

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

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

Roberto de Souza Oliveira

**Belo Horizonte
2009**

Roberto de Souza Oliveira

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

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

Roberto de Souza Oliveira

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

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 Mecânica

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2009

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO

UFMG - Carimbo

“ANÁLISE DA FABRICAÇÃO DE FIO RETANGULAR DE COBRE ELETROLÍTICO, COM SEÇÃO DE 3,5 x 8,8 mm A PARTIR DE VERGALHÃO CILÍNDRICO DE DIÂMETRO 8mm”

ROBERTO DE SOUZA OLIVEIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **“Mestre em Engenharia Mecânica”**, na área de concentração de **“Processos de Fabricação”**.

Dissertação aprovada em: 27 de Maio de 2009.

Por:

Prof. Haroldo Béria Campos

Orientador – Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG

Prof. Paulo Roberto Cetlin

Co-Orientador – Doutor, Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFMG

Prof. Paulo Eustáquio de Faria

Examinador – Doutor, Departamento de Engenharia de Produção, UFMG

Frederico de Castro Magalhães

Examinador – Doutor, FAPEMIG / UFMG

Dedico a Júnia, esposa e companheira, que soube dosar conhecimento e sabedoria para compreender e incentivar em todos os momentos.

A minha filha Sophia, pela doçura de criança que elimina todas as dificuldades pela simplicidade e inocência.

Aos meus pais, Manoel (in memoriam) e Geni, sempre incentivadores de meus desafios e confiantes em minha capacidade.

Aos meus irmãos Ronei, Teofaney e Telson, exemplos de caráter e amizade incondicional.

AGRADECIMENTOS

Ao Mestre, Professor Doutor Haroldo Béria Campos, pela orientação e dedicação, mesmo em momentos de dificuldades e limitações físicas se dispôs a participar ativamente deste trabalho.

Ao Professor Doutor Paulo Roberto Cetlin, Co-Orientador que foi decisivo em momento de grande dificuldade de prosseguimento dos trabalhos e forneceu subsídios e conhecimento, para viabilizar a conclusão desta empreitada.

Ao companheiro Arisson Carvalho de Araújo, que participou comigo desde o preparatório para os exames de qualificação no processo seletivo até o encerramento dos trabalhos. Obrigado pelo incentivo e apoio em todos os momentos.

Ao Doutor Frederico de Castro Magalhães e Doutora Elaine Carballo Siqueira Corrêa, pela colaboração e valiosa participação nas etapas experimentais e de simulação.

Aos familiares da minha esposa e aos meus, pelo entendimento da limitação de disponibilidade de tempo e apoio no dia a dia.

À Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda, pelo apoio recebido. Agradeço particularmente ao Diretor Presidente, Sr. Robson Tadeu Lage Alves, ao Gerente de Projetos, Sr. José Maria Ewerton Sampaio e ao Engenheiro Chefe de Projetos, Sr. Fernando César de Moura Guañabens, pela valorização e incentivo aos trabalhos.

Aos funcionários da Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda, Sr. Augusto Henrique Cascelli, pelo auxílio na execução dos desenhos no Solid Works. Ao pessoal da linha de fabricação de fios, principalmente ao Coordenador do Setor, Sr. Alexandre Medeiros Chaves e ao Líder de Equipe, Sr. Otávio Renato Alvim, pela disponibilidade e acesso ao processo fabril, além da experiência prática transmitida durante a execução das atividades.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente ajudaram e apoiaram em diversos aspectos deste trabalho.

A minha esposa Júnia, a quem dediquei este trabalho. Sem ela esta realização pessoal seria impossível. O conhecimento adquirido pelo caminho similar já transposto, pelo companheirismo e incentivo me facilitou e ajudou a transpor todas as barreiras e dificuldades.

“Do mundo dos fatos não há caminho
que nos conduza ao mundo dos valores,
mas do mundo dos valores há sempre um
caminho que nos leva ao mundo dos fatos”

Albert Einstein

SUMÁRIO

Resumo	X
Abstract	XI
Lista de Figuras	XII
Lista de Tabelas	XV
Lista de Notações	XVI
1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Colocação do problema	18
1.2. Objetivos do trabalho	22
1.3. Justificativas	23
1.4. Conteúdo	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. Cobre eletrolítico	27
2.2. Laminação a frio	29
2.2.1. Cilindros de laminação	31
2.2.2. Deformações durante a laminação	33
2.3. Trefilação	36
2.3.1. Fieira	37
2.3.2. Deformação durante a trefilação	39
2.3.3. Tensão na trefilação de materiais	41
2.4. O método dos elementos finitos	42
2.4.1. O método dos elementos finitos aplicado à conformação de metais	44
2.4.1.1. Formulação rígido-plástica ou rígido-viscoplástica	45
2.4.1.2. Formulação elasto-plástica – Abordagem estática implícita	45
2.4.1.3. Formulação elasto-plástica – Abordagem estática explícita	45
2.4.1.4. Formulação elasto-plástica – Abordagem dinâmica explícita	46
3. METODOLOGIA	47
3.1. Desenvolvimento do trabalho	47
3.2. O procedimento experimental	49

3.3. Caracterização da matéria prima (vergalhão de cobre Ø8 mm)	50
3.3.1. Ensaio de tração do vergalhão de cobre Ø8 mm	53
3.3.2. Ensaio de dureza do vergalhão de cobre Ø8 mm	55
3.4. Laminação do vergalhão de cobre (Processo intermediário)	56
3.4.1. Ensaio de tração do material laminado	57
3.4.2. Ensaio de dureza do material laminado	58
3.4.3. Simulação numérica do processo de laminação	59
3.5. Trefilação do fio retangular	61
3.5.1. Ensaio de tração do fio trefilado	63
3.5.2. Ensaio de dureza do fio trefilado	65
3.5.3. Simulação numérica do processo de trefilação	65
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	69
4.1. Análise da matéria prima (Vergalhão de cobre Ø8 mm)	69
4.1.1. Ensaio de tração da matéria prima (Vergalhão de cobre Ø8 mm)	71
4.1.2. Ensaio de dureza da matéria prima (Vergalhão de cobre Ø8 mm)	74
4.2. Análise do processo intermediário de laminação	74
4.2.1. Ensaio de tração do material laminado	75
4.2.2. Ensaio de dureza do material laminado	77
4.2.3. Cálculo teórico do perfil do material laminado	78
4.2.4. Simulação numérica do processo de laminação	80
4.3. Análise do processo de trefilação	86
4.3.1. Ensaio de tração do material trefilado	87
4.3.2. Ensaio de dureza do fio trefilado	89
4.3.3. Simulação numérica do processo de trefilação	90
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
5.1. Conclusões	94
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	95
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

RESUMO

A utilização do fio retangular de cobre eletrolítico como componente principal na fabricação de enrolamentos de transformadores elétricos, está diretamente ligada as suas dimensões e propriedades mecânicas que são conferidas durante o processo de fabricação dos mesmos. O principal objetivo deste trabalho consiste em avaliar o processo atual de fabricação de fios retangulares em passe único a partir do vergalhão de cobre eletrolítico de diâmetro 8 mm na linha de produção da “Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda”, no que se refere ao dimensional final dos mesmos, apresentando os resultados práticos e a simulação do processo através do software Deform 3D. A revisão bibliográfica apresenta os conceitos e estado da arte dos processos de manufatura de laminação e trefilação, além do método de elementos finitos cuja base é utilizada pelo software de simulação numérica dos processos. A metodologia apresenta uma busca quantitativa de dados e propriedades nas diversas etapas do processo de fabricação, além de resultados qualitativos da simulação da laminação e trefilação. O material semi-processado da laminação e o produto final da trefilação são avaliados com relação ao comportamento mecânico (ensaio de tração) e dimensional. Os resultados obtidos na produção experimental e as simulações equivalentes realizadas são apresentados e comparados.

Palavras-chaves: Cobre eletrolítico, Trefilação, Laminação, Fio de Cobre Retangular, Método dos Elementos Finitos, Formulação Implícita.

ABSTRACT

The application of the electrolytic copper rectangular wire, as a main component in the manufacturing of electric transformers windings, is directly associated to its dimensions and mechanical properties. These can be verified during the wire production process. The main objective of this work consists in evaluating the current production process of rectangular wire in a single pass, starting from the copper electrolytic rod 8 mm diameter on the production line of Toshiba Transmission and Distribution of Brazil Ltda (“Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda”). Furthermore, this study intends to particularly analyze the final dimensions of the windings, presenting both the practical results and simulation of the process with the use of the Deform 3D software. The revision of the chosen bibliography, in this present study, presents not only the concepts and state of the art of the processes related to the rolling and drawing of copper wires, but also the Finite Element Method (FEM), whose base is used by the numeric simulation software. The methodology presents both a quantitative search of data and properties pertaining to the various stages of the production process and, qualitative results related to the numeric simulation of the rolling and drawing process. The process of rolling semi-processed material and the final product of the drawing are evaluated in relation to the mechanical and dimensional behavior. The results obtained in the experimental production and the equivalent simulations are presented and compared.

Keywords: Electrolytic Copper, Drawing, Rectangular Copper Wire, Finite Element Method, Implicit Formulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Esquema da linha de fabricação de fios retangulares da TTDB	21
Figura 2.1.	Processo de laminação (Representação esquemática)	29
Figura 2.2.	Laminador Duo	30
Figura 2.3.	Relações geométricas na laminação	31
Figura 2.4.	Deformação na laminação	33
Figura 2.5.	Esquema ilustrativo da laminação de barra redonda	35
Figura 2.6.	Esquema de trefilação com um bloco rotativo	36
Figura 2.7.	Desenho da fieira em corte total	38
Figura 2.8.	Esforços presentes no processo de trefilação	40
Figura 3.1.	Seção transversal do material – (a) Matéria prima, (b) Produto Laminado e (c) Produto trefilado	47
Figura 3.2.	Processo de laminação do vergalhão de cobre	48
Figura 3.3.	Processo de trefilação do fio retangular (Material laminado) – (a) Entrada da fieira e (b) Saída da fieira	49
Figura 3.4.	Fluxograma da parte experimental do trabalho	50
Figura 3.5.	Embalagem da matéria prima (vergalhão de cobre eletrolítico)	51
Figura 3.6.	Amostra do vergalhão de cobre para ensaios de dureza: (a) Dimensões da amostra e (b) Foto da amostra para ensaio	52
Figura 3.7.	Amostra do vergalhão de cobre para ensaios de tração: (a) Dimensões da amostra e (b) Foto da amostra para ensaio	53
Figura 3.8.	Ensaio de tração do vergalhão de cobre: (a) Vista geral e (b) Detalhe do teste	54

Figura 3.9.	Máquina de ensaio de dureza (Vergalhão de cobre $\varnothing 8$ mm)	55
Figura 3.10.	Amostra do material laminado para ensaios de tração e dureza: (a) Dimensões da amostra e (b) Foto da amostra para ensaio	57
Figura 3.11.	Ensaio de tração do material laminado: (a) Vista geral e (b) Detalhe da região de estrição do material	57
Figura 3.12.	Máquina de ensaio de dureza	59
Figura 3.13.	Desenho do vergalhão a ser laminado, empurrador e rolo de laminação	60
Figura 3.14.	Perfil da malha de nós do vergalhão de cobre na laminação	60
Figura 3.15.	Estágios inicial e intermediário da simulação de laminação	61
Figura 3.16.	(a) Detalhe da fieira de trefilação; (b) Entrada do fio no processo de trefilação e (c) Saída do fio da linha de trefilação	62
Figura 3.17.	Amostra do material trefilado para ensaios de tração e dureza: (a) Dimensões da amostra e (b) Foto da amostra para ensaio	63
Figura 3.18.	Ensaio de tração do material trefilado: (a) Vista geral e (b) Detalhe da execução do ensaio	64
Figura 3.19.	Desenho do fio retangular laminado e fieira de trefilação	66
Figura 3.20.	Detalhe da malha de nós do perfil retangular laminado de cobre	67
Figura 3.21.	Estágios inicial e intermediário da simulação de laminação	68
Figura 4.1.	Ensaio de tração no vergalhão de cobre $\varnothing 8$ mm – Tensão x deformação convencionais	72
Figura 4.2.	Ensaio de tração no vergalhão de cobre $\varnothing 8$ mm – Tensão x deformação efetivas (Deformação Uniforme)	72
Figura 4.3.	Ensaio de tração no vergalhão de cobre $\varnothing 8$ mm – Tensão x deformação efetivas (Deformação Total)	73

Figura 4.4.	Determinação do alongamento uniforme	73
Figura 4.5.	Ensaio de tração no perfil laminado de cobre – Tensão x deformação convencionais	76
Figura 4.6.	Ensaio de tração no perfil laminado de cobre – Tensão x deformação efetivas	77
Figura 4.7.	(a) Isolinhas de danos; (b) Isolinhas de tensão efetiva (Perfil laminado – Coeficiente de atrito de 0,1)	81
Figura 4.8.	(a) Isolinhas de danos; (b) Isolinhas de tensão efetiva (Perfil laminado – Coeficiente de atrito de 0,3)	82
Figura 4.9.	(a) Isolinhas de danos; (b) Isolinhas de tensão efetiva (Perfil laminado – Coeficiente de atrito de 0,5)	83
Figura 4.10.	(a) Isolinhas de danos; (b) Isolinhas de tensão efetiva (Perfil laminado – Coeficiente de atrito de 0,7)	84
Figura 4.11.	(a) Isolinhas de danos; (b) Isolinhas de tensão efetiva (Perfil laminado – Coeficiente de atrito de 0,9)	85
Figura 4.12.	Isolinhas de deformação efetiva do perfil laminado (Coeficiente de atrito de 0,9)	86
Figura 4.13.	Ensaio de tração no perfil trefilado – Tensão x deformação convencionais	88
Figura 4.14.	Ensaio de tração no perfil trefilado – Tensão x deformação efetivas	88
Figura 4.15.	Isolinhas de danos do perfil trefilado	91
Figura 4.16.	Isolinhas de danos do perfil trefilado (Lado laminado)	91
Figura 4.17.	Isolinhas de danos do perfil trefilado (Lado trefilado)	92
Figura 4.18.	Isolinhas de tensão efetiva do perfil trefilado	93

LISTA DE TABELAS

Tabela I.1.	Tolerâncias dimensionais para espessuras de fios retangulares	20
Tabela I.2.	Tolerâncias dimensionais para larguras de fios retangulares	20
Tabela II.1.	Características elétricas e mecânicas do cobre eletrolítico	28
Tabela III.1.	Composição química do cobre eletrolítico	51
Tabela III.2.	Propriedades do cobre eletrolítico	52
Tabela IV.1.	Composição química e propriedades (Vergalhão de cobre Ø8mm) ...	70
Tabela IV.2.	Medição das dimensões do vergalhão de cobre	71
Tabela IV.3.	Propriedades mecânicas do vergalhão de cobre levantadas nos ensaios de tração	74
Tabela IV.4.	Resultados do ensaio de dureza Brinell no vergalhão de cobre	74
Tabela IV.5.	Medição das dimensões do perfil laminado	75
Tabela IV.6.	Propriedades mecânicas do material laminado	77
Tabela IV.7.	Resultados do ensaio de dureza Brinell no material laminado	78
Tabela IV.8.	Dimensões obtidas na simulação do processo de laminação	80
Tabela IV.9.	Medição das dimensões do perfil trefilado	87
Tabela IV.10.	Propriedades mecânicas do fio trefilado	89
Tabela IV.11.	Resultados do ensaio de dureza Brinell no fio trefilado	89
Tabela IV.12.	Dimensões obtidas na simulação do processo de trefilação	90

LISTA DE NOTAÇÕES

A	ponto de entrada: onde o material inicia o contato com o cilindro de laminação na entrada do processo
A1, A2, A3, A4, A5 ...	corpos de prova para ensaios
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	arco de contato: arco medido sobre o cilindro de laminação desde o ponto de entrada até o ponto de saída
ALU	alongamento uniforme
ALNU	alongamento não uniforme
B1, B2, B3, B4, B5 ...	corpos de prova para ensaios
C	ponto de saída: onde o material termina o contato com o cilindro de laminação na saída do processo
D	diâmetro do cilindro de laminação
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG
DEMET	Departamento de Metalurgia da UFMG
FEM	método de elemento finitos – <i>finite element method</i>
HB	dureza Brinell
h_i	espessura ou altura inicial do material na entrada do cilindro de laminação
h_f	espessura ou altura final do material na saída do cilindro de laminação
kV	Kilo Volt (Unidade de tensão elétrica)
L	comprimento aproximado do arco de contato no cilindro de laminador
l	Comprimento útil do corpo de prova na tração
MVA	Mega Volt Amperé (Unidade de Potência aparente)
MVA _r	Mega Volt Amperé Reativo (Unidade de Potência reativa)
R	raio do cilindro de laminação
TTDB	Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda

UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
V_{tra}	Velocidade de tração nas garras da máquina de tração
ε	deformação homogênea
ε'	taxa de deformação
ε'_{tra}	taxa de deformação na tração
μ	coeficiente de atrito
\varnothing	diâmetro
α	ângulo de contato: ângulo definido pelo raio do cilindro de laminação sobre os segmentos de reta OC e AO (correspondente ao arco de contato)

1 INTRODUÇÃO

1.1. Colocação do problema

A Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda (TTDB), empresa multinacional subsidiária pertencente ao grupo Toshiba Corporation com matriz no Japão, instalada no município de Contagem-MG desde 1968, é um fabricante de transformadores elétricos, autotransformadores, reatores monofásicos, reguladores de tensão monofásicos, transformadores de distribuição e acessórios diversos para estes produtos. Possui atualmente capacidade instalada para produção de 5.000 MVA por ano, entre os diversos produtos, sendo que a unidade fabril atual possui linhas de produção distintas para fabricar transformadores de potência (limite máximo de 550 kV / 600 MVA) e reatores de potência (limite máximo de 550 kV / 700 MVar) e outra para reguladores de tensão monofásicos (limite máximo de 36,2 kV / 833 kVA) e transformadores de distribuição (limite máximo de 36,2 kV). Diversos acessórios aplicados a estes produtos também são manufaturados internamente nesta unidade. Todos estes produtos e acessórios são utilizados em sistemas de geração, transmissão e distribuição das concessionárias de energia elétrica e das empresas dos mais diversos ramos de atividade.

Os transformadores elétricos são equipamentos que permitem variar as relações de corrente e tensão entre os circuitos de entrada e saída, além de permitir a variação da impedância elétrica no circuito elétrico, possibilitando dessa forma atender a especificidades do usuário quanto à sua aplicação. Tais equipamentos são basicamente constituídos por um núcleo magnético, enrolamentos ou bobinas (sendo dois ou mais enrolamentos), tanque e buchas. As buchas são componentes que permitem a passagem isolada de corrente e tensão através de uma parede condutora (tanque). O tanque permite a montagem dos enrolamentos e núcleo, além de fixar as buchas. Na Toshiba, todos os transformadores são fornecidos com óleo mineral naftênico para o preenchimento do tanque, sendo este produto responsável pelo isolamento elétrico entre componentes sob tensão, além de também ter a função de refrigeração e lubrificação. O núcleo, em aço silício de grão orientado no

caso dos transformadores e aço silício de grão não orientado no caso dos reatores, possui a função de realizar o acoplamento elétrico e magnético entre os enrolamentos através do fluxo magnético circulante. Segundo Fitzgerald, Kingsley Jr. e Kusko (1975), os enrolamentos são constituídos de bobinas que possuem diferentes quantidades de espiras, permitindo a regulação de corrente e tensão, conforme as Leis de Faraday e Lenz.

Os enrolamentos empregam materiais de alta condutividade elétrica, visando minimizar as perdas dielétricas pela Lei de Joule, sendo normalmente utilizados o cobre ou o alumínio, na forma de chapas ou fios. A especificação do tipo de enrolamento é função do nível de corrente e tensão entre espiras, nível de perdas e peso máximos permissíveis para o produto, além de fatores econômicos e tecnológicos para a manufatura.

Para 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. A capacidade de processamento atual, de 120 toneladas/mês, destinada integralmente ao consumo interno, não é suficiente para atender a produção de transformadores com a fábrica em plena carga, sendo normalmente necessário comprar no mercado parte dos fios consumidos em sua linha de montagem de transformadores. Os fios redondos possuem maior limitação de uso, devido à inviabilidade técnica de montagem de conjuntos (cabos) para correntes mais elevadas e aumento das dimensões externas das bobinas pela necessidade geométrica de ordenação; tais fios são assim utilizados em transformadores de distribuição e reguladores monofásicos com correntes elétricas menores. Já 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. Devido ao fato de representar maior volume de produção (80% dos fios produzidos na Toshiba são em perfil retangular), o mesmo foi escolhido como foco de estudo neste trabalho.

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. Este processo não será abordado neste trabalho. 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). 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), são apresentadas na Tabela I.1 (Espessura) e Tabela I.2 (Largura).

Tabela I.1 – 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 I.2 – 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

A linha de conformação dos fios retangulares na TTDB é apresentada esquematicamente na Figura 1.1. A tecnologia atual de produção está limitada a condições do maquinário disponível, sendo que não existe um dimensionamento matemático ou de simulação numérica para avaliar previamente o produto final, sendo todos os controles basicamente utilizados a partir de experiência da equipe de

produção. Normalmente o produto é fabricado a partir de tabelas desenvolvidas pela experiência de fabricação anterior ou por aproximação de dimensões já produzidas, no caso de fabricação de uma dimensão pela primeira vez, sendo os parâmetros de dimensão e dureza dos fios monitorados durante o processo produtivo de forma a ocorrerem intervenções manuais, caso sejam necessárias, para ajustar o produto a condição de manufatura.

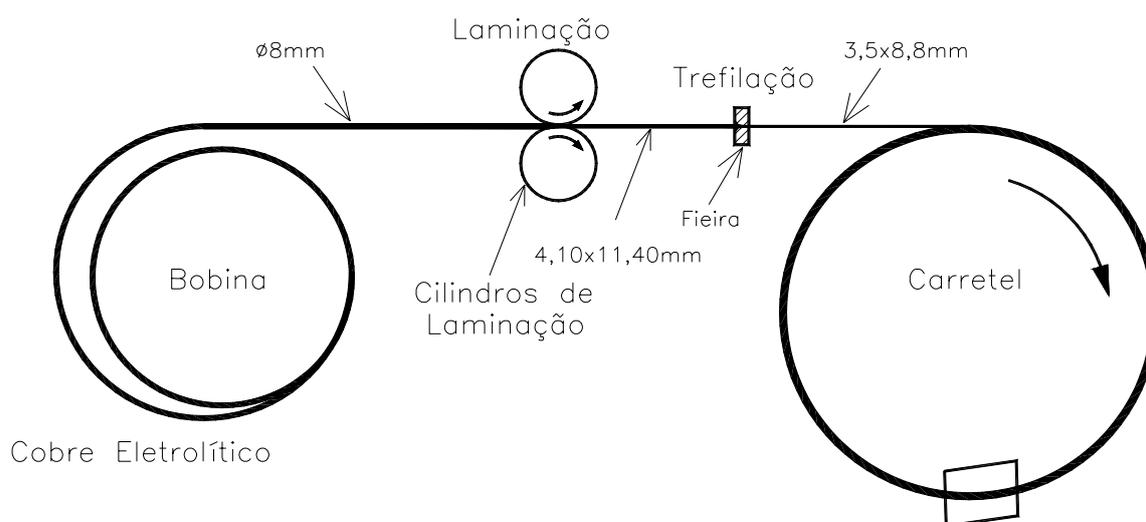


Figura 1.1 – Esquema da linha de fabricação de fios retangulares da TTDB
Fonte: Elaborado pelo autor

Atualmente na TTDB, a matéria prima, vergalhão de cobre cilíndrico diâmetro 8 mm, é comprada no mercado, oriunda de fabricantes nacionais e do Chile. Todos os fornecedores são qualificados previamente ao fornecimento através de critérios de ensaios de dureza e tração de protótipos, além de processamento na linha de produção de um lote piloto. Após a qualificação do fornecedor, o produto é fornecido em bobinas, com laudos de ensaios para assegurar o atendimento às necessidades mecânicas do produto, sendo a dureza o parâmetro de acompanhamento na inspeção de recebimento do mesmo. Na linha de conformação de fios retangulares (Figura 1.1), o vergalhão de cobre é desbobinado em uma linha contínua, na qual o produto é submetido ao processo de laminação em um laminador de rolos planos, cujo objetivo básico é a redução da seção do fio e encruamento do material para conferir resistência mecânica para ser submetido ao processo de trefilação. A etapa posterior, a trefilação dos fios, permite conferir ao mesmo a dimensão final, conforme cálculo elétrico da necessidade de seção para aplicação em transformadores. Na

linha de trefilação é possível a montagem em cadeia de fieiras para reduções sucessivas até a obtenção da dimensão final. Nesta linha de fabricação é possível a produção de fios nos perfis retangular ou circular, de acordo com a fieira utilizada. Na saída da fieira de trefilação, o fio é acondicionado em carretéis, visando a destinação do mesmo aos processos de acabamento dos fios. As características mecânicas do produto final são conferidas aos fios através do processo de recozimento, o qual é dimensionado para permitir a recuperação dos defeitos e tensões internas imprimidas durante os processos de conformação a frio. Os parâmetros de dureza e alongamento são utilizados neste processo de fabricação para a aprovação do produto final.

