 mm de diâmetro em uma matriz com 8° de semi-ângulo de contato.

4.2.7 Vergalhão com 8 mm de diâmetro e matriz com 4° de semi-ângulo

Agora são analisadas as simulações numéricas realizadas com o vergalhão de maior bitola, o de 8 mm de diâmetro. E a primeira delas é com a matriz de semi-ângulo igual a 4°. Com a conformação, analisa-se as deformações efetivas ocorridas no material conforme mostrado na Figura B.25. A deformação efetiva compreende desde o centro do material com 0,971 até as extremidades do material com 0,570.

A tensão efetiva ao longo do vergalhão no momento da deformação pode ser visualizada na Figura B.26. Após a deformação o perfil mantém-se tracionado com a tensão efetiva máxima de 394 MPa no centro e mínima de 312 MPa nas extremidades.

O ponto de maior tensão efetiva durante a deformação é explicitado na Figura B.27. A maior tensão efetiva ocorre no centro com o valor de 487 MPa. A menor ocorre nas extremidades com o valor de 374 MPa.

A carga de trefilação para um quarto do vergalhão é obtida a partir da carga sofrida pela matriz na direção da trefilação, conforme pode ser visto na Figura B.28. A valor aproximado é de 2,5 kN.

O dimensional do perfil de saída é mostrado na Figura 4.48. A espessura é de 3,44 mm e a largura é de 8,70 mm. A área obtida é de 30,54 mm².

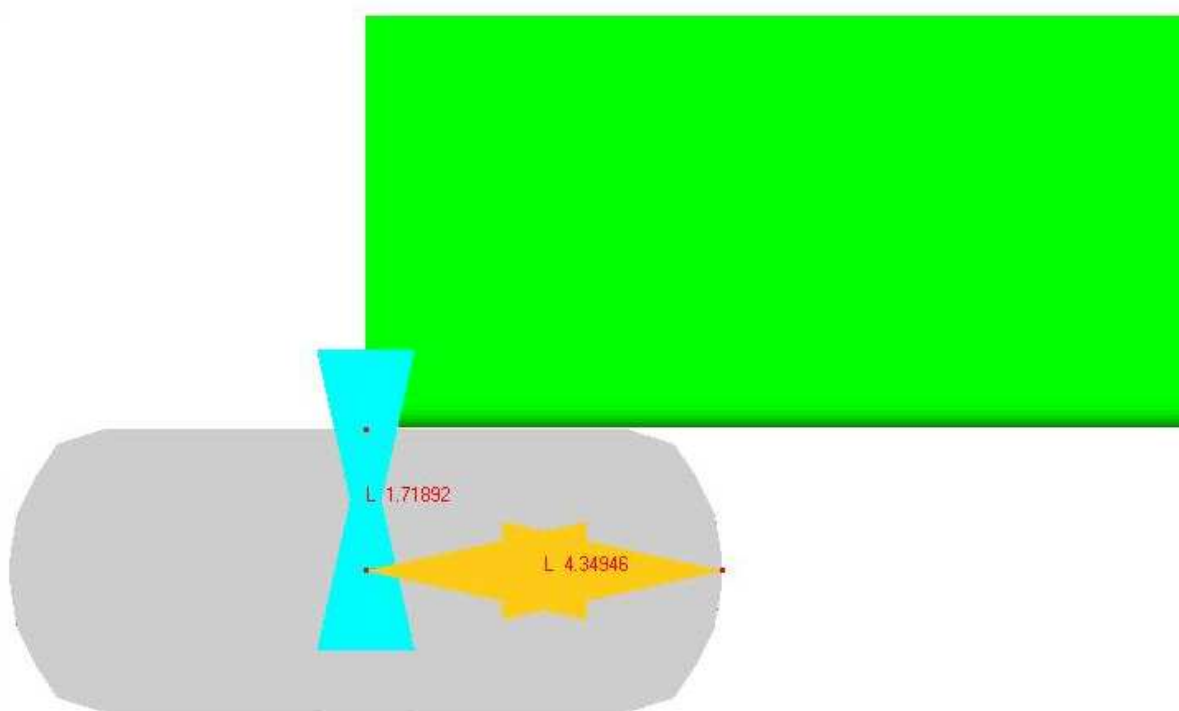


Figura 4.16 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 8 mm de diâmetro em uma matriz com 4° de semi-ângulo de contato.

4.2.8 Vergalhão com 8 mm de diâmetro e matriz com 6° de semi-ângulo

A segunda simulação numérica realizada com o vergalhão de 8 mm de diâmetro utilizou a matriz com 6° de semi-ângulo. A deformação efetiva sofrida pelo material é demonstrada na Figura B.29. 1,010 é a deformação efetiva no centro do perfil de saída e 0,548 é a deformação efetiva nas extremidades laterais.

As tensões efetivas impostas ao material no momento da deformação são mostradas na Figura B.30. O material mantém-se tracionado na saída com um valor máximo de 359 MPa e mínimo de 266 MPa.

Um corte transversal no ponto do perfil na Figura B.30 mostra a máxima tensão efetiva, conforme Figura B.31. O valor varia de 488 MPa no centro do material até 371 MPa nas extremidades laterais.

A carga de trefilação em função do processo de um quarto do vergalhão é obtido a partir do esforço sofrido pela matriz na direção da trefilação, conforme Figura B.32. O valor aproximado da carga é de 2,3 kN.

A dimensão da espessura do perfil de saída para essa configuração é de 3,47 mm. A largura é de 9,06 mm. A Figura 4.17 mostra a medição do perfil através do software Deform 3D, o qual obteve uma área da sua seção transversal de 28,93 mm².

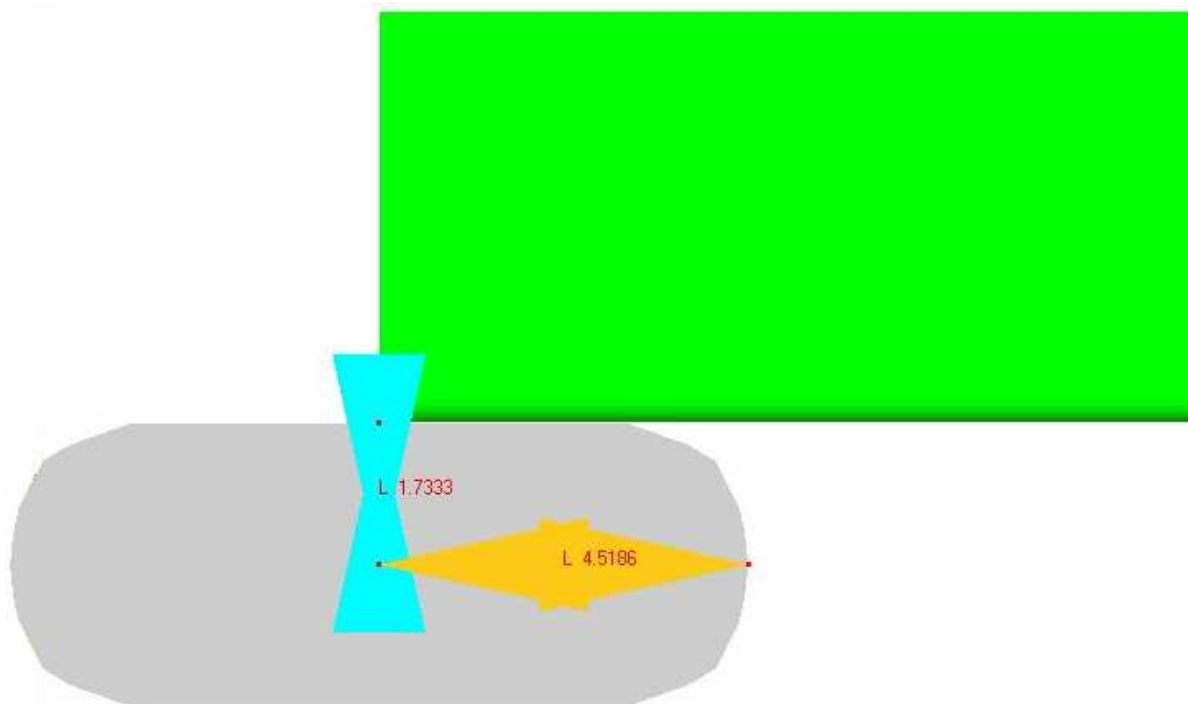


Figura 4.17 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 8 mm de diâmetro em uma matriz com 6° de semi-ângulo de contato.

4.2.9 Vergalhão com 8 mm de diâmetro e matriz com 8° de semi-ângulo

A última simulação numérica com espessura definida e sem restrição lateral foi com o vergalhão de 8 mm de diâmetro e matriz com 8° de semi-ângulo. A deformação efetiva imposta ao perfil de saída é explicitada na Figura B.33. A região central do perfil sofreu uma deformação efetiva de 0,963 e as extremidades laterais sofreram uma deformação efetiva menor de 0,539.

A Figura B.34 mostra as isolinhas de tensão efetiva no momento da deformação do cobre eletrolítico. Na saída do perfil ocorrem tensões efetivas que variam de 338 MPa no centro até 256 MPa nas extremidades.

Fazendo um corte transversal na Figura B.34, observa-se de acordo com a Figura B.35 que a máxima tensão efetiva tem valor de 504 MPa, variando até as extremidades laterais com o valor de 377 MPa.

A carga sofrida pela matriz em função da conformação da quarta parte do vergalhão está representada na Figura B.36. O valor da carga de trefilação é de aproximadamente 2,2 kN.

A dimensão da espessura para este caso é de 3,44 mm e a da largura é de 8,99 mm, conforme pode ser observado pela medição feita via software demonstrada na Figura 4.18. A área do perfil é de 29,11 mm².

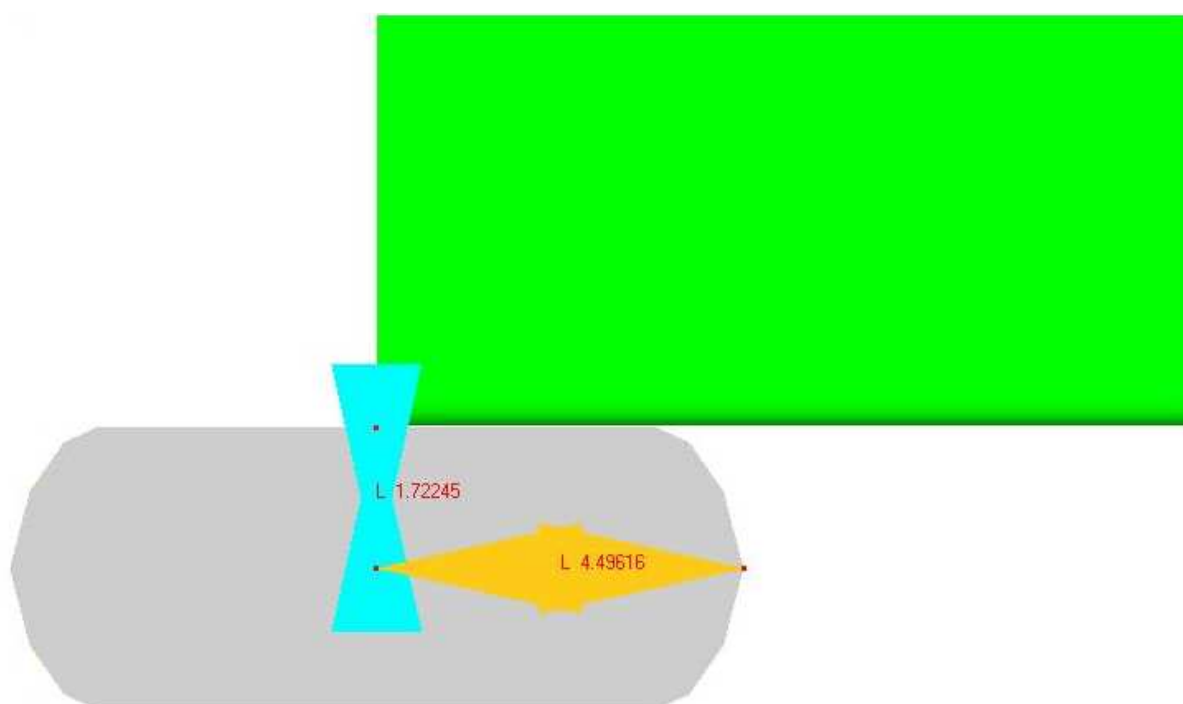


Figura 4.18 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com 8 mm de diâmetro em uma matriz com 8° de semi-ângulo de contato.

4.2.10 Relacionando os resultados

Após a realização das simulações dos processos de conformação mecânica do vergalhão de cobre eletrolítico com diâmetro variando nos valores de 6, 7 e 8 mm, utilizando uma matriz de abertura 3,5 mm na espessura sem restrição lateral, variando o semi-ângulo de trabalho nos valores de 4, 6 e 8°, a partir dos perfis e suas características obtidas, dispõe-se os resultados na Tabela IV.2.

As Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 mostram gráficos relacionando as tensões efetivas sofridas pelo vergalhão de cobre com o semi-ângulo de contato utilizado. As Figuras

4.22, 4.23 e 4.24 mostram graficamente as deformações efetivas impostas aos vergalhões. E as Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 mostram gráficos relacionando a área e a largura do perfil obtido com o semi-ângulo utilizado.

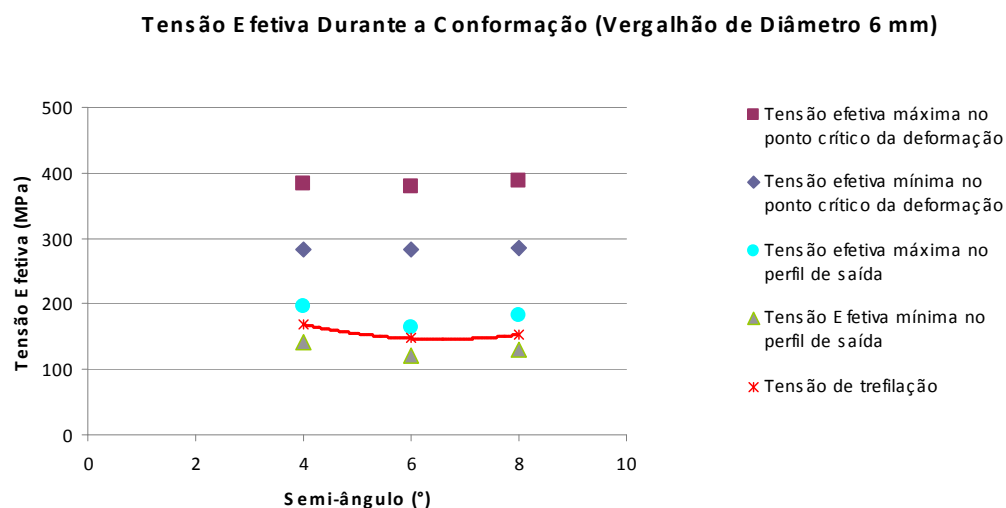


Figura 4.19 – Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 6 mm durante a trefilação para o processo com espessura final definida.

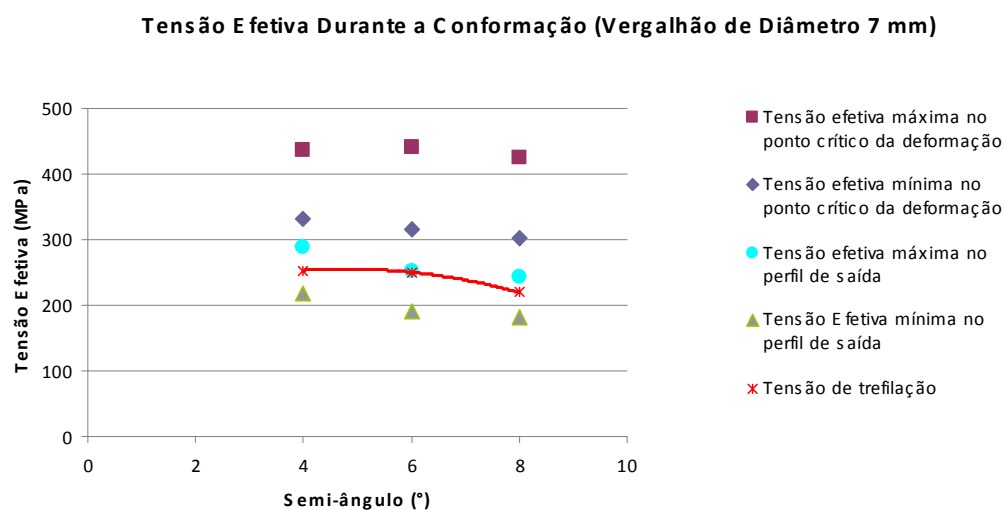


Figura 4.20 – Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 7 mm durante a trefilação para o processo com espessura final definida.

Tabela IV.2 – Características do material das simulações numéricas para a conformação mecânica a frio com espessura definida

Diâmetro do vergalhão	Semi-ângulo de contato	Máxima Tensão Efetiva na deformação (Mpa)		Tensão Efetiva na saída (Mpa)		Deformação Efetiva		Carga de Trefilação (kN)	Dimensões do perfil de saída (mm)		Área do perfil de saída (mm ²)	Redução	Tensão de Trefilação (MPa)
		Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		Espessura	Largura			
6 mm	4°	284	384	142	197	0,262	0,603	3,5	3,49	6,70	21,02	0,257	168
	6°	284	380	120	164	0,279	0,595	3,2	3,49	6,72	21,44	0,242	147
	8°	285	388	131	182	0,280	0,655	3,2	3,48	6,55	21,19	0,251	153
7 mm	4°	332	437	218	289	0,381	0,802	6,4	3,47	7,83	25,27	0,343	253
	6°	316	442	190	253	0,393	0,822	6,4	3,46	7,85	25,56	0,336	250
	8°	303	424	182	243	0,455	0,797	5,6	3,47	7,86	25,48	0,338	220
8 mm	4°	374	487	312	394	0,570	0,971	10,0	3,44	8,70	30,54	0,392	327
	6°	371	488	266	359	0,548	1,010	9,2	3,47	9,06	28,93	0,424	318
	8°	377	504	256	338	0,539	0,963	8,8	3,44	8,99	29,11	0,421	302

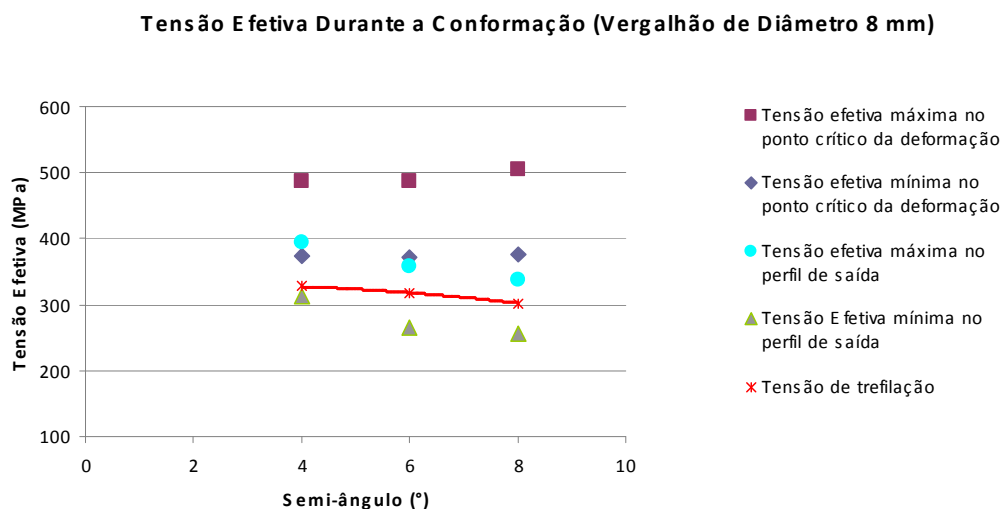


Figura 4.21 – Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 8 mm durante a trefilação para o processo com espessura final definida.

Para o vergalhão de diâmetro 6 mm, observa-se que as tensões máximas e mínimas atuantes, tanto no ponto crítico da deformação quanto no perfil de saída, têm uma variação pequena em relação ao valor do semi-ângulo de trabalho. Contudo, a tendência da tensão efetiva é diminuir com o semi-ângulo de 6° e voltar a aumentar com o semi-ângulo de 8°. As tensões de saída são bastante inferiores em relação às tensões atuantes no ponto mais crítico da conformação. Assim a tensão de trefilação é bastante inferior à solicitação imposta ao material durante a sua deformação.

Ao se utilizar o vergalhão de diâmetro 7 mm, a tendência da tensão efetiva aplicada passa a decrescer conforme ocorre o aumento do semi-ângulo de trabalho. As tensões efetivas no ponto crítico aumentam e as tensões efetivas de saída se aproximam mais dos valores de tensão aplicada na região da deformação, mas ainda são inferiores às tensões no ponto crítico. A tensão efetiva máxima na saída mantém-se abaixo da tensão efetiva mínima no ponto mais crítico da deformação. Assim, a tensão de trefilação se mantém bastante inferior à tensão aplicada no momento da conformação.

A conformação a partir do vergalhão de diâmetro 8 mm mostra uma aproximação maior da tensão de trefilação em relação às tensões aplicadas no ponto mais crítico da deformação. Como neste caso o perfil obtido possui uma largura maior, a qual é ainda maior conforme o aumento do semi-ângulo de trabalho, as tensões aplicadas na saída tendem a decrescer com o aumento do semi-ângulo, observando-se que as áreas laterais deformadas e se restrição oferecem uma menor resistência à ocorrência da trefilação. Contudo, o aumento do diâmetro fez com que as tensões aplicadas fossem maiores em relação aos diâmetros anteriores. As tensões na saída aumentaram consideravelmente, mas ainda sim a tensão de trefilação se manteve abaixo das tensões sofridas na região mais solicitada durante a conformação.

Enfim, observa-se, comparando os três gráficos de tensão efetiva em relação ao semi-ângulo de trabalho, que as tensões efetivas, tanto no ponto crítico quanto no perfil de saída, seja para qualquer semi-ângulo, aumentam à medida em que se aumenta o diâmetro de entrada do vergalhão de cobre eletrolítico. Logo, quanto maior é o diâmetro da matéria prima, maior é a tensão de trefilação necessária para o processo. Também ocorre uma maior aproximação da tensão de trefilação à região de variação de tensão no ponto mais crítico da deformação, o que poderá, para diâmetros ainda maiores, levar o material à ruptura.

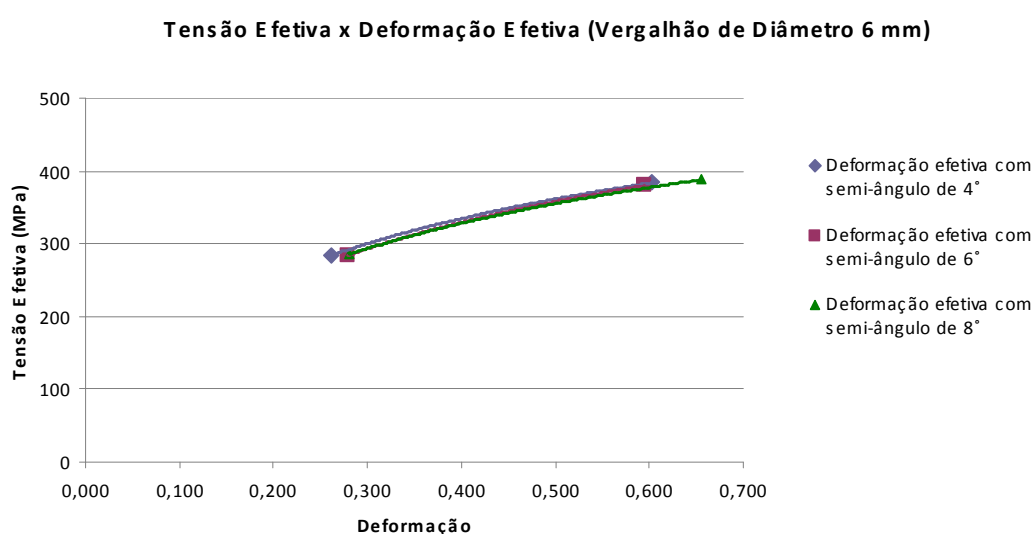


Figura 4.22 – Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura definida com vergalhão de diâmetro 6 mm.

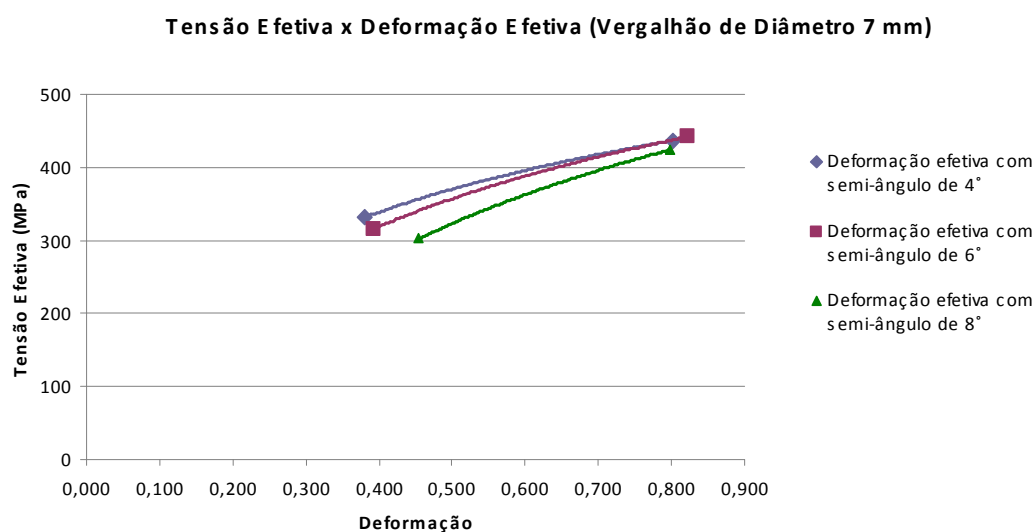


Figura 4.23 – Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura definida com vergalhão de diâmetro 7 mm.

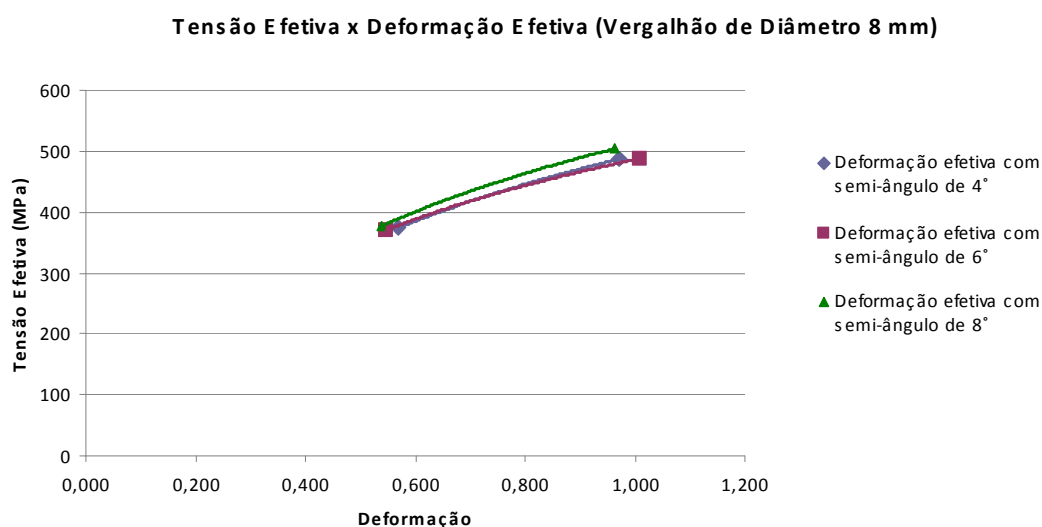


Figura 4.24 – Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura definida com vergalhão de diâmetro 8 mm.

O gráfico tensão x deformação correlaciona os valores de tensão efetiva máxima e mínima no ponto mais solicitado durante a deformação com os valores de deformação efetiva impostas ao material a partir dos resultados obtidos na simulação com o vergalhão de diâmetro 6 mm. As três curvas são dispostas muito próximas e algumas vezes quase sobrepostas, o que valida a utilização da curva real de tensão x deformação do cobre eletrolítico. O gráfico mostra que as deformações para os três semi-ângulos são muito

próximas, sendo que o semi-ângulo de trabalho de 8° apresenta uma deformação ligeiramente maior.

Para o vergalhão de 7 mm as curvas se apresentam mais espaçadas em relação às curvas para o vergalhão de diâmetro 6 mm. Isso acontece pela variação das regiões tomadas a partir dos resultados. Significa que houve variações dos pontos coletados no perfil de saída e, com isso, houve variação do valor coletado, tanto para o valor de deformação quanto para o valor de tensão. As deformações para os três semi-ângulos são bastantes próximas.

Utilizando-se o vergalhão de diâmetro 8 mm, observa-se uma maior união entre as curvas, mostrando que os valores foram bem definidos. A utilização do semi-ângulo de 6° apresenta uma deformação ligeiramente maior.

Analisando-se os três gráficos é possível verificar que a deformação aumenta à medida em que se utiliza um vergalhão de diâmetro maior. Isso se dá uma vez que fica mantido o valor da espessura final a ser obtida, forçando o material a se deformar para um dimensional constante, não importando as dimensões iniciais.

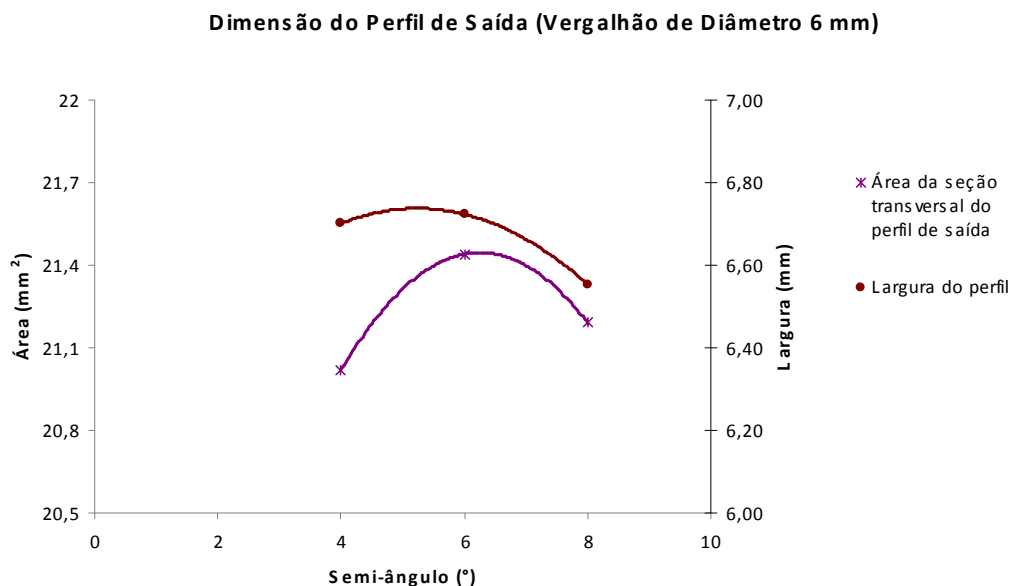


Figura 4.25 – Relação entre o dimensional obtido pelo processo de espessura definida a partir do vergalhão de diâmetro 6 mm e o semi-ângulo de contato da trefila.

