

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

“Substituição das Etapas de Usinagem pela
Conformação Mecânica na Fabricação de
Contatos para Soldagem por Resistência”

Autor: Gilmar Cordeiro da Silva
Orientador: Prof. Paulo Roberto Cetlin

Dezembro/2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Gilmar Cordeiro da Silva

SUBSTITUIÇÃO DAS ETAPAS DE USINAGEM PELA CONFORMAÇÃO
MECÂNICA NA FABRICAÇÃO DE CONTATOS PARA SOLDAGEM POR
RESISTÊNCIA

Proposta de Dissertação de Mestrado apresentado ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da
Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Metalurgia de Transformação
Orientador: Prof. Paulo Roberto Cetlin

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2003

À minha Mãe pela dedicação e carinho.

Ao meu Pai pelo exemplo de luta. “in memoriam”.

Ao amigo Tarcísio José de Almeida.

A minha amada Elizangêla de Souza Prado.

Aos meus Irmãos Agmar, Agna, Wagna, Gislene e Viviane.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade e perseverança dadas a mim para a realização deste trabalho.

Aos Professores Paulo Roberto Cetlin e Maria Teresa Paulino Aguilar pela orientação, amizade e ensinamentos transmitidos.

Ao amigo Carlos Augusto dos Santos, Elaine Carbalho Siqueira Corrêa e demais colegas pelo apoio e troca de conhecimentos.

Ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e a Coordenação do Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFMG, pelo apoio na realização deste trabalho.

A Brasição Indústria e Comércio pelo apoio, incentivo e reconhecimento

A Elizângela de Souza Prado pelo apoio na realização deste trabalho

A Tarcísio José de Almeida pelo apoio e ensinamentos.

Aos Amigos e Professores da PUC – M.G. em especial José Eduardo Brandão, Wisley Falco Sales, José Rubens Carneiro e a Rômulo Albertini Rigueira.

Ao Renato Righi pela boa vontade e competência no suporte técnico e fotografias.

A todos que, de alguma forma, colaboraram para a concretização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE NOTAÇÕES.....	XII
RESUMO	XIV
ABSTRACT.....	XV
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Soldagem por Resistência.....	4
3.1.1. Soldagem por Costura.....	5
3.1.2. Soldagem a Ponto	6
3.1.2.1. Variáveis do processo de soldagem a ponto	7
3.1.2.2. Características Exigidas da Ponta Intercambiável	10
3.2. Usinagem.....	11
3.2.1. Processos Convencionais de Usinagem.....	11
3.2.1.1. Processos Convencionais de Usinagem por Cisalhamento.....	11
3.2.1.2. Processos Convencionais de Usinagem por Abrasão.....	14
3.2.2. Processos Não Convencionais De Usinagem	15
3.2.3. Usinagem na Fabricação dos Contatos	22
3.3. Conformação Mecânica.....	23
3.3.1. Forjamento	24
3.3.1.1. Forjamento Livre.....	25
3.3.1.2. Forjamento em Matriz.....	25
3.3.1.3. Material para Confecção de Matrizes	27
3.3.2. Ironing.....	28
3.4. Modelagem dos Processos de Conformação Mecânica.....	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1. Etapa preparatória.....	39
4.1.1. Caracterização do Material	39
4.1.2. Corte do Tarugo Inicial.....	40

4.1.3. Pré- Projeto	41
4.1.4. Curva Tensão Verdadeira Versus Deformação Verdadeira.....	42
4.2. Simulações Numéricas	42
4.2.1. Simulação do pré-projeto inicial.....	45
4.2.1.1. Simulação da primeira etapa do pré- projeto inicial	45
4.2.1.2 Simulação da segunda etapa do pré- projeto inicial.....	45
4.3. Validação Experimental Pré-Projeto Inicial.....	46
4.3.1. Validação Experimental do Corte do Tarugo Inicial	46
4.3.2. Validação Experimental da primeira Etapa do Pré-Projeto Inicial.....	46
4.3.3. Validação Experimental da Segunda Etapa do Pré-Projeto Inicial.....	46
4.4. Simulação da Modificação da Segunda Etapa do Primeiro Pré-Projeto	47
4.5. Segundo Pré-Projeto.....	47
4.5.1. Simulação do Segundo Pré-Projeto	48
4.6. Validação Experimental do Segundo Pré-projeto	49
4.7. Construção dos Matrizes	49
4.8. Teste dos Conjuntos de Matrizes em Prensa	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1. Dados de Entrada para a Simulação	53
5.1.1. Composição Química do Material	53
5.1.2. Curva Obtida no Ensaio de Tração	53
5.1.3. Pré- Projeto Inicial	54
5.2. Resultados da simulação do pré-projeto inicial, 1ª e 2ª etapas.....	56
5.2.1 Resultado da Simulação da 1ª Etapa do Pré-Projeto Inicial.....	56
5.2.2. Resultado da Simulação da 2ª Etapa do Pré-Projeto Inicial.....	60
5.2.3. Modificação da Matriz Inferior da Segunda Etapa do Primeiro Pré-Projeto.....	61
5.3. Resultados da Confecção do Estampo de Corte do Tarugo Inicial	62
5.4. Resultado da Validação Experimental do Pré-Projeto Inicial	63
5.4.1. Resultado da Primeira Etapa Experimental do Pré-Projeto Inicial.....	63
5.4.2. Resultado da Segunda Etapa Experimental do Pré-Projeto Inicial.....	65
5.5. Segundo Pré-Projeto.....	66
5.6. Resultados da Simulação do Segundo Pré Projeto.....	68

5.6.1. Segundo Pré Projeto 1ª Etapa.....	68
5.6.2. Segundo Pré Projeto 2ª Etapa.....	71
5.6.3. Segundo Pré Projeto 3ª Etapa.....	74
5.6.4. Segundo Pré Projeto 4ª Etapa.....	77
5.7. Resultados das Etapas Experimentais do Segundo Pré-Projeto	80
5.7.1. Resultado da Primeira Etapa Experimental do Segundo Pré-Projeto	80
5.7.2. Resultado da Segunda Etapa Experimental do Segundo Pré-Projeto	82
5.7.3. Resultado da Terceira Etapa Experimental do Segundo Pré-Projeto	84
5.7.4. Resultado da Quarta Etapa Experimental do Segundo Pré-Projeto	86
5.8. Análise Econômica	88
6. CONCLUSÕES.....	91
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
Anexo A – Equipamentos pertencentes à Brasição e utilizados no experimento	102
Anexo B – Desenhos das Matrizes.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Processos de soldagem por costura.....	5
Figura 3.2 – Esquema de solda a ponto.....	6
Figura 3.3 – Esquema de resistências elétricas ôhmicas.....	8
Figura 3.4 - Esquema de refrigeração da ponta intercambiável.....	9
Figura 3.5 – Formas de trajetórias de torneamento.....	12
Figura 3.6 – Processos convencionais de furação.....	13
Figura 3.7 – Necessidades que motivaram a criação e evolução dos processos não convencionais de usinagem.	16
Figura 3.8 – Principais processos de usinagem.....	17
Figura 3.9 – Conjunto de operações para confecção da ponta no processo de usinagem convencional.	22
Figura 3.10 – Formas típicas de deformação no forjamento.....	24
Figura 3.11 – Recalque entre ferramentas planas.	25
Figura 3.12 – Forjamento em matriz por cunhagem.....	26
Figura 3.13 – Desenho esquemático do processo de “ironing”.	29
Figura 3.14 – Desenho esquemático da trefilação de tubos com mandril passante.....	30
Figura 3.15 – Ilustração do processo de embutimento e “ironing”.....	30
Figura 3.16 – Ilustração do processo de “ironing” seguido de bojamento através de punção de borracha	31
Figura 4.1 – Fluxograma esquemático dos métodos utilizados no trabalho.....	40
Figura 4.2 – Forma e dimensões da ponta intercambiável.....	41
Figura 4.3 – Desenho inicial para obter a ponta intercambiável.....	42
Figura 4.4 – Figura Inicial do Segundo Pré-Projeto.	48
Figura 5.1 – Fotografia do corpo de prova antes e após o ensaio.....	53
Figura 5.2 – Curva Tensão efetiva x Deformação efetiva plástica para a liga Cu-Cr.....	54
Figura 5.3 – Pré- projeto inicial da primeira etapa.....	55
Figura 5.4 – Pré-Projeto Inicial Segunda Etapa.....	56
Figura 5.5 – Preenchimento da matriz na simulação da 1ª etapa do pré- projeto inicial.....	57
Figura 5.6 – Gráfico carga x deslocamento na 1ª etapa do pré- projeto inicial.....	58

Figura 5.7 – Critério de dano Cockroft & Latham normalizado obtido na simulação da 1ª etapa pré-projeto inicial.	59
Figura 5.8 – Tensão (MPa) na matriz superior (objeto3); inferior (objeto 1) da 1ª etapa do pré- projeto inicial.....	59
Figura 5.9 – Posição Inicial da segunda etapa do pré-projeto inicial.....	60
Figura 5.10 – Rompimento do Material.....	61
Figura 5.11 – Simulação da segunda etapa do pré-projeto inicial com modificação angular. (a) posição inicial do punção, (b) posição final do punção.	61
Figura 5.12 - Fotografia do estampo e da barra utilizada: (a) desmontado; (b) montado na prensa.	62
Figura 5.13 – Tarugos obtidos através do procedimento de corte.	63
Figura 5.14 – Vista de cima do estampo da primeira etapa do pré-projeto inicial.	64
Figura 5.15 – forma de sino primeira etapa do pré-projeto inicial.....	64
Figura 5.16 – Peças rompidas na segunda etapa do pré-projeto inicial.	65
Figura 5.17 - Primeira etapa segundo pré-projeto. (a) posição inicial, (b) posição final.	66
Figura 5.18 - Segunda etapa do segundo pré-projeto. (a) posição inicial, (b) posição final.	67
Figura 5.19 -Terceira etapa do segundo pré-projeto. (a) posição inicial, (b) posição final.	67
Figura 5.20 - Quarta etapa do segundo pré-projeto. (a) posição inicial, (b) posição final.	68
Figura 5.21 – Resultado da simulação da etapa de calibração do tarugo inicial.....	69
Figura 5.22 – Gráfico carga versus deslocamento.	69
Figura 5.23 – Critério de dano Cockroft & Latham normalizado obtido na simulação da etapa de calibração do tarugo inicial.....	70
Figura 5.24 – Tensão (MPa) na matriz superior (objeto3); inferior (objeto 1) da 1ª etapa do pré- projeto inicial.....	70
Figura 5.25 – Resultado da simulação da etapa de pré-forma.	71
Figura 5.26 – Gráfico carga versus deslocamento da etapa de pré-forma.	72
Figura 5.27 – Critério de dano Cockroft & Latham normalizado obtido na simulação da etapa de pré-forma.	72

Figura 5.28 – Tensão (MPa) na matriz superior (objeto3); inferior (objeto 1) da etapa de pré-forma.	73
Figura 5.29 – Resultado da simulação da etapa de forma cônica.	74
Figura 5.30 – Gráfico carga versus deslocamento da etapa de pré-forma.	75
Figura 5.31 – Critério de dano Cockroft & Latham normalizado etapa de forma cônica.	75
Figura 5.32 – Tensão (MPa) na matriz superior (objeto3); inferior (objeto 1) da etapa de forma cônica.	76
Figura 5.33 – Resultado da simulação da etapa de ‘ironing’.	77
Figura 5.34 – Gráfico carga versus deslocamento da etapa de ‘ironing’.	78
Figura 5.35 – Tensão (MPa) na matriz superior (objeto3); inferior (objeto 1) da etapa de ‘ironing’.	78
Figura 5.36 – Critério de dano Cockroft & Latham normalizado obtido na simulação da etapa de forma cônica.	79
Figura 5.37 – Irregularidades no tarugo inicial.....	80
Figura 5.38 - Estampo utilizado para calibração do tarugo inicial.	81
Figura 5.39 – Fotografia do tarugo inicial após a etapa de calibração (a) (vista por cima) e (b) (vista lateral).....	81
Figura 5.40 – Fotografia do estampo para a segunda etapa do segundo pré-projeto.....	82
Figura 5.41 – Estampo da segunda etapa do segundo pré-projeto, montado em prensa.	83
Figura 5.42 – Foto do produto da segunda etapa do segundo pré-projeto.	83
Figura 5.43- Vista de cima do estampo da terceira operação do segundo pré-projeto. ...	84
Figura 5.44 – Estampo da terceira etapa do segundo pré-projeto montado em prensa excêntrica.	85
Figura 5.45 – Foto do produto obtido na terceira etapa do segundo pré-projeto.....	85
Figura 5.46 – Foto do estampo da etapa de ‘ironing’ vista de por cima.	86
Figura 5.47 - Foto do sistema de extração do estampo da etapa de ‘ironing’.	87
Figura 5.48 - Foto do estampo da etapa de ‘ironing’ montado em prensa hidráulica.	87
Figura 5.49 – Foto do produto obtido após o teste do estampo de ‘ironing’.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Listagem dos processos em relação aos materiais	20
Tabela III.2 – Listagem dos processos com relação a várias operações	20
Tabela III.3 – Capabilidade dos processos.....	21
Tabela III.4 – Aspectos econômicos dos processos.....	21
Tabela III.5 – Valores de k_{cf}	27
Tabela IV.1 – Dados do equipamento.....	44
Tabela IV.2 – Condições de Contorno.....	45
Tabela IV.3 – Tempo em cada passo simulação do segundo pré-projeto.....	48
Tabela IV.4 – Relação do Material Utilizado para a confecção das Matrizes	50
Tabela IV.5 – Composição Química dos Aços Ferramenta.....	50
Tabela IV.6 – Características das prensas excêntricas.....	51
Tabela IV.7 – Característica da Prensa Hidráulica Automática/semi-automática	52
Tabela V.1 – Composição Química	53
Tabela V.2 – Valores de densidade, massa e volume da liga Cu-Cr	54
Tabela V.3 – Dimensões necessárias na fabricação por peça.....	89
Tabela V.4 – Taxas de produção e maquinário utilizado em cada etapa do forjamento.	89
Tabela V.5 – Custo total e parcial da ponta fabricada por usinagem e forjamento, em valores relativos a unidade.....	90

LISTA DE NOTAÇÕES

A – ótima;

Ac – área do cilindro;

AJM – usinagem por jato abrasivo;

A_p – área de superfície cunhada;

AWJM – usinagem por jato de água abrasivo;

B – boa;

C – fraca;

C_F – custo de fabricação;

C_M – custo do material;

C_T – custo total;

CHM – usinagem química;

CNC – controle numérico;

D – não aplicável;

D_e – densidade de corrente;

Dtp – deslocamento total do punção;

d – espessura do copo;

d_1 – diâmetro inicial do copo;

d_2 – diâmetro final do copo;

EBM – usinagem por feixe de elétrons;

ECM – usinagem eletroquímica;

EDM – usinagem por descarga elétrica;

ECG – esmerilhamento eletroquímico;

EDG – esmerilhamento por eletrod descarga;

e – espessura da chapa;

F – força requerida para conformação por cunhagem;

F_d – força necessária para a deformação;

F_e – força requerida;

HV – dureza Vickers;

h – altura;

IBM – usinagem por feixe de íons;

J – constante;

k_{cf} – resistência do material ao fim da conformação;

L – comprimento furo;

LAG – esmerilamento a laser;

LAU – ultra-sônico realizado a laser;

P – perímetro da área de corte;

P_c – máxima pressão mostrada no visor do manômetro durante o teste;

PCHM – usinagem fotoquímica;

PBM – usinagem por feixe de plasma;

PCU – processos convencionais de usinagem;

Q – energia para fusão;

R – somatório das resistências ôhmicas;

R_e – resistência ao cisalhamento do material;

R_1 – resistência de contato entre eletrodo e chapa superior;

R_2 – resistência de contato entre eletrodo e chapa inferior;

R_3 – resistência de contato entre chapas;

R_4 – resistência de chapa superior;

R_5 – resistência de chapa inferior;

$R_{(a)}$ – rugosidade;

RUM – usinagem ultra-sônica com rotação;

T – temperatura em Kelvin;

T_h – temperatura homóloga;

T_f – temperatura de fusão;

t_p – tempo em cada passo;

TRM – tolerância dimensional;

t_0 – espessura inicial;

t_f – espessura final;

V_p – velocidade do punção;

V_1 – velocidade inicial;

V_2 – velocidade final;

ZAC – zona afetada pelo calor;

\emptyset - ângulo de ironing.