Para aplicação final do produto em transformadores, o fio deve antes ser isolado de modo a impedir curto circuito entre espiras do enrolamento. Esse processo de isolamento pode ser realizado através do uso de verniz isolante (esmaltação de fios) ou encapamento por papel. Normalmente a esmaltação é aplicada nos fios de seção circular e o encapamento por papel aos fios retangulares. Estes processos, assim como o recozimento dos fios de cobre não serão objeto deste trabalho.

1.2. Objetivos do trabalho

O foco principal deste trabalho está no estudo das características e condições de contorno da fabricação do fio retangular de cobre produzido na Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda, mais especificamente no processo de fabricação em passe único de laminação e trefilação a partir do vergalhão de cobre eletrolítico cilíndrico de diâmetro 8 mm, estudando os processos nas condições atuais dos maquinários e parâmetros adotados na empresa, realizando simulações dos processos no software de modelamento matemático DEFORM 3D e comparando os resultados obtidos com os valores ocorridos na prática. Por último, pretende-se apresentar propostas para otimização do processo produtivo, caso seja possível.

1.3. Justificativas

As características dimensionais dos fios retangulares são primordiais no processo produtivo de transformadores. O não atendimento aos requisitos da Tabela I.1 (Espessura) implica em problemas no processo de montagem, podendo inclusive ser fator de impedimento na fabricação do produto. Ao se produzir fios com espessura acima do limite, implicará em aumento da dimensão externa das bobinas. Este aumento pode inviabilizar a montagem dos enrolamentos, os quais são montados axialmente sobre uma mesma base, ou seja, o enrolamento A (ou primário) é montado sobre o enrolamento B (ou secundário) e assim, sucessivamente, sejam quantos forem. Estes enrolamentos normalmente são montados sobre pressão uns sobre os outros, os quais servem de apoio radial contra movimentação durante esforços de curto-circuito (gerador de esforços radiais e axiais). Variações acima dos limites especificados implicam em inviabilidade da montagem, uma vez que os enrolamentos são compostos de várias camadas de fios (espiras), sendo o aumento dimensional cumulativo ao longo do diâmetro do enrolamento. De forma análoga, espessuras abaixo do limite especificado implicarão em diâmetros externos dos enrolamentos inferiores ao calculado no projeto e, portanto, montagem das bobinas com folgas excessivas, podendo ocorrer deslocamentos de camadas (espiras) durante esforços de curto-circuito, levando o produto ao colapso (break-down) ou falha operacional durante ensaios ou vida útil do mesmo.

Relativo a largura do fio, o não atendimento à Tabela I.2 (Largura), conduz a ocorrência de problemas de montagem similares aos acima descritos. Larguras acima dos limites implicam em crescimento das alturas dos enrolamentos. Estes enrolamentos são normalmente comprimidos na parte superior e inferior por anéis ou calços isolantes inteiriços que apóiam todos os enrolamentos. Estes anéis têm a função principal de impedir deslocamentos no sentido axial. Um excesso dimensional impede a aplicação uniforme de pressão ou até impossibilita que um dos enrolamentos seja comprimido, além de aumentar a altura total do conjunto das bobinas, podendo inviabilizar a montagem mecânica dos enrolamentos dentro do núcleo. Analogamente, produtos fabricados abaixo dos limites de largura implicaram em altura menor do enrolamento, provocando falta de compressão do mesmo,

podendo ocorrer o colapso (break-down) ou falha operacional devido ao deslocamento de espiras durante ensaios ou vida útil do mesmo.

Atualmente as dimensões dos fios são monitoradas durante o processo de fabricação, basicamente com medição no material no início do processamento, ocorrendo perdas de tempo para ajustes, perda de mão de obra até ocorrer o ajuste para fabricação contínua, além da perda de material até este momento. Este ajuste se faz necessário no processo de laminação anterior a trefilação e neste último, sendo o tempo demandado para esta atividade significativo no processo. Todo este material usado no ajuste inicial é descartado, sendo segregado até acumular volume suficiente para transporte até o fornecedor da matéria prima e vendido ao mesmo basicamente ao preço de sucata.

Além dos problemas geométricos que são provocados pela variação dimensional, ocorre também a perda de qualidade do produto, medida através da variação das perdas dielétricas da bobina e impedância do transformador. A impedância do transformador, com sua variação admissível e as perdas dielétricas máximas aceitáveis do transformador, normalmente são estabelecidas na especificação técnica de fornecimento do produto, sendo características mensuráveis nos ensaios de rotina de aceitação do produto final e, freqüentemente são associadas ao não atendimento destas propriedades muitas contratuais ou recusa do produto final. Estas duas características elétricas são calculadas em projeto baseadas na geometria dos fios (área da seção retangular) e o comprimento total do fio no enrolamento. Variações dimensionais fora dos limites especificados nas Tabela I.1 (Espessura) e Tabela I.2 (Largura) implicarão em somatório de erros devido ao comprimento e número de espiras de uma bobina, podendo provocar variações destas características fora dos limites especificados. As perdas dielétricas dos transformadores são características causadoras de desperdício de energia através do efeito Joule (perda por calor), sendo que quanto menor a perda dielétrica do produto, mais eficiente é o mesmo. A impedância dos transformadores é importante para definir o equilíbrio da rede elétrica, pois conforme a Lei de Ohm (JOHNSON, HILBURN e JOHNSON, 1994), a corrente elétrica tende a percorrer o caminho com menor impedância, dessa forma, basicamente no sistema de transmissão e distribuição de energia onde os transformadores são posicionados para trabalhar em

série e em paralelo com outros equipamentos, alterações significativas de impedância podem provocar desequilíbrios de corrente e tensão entre linhas (sistemas bifásicos e trifásicos).

1.4. Conteúdo

O capítulo de revisão bibliográfica apresenta basicamente uma visão geral da matéria prima e dos processos de conformação envolvidos no processo produtivo dos fios retangulares para uso em enrolamentos. O cobre eletrolítico é apresentado com suas características elétricas e mecânicas. O processo de laminação, primeira conformação imposta ao vergalhão de cobre, é descrito apresentando as principais variáveis e os cilindros de laminação utilizados no processo produtivo da Toshiba. O processo de trefilação, conformação posterior à laminação, é descrito com suas variáveis e as características construtivas da fieira são apresentadas. Finalizando a revisão bibliográfica, o método de elementos finitos, base da simulação realizada pelo software DEFORM 3D, é descrito.

A metodologia apresenta as fontes dos dados da matéria prima (vergalhão de cobre eletrolítico) e é descrito o processo de levantamento de algumas propriedades, através de ensaios de tração do material nas duas etapas de conformação mecânica (laminação e trefilação). Finalmente, são descritos os procedimentos de parametrização do software de simulação e modelamento matemático (DEFORM 3D).

No capítulo de Apresentação e Discussão dos Resultados são apresentados os resultados obtidos através da pesquisa experimental e os levantamentos de dados realizados. A simulação do processo é realizada com base nas propriedades mecânicas levantadas através dos ensaios. Os resultados da simulação são comparados com os resultados experimentais de produção do fio retangular.

O trabalho é encerrado apresentando conclusões e sugestões a partir da análise dos resultados. O processo é avaliado pela ótica da obtenção dos resultados atuais e

utilizando as ferramentas de simulação. São apresentadas também propostas para trabalhos futuros relacionados ao assunto e às demais etapas de processamento do fio retangular de cobre na linha de produção da Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a matéria prima envolvida na fabricação do fio retangular em estudo (cobre eletrolítico recozido) e descreve os dois processos de deformação a frio utilizados na manufatura deste produto (laminação e trefilação). Os processos serão apresentados na seqüência de sua ocorrência na linha de produção.

A simulação numérica que utiliza a técnica dos elementos finitos é apresentada. A mesma representa a base principal da simulação dos processos de manufatura realizada através do software DEFORM 3D.

2.1. Cobre eletrolítico

Na fabricação de produtos para fins elétricos, normalmente são utilizados materiais de elevada condutividade elétrica de modo a ocorrer a menor perda possível pelo efeito Joule, contribuindo para a maior eficiência dos mesmos. Os materiais utilizados na fabricação dos fios para uso em transformadores elétricos normalmente são o cobre ou o alumínio, os quais possuem a característica de boa condutividade elétrica, além de apresentarem a facilidade de trabalho a frio (conformação) e dissipação térmica. No caso dos fios retangulares usados na Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda, o cobre eletrolítico é a matéria prima, sendo este capítulo destinado à apresentação deste material.

As ligas de cobre apresentam excelente condutividade térmica e elétrica, boas características de trabalho a frio e a quente, usinabilidade e resistência à corrosão em atmosfera ambiente. O cobre é produzido inicialmente com grau de pureza de 98 a 99% do elemento puro, sendo o restante do material composto por impurezas como manganês, cobalto, zinco, estanho, antimônio, arsênio, etc. Para obter as propriedades necessárias principalmente para fins elétricos e maior grau de pureza, o mesmo é submetido a um processo de refinamento eletrolítico. O processo ocorre através de uma reação de eletrólise entre o anodo (chapas de cobre produzidos na

forma bruta) e o catodo (folhas de cobre puríssimo), através do eletrólito (solução aquosa de sulfato de cobre). A reação química ocorre conforme abaixo:



As impurezas contidas no cobre produzido originalmente precipitam-se, ficando depositadas no eletrólito. Dessa forma é possível obter um refinamento no grau de pureza podendo alcançar níveis de 99,99% do elemento cobre. Este processamento normalmente origina lingotes de cobre eletrolítico (catodos brutos), os quais são refundidos ou processados posteriormente para aplicação na indústria na forma de barras, chapas, vergalhões, entre outros. O cobre é considerado puro se possuir em sua composição química no mínimo 99,3% do elemento cobre, sendo neste teor também incluso o residual de prata da composição da liga, podendo este ser de origem do próprio minério ou adicionado para fins de desoxidação da liga.

As características elétricas e mecânicas do cobre eletrolítico são apresentadas na Tabela II.1.

Tabela II.1 – Características elétricas e mecânicas do cobre eletrolítico

Composição Química Nominal (%)					Resistência à tração Mínimo (Mpa)		Alongamento (% em 2")		Limite de escoamento ^a 0,5% deformação Mínimo (kpsi)		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	8,9e-6

Fonte: Encyclopedia of Materials Science and Engineering

A presença de oxigênio pouco afeta a tenacidade do cobre eletrolítico, mas este teor deve ser baixo o suficiente para garantir boa trabalhabilidade durante os processos de fabricação/conformação. O teor de oxigênio depende do grau de refino do cobre durante a fundição.

A escala de condutividade elétrica foi estabelecida em 1913 baseada no cobre padrão, sendo este definido como 100% e a condutividade elétrica de qualquer material é expressa em percentagem de IACS (International Annealed Cooper Standard), igual a 100 vezes a razão da resistividade do cobre padrão recozido ($0,017241 \mu\Omega\text{m}$) a 20°C para o valor medido do material. Atualmente se consegue produzir comercialmente cobre com condutividade de 103% IACS ($0,0168 \mu\Omega\text{m}$). Ressalta-se que o valor da condutividade é expresso em função da temperatura de execução do ensaio, pois a mesma é sensível à temperatura. Para o cobre, varia de 800%IACS à -240°C até 38%IACS à 45°C .

2.2. Laminação a frio

Para a produção de fios retangulares em cobre eletrolítico, uma laminação prévia do vergalhão de cobre $\phi 8$ mm se faz necessária para pré-formar o material no formato aproximadamente retangular, visando viabilizar a trefilação utilizando taxas menores de redução, exigindo menor esforço durante este processo, conforme será apresentado na seção 2.3.

A laminação consiste na passagem de uma peça entre dois cilindros que giram, de forma a reduzir a área de uma seção transversal (CETLIN e HELMAN, 2005). A Figura 2.1 apresenta o desenho esquemático deste processo.

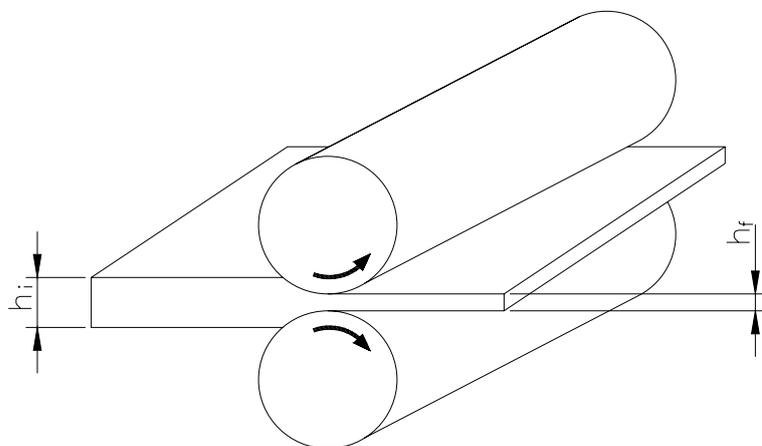


Figura 2.1 – Processo de Laminação (Representação esquemática)
Fonte: Elaborado pelo autor

A laminação pode ocorrer em processo a frio ou a quente. A diferença está na temperatura do material processado durante a conformação mecânica: se o material é processado próximo à sua temperatura crítica, na qual após certa deformação, ocorre um amaciamento pronunciado do material, devido as reações de recuperação e recristalização na estrutura do mesmo, a laminação é denominada a quente. Se durante o processamento do material a temperatura do mesmo se mantiver abaixo desta faixa e, por consequência não desencadear os processos de recuperação e recristalização, a laminação é denominada a frio. Neste trabalho serão abordados apenas os aspectos da laminação a frio na fabricação dos fios de cobre.

Existem diferentes tipos de laminadores, cada qual específico para determinada linha de produto. Neste trabalho o laminador duo será apresentado por se tratar do equipamento utilizado no processo de fabricação dos fios retangulares. Este tipo de laminador está apresentado na Figura 2.2 e é constituído por cilindros de trabalho de eixos horizontais suportados por mancais. O cilindro inferior é fixo e o superior permite acionamento mecânico ou hidráulico para regulação da distância entre ambos e, portanto da taxa de redução na laminação. Ambos os cilindros são denominados de trabalho, por realizarem o contato direto com o material em processamento e imprimem a deformação ao mesmo, girando somente em um sentido.

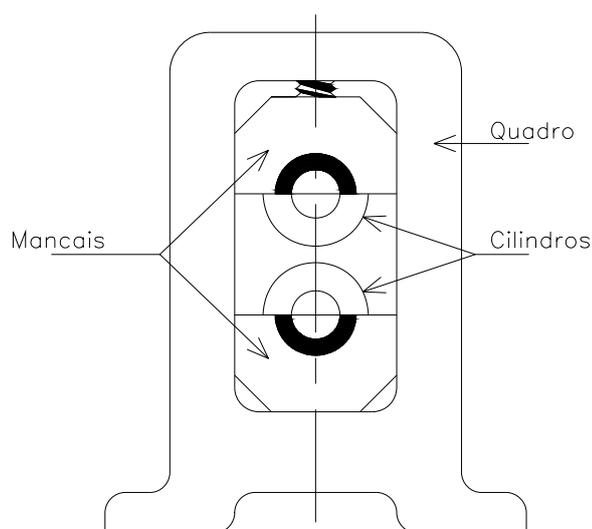


Figura 2.2 – Laminador Duo
Fonte: (CETLIN e HELMAN, 2005)

2.2.1. Cilindros de laminação

Os cilindros para laminação de fios retangulares de cobre possuem mesas ou superfície de contato planas, sendo utilizados basicamente para transformação do perfil da seção circular do vergalhão de cobre para a seção aproximadamente retangular antes da entrada na fieira da trefilação.

Segundo Barbosa (2004), os cilindros de trabalho dos laminadores imprimem a força motora necessária para o processamento do material e, devido à abrasão, adesão e fadiga, podem desgastar a superfície de trabalho com o uso, necessitando de constante acompanhamento e monitoramento para que se mantenham em condições adequadas de operação. Frequentemente estes cilindros devem ser substituídos e, os rolos desgastados podem ser enviados para recuperação caso seja viável, o que normalmente se é obtido através de passes de usinagem.

As relações geométricas na laminação são apresentadas na Figura 2.3.

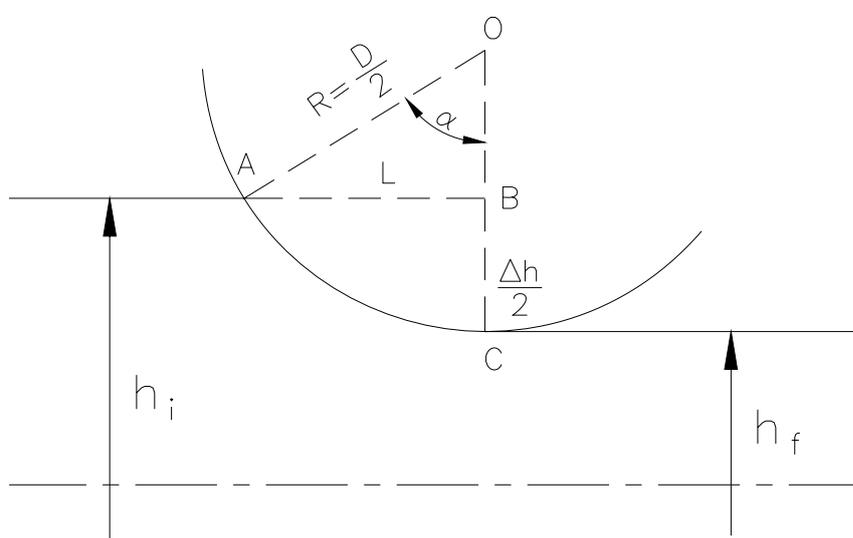


Figura 2.3 – Relações geométricas na laminação
Fonte: (CETLIN e HELMAN, 2005)

A partir da Figura 2.3, são definidos os seguintes pontos e características geométricas da laminação, segundo Cetlin e Helman (2005):

- h_i Espessura ou altura inicial do material na entrada do cilindro de laminação
 h_f Espessura ou altura final do material na saída do cilindro de laminação
 D Diâmetro do cilindro de laminação
 R Raio do cilindro de laminação
 A Ponto de entrada: ponto onde o material inicia o contato com o cilindro de laminação na entrada do processo
 C Ponto de saída: ponto onde o material termina o contato com o cilindro de laminação na saída do processo
 α Ângulo de contato: ângulo definido pelo raio do cilindro de laminação sobre os segmentos de reta OC e AO (correspondente ao arco de contato)
 AC Arco de contato: arco medido sobre o cilindro de laminação desde o ponto de entrada até o ponto de saída
 L Comprimento aproximado do arco de contato

Assumindo que o cilindro de laminação possui um raio (R) muito maior que a altura inicial (h_i) do perfil a ser laminado ($R \gg h_i$), pode-se aproximar que o arco de contato é igual à projeção horizontal: $AC \cong AB = L$. A partir da relação de triângulos retângulos, é possível estabelecer a equação:

$$L = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2} = \sqrt{R \cdot \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (2.1)$$

De acordo com a consideração acima $\left(R \cdot \Delta h \gg \frac{\Delta h^2}{4}\right)$, podemos desconsiderar este fator, resultando:

$$L = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (2.2)$$

Portanto,

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{L}{R} = \frac{\sqrt{R \cdot \Delta h}}{R} \quad \text{ou} \quad \operatorname{sen} \alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (2.3)$$

Admitindo-se que para ângulos pequenos tem-se $\operatorname{sen} \alpha \cong \alpha$, o ângulo de contato pode ser escrito como:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (2.4)$$

2.2.2. Deformações durante a laminação

Durante a laminação, nos pontos compreendidos dentro do arco de contato, conforme DIETER (1981), pode-se representar os esforços de compressão (P_r), ou *carga de laminação*, e a força de atrito (F), conforme demonstrado no ponto X da Figura 2.4. A *carga de laminação* é a força que o rolo de laminação comprime o metal, e por reação, a força que o metal tende a afastar estes, sendo também conhecida como *força de separação*.

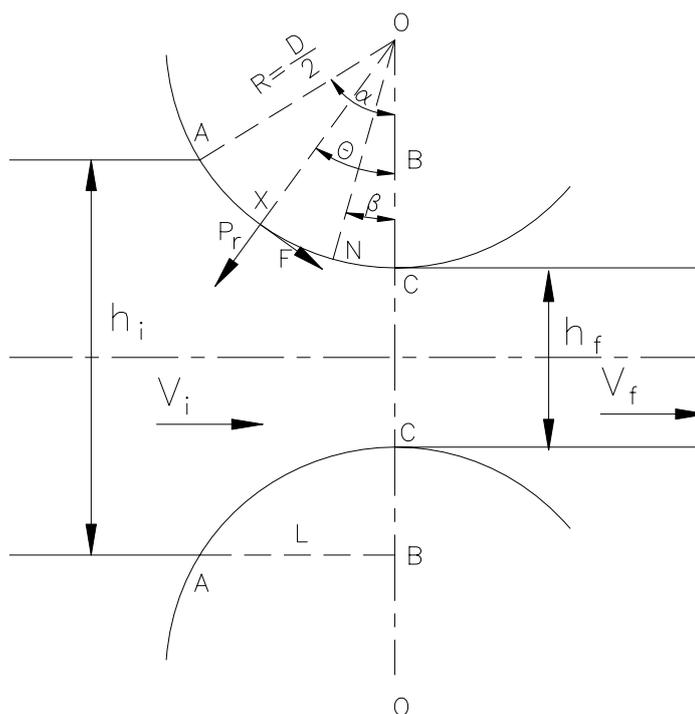


Figura 2.4 – Deformação na laminação
Fonte: (DIETER, 1981)

Observando a Figura 2.4, a deformação convencional de um ponto genérico pertencente ao arco de contato, devido ao esforço de compressão, representado pelo ponto A, admitindo-se deformação homogênea na espessura, é obtido por:

$$e = \frac{h_i - h_f}{h_i} = 1 - \frac{h_f}{h_i} \quad (2.5)$$

A deformação logarítmica é calculada por,

$$\varepsilon = \ln \frac{h_i}{h_f} = \ln \left(\frac{1}{1 - e} \right) \quad (2.6)$$

O cálculo da espessura do material no ponto genérico A é dado por:

$$h = h_f - D(1 - \cos\varphi) \quad (2.7)$$

Substituindo-se este valor nas equações de deformação convencional,

$$e = 1 - \frac{h_i}{h_i} - \frac{D}{h_i}(1 - \cos\varphi) \quad (2.8)$$

e, para a deformação logarítmica,

$$\varepsilon = \ln \left[\frac{h_i}{h_f + D(1 - \cos\varphi)} \right] \quad (2.9)$$

Explicitando-se a partir da equação acima em função do ângulo de contato do ponto genérico, temos:

$$\varphi = \arccos \left[1 - \frac{1}{D} \left(\frac{h_i}{\exp(\varepsilon)} - h_f \right) \right] \quad (2.10)$$

Outras relações importantes na laminação, demonstradas por CETLIN e HELMAN (2005) são as que relacionam a deformação convencional média, obtida através da equação 2.11 e a deformação total, obtida através da equação 2.12.

$$e_m = \frac{R(\alpha - \text{sen} \alpha \cdot \cos \alpha)}{h_i \cdot \text{sen} \alpha} \quad (2.11)$$

$$e_T = \frac{h_i - h_f}{h_i} = \frac{2R(1 - \cos \alpha)}{h_i} \quad (2.12)$$

De acordo com trabalho de KAZEMINEZHAD e TAHERI (2004), na laminação a frio de uma barra redonda, em um passe ou mais, obtendo-se um perfil próximo ao retangular (Figura 2.5), a mesma não é submetida a um estado plano de deformação, ocorrendo um espalhamento na lateral do material.