Dimensional do Perfil de Saída (Vergalhão de Diâmetro 7 mm)

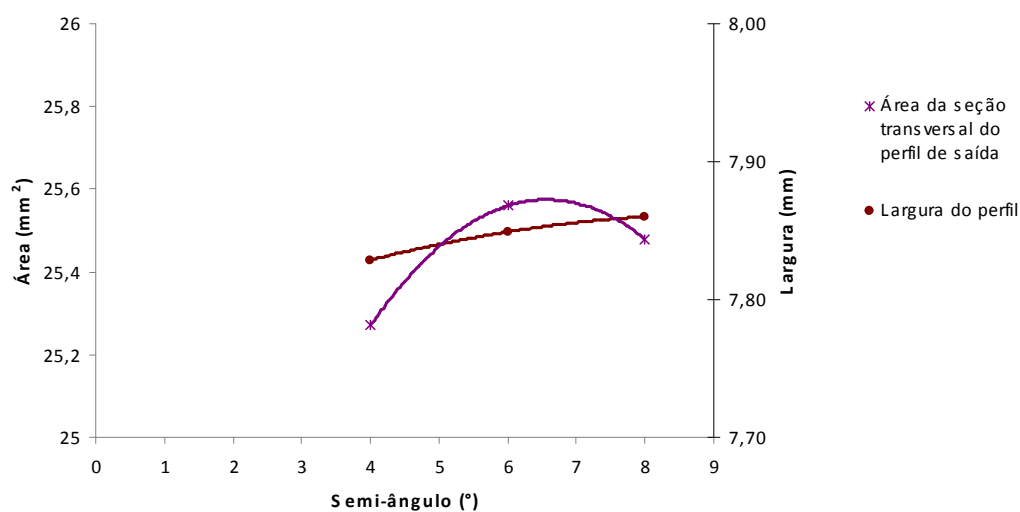


Figura 4.26 – Relação entre o dimensional obtido pelo processo de espessura definida a partir do vergalhão de diâmetro 7 mm e o semi-ângulo de contato da trefila.

Dimensional do Perfil de Saída (Vergalhão de Diâmetro 8 mm)

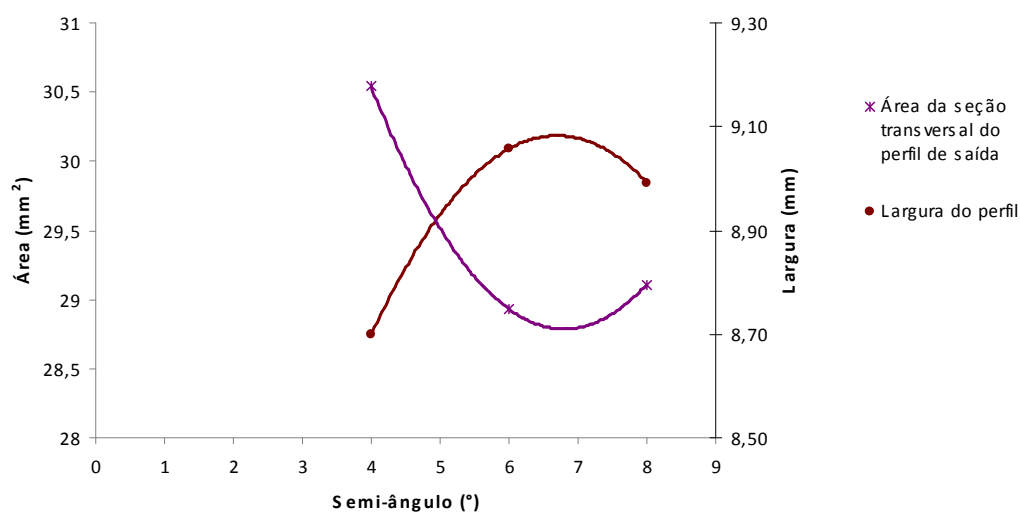


Figura 4.27 – Relação entre o dimensional obtido pelo processo de espessura definida a partir do vergalhão de diâmetro 8 mm e o semi-ângulo de contato da trefila.

A partir do vergalhão de diâmetro 6 mm, observa-se que a área da seção transversal do perfil de saída aumenta conforme o aumento do semi-ângulo de contato com a matriz, mas decai novamente para o ângulo de 8°. Já a largura do

perfil varia muito pouco. Porém possui uma tendência de positiva com o aumento do semi-ângulo.

Com o vergalhão de diâmetro 7 mm a área é menor para o semi-ângulo de 4°, variando pouco para os demais semi-ângulos. A tendência da largura é crescente acompanhando o aumento do semi-ângulo empregado no processo de conformação mecânica.

Para o vergalhão de diâmetro 8 mm, conforme o gráfico, a curva de tendência da variação da área do perfil obtido praticamente espelha a curva de tendência da variação da largura do perfil. Analisando, podemos dizer que os semi-ângulos de 6 e 8° tem maior capacidade de preencher os vãos verificados na simulação de passe único. Eles possuem áreas maiores apresentando larguras menores.

4.3 Análise da simulação numérica de processo com dois passes

Nesta etapa foram realizadas simulações de três processos em dois passes. O primeiro passe variou a espessura de saída, utilizando os valores de 4,0, 4,5 e 5,0 mm. Não foram colocadas restrições laterais para esta etapa. Já o segundo passe foi feito por uma fieira com as dimensões finais desejadas, sendo a espessura de 3,5 mm e a largura de 8,8 mm. Durante todo o processo foram utilizados semi-ângulos de contato de 8°.

4.3.1 Primeiro passe com espessura de 4,0 mm

Estabelecendo-se um processo em dois passes no qual o primeiro é projetado para obter a espessura de 4,0 mm, realizou-se a simulação desta etapa. O vergalhão de diâmetro 8 mm foi trefilado através de uma matriz de espessura 4,0 mm sem restrições laterais com semi-ângulo de trabalho de 8°. Conforme a Figura C.1, a maior deformação efetiva sofrida pelo material ocorreu na região central com o valor de 0,810, diminuindo à medida em que a região se aproxima das bordas laterais até o valor mínimo de 0,405.

A Figura C.2 mostra o momento da ocorrência de deformação sobre o vergalhão de diâmetro 8 mm, dividindo o material em regiões de tensões efetivas sofridas. O perfil de saída possui uma tensão efetiva máxima de 253 MPa na região central e uma tensão efetiva mínima de 184 MPa nas bordas laterais. Fazendo um corte transversal na região de maior solicitação, conforme mostrado na Figura C.3, observa-se que o maior valor de tensão efetiva aplicada ao material é de 436 MPa e o menor valor para o mesmo ponto crítico é de 322 MPa.

A Figura C.4 mostra variação da carga de trefilação ao longo do tempo em função do processo do quarto do vergalhão. O valor aproximado para o primeiro passe é de 1,9 kN.

No primeiro passe obteve-se um perfil de acordo com o mostrado na Figura 4.28. A espessura do perfil é de 3,96 mm e a largura é de 8,74 mm. A figura equipara o perfil obtido à dimensão da quarta parte da matriz proposta. A área da seção transversal do perfil obtido é de 32,87 mm².

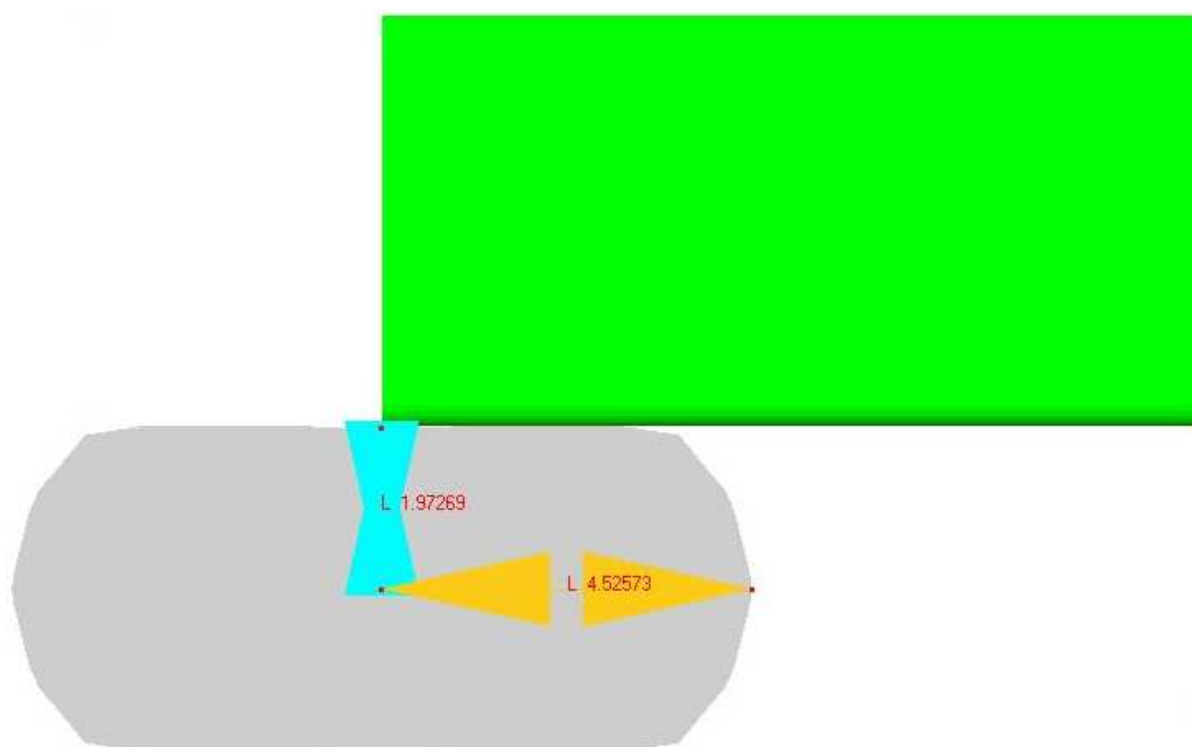


Figura 4.28 – Dimensional do perfil de saída para o primeiro passe com espessura de 4,0 mm.

4.3.2 Segundo passe para o processo com espessura intermediária de 4,0 mm

Buscando verificar a influência nas dimensões do produto final após uma passe com espessura intermediária de 4,0 mm, simulou-se o segundo e último passe para a espessura de 3,5 mm mantendo-se o semi-ângulo da trefila em 8°. A Figura C.5 mostra que a maior deformação efetiva ocorreu na região central com o valor de 0,994. Ao longo da seção transversal do perfil, a deformação efetiva diminuiu até o valor de 0,597 nas bordas laterais desse.

A Figura C.6 mostra o comportamento do material em relação às tensões efetivas aplicadas. O perfil de saída mantém-se tracionado com uma tensão máxima de 150 MPa e uma tensão mínima de 115 MPa. A região transversal mais crítica em relação à aplicação de tensão efetiva é apresentada conforme a Figura C.7. A tensão máxima aplicada é de 496 MPa e a menor tensão atinge o valor de 383 MPa.

A carga de trefilação no segundo passe em função do processo da quarta parte do perfil, conforme Figura C.4, é de aproximadamente 890 N.

A Figura 4.29 mostra a forma do perfil de saída obtido após o segundo passe. Ele é comparado com o quarto da fieira projetada com os valores das dimensões finais desejadas. A espessura do perfil é de 3,45 mm e a sua largura é de 8,80 mm. A sua área transversal é de 29,32 mm². A distância entre o perfil e o vértice da fieira é de 0,41 mm.

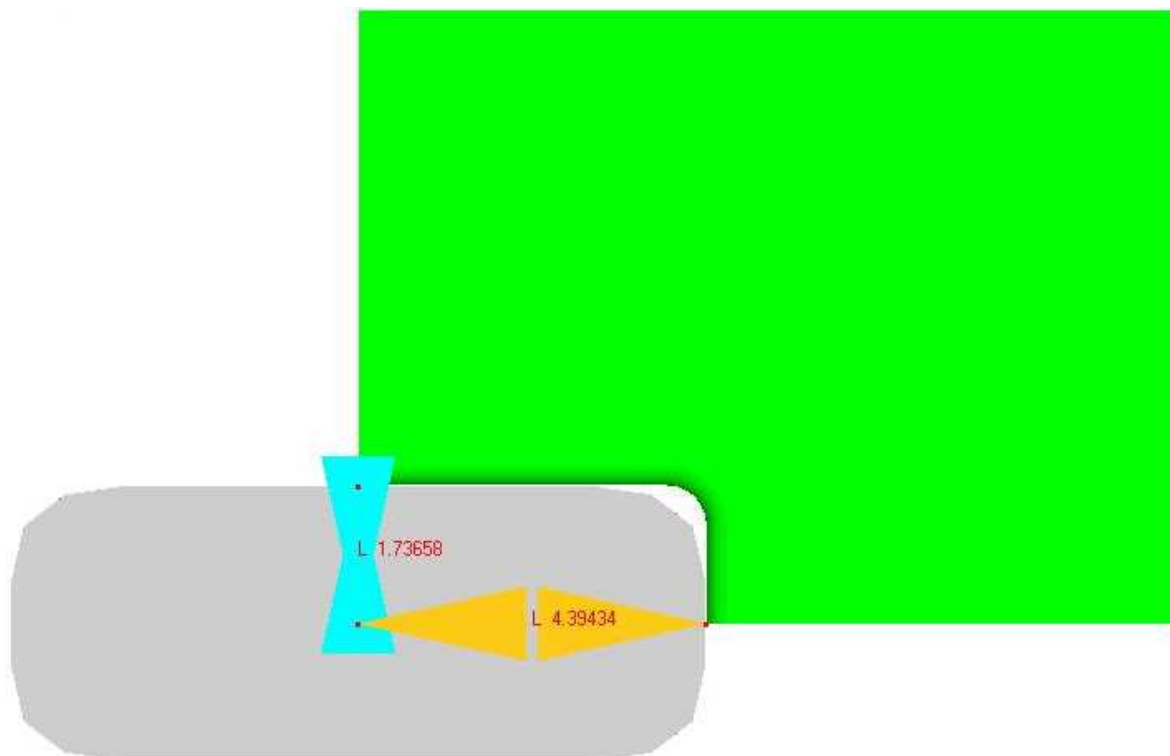


Figura 4.29 – Dimensional do perfil de saída do segundo passe para o processo de espessura intermediária de 4,0 mm.

4.3.3 Primeiro passe com espessura de 4,5 mm

No caso presente variou-se a espessura intermediária para um valor de 4,5 mm, mantendo-se um ângulo de contato de 8° e a não-restrição lateral. A Figura C.8 mostra o perfil de saída para este passe e a deformações efetivas ocorridas. A maior deformação efetiva ocorreu na região central do perfil com o valor de 0,684. A menor situou-se nas regiões laterais com o valor de 0,320.

As tensões efetivas sofridas pelo material estão dispostas na Figura C.9. A maior tensão efetiva atuante no perfil de saída ocorre na região central do perfil e é de 196 MPa. A menor tensão efetiva fica localizada nas bordas laterais com o valor de 137 MPa.

Na Figura C.9, tomando a região onde ocorre a maior tensão efetiva aplicada ao material e fazendo um corte transversal naquela região, vemos, pela Figura C.10, que a maior tensão aplicada é de 392 MPa no centro do material e de 297 MPa nas extremidades.

A força exercida sobre a matriz na direção de trefilação em função da quarta parte do vergalhão para o processo de espessura intermediária de 4,5 mm é mostrada na Figura C.11. A partir do gráfico, observa-se que a carga de trefilação para o primeiro passe é de aproximadamente 1,6 kN.

A Figura 4.30 mostra as dimensões do perfil de saída para este primeiro passe com espessura desejada de 4,5 mm. A espessura real obtida é de 4,48 mm e a largura é de 8,80 mm. A área da seção transversal do perfil é de 35,59 mm².

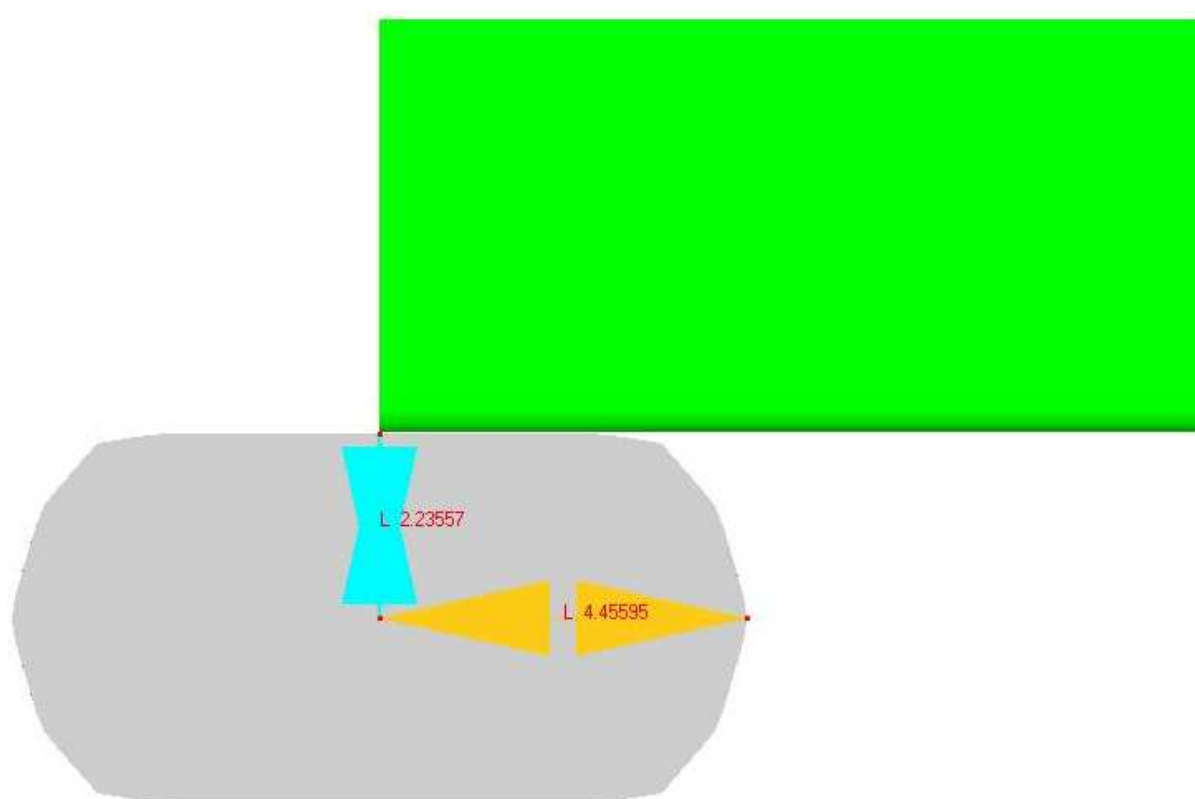


Figura 4.30 – Dimensional do perfil de saída para o primeiro passe com espessura de 4,5 mm.

4.3.4 Segundo passe para o processo com espessura intermediária de 4,5 mm

Após o primeiro passe do processo com espessura intermediária de 4,5 mm, realizou-se o segundo passe deste processo. Utilizou-se uma fieira com espessura de 3,5 mm e restrição lateral de 8,8 mm. As deformações impostas ao material são

mostradas na Figura C.12. A maior tensão efetiva é de 0,974, enquanto que a menor é de 0,590.

As tensões efetivas impostas ao material na região da deformação estão demonstradas na Figura C.13. No perfil de saída, a maior tensão aplicada é situada na região central sendo de 180 MPa. A menor, nas extremidades laterais, é de 133 MPa. Fazendo um corte transversal na região de maior solicitação, observa-se, conforme a Figura C.14, que a maior tensão efetiva sofrida pelo material possui o valor de 500 MPa. A menor, nas regiões laterais, possui o valor de 360 MPa.

A carga de trefilação para o segundo passe no processo de espessura intermediária 4,5 mm, conforme Figura C.11, é de 1,2 kN.

O processo em discussão gerou um perfil de saída com as dimensões conforme mostrado na Figura 4.31. A espessura obteve o valor de 3,44 mm e a largura o valor de 8,78 mm. A área da seção transversal do perfil obtido é de 28,36 mm². O perfil obteve um preenchimento da fieira tal que manteve uma distância do vértice dessa de 0,29 mm.

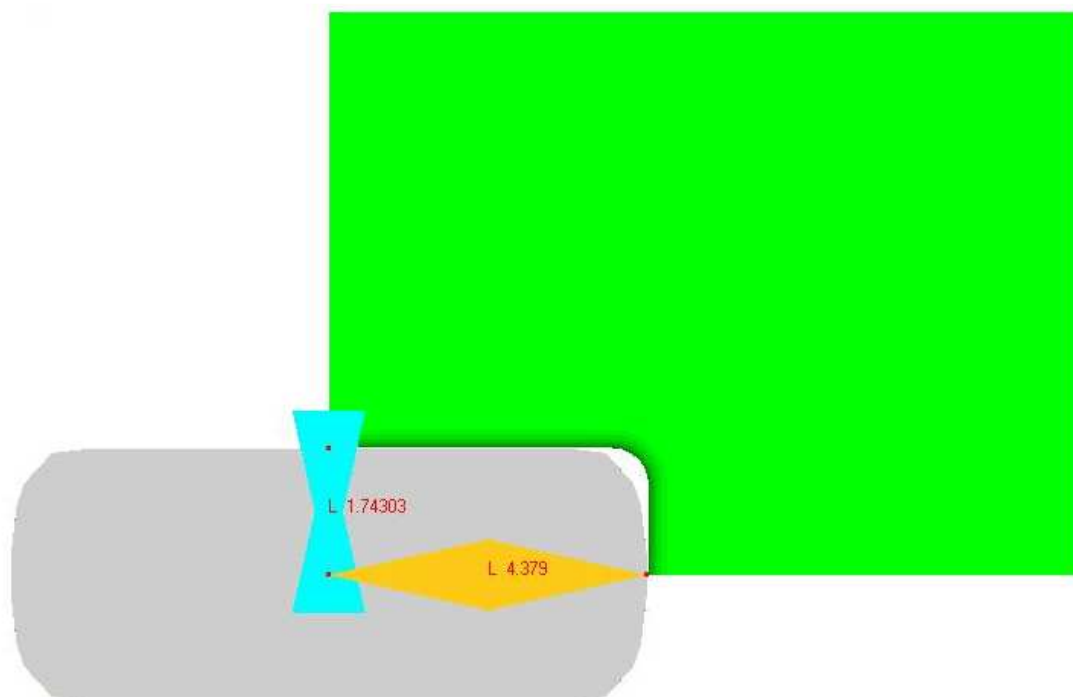


Figura 4.31 – Dimensional do perfil de saída do segundo passe para o processo de espessura intermediária de 4,5 mm.

4.3.5 Primeiro passe com espessura de 5,0 mm

A última espessura a ser testada é a de 5,0 mm. A partir do vergalhão de diâmetro 8 mm e de uma matriz sem restrição lateral e semi-ângulo de contato de 8° , realizou-se a simulação do primeiro passe do processo de trefilação sugerido com uma espessura intermediária de 5,0 mm. A Figura C.15 mostra as deformações impostas ao vergalhão. A maior tensão efetiva foi de 0,571 na região central do perfil de saída. A menor, nas áreas laterais, obteve o valor de 0,228.

A Figura C.16 mostra a distribuição da tensão efetiva no material durante a deformação. No perfil de saída o material mantém-se tracionado com uma tensão efetiva máxima de 139 MPa e uma tensão efetiva mínima nas laterais de 102 MPa. Fazendo um corte transversal na região de maior sollicitação do material, define-se, conforme Figura C.17, os valores de tensão efetiva máxima de 361 MPa e mínima de 277 MPa.

A Figura C.18 mostra a variação da carga de trefilação de um quarto do vergalhão. Para o primeiro passe, o valor é de aproximadamente 1,2 kN.

O perfil obtido no primeiro passe objetivando a espessura intermediária de 5,0 mm é mostrado na Figura 4.32. A espessura do material tomou a dimensão de 4,91 mm. A largura possui o valor de 8,80 mm. A área do perfil obtido é de $38,33 \text{ mm}^2$.

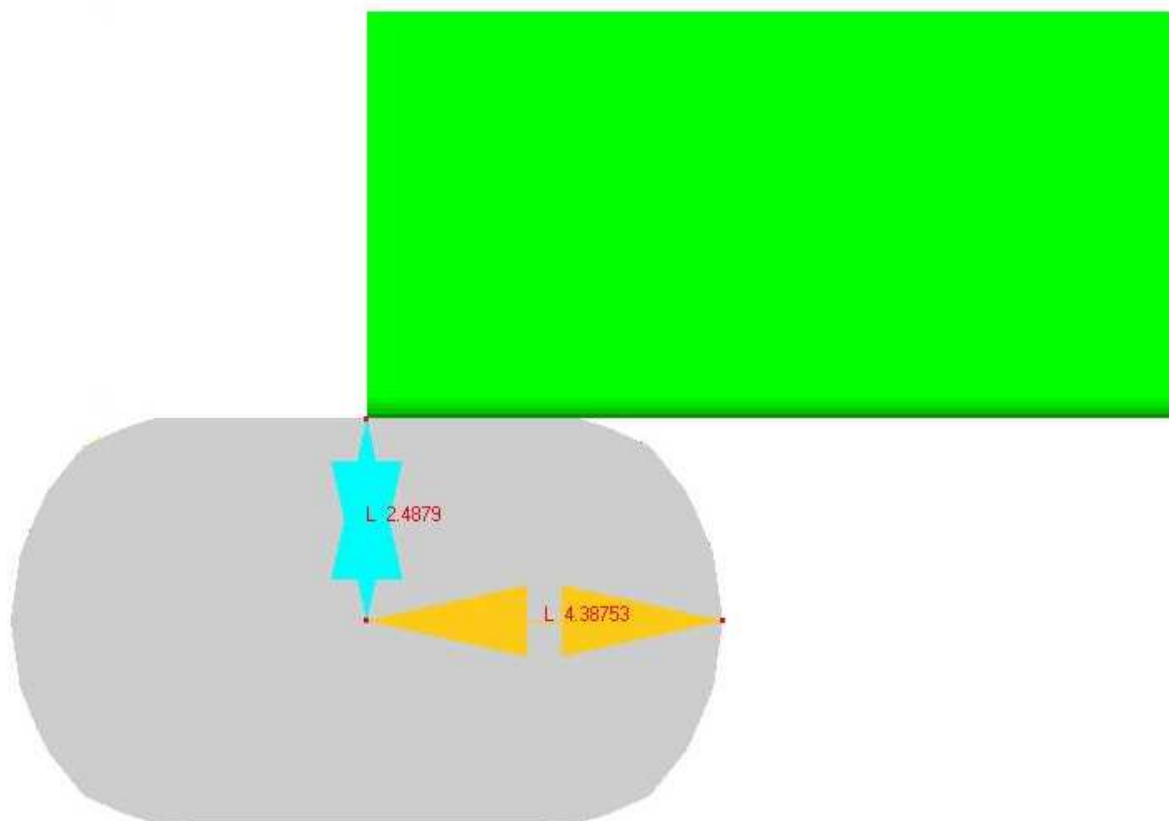


Figura 4.32 – Dimensões do perfil de saída para o primeiro passe com espessura de 5,0 mm.

4.3.6 Segundo passe para o processo com espessura intermediária de 5,0 mm

O passe de conclusão do processo com espessura intermediária de 5,0 mm foi realizado utilizando-se uma fieira com espessura de 3,5 mm e largura de 8,8 mm, mantendo o semi-ângulo de contato de 8° . A Figura C.19 mostra as deformações impostas ao vergalhão de diâmetro 8 mm. A deformação efetiva máxima imposta ao material é de 0,955. A mínima ocorre nas regiões laterais do perfil, sendo de 0,607.

A Figura C.20 mostra a região de deformação do material estabelecendo faixas de tensão efetiva imposta pelo processo. No perfil de saída a tensão efetiva máxima ocorre na região central com o valor de 224 MPa e a mínima ocorre nas bordas laterais com o valor de 173 MPa. Fazendo-se um corte transversal na região mais solicitada durante a conformação do material, como é mostrado na Figura C.21, verifica-se que a tensão efetiva máxima naquele ponto é de 484 MPa, enquanto que a mínima é de 385 MPa.

A carga de trefilação da quarta parte do vergalhão no segundo passe, conforme a Figura C.18, é de aproximadamente 1,5 kN.

O perfil obtido após o processo com espessura intermediária de 5,0 mm está exposto na Figura 4.33. A espessura tem o valor de 3,48 mm. A largura possui 8,78 mm. A área do perfil é de 29,70 mm². O comprimento do vão entre o perfil de saída e o vértice da fieira é de 0,32 mm.

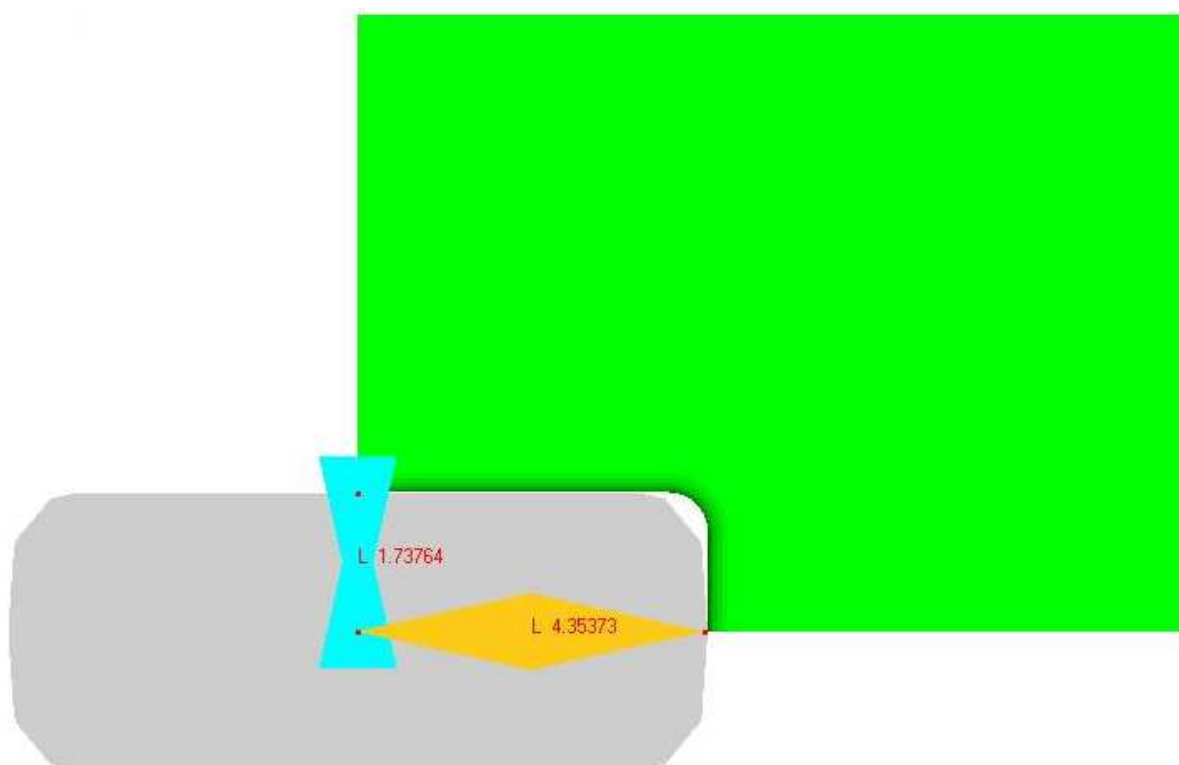


Figura 4.33 – Dimensões do perfil de saída do segundo passe para o processo de espessura intermediária de 5,0 mm.