RESUMO

A solda a ponto consiste em unir duas ou mais chapas metálicas pela aplicação de pressão sobre as mesmas e conseqüente aquecimento. Este aquecimento é gerado pela resistência do metal ao fluxo de corrente elétrica elevada imposta através dos contatos que pressionam as chapas. Dentre os elementos de controle do processo, destacam-se os contatos intercambiáveis que permitem a passagem de corrente elétrica e exercem pressão nas chapas. Esses contatos são hoje fabricados pelo processo de usinagem, que envolve alto custo de material e de fabricação. A conformação a frio apresenta vantagens econômicas sobre a usinagem, tais como: economia de material, produtividade e custo operacional. O presente estudo empregou a modelagem numérica via elementos finitos e métodos experimentais, para verificar a viabilidade da substituição da usinagem pela conformação a frio, na fabricação dos contatos intercambiáveis de solda a ponto.

ABSTRACT

Spot welding consists joins two or more metal sheets by the application of pressure and heating. The heating is generated by the metal resistance to the flow of high a electric current through contacts that press the metal sheets. Among the control elements of the process the interchangeable contacts are important. They allow the electric current to flow and cause pressure on the foils. Today these contacts are manufactured by a machining process which involves high material and fabrication costs. The cold metal forming presents economic advantages over the machining process such as: material savings, productivity and lower operating costs. The present case study utilized the numeric modelling by finite elements and experimental methods to analyze the replacement of the machining process by cold metal forming in the production of interchangeable contacts for spot welding.

1. INTRODUÇÃO

A união de componentes metálicos através do processo de soldagem por resistência elétrica desempenha um importante papel dentre os modernos métodos de fabricação ⁽¹⁾. Esse processo é utilizado em vários setores de construção e manutenção de produtos, tais como funilaria, suspensão de veículos, trocadores de calor em transformadores de alta tensão e ponteamento de chapas finas.

Comumente são utilizados dois tipos de soldagem por resistência: a soldagem por costura e a soldagem a ponto. A soldagem por costura é caracterizada por pontos de solda que são executados repetidamente, de modo a formar um cordão de solda contínuo. Uma de suas aplicações é na fabricação de trocadores de calor e de tubos com costura. O acesso a locais de difícil soldagem e o empenamento reduzido torna a soldagem a ponto, mais vantajosa em relação à soldagem por costura.

A solda a ponto consiste em se aplicar uma corrente elétrica sob pressão em uma ponta condutora intercambiável, em contato com o material a ser soldado. Essas pontas são elementos que devem conduzir elevada corrente elétrica para as chapas. Devem ter alta condutividade elétrica de modo a evitar perdas e superaquecimento gerados pela passagem de corrente elétrica elevada e boa resistência ao desgaste (elevada dureza) a temperaturas elevadas, para que não ocorra amolecimento mesmo quando submetidas a longo tempo em temperatura elevada. Também devem ter fácil trabalhabilidade para que possam ser fabricadas com geometrias retas ou curvas em função do acesso ao local de ponteamento. O material que apresenta tais características, e que é comumente usado na confecção das pontas, é o cobre.

A fabricação das pontas intercambiáveis tem sido realizada no Brasil através de várias etapas de usinagem. Esse processo requer tempo, custo operacional, ferramentas e consumo de materiais elevados. Em função disso seria interessante à substituição das etapas deste processo de fabricação. Uma alternativa para as etapas de usinagem pode ser a fabricação das pontas utilizando apenas processos de conformação a frio. Uma vantagem fundamental do uso dos processos de produção por conformação está na

possível economia de material, devido a não geração de cavacos, a grande repetibilidade dimensional, a adequação das formas, e na construção mais leve, em comparação com os costumeiros métodos de torneamento, fresamento e outros ⁽²⁾. Nesse sentido este trabalho se propõe a avaliar a possibilidade da substituição das etapas de usinagem por conformação a frio na fabricação das pontas intercambiáveis.

As etapas de conformação mecânica a frio necessárias serão definidas através de uma modelagem utilizando elementos finitos (Programa Deform –2D) de modo a minimizar as etapas experimentais feitas por tentativa e erros. Sendo assim o trabalho consiste do estabelecimento das etapas de conformação a frio e da validação experimental dos mesmos.

2. OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a possibilidade de fabricação de contatos intercambiáveis para a soldagem por resistência a ponto utilizando apenas processos de conformação mecânica a frio, ou seja, avaliar a possibilidade de se eliminar as etapas de usinagem presente nos processos atuais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Abordou-se neste capítulo tópicos referentes à soldagem por resistência, usinagem, conformação mecânica e método de elementos finitos aplicados na conformação mecânica.

3.1. Soldagem por Resistência

O processo de soldagem por resistência elétrica é um processo de união autógena, ou seja, processo no qual há ausência de metal de adição. A soldagem por resistência consiste na união de materiais metálicos através de uma fusão localizada na região a ser soldada ⁽³⁾. Esta fusão é gerada pelo aquecimento localizado das peças. O aquecimento ocorre em função da passagem de uma elevada corrente elétrica através do eletrodo e da resistência elétrica nos pontos de contatos entre as peças. Esse contato ocorre devido ao pressionamento de uma peça contra a outra por meio dos eletrodos, chamados de pontas intercambiáveis. Os materiais normalmente soldados por resistência elétrica são aços ao carbono, inclusive os zincados, baixas ligas e inoxidáveis; cobre, níquel, alumínio, magnésio, titânio e suas ligas.

A soldagem por resistência elétrica é utilizada em processos de fabricação, em vários setores da construção civil e na manutenção de produtos como funilaria, suspensão de veículos, trocadores de calor em transformadores de alta tensão e ponteamto de chapas finas. São dois os tipos de soldagem comumente utilizados: a soldagem por costura e a soldagem a ponto.

3.1.1. Soldagem por Costura

É o processo no qual a pressão entre os contatos e o calor gerado pela passagem de corrente elétrica entre os mesmos produz repetidamente os pontos de solda de modo a formar a costura soldada. O processo de soldagem por costura pode ser classificado como *roll spot welding*, *reinforced roll spot welding* e *leak-tight seam welding* ⁽⁴⁾. O primeiro possui como característica grande vazio entre os pontos de solda, o segundo apresenta pequeno vazio e o terceiro apresenta pontos de solda sobrepostos.

No processo de soldagem por costura os eletrodos de forma circular são rotacionados em sentidos opostos proporcionando o deslocamento contínuo do material a ser soldado (figura 3.1). A soldagem por costura é utilizada amplamente na indústria automobilística, na fabricação de trocadores de calor, tubos com costura e tanques de gasolina, assim como em vários outros segmentos de fabricação.

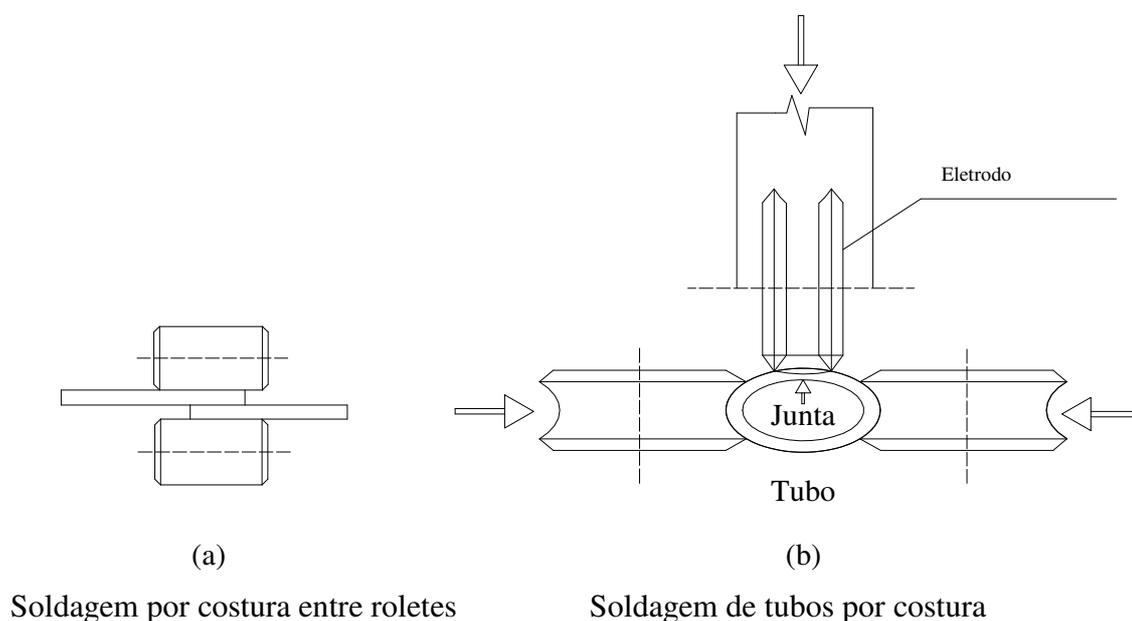


Figura 3.1 – Processos de soldagem por costura.

3.1.2. Soldagem a Ponto

A soldagem a ponto consiste em unir duas ou mais chapas metálicas, pela aplicação de pressão mecânica e corrente elétrica. O processo é realizado utilizando um dispositivo que aplica uma corrente elétrica através de chapas metálicas sobrepostas, na região onde será realizada a união. Um transformador impõe ao sistema uma elevada corrente elétrica associada a uma baixa diferença de potencial. A passagem do fluxo de corrente elétrica elevada através dos contatos que pressionam as chapas gera um aquecimento localizado levando à fusão parcial das chapas metálicas. A figura 3.2 (a) ilustra o transformador e a figura 3.2 (b) ilustra o sistema de pressão.

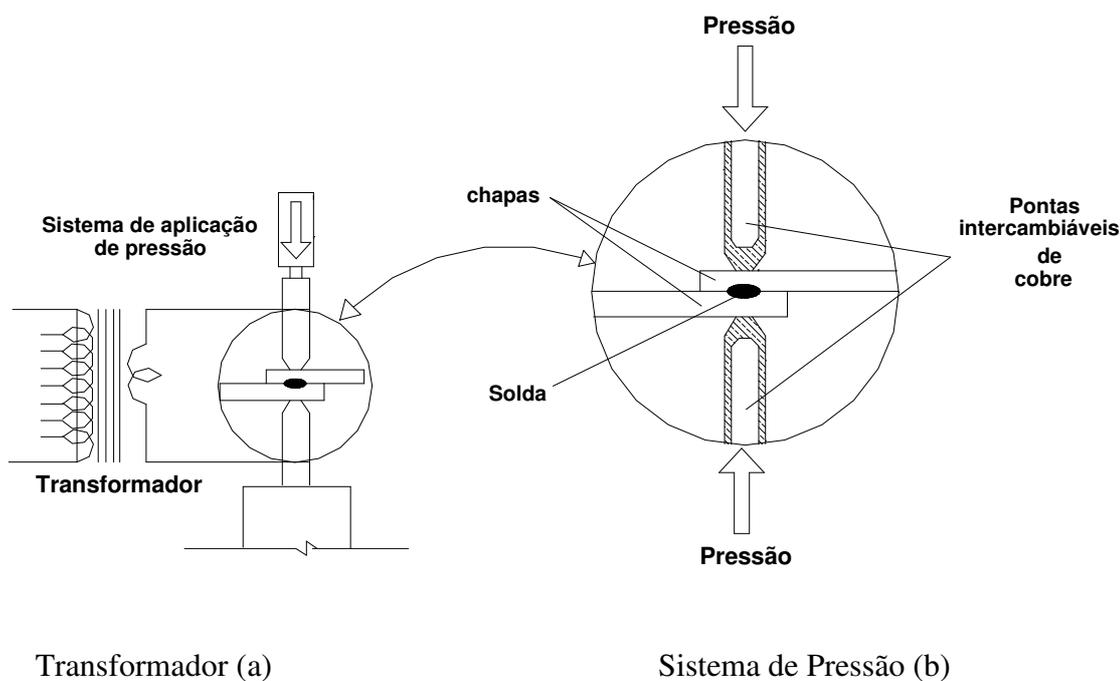


Figura 3.2 – Esquema de solda a ponto.

Algumas das vantagens da solda a ponto são: a ausência de escória, baixo nível de contaminação, empenamento reduzido e tempo de operação menor. O processo pode ser operado de forma manual, mecânica ou automática.

3.1.2.1. Variáveis do processo de soldagem a ponto

As variáveis fundamentais no processo de solda a ponto são a energia para fusão, o tempo de soldagem, a densidade da corrente, a refrigeração e a força exercida sobre a ponta intercambiável.

- **Energia para fusão e tempo de soldagem**

Para que a solda ocorra, a região da interface entre as peças deve ser a primeira a alcançar a temperatura de fusão dos metais base ⁽¹⁾.

A energia necessária para tal fusão e formação do ponto de solda é gerada nas pontas intercambiáveis e nas peças. A mesma pode ser obtida segundo a seguinte equação (lei de Joule):

$$Q = \frac{1}{J} \int_{a=0}^{b=1} I^2 \cdot R \cdot dt \quad (3.1)$$

onde: dt é o intervalo de tempo de passagem da corrente; I é a corrente passando pelos eletrodos e peças; J é constante e de valor igual a 4,185; e R é a somatória das resistências elétricas ôhmicas (R1, R2, R3, R4 e R5) ^(1, 3).