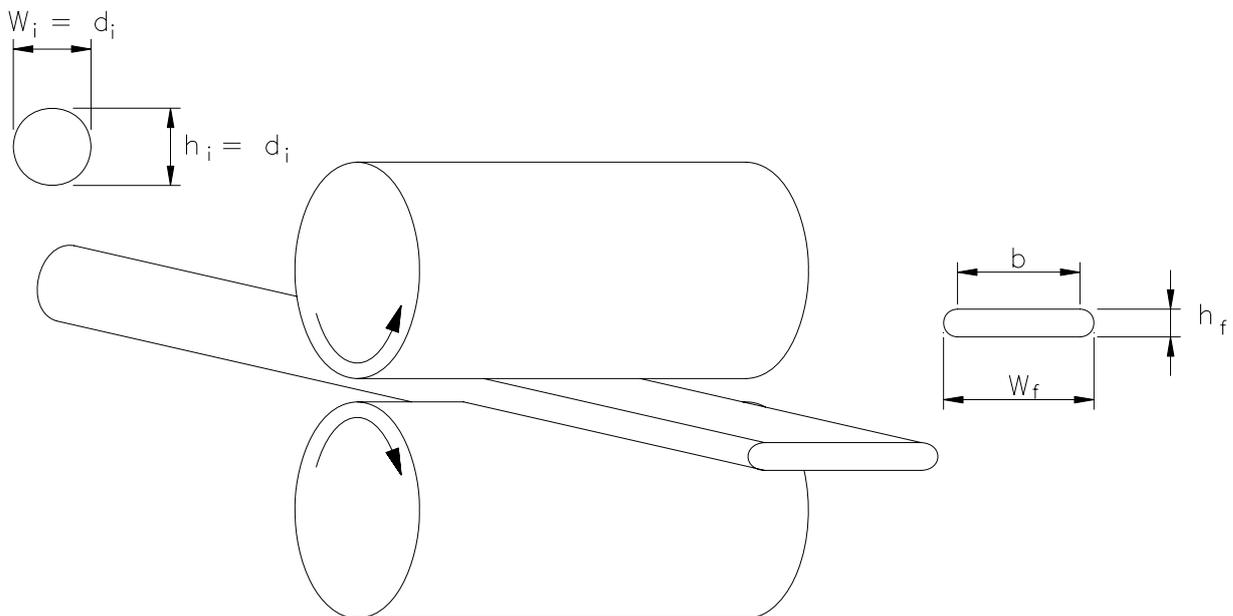


Figura 2.5 – Esquema ilustrativo da laminação de barra redonda
 Fonte: (KAZEMINEZHAD e TAHERI, 2004)

A previsão das dimensões do perfil laminado do material pode ser obtida através das equações desenvolvidas por estudos publicados por KAZEMINEZHAD e TAHERI (2004) para a largura de contato com o cilindro (Equação 2.13) e para a largura final do material com o espalhamento (Equação 2.14), conforme Figura 2.5.

$$b = \sqrt{2h_i\Delta h} \quad (2.13)$$

$$\frac{W_f}{W_i} = 1,02 \left(\frac{h_i}{h_f} \right)^{0,45} \quad (2.14)$$

2.3. Trefilação

O processo de deformação a frio de trefilação consiste basicamente 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 HELMAN, 2005). A Figura 2.6 apresenta o diagrama esquemático deste processo. O material ao ser forçado a passar pela fieira deforma-se, reduzindo a seção transversal para assumir o perfil de saída da mesma e, devido à conservação de massa, ocorre o aumento do comprimento do material. Este processo normalmente confere ao produto final “boa qualidade superficial e excelente controle dimensional” (CETLIN e HELMAN, 2005). Os fios trefilados podem ser produzidos em seções de diferentes perfis, sendo mais comuns os de seções circulares e retangulares.

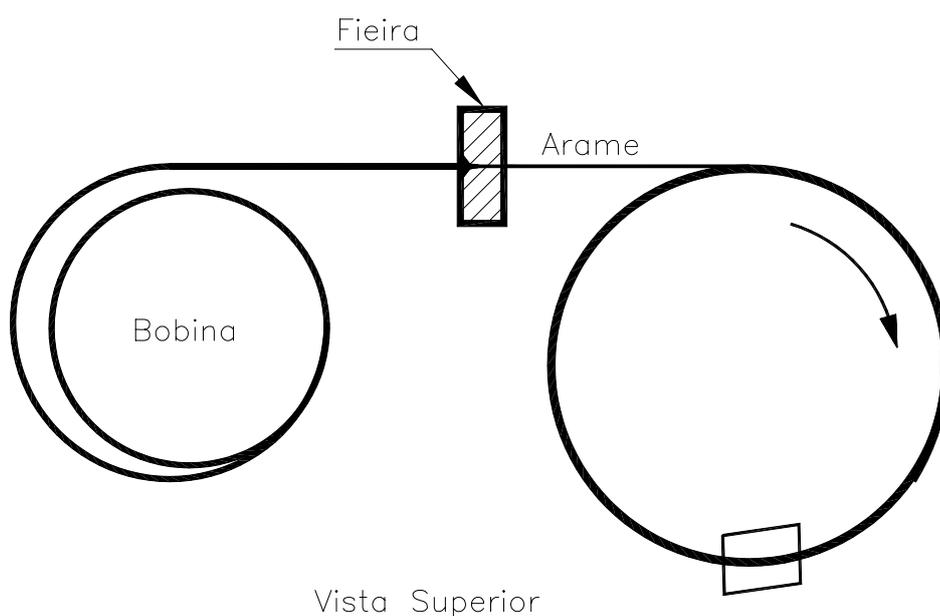


Figura 2.6 – Esquema de trefilação com um bloco rotativo
 Fonte: (CETLIN e HELMAN, 2005)

Para a obtenção do perfil de seção e dimensional final, o material pode ser submetido a um processo prévio de deformação, como a laminação e/ou a quantidades variáveis de passes sucessivos de trefilação. “Tratamentos térmicos podem ser realizados entre os passes, de forma a eliminar ou minimizar os possíveis efeitos do encruamento, reduzindo a tensão de fluxo e aumento da ductilidade” (CORRÊA, 2004).

Para o início do processo de trefilação é necessário que o material passe por dentro da fieira sem necessidade de esforços para permitir que o mesmo seja tracionado na saída da mesma. Normalmente neste caso são realizados apontamentos do material, onde o mesmo é deformado previamente por esmagamento ou desbastados, seja por usinagem ou abrasão, permitindo essa passagem da ponta do material pelo interior da fieira, possibilitando o acoplamento do equipamento de tração do fio. O material inicialmente trefilado, incluindo esta ponta, normalmente é descartado do processo produtivo, devido ao fato de apresentar variações dimensionais e de propriedades mecânicas.

2.3.1. Fieira

A fieira ou matriz de trefilação é o elemento 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. A Figura 2.7 apresenta uma fieira em corte.

Segundo CETLIN e HELMANN (2005), são três as principais variáveis independentes no processo de trefilação: semi-ângulo de trefilação, redução de área e atrito, sendo todas elas controladas na fieira. A fieira apresenta quatro regiões específicas de sua construção que são de suma importância ao processo de trefilação. A Figura 2.7 apresenta estas regiões em um corte da seção transversal da fieira.

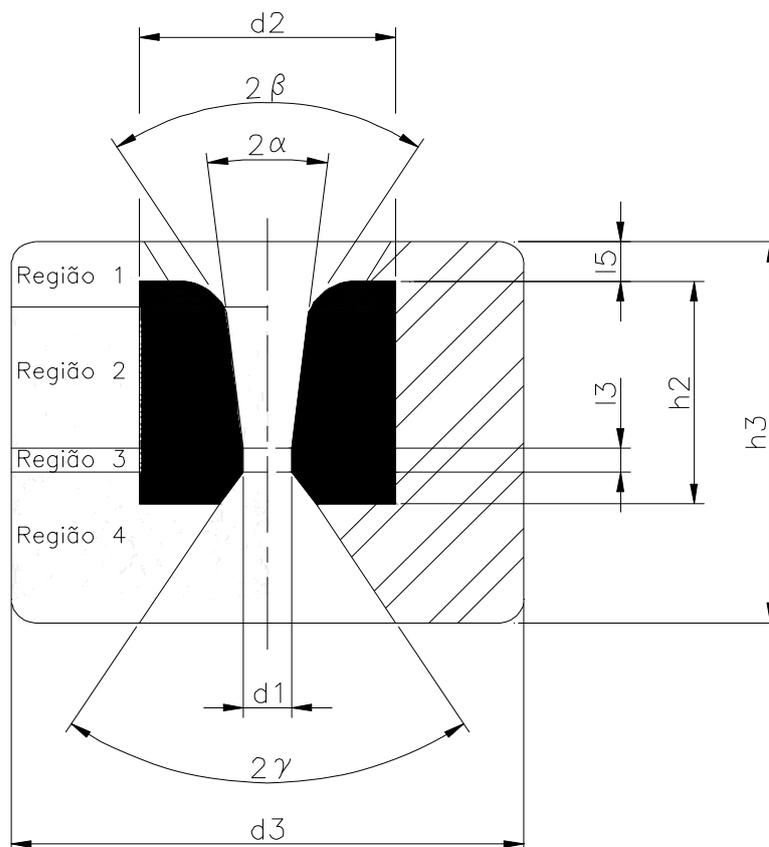


Figura 2.7 – Desenho da fieira em corte total
 Fonte: Elaborado pelo autor

Onde:

- d1 Diâmetro 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
- 2α Ângulo de redução
- 2β Ângulo de entrada
- 2γ Ângulo de saída

O ângulo de entrada da fieira (2β), mostrado na Figura 2.7 como região 1, é o ponto de introdução do material na fieira. Esta região é responsável por guiar o material e sua dimensão deverá exceder à dimensão máxima do material, de modo a garantir

um reservatório de lubrificante durante o processamento, “garantindo que o lubrificante seja arrastado para dentro da região de deformação” (MAGALHÃES, 2008).

O semi-ângulo de redução (2α), mostrado na Figura 2.7 como região 2, é onde ocorre a redução da seção do material trefilado e, conseqüentemente, onde os maiores esforços estão localizados, sendo também definida como região de trabalho da fieira.

A região 3, mostrado na Figura 2.7 é denominada de cilindro (l3) sendo a responsável pela conferência ao material de seu dimensional e acabamento superficial. A vida útil da matriz também depende desta dimensão. Um comprimento reduzido desta região implica em desgaste prematuro da fieira. Um comprimento maior implica em aumento da força de tração para trefilação, podendo causar variação do dimensional desejado por deformação do fio ou desgaste do núcleo.

A região 4, mostrado na Figura 2.7 é caracterizada pelo ângulo de saída (2γ), sendo o ângulo mais importante. Possui algumas funções como: é responsável para evitar que o núcleo trinque na saída do cilindro; é a região onde ocorre a recuperação da deformação elástica do material, devendo esta ser suave, de modo a manter o filme de lubrificação; deve ter dimensional que evite que variações no guia do fio na saída da fieira não ocorra riscos ou danos ao fio; e finalmente, opera como um guia para o material trefilado na saída da fieira.

2.3.2. Deformações durante a trefilação

Durante a trefilação, ao analisarmos um elemento do material, conforme Figura 2.8, ocorrem esforços de estiramento e cisalhamento. O efeito do cisalhamento é reduzido à medida que se introduz mais o elemento no interior da fieira, sendo que o efeito de estiramento se mantêm. É denominada deformação homogênea aquela causada pelo estiramento do material e deformação redundante é a causada pelo cisalhamento.

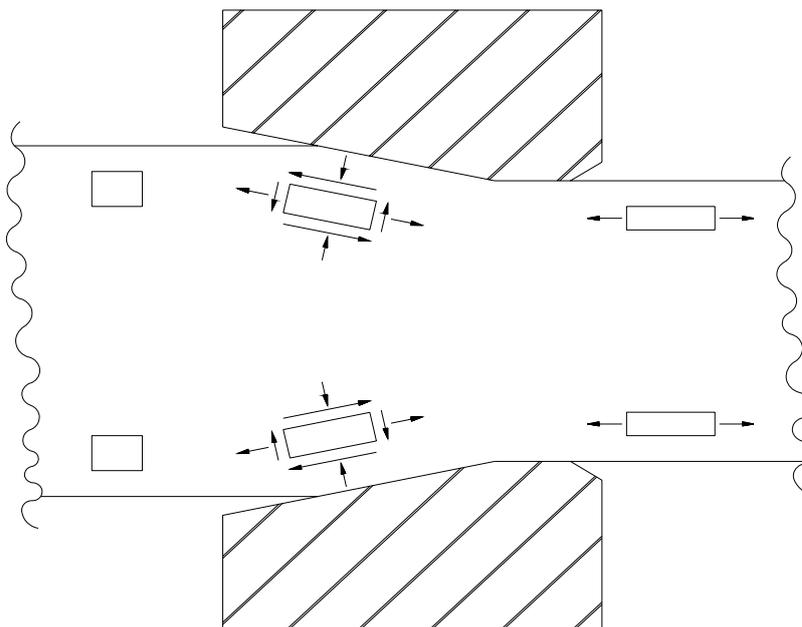


Figura 2.8 – Esforços presentes no processo de trefilação
 Fonte: (MAGALHÃES, 2008)

Segundo HOSFORD e CADDELL (1993), o trabalho redundante é a energia necessária por volume unitário para causar a deformação redundante. Conforme CETLIN e HELMANN (2005), o coeficiente de atrito (μ) influi na geometria de fluxo da matriz, não sendo a deformação redundante totalmente imune à esta condição de contorno do processo, porém sua influência foi comprovada experimentalmente ser pouco relevante para uma série de materiais e lubrificantes, portanto o trabalho redundante ou distorção se apresenta maior quanto maior o ângulo da matriz e cresce ao diminuir a redução imposta ao material. Naturalmente o trabalho redundante também é responsável pelo aumento do endurecimento do material.

As deformações em barras de seção cilíndricas submetidas a trefilação, podem ser obtidas calculando-se um valor médio para as deformações (ϵ_m) de forma analítica e experimental. Analiticamente,

$$\epsilon_m = \phi \cdot \epsilon_H \quad (2.15)$$

onde a deformação homogênea ou uniforme (ϵ_H) é função direta da redução de área.

$$\varepsilon_H = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad \text{ou} \quad \varepsilon_H = \ln\left(\frac{1}{1-r}\right) \quad (2.16)$$

onde A_0 é a área inicial, A_f a área final, e ϕ o fator ou coeficiente de deformação redundante. A deformação redundante é notadamente maior na superfície do material, reduzindo até o centro do mesmo, devido ao gradiente de cisalhamento imposto ao mesmo na fiação. BACKOFEN (1972) propôs o parâmetro Δ , conforme a equação 2.3, que relaciona o coeficiente de deformação redundante em função do semi-ângulo de trefilação (α) e a relação de área (r).

$$\phi = 1 + 0,21 \cdot \Delta + 1 \quad (2.17)$$

$$\Delta = \left(\frac{\alpha}{r}\right) \left[1 + (1-r)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.18)$$

O trabalho redundante pode ainda ser determinado através do trabalho desenvolvido por ROWE (1977), apresentado na equação 2.5.

$$\phi = 0,88 + 0,78 \left(\frac{A_s}{M}\right) \quad (2.19)$$

onde A_s é a área de uma superfície esférica centrada no ápice do cone e limitada por ele, cujo raio é a média dos raios correspondentes dos pontos de entrada e saída do material e M é a área de contato entre a matriz e o material.

2.3.3. Tensão na trefilação de materiais

De acordo com CETLIN E HELMAN (2005), a tensão de trefilação (σ_f) é definida como a força F necessária para executar a operação, dividida pela área da seção transversal (A_f) do metal após a trefilação.

Segundo CHAKRABARTY (2006), a tensão de trefilação apresenta quatro variáveis importantes que afetam seu valor, juntamente com o efeito combinado das mesmas: atrito, encruamento, velocidade de deformação e temperatura. Além destas variáveis, conforme CETLIN e HELMAN (2005), a geometria da fiação (semi-ângulo de entrada, taxa de redução e comprimento da região cilíndrica) também é um fator importante de influência na tensão de trefilação.

O trabalho de YOSHIDA e MATSUNAGA (2008), para a trefilação de perfil retangular a partir de perfil circular, demonstrou que para uma pequena redução na trefilação por passe confere ao material uma alta deformação na direção da altura do fio enquanto que deformação na largura do fio é desprezível, apresentando uma relação de dependência entre a precisão dimensional dos fios com a taxa de redução.

2.4. O método dos elementos finitos

Segundo BICKFORD (1994), dois dos principais objetivos da análise em engenharia são: determinar os princípios básicos que governam o comportamento de um fenômeno e transferir estes princípios para um modelo matemático envolvendo uma equação ou equações que possam prever soluções qualitativas e/ou quantitativas do comportamento deste fenômeno.

O Método de Elementos Finitos (FEM), desenvolvido na década de 1950, é uma ferramenta analítica de equacionamento de fenômenos através do modelamento físico e matemático, utilizando os recursos de informática para processamento de inúmeras matrizes de equações, sendo difundido mais amplamente no último quarto do século passado. A amplitude de aplicação desta ferramenta, devido ao poderio dos modelamentos físicos e matemáticos, além do avanço tecnológico das ferramentas computacionais abrange às mais distintas áreas, como: mecânica dos sólidos e fluídos, transferência de calor, vibrações, potencial elétrico, campos magnéticos, comportamentos de materiais em processos de conformação, etc.

Segundo BICKFORD (1994), 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.

De acordo com ZIENKIEWICZ (1989), o método consiste em três passos:

1º.) Pré-processamento

Nesta fase, o fenômeno a ser estudado já foi equacionado e a partir da construção de um modelo de simulação deste processo, é realizada a divisão do modelo em malhas. A partir do conhecimento do processo ou fenômeno, são aplicadas aos nós das malhas as condições de contorno ou restrições, como esforços aplicados e graus de liberdade do elemento. A escolha do formato e número de elementos da malha é um fator de extrema atenção e demanda a maior parte do tempo na elaboração do trabalho, segundo ZIENKIEWICZ (1989). Esta fase engloba as etapas “a” e “b” citadas acima.

2º.) Análise

Nesta etapa é escolhida a ferramenta adequada para processamento dos dados preparados na etapa do pré-processamento. Normalmente são utilizados softwares comerciais de processamento numérico para equações lineares e não-lineares, porém podem ser desenvolvidos algoritmos específicos para solução de sistemas. A parametrização realizada no pré-processamento é implementada no software escolhido para o processamento e fornecimento da solução matemática das equações. Esta fase engloba as etapas “c” e “d” citadas acima.

Atualmente existem diferentes softwares comercialmente disponíveis (Ansys, Nastran, Deform, Abaqus, LS-Dyna, etc), cada qual com suas características e limitações, tendo sido desenvolvidos para fenômenos específicos, sendo o uso e aplicação definida pela experiência do usuário.

3º.) Pós-processamento

Nesta etapa analisa-se, interpreta-se e verificam-se os resultados apresentados pelo aplicativo numérico.

Devido à precisão requerida na solução das equações, validade e coerência dos resultados apresentados é comum nesta fase, verificar a necessidade de um reprocessamento do fenômeno em estudo, alterando, por exemplo, a malha, as condições de contorno e a modificação das equações governantes.

2.4.1. O método dos elementos finitos aplicado à conformação de metais

O trabalho de MAKINOCHI (1996) apresenta formulações de integração no tempo, para a solução das equações diferenciais que descrevem o fenômeno em estudo.

2.4.1.1. Formulação Rígido-Plástica ou Rígido-Viscoplástica

Através desta formulação, assume-se que o material possui comportamento Rígido-Plástico ou Rígido-Viscoplástico, desprezando na conformação do material o efeito da resposta elástica do mesmo, quando submetido à deformação plástica. A tensão de escoamento é uma função da deformação e taxa de deformação do material e da temperatura de processamento.

Para processos de conformação plástica, tais como a laminação e trefilação, este método é bastante razoável, devido ao efeito elástico após o processamento do material ser desprezível.

2.4.1.2. Formulação Elasto-Plástica - Abordagem Estática Implícita

Para análise através deste método, é necessário que o processamento do material ocorra sem ação de impacto, dessa forma, assume-se a condição de quase equilíbrio durante a conformação. A integração estática implícita atende à este requisito, desde que as condições sejam mantidas a cada passo de integração. Entretanto ocorre uma grande dificuldade de convergência devido principalmente à continua mudança do atrito entre a ferramenta e o material na simulação.

2.4.1.3. Formulação Elasto-Plástica - Abordagem Estática Explícita

Para análise através deste método, a dificuldade de convergência do método implícito a tangente da matriz rigidez é solucionada sem iterações a cada passo de integração, limitando-se o tamanho de cada passo, tornando-os muito pequenos. Dessa forma, grande número de passos de incremento são necessários para completar todo o processo de conformação sem acúmulo de erro significativo devido ao fato de estar-se desprezando o efeito da contribuição dos termos de alta ordem de integração no tempo.

2.4.1.4. Formulação Elasto-Plástica - Abordagem Dinâmica Explícita

Nesta abordagem, as equações de equilíbrio dinâmico são a base desta formulação. A matriz rigidez não precisa ser construída e resolvida, sendo a principal vantagem deste método devido à velocidade para obtenção da solução comparando-se às abordagens estáticas. Para se obter uma solução estável, limita-se o tempo incremental de integração de tal forma que a amplitude da onda de dilatação não ultrapasse qualquer elemento. A solução pode ser obtida em tempos menores de processamento aumentando-se a velocidade do ferramental (em muitos casos 100 vezes a velocidade normal de processamento do material), porém este procedimento pode incorrer a erros ou apresentar resultados muito longe da realidade.

3 METODOLOGIA

3.1 Desenvolvimento do trabalho

O presente trabalho se restringe à fabricação dos fios de cobre de perfis retangulares para aplicação em indústria elétrica na produção de reguladores monofásicos, os quais são obtidos diretamente pela trefilação do vergalhão de cobre $\varnothing 8\text{mm}$, cuja seção transversal está representada na Figura 3.1(a), para o perfil retangular de cantos arredondados, cuja seção transversal está representada na Figura 3.1(c). O foco principal do mesmo se encontra na avaliação do dimensional do produto em suas diferentes etapas de processamento, laminação e trefilação, através de medição experimental do material processado e predição dimensional através de simulação numérica.

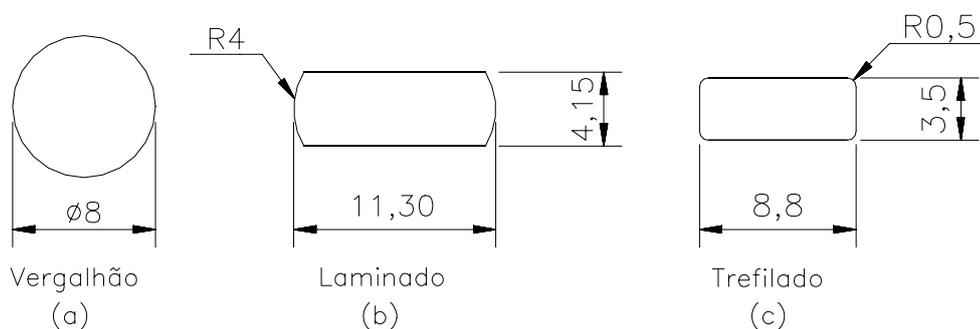


Figura 3.1 – Seção transversal do material – (a) Matéria prima, (b) Produto Laminado e (c) Produto Trefilado.

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim sendo, o trabalho está centrado nas três etapas básicas de produção do fio retangular: análise da matéria prima, conformação intermediária através do processo de laminação, cuja seção transversal está representada na Figura 3.1(b) e formatação final do produto através da trefilação. Na primeira etapa, o vergalhão de cobre é avaliado quanto às suas características mecânicas através de ensaio de tração e realização de medição do diâmetro inicial de partida do produto a ser processado. O ensaio de tração permitiu levantar a curva de resistência do material para comparação com os valores tabelados para o cobre eletrolítico e utilização da

mesma como parâmetro de entrada para a simulação de laminação. Nesta etapa também foi realizada uma análise comparativa da composição química do vergalhão de cobre de diâmetro 8 mm também , utilizando-se os valores normalizados para este produto e o resultado de ensaios informados no laudo do fornecedor.