4.3.7 Relacionando os resultados

Com os resultados obtidos a partir das simulações dos processos utilizando 2 passes, variando a espessura intermediária com valores de 4,0, 4,5 e 5,0 mm e mantendo o semi-ângulo de trabalho em 8° para os dois passes, relaciona-se as informações dipostas na Tabela IV.3.

As tensões efetivas impostas ao material de cobre eletrolítico durante o processo estão correlacionadas, variando-se a espessura intermediária, na Figura 4.34 para o primeiro passe e na Figura 4.35 para o segundo passe. As Figuras 4.36, 4.37 e 4.38 mostram a distribuição das deformações impostas ao material para os processos caracterizados pela espessura intermediária utilizada. E as Figuras 4.39 e 4.40 relacionam as dimensões dos perfis obtidos com a utilização de cada espessura intermediária.

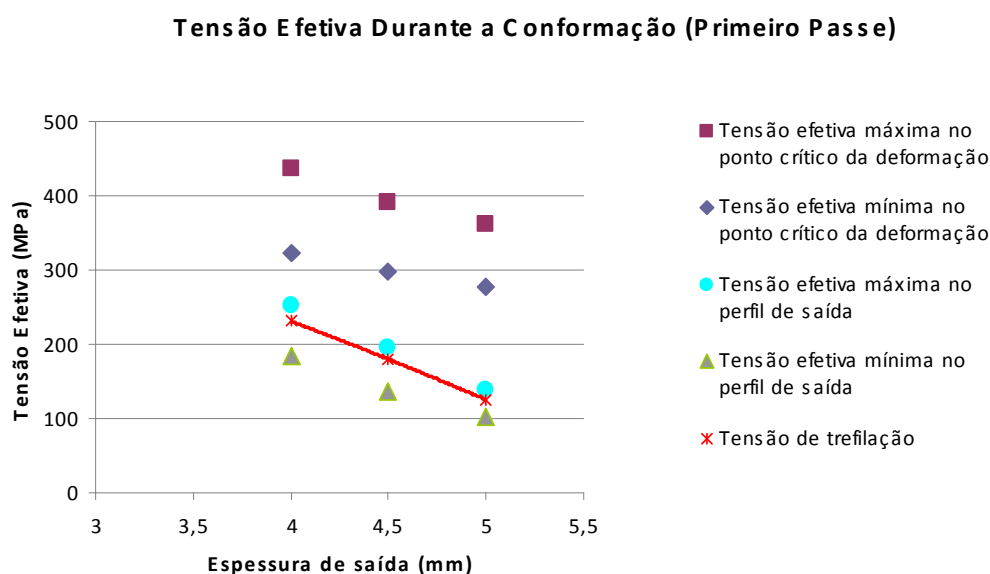


Figura 4.34 – Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 8 mm no primeiro passe do processo em 2 passes.

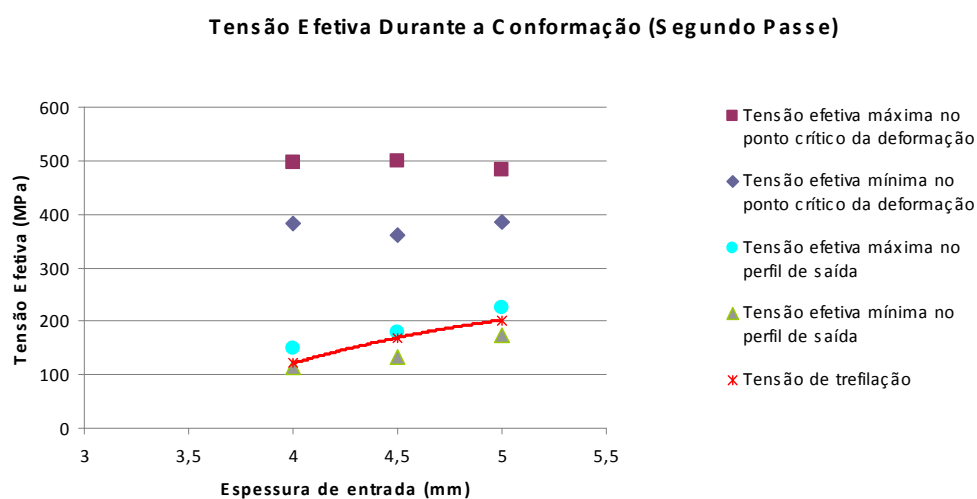


Figura 4.35 – Distribuição da tensão efetiva sobre o material no segundo passe do processo em 2 passes.

Tabela IV.3 – Características do material para processo com 2 passes e semi-ângulo de 8° a partir do vergalhão de diâmetro 8 mm

Passe	Espessura da fieira	Máxima Tensão Efetiva na deformação (Mpa)		Tensão Efetiva na saída (Mpa)		Deformação Efetiva		Carga de Trefilação (kN)	Dimensões do perfil de saída (mm)		Distância do perfil ao vértice da matriz (mm)	Área do perfil de saída (mm ²)	Redução total	Tensão de Trefilação (MPa)
		Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		Espessura	Largura				
1	4 mm	322	436	184	253	0,405	0,810	7,6	3,96	9,12	-	32,87	0,346	231
2	3,5 mm	383	496	115	150	0,597	0,994	3,6	3,45	8,80	0,41	29,32	0,417	121
1	4,5 mm	297	392	137	196	0,320	0,684	6,4	4,48	9,06	-	35,59	0,292	180
2	3,5 mm	360	500	133	180	0,590	0,974	4,8	3,44	8,78	0,29	28,36	0,436	169
1	5 mm	277	361	102	139	0,228	0,571	4,8	4,91	8,93	-	38,33	0,237	125
2	3,5 mm	385	484	173	224	0,607	0,955	6,0	3,48	8,78	0,32	29,70	0,409	202

No primeiro passe, as tensões efetivas atuantes no ponto mais crítico durante a deformação possuem uma tendência decrescente com o aumento da espessura intermediária utilizada, uma vez que a redução necessária diminui com o aumento da espessura de saída. O mesmo ocorre com a tensão de trefilação, a qual diminui à medida em que a espessura intermediária aumenta, pois a resistência contra o fluxo do material no sentido da trefilação diminui.

O segundo passe mostra que as tensões efetivas no ponto crítico da deformação mantêm-se muito próximas para os três processos com suas espessuras intermediárias características. Isso acontece em virtude de a espessura final ser a mesma e a redução total para os três casos serem muito próximas, partindo da mesma matéria prima. Já a tensão de trefilação cresce com o aumento da espessura intermediária que, neste caso, é a espessura de entrada. Quanto maior a espessura de entrada maior é a resistência ao processo de trefilação e em consequência disso a tensão de trefilação aumenta.

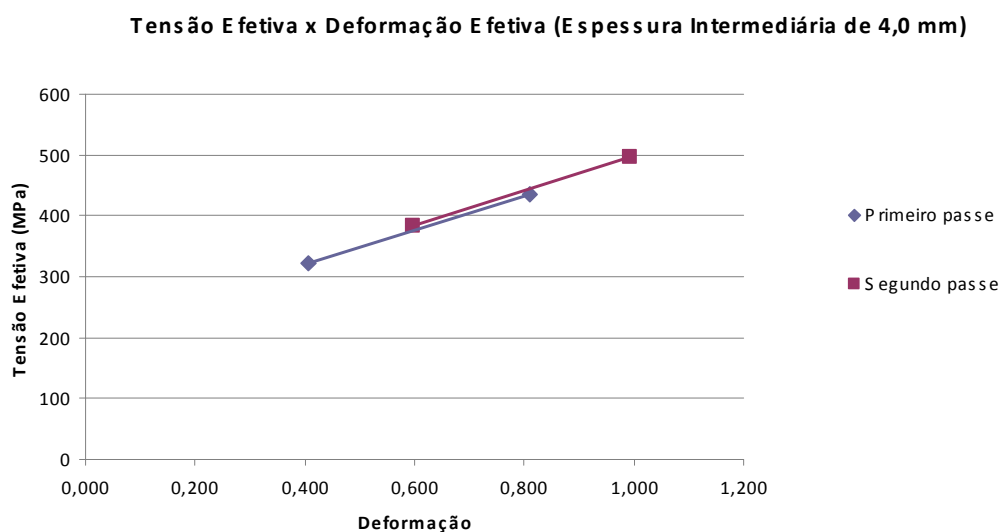


Figura 4.36 – Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura intermediária de 4,0 mm.

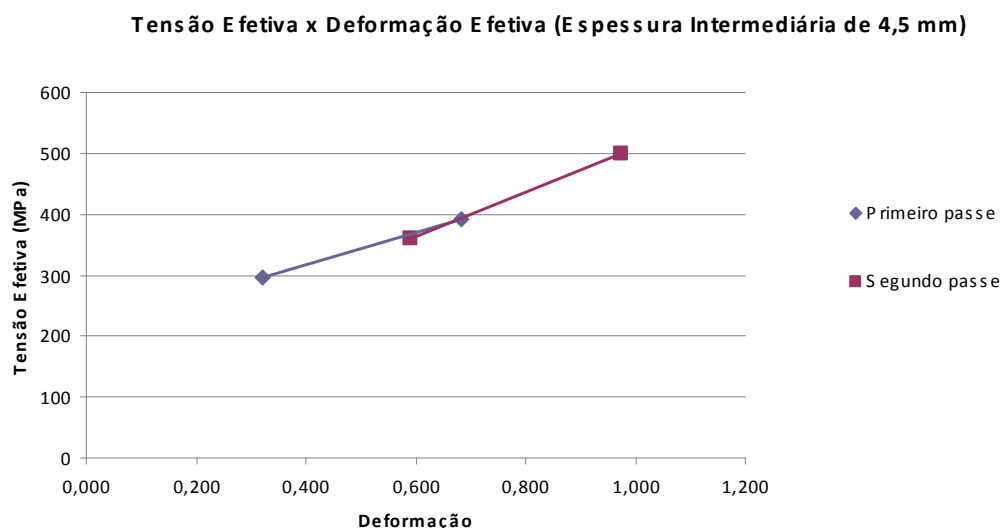


Figura 4.37 – Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura intermediária de 4,5 mm.

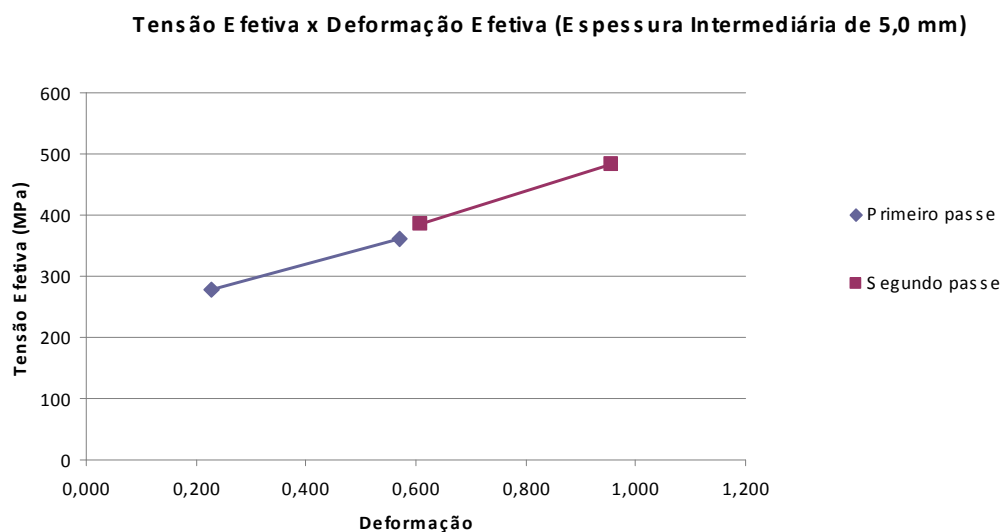


Figura 4.38 – Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo de espessura intermediária de 5,0 mm.

Os gráficos de tensão x deformação obtidos a partir das simulações mostram que, no primeiro passe, quanto maior é a espessura intermediária menor é a deformação sofrida pelo vergalhão de diâmetro 8 mm. Observa-se que a região de deformação no primeiro passe afasta-se da região de deformação no segundo passe à medida em que cresce a espessura intermediária do processo. Já a deformação no segundo

passo é regular para os três processos, lembrando que a redução total de área para cada um é muito próxima.

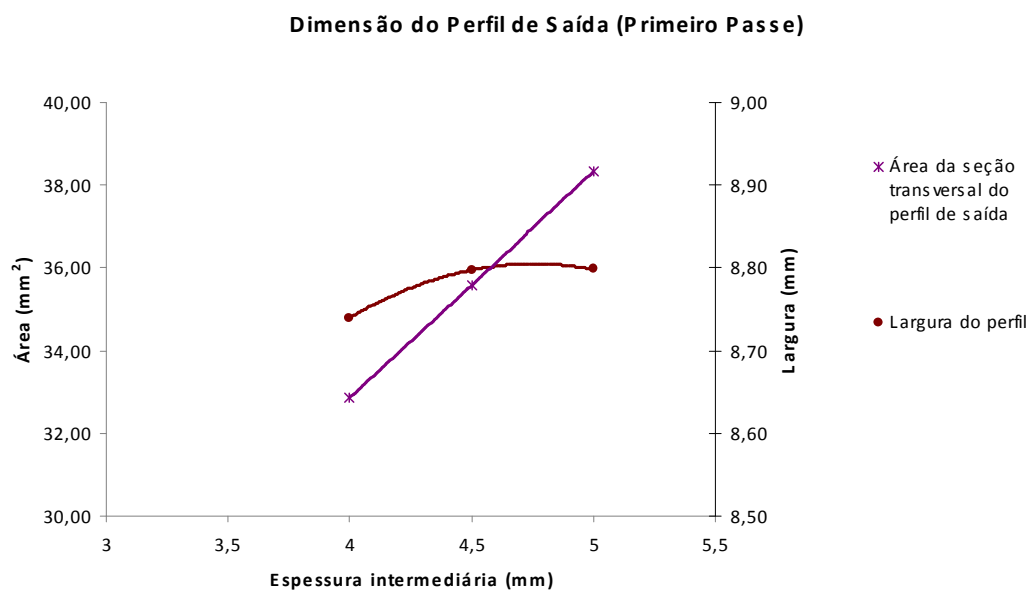


Figura 4.39 – Relação entre as dimensões obtidas no primeiro passo para diferentes espessuras intermediárias.

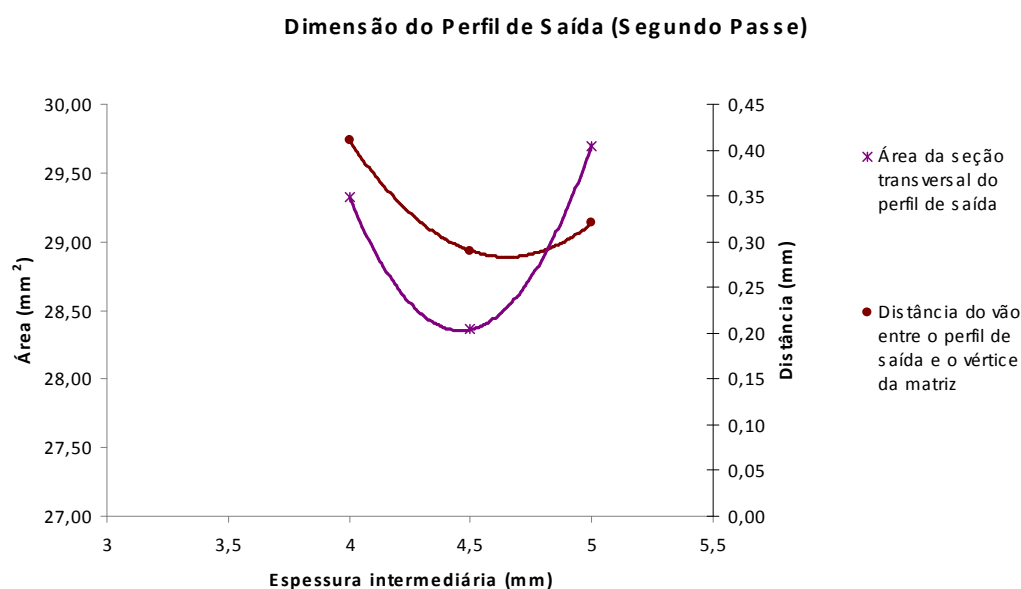


Figura 4.40 – Relação entre as dimensões obtidas no segundo passo para diferentes espessuras intermediárias.

Observa-se no primeiro passe que a área do perfil de saída é se comporta linearmente em relação ao aumento da espessura intermediária, que é a espessura de saída. Contudo, a largura do perfil atinge o seu maior valor entre as espessuras de saída de 4,5 e 5,0 mm. Tomando o processo de fabricação da TTDB realizado também em 2 passes, o qual lamina o vergalhão de diâmetro 8 mm para uma espessura de saída de 4,1 mm no primeiro passe e trefila o material no segundo passe, sabe-se que a largura do perfil obtido através da laminação é de 11,30 mm, como pode ser visto na Figura 2.12. Logo, comparando-se as larguras de perfil para os dois processos, sejam eles a laminação e a trefilação sem restrição lateral, observa-se que a largura obtida através da laminação é significativamente maior do que a obtida através da trefilação. Este fator torna possível o processo de fabricação em 2 passes quando utilizada a laminação no primeiro passes e exige um estudo mais detalhado variando-se o número de passes e os formatos das fieiras para que seja possível realizar o processo utilizando-se apenas trefilação.

No segundo passe a melhor aproximação entre o perfil e os vértices da fieira é obtida na utilização das espessuras intermediárias, também espessuras de entradas para o segundo passe, de 4,5 e 5,0 mm, considerando-se semi-ângulos de trabalho planos e um processo em 2 passes. Contudo, o processo com a espessura intermediária de 5,0 mm fornece uma área do perfil de saída maior, preenchendo melhor as dimensões da fieira.

4.4 Análise da simulação numérica de processo com dois passes e fieira curva no primeiro passe

O processo proposto nesta etapa buscou melhorar o preenchimento do perfil da fieira no segundo e último passe a partir do vergalhão de diâmetro 8 mm. Para tanto, projetou-se uma fieira não-convencional para o primeiro passe, de forma a possibilitar um maior fluxo de material para as regiões dos vértices do mesmo. A fieira não-convencional foi desenhada de forma que as suas faces superior e inferior fossem curvos convexos em relação ao material. Realizou-se duas simulações para processos de dois passes com fieira não-convencional no primeiro deles, variando para cada processo o raio de curvatura, sendo uma com raio de 4,5 mm na saída da

fieira e a outra com raio de 9,0 mm na saída. A espessura mínima para as duas fieiras foi de 4,0 mm. O semi-ângulo de trabalho foi fixado em 8° para todas as etapas.

4.4.1 Primeiro passe com curva de raio 4,5 mm

O primeiro passe com a fieira curva, dimensionada de acordo com a Figura 3.20, forneceu um perfil curvo côncavo nas faces superior e inferior do material, conforme Figura D.1. A maior deformação ocorreu no meio do perfil nas faces superior e inferior, obtendo o valor de 0,876. A menor deformação ocorreu nas regiões laterais com o valor de 0,232.

A distribuição das tensões efetivas sofridas pelo vergalhão de diâmetro 8 mm na região da deformação está demonstrada na Figura D.2. O perfil de saída mantém-se tracionado com uma tensão efetiva máxima de 210 MPa na região central e uma tensão efetiva mínima nas regiões laterais de 131 MPa. A região mais solicitada está situada na isolinha F. A Figura D.3 mostra esta região em corte transversal. A tensão efetiva máxima nesta região é de 441 MPa, enquanto que a mínima é de 240 MPa.

A força exercida sobre a matriz na direção da trefilação em função do processo de conformação da quarta parte do vergalhão de cobre em dois passes com matriz curva de raio 4,5 mm no primeiro passe é representada na Figura D.4. O valor aproximado para o primeiro passe é de 1,5 kN.

A Figura 4.41 mostra como ficou a dimensão do perfil em relação à matriz utilizada na conformação. A espessura do perfil ficou em 3,91 mm e a largura em 8,99 mm. A área do perfil obtido neste primeiro passe é de $39,40 \text{ mm}^2$.

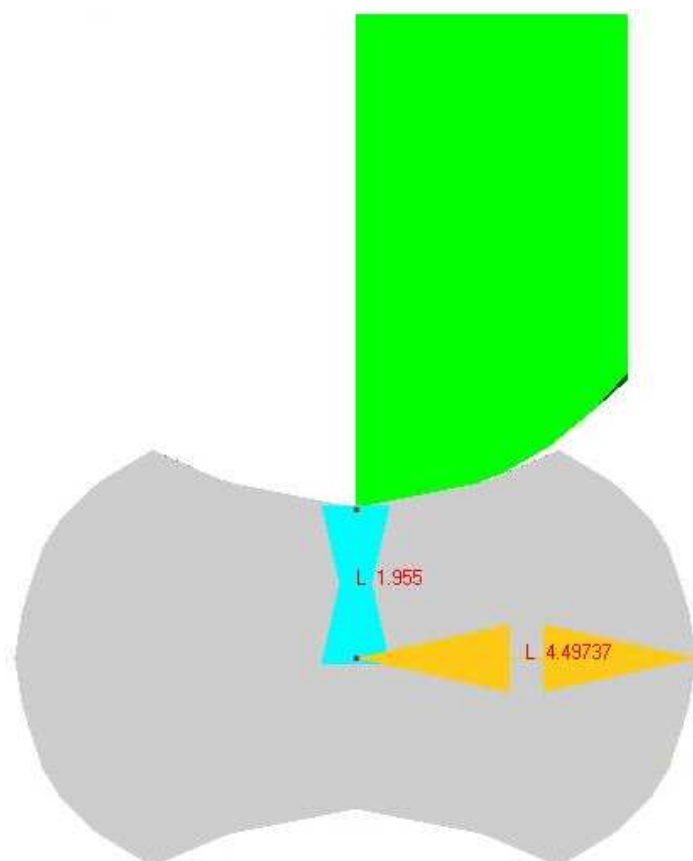


Figura 4.41 – Dimensões do perfil de saída para o primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.

4.4.2 Segundo passe para o processo com fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe

Realizando-se o segundo passe com a fieira nas dimensões finais desejadas, obteve-se um perfil conforme mostrado na Figura D.5. As faces da fieira são retas, o semi-ângulo de contato é de 8° , a espessura possui 3,5 mm e as restrições laterais possuem a largura de 8,8 mm. A maior deformação sofrida pelo perfil curvo foi de 1,150. A menor deformação foi de 0,632. É importante verificar que houve a ocorrência de alguns defeitos nas superfícies superior e inferior do perfil. E alguns pontos ocorreu uma deformação acima do necessário.

As tensões efetivas sobre o material no segundo passe são mostradas conforme a Figura D.6. O perfil de saída sofre uma tensão efetiva máxima de 267 MPa e mínima de 197 MPa. A isolinha G marca a região que sofre o maior esforço durante a conformação. Fazendo um corte na seção transversal na região da isolinha G, conforme mostrado na Figura D.7, observa-se que a tensão efetiva máxima neste

ponto mais crítico da deformação é de 500 MPa e a mínima, nas bordas laterais é de 401 MPa.

A carga de trefilação no segundo passe, em função da conformação da quarta parte do material proposto, para o processo com matriz curva de raio 4,5 mm no primeiro passe é de aproximadamente 1,6 kN (Figura D.4).

A comparação entre a dimensão do perfil final obtido e a fieira utilizada no segundo passe é mostrada na Figura 4.42. O perfil obteve uma espessura de 3,46 mm e uma largura de 8,78 mm. A área do perfil é de 30,05 mm². A distância do vão entre o perfil e o vértice da fieira é de 0,17 mm.

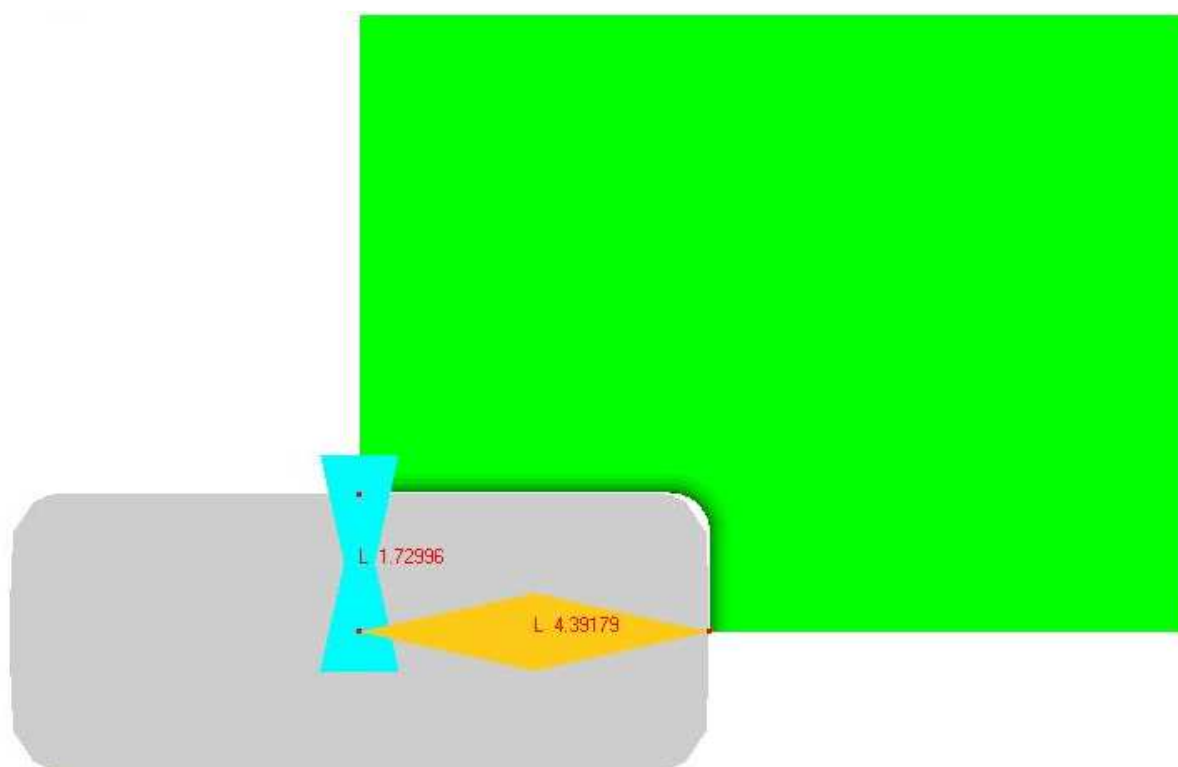


Figura 4.42 – Dimensões do perfil de saída para o segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.

4.4.3 Primeiro passe com curva de raio 9,0 mm

O segundo processo proposto foi a modificação do raio da curva da trefila do primeiro passe. Assim, o presente processo utilizou uma fieira com as faces superior e inferior curvas de raio 9,0 mm. O perfil do vergalhão após o primeiro passe e a

suas respectivas deformações efetivas podem ser visualizados na Figura D.8. A maior deformação encontrada foi de 0,800 e a menor foi de 0,308.

As tensões efetivas responsáveis pela deformação aplicada ao vergalhão de diâmetro 8 mm através da sua passagem dentro da matriz curva proposta estão dispostas na Figura D.9. No perfil de saída, a tensão efetiva mais forte encontrada foi de 231 MPa, enquanto que a menor foi de 156 MPa. A partir da mesma figura, é possível visualizar a região de maior solicitação durante a conformação. Fazendo um corte transversal neste ponto e exibindo o resultado na Figura D.10, Coleta-se o valor da maior tensão efetiva na conformação no valor de 422 MPa e a menor no valor de 295 MPa.

A força exercida sobre a matriz em função da trilação da quarta parte do vergalhão durante o processo de dois passes com fiação curva de raio 9,0 mm no primeiro passe é mostrada na Figura D.11. O valor para o primeiro passe é de 1,7 kN.

As dimensões do perfil estão expostas na Figura 4.43. A espessura do perfil é de 3,97 mm e a largura é de 9,03 mm. A área do perfil foi calculada em 35,46 mm².

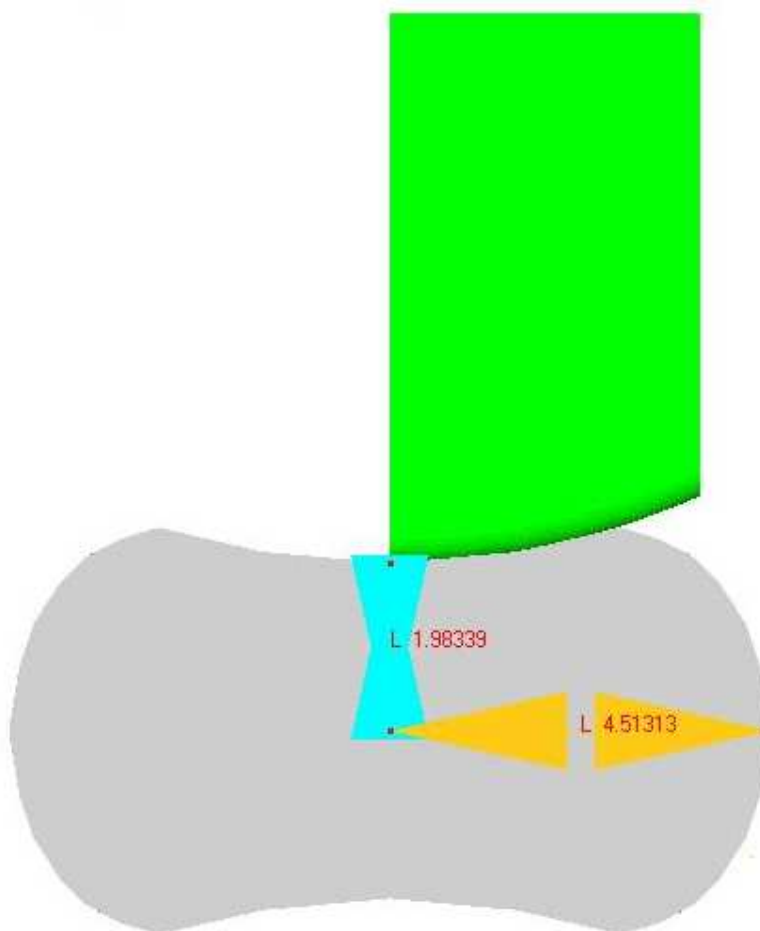


Figura 4.43 – Dimensões do perfil de saída para o primeiro passe com curva de raio 9,0 mm.