Na figura 3.3. verifica-se que R1 e R2 são as resistências de contato entre eletrodos e chapas, R3 resistências de contato entre chapas, R4 e R5 resistências das peças a serem soldadas. A resistência R3 é diretamente proporcional à raiz quadrada da razão entre as durezas das peças, nas temperaturas de trabalho e ambiente ^(1, 4, 5).

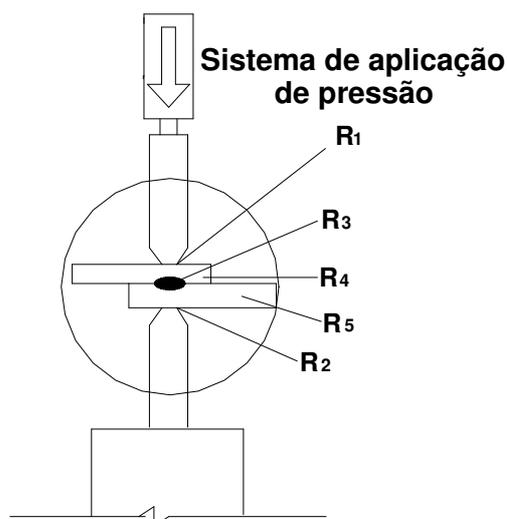


Figura 3.3 – Esquema de resistências elétricas ôhmicas.

Somente uma fração de calor gerado é consumida para a soldagem propriamente dita. Grande parte é perdida ou é transmitida pelas pontas intercambiáveis para a água de refrigeração, ou é dissipada pelas chapas. As perdas são máximas no início da solda. A quantidade total de perdas é proporcional à raiz quadrada da duração do tempo de solda. O rendimento do processo é definido como o volume de material fundido correspondente a uma determinada quantidade de calor pelo volume que poderia ser fundido se não houvesse perdas ⁽¹⁾. Portanto, soldas realizadas num menor tempo apresentarão um maior rendimento térmico.

- **Densidade da Corrente**

Apesar do maior rendimento térmico ocorrer em soldas realizadas num curto período de tempo, existem limites para a densidade de corrente, os quais dependem da intensidade de corrente, a espessura e do tipo dos materiais envolvidos ⁽⁶⁾. Se essa intensidade de corrente for insuficiente, nunca ocorrerá fusão, mesmo em um longo tempo. Entretanto, sendo a mesma excessiva, a ponta penetrará na peça, pois grande parte ou a totalidade da espessura estará na fase fundida. Assim, para uma dada força de aplicação das pontas, há uma corrente máxima, acima da qual o metal sob os mesmos é expulso violentamente provocando soldas com defeito. Praticamente, para o processo ocorrer no

menor tempo possível e produzir pontos com a mais alta resistência mecânica, é usual se determinar a densidade de corrente máxima exatamente anterior àquela que provoca essa expulsão. Tal densidade pode ser estimada pela seguinte fórmula deduzida empiricamente ⁽⁶⁾:

$$D_e = 192 + 480 \cdot \text{EXP}^{-e} \quad (\text{A/mm}^2) \quad (3.2)$$

onde: D_e é a densidade corrente máxima e “ e ” é a espessura da chapa mais fina em mm.

Refrigeração

As pontas intercambiáveis são refrigeradas utilizando água, que é conduzida até as mesmas por um tubo que vai próximo à extremidade da ponta intercambiável e retorna pela secção em forma de coroa circular externa ao tubo e interna a ponta (figura 3.4). A distância da extremidade do tubo e do final do furo de refrigeração da ponta é fundamental para a obtenção do resfriamento adequado da ponta intercambiável ⁽⁷⁾. Tubos de circulação muito longos dificultam a circulação de água, e os muito curtos, levam à formação de vapor, ambos dificultando a refrigeração.

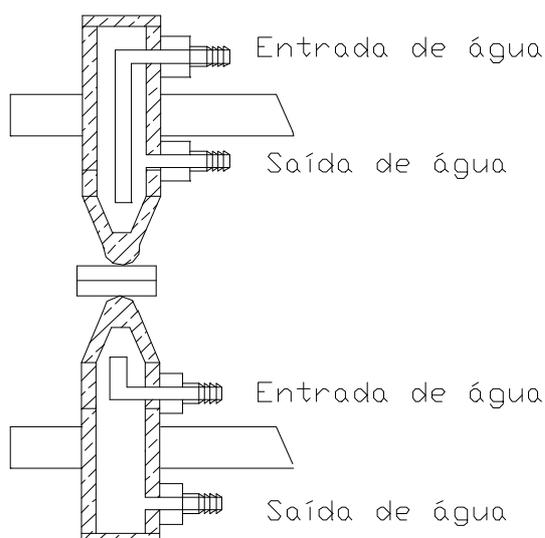


Figura 3.4 - Esquema de refrigeração da ponta intercambiável.

- **Força exercida sobre a ponta intercambiável**

A força aplicada na ponta intercambiável varia ao longo do ciclo do processo, em função dos períodos de aquecimento, de soldagem, pós-soldagem e tempo total. No que diz respeito ao período de aquecimento a força aplicada deve ser suficiente para pressionar as peças a serem soldadas uma contra a outra e possibilitar a passagem de corrente pela região a ser soldada. Não devem ser geradas centelhas a fim de se evitar danos nas peças a serem soldadas. Durante o período de soldagem, as forças devem ser suficientes para que o material aquecido forme uma ligação metálica perfeita. No período de pós-soldagem, ou seja, após término da passagem da corrente, o eletrodo deve ainda manter a pressão nas pontas intercambiáveis até que a solda tenha resfriado suficientemente.

3.1.2.2. Características Exigidas da Ponta Intercambiável

As pontas intercambiáveis trabalham em condições desfavoráveis. Devem ter qualidades elétricas e mecânicas, pois conduzem corrente elétrica de grande intensidade. Não devem estar expostas a um aquecimento demasiado, devem resistir a pressões elevadas durante a soldagem, sem sofrerem desgaste excessivo, como também só devem perder a dureza após um certo período de trabalho. As principais características necessárias ao bom desempenho das pontas intercambiáveis são: alta condutividade elétrica e térmica; elevada dureza e resistência ao desgaste a elevadas temperaturas; e pequena tendência para formar liga com material a ser soldado. Alta condutividade elétrica é necessária para evitar perdas e superaquecimento. O material deve possuir elevada condutividade térmica para melhor conduzir o calor gerado, principalmente nos pontos de contato entre a ponta intercambiável e a peça, mantendo as superfícies de contato relativamente frias. Deverá ter elevada dureza e resistência ao desgaste a altas temperaturas, para evitar-se o amolecimento depois de submetido durante longo tempo à temperatura elevada. A pequena tendência para formar liga com material a ser soldado é necessária a fim de evitar que o material fique aderido à ponta intercambiável. As ligas que atendem a tais requisitos são de cobre ⁽⁸⁾. As mais utilizadas são cobre-cromo, cobre-zircônio, cobre-cádmio e cobre-berílio.

3.2. Usinagem

É o processo que promove o arrancamento controlado de material, com o objetivo de produzir peças com formas e características superficiais especificadas ⁽⁹⁾. Para a compreensão das diferentes grandezas relacionadas com a usinagem dos metais, tais como o desgaste de ferramentas e suas causas, a força de corte e arestas postiças, é necessário um estudo minucioso do processo de formação do cavaco. Limitar-se-á neste trabalho a uma apresentação dos processos convencionais e não convencionais de usinagem.

3.2.1. Processos Convencionais de Usinagem

Desde há muito tempo, todos os processos de usinagem usavam o contato físico entre a ferramenta e a peça para o arrancamento de cavacos utilizando basicamente dois mecanismos: o do cisalhamento e a da abrasão.

3.2.1.1. Processos Convencionais de Usinagem por Cisalhamento

Durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção de material (ainda solidária à peça) é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta. O material recalcado sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento (sem que haja com isto uma perda de coesão) entre a porção de material recalcada e a peça. Esse deslizamento se realiza segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcado. Durante a usinagem, esses planos instantâneos definem uma certa região entre a peça e o cavaco, dita região de cisalhamento. Dentre os processos convencionais de usinagem por cisalhamento destacam-se: o torneamento, aplainamento, furação, alargamento, mandrilhamento, fresamento, serramento, brochamento e o rosqueamento.

O torneamento é o processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfície de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto a

peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina (torno mecânico), e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. Quanto à forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo. O torneamento curvilíneo é o processo de torneamento, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea. Quanto à finalidade, as operações de torneamento podem ser classificadas ainda em torneamento de desbaste e torneamento de acabamento. Entende-se por acabamento a operação de usinagem destinada a obter na peça as dimensões finais, ou um acabamento superficial especificado, ou ambos. O desbaste é a operação de usinagem, anterior a de acabamento, que visa obter na peça a forma e dimensões próximas das finais. O torneamento retilíneo se classifica em cilíndrico, cônico, radial, e perfilado. No cilíndrico a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina. No torneamento cônico a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, inclinada em relação ao eixo principal de rotação da máquina. No torneamento radial a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina. No torneamento por perfilamento a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea radial ou axial, visando à obtenção de uma forma definida, determinada pelo perfil da ferramenta. A figura 3.5 ilustra formas de trajetórias de torneamento.

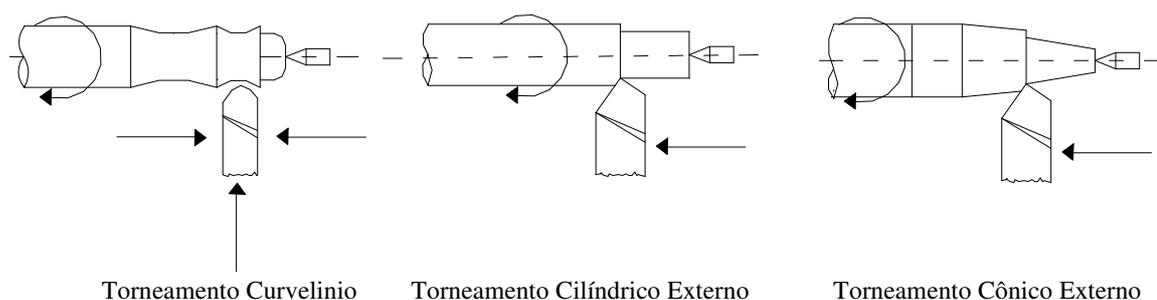


Figura 3.5 – Formas de trajetórias de torneamento.

Um segundo processo de usinagem convencional por cisalhamento é o aplainamento, que é destinado a obtenção de superfícies regradas, geradas por um movimento retilíneo alternativo da peça ou da ferramenta. O aplainamento pode ser horizontal ou vertical. Quanto à finalidade, as operações do aplainamento podem ser classificadas ainda em aplainamento de desbaste e de acabamento.

Ao lado do torneamento e do aplainamento, se coloca o processo convencional de furação que é destinado à obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante (figura 3.6). Para tanto a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente, a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina. Um tipo de processo de furação é o rebaixamento (escareamento).

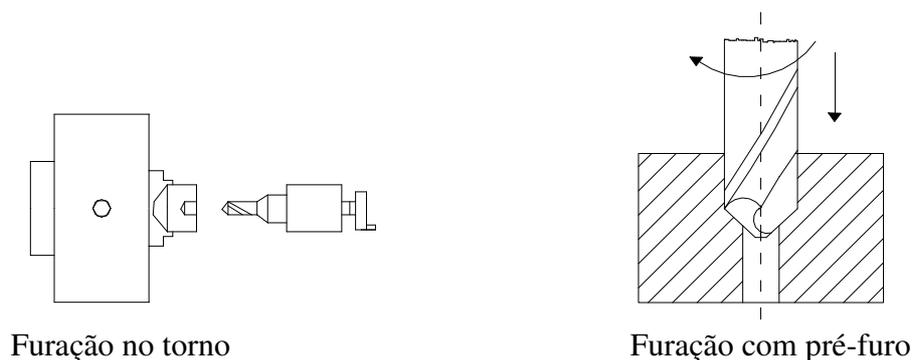


Figura 3.6 – Processos convencionais de furação.

O alargamento é destinado ao desbaste ou ao acabamento de furos cilíndricos ou cônicos, com auxílio de ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo de rotação da ferramenta. O alargamento pode ser de desbaste ou acabamento.

O mandrilhamento é destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou várias ferramentas de barra. Nessa etapa a ferramenta gira, e a peça ou a ferramenta se deslocam em uma trajetória determinada. O mandrilhamento pode ser cilíndrico, radial, cônico e de superfícies especiais. Quanto à finalidade, às operações de mandrilhamento podem ser classificadas ainda em desbaste e de acabamento.

O fresamento é destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer. Distinguem-se dois tipos básicos de fresamento, o cilíndrico tangencial e o frontal.

O serramento é destinado ao seccionamento ou recorte com auxílio de ferramentas multicortantes de pequena espessura. Para tanto, a ferramenta gira ou se desloca, ou executa ambos os movimentos e a peça se desloca ou se mantém parada. O serramento pode ser retilíneo ou circular. No serramento retilíneo a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea alternativa; no segundo caso, o serramento é retilíneo contínuo. No serramento circular a ferramenta gira ao redor de seu eixo e a peça ou ferramenta se desloca.

O brochamento é destinado à obtenção de superfícies quaisquer com auxílio de ferramentas multicortantes. Para tanto, a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo da ferramenta. O brochamento classifica-se em interno ou externo.

O rosqueamento é destinado à obtenção de filetes, por meio de abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. Para tanto, a peça ou a ferramenta gira e uma delas se desloca simultaneamente segundo uma trajetória retilínea paralela ou inclinada ao eixo de rotação. O rosqueamento classifica-se em interno ou externo.

3.2.1.2. Processos Convencionais de Usinagem por Abrasão

Denomina-se usinagem por abrasão o processo mecânico de usinagem no qual são empregadas ferramentas abrasivas constituídas de grãos abrasivos soltos ou ligados por aglutinante, com formas e dimensões definidas ⁽⁹⁾. A ferramenta abrasiva com forma e superfície de revolução adaptável a um eixo é denominada rebolo abrasivo. Dentre os processos convencionais de usinagem por abrasão destacam-se: a retificação, o brunimento e superacabamento, polimento, lixamento, jateamento e afiação.