A segunda etapa consiste em realizar a laminação experimental, conforme foto apresentada na Figura 3.2, a simulação do processo de laminação do fio e analisar os dados obtidos. O produto com perfil aproximadamente retangular foi obtido experimentalmente utilizando a linha de produção de fios retangulares e a simulação do processo realizada através do software DEFORM 3D. Os parâmetros da laminação como dimensional e material do cilindro, velocidade de laminação e força do laminador foram levantados para registro para eventual reprodução do processo e utilização no caso de futuras experimentações similares. A comparação dimensional nesta etapa foi realizada através de três formas distintas: medição experimental do produto obtido na trefilação, medição do produto obtido na simulação e cálculo teórico do dimensional final através de equações matemáticas. O ensaio de tração permitiu levantar a curva de resistência do material nesta etapa para comparação com a curva obtida na simulação do processo.



Figura 3.2 – Processo de laminação do vergalhão de cobre
Fonte: Laminação da TTDB

A terceira etapa do processo foi centrada na trefilação do produto para seu perfil final. O material laminado foi submetido ao processo de trefilação, sendo realizado a fabricação prática na linha de produção (Figura 3.3) e no software de simulação. Os parâmetros da trefilação como dimensional da fieira, velocidade de trefilação e carga

de tração foram levantados para registro para eventual reprodução do processo e utilização no caso de futuras experimentações similares. O dimensional do produto obtido nos dois processos foi comparado. O comportamento mecânico do material foi comparado através das curvas de tração obtidas no teste realizado no produto final e na curva de tração teórica levantada no software de simulação.



(a)

(b)

Figura 3.3 – Processo de trefilação do fio retangular (Material laminado) – (a) Entrada da fieira e (b) Saída da fieira

Fonte: Trefilação da TTDB

3.2 O procedimento experimental

O fluxograma apresentado na Figura 3.4 apresenta as etapas realizadas para execução do procedimento experimental do trabalho.

O trabalho experimental consistiu em realizar as etapas de conformação mecânica que o material é submetido (laminação e trefilação), com a realização de ensaios de dureza e tração antes e após estas etapas, para subsídio de informações das características mecânicas do produto.

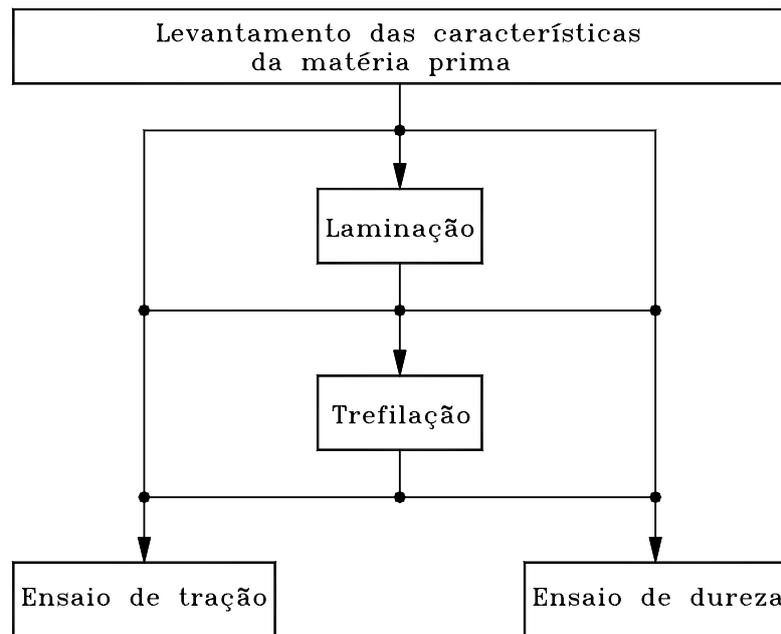


Figura 3.4 – Fluxograma da parte experimental do trabalho
 Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Caracterização da matéria prima (vergalhão de cobre Ø8 mm)

O material utilizado amplamente para a produção de fios para condução de corrente é o cobre eletrolítico. A escolha do tipo de cobre pode variar de acordo com os custos envolvidos, a necessidade de eficiência de condutividade necessária e a tecnologia disponível para processamento do material. Devido à utilização das condições disponíveis no processamento do fio retangular de cobre na TTDB, o material adotado foi o cobre eletrolítico.

O vergalhão de cobre eletrolítico é produzido a partir da fusão de catodos e outros elementos, sendo controlados durante seu estado líquido a sua composição química, apresentada na tabela III.1, e o teor de oxigênio (< 450 ppm), possuindo na composição uma concentração de 99,9% do elemento cobre puro. O líquido é fundido em lingotes que são posteriormente processados por laminação para o diâmetro nominal de Ø8mm, sendo posteriormente recozido e decapado. O mesmo é adquirido em bobinas enroladas sobre um palete de madeira, com amarração ao mesmo através de cintas metálicas e protegidas para o transporte e armazenagem por saco plástico de polietileno, conforme Figura 3.5. O peso total da embalagem

varia de 3 à 4,5 toneladas, correspondendo a um comprimento total de 6700 à 10125 metros de cobre.

TABELA III.1 - Composição química do cobre eletrolítico

Elemento	Limite Máximo (ppm)
Se	2,0
Te	2,0
Bi	1,0
Sb	4,0
As	5,0
Pb	5,0
S	15,0
Sn	5,0
Ni	10,0
Fe	10,0
Zn	3,0
Ag	25,0
O ₂	450,0

Fonte: ABNT NBR 14733



Figura 3.5 – Embalagem da matéria prima (vergalhão de cobre eletrolítico)

Fonte: Almoxarifado da TTDB

As propriedades físicas, químicas, mecânicas e elétricas principais do cobre eletrolítico são apresentadas na tabela III.2. As mesmas foram utilizadas como referência neste trabalho, sendo realizados ensaios comparativos apenas nos aspectos relativos à dureza e resistência mecânica dos valores obtidos nos ensaios de tração.

TABELA III.2 – 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 – 0,0172	[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	[HB]
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]

Fonte: Termomecânica São Paulo S.A.

⁽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.

Para a caracterização do material, foram retiradas amostras de 2 (duas) bobinas de diferentes lotes de fornecimento do fornecedor Caraíba, sendo preparados 4 (quatro) corpos de prova de comprimento 130mm, sendo 2 (duas) amostras de cada bobina utilizada no ensaio de tração e outras 2 (duas) para ensaio de dureza. As amostras foram retiradas diretamente da bobina do vergalhão de cobre, sem sofrer qualquer processo de usinagem. O desenho das dimensões das amostras e uma foto ilustrativa das mesmas estão apresentados na Figura 3.6.

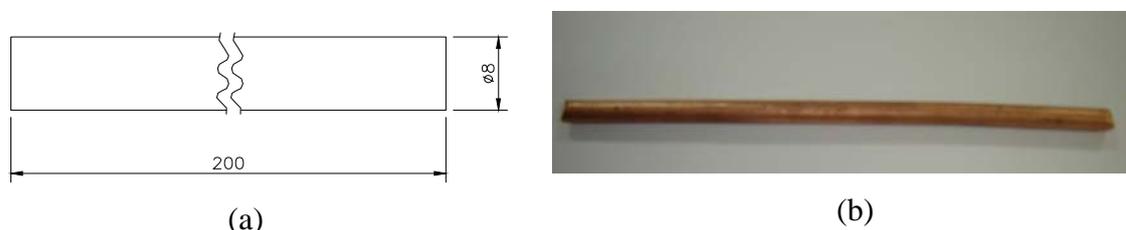


Figura 3.6 – Amostra do vergalhão de cobre para ensaios de dureza: (a) Dimensões da amostra e (b) Foto da amostra para ensaio

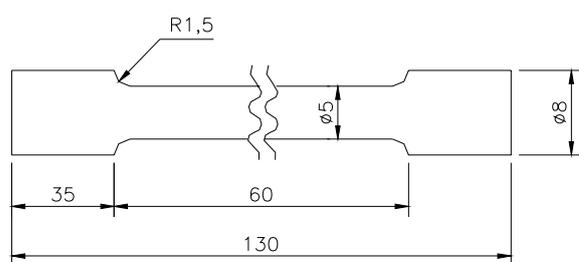
Fonte: Elaborado pelo Autor

Para obtenção das dimensões do vergalhão de cobre (dimensões de partida) para uso nos cálculos do processo de laminação, uma amostra de cada lote foi selecionada aleatoriamente e realizada a medição do diâmetro das mesmas. Foram

realizadas 04 (quatro) medidas utilizando um paquímetro digital Mitutoyo com exatidão de 0,02mm sendo a média e o desvio padrão calculados para cada lote. Com o valor médio obtido foi também calculada a seção do material.

3.3.1 Ensaio de tração do vergalhão de cobre Ø8 mm

Para a realização do ensaio de tração, 2 (duas) amostras retiradas conforme indicado no item anterior foram usinadas conforme apresentado na Figura 3.7. Para eliminar o risco de rompimento do material na região das garras de tração do material na máquina de ensaio, foi realizada uma redução na região central do corpo de prova.



(a)



(b)

Figura 3.7 – Amostra do vergalhão de cobre para ensaios de tração: (a) Dimensões da amostra e (b) Foto da amostra para ensaio

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina INSTRON modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados MERLIN e extensômetro axial eletrônico INSTRON modelo 2630-100 de 25 mm e célula de carga de 100 kN. A Figura 3.8 mostra fotos do equipamento durante a execução dos testes.

Os ensaios foram realizados com velocidade constante de 4 mm/min para todas as amostras. A taxa de deformação inicial do material foi calculada conforme equação 3.1, sendo obtido valor de $\varepsilon_{tra'} = 0,0011 \text{ s}^{-1}$, considerando o comprimento útil de 60 mm do corpo de prova no equipamento de ensaio. A manutenção da velocidade do ensaio constante provocou um decréscimo da taxa de deformação até a ocorrência da carga máxima e posterior aumento da mesma após atingir este ponto, porém com

controle adequado desta deformação a fim de evitar o rompimento abrupto do material durante o ensaio.

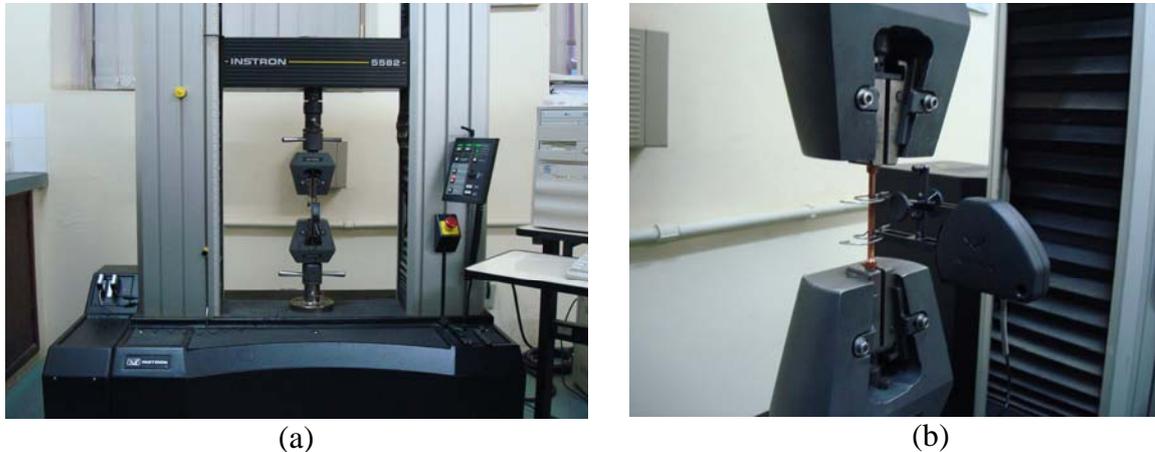


Figura 3.8 – Ensaio de tração do vergalhão de cobre: (a) Vista geral e (b) Detalhe do teste

Fonte: Laboratório do DEMET/UFMG

$$\varepsilon_{tra'} = \frac{V_{tra}}{l} \quad 3.1$$

onde $\varepsilon_{tra'}$ é a taxa de deformação na tração, V_{tra} é a velocidade das garras no ensaio e l é o comprimento útil do corpo de prova na tração.

A aquisição dos dados de carga e deformação convencional foi obtida diretamente no equipamento de ensaio via extensômetro, até o início da estricção (alcance da carga máxima). A partir destes dados, através da teoria da conservação do volume, os mesmos foram convertidos em pontos da curva de tensão verdadeira x deformação verdadeira, de modo a possibilitar a determinação da região da curva de escoamento correspondente à deformação uniforme do corpo de prova. Após a ocorrência da estricção, foram realizadas medidas periódicas do diâmetro instantâneo utilizando o paquímetro digital Bocchi e do raio do pescoço utilizando os padrões de raio Maissner, até a ruptura do corpo de prova. A cada medida o valor correspondente da força de tração era registrada. Estes valores permitiram a montagem da curva de tração do material a partir da carga máxima até a ruptura do mesmo, referente à deformação não uniforme do material, incluindo o uso de correção de Bridgman (DIETER, 1981).

Os valores obtidos na curva de tração do vergalhão de cobre recozido, desde o regime elástico até a estrição com o uso da correção de Bridgman, foram formatados e utilizados como entrada de dados para o programa de simulação numérica (DEFORM 3D). O objetivo de usar os valores reais obtidos em ensaios ao invés do banco de dados do software foi de alcançar a maior precisão e repetibilidade na simulação em relação ao processo real.

3.3.2 Ensaio de dureza do vergalhão de cobre Ø8 mm

Os ensaios de dureza foram realizados em um durômetro Microtest, modelo 81-C com zero automático, conforme Figura 3.9, sendo utilizada a escala de dureza Brinell. O penetrador constituído de esfera de aço temperado de $\varnothing 2,5$ mm e carga normalizada de 62,5 kg. O tempo de aplicação da carga durante o ensaio foi de 30 segundos.

As amostras foram ensaiadas na matéria prima conforme recebida (vergalhão de cobre recozido). O ensaio foi realizado no diâmetro das amostras, sendo para cada corpo de prova realizadas 4 (quatro) medições ao longo do comprimento, em linha reta, distanciadas de 30 mm entre as mesmas, sendo calculada a média aritmética das medidas para cada corpo de prova.



**Figura 3.9 – Máquina de ensaio de dureza
(Vergalhão de cobre Ø8 mm)**

Fonte: Laboratório da TTDB

3.4 Laminação do vergalhão de cobre (Processo intermediário)

O processo de conformação a frio de laminação é realizado na fabricação dos fios retangulares com objetivo de pré-formar o fio antes do processo de trefilação. O mesmo é realizado utilizando-se um laminador de cilindros planos do tipo “duo” e não é realizada refrigeração nesta etapa, conforme apresentado na Figura 3.2. O processo inicialmente consiste na abertura dos cilindros para acoplamento do vergalhão de cobre, sendo o mesmo esmagado pelo fechamento posterior dos cilindros até que a abertura entre os mesmos atinja a abertura correspondente à espessura do perfil que se deseja laminado. No caso específico deste experimento a abertura foi de 4,10mm sendo após este ajuste iniciada a laminação propriamente. A ponta inicial do processo, deformada através deste procedimento é descartada da linha de produção, não sendo objeto de análise do trabalho.

O laminador utilizado no processo possuía cilindro de aço fundido de diâmetro $\varnothing 162,4$ mm e foi utilizada a velocidade de laminação da ordem de 50 m/min sendo aplicada uma força de 5 toneladas aos cilindros de conformação do metal.

Para levantamento das características do material em sua condição final de processamento, o perfil utilizado para realização dos ensaios foi o obtido diretamente no processo de laminação. Foram retiradas quatro amostras de dois lotes de produção, sendo duas amostras por lote, sendo as mesmas coletadas logo após o cilindro laminador. As dimensões das amostras para realização dos ensaios de tração e dureza são apresentadas na Figura 3.10. Foram realizadas quatro medições para cada amostra (espessura e largura) utilizando um paquímetro digital Mitutoyo com exatidão de 0,02mm sendo a média e o desvio padrão calculados para cada lote. A seção do perfil médio encontrado também foi calculada para cada lote.

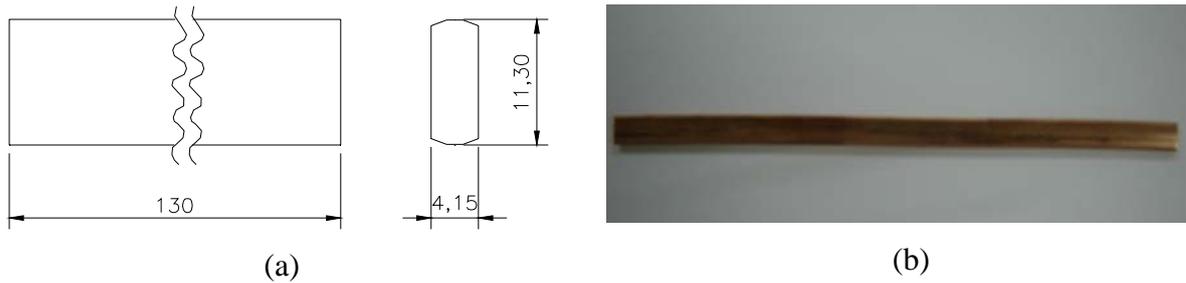


Figura 3.10 – Amostra do material laminado para ensaios de tração e dureza: (a) Dimensões da amostra e (b) Foto da amostra para ensaio

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.4.1 Ensaio de tração do material laminado

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina INSTRON modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados MERLIN e extensômetro axial eletrônico INSTRON modelo 2630-100 de 25 mm e célula de carga de 100 kN. A Figura 3.11(a) mostra fotos do equipamento durante a execução dos testes.

Devido ao fato de não ter sido construído um corpo de prova para realização do ensaio de tração com redução de área para forçar o rompimento neste ponto, foi tomado o cuidado de observar que o aparecimento da estricção e, conseqüentemente a ruptura do material ocorre-se fora da região de tracionamento das garras da maquina de ensaios, conforme Figura 3.11(b).



Figura 3.11 – Ensaio de tração do material laminado: (a) Vista geral e (b) Detalhe da região de estricção do material

Fonte: Laboratório do DEMET/UFMG

Os ensaios foram realizados com velocidade constante de 4 mm/min para todas as amostras. A taxa de deformação inicial do material foi calculada conforme equação 3.1, sendo obtido valor de $\dot{\epsilon}_{tra} = 0,0011s^{-1}$, considerando o comprimento útil de 60 mm do corpo de prova no equipamento de ensaio. A manutenção da velocidade do ensaio constante provocou um decréscimo da taxa de deformação até a ocorrência da carga máxima e posterior aumento da mesma após atingir este ponto, porém com controle adequado desta deformação a fim de evitar o rompimento abrupto do material durante o ensaio.

A aquisição dos dados de carga e deformação convencional foi obtida diretamente no equipamento de ensaio via extensômetro, até o início da estricção (alcance da carga máxima). A partir destes dados, através da teoria da conservação do volume, os mesmos foram convertidos em pontos da curva de tensão verdadeira x deformação verdadeira, de modo a possibilitar a determinação da região da curva de escoamento correspondente à deformação uniforme do corpo de prova.

3.4.2 Ensaio de dureza do material laminado

Os ensaios de dureza foram realizados em um durômetro Microtest, modelo 81-C com zero automático, conforme Figura 3.12, sendo utilizada a escala de dureza Brinell. O penetrador constituído de esfera de aço temperado de $\varnothing 2,5$ mm e carga normalizada de 62,5 kg. O tempo de aplicação da carga durante o ensaio foi de 30 segundos.

As amostras conforme apresentado na Figura 3.10 foram ensaiadas considerando medições realizadas na largura do material, sendo para cada corpo de prova realizadas 4 (quatro) medições ao longo do comprimento, em linha reta, distanciadas de 30 mm entre as mesmas, sendo calculada a média aritmética das medidas para cada corpo de prova.



Figura 3.12 – Máquina de ensaio de dureza
Fonte: Laboratório da TTDB

3.4.3 Simulação numérica do processo de laminação

A simulação da laminação foi realizada utilizando o software DEFORM 3D versão 6.1 do fabricante SFTC. A geometria do material a ser laminado (vergalhão com dimensional de $\varnothing 8 \times 50$ mm de comprimento), o cilindro laminador (rolo laminador plano de $\varnothing 160,2$ mm e largura 15 mm) e o empurrador (com dimensional de 10×10 mm) foram elaborados no software utilizando o módulo “Shape Rolling”. Devido à simetria dos perfis, o material base (vergalhão de cobre) e o empurrador foram desenhados considerando $\frac{1}{4}$ do perfil original de cada item, conforme Figura 3.13.

Os parâmetros de simulação no pré-processador do DEFORM 3D foram ajustados com as seguintes condições de contorno: laminação com deformação plástica incremental (Laminação Lagrangiana), processo com temperatura constante de 25°C (isotérmico), peça de trabalho simulada em $\frac{1}{4}$ de dimensão, conforme Figura 3.14. O laminador e o empurrador foram considerados materiais rígidos, uma vez que o foco do estudo não estava no acompanhamento dos fenômenos que ocorrem nestas peças. O vergalhão de cobre foi definido como um material de rígido-plástico.

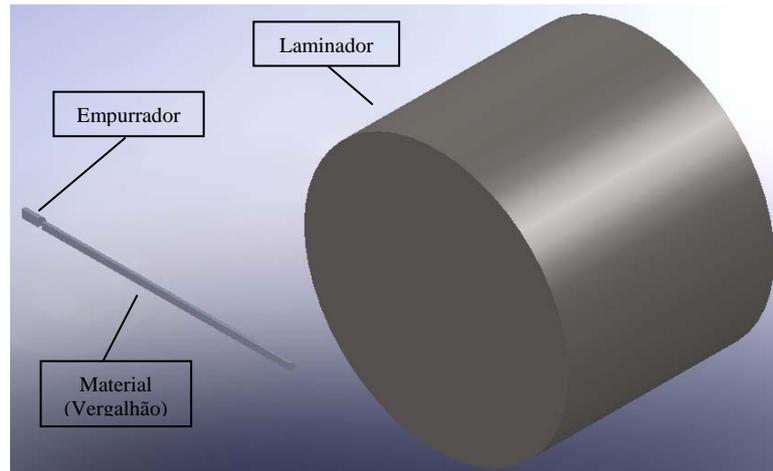


Figura 3.13 – Desenho do vergalhão a ser laminado, empurrador e rolo de laminação
Fonte: Elaborado pelo Autor

Após algumas simulações, foi escolhido para o material a ser laminado (vergalhão de cobre) uma malha hexaédrica com a formação de 34 elementos na seção 2D (face) por 75 layers na seção 3D, proporcionando a formação de 2550 elementos na seção 3D equivalentes à 3496 nós. Objetivou-se neste ponto a obtenção de elementos de dimensões aproximadas em todas as faces do material e o melhor perfil de contorno dos elementos na seção do mesmo, conforme Figura 3.14. As características mecânicas do vergalhão de cobre foram importadas para o DEFORM 3D com base nos ensaios de tração realizados para a matéria prima, conforme descrito anteriormente.

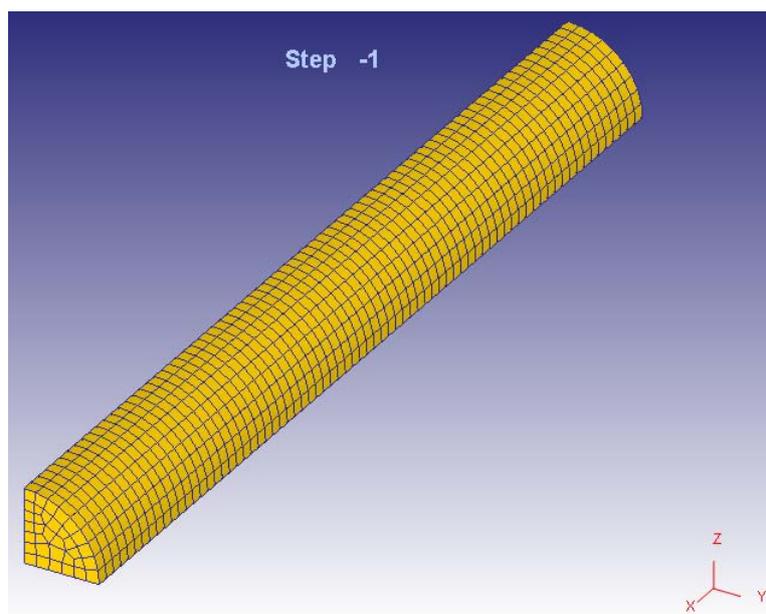


Figura 3.14 – Perfil da malha de nós do vergalhão de cobre na laminação
Fonte: Elaborado pelo Autor

No processo de simulação foi adotada a velocidade angular constante dos cilindros de laminação de 87,42 rpm (equivalente à 50 m/min), conforme medido no processo de fabricação real. A velocidade linear do empurrador no vergalhão de cobre foi adotada como constante de 366,64 mm/s. Para avaliar a influência do coeficiente de atrito entre o vergalhão de cobre e os materiais rígidos no espalhamento do material durante o processo de laminação, foram simuladas laminações com alteração somente desta componente considerando os seguintes valores: $\mu = 0,3; 0,5; 0,7$ e $0,9$. A representação do processo de laminação está apresentada na Figura 3.15, onde são apresentados o estágio inicial da simulação e um estágio intermediário, onde se pode notar na saída do laminador o perfil retangular com bordas arredondadas obtidas neste processo.