4.4.4 Segundo passe para o processo com fieira curva de raio 9,0 mm no primeiro passe

O segundo passe após a primeira etapa com a trefilação utilizando uma matriz de faces superior e inferior curvas de raio 9,0 mm, obteve-se o perfil conforme mostrado na Figura D.12. As deformações impostas ao material neste segundo passe com o uso de uma fieira de faces retas, espessura 3,5 mm, largura 8,8 mm e semi-ângulo de contato de 8° , também estão mostradas na figura a seguir. A maior deformação obteve o valor de 1,040 e a menor o valor de 0,621.

As tensões efetivas sofridas pelo material durante a deformação do segundo passe estão dispostas na Figura D.13. No perfil de saída, a maior tensão efetiva é de 224 MPa e a menor é de 174 MPa. Fazendo-se um corte transversal no ponto o material sofre a maior solicitação e demonstrando na Figura D.14, obtém-se os valores de

tensão efetiva no ponto mais crítico da deformação. A tensão efetiva máxima nesta região é de 515 MPa e a mínima é de 396 MPa.

A carga de trefilação para o segundo passe baseada no processo de um quarto do material, conforme Figura D.11, é de aproximadamente 1,2 kN.

A Figura 4.44 mostra as as dimensões do perfil obtido após os dois passes. A espessura obteve um valor de 3,45 mm e a largura 8,79 mm. A área do perfil foi calculada em 29,56 mm². A distância do vão entre o perfil e o vértice da fieira é de 0,14 mm.

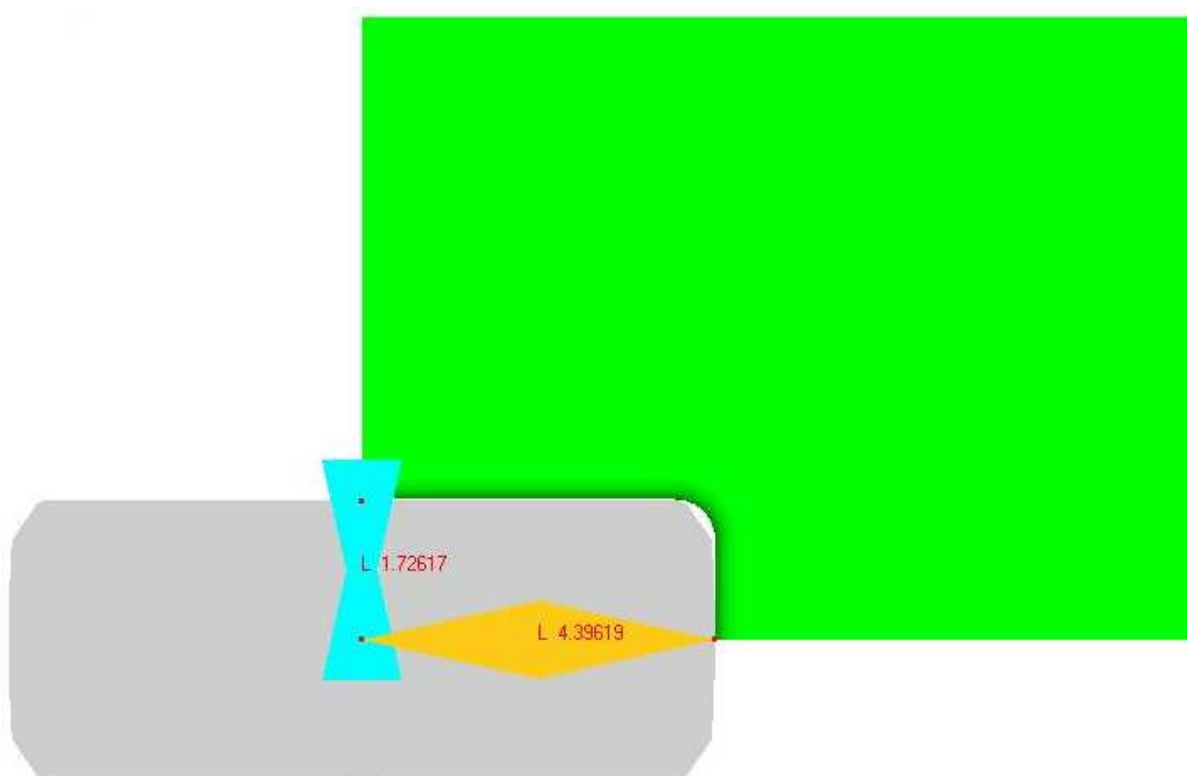


Figura 4.44 – Dimensões do perfil de saída para o segundo passe após a fieira curva de raio 9,0 mm.

4.4.5 Relacionando os resultados

Foram analisados os perfis obtidos a partir dos dois processos de dois passes com uma fieira não-convencional no primeiro passe propostos na metodologia. As características dos perfis e do processo estão dispostas na Tabela IV.4.

Os dados coletados foram analisados graficamente. As Figuras 4.45 e 4.46 mostram a distribuição das tensões efetivas sobre o cobre no primeiro e no segundo passe em relação ao processo utilizado, seja ele com a fieira com raio de curvatura de 4,5 mm ou de 9,0 mm. As Figuras 4.47 e 4.48 mostram a relação entre as tensões impostas e as deformações sofridas para cada processo. As Figuras 4.49 e 4.50 relacionam as dimensões dos perfis obtidos no fim de cada passe para os dois processos analisados.

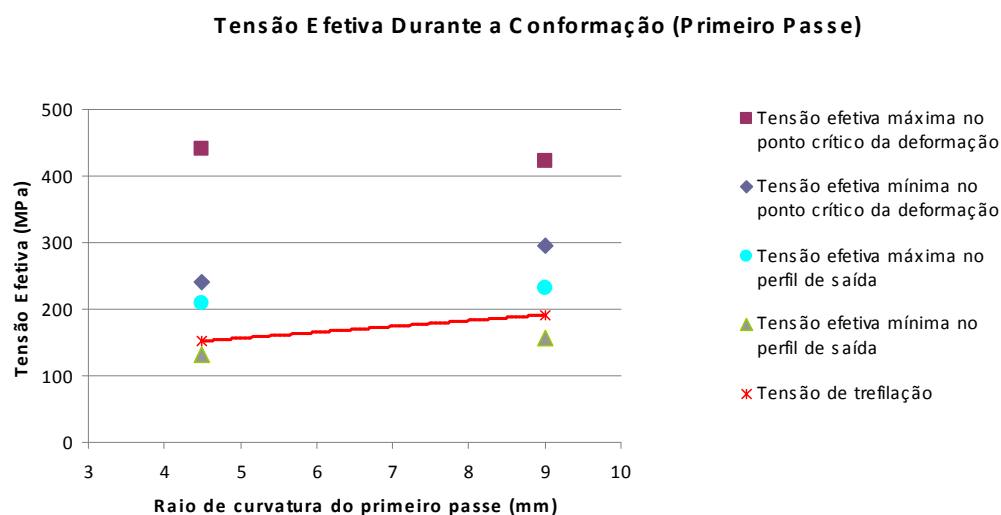


Figura 4.45 – Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 8 mm no primeiro passe com fieira não-convencional.

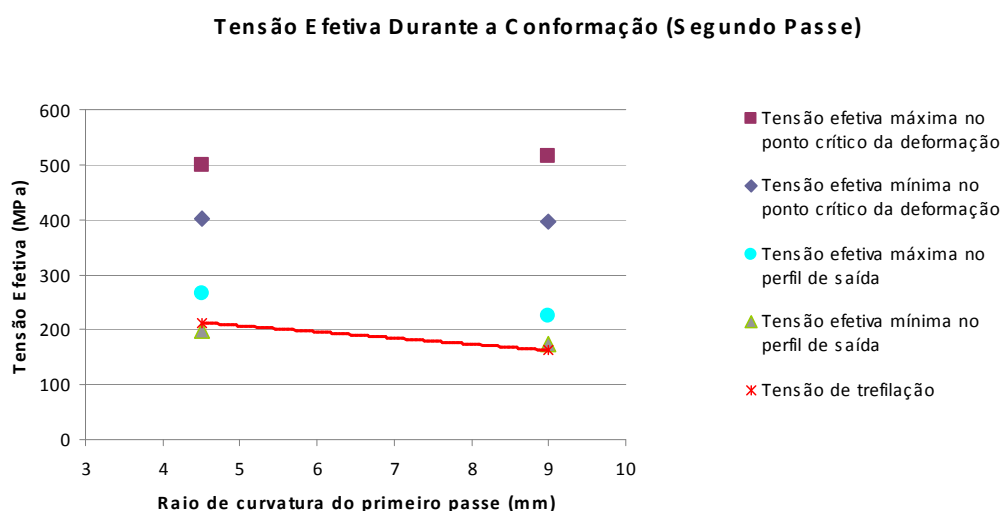


Figura 4.46 – Distribuição da tensão efetiva sobre o material no segundo passe do processo com fieira não-convencional no primeiro passe.

Tabela IV.4 – Características do material para processo com 2 passes e semi-ângulo de 8° a partir do vergalhão de diâmetro 8 mm utilizando uma matriz curva no primeiro passe

Passe	Raio de curvatura das faces superior e inferior (mm)	Espessura da fiação (mm)	Máxima Tensão Efetiva na deformação (Mpa)		Tensão Efetiva na saída (Mpa)		Deformação Efetiva		Carga de Trefilação (kN)	Dimensões do perfil de saída (mm)		Distância do perfil ao vértice da matriz (mm)	Área do perfil de saída (mm ²)	Redução total	Tensão de Trefilação (MPa)
			Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		Espessura	Largura				
1	4,5	4	240	441	131	210	0,232	0,876	6,0	3,91	8,99	-	39,40	0,216	152
2	∞	3,5	401	500	197	267	0,632	1,150	6,4	3,46	8,78	0,17	30,05	0,402	213
1	9	4	295	422	156	231	0,308	0,800	6,8	3,97	9,03	-	35,46	0,295	192
2	∞	3,5	396	515	174	224	0,621	1,040	4,8	3,45	8,79	0,14	29,56	0,412	162

Tomando o primeiro passe do processo com a fieira com raio de 4,5 de curvatura das faces superior e inferior, observa-se que a sua variação entre a menor tensão efetiva e a maior no ponto mais crítico da deformação é maior que para o processo com a fieira com 9,0 mm de raio de curvatura. Isso ocorre pois a matriz força bastante a região central deixando as regiões laterais livres em função do seu menor raio de curvatura. Contudo, o seu raio menor faz com que o seu contato com o material seja menor e a resistência ao fluxo no material na direção da trefilação também é menor, fazendo com que a tensão de trefilação seja menos expressiva que no processo com raio de curvatura de 9,0 mm.

No segundo passe, tanto para um processo quanto para o outro, as tensões no ponto mais crítico da deformação tendem a ser próximas, já que a redução total almejada é muito similar. Já a tensão de trefilação será maior para o primeiro caso pois o raio sendo menor no primeiro passe fornece uma área maior para o perfil de entrada.

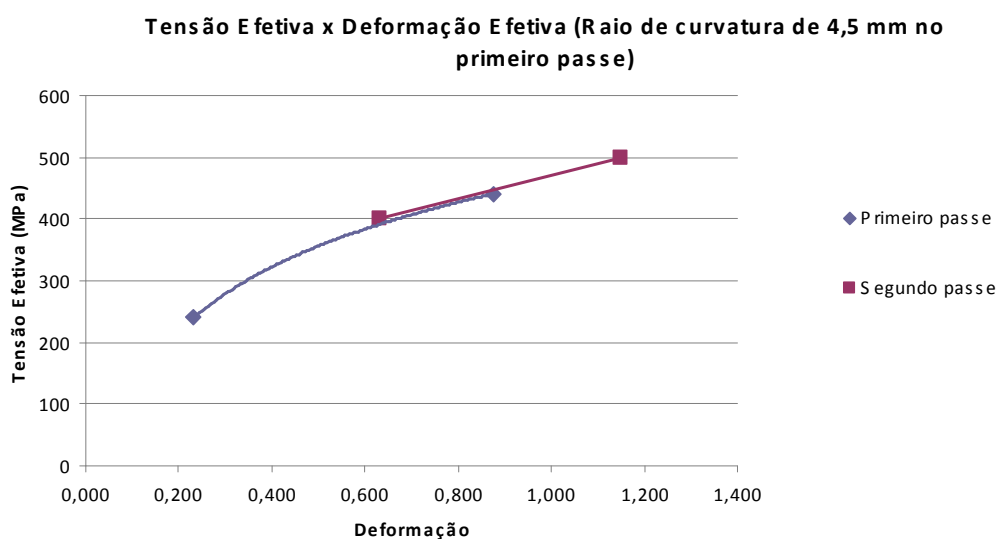


Figura 4.47 – Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo com a fieira com raio de 4,5 mm da curva.

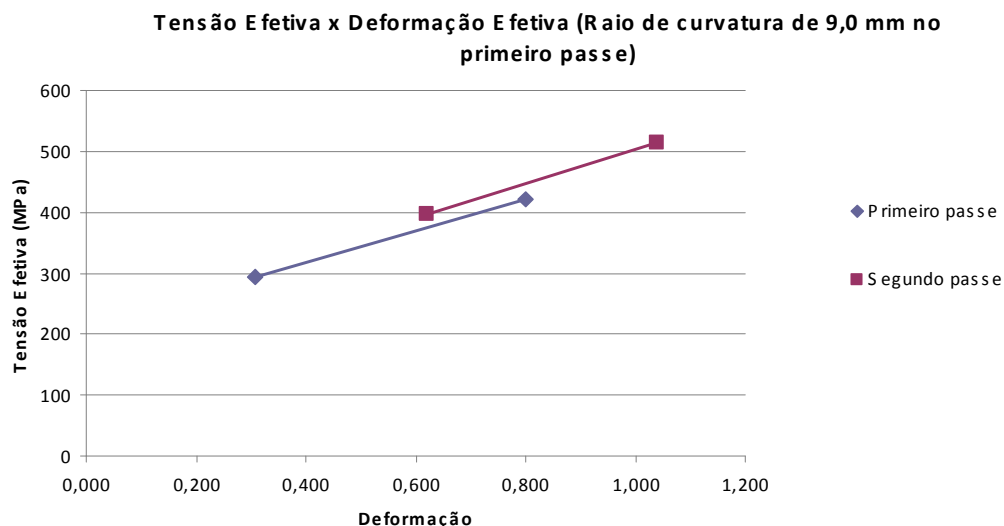


Figura 4.48 – Relação entre a tensão no ponto crítico da conformação e a deformação sofrida pelo material para o processo com a fieira com raio de 9,0 mm da curva.

As deformações impostas ao material no primeiro passe para o processo com fieira em curva de raio 4,5 mm são menores que para o processo com fieira em curva de raio 9,0 mm. Contudo, no segundo passe elas tornam a serem próximas em virtude de as reduções totais serem as mesmas.

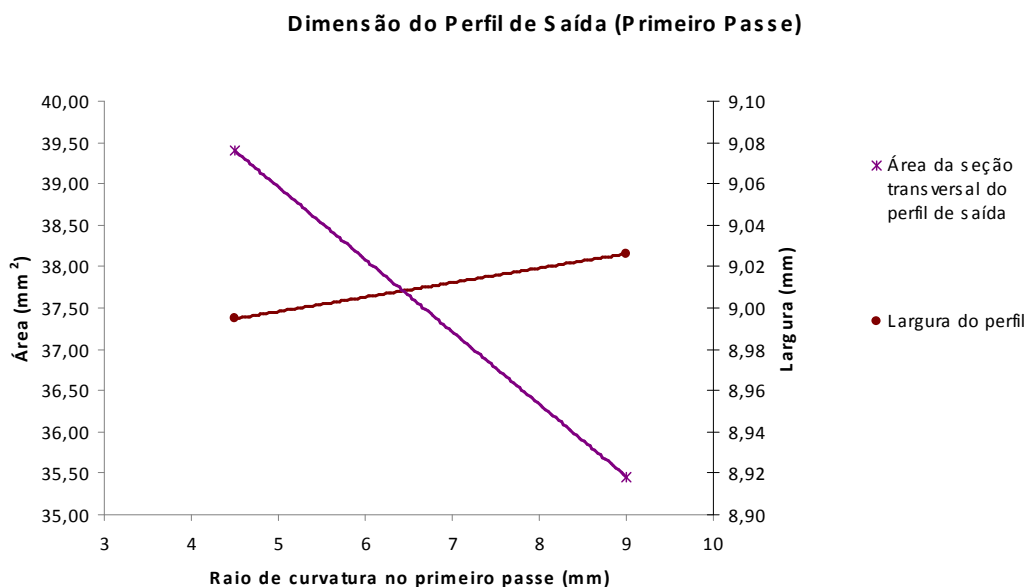


Figura 4.49 – Relação entre as dimensões obtidas no primeiro passe dos processos com fieira não-convencional.

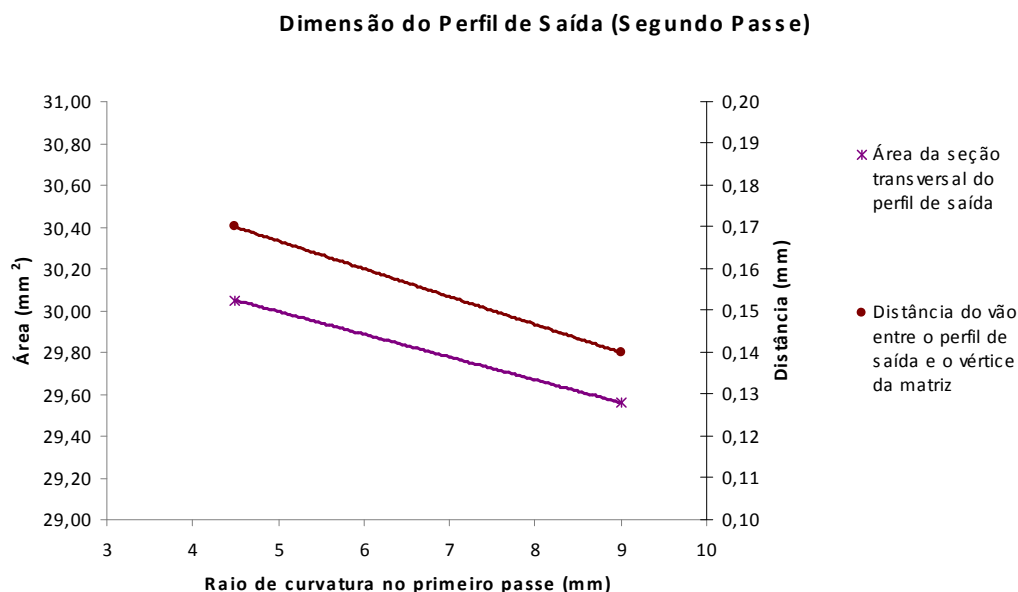


Figura 4.50 – Relação entre as dimensões obtidas no segundo passe dos processos com fieira não-convencional no primeiro passe.

No primeiro passe o processo com fieira de curva de raio 4,5 mm resulta em um perfil com uma área maior que para o processo de raio 9,0 mm. Isso ocorre pois a deformação é menor, ocorrendo mais efetivamente apenas no centro do vergalhão. Com isso o vergalhão se deformou menos na direção da largura.

No segundo passe, o processo com raio de 4,5 mm no primeiro passe fornece um perfil com uma área maior, porém preenche menos o vão até os vértices da fieira. Mas, sendo a diferença entre os dois processos no relativo ao comprimento do vão até o vértice da fieira considerada pequena, entende-se que o processo com a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe fornece um perfil melhor.

4.5 Análise da simulação numérica com fieira não-convencional

Após a primeira tentativa de se modificar o formato da fieira, conforme o item anterior, propôs-se uma nova modificação da fieira. Desta vez a fieira utilizada possuiu, ao invés de as faces superior e inferior, as faces laterais curvas convexas. Contudo, as faces laterais são curvas até a espessura da fieira atingir 4,0 mm, ponto a partir do qual as faces laterais passam a convergir para o formato final do produto

desejado. Além disso, somente as faces superior e inferior possuem semi-ângulo de 8° , enquanto que as faces laterais possuem um semi-ângulo de $0,38^\circ$, conforme pode ser revisto na Figura 3.25.

Realizando a simulação do processo aqui proposto verifica-se, conforme a Figura 4.51, o passo-a-passo da trefilação. Através da figura observa-se que a mudança do perfil, remodelando as faces laterais da fieira, não resultou em efeito satisfatório. De fato, a fieira não mostrou diferença significativa em relação a uma fieira convencional. Avaliando-se a largura obtida a partir de uma matriz sem restrições laterais com a mesma espessura da fieira aqui proposta, observa-se que a dimensão lateral a ser trabalhada é muito pequena para a obtenção de um perfil final de 8,8 mm, uma vez que não há diferença significativa.

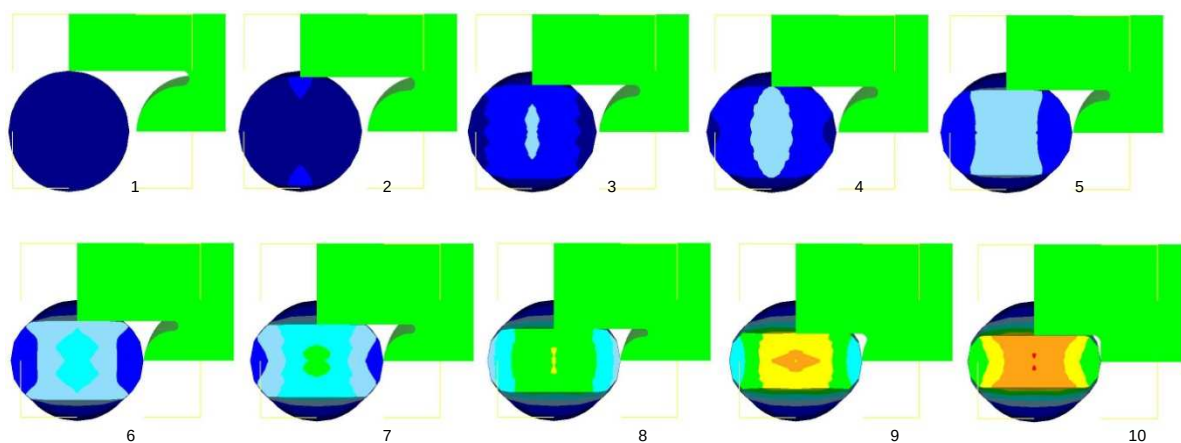


Figura 4.51 – Progressão do processo de trefilação em passe único com fieira não-convencional.

O perfil obtido é mostrado na Figura E.1, assim como as deformações sofridas pelo material. A maior deformação encontrada foi 0,989 na região central do perfil. A menor foi 0,588 nas regiões laterais do material na saída.

As tensões efetivas impostas ao vergalhão durante a conformação são mostradas na Figura E.2. O perfil de saída possui uma tensão efetiva máxima de 363 MPa e mínima de 272 MPa. Fazendo um corte transversal na região onde os esforços são mais severos, obtém-se a Figura E.3. No ponto mais crítico dos esforços ocorridos no material, a maior tensão efetiva é de 513 MPa e a menor é de 394 MPa.

A carga exercida sobre a fieira na direção da trefilação em função da conformação da quarta parte do vergalhão é de aproximadamente 2,3 kN, conforme Figura E.4.

A dimensão do perfil obtido é mostrado na Figura 4.52. Ele possui 3,42 mm de espessura e 8,71 mm de largura. Sua área da seção transversal é de 30,48 mm². A distância do vão entre o perfil e os vértices da fieira é de 0,45 mm. As dimensões obtidas são ruins em relação aos processos anteriores, não sendo este um bom sistema para efetuar a trefilação de vergalhões de diâmetro 8 mm para a obtenção de fios retangulares de espessura 3,5 mm e largura 8,8 mm.

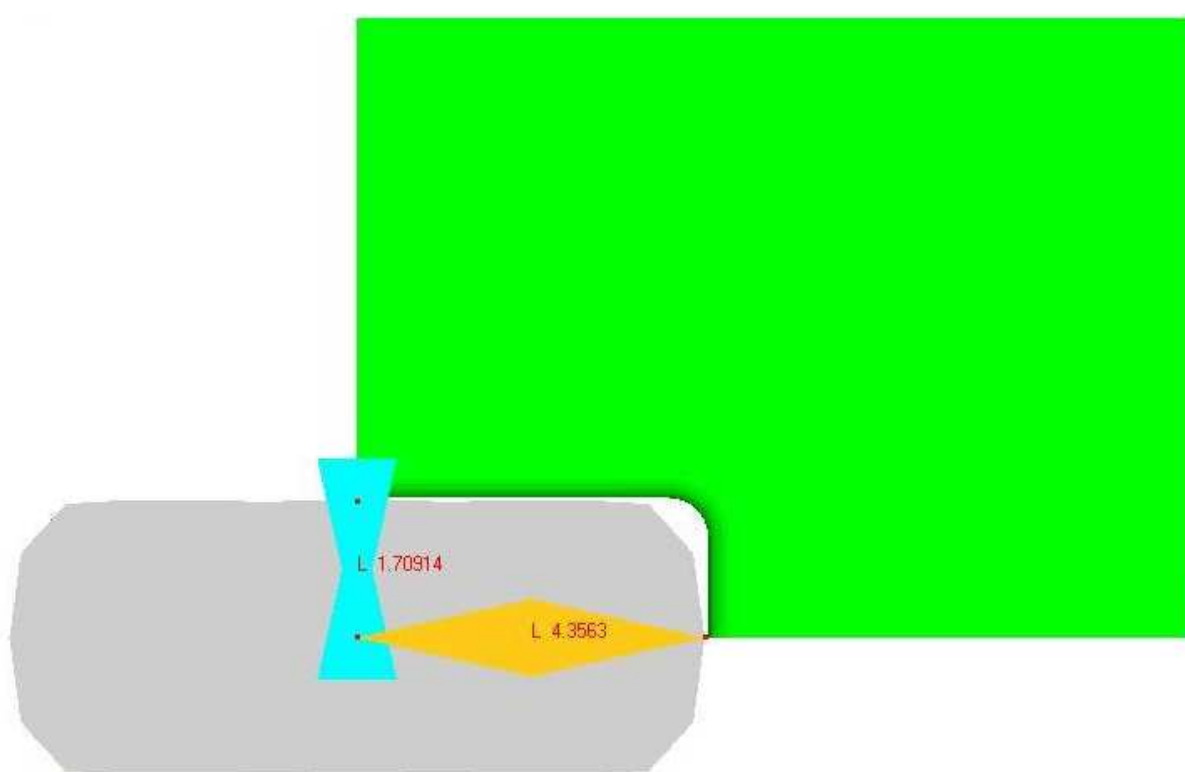


Figura 4.52 – Dimensional do perfil de saída para a conformação do vergalhão com diâmetro 8 mm em uma fieira curva.

Tabela IV.5 - Características do material para processo com fieira não-convencional a partir do vergalhão de diâmetro 8 mm

Diâmetro do vergalhão	Semi-ângulo de contato	Tensão efetiva no ponto crítico da deformação (Mpa)		Tensão efetiva na saída (Mpa)		Deformação Eetiva		Carga de trefilação (kN)	Dimensões do perfil de saída (mm)		Distância do perfil ao vértice da matriz (mm)	Área do perfil de saída (mm ²)	Redução	Tensão de trefilação (MPa)
		Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		Espessura	Largura				
8 mm	9	394	513	272	363	0,588	0,989	9,2	3,42	8,71	0,45	30,48	0,394	302

4.6 Análise da simulação numérica com vergalhão de 9 mm

Visando avaliar como influenciaria nos resultados uma mudança dimensional da matéria prima, propôs-se utilizar um vergalhão de cobre eletrolítico de diâmetro 9 mm. Para tanto, definiu-se realizar dois processos com bonés resultados para o vergalhão de 8 mm. Ambos os processos escolhidos são em 2 passes, sendo um com espessura intermediária de 5,0 mm e o outro com a fieira do primeiro passe curva de raio 4,5 mm. O semi-ângulo de trabalho utilizado será, para todas as matrizes, 8°.

4.6.1 Primeiro passe com espessura de 5,0 mm

O primeiro passe do processo de 2 passes a partir de um vergalhão de diâmetro 9 mm e espessura intermediária de 5,0 mm foi simulado e seu perfil é mostrado na Figura F.1. A maior deformação sobre o vergalhão foi 0,704 e a menor 0,317.

A Figura F.2 mostra as regiões de tensão efetiva sobre o material no momento da conformação. No perfil de saída a tensão efetiva máxima é de 210 MPa e a mínima de 151 MPa. Fazendo-se um corte transversal na região de maior esforço sobre o material, obtém-se a Figura F.3. A maior tensão efetiva neste ponto mais crítico é de 396 MPa, enquanto que a menor é de 292 MPa.

A variação da carga sobre a matriz na direção da trefilação durante o processo presente é mostrada graficamente em relação ao tempo na Figura F.4. O valor para o primeiro passe é de aproximadamente 2,0 kN.

As dimensões do perfil, conforme pode ser observado pela Figura 4.53, são 4,97 mm de espessura e 10,06 mm de largura. A área do perfil obtido é de 34,93 mm².