A retificação é o processo de usinagem por abrasão destinado à obtenção de superfícies com o auxílio de ferramenta abrasiva de revolução. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória determinada, podendo a peça girar ou não. A retificação pode ser tangencial ou frontal. Quanto ao avanço automático da ferramenta ou da peça, a retificação cilíndrica pode ser com avanço longitudinal da

peça, com avanço radial, circular ou longitudinal do rebolo. Quanto ao avanço automático da ferramenta ou da peça, a retificação cônica pode ser com avanço longitudinal da peça, com avanço radial, circular ou longitudinal do rebolo.

O brunimento e o superacabamento são empregados no acabamento de furos cilíndricos de revolução e peças respectivamente, no qual todos os grãos ativos da ferramenta abrasiva estão em constante contato com a superfície da peça e descrevem trajetórias helicoidais. Para tanto, a ferramenta ou a peça gira e se desloca axialmente com movimento alternativo.

No polimento a ferramenta é constituída por um disco ou conglomerado de discos revestidos de substâncias abrasivas.

O lixamento é o processo mecânico de usinagem por abrasão executado por abrasivo aderido a uma tela e movimentado com pressão contra a peça.

No jateamento as peças são submetidas a um jato abrasivo, para serem rebarbadas, asperizadas ou receberem um acabamento.

Na afiação é dado o acabamento das superfícies da cunha cortante da ferramenta, com o fim de habilitá-la a desempenhar sua função. Desta forma, são obtidos os ângulos finais de ferramenta.

3.2.2. Processos Não Convencionais De Usinagem

Desde há muito tempo, todos os processos de usinagem utilizavam o contato físico entre a ferramenta e a peça para o arrancamento de cavacos, utilizando basicamente dois mecanismos: o do **cisalhamento** (torneamento, fresamento, furação, alargamento, brochamento) e a da **abrasão** (retificação, brunimento, polimento, lapidação). Apesar de todo o avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, esses processos têm sérias limitações principalmente em casos de utilização de materiais duros e quando se deseja a obtenção de formas complexas. Por outro lado, a necessidade humana levou ao desenvolvimento de novos materiais normalmente de difícil usinagem por processos

convencionais. Surgiram novos aços-liga, as superligas (de Fe, Ni e Ti), as cerâmicas finas, os compósitos, entre outros, que facilmente ultrapassam a dureza de 1000HV, e que passaram a exigir novos processos especiais de fabricação. Paralelamente, novas geometrias e formas mais complexas e diminutas foram sendo exigidas pelo mercado. Com isso, mais um motivo passou a existir para que novos processos fossem desenvolvidos. A figura 3.7 apresenta os principais motivos que inspiraram o desenvolvimento dos assim chamados processos não convencionais de usinagem.

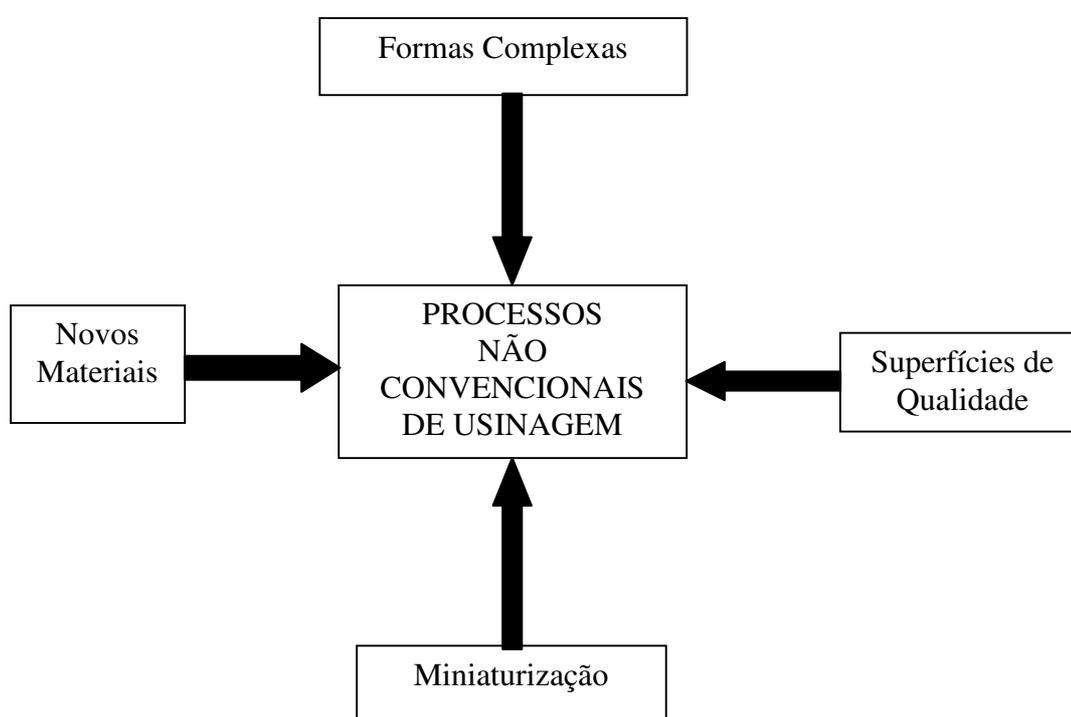


Figura 3.7 – Necessidades que motivaram a criação e evolução dos processos não convencionais de usinagem.

As diferenças fundamentais entre os processos não convencionais e os convencionais⁽¹⁰⁾ são as formas de energia empregadas e os mecanismos de retirada de material da peça. Como se pode notar pelo diagrama da figura 3.8, onde os principais processos de usinagem são apresentados, os processos diferem quanto à natureza da energia empregada, ao mecanismo de ação e, conseqüentemente, quanto às aplicações práticas.

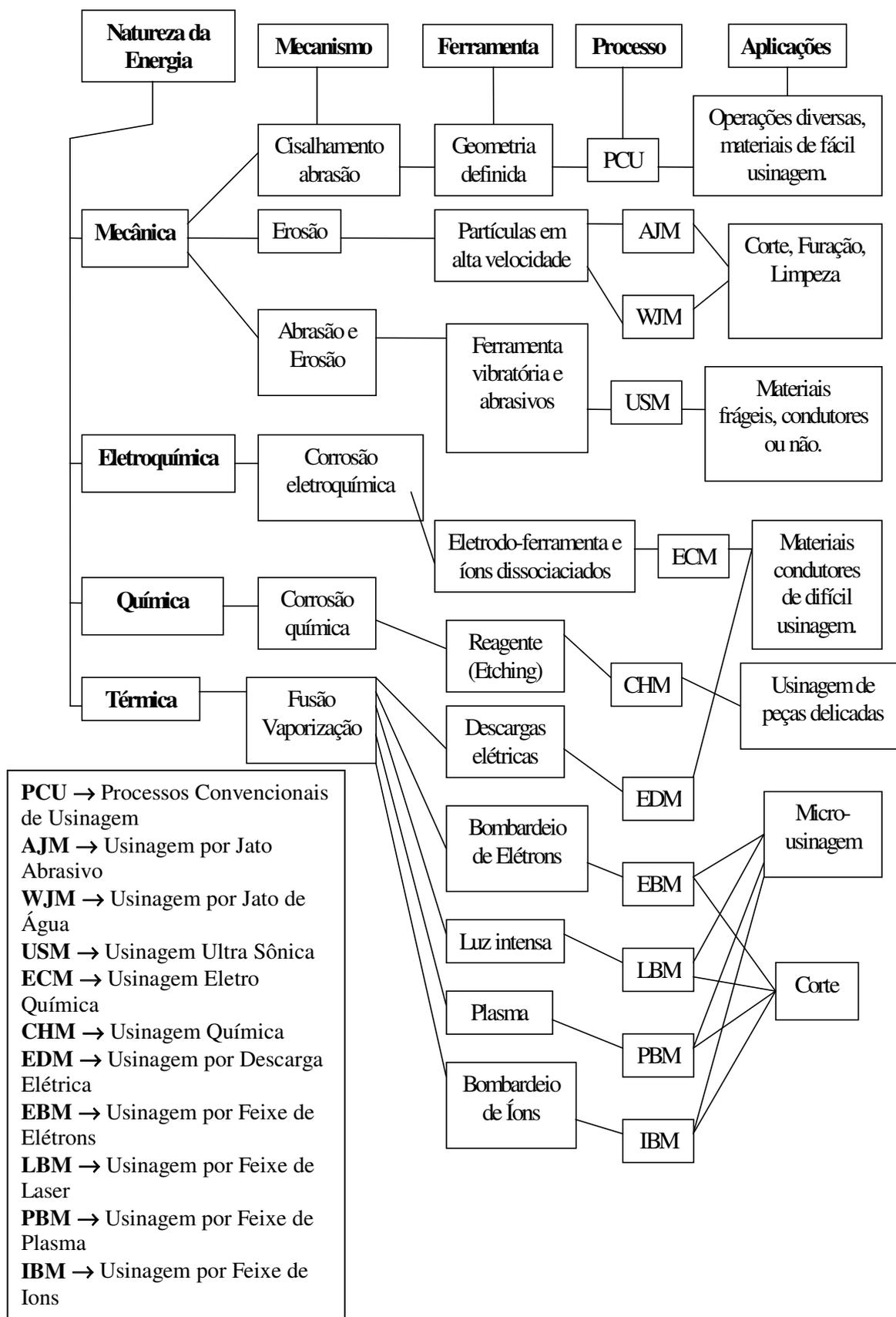


Figura 3.8 – Principais processos de usinagem. ⁽¹⁰⁾

Cada processo tem seu nicho no moderno mundo da usinagem, e dificilmente concorrem entre si. Para se estabelecer o campo de aplicação de cada processo é necessário que se conheça detalhadamente a natureza da usinagem que se pretende realizar. Deve ser levado em conta que:

- os processos não convencionais não devem competir, via de regra, com os convencionais;
- um processo particular adequado a uma situação específica, pode não ser igualmente eficiente sob outras condições.

Em virtude desse segundo aspecto, outros processos têm sido desenvolvidos, geralmente obtidos por combinação com os processos não convencionais básicos da figura 3.8. Desta forma, desenvolveram-se, por exemplo, os processos AWJM (*Usinagem por Jato de Água Abrasivo*), ECG (*Esmerilhamento Eletroquímico*), EDG (*Esmerilhamento por Eletrodescarga*), LAU (*Ultra-sônico Realizado a Laser*), LAG (*Esmerilhamento a Laser*), PCHM (*Usinagem Fotoquímica*), e muitos outros, ainda em fase de laboratório, que estão por surgir ⁽¹¹⁾.

Para bem selecionar um processo, é preciso levar em conta o que a pesquisa e experiência prática já concluiu para cada um deles em termos dos seguintes aspectos:

- materiais a serem usinados;
- forma da peça (ou operações mais indicadas para o processo);
- capacidade do processo: taxa de remoção do material (TRM), tolerância dimensional, acabamento superficial e zona afetada pelo calor (ZAC);
- considerações econômicas.

As tabelas III.1 a III.4 apresentadas a seguir servem para uma abordagem preliminar com vistas à seleção do melhor processo ⁽¹²⁾. Analisando-se as referidas tabelas, nota-se que cada processo responde diferentemente a cada situação. Por exemplo, a Tabela III.1 indica para usinagem de vidro, os processos USM e AJM. No entanto, conforme Tabela III.2, o AJM seria mais indicado para corte enquanto que o USM seria mais apropriado para a produção de cavidades.

Embora as tabelas em questão sejam válidas para as décadas de 70 e 80, sabe-se que houve uma extraordinária evolução na década de 90 e é possível que algumas situações tenham se modificado. Por exemplo, sabe-se que o USM diminuiu muito de preço, o mesmo acontecendo com o EDM. Talvez estejam no nível A ao lado do PBM.

Seguramente, os valores da TRM e das tolerâncias dimensionais melhoraram muito na última década, em função de incorporação de novas tecnologias que otimizaram o desempenho das máquinas. Assim sendo, o uso de controle adaptativo melhorou muito o EDM, enquanto que o uso de mancais aerostáticos possibilitou o desenvolvimento do RUM (Rotary Ultrasonic Machining), uma variante muito mais produtiva do USM.

Se o custo do ferramental é um dos problemas da ECM (onde curiosamente é o único em que a ferramenta não se desgasta), devido à complexidade da mesma, espera-se que num futuro bem próximo este problema seja sobrepujado com o uso do CNC em ECM em que a ferramenta se tornará apenas uma esfera de pequenas dimensões ⁽¹³⁾.

Tabela III.1 – Listagem dos processos em relação aos materiais ⁽¹²⁾

Processo	MATERIAL							
	Al	Aço	Superligas	Ti	Refratários	Plásticos	Cerâmica	Vidro
USM	C	B	C	B	A	B	A	A
AJM*	B	B	A	B	A	B	A	A
ECM	B	A	A	B	B	D**	D**	D**
CHM	A	A	B	B	C	C	C	B
EDM	B	A	A	A	A	D**	D**	D**
EBM	B	B	B	B	A	A	A	B
LBM	B	B	B	B	C	A	A	B
PBM	A	A	A	B	C	D	D	D

A - Ótima; B - Boa; C - Fraca; D - Não Aplicável * Vale também para WJM

** Só se aplicam a estes materiais se forem condutores elétricos.

Tabela III.2 – Listagem dos processos com relação a várias operações ⁽¹²⁾

Processo	Furos				Cavidades		Contor- namento	Corte	
	Precisos		Normais		Precisas	Normais		Fino	Grosso
	$\phi < 0,025$	$\phi > 0,025$	L/ $\phi < 20$	L/ $\phi > 20$					
USM	-	-	A	C	A	A	C	C	-
AJM*	-	-	B	C	C	B	-	A	-
ECM	-	-	A	A	B	A	B	-	-
CHM	B	B	-	-	C	B	-	A	-
EDM	-	-	A	B	A	A	A	A	B
LBM	A	A	B	C	C	C	-	A	B
PBM	-	-	B	C	C	C	-	A	A
EBM	A	A	A	B	C	C	B	A	B

A - Ótima; B - Boa; C - Fraca; D - Não Aplicável * Vale também para WJM

Tabela III.3 – Capabilidade dos processos ⁽¹²⁾

Processo	TRM (mm ³ /min)	Tolerância (μm)	Rugosidade (R _a , μm)	ZAC (μm)
USM	300	7,5	02-0,5	25
AJM	0,8	50	0,5-1,2	25
ECM	1500	50	0,1-2,5	5
CHM	15	50	0,4-2,5	50
EDM	800	15	0,2-12,5	125
LBM	1,6	25	0,4-2,5	250
EBM	0,1	25	0,4-1,25	125
PBM	75000	125	Rugoso	500
PCU	50000	50	0,4-5,0	2,5

A - Ótima; B - Boa; C - Fraca; D - Não Aplicável *Vale também para WJM

Tabela III.4 – Aspectos econômicos dos processos ⁽¹²⁾

Processo	Investimento de Capital	Ferramental	Potência	Eficiência	Consumo de Ferramentas
USM	A	B	B	D	C
AJM*	A	B	B	D	B
ECM	E	C	C	B	A
CHM	B	B	C	C	A
EDM	B	A	B	D	D
EBM	D	B	B	E	A
LBM	C	B	A	E	A
PBM	A	B	A	A	A
PCU	B	B	B	A	B

A - Ótima; B - Boa; C - Fraca; D - Ruim; E - Pior *Vale também para WJM

3.2.3. Usinagem na Fabricação dos Contatos

A fabricação dessas peças tem sido realizada no Brasil por usinagem convencional. Esse processo exige operações de torneamento cônico externo, sangramento, furação, torneamento cônico interno e utilização de maquinário dependente de operações conjuntas, conforme esquema apresentado na figura 3.9. A usinagem requer tempo, custo operacional, ferramentas e consumo de materiais elevados e, em função disso, tem-se considerado a substituição deste processo de fabricação. Uma alternativa para a usinagem seria a conformação a frio, que proporciona vantagens como economia de material, controle do processo, produtividade e eliminação das operações subseqüentes citadas acima.