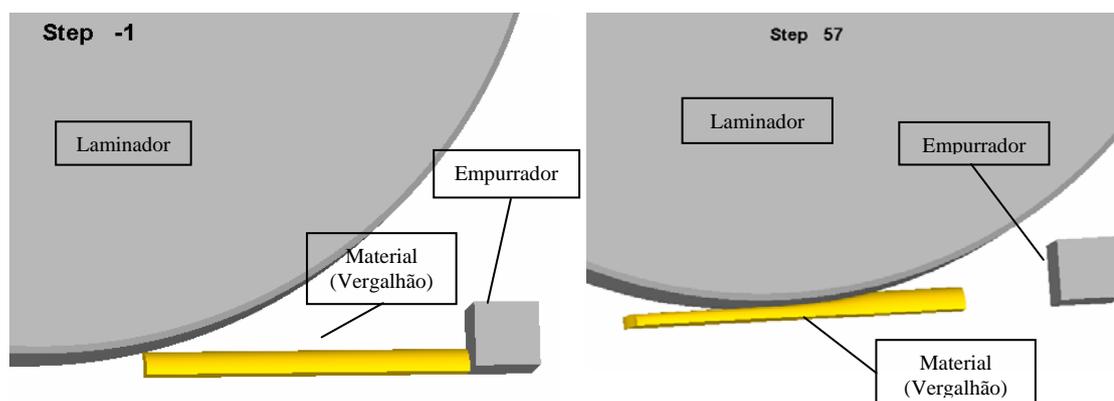


Figura 3.15 – Estágios inicial e intermediário da simulação de laminação
Fonte: Elaborado pelo Autor

Para efeito de avaliação do processo de laminação, foram realizadas comparações dimensionais dos resultados obtidos a partir da experimentação na linha de fabricação, das dimensões obtidas a partir da simulação do processo no software DEFORM 3D e das equações de KAZEMINEZHAD e TAHERI para o cálculo teórico do valor do alargamento do material obtido durante a laminação.

3.5 Trefilação do fio retangular

A trefilação do fio retangular é um processo de conformação à frio realizado continuamente logo após a laminação para a obtenção do fio no seu dimensional

final. Para a obtenção do perfil em estudo, o qual apresenta o dimensional de 3,5 x 8,8 mm, é utilizada a fieira apresentada na Figura 3.16(a). Durante o processo é utilizada uma lubrificação com óleo Agefil com o intuito de reduzir o atrito entre o fio de cobre e a matriz, além desse fluido também contribuir para a refrigeração durante a trefilação. A Figura 3.16(b) apresenta a entrada do processo de trefilação, mostrando a imersão do fio laminado no fluido lubrificante. A Figura 3.16(c) apresenta a saída da trefilação, onde o fio apresenta o perfil final desejado.

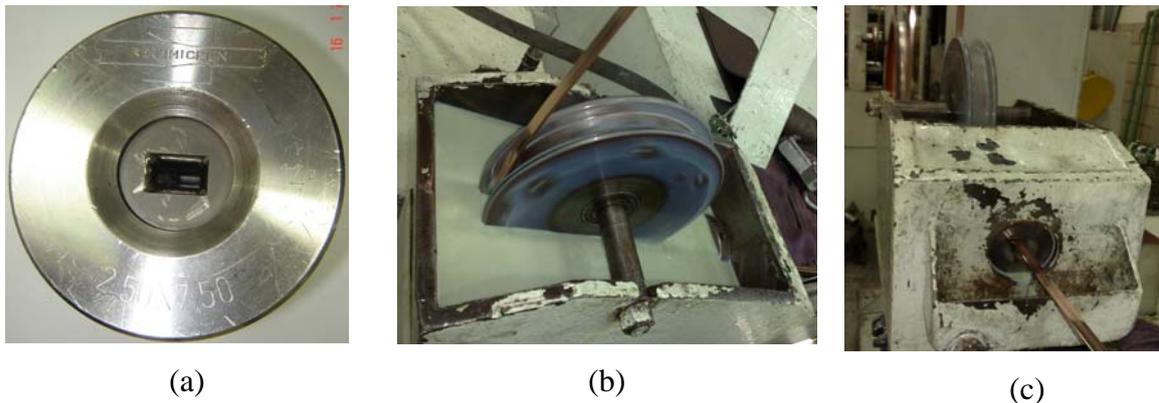


Figura 3.16 – (a) Detalhe da fieira de trefilação; (b) Entrada do fio no processo de trefilação e (c) Saída do fio da linha de trefilação

Fonte: TTDB

Os parâmetros de trefilação foram registrado para fins de necessidade de repetição do processo e utilização de fatores similares na simulação numérica. A velocidade de entrada do fio na fieira foi medido com valor de 50 m/min e a velocidade na saída da fieira apresentava valor de 55 m/min. A força de tracionamento do fio foi medido com valor de 3 ton. A fieira utilizada no processo possuía o núcleo de trabalho do material em metal duro de dureza 90,5 à 92,5 HRA, com carcaça em aço carbono SAE1045. As principais dimensões da fieira apresentada em corte total na Figura 2.6 são apresentadas abaixo, conforme informações técnicas apresentadas no desenho de construção da matriz.

Seção de calibragem	(S1)	3,8 x 8,5 mm (+0,01 /-0)
Diâmetro do núcleo	(d2)	25±0,02 mm
Diâmetro da carcaça	(d3)	70±0,1 mm
Altura do núcleo	(h2)	20±0,02 mm
Altura da carcaça	(h3)	40±0,1 mm

Cilindro de calibragem	I3	3,5 mm
Altura de entrada	I5	11 mm
Ângulo de entrada	2β	$60^{\circ}\pm 5^{\circ}$
Ângulo de redução	2α	$18^{\circ}\pm 1^{\circ}$
Ângulo de saída	2γ	$90^{\circ}\pm 5^{\circ}$

Para levantamento das características do material em sua condição final de processamento, o perfil utilizado para realização dos ensaios foi o obtido diretamente no processo de trefilação. Foram retiradas quatro amostras de diferentes bateladas de produção, sendo duas amostras por corrida, sendo as mesmas coletadas logo após a saída da fieira de trefilação. O dimensional das amostras para realização dos ensaios de tração e dureza é apresentado na Figura 3.17. Foram realizadas medições nas dimensões das amostras utilizando um paquímetro digital Mitutoyo com exatidão de 0,02mm sendo a média e o desvio padrão calculados para cada lote. Foi calculada a seção do perfil trefilado considerando a seção média.

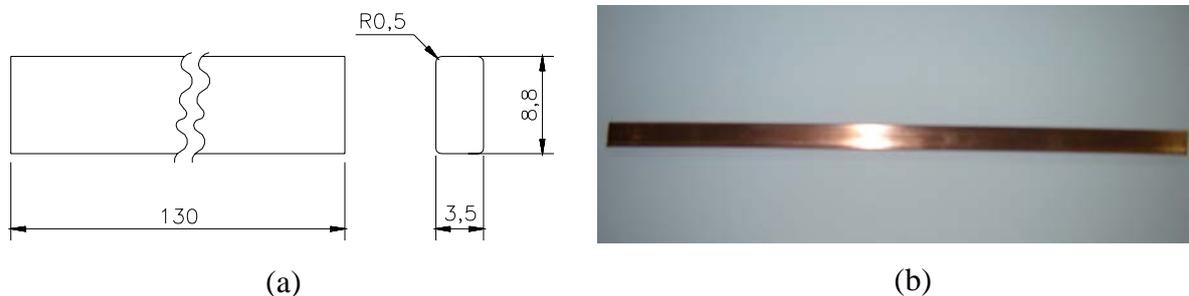


Figura 3.17 – Amostra do material trefilado para ensaios de tração e dureza: (a) Dimensões da amostra e (b) Foto da amostra para ensaio

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.5.1 Ensaio de tração do fio trefilado

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina SHIMADZU modelo Autograph AG-IS 100 kN com sistema de controle e aquisição de dados TRAPEZIUM 2 e extensômetro axial eletrônico SHIMADZU modelo SG50-100 de 50 mm e célula de carga de 100 kN. A Figura 3.18(a) mostra uma foto com a vista geral do equipamento de ensaio.

Devido ao fato de não ter sido construído um corpo de prova para realização do ensaio de tração com redução de área para forçar o rompimento neste ponto, foi tomado o cuidado de observar que o aparecimento da estrição e, conseqüentemente a ruptura do material ocorre-se fora da região de tracionamento das garras da maquina de ensaios. A Figura 3.18(b) mostra uma foto em detalhe da colocação do extensômetro no corpo de prova.

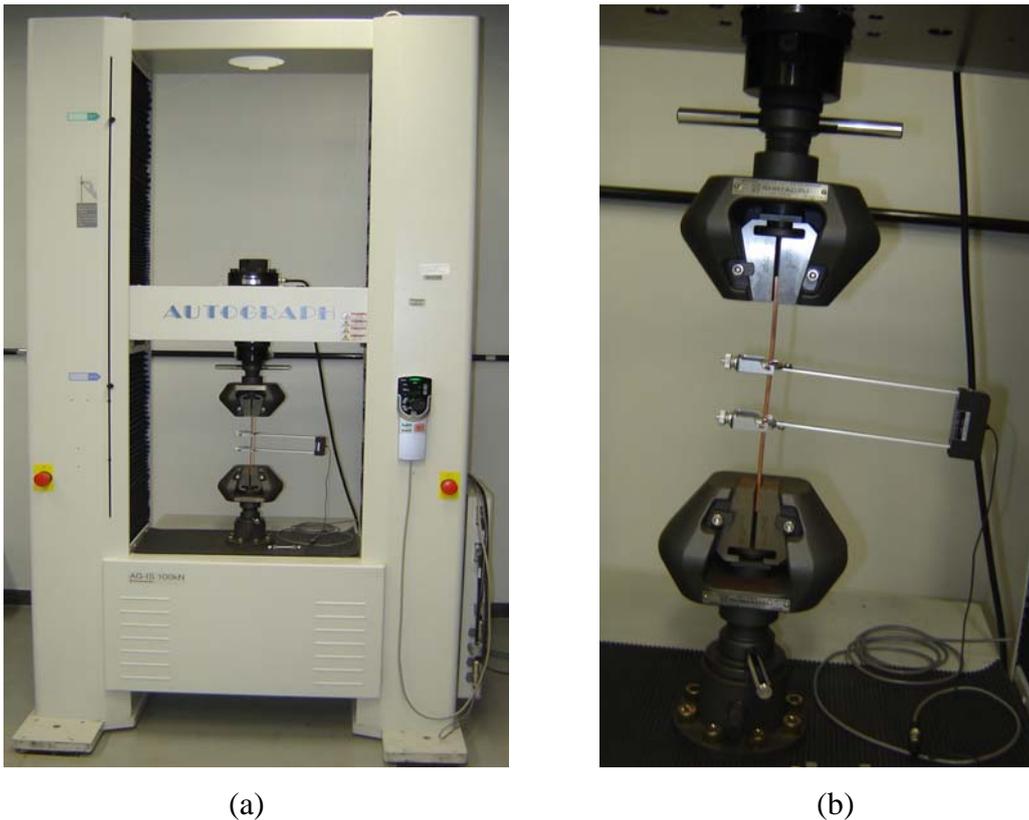


Figura 3.18 – Ensaio de tração do material trefilado: (a) Vista geral e (b) Detalhe da execução do ensaio

Fonte: Laboratório do DEMEC/UFMG

Os ensaios foram realizados com velocidade constante de 4 mm/min para todas as amostras. A taxa de deformação inicial do material foi calculada conforme equação 3.1, sendo obtido valor de $\varepsilon_{tra} = 0,0011s^{-1}$, considerando o comprimento útil de 60 mm do corpo de prova no equipamento de ensaio. A manutenção da velocidade do ensaio constante provocou um decréscimo da taxa de deformação até a ocorrência da carga máxima e posterior aumento da mesma após atingir este ponto, porém com controle adequado desta deformação a fim de evitar o rompimento abrupto do material durante o ensaio.

A aquisição dos dados de carga e deformação convencional foi obtida diretamente no equipamento de ensaio via extensômetro, até o início da estricção (alcance da carga máxima). A partir destes dados, através da teoria da conservação do volume, os mesmos foram convertidos em pontos da curva de tensão verdadeira x deformação verdadeira, de modo a possibilitar a determinação da região da curva de escoamento correspondente à deformação uniforme do corpo de prova.

3.5.2 Ensaio de dureza do fio trefilado

Os ensaios de dureza foram realizados em um durômetro Microtest, modelo 81-C com zero automático, apresentada na Figura 3.12, sendo utilizada a escala de dureza Brinell. O penetrador constituído de esfera de aço temperado de $\varnothing 2,5$ mm e carga normalizada de 62,5 kg. O tempo de aplicação da carga durante o ensaio foi de 30 segundos.

As amostras conforme apresentado na Figura 3.17 foram ensaiadas considerando medições realizadas na largura do material, sendo para cada corpo de prova realizadas 4 (quatro) medições ao longo do comprimento, em linha reta, distanciadas de 30 mm entre as mesmas, sendo calculada a média aritmética das medidas para cada corpo de prova.

3.5.3 Simulação numérica do processo de trefilação

A simulação da trefilação foi realizada no software DEFORM 3D versão 6.1 do fabricante SFTC. Para implementação no pré-processador, a fieira de trefilação foi desenhada previamente no software Solid Works versão 2008 do fabricante Dassault Systèmes SolidWorks Corp., pertencente ao Departamento de Metalurgia, conforme dados já apresentados. O material laminado teve o dimensional utilizado conforme a saída do processo de simulação realizado para a laminação. Devido à simetria dos

perfis, a simulação foi realizada considerando $\frac{1}{4}$ do perfil original do fio retangular laminado, conforme Figura 3.19.

Os parâmetros de simulação no pré-processador do DEFORM 3D foram ajustados com as seguintes condições de contorno: processo com temperatura constante de 25°C (isotérmico), peça de trabalho simulada em $\frac{1}{4}$ de dimensão. A fieira de trefilação foi considerada como material rígido, uma vez que o foco do estudo não estava no acompanhamento dos fenômenos que ocorrem neste elemento. O perfil de cobre laminado foi definido como um material de comportamento rígido-plástico.

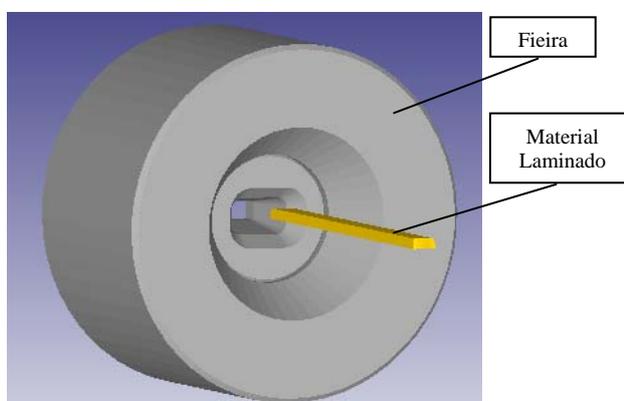


Figura 3.19 – Desenho do fio retangular laminado e a fieira de trefilação
Fonte: Elaborado pelo Autor

Após algumas simulações, foi escolhido para o material a ser trefilado (perfil retangular previamente laminado) uma malha tetraédrica com a formação de 8000 elementos e fator de relação de tamanho de 2, proporcionando um total de 10422 nós e 10952 polígonos superficiais, totalizando 43022 elementos na superfície 3D. Objetivou-se neste ponto a obtenção de elementos de dimensões aproximadas em todas as faces do material e o melhor perfil de contorno dos elementos na seção do mesmo, conforme Figura 3.20. Para evitar distorções e obter o melhor resultado na simulação, foi realizada uma condensação das malhas nas bordas do material laminado devido ao pequeno raio (0,5mm) na fieira de trefilação neste ponto. As características mecânicas do perfil retangular de cobre previamente laminado foram utilizadas a partir dos resultados obtidos na simulação da laminação do vergalhão de cobre no DEFORM 3D.

No processo de simulação foi adotada a velocidade linear constante de alimentação da fieira de trefilação 115 m/min, correspondente ao valor medido no processo real de trefilação do material na linha de produção de fios retangulares (parâmetro levantado na máquina de trefilação). Para o início da operação de trefilação no software Deform 3D, foi imprimida uma força constante de 100 N na face frontal de entrada do material na fieira. O atrito entre a fieira e o material de cobre foi considerado de 0,09, conforme valor levantado por HENSEL e SPITTEL (1978). A representação gráfica do processo de trefilação está apresentada na Figura 3.21, onde são apresentados o estágio inicial da simulação e um estágio intermediário, onde parte do material já foi totalmente submetido ao processo de trefilação.

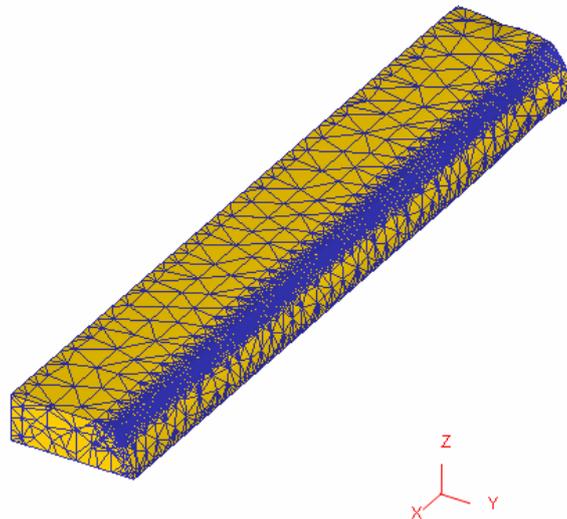


Figura 3.20 – Detalhe da malha de nós do perfil retangular laminado de cobre
Fonte: Elaborado pelo Autor

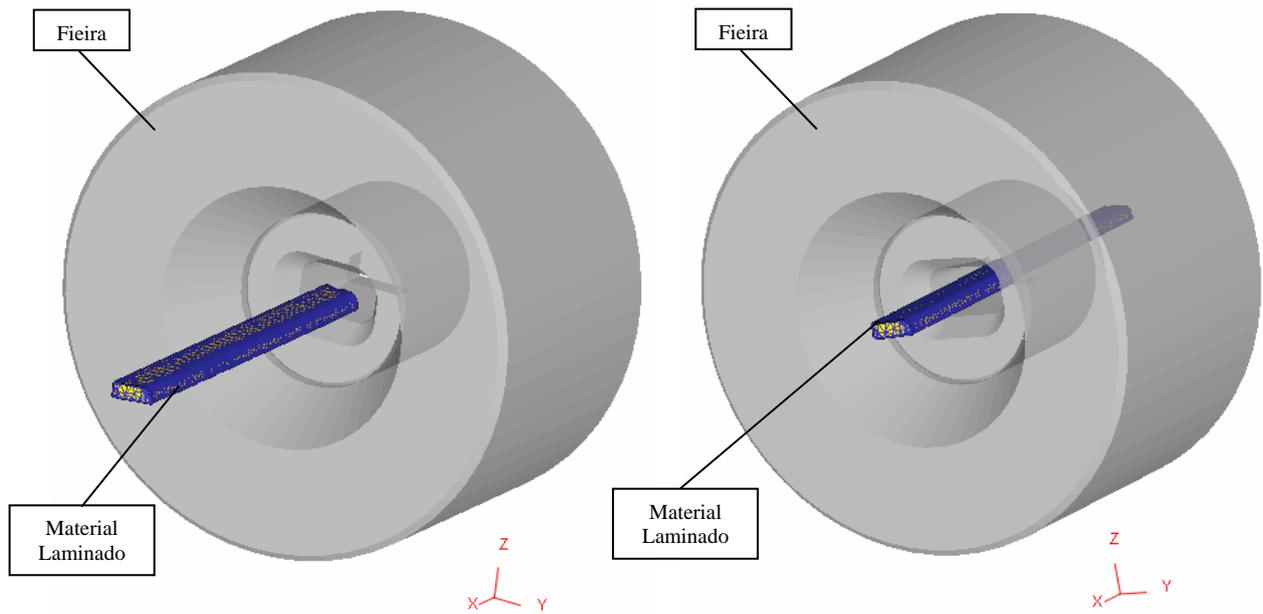


Figura 3.21 – Estágios inicial e intermediário da simulação de laminação
Fonte: Elaborado pelo Autor

Para efeito de avaliação do processo de trefilação, foram realizadas comparações nas dimensões dos resultados obtidos a partir da experimentação na linha de fabricação e dos dimensionais obtidos a partir da simulação do processo no software DEFORM 3D.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos para o material analisado nas diversas etapas do processamento do fio retangular: a matéria prima (vergalhão de cobre), o produto semi-elaborado (perfil laminado) e o produto acabado (fio retangular trefilado). Para cada uma das etapas serão discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados, os parâmetros de fabricação e recebimento desejados, os resultados encontrados na análise do processo na linha de produção, a avaliação teórica da etapa de laminação e as simulações através do aplicativo numérico para as etapas de laminação e trefilação.

4.1 Análise da matéria prima (Vergalhão de cobre Ø8 mm)

O vergalhão de cobre de diâmetro 8 mm analisado foi adquirido no mercado nacional do fornecedor Caraíba Metais (Grupo Paranapanema). A composição química informada no certificado de análises físico/químico (laudo dos fabricantes) está apresentada na Tabela IV.1. Os valores são comparados com a norma aplicável para o produto (ABNT NBR 14733). Foram analisados 2 (dois) lotes diferentes de fornecimento, sendo os mesmos denominados “A” e “B”.

Confrontado os valores apresentados para a composição química do vergalhão de cobre diâmetro 8 mm, conforme laudo do fabricante e os limites apresentados pela norma ABNT NBR 14733, pode-se notar que o mesmo atende totalmente para os dois lotes avaliados os limites exigidos. Neste estudo não se deu enfoque em avaliar as características do material a partir de sua composição química, porém os resultados de suas propriedades mecânicas são fundamentais para definição do comportamento do mesmo durante o processo de conformação a frio, portanto foram realizados ensaios de dureza e tração em duas (2) amostras em cada ensaio, conforme descrito no item 3.3. Os objetivos destes ensaios foram de levantar os valores de dureza, alongamento e resistência a tração para comprovação dos valores informados no laudo, além da obtenção da curva de resistência mecânica à

tração do material para uso no software DEFORM 3D, utilizado na simulação numérica dos processos de laminação e trefilação.

Tabela IV.1 – Composição química e propriedades (Vergalhão de cobre Ø8mm)

Elemento	Símbolo	NBR 14733		Lote “A” (ppm)	Lote “B” (ppm)
		(%)	(ppm)		
Telúrio	Te	< 0,0002	< 2	< 0,50	< 0,50
Selênio	Se	< 0,0002	< 2	< 1,00	< 1,00
Bismuto	Bi	< 0,0001	< 1	0,23	0,23
Prata	Ag	< 0,0025	< 25	7,00	6,00
Arsênio	As	< 0,0005	< 5	2,50	2,70
Ferro	Fe	< 0,0010	< 10	2,50	2,50
Níquel	Ni	< 0,0010	< 10	< 1,00	< 1,00
Chumbo	Pb	< 0,0005	< 5	0,41	0,40
Antimônio	Sb	< 0,0004	< 4	< 1,00	< 1,00
Estanho	Sn	< 0,0005	< 5	< 0,50	< 0,50
Enxofre	S	< 0,0015	< 15	5,40	5,10
Zinco	Zn	< 0,0003	< 3	< 1,00	< 1,00
O ₂	Oxigênio	< 0,0450	< 450	230,00	216,00
Cobre (*)	Cu	Mín. 99,9%		99,975	99,977
Condutividade elétrica (% IACS a 20°)			> 101,0	101,30	101,29
Alongamento após tração (%)			> 30	43,60	44,20
Resistência à tração (kg/mm ²)			< 25	22,12	20,89
Diâmetro (mm)			8 ± 0,4	7,92	7,94

(*) Teor de Cobre: Obtido pela diferença entre 100% e o total de impurezas contidas.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Foram retiradas 4 (quatro) amostras para realização dos ensaios de tração e dureza, sendo 2 (duas) do lote “A” e 2 (duas) do lote “B”. Foi realizada a medição do diâmetro do material, considerando 4 (quatro) medidas para cada lote sendo 2 (duas) em cada amostra. Os resultados apresentados na Tabela IV.2, onde se apresenta também a seção calculada a partir da média dos diâmetros.