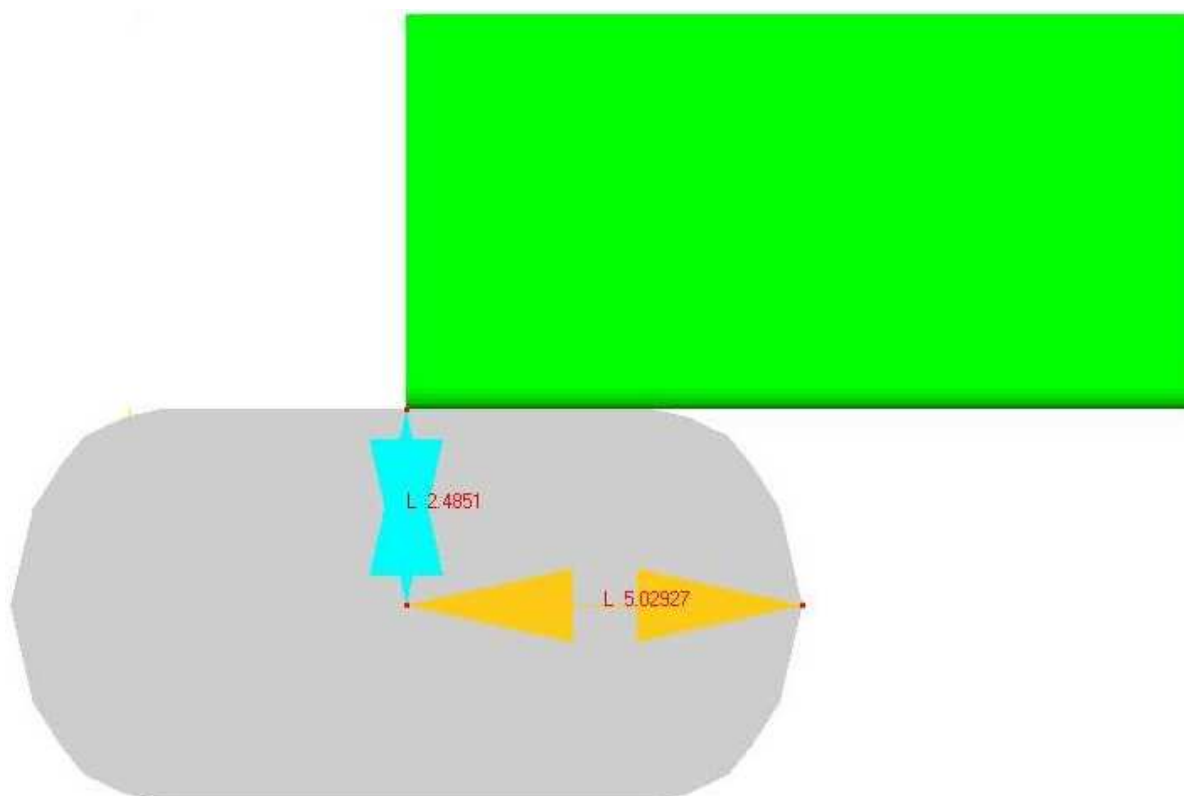


Figura 4.53 – Dimensional do perfil de saída sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm para o primeiro passe com espessura de 5,0 mm.

4.6.2 Segundo passe para o processo com espessura intermediária de 5,0 mm

O segundo passe do processo de 2 passes a partir de um vergalhão de diâmetro 9 mm e espessura intermediária de 5,0 mm foi simulado e seu perfil é mostrado na Figura F.5. A maior deformação sobre o vergalhão foi 1,250 e a menor 0,849.

A Figura F.6 mostra as regiões de tensão efetiva sobre o material no momento da conformação. No perfil de saída a tensão efetiva máxima é de 283 MPa e a mínima de 229 MPa. Fazendo-se um corte na seção transversal na região de maior esforço sobre o material, obtém-se a Figura F.7. A maior tensão efetiva neste ponto mais crítico é de 462 MPa, enquanto que a menor é de 456 MPa.

Para o segundo passe, a carga sofrida pela fieira na direção da trefilação para o processo em discussão, considerando a trefilação da quarta parte do vergalhão, é de aproximadamente 2,2 kN, como pode ser observado no gráfico da Figura F.4.

As dimensões do perfil, conforme pode ser observado pela Figura 4.54, são 3,41 mm de espessura e 8,72 mm de largura. A área do perfil obtido é de 31,08 mm². A distancia do vão entre o perfil e os vértices da fieira é de 0,24 mm.

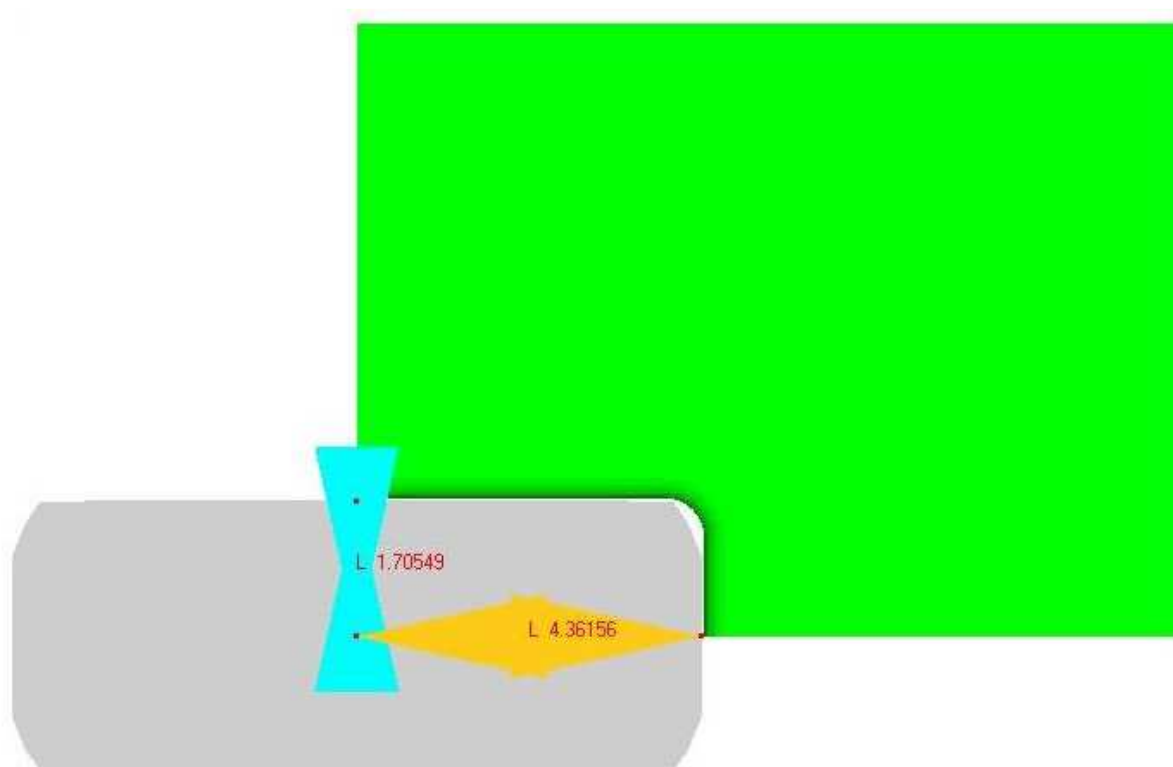


Figura 4.54 – Dimensional do perfil de saída sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm para o segundo passe com espessura intermediária de 5,0 mm.

4.6.3 Primeiro passe com curva de raio 4,5 mm

O primeiro passe do processo de 2 passes a partir de um vergalhão de diâmetro 9 mm com uma fieira não-convencional de espessura intermediária de 4,0 e faces superior e inferior curvas convexas de raio 4,5 mm foi simulado e seu perfil é mostrado na Figura F.8. A maior deformação sobre o vergalhão foi 0,881 e a menor 0,276.

A Figura F.9 mostra as regiões de tensão efetiva sobre o material no momento da conformação. No perfil de saída a tensão efetiva máxima é de 237 MPa e a mínima de 143 MPa. Fazendo-se um corte na seção transversal na região de maior esforço sobre o material, obtém-se a Figura F.10. A maior tensão efetiva neste ponto mais crítico é de 458 MPa, enquanto que a menor é de 287 MPa.

A carga sofrida pela matriz na direção de trefilação, considerando a conformação de um quarto do vergalhão, para o presente processo é demonstrada graficamente na Figura F.11. O valor para o primeiro passe é de aproximadamente 2,2 kN.

As dimensões do perfil, conforme pode ser observado pela Figura 4.55, são 3,98 mm de espessura e 10,37 mm de largura. A área do perfil obtido é de 33,89 mm².

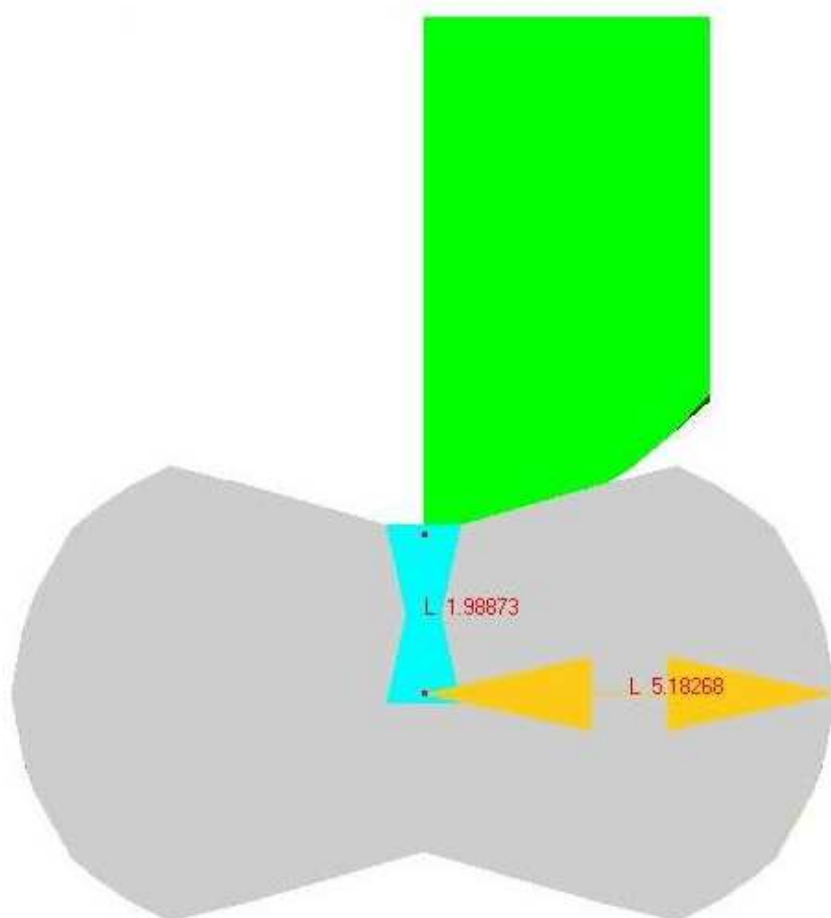


Figura 4.55 – Dimensões do perfil de saída para o primeiro passe com curva de raio 4,5 mm sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm.

4.6.4 Segundo passe para o processo com fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe

O segundo passe do processo de 2 passes a partir do vergalhão de diâmetro 9 mm com uma fieira não-convencional de espessura intermediária de 4,0 e faces superior e inferior curvas convexas de raio 4,5 mm no primeiro passe foi simulado e seu perfil é mostrado na Figura F.12. A maior deformação sobre o vergalhão foi 1,450 e a menor 0,881.

A Figura F.13 mostra as regiões de tensão efetiva sobre o material no momento da conformação. No perfil de saída a tensão efetiva máxima é de 434 MPa e a mínima de 315 MPa. Fazendo-se um corte na seção transversal na região de maior esforço sobre o material, obtém-se a Figura F.14. A maior tensão efetiva neste ponto mais crítico é de 630 MPa, enquanto que a menor é de 484 MPa.

Conforme visto na Figura F.11, a carga de trefilação no segundo passe, considerando-se o processo de um quarto do material, é de aproximadamente 2,5 kN.

As dimensões do perfil, conforme pode ser observado pela Figura 4.56, são 3,31 mm de espessura e 8,71 mm de largura. A área do perfil obtido é de 29,88 mm². A distância do vão entre o perfil e os vértices da fieira é de 0,19 mm.

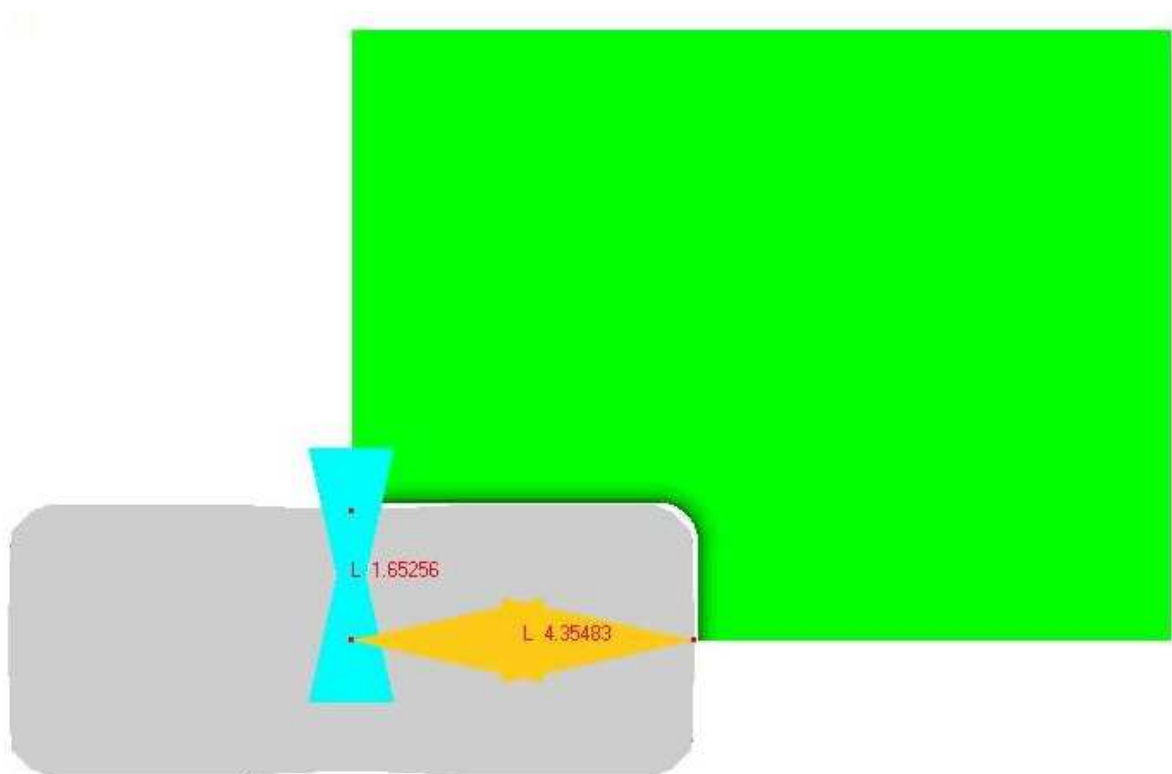


Figura 4.56 – Dimensões do perfil de saída para o segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm.

4.6.5 Relacionando resultados

Foram analisados os perfis obtidos a partir dos dois processos de dois passes, sendo um com espessura intermediária de 5,0 mm e o outro com uma fieira não-convencional no primeiro passe. As características dos perfis e do processo estão dispostas na Tabela IV.6.

Os dados coletados foram analisados graficamente. As Figuras 4.57 e 4.58 mostram a distribuição das tensões efetivas sobre o cobre no primeiro e no segundo passe em relação ao processo utilizado, seja ele com espessura intermediária de 5,0 mm ou com a fieira com raio de curvatura de 4,5 mm. As Figuras 4.59 e 4.60 mostram a relação entre as tensões impostas e as deformações sofridas para cada processo. As Figuras 4.61 e 4.62 relacionam as dimensões dos perfis obtidos no fim de cada passe para os dois processos analisados.

Tabela IV.6 – Características do material para processo de 2 passes a partir do vergalhão de diâmetro 9 mm e semi-ângulo de 8°

Diâmetro do vergalhão	Passe	Raio de curvatura das faces superior e inferior (mm)	Espessura da fiação (mm)	Máxima Tensão Efetiva na deformação (Mpa)		Tensão Efetiva na saída (Mpa)		Deformação Efetiva		Carga de Trefilação (kN)	Dimensões do perfil de saída (mm)		Distância do perfil ao vértice da matriz (mm)	Área do perfil de saída (mm ²)	Redução total	Tensão de Trefilação (MPa)
				Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		Espessura	Largura				
9 mm	1	∞	5	292	396	151	210	0,317	0,704	8,0	4,97	10,06	-	34,93	0,305	229
	2	∞	3,5	456	562	229	283	0,849	1,250	8,8	3,41	8,72	0,24	31,08	0,382	283
9 mm	1	4,5	4	287	458	143	237	0,276	0,881	8,8	3,98	10,37	-	33,89	0,326	260
	2	∞	3,5	484	630	315	434	0,881	1,450	10,0	3,31	8,71	0,19	29,88	0,406	335

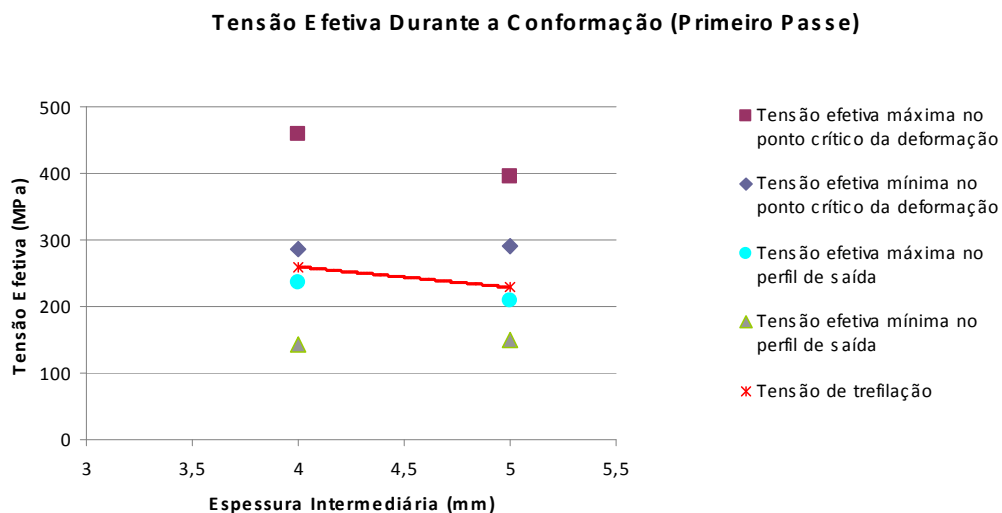


Figura 4.57 – Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe.

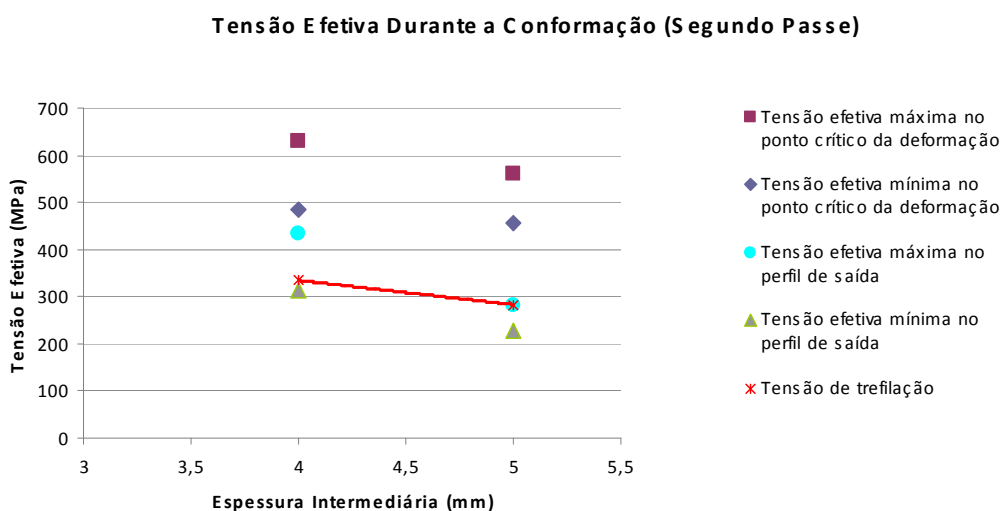


Figura 4.58 – Distribuição da tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe.

Os gráficos de comparação das tensões efetivas impostas ao vergalhão de cobre eletrolítico com diâmetro 9 mm na trefilação em dois passes para um processo com o primeiro passe realizado por uma matriz de faces superior e inferior curva e para outro processo com faces retas mostram que, no primeiro passe, o processo com faces curvas obtém uma dispersão maior dos valores máximos e mínimos de tensão efetiva. Isso se dá devido ao formato característico de cada uma das duas matrizes. Sem restrições laterais característica das duas matrizes para o primeiro passe, a matriz curva exerce um esforço bastante acentuado no centro do material, com a

espessura de 4,0 mm, e alivia a conformação no sentido das laterais do material em função do seu formato curvo. Em contra-ponto, a matriz reta exerce um esforço para a deformação do material a uma espessura de 5,0 mm uniforme ao longo de toda a extensão do material. Com isso, a tensão efetiva máxima ao se utilizar a matriz curva é maior que na utilização da matriz reta, enquanto que a tensão efetiva mínima é menor já que ocorre um alívio por parte da curvatura da matriz nas regiões laterais. A tensão de trefilação para a matriz reta é ligeiramente menor que para a matriz curva, mostrando que a matriz curva oferece maior resistência em função da sua espessura menor, mesmo com o seu alívio lateral, responsável pela queda na tensão de trefilação e aproximação dos dois valores distintos.

No segundo passe, as tensões efetivas impostas ao perfil procedente da matriz curva são maiores que o perfil procedente da matriz reta. Isso se dá já que o primeiro perfil possui regiões pouco deformadas nas extremidades e à necessidade de a deformação total ser a mesma. A tensão de trefilação no segundo passe para o perfil procedente da matriz curva é maior em relação ao perfil procedente da matriz reta.

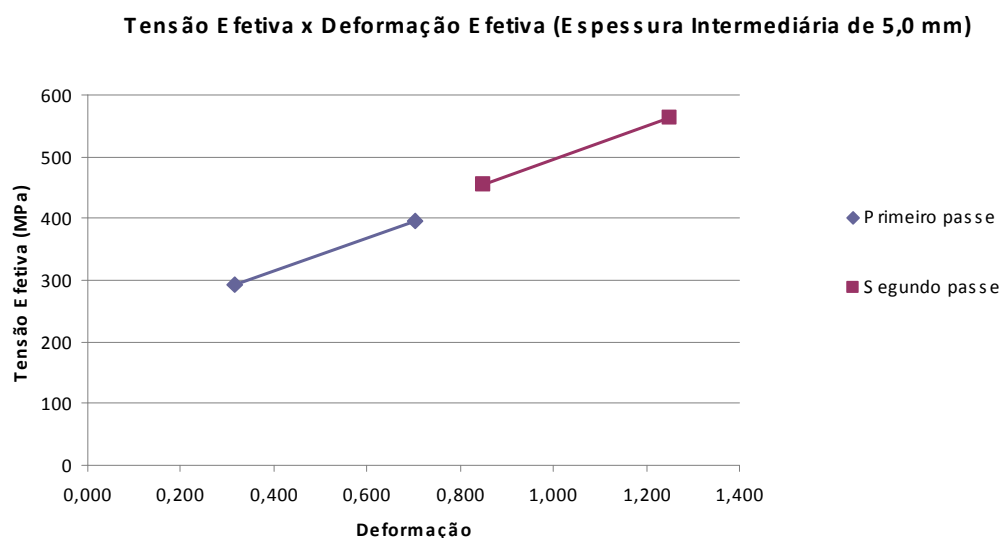


Figura 4.59 – Relação entre a tensão efetiva no ponto crítico da conformação e a deformação efetiva sobre o material para o processo com espessura intermediária de 5,0 mm a partir do vergalhão de diâmetro 9 mm.

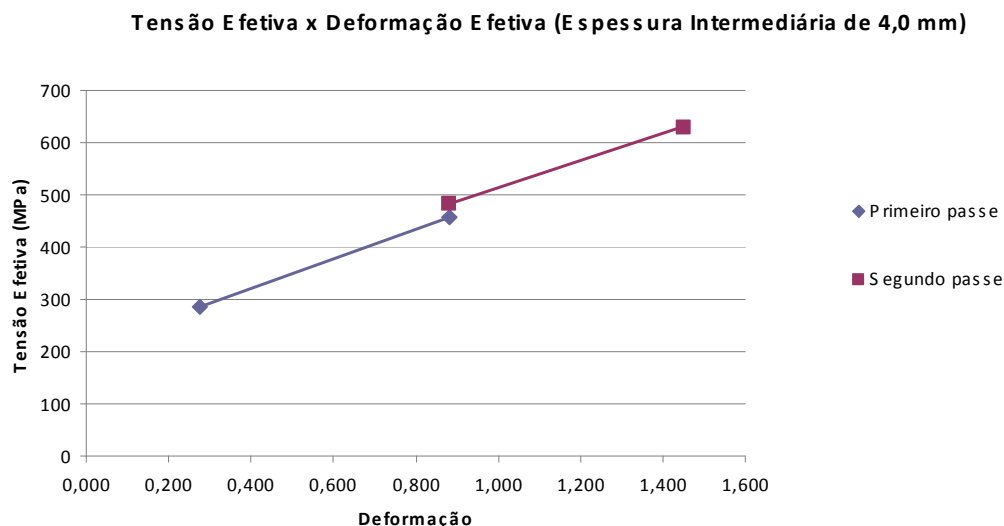


Figura 4.60 – Relação entre a tensão efetiva no ponto crítico da conformação e a deformação efetiva sobre o material para o processo com espessura intermediária de 4,0 mm a partir do vergalhão de diâmetro 9 mm.

Os gráficos relacionando as deformações no primeiro e no segundo passe para cada um dos processos aqui propostos mostram o quanto, no primeiro passe, o processo com a matriz curva deformou mais o material em função da sua menor espessura na região central. A deformação no segundo passe também foi maior para o processo com a matriz curva no primeiro passe em função da geometria do perfil intermediário, o qual possibilita um aumento da deformação nas regiões laterais do perfil.

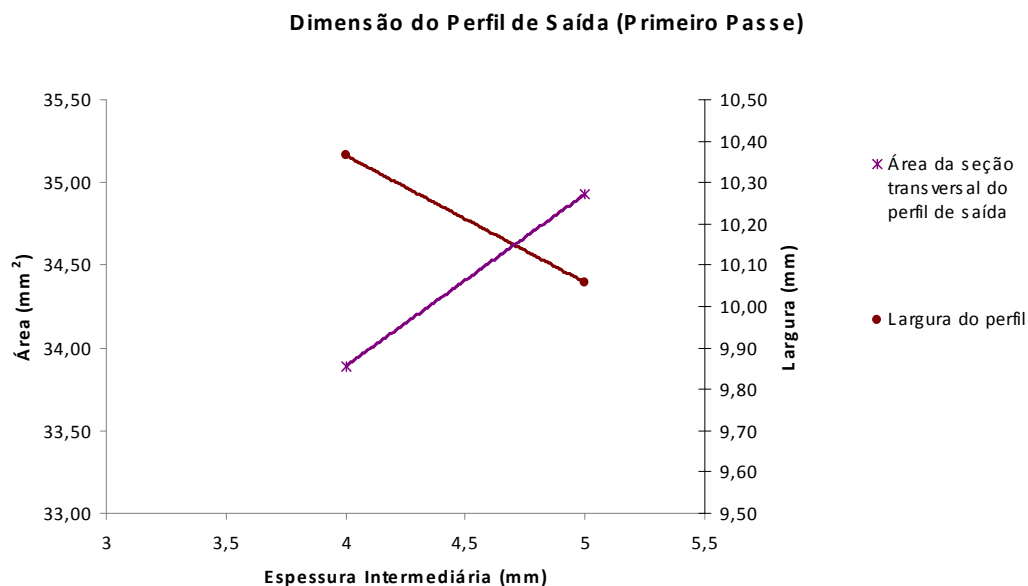


Figura 4.61 – Relação entre as dimensões obtidas no primeiro passe dos processos para vergalhão de diâmetro 9 mm.

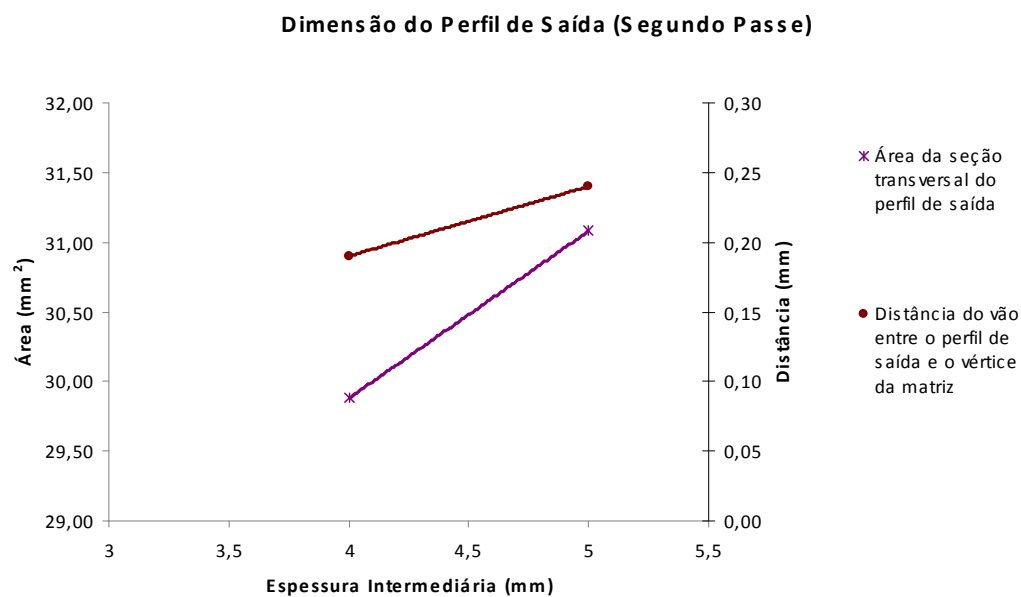


Figura 4.62 – Relação entre as dimensões obtidas no segundo passe dos processos para vergalhão de diâmetro 9 mm.

No primeiro passe, o processo com matriz curva obteve uma deformação maior, implicando em uma redução de área maior e, conseqüentemente, uma área da seção transversal do perfil de saída menor. Contudo, a largura do perfil foi maior,

uma vez que a curva da matriz auxilia no processo de deformação do material no sentido das extremidades laterais.

As dimensões finais obtidas, após o segundo passe, mostram que o processo utilizando a fieira curva no primeiro passe produz melhores resultados para o objetivo de se aproximar o perfil dos vértices da fieira no passe final. Contudo, a forma obtida possui deformações irregulares, obtendo inclusive uma área menor em relação ao processo com uma fieira reta no primeiro passe.

A partir das Tabelas IV.3 e IV.6 compara-se os resultados obtidos para processos semelhantes, porém com diâmetro da matéria prima variável. As Figuras 4.63 e 4.64 mostram a relação dimensional para ambos os casos, seja com espessura intermediária de 4,0 mm com faces curvas no primeiro passe ou com espessura intermediária 5,0 mm e faces retas no primeiro passe.