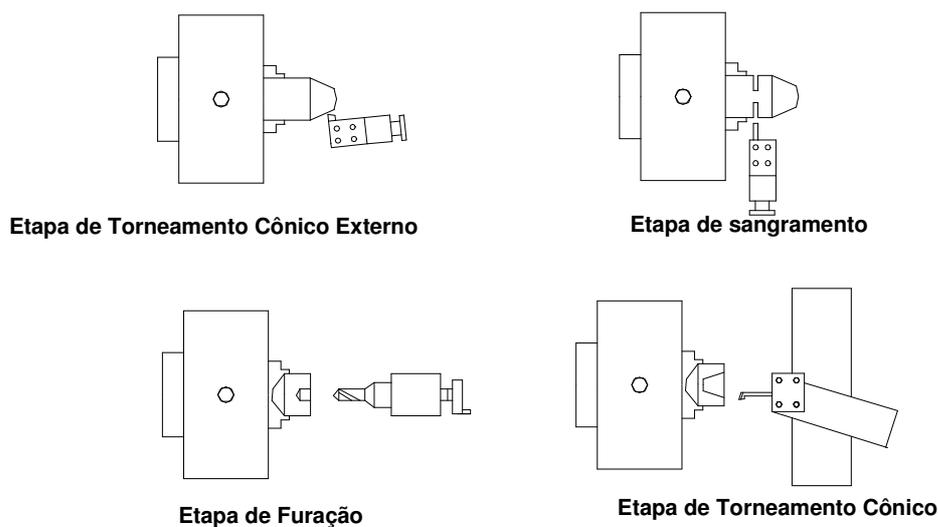


Figura 3.9 – Conjunto de operações para confecção da ponta no processo de usinagem convencional.

3.3. Conformação Mecânica

A conformação mecânica consiste na deformação de um corpo metálico rígido que é levado à forma desejada pelo deslocamento relativo das partículas do sólido mantendo sua coesão ⁽²⁾. Uma vantagem fundamental dos processos de produção por conformação mecânica está na possível economia de material, devido à adequação das formas e na construção mais leve ^(14, 15).

O comportamento dos metais durante a conformação mecânica é fortemente influenciado por sua temperatura. Os processos de conformação podem ser classificados em função de uma “temperatura homóloga”, definida pela razão entre a temperatura de processamento do metal e sua temperatura de fusão, ambas em Kelvin (K) ⁽¹⁶⁾:

$$T_h = \frac{T}{T_f} \quad (3.3)$$

onde: T_h é a temperatura homóloga, T é a temperatura da peça e T_f é a temperatura de início de fusão do material.

Classicamente, o processo é considerado trabalho a quente quando $T_h \geq 0,5$, trabalho a morno quando $0,3 < T_h < 0,4$ e trabalho a frio quando $T_h \leq 0,3$ ⁽¹⁸⁾. Nas faixas de temperatura de trabalho a frio, a resistência ao escorregamento nos planos cristalinos cresce com o próprio escorregamento; isto conduz a um aumento da resistência com redução da ductilidade do metal, podendo ainda promover uma anisotropia de propriedades. O aumento da resistência com a deformação (encruamento) é ocasionado pela interação das discordâncias entre si e com outras barreiras, como os contornos de grãos, que impedem seu movimento através da rede cristalina. O trabalho a frio possibilita obter um produto com alta qualidade intrínseca, rapidez de entrega e razoável custo ⁽¹⁷⁾.

Os processos de conformação mecânica também podem ser subdivididos em processos de conformação de chapas e de conformação de volumes. Dentre os processos de

conformação a frio destacam-se o forjamento a frio, no tocante à conformação de volume, e o Ironing no que diz respeito à conformação de chapas e volume.

3.3.1. Forjamento

O forjamento é uma das técnicas de conformação mais antigas. É definida como uma operação de transformação dos metais numa forma adequada, através da deformação plástica obtida por processos de prensagem ou martelamento ^(18, 19). É responsável pela produção de grande parte dos elementos mecânicos, principalmente depois do desenvolvimento do forjamento de precisão.

O processo de forjamento envolve a aplicação de um estado de compressão direta, com a deformação ocorrendo basicamente por recalque, alargamento e ascensão ⁽²⁰⁾, conforme esquema da figura 3.10. No recalque, a altura original da peça é reduzida com escasso alargamento, sem que ocorram escorregamentos substanciais nas paredes da matriz. No alargamento o material flui predominantemente em direção perpendicular ao movimento das matrizes. Na ascensão o material é impelido em oposição ao movimento das ferramentas. De acordo com a geometria da peça a ser forjada tem-se uma combinação de alargamento e ascensão. Pode-se dividir o processo de forjamento em forjamento livre e forjamento em matrizes.

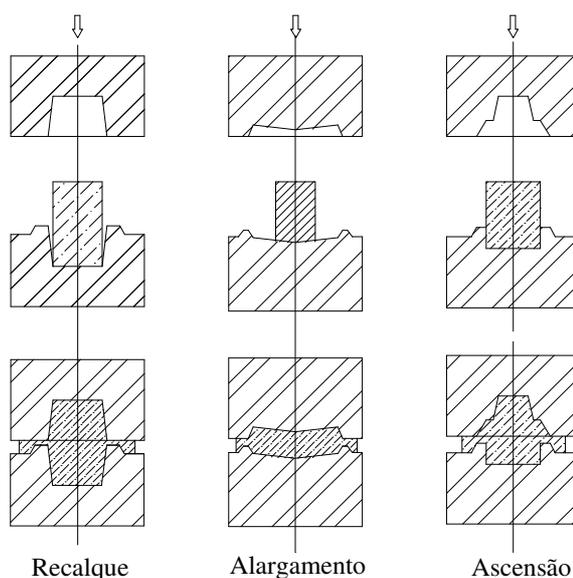


Figura 3.10 – Formas típicas de deformação no forjamento.

3.3.1.1. Forjamento Livre

No forjamento livre o material é conformado entre ferramentas geometricamente simples podendo escoar na direção das superfícies-limite. No forjamento de um corpo cilíndrico a seção transversal permanece circular, mesmo após a deformação. O recalque é a operação mais simples, pois a conformação ocorre entre duas ferramentas planas (figura 3.11 (a)). O desdobraimento da deformação é limitado somente pelo o atrito na superfície de contato o que produz um arqueamento da peça. Quando o corpo a recalcar é muito delgado (figuras 3.11 (b) e (c)), os arqueamentos se formam, inicialmente, próximos aos extremos. O recalque livre só é possível em peças cuja altura (h) não exceda 1,5 vezes a sua espessura (d) ⁽²⁾. Para as peças mais delgadas pode ocorrer a flambagem.

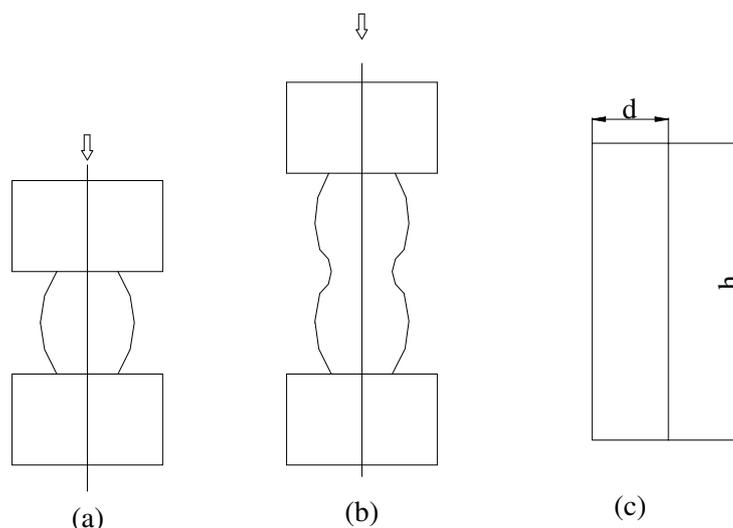


Figura 3.11 – Recalque entre ferramentas planas.

3.3.1.2. Forjamento em Matriz

Neste processo o produto será determinado pela forma da matriz. A peça inicial geralmente é obtida pelo forjamento livre; de acordo com a forma do bloco inicial pode-se estabelecer uma divisão do processo em diversos procedimentos, como forjamento a partir de uma barra, palanquilhas e elementos estampados ⁽²⁾.

O forjamento a partir de uma barra é utilizado predominantemente para peças alongadas, com peso variado de 2 a 3 kg, até um diâmetro de 50 mm. O forjamento em palanquilhas faz-se necessário quando a peça se torna muito grande ou pesada. É utilizada como forma inicial um bloco cisalhado ou serrado da barra. Já o forjamento de elementos estampados é utilizado para produção de pequenas peças delgadas. A forma inicial é estampada a partir de uma tira de chapa praticamente sem perda de material.

Dentre os tipos de forjamento em matriz destaca-se a cunhagem, que é um processo de forjamento a frio mais econômico que a usinagem, na qual se divide em cunhagens simples e maciça. Na cunhagem simples, a espessura da peça permanece praticamente inalterada, ao longo de toda a superfície, antes e após a conformação. Na maciça, a espessura do material é modificada (figura 3.12). O fluxo do material se caracteriza por alargamentos e ascensões. As ferramentas utilizadas na cunhagem são placas planas temperadas, cujo desgaste reduzido dado às pequenas deformações.

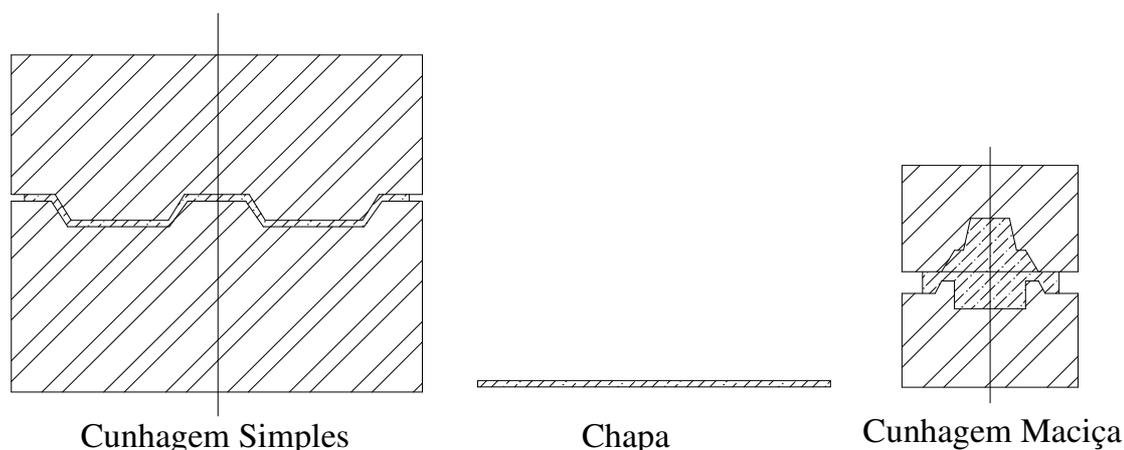


Figura 3.12 – Forjamento em matriz por cunhagem.

Como as peças a cunhar possuem espessuras variáveis, em virtude das inevitáveis tolerâncias de execução, cada peça, praticamente, é recalçada a uma dimensão diferente. Daí resultam, para cada peça, diferentes graus de deformação os quais conduzem a utilização de diferentes forças de conformação. A máxima força requerida para a conformação por cunhagem é obtida, a partir da equação ⁽²⁾:

$$F = k_{cf} \cdot A_p \quad (3.4)$$

onde, F é a força requerida em kg, k_{cf} é a resistência oposta pelo material ao fim da conformação em kg/mm^2 e A_p é a superfície cunhada em mm^2 . Na tabela III.5 são dados alguns valores de k_{cf} .

Tabela III.5 – Valores de $k_{cf}^{(2)}$

Material	Cunhagem simples kg/mm^2	Cunhagem maciça kg/mm^2
Alumínio 99%	5 a 8	8 a 12
Ligas de alumínio	Até 15	até 35
Latão 63	20 a 30	150 a 180
Cobre macio	20 a 30	80 a 100
Cobre duro	30 a 50	100 a 150
Níquel puro	30 a 50	160 a 180
Prata alemã	30 a 40	180 a 220
Aço Ust 12-13	30 a 40	120 a 150
Aço inoxidável 18-8	60 a 80	250 a 320
Prata	-	150 a 180
Ouro	-	120 a 150

3.3.1.3. Material para Confeção de Matrizes

Na conformação em matriz, as elevadas pressões exigidas são supridas pelas matrizes, superior e inferior. As mesmas podem estar submetidas a tensões radiais, tensões de compressão, à solicitação térmica e ao desgaste. Em função do tipo da solicitação resultam os seguintes requisitos sobre o material da matriz:

- alta dureza, tenacidade, resistência à fadiga, alto limite de escoamento e alongamento;

- alta resistência a quente e insensibilidade contra oscilações térmicas de curta duração;
- alta resistência ao desgaste.

Como materiais para matrizes, utilizam-se os aços ligados com um teor de carbono entre 0,3 e 0,55%, com cromo, níquel, vanádio, molibdênio e tungstênio como elementos de liga. Os aços cromo-níquel e cromo-níquel-molibdênio possuem uma elevada tenacidade e são preferidos na conformação de metais leves. Os aços ligados ao tungstênio, pelo contrário, em virtude de sua elevada resistência à quente, são utilizados predominantemente no forjamento do aço em matriz. Maior dureza e resistência à compressão podem ser conseguidas com matrizes com insertos de metal duro.