Tabela IV.2 – Medição das dimensões do vergalhão de cobre

		Lote “A”	Lote “B”
Diâmetro (mm)	Medida 1	7,94	7,96
	Medida 2	7,92	7,93
	Medida 3	7,92	7,94
	Medida 4	7,93	7,94
	Média	7,93±0,010	7,94±0,013
Seção (mm²)		49,36±0,119	49,55±0,157

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.1 Ensaio de tração da matéria prima (Vergalhão de cobre Ø8 mm)

O ensaio de tração uniaxial para as amostras de vergalhão de cobre diâmetro 8mm, realizado conforme descrito no item 3.3.1 apresentou os resultados mostrados nas Figuras 4.1 a 4.3. Os corpos de prova para o ensaio de tração foram denominados amostra “A1” para o lote “A” e “B1” para o lote B. A Figura 4.1 mostra as curvas obtidas para as amostras “A” e “B” para tensão e deformação convencionais. A Figura 4.2 mostra as curvas obtidas para amostras “A” e “B” para a tensão e deformação verdadeiras (deformação uniforme). A Figura 4.3 mostra as curvas obtidas para amostras “A” e “B” para a tensão e deformação verdadeiras (deformação total), com correção de Bridgman.

A partir do ensaio de tração foram levantados os dados apresentados na Tabela IV.3. O limite de escoamento convencional foi calculado a partir da média para as duas amostras da tensão máxima convencional necessária para provocar uma deformação de 0,5% no material. O limite de resistência corresponde à média da tensão máxima convencional obtida no ensaio de tração para as duas amostras. O alongamento uniforme (ALU) foi calculado como a deformação provocada pela carga máxima, conforme Figura 4.4, sendo o valor apresentado na Tabela IV.3 a média calculada para as duas amostras. O alongamento total foi calculado como a média para as duas amostras da deformação total, considerando o comprimento inicial (Figura 3.7) e o comprimento alcançado após a fratura do material. O alongamento não uniforme (ALNU) foi calculado pela diferença direta dos valores médios calculados para a deformação total e a deformação uniforme.

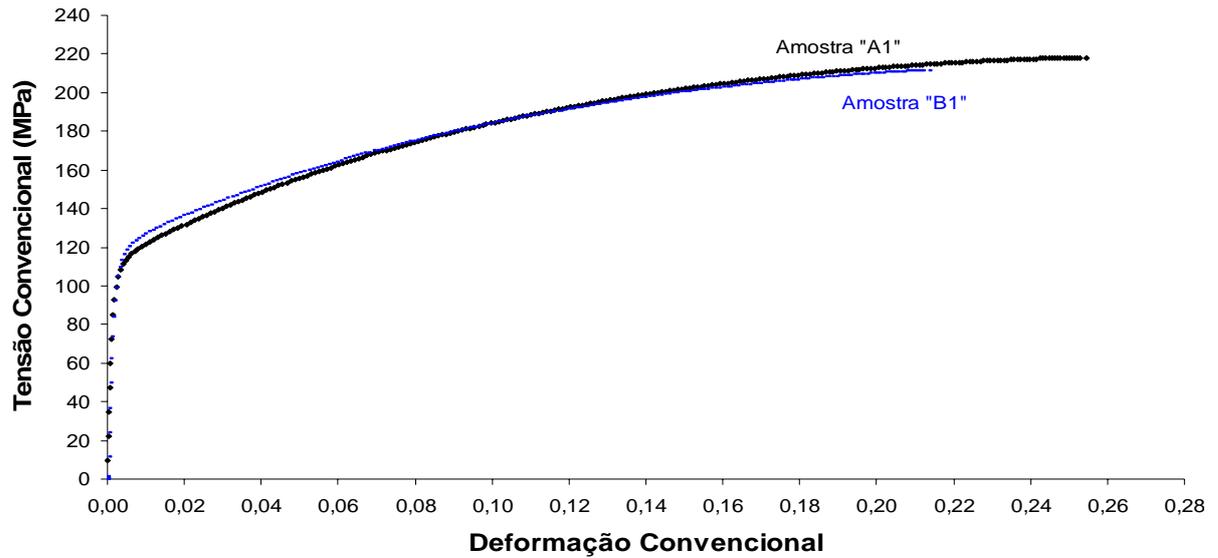


Figura 4.1 – Ensaio de tração no vergalhão de cobre Ø8 mm – Tensão x deformação convencionais

Fonte: Elaborado pelo Autor

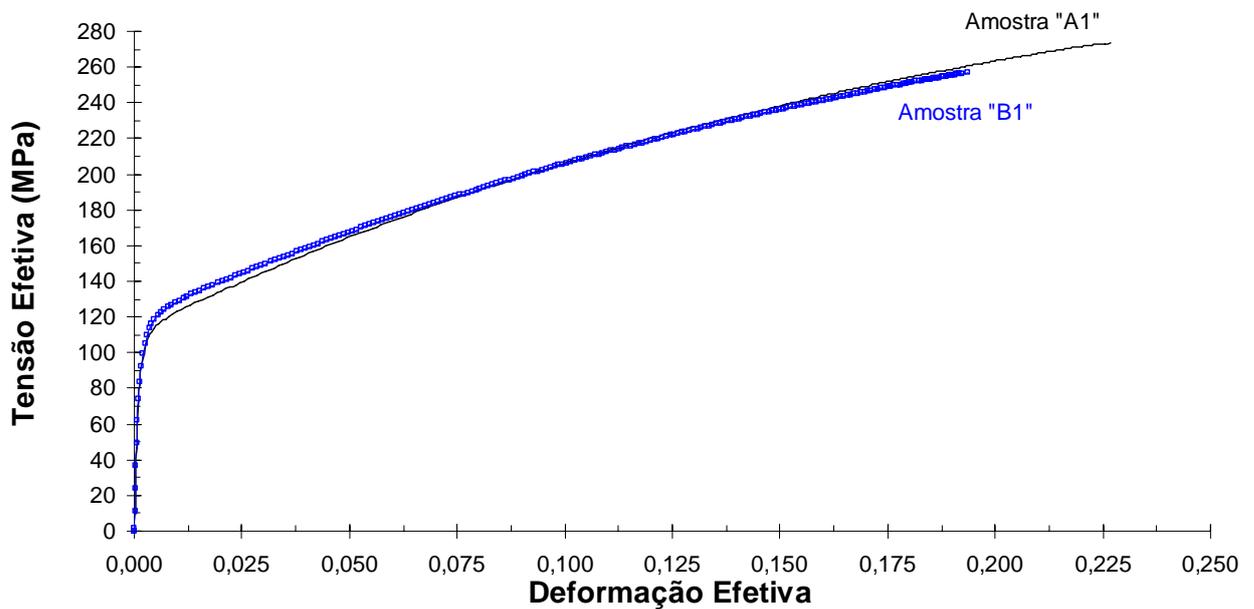


Figura 4.2 – Ensaio de tração no vergalhão de cobre Ø8 mm – Tensão x deformação efetivas (Deformação Uniforme)

Fonte: Elaborado pelo Autor

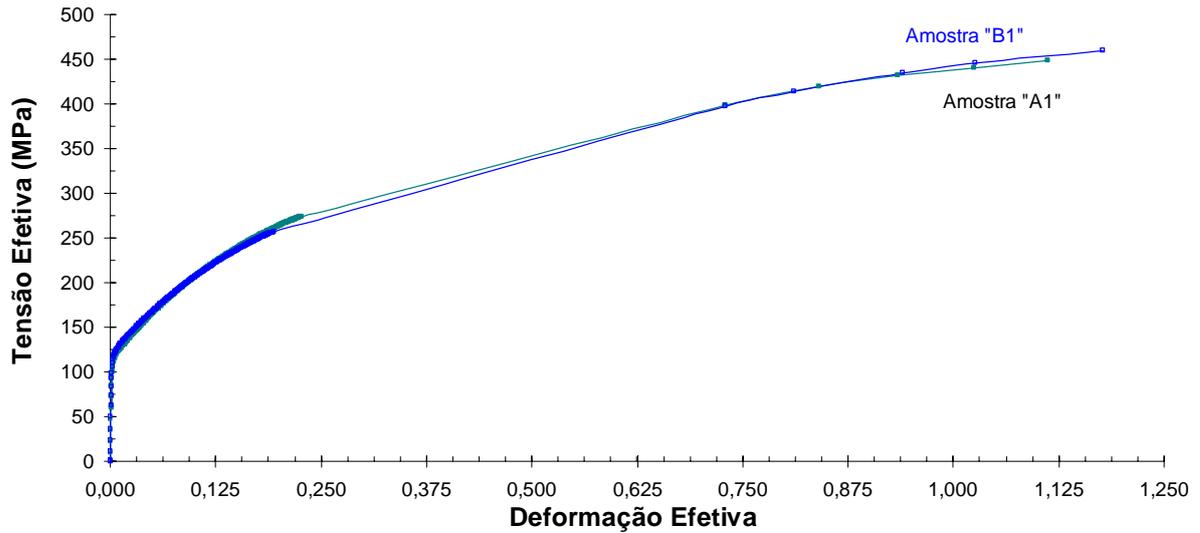


Figura 4.3 – Ensaio de tração no vergalhão de cobre Ø8 mm – Tensão x deformação efetivas (Deformação Total)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os valores obtidos em ensaios comprovaram o atendimento do material com relação ao especificado na Tabela III.2 para o vergalhão de cobre, comparando-se os valores de resistência à tração, limite de escoamento convencional (0,5%) e alongamento mínimo. Os valores da resistência à tração e alongamento mínimo também atendem ao especificado na ABNT NBR-14733 (Tabela IV.1).

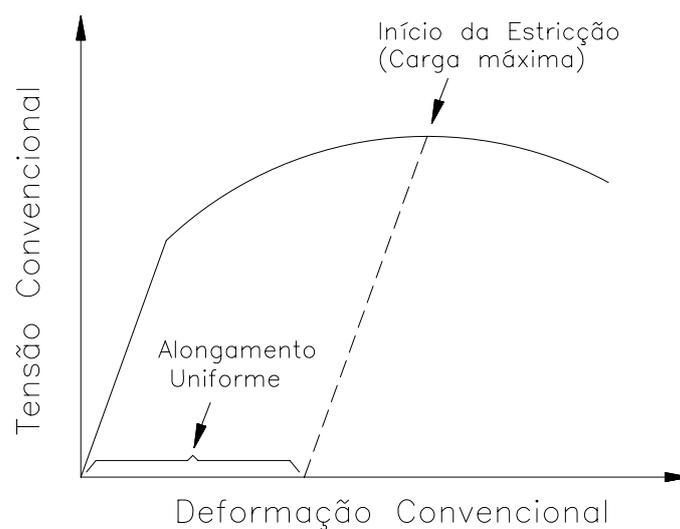


Figura 4.4 – Determinação do alongamento uniforme

Fonte: CÔRREA (2005)

Tabela IV.3 – Propriedades mecânicas do vergalhão de cobre levantadas nos ensaios de tração

Propriedade Mecânica	Valor	Unidade
Limite de escoamento convencional (0,5%)	112,2	MPa
Limite de resistência à tração	214,8	MPa
Alongamento Uniforme	19,6	%
Alongamento Não Uniforme	11,0	%
Alongamento total	30,6	%

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.2 Ensaio de dureza da matéria prima (Vergalhão de cobre Ø8 mm)

Devido ao fato de ser uma propriedade de aceitação do material na linha de produção, foram realizadas medições de dureza em uma amostra de cada lote, conforme item 3.3.2. Os resultados são apresentados na Tabela IV.4.

Os resultados obtidos para a dureza também estavam coerentes com o valor especificado para o produto, conforme Tabela III.2.

Tabela IV.4 – Resultados do ensaio de dureza Brinell no vergalhão de cobre

Amostra	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média
“A2”	46 HB	50 HB	51 HB	49 HB	50 HB	49,2±1,92 HB
“B2”	47 HB	44 HB	49 HB	45 HB	49 HB	46,8±2,28 HB

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2 Análise do processo intermediário de laminação

O vergalhão de cobre de diâmetro 8 mm foi processado na linha de fabricação para produção do perfil apresentado na Figura 3.1(b), sendo amostras coletadas conforme descrito no item 3.4.

Foram retiradas 4 (quatro) amostras para realização dos ensaios de tração e dureza, sendo 2 (duas) do lote “A” e 2 (duas) do lote “B”. Foi realizada a medição das dimensões do perfil apresentado pela laminação, sendo os resultados apresentados na Tabela IV.5. A Tabela IV.5 também apresenta a redução de seção ocorrida no processo de laminação, sendo calculada considerando a área inicial do perfil circular do vergalhão (Tabela IV.2) e a seção calculada pela dimensão média do perfil laminado.

Não existe para esta etapa do processo critério de aceitação quanto a variação dimensional. Os resultados são apresentados como referência para comparação com a simulação numérica (Item 4.2.4) e cálculo teórico (Item 4.2.3).

Tabela IV.5 – Medição das dimensões do perfil laminado

	Dimensão (mm)	Lote “A”		Lote “B”	
		Espessura	Largura	Espessura	Largura
Dimensão (mm)	Medida 1	4,17	11,30	4,17	11,30
	Medida 2	4,16	11,33	4,18	11,29
	Medida 3	4,18	11,33	4,17	11,26
	Medida 4	4,13	11,28	4,16	11,33
	Média	4,16±0,022	11,31±0,024	4,17±0,008	11,30±0,029
Seção perfil médio (mm ²)		45,48		45,54	
Redução seção média (%)		7,85		8,08	

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2.1 Ensaio de tração do material laminado

O ensaio de tração uniaxial para as amostras do material laminado, realizado conforme descrito no item 3.4.1 apresentou os resultados mostrados nas Figuras 4.5 e 4.6. Os corpos de prova para o ensaio de tração foram denominados amostra “A3” para o lote A e “B3” para o lote B. A Figura 4.5 mostra as curvas obtidas para as amostras “A” e “B” para tensão e deformação convencionais. A Figura 4.6 mostra as

curvas obtidas para amostras “A” e “B” para a tensão e deformação verdadeiras (deformação uniforme).

A partir do ensaio de tração foram levantados os dados apresentados na Tabela IV.6. A carga máxima corresponde à media da carga máxima alcançada para cada amostra. O limite de resistência corresponde à média da tensão máxima convencional obtida no ensaio de tração para as duas amostras. O alongamento uniforme foi calculado como a deformação provocada pela carga máxima, conforme Figura 4.4, sendo o valor apresentado na Tabela IV.6 a média calculada para as duas amostras.

Para esta etapa intermediária do processo de fabricação de fios retangulares não há um critério de aceitação ou aprovação do produto com relação aos limites de resistência mecânica. Os dados aqui levantados serão apenas avaliados qualitativamente em relação aos dados obtidos na simulação numérica a ser realizada no item 4.2.4.

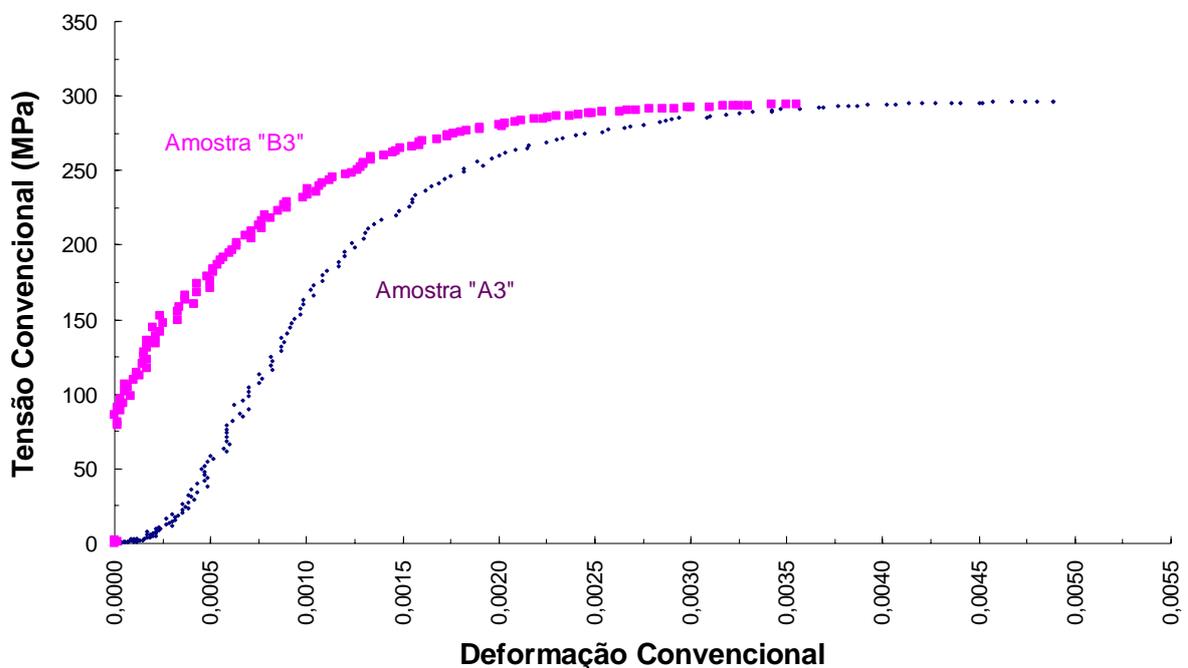


Figura 4.5 – Ensaio de tração no perfil laminado de cobre – Tensão x deformação convencionais

Fonte: Elaborado pelo Autor

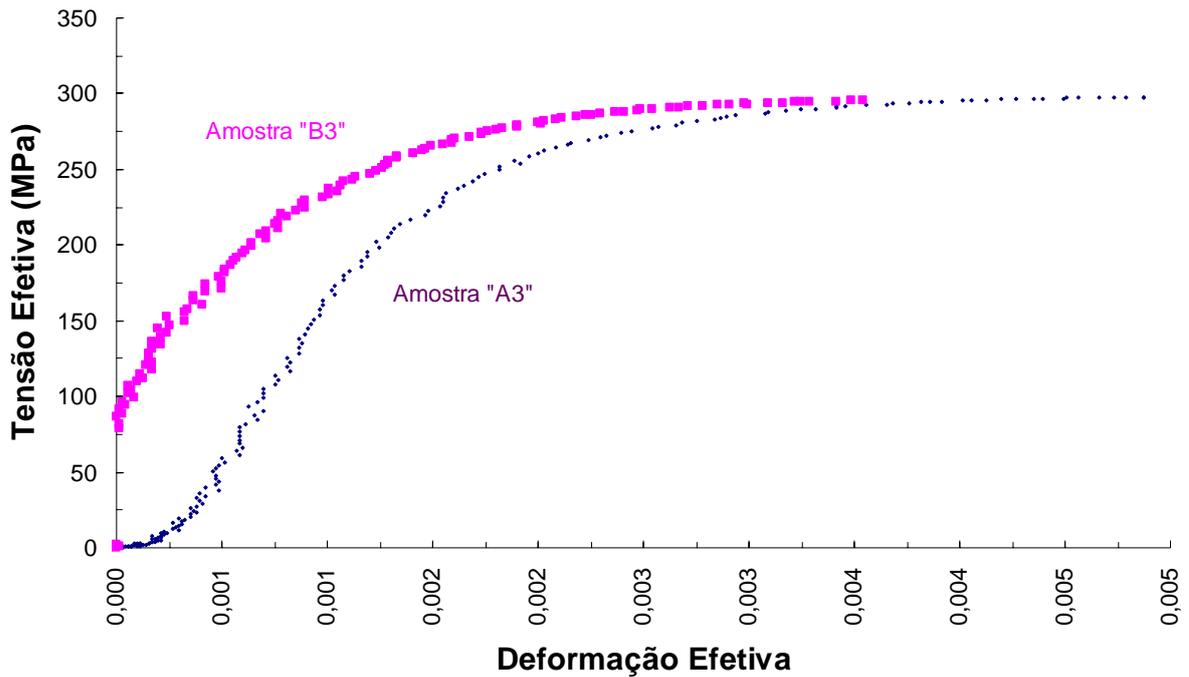


Figura 4.6 – Ensaio de tração no perfil laminado de cobre – Tensão x deformação efetivas

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela IV.6 – Propriedades mecânicas do material laminado

Propriedade Mecânica	Valor	Unidade
Carga máxima	13835	kN
Limite de resistência à tração	295	MPa
Alongamento Uniforme	0,25	%

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2.2 Ensaio de dureza do material laminado

O ensaio de dureza do material laminado foi realizado conforme item 3.4.2. Os resultados são apresentados na Tabela IV.7.

Tabela IV.7 – Resultados do ensaio de dureza Brinell no material laminado

Amostra	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média
“A4”	99 HB	108 HB	110 HB	99 HB	94 HB	102±6,7 HB
“B4”	100 HB	110 HB	96 HB	112 HB	116 HB	107±8,4 HB

Fonte: Elaborado pelo Autor

Também nesta etapa não existe um critério estabelecido para avaliação da dureza do fio resultante do processo laminação, sendo os dados acima levantados apenas para referência e orientação em análises de trabalhos futuros.

4.2.3 Cálculo teórico do perfil do material laminado

Utilizando as equações 2.13 e 2.14, desenvolvidas por KAZEMINEZHAD e TAHERI (2004), foi calculado teoricamente o dimensional do perfil laminado do material, a partir das dimensões iniciais da matéria prima e da abertura entre os cilindros de laminação. Segue abaixo o cálculo para a largura de contato com o cilindro de laminação (b) e a largura final do material com espalhamento (W_f).

Lote “A”:

$$b = \sqrt{2h_i\Delta h} = \sqrt{2*7,93*(7,93-4,16)} \Rightarrow b = 7,73 \text{ mm}$$

$$\frac{W_f}{W_i} = 1,02\left(\frac{h_i}{h_f}\right)^{0,45} \Rightarrow \frac{W_f}{7,93} = 1,02\left(\frac{7,93}{4,16}\right)^{0,45} \Rightarrow W_f = 10,81 \text{ mm}$$

Lote “B”:

$$b = \sqrt{2h_i\Delta h} = \sqrt{2*7,94*(7,94-4,17)} \Rightarrow b = 7,74 \text{ mm}$$

$$\frac{W_f}{W_i} = 1,02 \left(\frac{h_i}{h_f} \right)^{0,45} \Rightarrow \frac{W_f}{7,94} = 1,02 \left(\frac{7,94}{4,17} \right)^{0,45} \Rightarrow W_f = 10,82 \text{ mm}$$

Assim, o valor médio para a largura de contato com o cilindro de laminação e a largura final do material com espalhamento será:

$$\mathbf{b = 7,73 \pm 0,003 \text{ mm}}$$

$$\mathbf{W_f = 10,82 \pm 0,006 \text{ mm}}$$

O valor de W_f calculado se mostrou bastante coerente com o resultado prático obtido. Comparando os resultados com os valores medidos e apresentados na Tabela IV.5, são encontrados erros de 4,16% para o lote A e 4,25% para o Lote B, conforme cálculo abaixo.

$$\text{Lote "A":} \quad \Delta W_f = \frac{10,84}{11,31} * 100 \Rightarrow \Delta W_f = 95,84 \%$$

$$\text{Lote "B":} \quad \Delta W_f = \frac{10,82}{11,30} * 100 \Rightarrow \Delta W_f = 95,75 \%$$

A diferença entre o valor calculado teoricamente e o resultado experimental (Item 4.2 – Tabela IV.5) pode ser atribuída as diferentes variáveis entre o estudo original e o presente trabalho. A equação apresentada pelos autores foi levantada e proposta para estudos de trefilação de barras de aço baixo e alto carbono, sendo o comportamento deste material muito diferente mecanicamente em relação ao cobre eletrolítico recozido, além de condições de contorno de laminação (atrito entre laminador e material, velocidades de laminação e taxas de redução).

4.2.4 Simulação numérica do processo de laminação

A simulação numérica do processo de laminação, desenvolvida como descrito no item 3.4.3, foi realizada considerando diferentes coeficientes de atrito para verificar o comportamento do dimensional final da seção transversal. A Tabela IV.8 apresenta os resultados de largura e espessura obtidos para as variações realizadas.