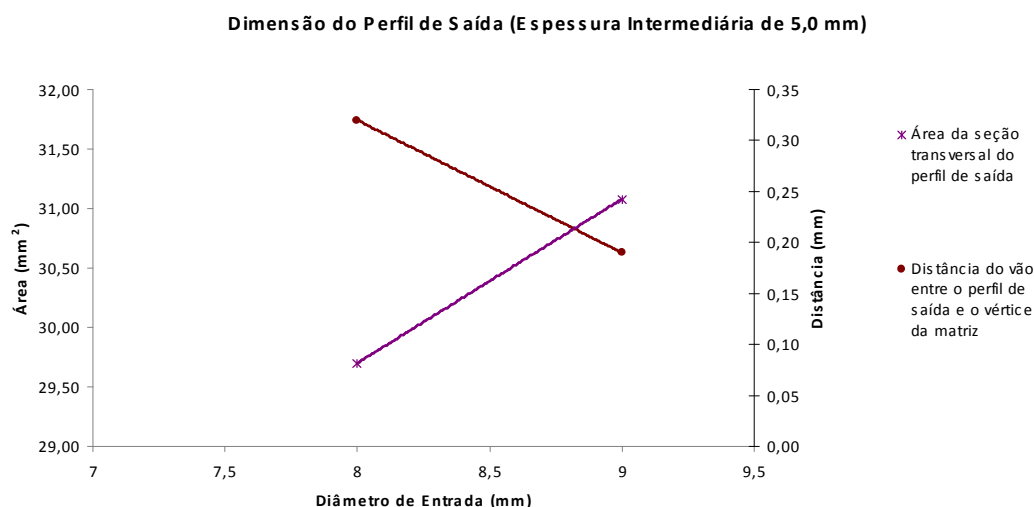


Figura 4.63 – Relação entre as dimensões finais obtidas para processos de espessura intermediária de 5,0 mm utilizando vergalhões de diâmetro 8 e 9 mm.

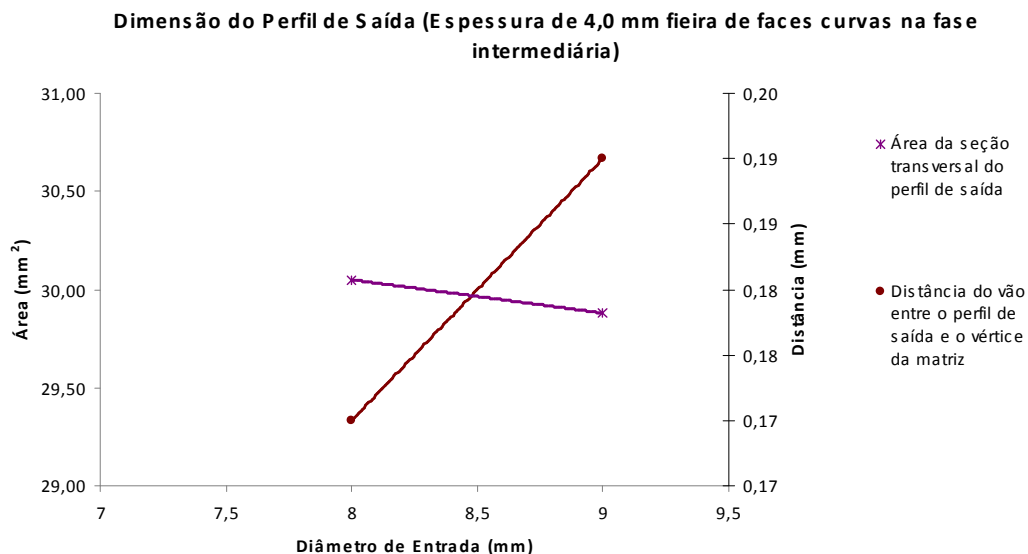


Figura 4.64 – Relação entre as dimensões finais obtidas para processos de espessura intermediária mínima de 5,0 mm, com curva de raio 4,5 mm, utilizando vergalhões de diâmetro 8 e 9 mm.

Para o processo com espessura intermediária de 5,0 mm, o vergalhão de 9 mm obteve uma área maior e uma aproximação dos vértices da fieira melhor. O mesmo ocorreu no processo com fieira intermediária de faces curvas. Portanto, o vergalhão de diâmetro 9 mm forneceu ao produto características dimensionais melhores.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O estudo do processo de fabricação de fios retangulares de cobre eletrolítico através da trefilação somente, permitiu conhecer e entender a influência de diferentes sistemas do processo proposto, entre número de passes e formas de feiras com suas diversas variáveis, permitindo adquirir conhecimentos para se estabelecer melhor uma rota de fabricação utilizando-se a trefilação. Baseado no estudo, pode-se afirmar que:

- Não é possível fabricar o fio de cobre eletrolítico retangular, de dimensões 3,5 x 8,8 mm, a partir do vergalhão de diâmetro 8 mm através do processo de fabricação por trefilação utilizando-se apenas um passe. As dimensões do perfil obtido com um passe não são satisfatórias. Nem mesmo a variação do semi-ângulo de contato da feira influencia de forma positiva sobre o resultado adquirido.
- Realizando o processo de trefilação em um passe através de uma matriz sem restrições laterais, para a espessura de 3,5 mm, a partir de um vergalhão de diâmetro 6, 7 ou 8 mm, dentre os semi-ângulos de trabalho 4, 6 e 8°, todos os processos utilizando os semi-ângulos de 6 e 8° obtiveram uma combinação de resultados mais satisfatória. Define-se então o valor de 8° como ideal, levando em conta a convergência do valor do semi-ângulo a partir das simulações e a proximidade com o valor industrial para este processo de 9°.
- Para o processo de fabricação do fio retangular de cobre a partir de um vergalhão de diâmetro 8 mm, utilizando a trefilação em dois passes na qual o primeiro passe é realizado por uma matriz sem restrições laterais, conclui-se que para os processos com espessura intermediária de 4,0, 4,5 e 5,0 mm, a espessura que fornece o melhor conjunto de resultados é a de 4,5 mm. Contudo, o processo em dois passes da forma proposta não fornece um perfil com dimensões satisfatórias.

- Comparando o processo acima concluído e o processo atual na TTDB, entende-se que as dimensões obtidas no primeiro passe através da trefilação para a espessura de 4,0 mm ou da laminação para a espessura de 4,1 mm, fornecem perfis dimensionais distintos. A largura máxima obtida na laminação é de 11,30 mm, enquanto que na trefilação é de 9,12 mm. Logo, o processo de laminação fornece um perfil intermediário melhor para um processo de fabricação em dois passes.

- Para a proposta da realização do processo em dois passes modificando-se a matriz utilizada no primeiro passe, modelando as superfícies em curva convexa de raios de 4,5 ou 9,0 mm com espessura mínima de 4,0 mm, verificou-se resultados finais bons para os dois raios utilizados no primeiro passe, sendo o processo com raio de 4,5 mm caracterizado detentor de um conjunto de características dimensionais mais equilibrado

- Para o processo proposto em passe único com uma fieira com faces laterais curvas convexas, observou-se que o formato das paredes laterais pouco ou nada influenciam na conformação do vergalhão de diâmetro 8 mm, mantendo-se as faces superior e inferior da fieira retas.

- A utilização de uma matéria prima com diâmetro 9 mm nos processos de trefilação de dois passes, sendo um com matriz de faces superior e inferior curva de raio 4,5 e espessura mínima de 4,0 no primeiro passe e outro com faces retas de espessura de 5,0 mm no primeiro passe, ambas sem restrições laterais, foram mais satisfatórias que quando da utilização do vergalhão de diâmetro 8 mm para os mesmos sistemas.

Finalmente, conclui-se, a partir dos processos com o vergalhão de diâmetro 8 mm como matéria prima, que a substituição do processo industrial de dois passes, utilizando laminação no primeiro e trefilação no segundo, por um processo que utiliza exclusivamente a trefilação, requer no mínimo dois passes. Além disso, o processo com a fieira curva no primeiro passe apresentou resultados mais satisfatórios. A utilização da matéria prima com diâmetro 9 mm apresentou resultado melhores em relação à utilização da matéria prima com diâmetro 8 mm.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir dos estudos realizados no presente trabalho, definiu-se um caminho para o desenvolvimento do processo de trefilação para fios retangulares a partir de vergalhões. Sabe-se que outras formas de processos também podem ser empregadas. Sendo assim, sugere-se os seguintes trabalhos a serem desenvolvidos:

- Projetar novas formas de fieiras visando possibilitar o processo em um ou dois passes.
- Avaliar a influência do aumento do número de passes em concordância com variados formatos de fieiras.
- Verificar o diâmetro ótimo para a fabricação do fio retangular utilizando-se o menor número de passes possível em concordância com formas diferentes de fieiras para a obtenção de um perfil satisfatório.
- Realizar os mesmos estudos para diferentes formas de processo como, por exemplo, a utilização de cassetes ou turk-heads.
- Realizar o processo desenvolvido com fieiras reais.
- Elaborar uma comparação do custo de investimento e do custo de produção entre o processo estudado e proposto e o processo atual na TTDB.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLORA, F. **Engenharia de Custos Técnicos**. 1ª ed., 114 p. São Paulo: Livraria Pioneira Editora, 1985.

CETLIN, P. R., HELMAN, H. **Fundamentos da Conformação**. Mecânica dos Metais. 2ª ed., 263 p. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

CORRÊA, E. C. S. **Aspectos do Encruamento de Metais Previamente Deformados a Frio**. 2004. 233f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais. 2004.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª ed., 653 p. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S. A., 1981.

Encyclopedia of Materials Science and Engineering, 1ª Ed, V. 2. New York, Pergamon Press, 1986.

FONTANA, A.; ROSA, J. A. C.; KAJITA, L. M. **Refino da Estrutura de Arames Temperados e Revenidos para Molas de Válvulas**. Metalurgia & Materiais, p. 651-655, Nov. 1996.

HENSEL, A.; SPITTEL, T. **Kraft und Arbeitsbedarf Bildsamer Formgebung**. Leipzig, Verfahren VEB Deutscher Verlag Fur Grundstoffindustrie, pp. 594, 1978d.

HOSFORD, W. F., CADDELL, R. M. **Metal Forming**. Mechanics and Metallurgy. 3ª ed., 312 p. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

KAWAKAMI, H.; NAKAMURA, M.; OKI, Y.; MURAHASHI, M.; KANESADA, Y. **Influência de Revestimento Intermediário na Trefilação de Arame de Aço-Alto Carbono**. Metalurgia & Materiais, p. 646-650, Nov. 1996.

MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 6^a ed., 307 p. Porto Alegre e Rio de Janeiro: Editora Globo, 1983.

Neves, F. O. **Análise das Tensões Residuais em Tubos Trefilados de Aço Inox ABNT 304**. 2003. 141f. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica de Materiais. Universidade Estadual de Campinas. 2003.

OLIVEIRA, R. S. **Análise da Fabricação de Fio Retangular de Cobre Eletrolítico, com seção 3,5 x 8,8 mm a partir de Vergalhão Cilíndrico de Diâmetro 8,0 mm**. 2009. 98f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais. 2009.

Oliveira, R. S.; SILVA, A. D.; MAGALHÃES, F. C.; CETLIN, P. R.; CAMPOS, H. B. **Análise Dimensional da Seção Transversal do Fio de Cobre Eletrolítico Retangular Produzido pelos Processos de Laminação e Trefilação**. Revista Escola de Minas, 7 p. Ago. 2009.

RENZ, J. P.; KOPP, R. **A New Calibration Method for complex Angles**. Wire Journal International, p. 96-100, Nov. 1998.

SCHMITT, P.; KONRAD, T.; BARK, C. **Laminação a Frio: um Método Antigo Revisitado**. Metalurgia & Materiais, p. 642-645, Nov. 1996.

SEGERLIND, L. J. **Applied Finite Element Analysis**. 1^a ed., 427 p. Nova York: 1984.

STRANG, G.; FIX, G. J. **An Analysis of The Finite Element Method**. 1^a Ed., 306 p. N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1973.

YOSHIDA, K.; MATSUNAGA, M. **Fabrication of Shaped Medical Testing Wire by Drawing**. Wire Journal International, p. 88-92, Out. 2008.

YOSHIDA, K.; SRIPRAPAI, D.; SHINOHARA, T.; IMAI, T. ***Drawing of Stainless Shaped Steel Microwire of 400-600 μm size.*** Wire Journal International, p. 56-61, Mar. 2004.

ANEXOS

ANEXO A – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 1

Este anexo mostra resultados obtidos para a simulação numérica do processo em passe único utilizando semi-ângulo de 4° .

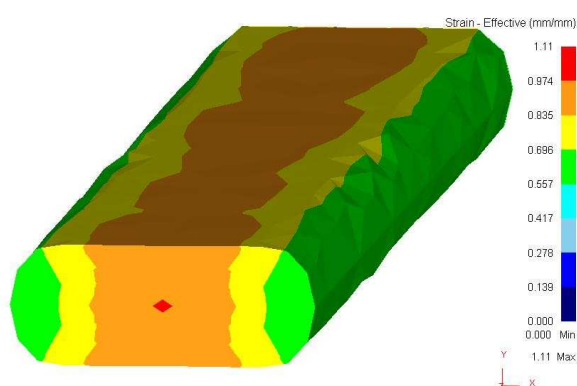


Figura A.1 – Regiões de deformação efetiva ocorrida no vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 4° .

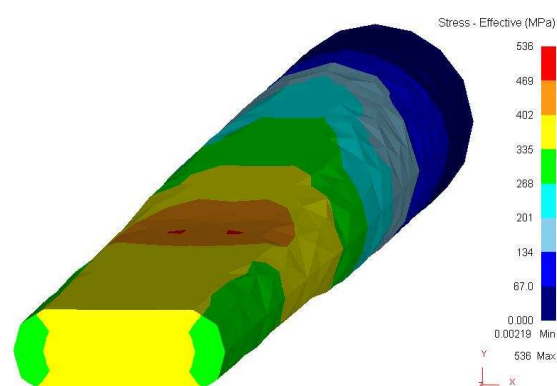


Figura A.2 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 4° na região da ocorrência da conformação.

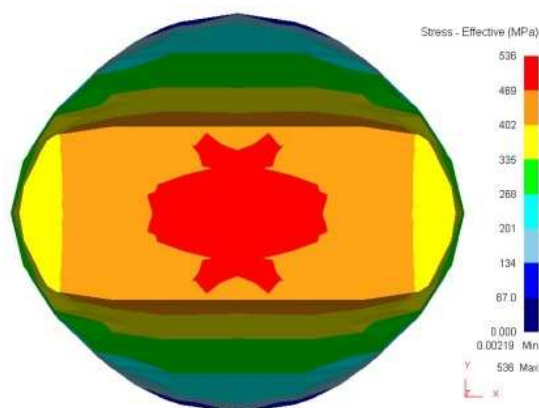


Figura A.3 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 4° no ponto mais crítico da região de ocorrência da conformação.

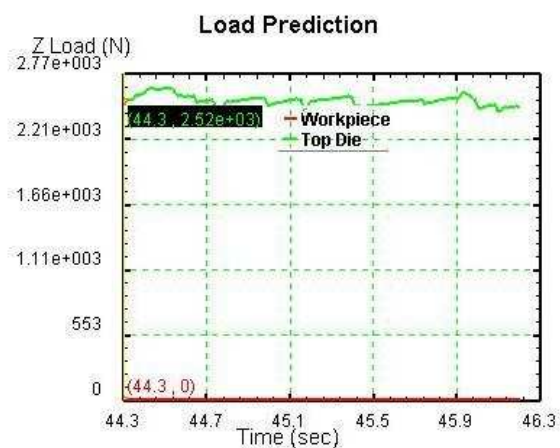


Figura A.4 – Força sobre a fieira de semi-ângulo 4° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 8 mm.

ANEXO B – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 2

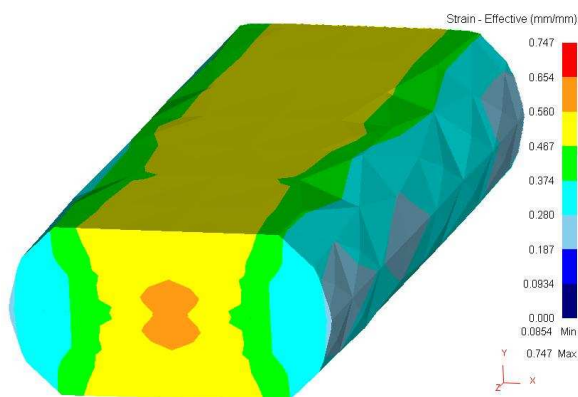


Figura B.1 – Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4°.

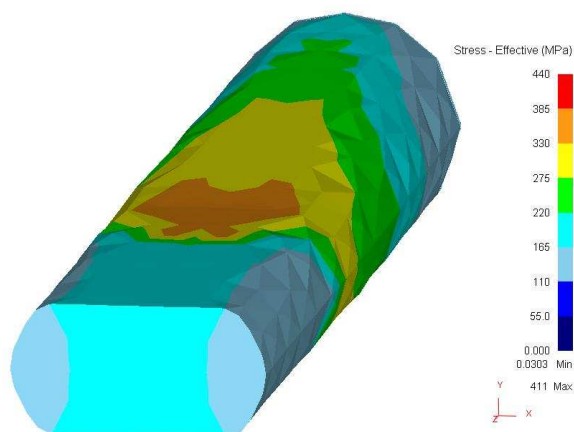


Figura B.2 – Regiões de Tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° na ocorrência da deformação.

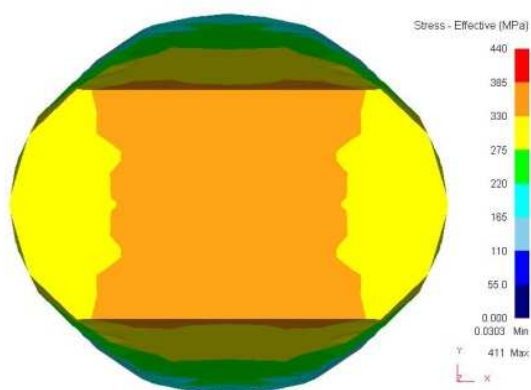


Figura B.3 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

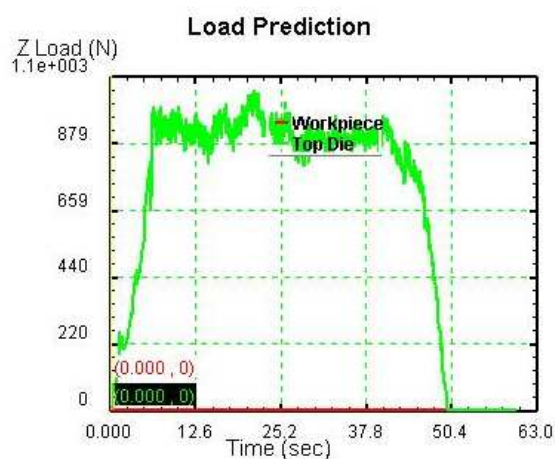


Figura B.4 – Força sobre a matriz de semi-ângulo 4° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 6 mm.

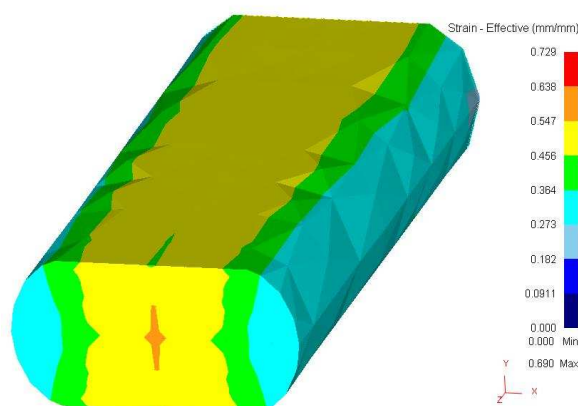


Figura B.5 – Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6°.

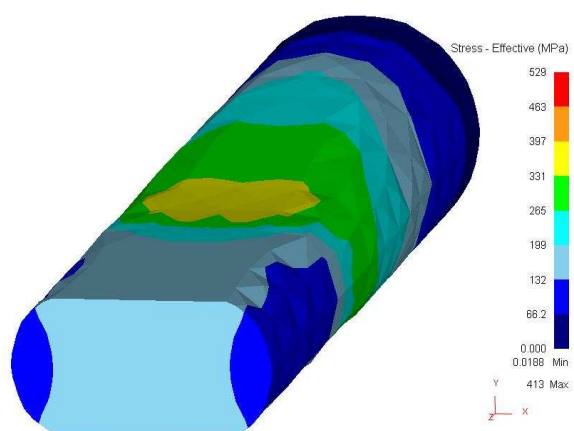


Figura B.6 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° na região da ocorrência da deformação.

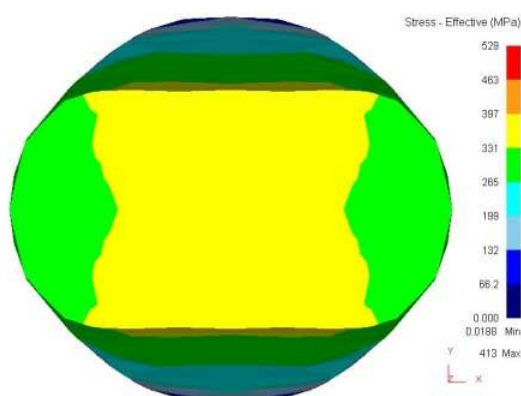


Figura B.7 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

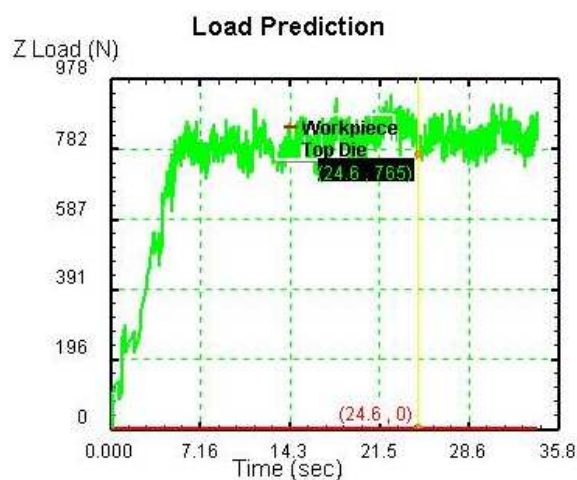


Figura B.8 – Força sobre a matriz de semi-ângulo 6° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 6 mm.

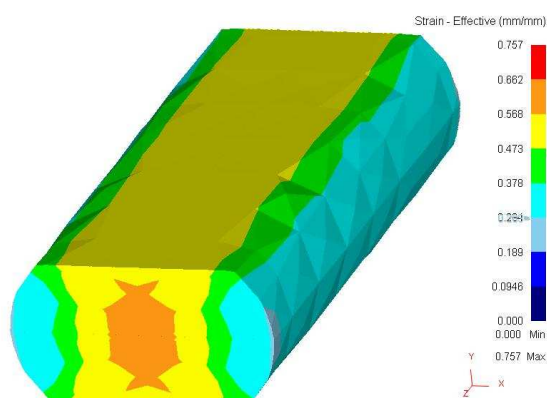


Figura B.9 – Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8°.

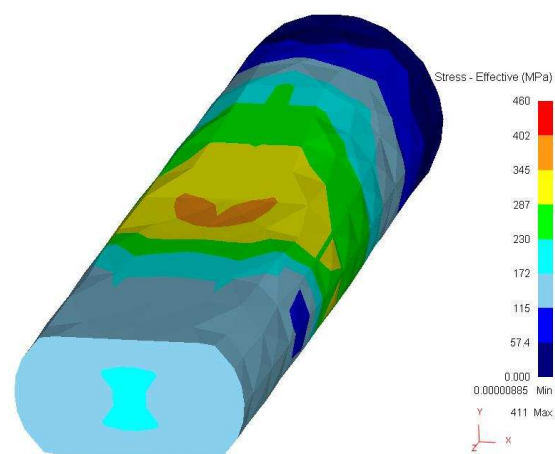


Figura B.10 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° na região da ocorrência da deformação.

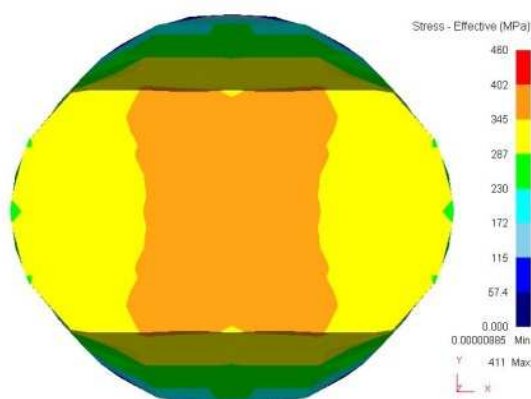


Figura B.11 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 6 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

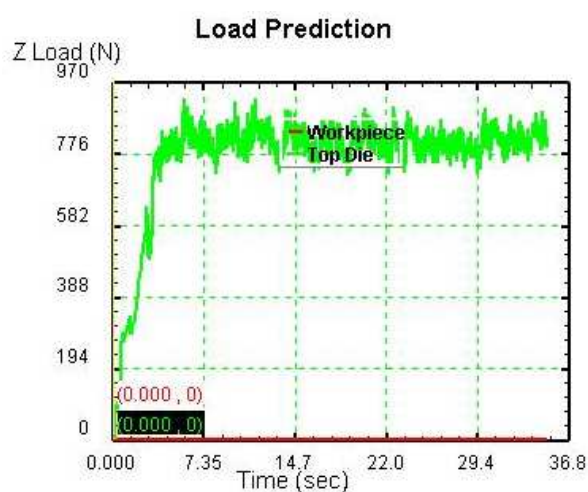


Figura B.12 – Força sobre a matriz de semi-ângulo 8° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 6 mm.

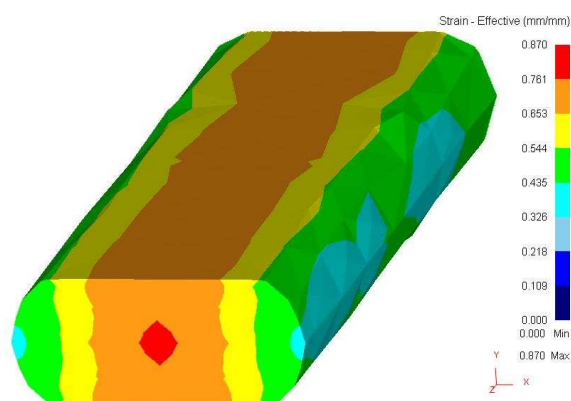


Figura B.13 – Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4°.

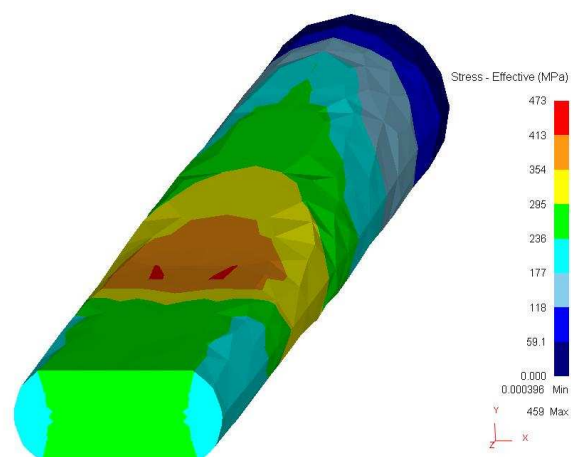


Figura B.14 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° na região da ocorrência da deformação.

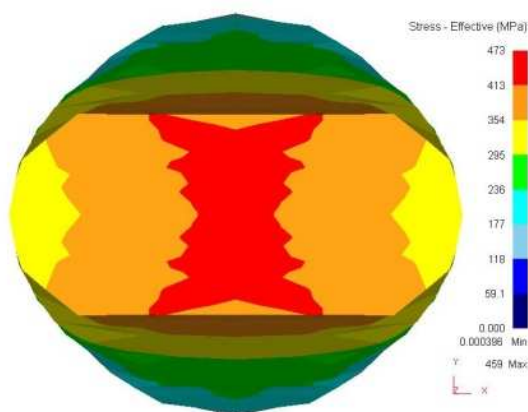


Figura B.15 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

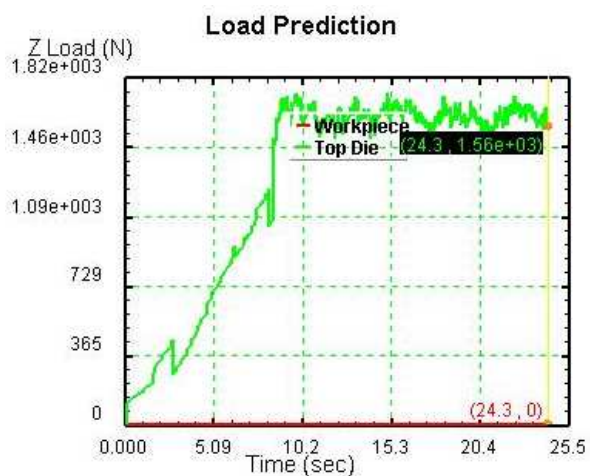


Figura B.16 – Força sobre a matriz de semi-ângulo 4° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 7 mm.

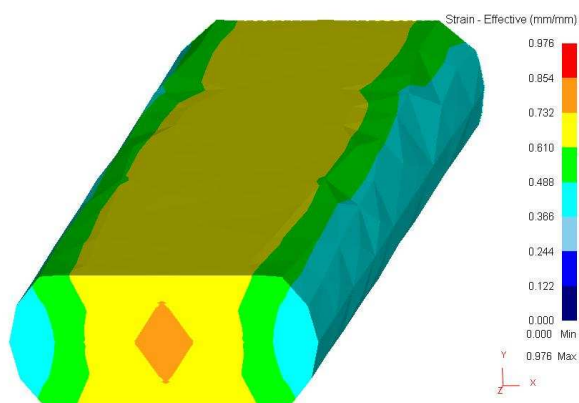


Figura B.17 – Região de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6°.

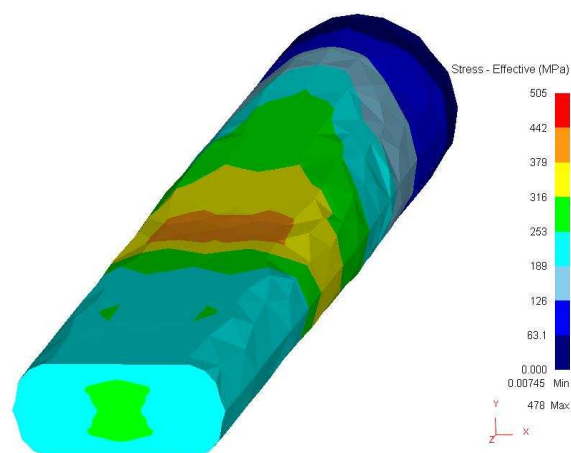


Figura B.18 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° na região da ocorrência da deformação.