3.3.2. Ironing

O processo de “ironing” consiste em forçar a passagem de um copo previamente embutido através de um punção por um anel cônico. Como resultado ocorre diminuição da espessura da parede do copo e o aumento do seu comprimento ^(21, 22). O processo pode ser repetido seguidas vezes para que se consiga uma parede bastante fina. Na figura 3.13, onde o processo é apresentado esquematicamente, podem-se observar reduções da espessura inicial (t_0) para a final (t_f) e do diâmetro inicial (d_1) para o final (d_2). Constata-se, também, um aumento no comprimento e na velocidade de saída do material através da matriz cônica de semi-ângulo α sem alteração no diâmetro interno do produto.

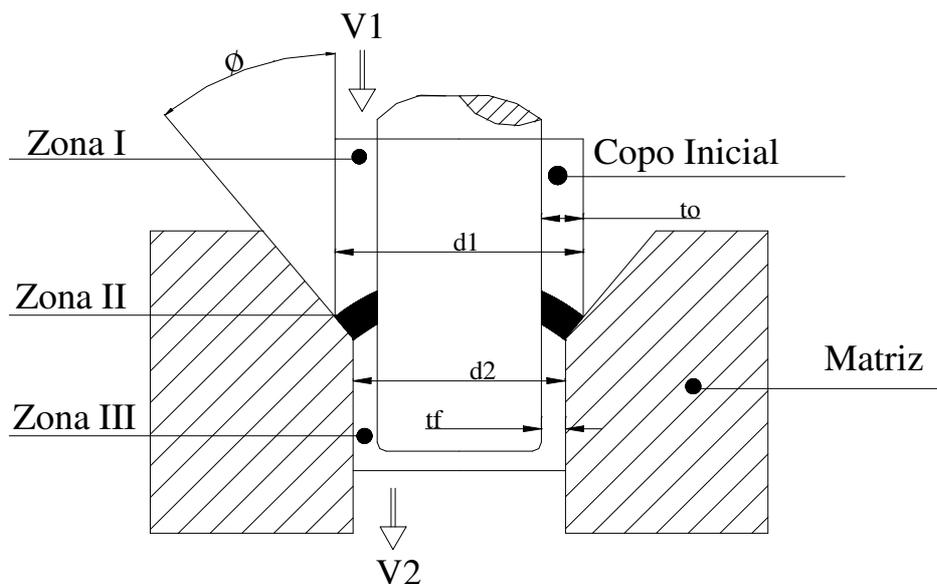


Figura 3.13 – Desenho esquemático do processo de ‘ironing’. ⁽⁷³⁾

O processo de ‘ironing’ pode ser descrito como uma combinação dos processos de estampagem e trefilação ⁽²³⁾. Nesse processo de fabricação uma prensa aplica uma força a um punção que entra empurrando um copo pela cavidade de uma matriz. No entanto, analisando-se um esquema do processo, vê-se que, na realidade, o que a parede do copo está sofrendo assemelha-se muito com o processo de trefilação de tubos com mandril passante (figura 3.14). Nas operações de estampagem tem-se uma mudança pouco significativa de espessura da chapa original para o produto. No ‘ironing’ entretanto, a espessura da parede pode ser reduzida entre 25 e 70% ⁽²⁴⁾. Na operação de ‘ironing’, o fundo do copo não é tensionado. O transporte do material do copo pelo anel de ‘ironing’, se dá principalmente pelo atrito entre o punção e o copo. A literatura apresenta resultados que indicam que somente o atrito existente na zona II é responsável pela quase totalidade da carga do processo ⁽²⁵⁾.

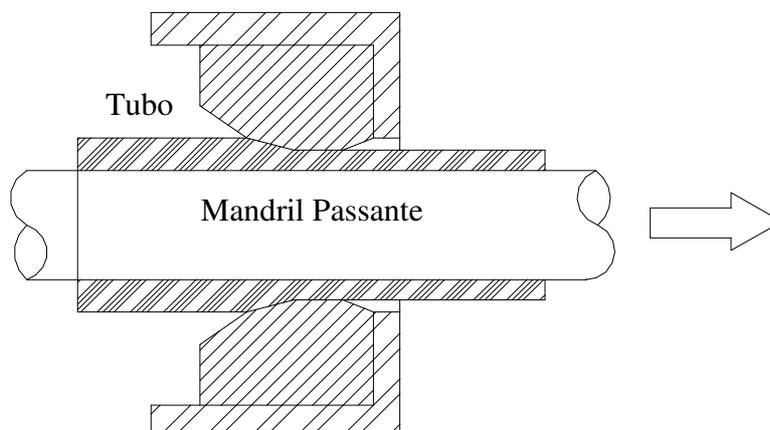


Figura 3.14 – Desenho esquemático da trefilação de tubos com mandril passante. ⁽⁷³⁾

Nos dias atuais, o método de conformação por embutimento seguido de ‘ironing’ é o principal processo utilizado na fabricação de latas, (figura 3.15). É possível obter uma produção de mais de 800 latas por hora, ou uma velocidade relativa entre o copo e o anel de até 10m/s ^(26, 27). Porém, vários outros tipos de produtos podem ser obtidos por ‘ironing’: instrumentos médicos, componentes eletro-eletrônicos, películas eletro-óticas, discos magnéticos, películas fotossensíveis, vasos de pressão, extintores de incêndio, e peças de painéis de automóveis ^(28, 29). Em função das características do processo de ‘ironing’, pode se vislumbrar várias outras aplicações para este processo, onde a profundidade deve ser elevada, o acabamento superficial muito bom e a espessura da parede muito reduzida.

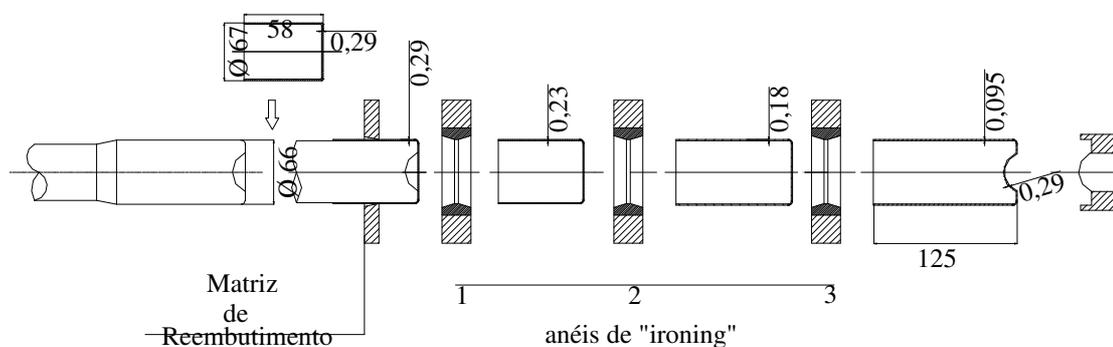


Figura 3.15 – Ilustração do processo de embutimento e ‘ironing’. ⁽⁷³⁾

No desenvolvimento de uma variação do processo de ‘ironing’, realizada através da substituição do punção metálico por um punção de borracha observou se que ⁽³⁰⁾:

- 1- O processo de ‘ironing’, com punção de borracha é praticamente viável para materiais não-ferrosos e com espessura variando entre 2 e 4 mm.
- 2- O aumento do atrito entre o punção e o copo no processo de ‘ironing’, diminui a tensão na parede do copo e facilita a conformação com grandes reduções de área.
- 3- A dureza do punção de borracha influencia muito no processo.
- 4- Teoricamente e no experimento, o ângulo ótimo para o anel de ‘ironing’ foi de aproximadamente 12°.
- 5- O processo pode ser combinado com uma operação de bojamento.

O uso diferenciado do processo de ‘ironing’ mostrou se bastante promissor na associação bojamento – ‘ironing’, pois através do bojamento no final do processo pode-se conseguir peças não cilíndricas ou, até mesmo, peças assimétricas. A figura 3.16 apresenta um esquema do ‘ironing’ com punção de borracha seguido de bojamento.

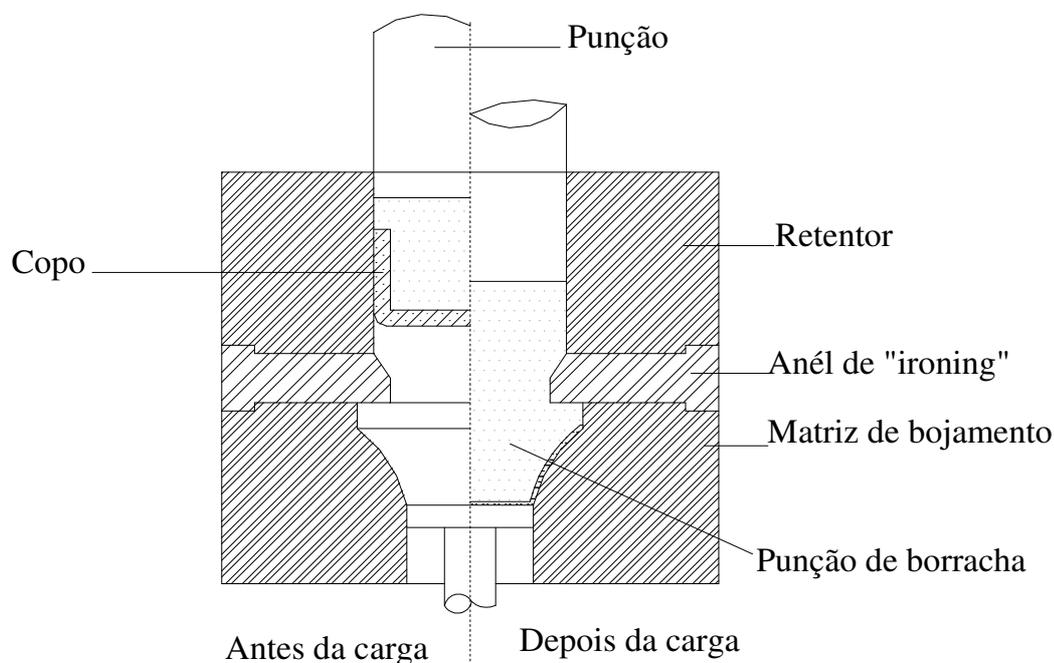


Figura 3.16 – Ilustração do processo de ‘ironing’ seguido de bojamento através de punção de borracha. ⁽⁷³⁾

O processo de “ironing” tem sido modelado por vários pesquisadores. De modo geral os modelos avaliam a carga na conformação, o coeficiente de atrito e a razão de redução no processo. As propriedades mecânicas, o controle dimensional e o acabamento superficial da peça pronta não são estudados. Um modelo analítico para o processo, utilizando o método dos blocos, apresentou uma faixa para o ângulo ótimo de anel de “ironing” que vai de 12 a 20° ⁽³¹⁾. Outros pesquisadores também modelaram, com relativo sucesso, o processo de “ironing”, utilizando pacotes comerciais de programas de elementos finitos, como o programa DEFORM de origem norte americana ^(23 - 26), e o PLAST2, de origem européia ⁽²⁶⁾. Ambas modelagens foram feitas considerando o “ironing” envolvendo deformações no estado plano. Os resultados obtidos pelos dois grupos de pesquisadores foram satisfatórios, porém, não citam o ângulo de anel utilizado. Os estudiosos são unânimes em relatar que o atrito elevado entre o punção e o copo é essencial para o sucesso do processo e para o bom acabamento superficial, que um baixo atrito entre o copo e o anel de “ironing” reduz a carga no processo e melhora o acabamento superficial da peça pronta. Outras conclusões importantes são que, no “ironing”, podem ser atingidas altíssimas reduções de parede, que a afinidade entre o metal do copo e do anel de “ironing” deve ser evitada e que podem ser conseguidas peças não cilíndricas e assimétricas pelo processo de “ironing” seguido de bojamento.

3.4. Modelagem dos Processos de Conformação Mecânica

Os principais métodos de análise de processos de Conformação Plástica são os métodos dos blocos, das linhas de escorregamento, do limite superior e dos elementos finitos.

O método dos blocos (1933) e o método das linhas de escorregamento (1953) baseiam-se em hipóteses simplificadoras que, embora sejam indispensáveis ao tratamento matemático, lhes restringem a aplicabilidade a formas geométricas e condições operatórias relativamente simples.

As primeiras aplicações do método do limite superior à análise de processos de conformação plástica foram efetuadas por Kudo ^(32, 33), Halling e Mitchell ⁽³⁴⁾ e por Avitzur ⁽³⁵⁾ no âmbito de estudos teórico-experimentais relacionados com forjamento, extrusão e laminação.

Os primeiros programas de computador, destinados à simulação numérica de processos de conformação plástica foram desenvolvidos no início da década de 70, e se baseavam na aplicação do método do limite superior. Este esforço de informatização estimulou o aperfeiçoamento de algumas das técnicas que ainda hoje se utilizam na construção e otimização de campos de velocidade cinematicamente admissíveis ^(36 – 40).

Embora no início da década de 80 se tenha assistido à substituição do método do limite superior pelo método dos elementos finitos, enquanto técnica principal de análise de processos de conformação plástica, a utilização do método do limite superior ainda apresenta algumas vantagens das quais se destacam; a capacidade explícita de interpretação dos fenômenos físicos e a necessidade de recursos informáticos limitados.

O desenvolvimento do método dos elementos finitos data do final da década de 50, ligado aos trabalhos de Turner et al ⁽⁴¹⁾, Argyris e Kelsey ⁽⁴²⁾ e Clough ⁽⁴³⁾, o qual introduziu pela primeira vez o termo ‘elemento finito’.

As primeiras aplicações do método foram sobretudo efetuadas na resolução de problemas de análise estrutural, tendo as aplicações no domínio das tecnologias de fabricação sido apenas iniciadas nos anos 60. Os primeiros trabalhos devem-se a Marçal ⁽⁴⁴⁾, Yamada ⁽⁴⁵⁾, Zienkiewicz ⁽⁴⁶⁾, Kobayashi ⁽⁴⁷⁾ e colaboradores, que aplicaram o método dos elementos finitos na resolução de vários problemas elasto-plásticos em deformação plana ou axissimétrica, dos quais se destacam: a indentação, a compressão simples e a extrusão.

Os programas desenvolvidos na década de 60 baseavam-se na formulação sólida para deformações infinitesimais, e eram na sua maioria os resultados da generalização de programas existentes para análise estrutural. Contudo, rapidamente se concluiu que esta formulação não servia para analisar as não-linearidades associadas à geometria e ao material decorrentes das grandes deformações plásticas características dos processos de conformação plástica. Efetivamente, a formulação sólida para deformações infinitesimais apenas permitia simular corretamente as operações de fabricação em que os níveis de deformação e de rotação pudessem ser desprezados.