Tabela IV.8 – Dimensões obtidas na simulação do processo de laminação

Coeficiente de atrito (μ)	Espessura (mm)	Diferença da espessura padrão: 4,15mm		Largura (mm)	Diferença da largura padrão: 11,30mm	
		(mm)	(%)		(mm)	%
0,1	4,134	0,016	0,386	11,504	0,204	1,805
0,3	4,135	0,015	0,361	11,044	0,256	2,265
0,5	4,134	0,016	0,386	11,025	0,275	2,434
0,7	4,132	0,018	0,434	10,993	0,307	2,717
0,9	4,137	0,013	0,313	10,926	0,374	3,310

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados da simulação apresentados na Tabela IV.8 mostram que considerando com o valor ideal as dimensões padronizados para largura e espessura, o melhor resultado encontrado para a espessura ocorre com o coeficiente de atrito de $\mu = 0,9$, porém todos os valores obtidos para a espessura atendem a tolerância de fabricação conforme Tabela I.1. Analisando os valores encontrados para a largura do material, o melhor resultado ocorre para o coeficiente de atrito de $\mu = 0,1$.

A Figura 4.7(a) apresenta as isolinhas de danos e a Figura 4.7(b) as isolinhas de tensão efetiva do material laminado para o coeficiente de atrito de $\mu = 0,1$.

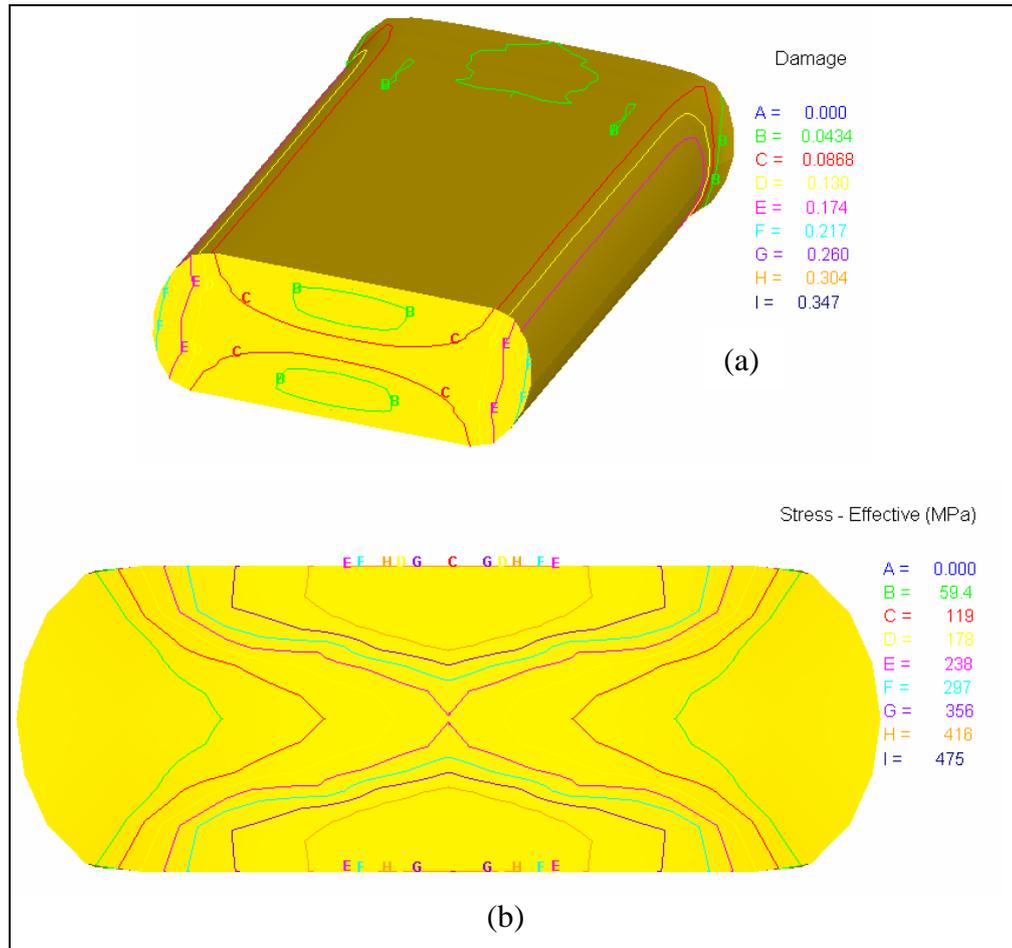


Figura 4.7 – (a) Isolinhas de danos; (b) Isolinhas de tensão efetiva (Perfil laminado - Coeficiente de atrito de 0,1)

Fonte: Elaborado pelo Autor

O resultado mostrado na Figura 4.7(a) apresenta a concentração dos danos na região central (0,0868) e nas bordas do material (0,217). O efeito dano do espalhamento do material contribui mais acentuadamente que o esforço de compressão na região central. Com relação à tensão efetiva no material, Figura 4.7(b), a maior concentração ocorre na região central do perfil, basicamente devido aos esforços de compressão impressos pelos rolos de laminação (416 MPa) comparativamente com a região das bordas (59,4 MPa).

A Figura 4.8(a) apresenta as isolinhas de danos e a Figura 4.8(b) as isolinhas de tensão efetiva do material laminado para o coeficiente de atrito de $\mu = 0,3$.

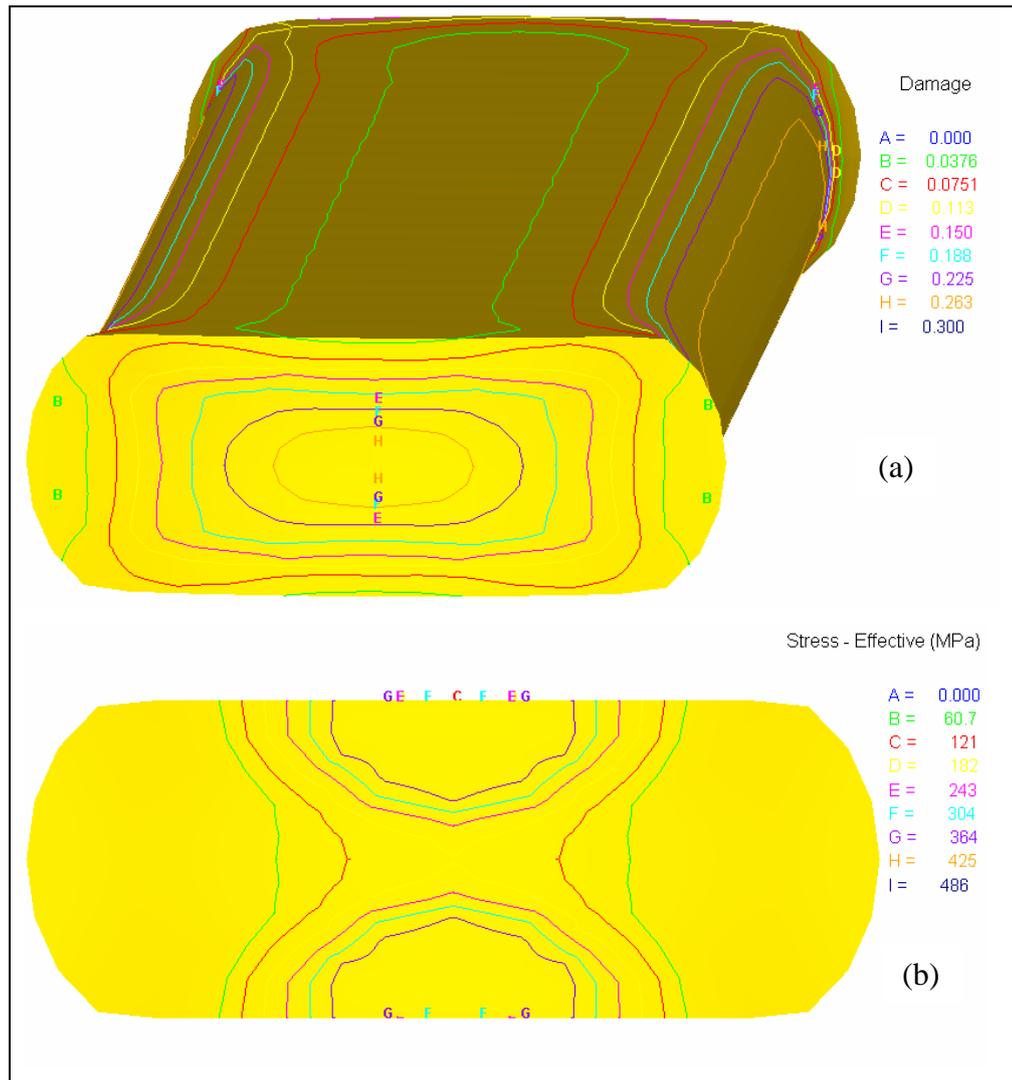


Figura 4.8 – (a) Isolinhas de danos; (b) Isolinhas de tensão efetiva (Perfil laminado - Coeficiente de atrito de 0,3)

Fonte: Elaborado pelo Autor

O efeito do dano e a tensão efetiva registrada com a simulação de coeficiente de atrito de $\mu = 0,1$ permanecem para a simulação com $\mu = 0,3$ (Figura 4.8), porém o aumento do atrito causa modificações nos níveis de valores, sendo registrada magnitude de dano de 0,263 na região central e de 0,0376 nas bordas do material. Os valores registrados para a tensão efetiva foram de 425 MPa na região central do perfil e 60,7 MPa na região das bordas.

A Figura 4.9(a) apresenta as isolinhas de danos e a Figura 4.9(b) as isolinhas de tensão efetiva do material laminado para o coeficiente de atrito de $\mu = 0,5$.

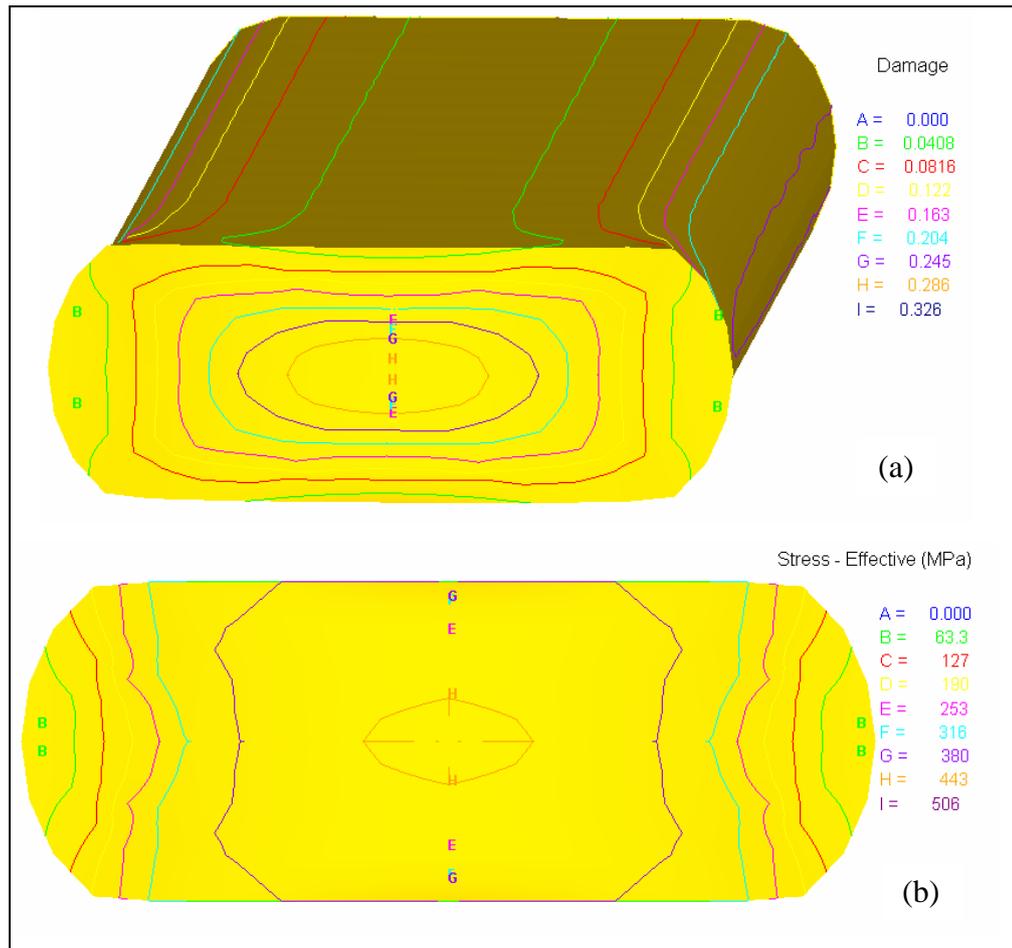


Figura 4.9 – (a) Isolinhas de danos; (b) Isolinhas de tensão efetiva (Perfil laminado - Coeficiente de atrito de 0,5)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os valores apresentados na Figura 4.9 registram a magnitude de dano de 0,286 na região central e de 0,0408 nas bordas do material. Os valores registrados para a tensão efetiva foram de 443 MPa na região central do perfil e 63,3 MPa na região das bordas.

A Figura 4.10(a) apresenta as isolinhas de danos e a Figura 4.10(b) as isolinhas de tensão efetiva do material laminado para o coeficiente de atrito de $\mu = 0,7$.

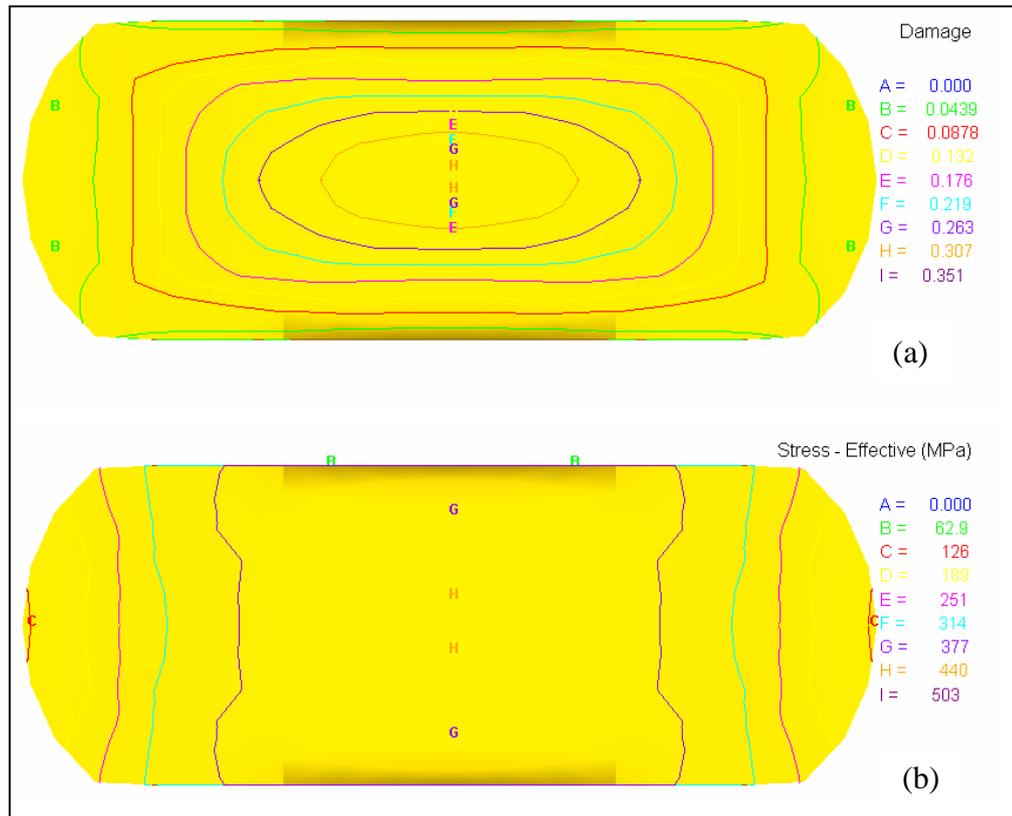


Figura 4.10 – (a) Isolinhas de danos; (b) Isolinhas de tensão efetiva (Perfil laminado - Coeficiente de atrito de 0,7)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os valores apresentados na Figura 4.10 registram a magnitude de dano de 0,307 na região central e de 0,0439 nas bordas do material. Os valores registrados para a tensão efetiva foram de 440 MPa na região central do perfil e 62,9 MPa na região das bordas. Comparativamente com a simulação com $\mu = 0,5$, verifica-se que o aumento do atrito provocou pequena variação nos níveis de danos e tensão efetiva. A Figura 4.11(a) apresenta as isolinhas de danos e a Figura 4.11(b) as isolinhas de tensão efetiva do material laminado para o coeficiente de atrito de $\mu = 0,9$.

Os valores apresentados na Figura 4.11 registram a magnitude de dano de 0,321 na região central e de 0,0458 nas bordas do material. Os valores registrados para a tensão efetiva foram de 453 MPa na região central do perfil e 64,7 MPa na região das bordas. Novamente percebe-se que a simulação com $\mu = 0,7$, apresenta magnitude de danos e tensão efetiva muito próximo aos registrados nesta última simulação.

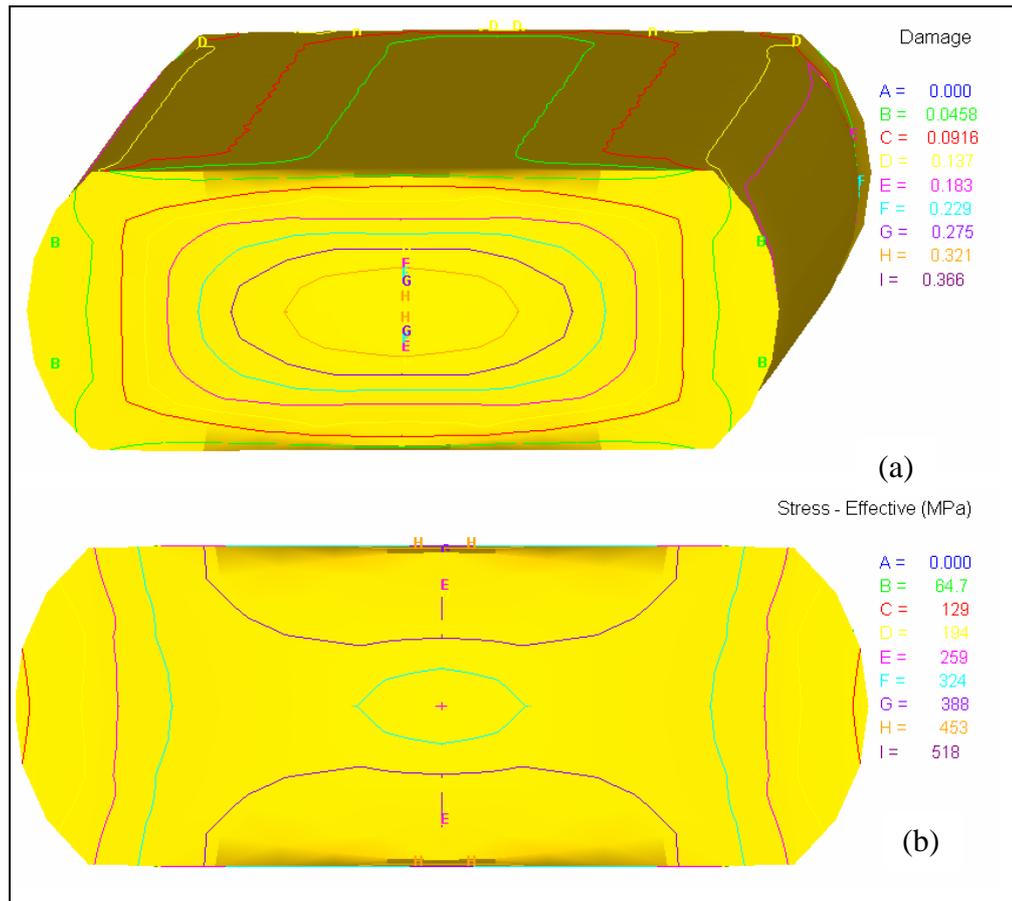


Figura 4.11 – Isolinhas de danos (a) e de tensão efetiva (b) do perfil laminado (Coeficiente de atrito de 0,9)

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 4.12 apresenta as isolinhas de deformação efetiva do material laminado, considerando a simulação com coeficiente de atrito de $\mu = 0,9$. Nesta figura pode-se verificar que a maior concentração da deformação efetiva ocorre na região central do material (área de contato com os rolos de laminação), sendo a deformação progressivamente reduzida à medida que se desloca em direção as bordas do perfil.

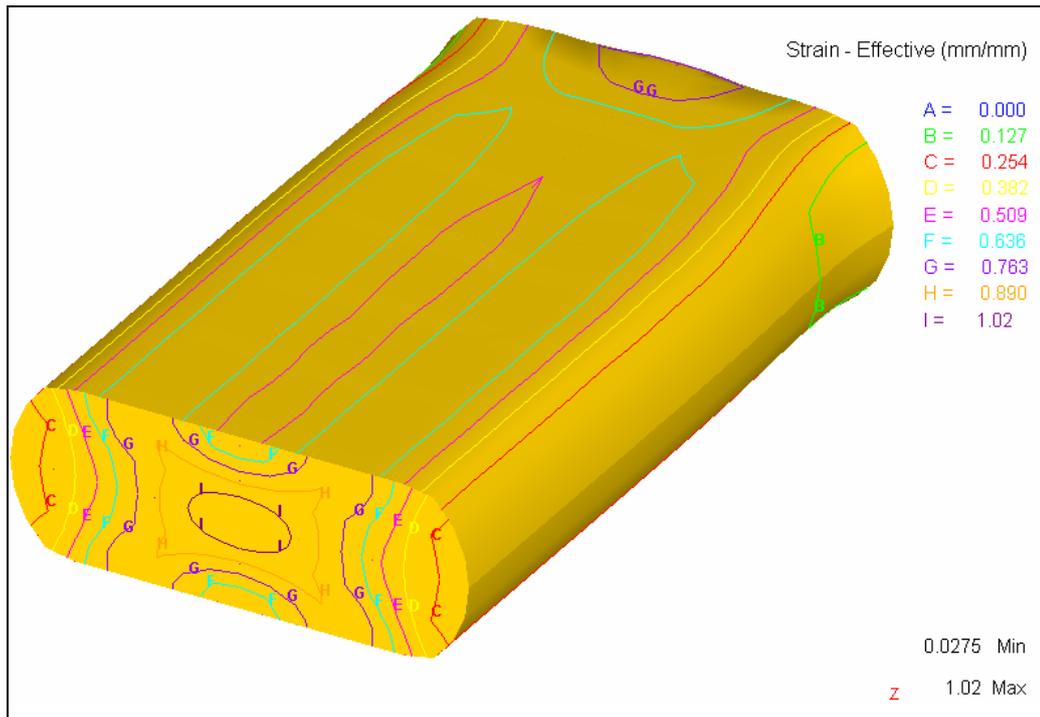


Figura 4.12 – Isolinhas de deformação efetiva do perfil laminado (Coeficiente de atrito de 0,9)

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3 Análise do processo de trefilação

O material trefilado foi processado na linha de fabricação para produção do perfil apresentado na Figura 3.1(c), sendo amostras coletadas conforme descrito no item 3.5.

Foram retiradas 4 (quatro) amostras para realização dos ensaios de tração e dureza, sendo 2 (duas) do lote “A” e 2 (duas) do lote “B”. Foi realizada a medição das dimensões do perfil apresentado pela trefilação, sendo os resultados apresentados na Tabela IV.8. A redução de seção ocorrida no processo de trefilação está apresentada na tabela, sendo calculada considerando as áreas apresentadas para o material laminado na Tabela IV.5 e a seção calculada pela dimensão média do perfil trefilado.

Tabela IV.9 – Medição das dimensões do perfil trefilado

	Dimensão (mm)	Lote “A”		Lote “B”	
		Espessura	Largura	Espessura	Largura
Dimensão (mm)	Medida 1	3,51	8,74	3,50	8,78
	Medida 2	3,50	8,75	3,50	8,77
	Medida 3	3,50	8,78	3,51	8,80
	Medida 4	3,51	8,75	3,50	8,82
	Média	3,51±0,006	8,76±0,017	3,50±0,005	8,79±0,022
Seção perfil (mm ²)		30,47		30,58	
Redução seção (%)		33,00		32,85	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os valores obtidos na medição de espessura e largura para ambos os lotes de fabricação atendem ao especificado para as tolerâncias de fabricação, conforme Item 1.1, Tabela I.1 (espessura) e Tabela I.2 (largura).