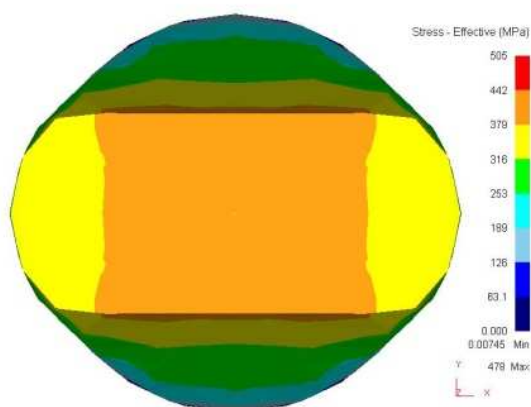


Figura B.19 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

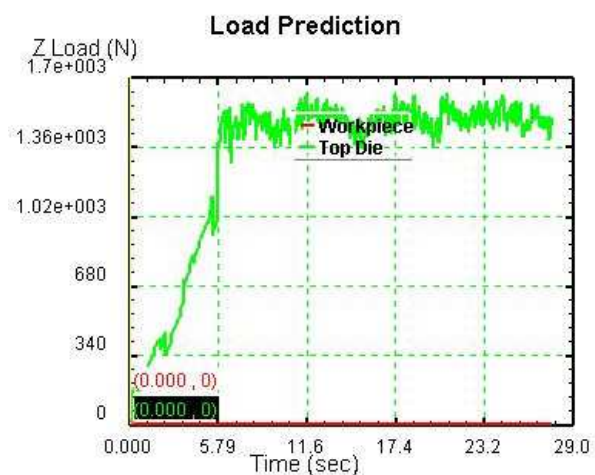


Figura B.20 – Força sobre a matriz de semi-ângulo 6° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 7 mm.

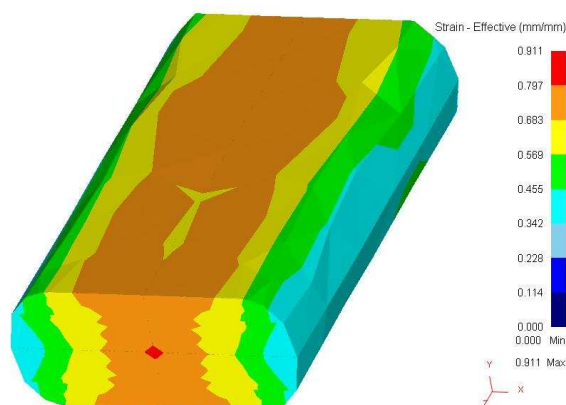


Figura B.21 – Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8°.

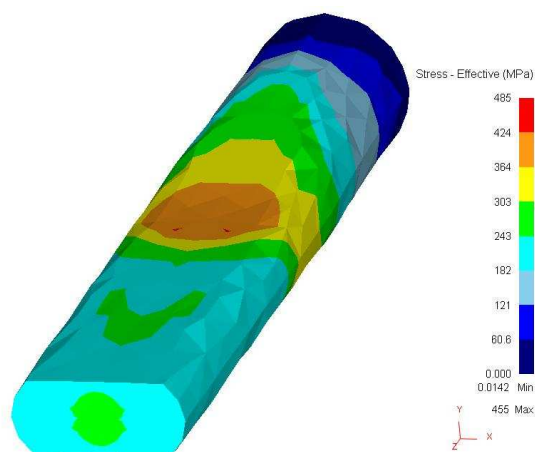


Figura B.22 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° na região da ocorrência da deformação.

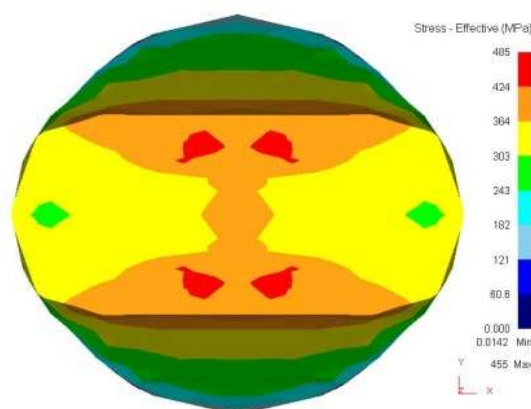


Figura B.23 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 7 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

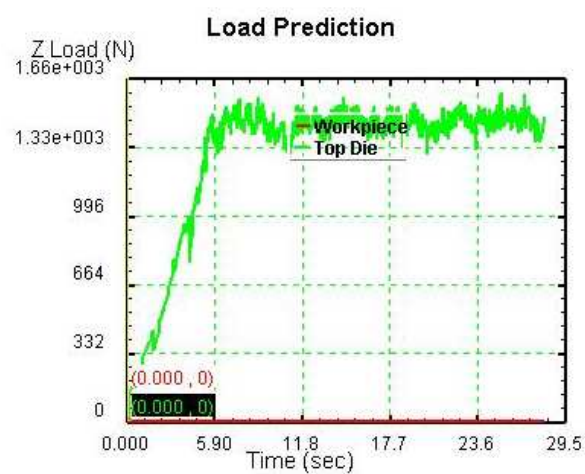


Figura B.24 – Força sobre a matriz de semi-ângulo 8° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 7 mm.

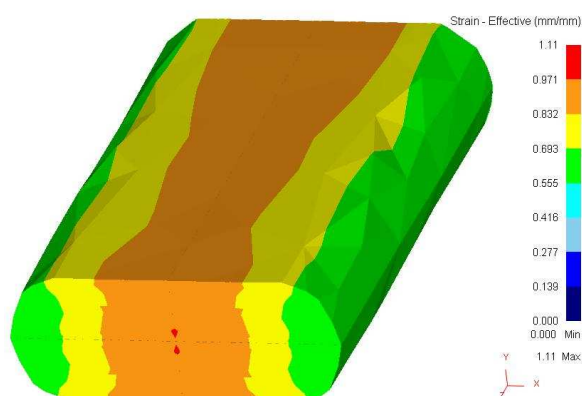


Figura B.25 – Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4°.

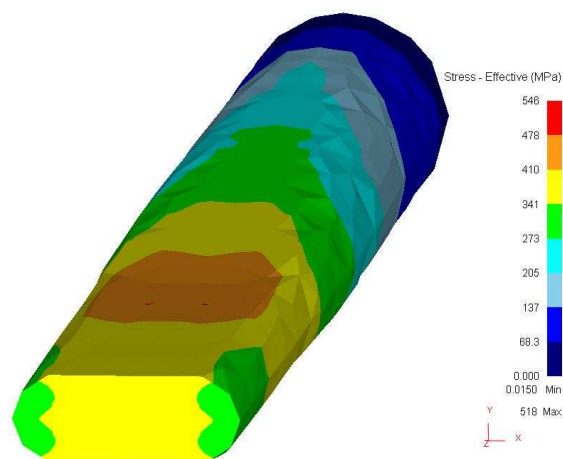


Figura B.26 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° na região da ocorrência da deformação.

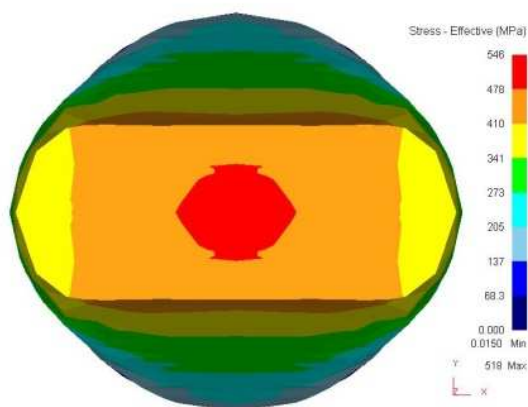


Figura B.27 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 4° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

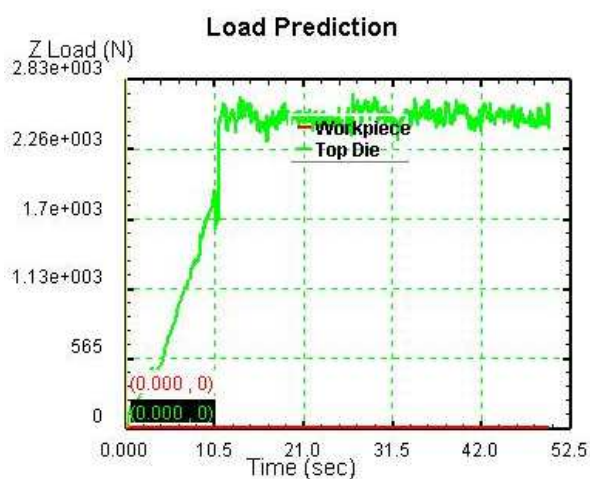


Figura B.28 – Força sobre a matriz de semi-ângulo 4° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 8 mm.

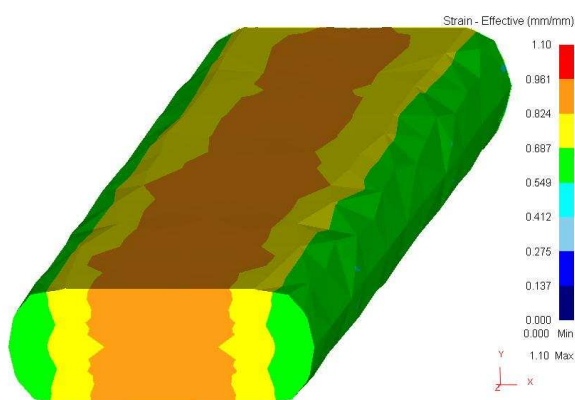


Figura B.29 – Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6°.

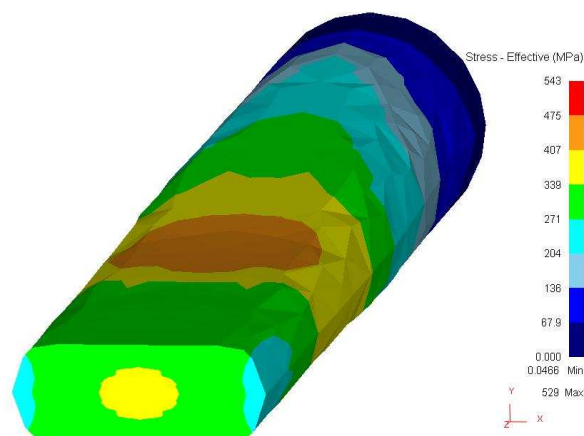


Figura B.30 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° na região da ocorrência da deformação.

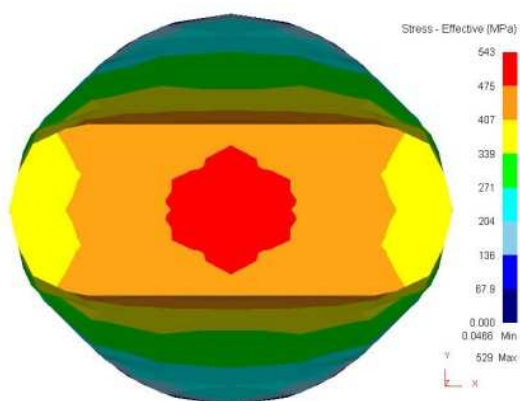


Figura B.31 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 6° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

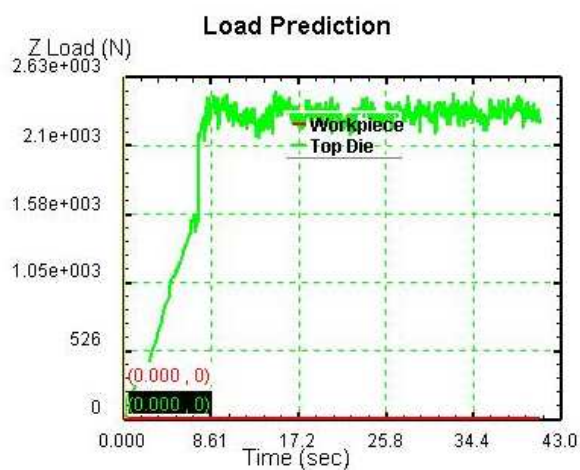


Figura B.32 – Força sobre a matriz de semi-ângulo 6° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 8 mm.

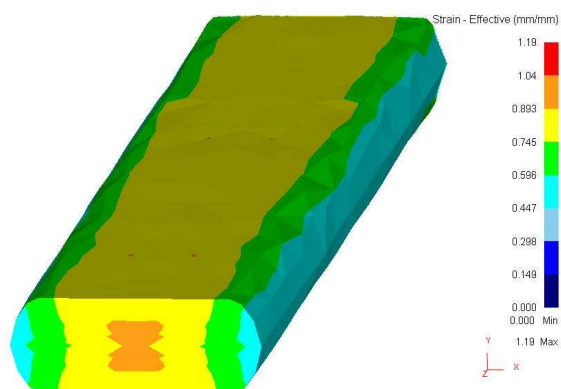


Figura B.33 – Regiões de deformação efetiva ocorrida no material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8°.

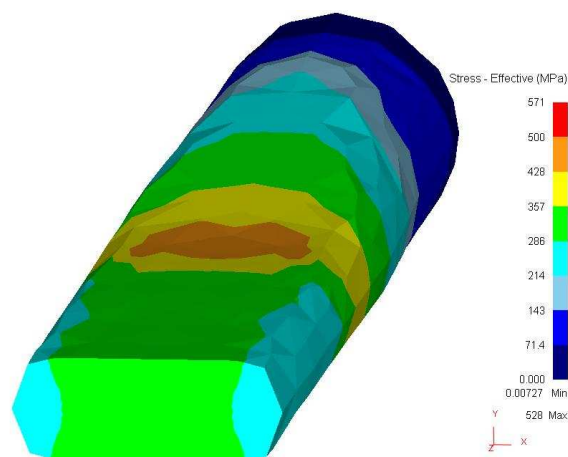


Figura B.34 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° na região da ocorrência da deformação.

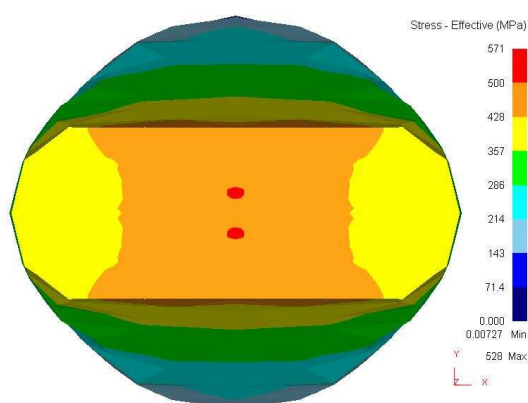


Figura B.35 – Regiões de tensão efetiva sobre o material com diâmetro de 8 mm e semi-ângulo de contato da matriz de 8° no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

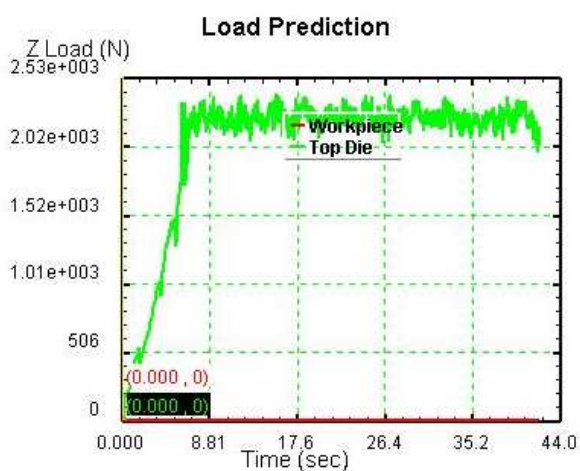


Figura B.36 – Força sobre a matriz de semi-ângulo 8° na direção da trefilação realizada pela tração do quarto do vergalhão de diâmetro 8 mm.

ANEXO C – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 3

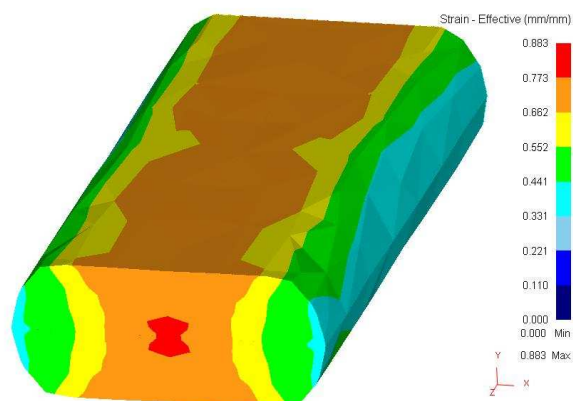


Figura C.1 – Regiões de deformação efetiva no primeiro passe para espessura de 4,0 mm.

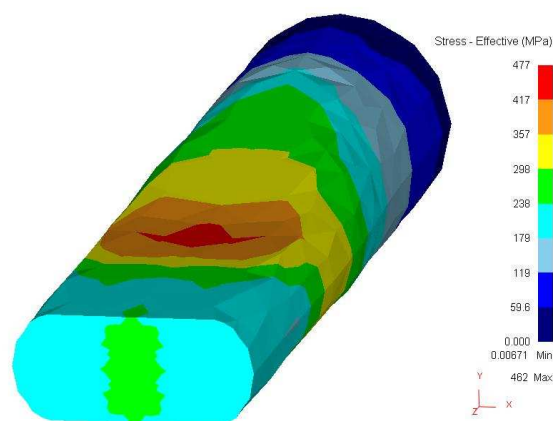


Figura C.2 – Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 4,0 mm.

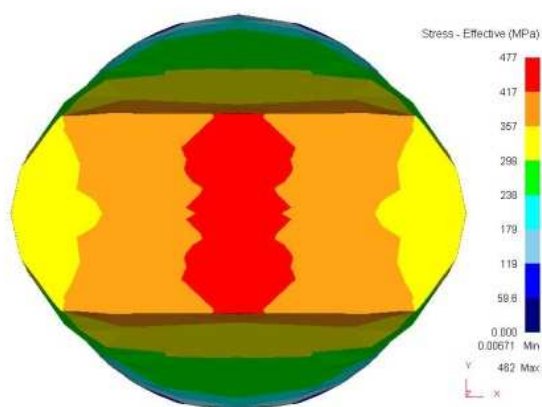


Figura C.3 – Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 4,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

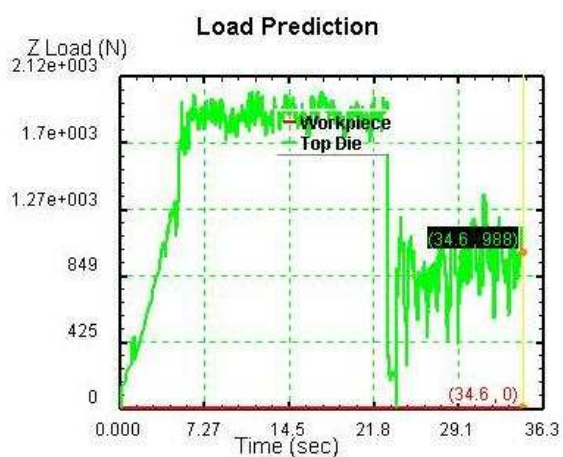


Figura C.4 – Força sobre a matriz em função da trefilação do quarto do vergalhão para o processo com espessura intermediária de 4,0 mm.

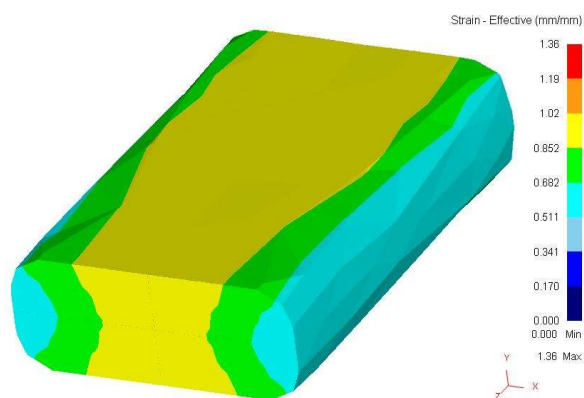


Figura C.5 – Regiões de deformação efetiva no segundo passe após espessura intermediária de 4,0 mm.

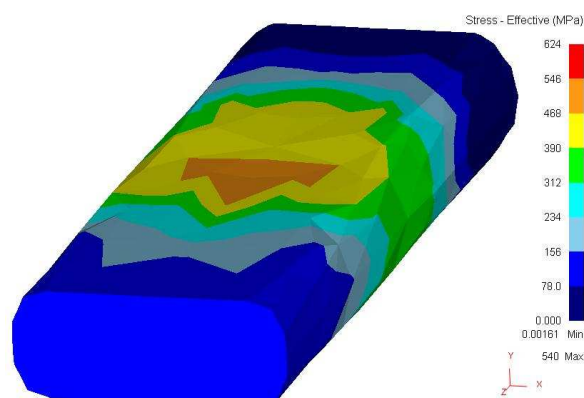


Figura C.6 – Regiões de tensão efetiva no segundo passe a partir da espessura intermediária de 4,0 mm.

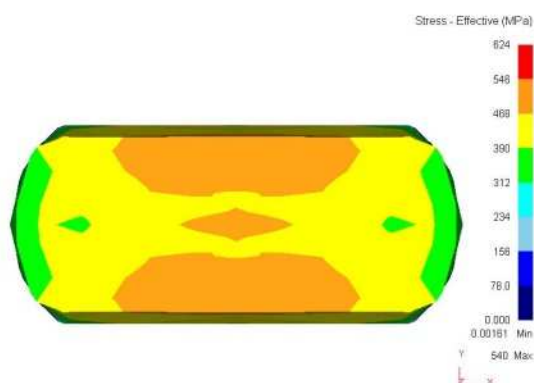


Figura C.7 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão para o segundo passe do processo com espessura intermediária de 4,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

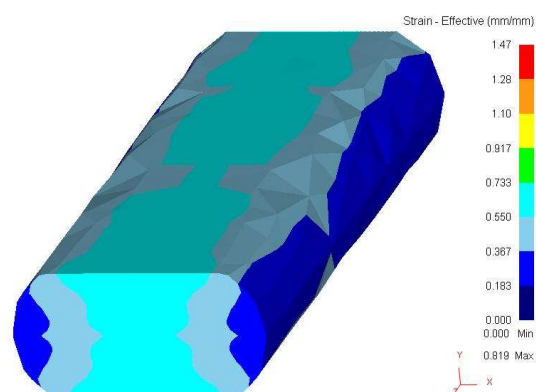


Figura C.8 – Regiões de deformação efetiva no primeiro passe para espessura de 4,5 mm.

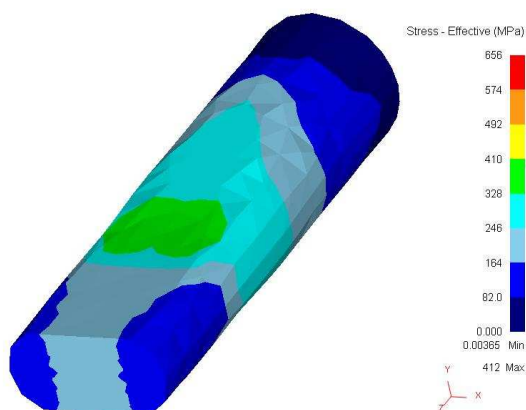


Figura C.9 – Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 4,5 mm.

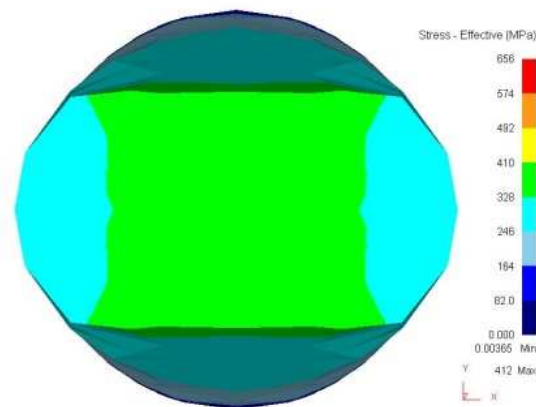


Figura C.10 – Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 4,5 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

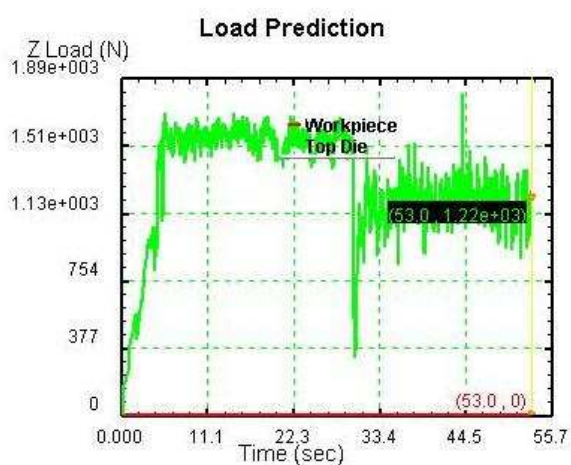


Figura C.11 – Força sobre a matriz em função da trefilação do quarto do vergalhão para o processo com espessura intermediária de 4,5 mm.

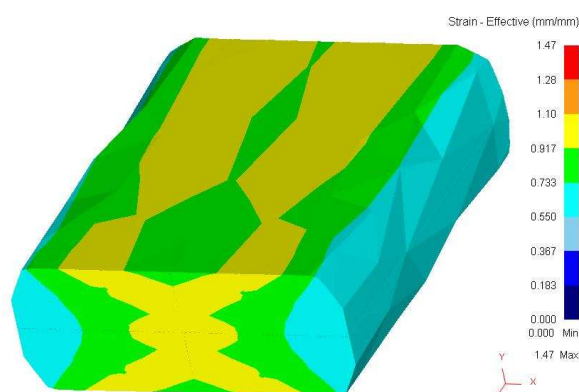


Figura C.12 – Regiões de deformação efetiva no segundo passe após espessura intermediária de 4,5 mm.

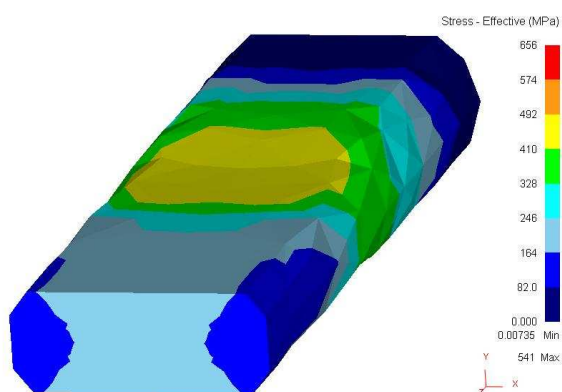


Figura C.13 – Regiões de tensão efetiva no segundo passe a partir da espessura intermediária de 4,5 mm.

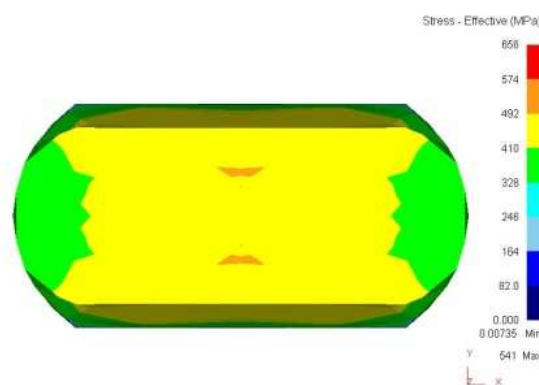


Figura C.14 – Tensão efetiva sobre o vergalhão para o segundo passe do processo com espessura intermediária de 4,5 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

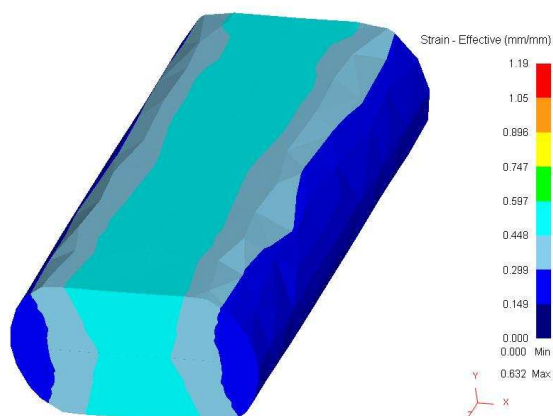


Figura C.15 – Regiões de deformação efetiva no primeiro passe para espessura de 5,0 mm.

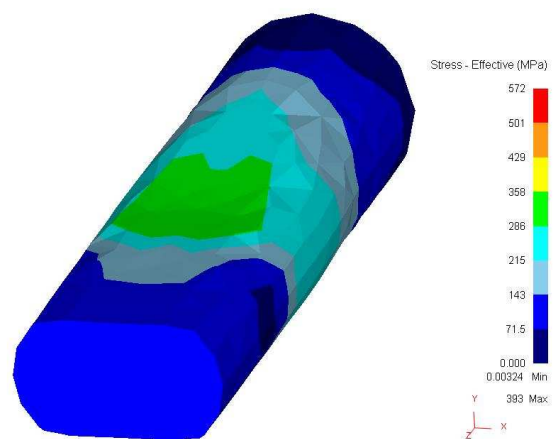


Figura C.16 – Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 5,0 mm.

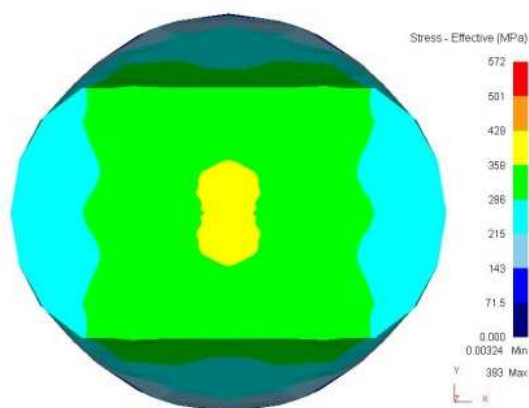


Figura C.17 – Regiões de tensão efetiva no primeiro passe para espessura de 5,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

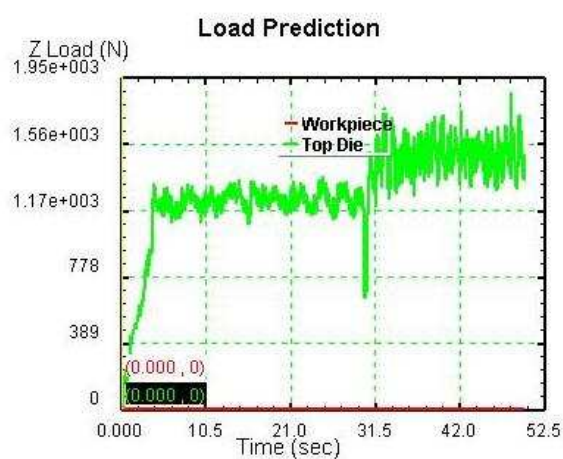


Figura C.18 – Força sobre a matriz em função da trefilação do quarto do vergalhão para o processo com espessura intermediária de 5,0 mm.