No início dos anos 70, Lee e Kobayashi ⁽⁴⁸⁾, Cornfield e Johnson ⁽⁴⁹⁾, e Zienkiewicz e Godbole ⁽⁵⁰⁾, desenvolveram uma formulação alternativa, denominada formulação de escoamento plástico (flow formulation), que caracteriza o escoamento dos metais em deformação plástica de forma análoga ao escoamento dos fluidos viscosos incompressíveis. As extensões elásticas são desprezadas, o que é admissível em face das elevadas deformações plásticas que as peças sofrem durante as operações de fabricação por conformação plástica, os materiais são descritos através de leis de comportamento rígido-plásticas/viscoplásticas e as relações entre a tensão e a velocidade de deformação, se baseiam nas equações constitutivas de Levy-Mises.

Esta formulação tem sido aplicada no estudo de processos de conformação plástica em massa bidimensionais e tridimensionais e serve de base a alguns programas comerciais (DEFORM 2D (3D), FORGE 2 (3), QFORM e FINEL).

A extensão da formulação rígido-plástica a problemas de conformação plástica de chapa foi iniciada no final da década de 70^(51 - 54). A polêmica em torno desta extensão tem originado inúmeras discussões, na medida em que a simplificação decorrente do fato da componente elástica da deformação ser desprezada implicar alterações na geometria final da chapa e conseqüentemente nas tensões residuais associadas^(55, 56).

Hibbit, Marçal e Rice⁽⁵⁷⁾ introduziram em 1970 a primeira formulação sólida de elementos finitos aplicada a grandes deformações elasto-plásticas/viscoplásticas. Esta formulação foi designada de formulação Lagrangiana total e caracteriza-se por descrever a deformação do material relativamente ao estado inicial não deformado. As aplicações da formulação sólida à simulação numérica de processos de conformação plástica são, na sua maioria, baseadas na formulação Lagrangiana atualizada a qual utiliza o estado deformado como estado de referência⁽⁵⁸⁾. A aplicação desta formulação aos processos de conformação plástica vem referenciada em inúmeros trabalhos publicados na literatura da especialidade e está na base de alguns programas comerciais de elementos finitos (ABAQUS implicit, MARC).

Trabalhos de simulação computacional de processos de conformação plástica baseados na utilização de formulações dinâmicas^(59, 60) têm sido apresentados, contudo, ainda existem muitos problemas numéricos por resolver, dos quais se destacam: a necessidade de se utilizarem incrementos de tempo excessivamente baixos (da ordem dos 10^{-6} segundos) e a possibilidade de se obterem soluções fisicamente impossíveis. Este último problema é conseqüência direta dos processos de conformação plástica não serem, na sua essência, processos dinâmicos. DYNA3D, PAMStamp e ABAQUS explicit são exemplos de programas comerciais que se baseiam em formulações dinâmicas.

Esta nota histórica relativa ao desenvolvimento do método dos elementos finitos aplicados à simulação de processos de conformação plástica, não poderia terminar sem uma referência aos avanços que, ao longo das últimas duas décadas se registraram, ao nível dos geradores automáticos de malha, dos procedimentos para regeneração adaptativa, dos algoritmos de contato, dos acoplamentos termo-mecânicos, dos modelos de atrito, dos critérios de conformabilidade e das técnicas de animação computacional,

sem os quais não teria sido possível desenvolver os sofisticados programas de modelagem computacional que se dispõem na atualidade.

Para finalizar o enquadramento histórico relativo ao método dos elementos finitos, deve fazer uma referência especial ao trabalho desenvolvido por Brännberg e Mackerle ⁽⁶¹⁾ que entre 1988 e 1994 identificaram mais de 1100 publicações relacionadas com a aplicação do método dos elementos finitos a processos de fabricação e, em particular, a processos de conformação plástica.

A utilização de técnicas experimentais para a análise de processos de conformação plástica é um assunto muito vasto que se perde na memória dos tempos. Conseqüentemente, torna-se pouco razoável, senão mesmo impossível, proceder a um enquadramento histórico em moldes semelhantes ao que foi efetuado para os métodos teóricos.

Os desenvolvimentos que se têm vindo a registrar nos equipamentos e nos procedimentos utilizados nos ensaios de caracterização mecânica, de atrito e de conformabilidade, bem como os avanços conseguidos ao nível dos sistemas de aquisição e tratamento de dados e, ainda, as melhorias verificadas no controle e comando das máquinas ferramenta, permitem que as atuais condições de realização de trabalho experimental sejam muito diversas das que se verificavam nas décadas de 60 e 70.

Em face do exposto, adotou-se para critério de enquadramento histórico, o de apenas incluir as principais técnicas relacionadas com a determinação experimental das variáveis de campo, indispensáveis à compreensão da mecânica do material em deformação plástica e, conseqüentemente, ao suporte e à validação dos métodos de análise teóricos.

De entre estas técnicas experimentais merece destaque especial o método da visioelasticidade, desenvolvido na década de 60 por Thomsen, Shabaik e colaboradores ^(62 - 64). Este método permite a determinação dos campos de velocidade, velocidade de

deformação, extensão e tensão a partir da análise experimental do escoamento do material, sendo muito utilizado no estudo de processos de conformação em massa. O escoamento do material é caracterizado através da marcação de grelhas de círculos ou de quadrados e da respectiva medição antes e após deformação plástica. O método apresenta como principal desvantagem o fato de estar limitado a processos de fabrico para os quais seja possível seccionar a pré-forma por um ou mais planos de simetria.

O método da visioplasticidade foi sofrendo diversos melhoramentos ao longo das décadas de 70 e 80. Um destes melhoramentos deve-se ao trabalho de Barata Marques ⁽⁴⁰⁾ que ao propor a utilização direta das linhas de corrente do material após deformação, simplificou consideravelmente não só o procedimento de leitura, como também a análise e o tratamento dos resultados. A combinação deste procedimento com a utilização de funções potenciais sugerida por Steck ⁽⁶⁵⁾, possibilitou o desenvolvimento de um método robusto, para a determinação experimental do campo de tensões sob condições de deformação plana ou axissimétrica.

A utilização de grelhas de círculos ou de quadrados está igualmente na base da determinação experimental das trajetórias de deformação e do estabelecimento das curvas limite de estampagem para os processos de deformação de chapa. A noção de curva limite de estampagem foi introduzida no decorrer da década de 60 ^(66, 67), e tem-se revelado um instrumento muito importante para a análise da conformabilidade dos processos de conformação de chapa.

A modelagem física de processos de conformação plástica com plasticinas ou ceras foi introduzida no final da década de 50 ⁽⁶⁸⁾. Esta técnica experimental é uma variante do método da visioplasticidade para a determinação da distribuição das principais variáveis de campo na região em deformação plástica. A utilização de plasticinas ou ceras faz-se geralmente através de dois procedimentos experimentais distintos; um baseia-se na marcação e medição de grelhas de círculos ou de quadrados em corpos de prova monocromáticos, enquanto que o outro recorre à utilização de corpos de prova policromáticos (habitualmente com duas cores) ⁽⁶⁹⁾. O primeiro procedimento é na sua essência semelhante ao que se utiliza no método da visioplasticidade, tendo, portanto

um limite de aplicabilidade análogo, ou seja, restringe-se a processos de fabricação onde é possível seccionar o corpo de prova por um ou mais planos de simetria. O segundo procedimento, embora tenha uma execução experimental mais complexa, possui um domínio de aplicabilidade mais amplo, na medida em que não exige que o corpo de prova seja previamente seccionado.

Embora a modelagem física com plasticinas ou ceras ofereça a possibilidade dos punções e matrizes poderem ser construídos em materiais poliméricos, tirando partido das modernas tecnologias de prototipagem rápida, subsistem ainda alguns problemas que resultam da ausência de similaridade completa entre os materiais metálicos e as plasticinas ou as ceras utilizadas na modelagem física. Merecem destaque, entre outras, as dificuldades que habitualmente se verificam na reprodução do encruamento dos materiais metálicos, na modelagem das condições tribológicas e na caracterização dos limites de conformabilidade⁽⁷⁰⁾.

O recurso a técnicas experimentais indiretas baseadas em ensaios de microdureza estão limitadas aos casos em que apenas se pretende determinar as distribuições de deformação e tensão efetiva⁽⁷¹⁾. Além desta limitação, a técnica exige um procedimento experimental cuidando-se para evitar alterações mecânicas e metalúrgicas na superfície (ou corte) a analisar.

A análise microestrutural, em nível de microscopia eletrônica de transmissão, foi iniciada na Inglaterra em torno de 1950, tendo passado por progressos notáveis, particularmente em termos dos equipamentos disponíveis. A análise de fenômenos ligados à deformação plástica através desta técnica envolve a observação de deslocações e sua distribuição espacial. Dado ao fantástico número desse tipo de defeitos cristalinos em metais deformados, e à natureza estatística de sua distribuição espacial, tem se revelado particularmente difícil o estabelecimento de “pontes” entre esta abordagem e aquela onde a conformação mecânica considera o material como um contínuo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Avaliou-se a possibilidade de substituição das etapas de usinagem por conformação a frio na fabricação das pontas intercambiáveis para a solda a ponto. Para isto, foram estabelecidas as etapas de conformação através de modelagem, utilizando o programa de elementos finitos comercial Deform-2D, cujos resultados foram validados experimentalmente.

O material utilizado para confecção das pontas intercambiáveis por conformação a frio foi o comumente empregado no mercado: a liga de cobre-cromo na forma de barras trefiladas de diâmetro 0,016m e comprimento de 3m.

Para o estabelecimento das etapas do processo de fabricação da ponta intercambiável conjugaram-se atividades de simulações numéricas e experimentos, de modo a otimizar o processo de construção das matrizes a serem utilizadas. Essas atividades e suas interações são descritas a seguir e podem ser visualizadas no fluxograma da figura 4.1.

4.1. Etapa preparatória

Nesta etapa caracterizou-se o material (liga de Cu-Cr), realizou-se o corte do tarugo inicial, o pré-projeto inicial das etapas de conformação da ponta intercambiável e obteve-se a curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira do material.

4.1.1. Caracterização do Material

A partir de limalhas do material utilizado nos experimentos, foi feita a determinação da composição química através de análise por espectrometria de absorção atômica no Laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais.

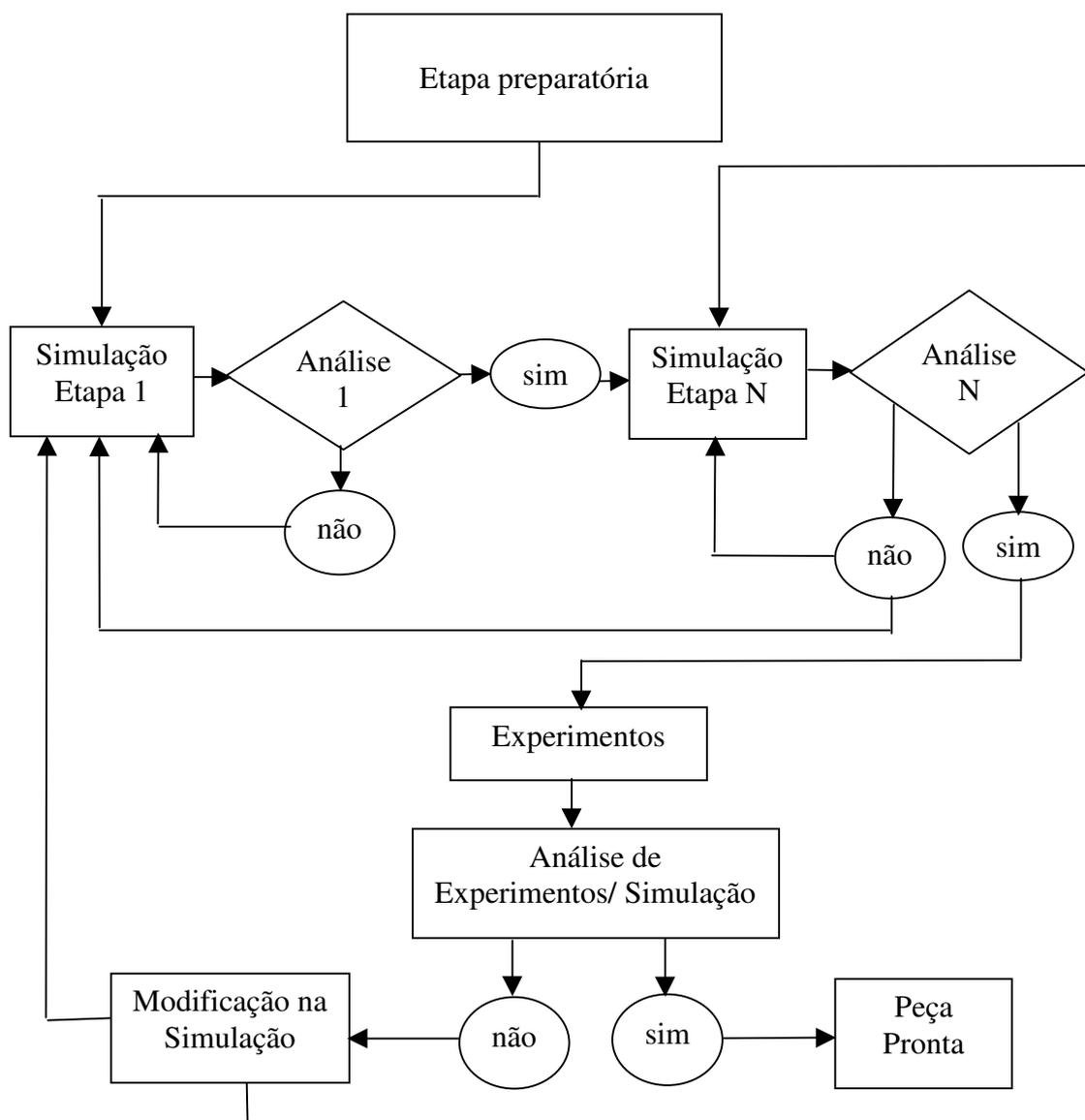


Figura 4.1 – Fluxograma esquemático dos métodos utilizados no trabalho.

4.1.2. Corte do Tarugo Inicial

Para o corte do tarugo inicial, primeiramente foram definidas a forma e as dimensões da ponta intercambiável desejada, conforme figura 4.2.

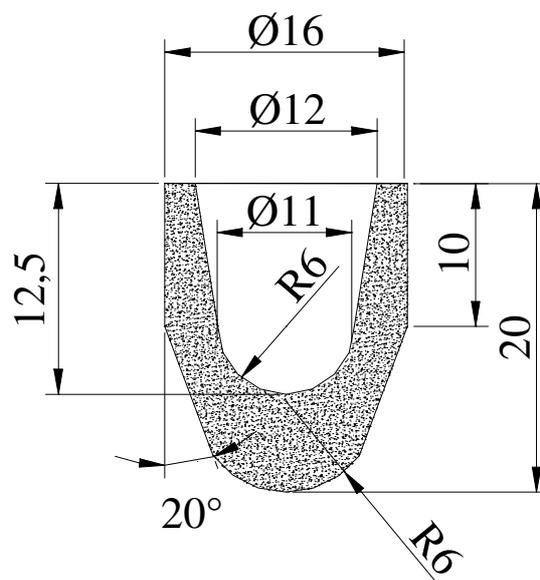


Figura 4.2 – Forma e dimensões da ponta intercambiável.