Não existe para esta etapa do processo critério de aceitação quanto a variação dimensional. Os resultados são apresentados como referência para comparação com a simulação numérica (Item 4.3.3).

4.3.1 Ensaio de tração do material trefilado

O ensaio de tração uniaxial para as amostras do material trefilado, realizado conforme descrito no item 3.5.1 apresentou os resultados mostrados nas Figuras 4.13 e 4.14. Os corpos de prova para o ensaio de tração foram denominados amostra “A5” para o lote A e “B5” para o lote B. A Figura 4.13 mostra as curvas obtidas para as amostras “A” e “B” para tensão e deformação convencionais. A Figura 4.14 mostra as curvas obtidas para amostras “A” e “B” para a tensão e deformação verdadeiras (deformação uniforme).

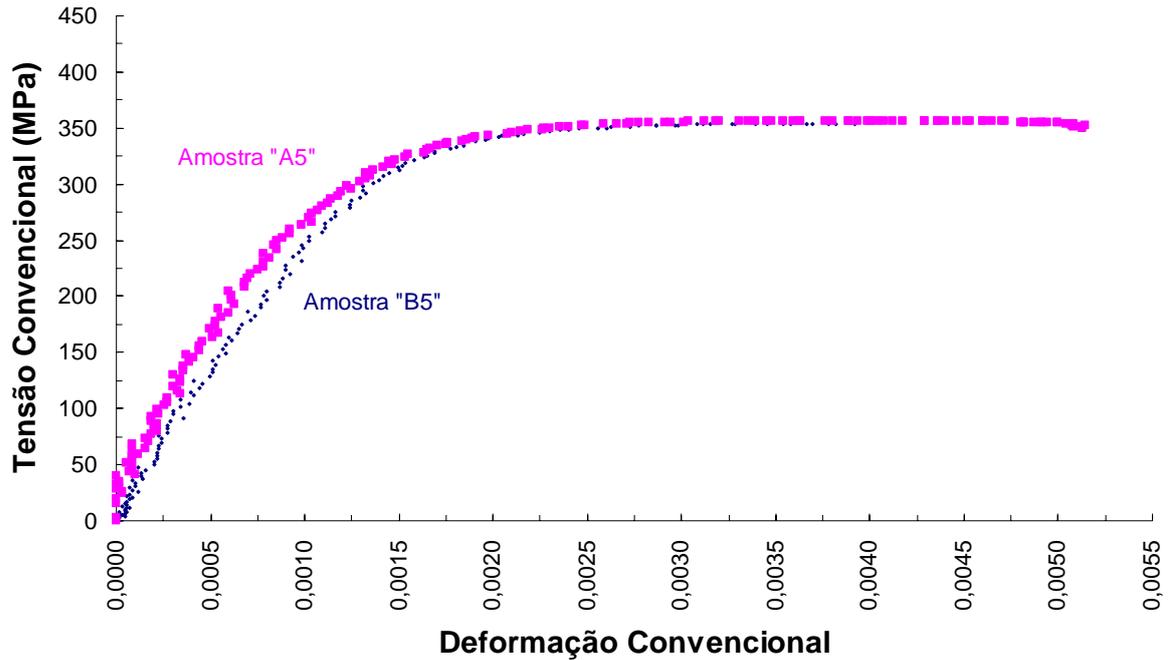


Figura 4.13 – Ensaio de tração no fio trefilado – Tensão x deformação convencionais

Fonte: Elaborado pelo Autor

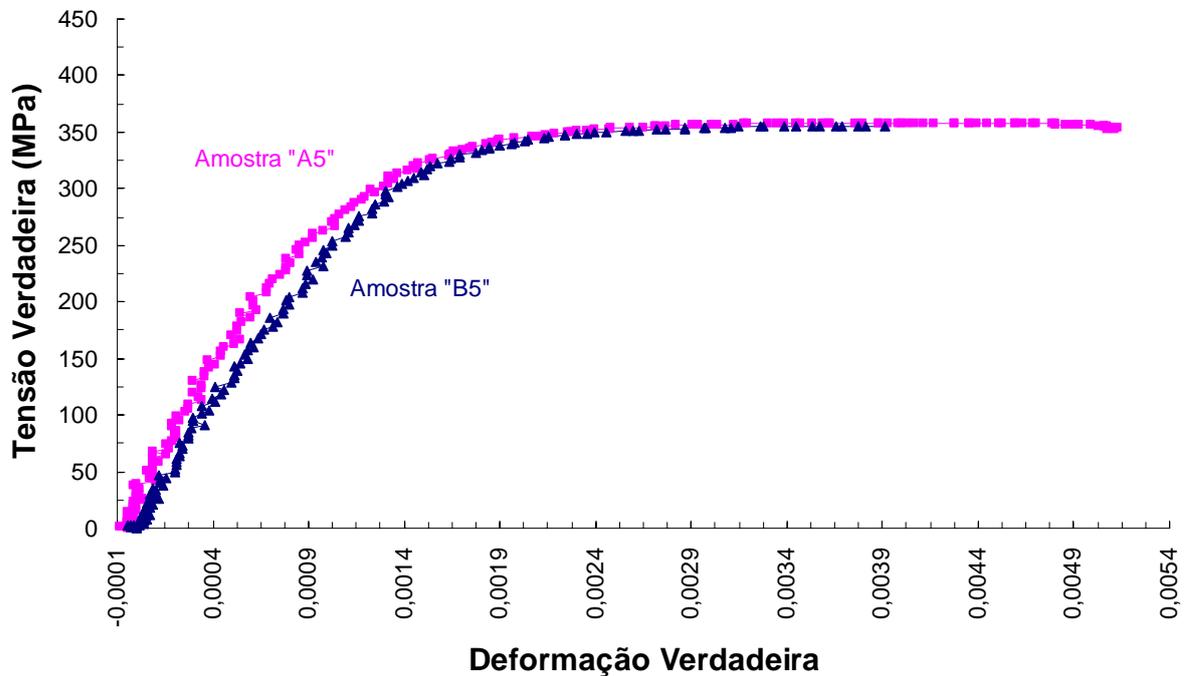


Figura 4.14 – Ensaio de tração no fio trefilado – Tensão x deformação efetivas

Fonte: Elaborado pelo Autor

A partir do ensaio de tração foram levantados os dados apresentados na Tabela IV.9. A carga máxima corresponde à média da carga máxima alcançada para as

duas amostras. O limite de resistência corresponde à média da tensão máxima convencional obtida no ensaio de tração para as duas amostras. O alongamento uniforme foi calculado como a deformação provocada pela carga máxima, conforme Figura 4.4, sendo o valor apresentado na Tabela IV.10 a média calculada para as duas amostras.

Tabela IV.10 – Propriedades mecânicas do fio trefilado

Propriedade Mecânica	Valor	Unidade
Carga máxima	10847	kN
Limite de resistência à tração	352	MPa
Alongamento Uniforme	0,34	%

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para a etapa de trefilação de fios retangulares não há um critério de aceitação ou aprovação do produto com relação aos limites de resistência mecânica. Os dados aqui levantados serão apenas avaliados qualitativamente em relação aos dados obtidos na simulação numérica a ser realizada no item 4.3.3.

4.3.2 Ensaio de dureza do fio trefilado

O ensaio de dureza do material trefilado foi realizado conforme item 3.5.2. Os resultados são apresentados na Tabela IV.11.

Tabela IV.11 – Resultados do ensaio de dureza Brinell no fio trefilado

Amostra	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média
“A4”	125HB	125HB	130HB	127HB	123HB	126,0±2,6 HB
“B4”	125HB	123 HB	120 HB	125 HB	120 HB	122,6±2,5 HB

Fonte: Elaborado pelo Autor

Também nesta etapa não existe um critério estabelecido para avaliação da dureza do fio resultante do processo laminação, sendo os dados acima levantados apenas para referência e orientação em análises de trabalhos futuros.

4.3.3 Simulação numérica do processo de trefilação

A simulação numérica do processo de trefilação foi realizada conforme especificado no item 3.5.3. A Tabela IV.11 apresenta as dimensões finais obtidas neste processo e compara as mesmas com o valor padronizado para o fio.

Tabela IV.12 – Dimensões obtidas na simulação do processo de trefilação

Coeficiente de atrito (μ)	Espessura (mm)	Diferença da espessura padrão: 3,5mm		Largura (mm)	Diferença da largura padrão: 8,8mm	
		(mm)	(%)		(mm)	%
0,09	3,504	0,004	0,114	8,891	0,092	1,045

Fonte: Elaborado pelo Autor

Este resultado não se mostrou adequado. A espessura atende ao solicitado como tolerância dimensional de fabricação da Tabela I.1, porém o valor da largura não atende ao proposto na Tabela I.2.

Comparativamente com as dimensões obtidas na trefilação do material (Tabela IV.8), novamente temos a espessura com a dimensão adequada. Considerando a média obtida para os dois lotes, tem-se uma diferença de 0,006 mm para o lote “A” (0,171%) e 0,004 mm para o lote “B” (0,114%).

As isolinhas de danos do material são apresentadas na Figura 4.15. Nesta figura pode-se verificar o material em um passo intermediário do processo de trefilação sendo apresentadas as curvas de danos desde a entrada da fieira até do material após a conformação. Verifica-se que a maior concentração de danos ocorrem nas bordas do material e na região central do perfil. Esta concentração pode ser melhor visualizada ns Figuras 4.16 e 4.17 que apresentam um detalhe frontal do material nas vistas de laminação e trefilação, respectivamente.

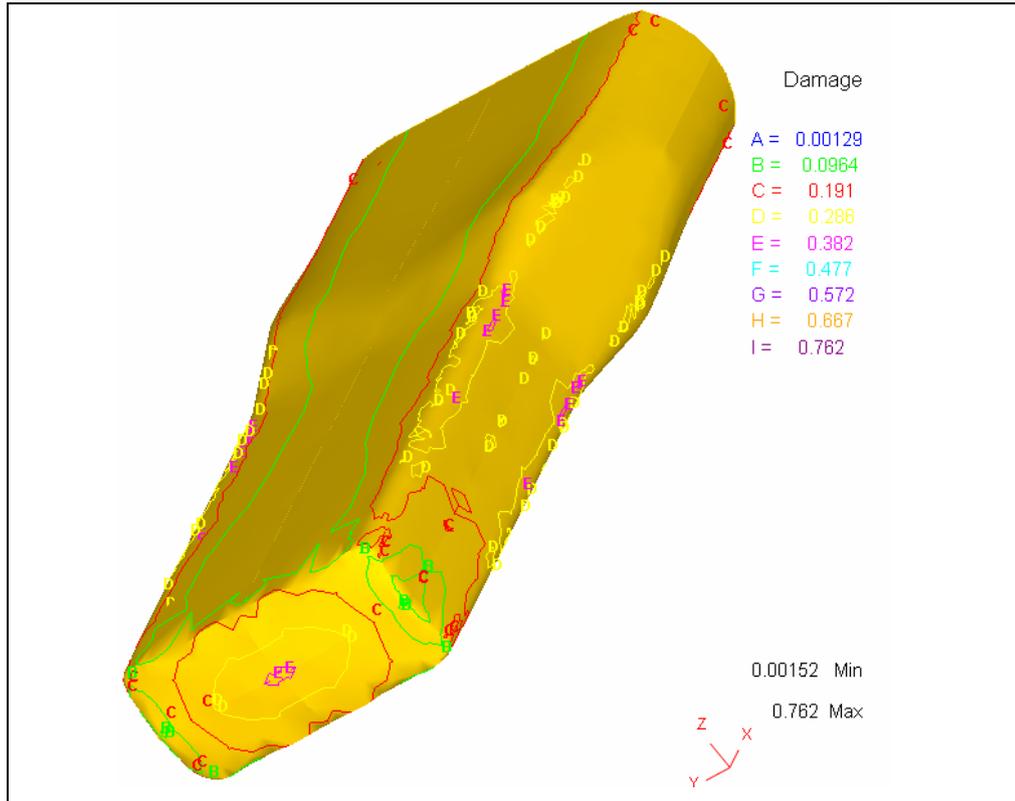


Figura 4.15 – Isolinhas de danos do perfil trefilado

Fonte: Elaborado pelo Autor

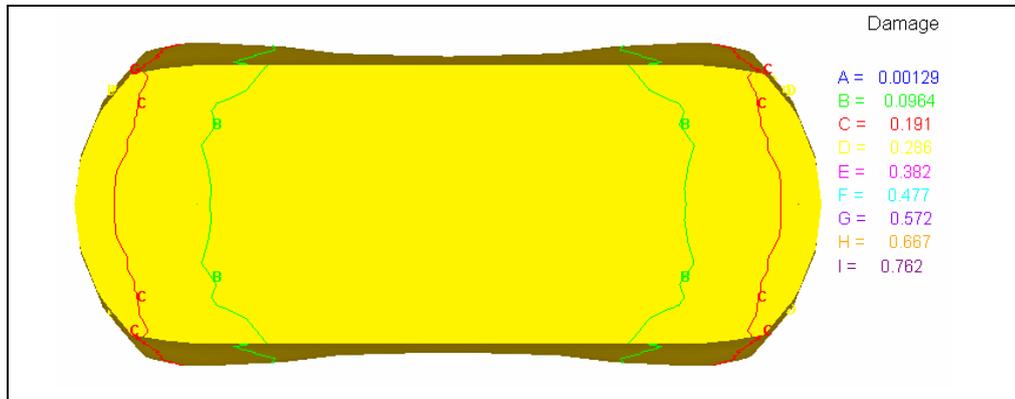


Figura 4.16 – Isolinhas de danos do perfil trefilado (Lado Laminado)

Fonte: Elaborado pelo Autor

As isolinhas de danos do material na Figura 4.16 mostram uma concentração deste efeito nas bordas do material laminado, com uma magnitude de 0,266, enquanto a região central apresenta valor de 0,0964. Esse efeito se deve basicamente ao fato da maior redução ocorrer no sentido de largura do material (de 11,30 mm para 8,8

mm, ou seja 22,1% de redução) em comparação com a espessura (de 4,15 mm para 3,5 mm, ou seja 15,7% de redução).

A Figura 4.17 também apresenta o efeito pronunciado dos danos causados em maior intensidade na região central do perfil (0,382) em comparação com as bordas do material (0,191). Nota-se também que ocorre uma concentração no raio do material, devido basicamente à geometria da feira, apresentando valor de 0,266 neste ponto.

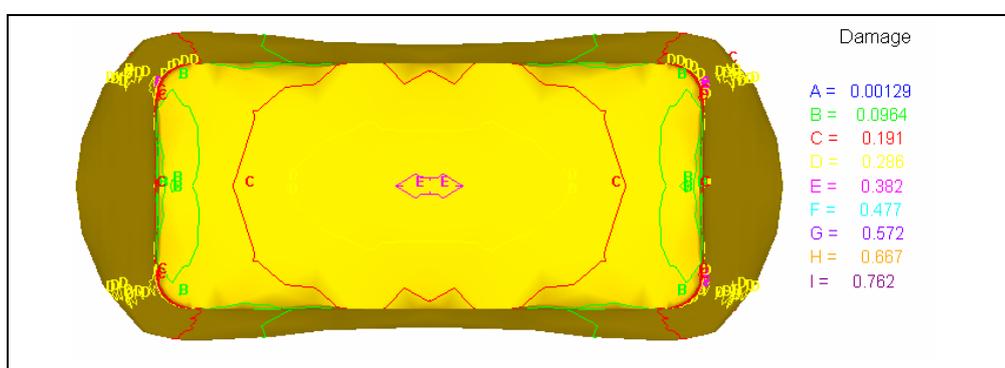


Figura 4.17 – Isolinhas de danos do perfil trefilado (Lado Trefilado)

Fonte: Elaborado pelo Autor

As isolinhas de tensão efetiva do material são apresentadas na Figura 4.18. Novamente foi amostrado o material em um passo intermediário do processo de trefilação sendo apresentadas as curvas de tensão efetiva desde a entrada da feira até do material após a conformação.

Verifica-se que a maior concentração de tensão ocorre nas bordas do material, onde se registra valores de 405MPa no material laminado antes da feira e 607MPa do material dentro da feira. Após a feira são registrados os valores de maior intensidade de tensão efetiva (1140MPa), sendo que o resultado apresentado pelo software mostra uma distribuição homogênea desta tensão na superfície do material.

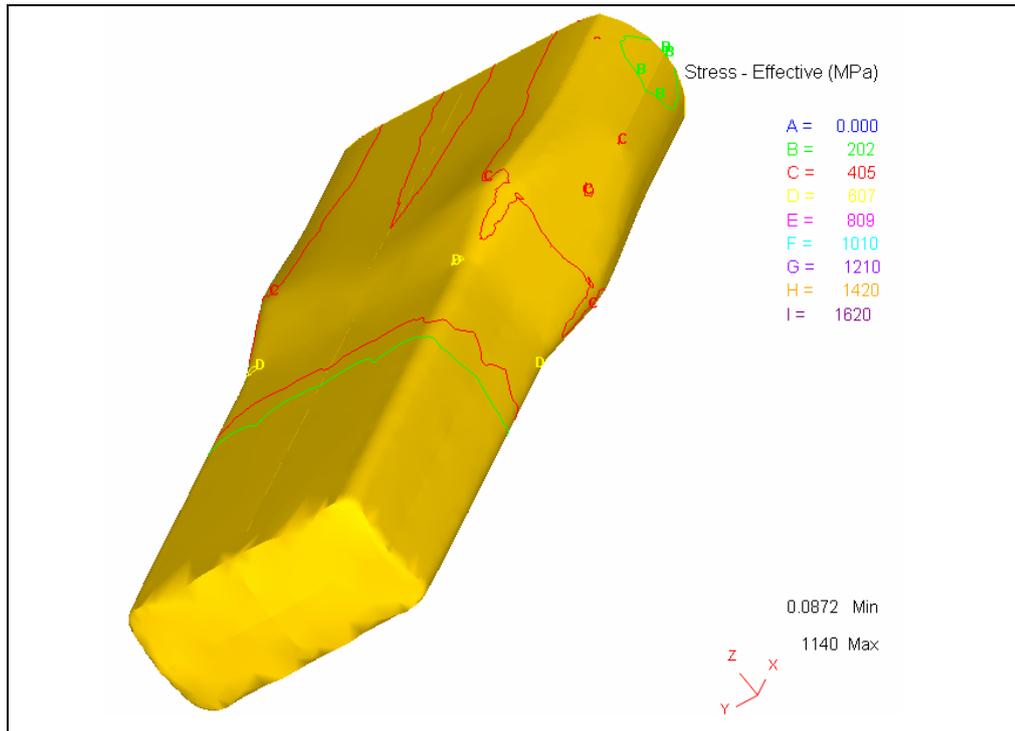


Figura 4.18 – Isolinhas de tensão efetiva do perfil treilado

Fonte: Elaborado pelo Autor

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A análise do processo de fabricação de fios retangulares a partir de vergalhão de cobre diâmetro 8 mm em passe único, proporcionou a elevação do grau de conhecimento sobre o processo e das principais variáveis de influência no mesmo. Além disso, pode-se citar ainda os seguintes pontos:

- O uso das equações de KAZEMINEZHAD e TAHERI (2004) permite uma boa aproximação no espalhamento do vergalhão de cobre submetido ao processo de laminação e, conseqüentemente, cálculo teórico aproximado das dimensões do perfil laminado e da seção gerada neste processo. Com os resultados obtidos é possível estimar a redução a ser realizada no processo de trefilação posterior.
- A ferramenta de simulação numérica dos processos de laminação e trefilação, neste caso específico usando o software DEFORM 3D, permitiu uma avaliação da fabricação de fios mesmo antes de iniciar o processo produtivo. Conhecendo-se as características básicas do material de partida (propriedades mecânicas do vergalhão de cobre eletrolítico) foi possível determinar com bastante acerto os resultados dimensionais e características mecânicas do produto final obtido.
- O desenvolvimento de outros fornecedores de produtos similares ao vergalhão de cobre eletrolítico estudado neste trabalho pode ser realizado utilizando-se o mesmo procedimento e metodologia empregada. Para tal deve ser levantada a curva de resistência mecânica deste material, a partir do ensaio de tração e realizadas as simulações para obtenção de uma aproximação prévia bastante razoável dos resultados que possivelmente serão alcançados na linha de produção.
- A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho pode ser aplicada a outras áreas afins da empresa que também podem ser equacionados previamente, utilizando-se ferramentas similares de modelamento e simulação matemática.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir dos estudos realizados e resultados obtidos neste trabalho, assim como o conhecimento adquirido no desenvolvimento deste trabalho, das dificuldades e variações na linha de produção, pode-se sugerir os seguintes trabalhos a serem desenvolvidos:

- Estudar variáveis no processo não avaliadas neste estudo como: desgaste e vida útil dos rolos de laminação e das fieiras de trefilação (estudo de otimização do uso destes ferramentais), aplicação de refrigeração durante o processo de laminação e variação do fluido refrigerante no processo de trefilação, medição do coeficiente de atrito na laminação e trefilação.
- Estudar o uso do cobre eletrolítico livre de oxigênio (oxygen free) para a produção de fios para fabricação de enrolamentos de transformadores, principalmente nos casos de necessidade de baixas perdas elétricas (capitalização de perdas) e com vistas à fabricação de produto mais eficiente.
- Estudar o processo de recozimento do fio trefilado. Estudar o sistema atual de recozimento utilizando forno com aquecimento por resistências elétricas, forno com aquecimento por corrente elétrica circulante e avaliar aplicação do processo de recozimento utilizando a energia interna do processo (gerada devido à redução de seção durante a laminação e trefilação).
- Realizar as simulações e modelamento matemático na fabricação dos fios produzidos com passe único na laminação e mais de um passo de redução na trefilação, conforme padrões de fabricação dos fios de seção circular da TTDB.
- Estabelecer critérios de monitoramento do material laminado (tolerâncias dimensionais, dureza e propriedades mecânicas).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14733**. *Vergalhão de cobre para uso elétrico - Requisitos*. Rio de Janeiro, 09/2001, 4 p.

BACKOFEN, W. A. ***Deformation Processing***. 1ª. ed., 326 p. Massachusetts: Addison-Wesley, 1972.

BARBOSA, A. de A. ***“Análise do desgaste dos cilindros de trabalho de um laminador de tiras a quente reversível tipo Steckel”***. 111f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

BICKFORD, W. B. ***A First Course in the Finite Element Method***. 2ª. ed., 652 p. Illinois: Irwin, 1994.

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

CHAKRABARTY, J. ***Theory of Plasticity***. 3ª. ed. Butterworth-Heinemann, 2006.

CORRÊA, E. C. S. ***“Aspectos do Encruamento de Metais Previamente Deformados a Frio”***. 233f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

DIETER, G. E. ***Metalurgia Mecânica***. 2ª. ed., 653p. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

ENCYCLOPEDIA OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, 1ª. ed., V. 2. New York: Pergamon Press, 1986.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; KUSKO, A. ***Máquinas Elétricas***. 1ª ed., 623p. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

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

HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. ***Metal Forming: Mechanics and Metallurgy***. 2ª ed., 364p. New Jersey: Prentice-Hall, 1993.

JOHNSON, D. E.; HILBURN, J. L.; JOHNSON, J. R. ***Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos***. 4ª ed., 539p. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1994.

KAZEMINEZHAD, M; TAHERI, A. K. ***A Theoretical and Experimental Investigation on Wire Flat Rolling Process Using Deformation Patter***. Materials and Design, n. 26, p. 99-103, Jun. 2004.

KAZEMINEZHAD, M; TAHERI, A. K. ***Deformation Inhomogeneity in Flattened Copper Wire***. Materials and Design, n. 28, p. 2047-2053, Jun. 2006.

KAZEMINEZHAD, M; TAHERI, A. K.; TIEU A. T. ***A Study on the Cross-Sectional Profile of Flat Rolled Wire***. Journal of Materials Processing Technology, n. 200, p. 325-330, Sep. 2007.

MAGALHÃES, F. de C. ***Estudo da Evolução de Defeitos Superficiais em Barras de Cobre Submetidas ao Processo de Trefilação***. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

ROWE, G. W. ***Principles of Industrial Metalworking Process***. 4ª ed., 407 p. London: Edward Arnold, 1977.

SOUZA, S. A. ***Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos Teóricos e Práticos***. 5ª ed., 286 p. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

ZIENKIEWICZ, O. C. ***The Finite Element Method***. 4ª ed. New York: McGraw-Hill, 1989.

YOSHIDA, K.; MATSUNAGA, M. ***Fabrication of Shaped Medical Testing Wire by Drawing***. Wire Journal International, V. 40, n. 10, Oct. 2008.