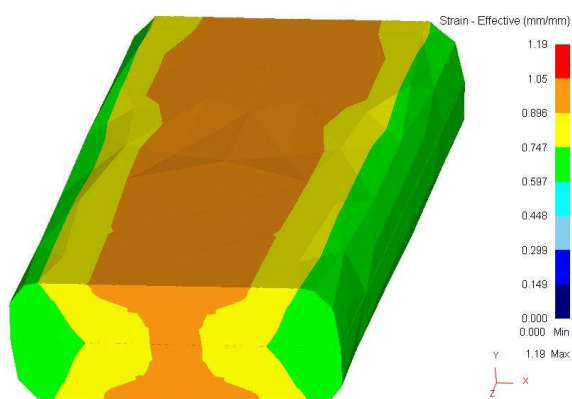


Figura C.19 – Regiões de deformação efetiva no segundo passe após espessura intermediária de 5,0 mm.

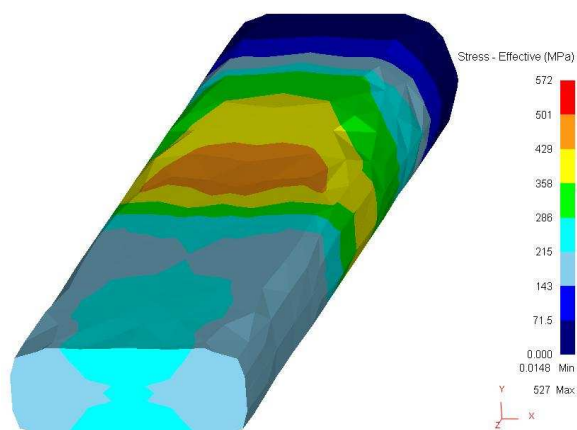


Figura C.20 – Tensão efetiva no segundo passe a partir da espessura intermediária de 5,0 mm.

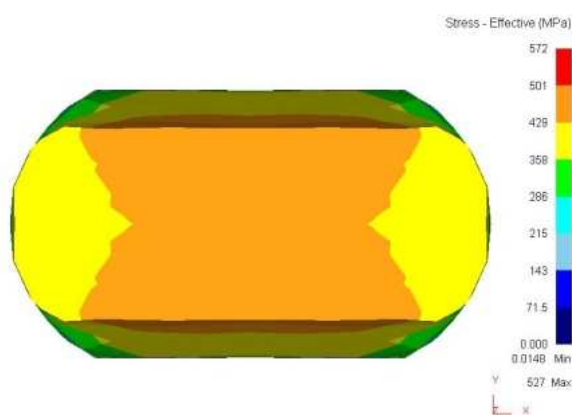


Figura C.21 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão para o segundo passe do processo com espessura intermediária de 5,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

ANEXO D – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 4

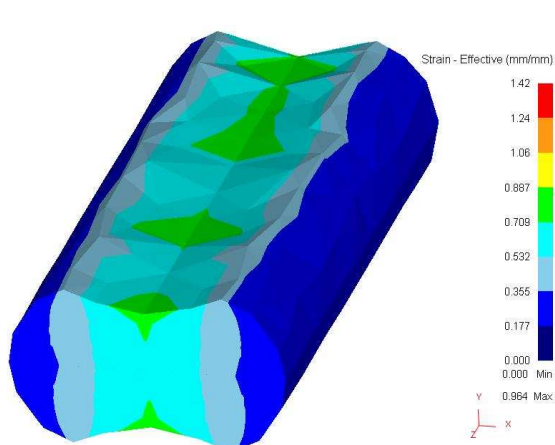


Figura D.1 – Deformação efetiva no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.

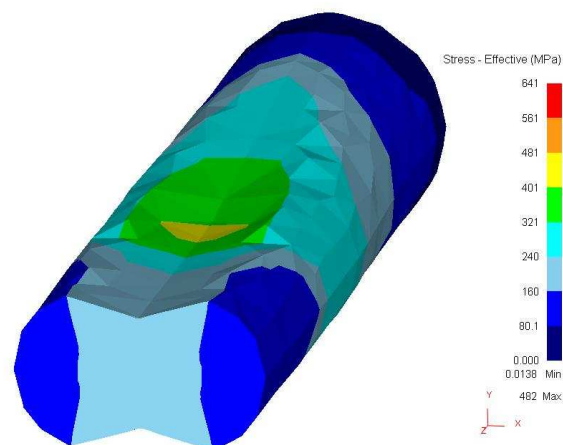


Figura D.2 – Regiões de tensão efetiva no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.

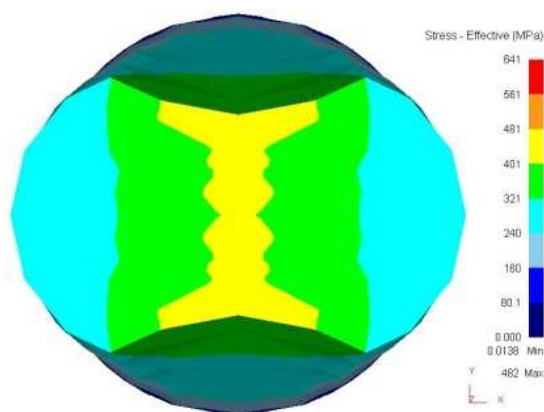


Figura D.3 – Regiões de tensão efetiva no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

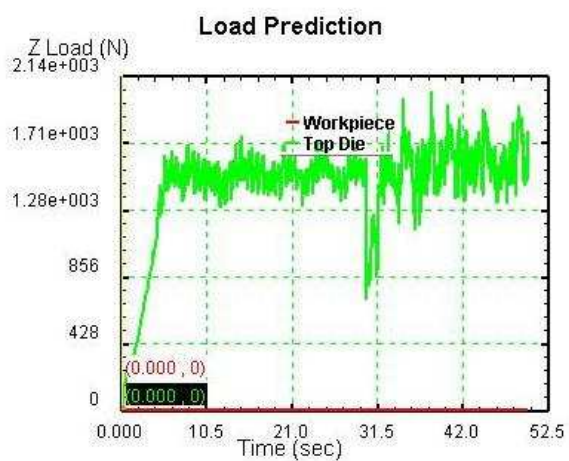


Figura D.4 – Força sobre a matriz em função da trefilação da quarta parte do vergalhão para o processo em dois passes com matriz curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.

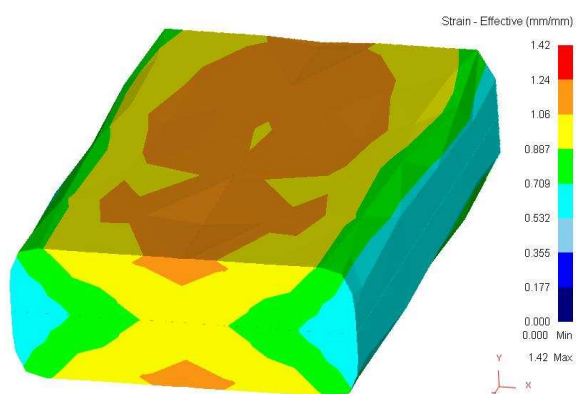


Figura D.5 – Regiões de deformação efetiva no segundo passe após a fiação curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.

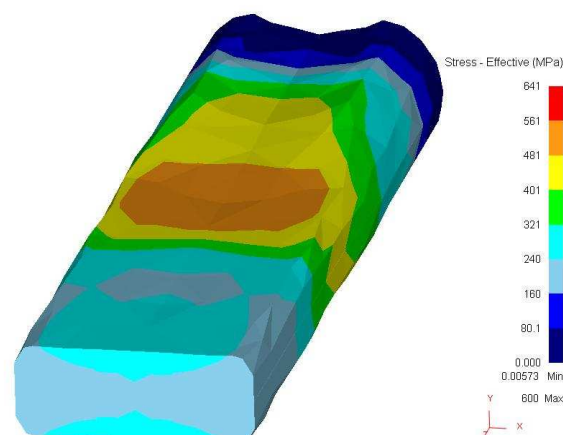


Figura D.6 – Regiões de tensão efetiva no segundo passe após a fiação curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.

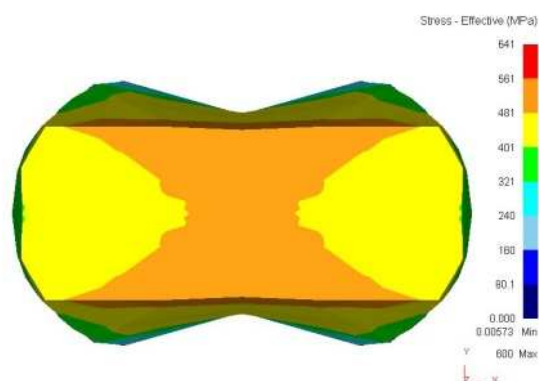


Figura D.7 – Regiões de tensão efetiva no segundo passe após a fiação curva de raio 4,5 mm no primeiro passe no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

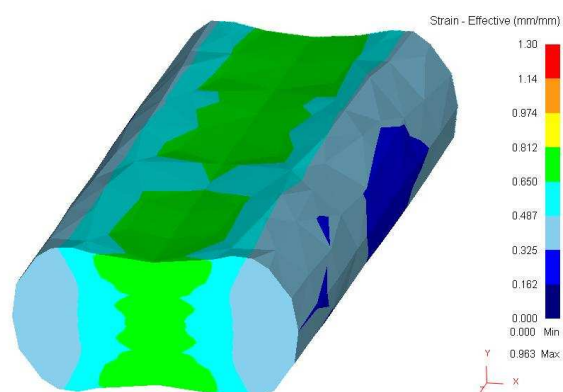


Figura D.8 – Regiões de deformação efetiva no primeiro passe com curva de raio 9,0 mm.

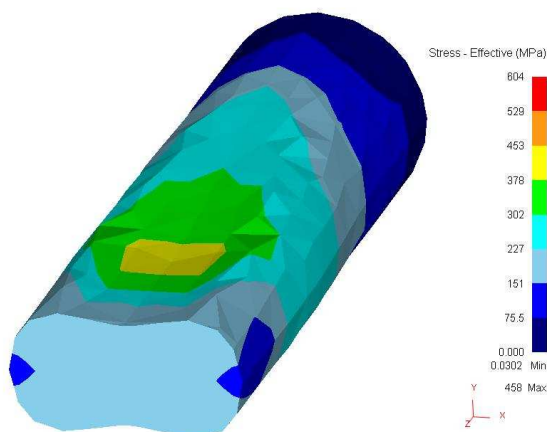


Figura D.9 – Regiões de tensão efetiva no primeiro passe com curva de raio 9,0 mm.

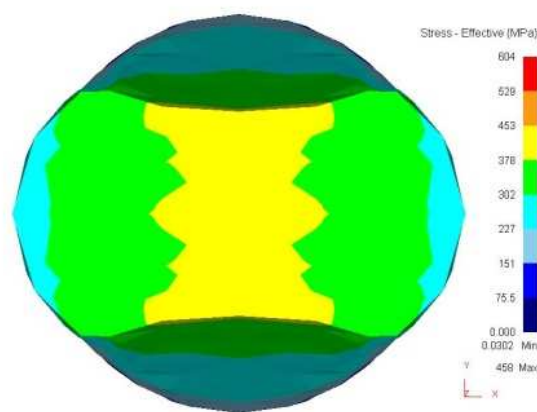


Figura D.10 – Regiões de tensão efetiva no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

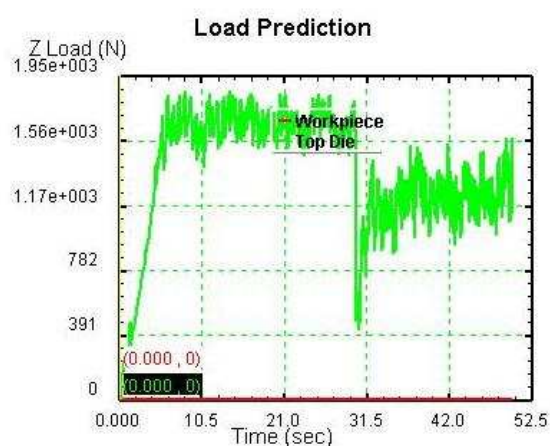


Figura D.11 – Força sobre a matriz em função da trefilação da quarta parte do vergalhão para o processo em dois passes com matriz curva de raio 9,0 mm no primeiro passe.

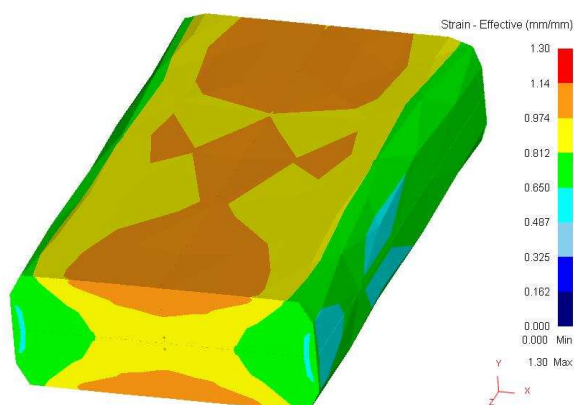


Figura D.12 – Regiões de deformação efetiva no segundo passe após a fiação curva de raio 9,0 mm no primeiro passe.

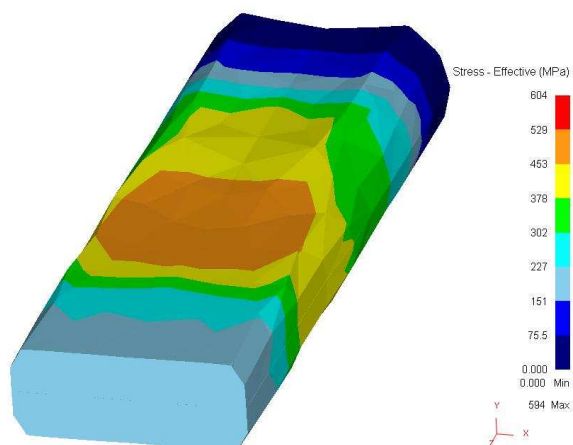


Figura D.13 – Regiões de tensão efetiva no segundo passe após a fieira curva de raio 9,0 mm no primeiro passe.

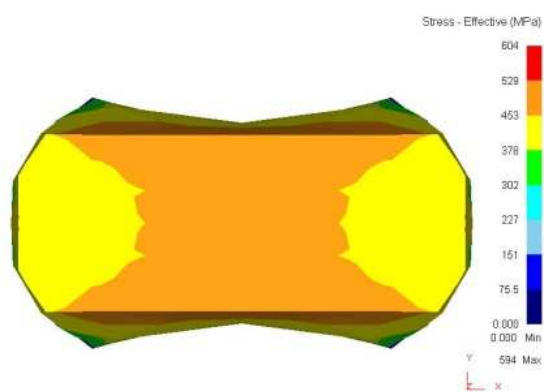


Figura D.14 – Regiões de tensão efetiva no segundo passe após a fieira curva de raio 9,0 mm no primeiro passe no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

ANEXO E – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 5

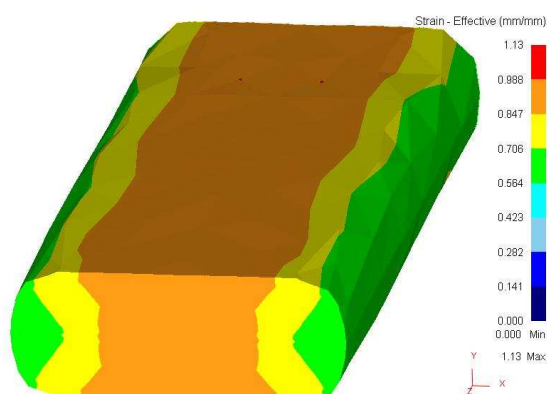


Figura E.1 – Regiões de deformação efetiva ocorrida no vergalhão com diâmetro 8 mm com a fieira curva.

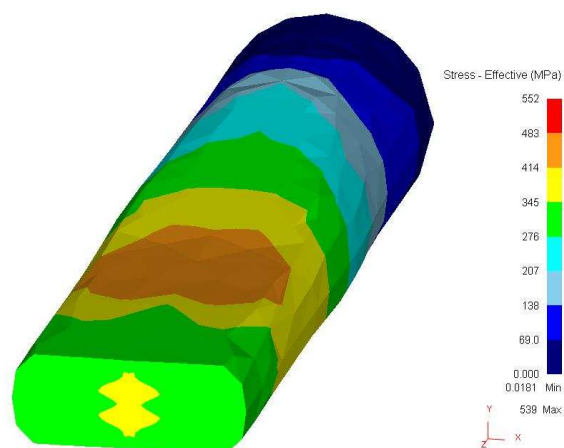


Figura E.2 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm com fieira curva.

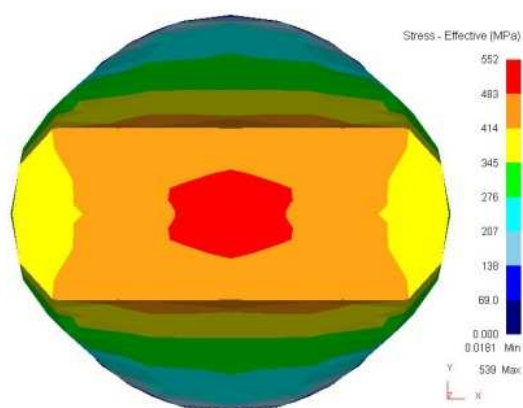


Figura E.3 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão com diâmetro 8 mm e semi-ângulo de contato da fieira de 4° com fieira curva no ponto mais crítico da região de ocorrência da conformação.

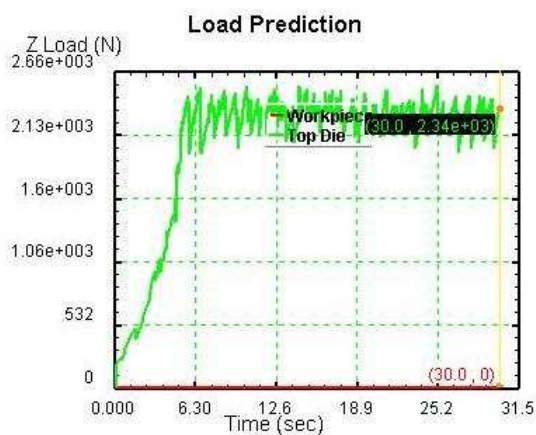


Figura E.4 – Força sobre a matriz em função da trefilação da quarta parte do vergalhão para o processo com matriz não-convencional.

ANEXO F – Figuras de análise da simulação numérica da Etapa 6

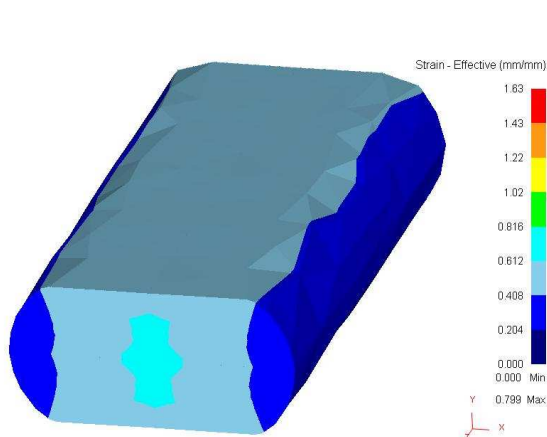


Figura F.1 – Regiões de deformação efetiva Sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe para espessura de 5,0 mm

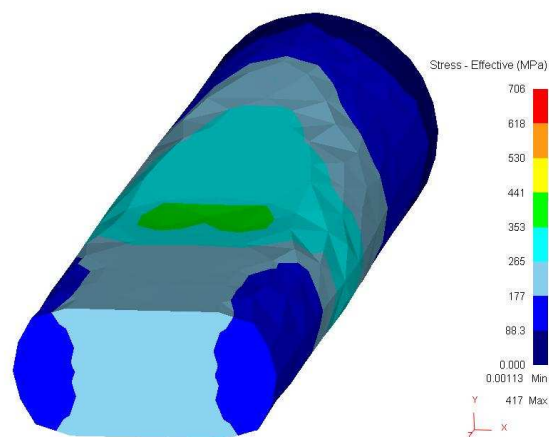


Figura F.2 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe para espessura de 5,0 mm.

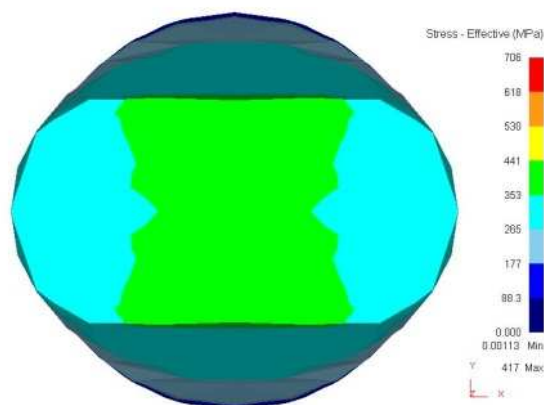


Figura F.3 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe para espessura de 5,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

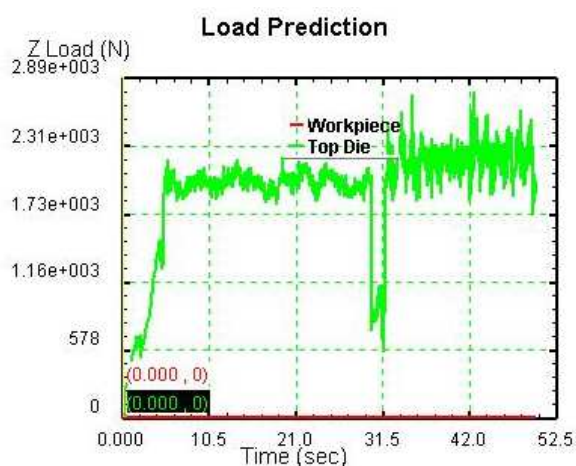


Figura F.4 – Força sobre a matriz em função da trefilação do quarto do vergalhão de diâmetro 9,0 mm para o processo com espessura intermediária de 5,0 mm.

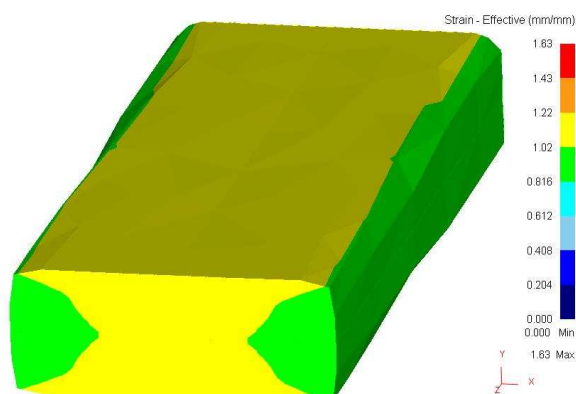


Figura F.5 – Regiões de deformação efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe para espessura intermediária de 5,0 mm.

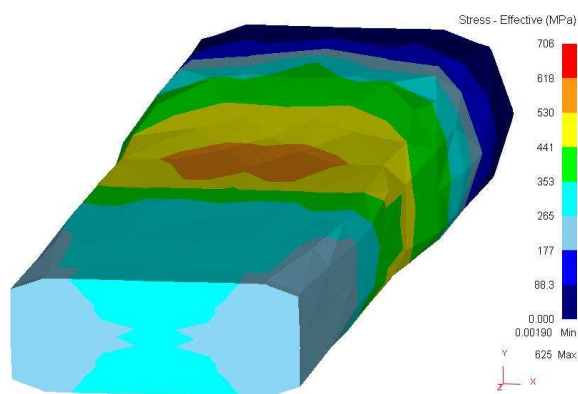


Figura F.6 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe a partir da espessura intermediária de 5,0 mm.

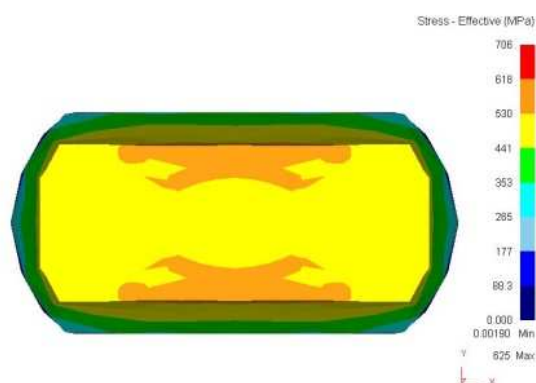


Figura F.7 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm para o segundo passe do processo com espessura intermediária de 5,0 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

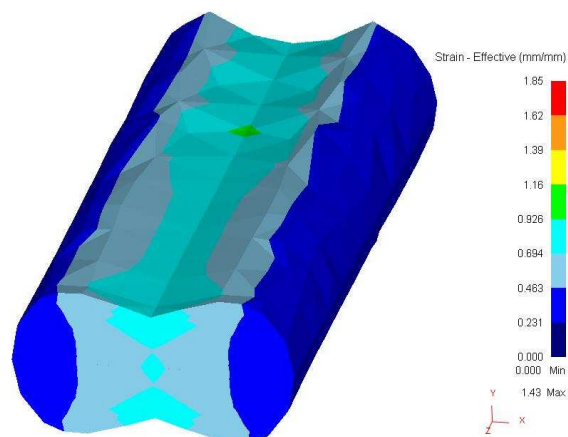


Figura F.8 – Regiões de deformação efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.

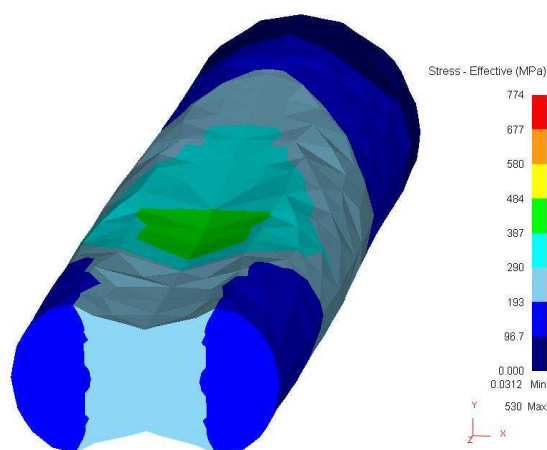


Figura F.9 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm.

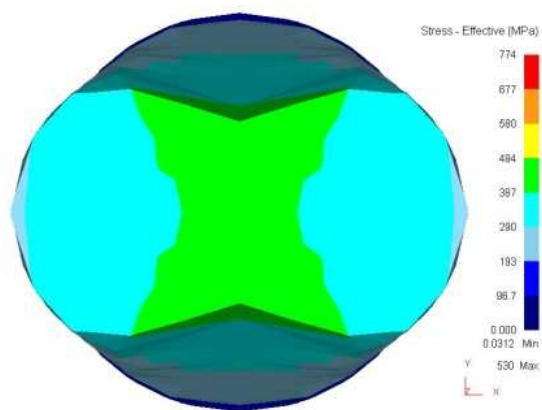


Figura F.10 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no primeiro passe com curva de raio 4,5 mm no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

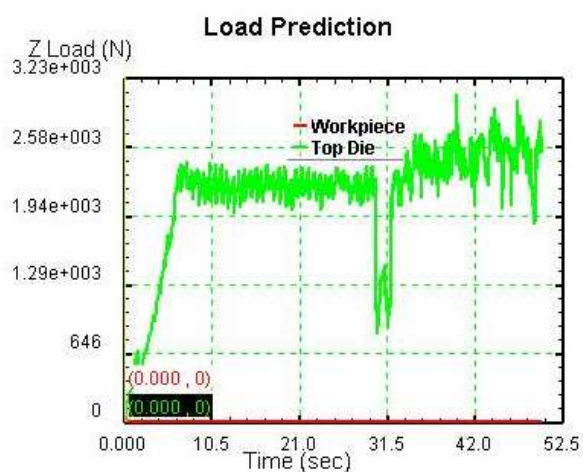


Figura F.11 – Força sobre a matriz em função da trefilação da quarta parte do vergalhão de diâmetro 9,0 mm para o processo em dois passes com matriz curva de raio 4,5 mm no primeiro.

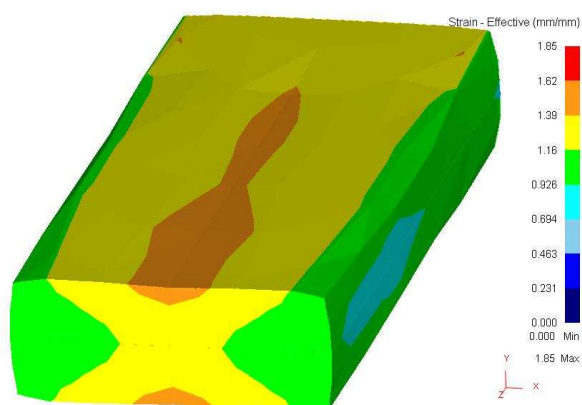


Figura F.12 – Regiões de deformação efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe após a primeira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.

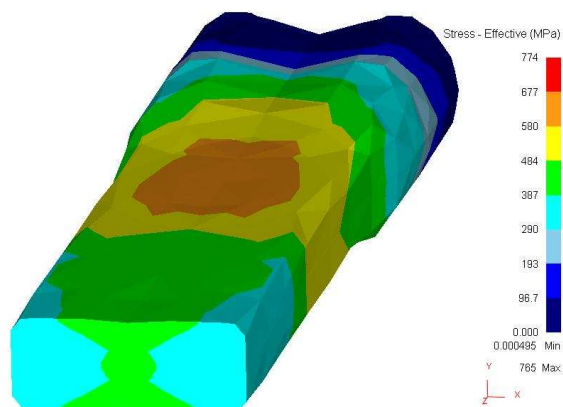


Figura F.13 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe.

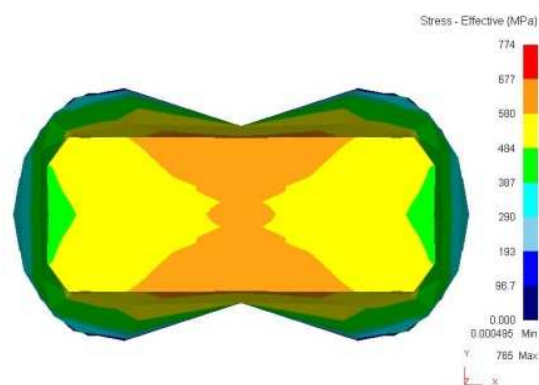


Figura F.14 – Regiões de tensão efetiva sobre o vergalhão de diâmetro 9 mm no segundo passe após a fieira curva de raio 4,5 mm no primeiro passe no ponto mais crítico da região de ocorrência da deformação.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)