Os valores descritos na figura 4.2 permitiram calcular o volume do tarugo inicial considerando a densidade e a massa da ponta modelo, depois que a mesma foi obtida através do processo convencional de usinagem. O corte do tarugo a partir da barra trefilada, foi por cisalhamento através de estampo de corte.

4.1.3. Pré- Projeto

O pré-projeto consistiu em se determinar uma seqüência de etapas de deformação a frio para se obter a ponta intercambiável. A seqüência estabelecida foi o ponto de partida para a simulação no programa de elementos finitos. A partir do tarugo inicial (figura 4.3a) analisou-se a melhor seqüência para se obter a ponta intercambiável através de desenhos esquemáticos das etapas que foram necessárias, sendo os mesmos utilizados como referência para posterior desenho no programa Deform 2D. A princípio pensou-se ser necessário duas etapas para a obtenção da ponta intercambiável por conformação a frio. A figura 4.3 apresenta o desenho inicial das etapas consideradas necessárias para a confecção da ponta.

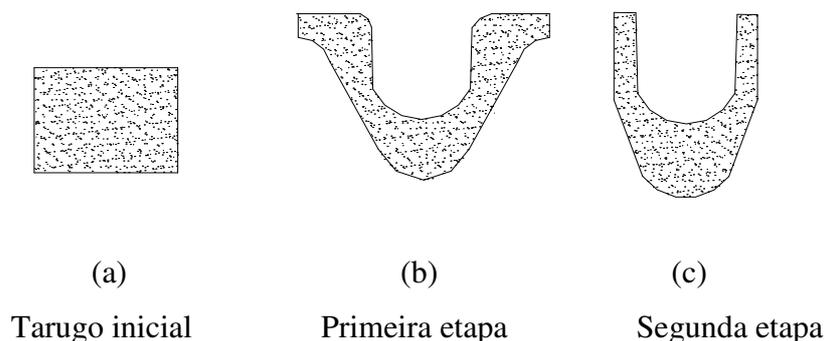


Figura 4.3 – Desenho inicial para obter a ponta intercambiável.

4.1.4. Curva Tensão Verdadeira Versus Deformação Verdadeira

Para a realização das simulações numéricas é necessário o conhecimento da curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira do material, sendo essa utilizada como referência do comportamento mecânico do material na simulação numérica. A curva foi obtida por ensaio de tração em cinco corpos de prova usinados no material a ser utilizado, de acordo com a norma NBR 6152 ⁽⁷²⁾. Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios INSTRON 5582 modelo EX 26300-100 no Laboratório de Ensaio Especial do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Universidade Federal de Minas Gerais. Com os dados de tensão e deformação obtidos no ensaio determinou-se a curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material.

4.2. Simulações Numéricas

Para a simulação numérica do processo de conformação da ponta intercambiável, utilizou-se o método de elementos finitos. O programa utilizado foi o código numérico Deform 2D, pertencente ao Laboratório de Engenharia do Produto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais.

O programa Deform 2D é formado por três módulos: o pré-processador, processador e pós-processador. O primeiro e o terceiro módulo encontram-se em um único ambiente gráfico e se destinam à entrada de dados e à leitura dos resultados, enquanto que o processador é o módulo encarregado das soluções das equações.

Para a realização das simulações, tanto a matriz como o material em estudo são divididos em pequenos elementos, formando uma malha que será deformada quando um esforço é aplicado.

Primeiramente todas as etapas das simulações foram simuladas com o material (liga Cu-Cr) no regime plástico e as matrizes no estado rígido. Durante a simulação da primeira etapa do pré-projeto inicial, utilizaram-se às malhas com 500, 700 e 1000 elementos, com objetivo de comparar os resultados obtidos e decidir qual malha seria usada. Como os resultados obtidos foram bem próximos, adotou-se a malha com 1000 elementos para todas as etapas a serem simuladas. Utilizou-se a simulação no regime elástico com o objetivo verificar a tensão imposta sobre as matrizes; para isto interpolaram-se os valores de carga atuante sobre o material a partir do penúltimo passo da simulação no estado rígido, seguido de geração de malha na matriz superior e inferior. O motivo de tal procedimento é justificado pelo elevado tempo dispendido em cada passo nas simulações no regime elástico.

Para utilização do programa é necessário definir um pré-projeto (seção 4.1.3), obter a curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira (seção 4.1.4), e as condições de contorno.

As condições de contorno tais como: velocidade, tempo em cada passo e temperatura utilizadas nas simulações foram tomadas em função do equipamento com o qual se validaram os resultados simulados. A tabela IV.1 apresenta os dados do equipamento utilizado.

A velocidade foi obtida através da compressão de um tarugo de cobre com diâmetro de 16mm e altura inicial de 20mm sendo este comprimido até a altura final de 10mm.

Através da variação da altura e o tempo gasto nesta compressão, determinou-se a velocidade média do embolo. O valor encontrado e utilizado em toda a simulação foi de 5mm/segundo.

Tabela IV.1 – Dados do equipamento

Prensa Hidráulica de Simples Efeito		
Marca	SIWA	–
Modelo	S 100	–
Capacidades	Carga máxima	100tons
	Curso máximo	400mm
	Diâmetro do cilindro	250mm
	Pressão máxima da bomba	200bar
Dados técnicos do Motor	Potência	5CV
	Rotação	1750 rpm
	Tensão	220V
	Frequência	60Hz

Cada etapa simulada foi realizada em 100 passos. O deslocamento necessário para se obter a forma desejada em cada etapa foi determinado no pré-projeto inicial. Após dividir-se o deslocamento em cem partes iguais obtém-se o deslocamento em cada passo. O tempo em cada passo foi obtido através da divisão do deslocamento de cada passo pela velocidade.

Para a temperatura adotou-se como condição de contorno o valor da temperatura ambiente, em todas as etapas da simulação.

A princípio a intenção foi de se obter a ponta intercambiável sem uso de lubrificante. Para isto procurou-se na literatura um coeficiente de atrito adequado a esta situação. Devido ao fato de não se ter encontrado um valor para o caso em estudo, adotou-se o coeficiente de atrito ⁽¹⁶⁾ que mais se aproximou para a situação, que foi aquele para trabalho a frio sem o uso de lubrificante; seu valor é de 0,1 para o processo de laminação.

Após cada etapa simulada, foram retirados os resultados de preenchimento, da carga necessária, a tensão imposta na matriz e o dano provável no material. O critério de dano utilizado foi o critério Cockroft & Latham Normalizado ⁽¹⁸⁾, o qual obtêm o dano através da tensão efetiva analisando as possíveis regiões de fratura durante a conformação mecânica. Esses resultados proporcionaram a melhor seqüência a ser avaliada na etapa experimental.

4.2.1. Simulação do pré-projeto inicial

4.2.1.1. Simulação da primeira etapa do pré- projeto inicial

A primeira etapa do pré-projeto inicial foi redesenhada no programa Deform onde foram utilizadas as condições de contorno apresentadas na tabela IV.2.

Tabela IV.2 – Condições de Contorno

Passos	Temperatura	Velocidade	Cf.atrito	Nº elementos da malha
100	20°C	5mm/s	0.1	500 – 700 -1000

Ao término da simulação, verificou-se que os resultados de preenchimento da matriz, carga para deformação, dano no material e tensão na matriz foram satisfatórios para serem executados com os equipamentos disponíveis para a validação experimental, o que conduziu a simulação da segunda etapa, conforme determinado no fluxograma mostrado na figura 4.1.

4.2.1.2 Simulação da segunda etapa do pré- projeto inicial

O desenho executado no programa Deform para a segunda etapa iniciou-se após o último passo da primeira etapa simulada. As condições de contorno utilizadas nesta etapa foram às mesmas apresentadas na tabela IV.2. O resultado indicou ruptura do material.

4.3. Validação Experimental Pré-Projeto Inicial

4.3.1. Validação Experimental do Corte do Tarugo Inicial

Para a validação do modelo primeiramente foi construído um estampo de corte para a 1ª operação com a finalidade de se obter um tarugo com ϕ 16mm e comprimento de 10mm a partir de uma barra trefilada de ϕ 16 mm. A máxima força requerida para o corte por cisalhamento foi obtida, a partir da equação:

$$F_e = P * R_e * e \quad (4.1)$$

onde, F_e é a força requerida em kgf, P é perímetro da área de corte em mm, R_e é resistência ao cisalhamento do material em kgf/mm², cujo valor encontrado foi de 20Kgf/mm² e (e) a espessura do material. Os resultados obtidos nesta etapa indicaram que não se obtém formas perfeitamente cilíndricas no corte.

4.3.2. Validação Experimental da primeira Etapa do Pré-Projeto Inicial

A validação da primeira etapa do pré-projeto inicial foi realizada em uma prensa hidráulica de simples efeito com capacidade de 100 toneladas onde foram mantidas as condições de contorno, tais como velocidades e temperatura. Para esta etapa usou-se o tarugo inicial usinado devido às correções do corte inicial ainda não terem sido realizadas. O resultado obtido referente à carga não se aproximou ao valor encontrado na simulação. Quanto ao formato desejado para essa etapa o resultado obtido foi igual ao obtido na simulação (ver item 4.2.1.1); desta forma, realizou-se a validação experimental da segunda etapa.

4.3.3. Validação Experimental da Segunda Etapa do Pré-Projeto Inicial

A validação experimental da segunda etapa do pré-projeto inicial foi realizada na mesma prensa e nas mesmas condições imposta para a primeira etapa. Porém, nessa

etapa ocorreu o rompimento do material como previsto na simulação (ver item 4.2.11). Tal resultado levou a suspeitar do ângulo de entrada do material na matriz inferior e do volume de material a ser deformado em duas operações. Diante do rompimento do material na segunda etapa retornou-se à etapa de simulação para efetuar-se uma modificação no ângulo de entrada do material na matriz inferior da segunda etapa do primeiro pré-projeto. Tal modificação foi realizada com o objetivo de melhorar o escoamento do material para dentro da matriz.

4.4. Simulação da Modificação da Segunda Etapa do Primeiro Pré-Projeto

O desenho da segunda etapa do projeto inicial foi modificado no programa Deform e submetido às mesmas condições de contorno e geração de malha. Após a nova simulação verificou-se que continuou a ocorrer o rompimento do material. Devido a necessidade de calibração do tarugo inicial e a ruptura do material na segunda etapa optou-se por mudar o pré-projeto inicial.

4.5. Segundo Pré-Projeto

A primeira modificação realizada foi a introdução de uma etapa de calibração do tarugo inicial; isso permitiu padronizar os tarugos, proporcionando com isso uma perfeita centragem para a segunda etapa. O desenho inicial das etapas de deformação do material é apresentado na figura 4.4. Procurou-se aproximar gradativamente a forma do material de etapa para etapa até a forma final. Para isso, fez-se necessário reduzir o volume de material que escoava para dentro da cavidade da matriz em cada etapa. Isso levou ao acréscimo do número de etapas para se obter a ponta em sua forma final, sendo essa obtida através do processo de “ironing” onde se conseguem taxas de reduções da ordem de 20 a 70%⁽²⁴⁾. As etapas anteriores ao processo de ironing foram desenvolvidas para se obter o produto em sua forma parcial com facilidade de extração do produto em cada etapa. Acreditava-se que, com este segundo pré-projeto, poderia ser eliminada a ruptura do produto observada no primeiro pré-projeto.

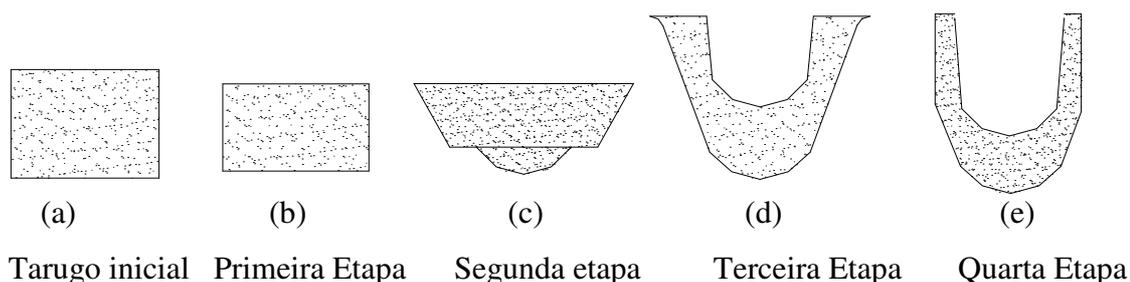


Figura 4.4 – Figura Inicial do Segundo Pré-Projeto.

4.5.1. Simulação do Segundo Pré-Projeto

A simulação numérica das etapas do segundo pré-projeto iniciou-se com o desenho das novas etapas no programa Deform. Manteve-se para o segundo pré-projeto o mesmo número de passos (cem) utilizados no primeiro pré-projeto simulado. Quanto ao número de elementos de malha, utilizou-se o mesmo procedimento anterior. O coeficiente de atrito utilizado foi mantido no valor de 0.1. As condições de contorno tais como velocidade e temperatura também foram mantidas. A condição de contorno ‘tempo (tp)’, variou de etapa para etapa e foi definida de acordo com a equação abaixo.

$$t_p = \frac{\frac{D_{tp}}{100}}{V_p} \quad (4.2)$$

onde D_{tp} é o deslocamento total do punção em (mm), V_p é a velocidade do punção (mm/s) e t_p é o tempo em cada passo em (s).

O deslocamento total do punção em cada etapa foi definido no segundo pré-projeto. A tabela IV.3. apresenta os valores de tempo em cada passo utilizados na simulação.

Tabela IV.3 – Tempo em cada passo simulação do segundo pré-projeto

Tempo em cada passo (s)				
Etapas	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa	4ª Etapa
Nome da Etapa	Calibração	Pré-forma	Forma Cônica	Ironing
Tempo em cada passo (s)	0,004	0,006	0,024	0,025

Os resultados de preenchimento da matriz, dano no material, carga necessária para a deformação e tensão imposta sobre a matriz mostraram-se satisfatórios, permitindo o prosseguimento para a próxima etapa do trabalho, que foi a validação experimental das etapas desenvolvidas e simuladas conforme fluxograma mostrado na figura 4.1.

4.6. Validação Experimental do Segundo Pré-Projeto

De posse dos resultados obtidos em cada simulação iniciou-se a construção dos quatro conjuntos de matrizes, sendo o primeiro para a calibração do tarugo inicial, o segundo para a pré-forma, o terceiro para a forma cônica e o quarto para a etapa de “ironing”. A confecção das matrizes e os testes foram realizados na Brasição Indústria e Comércio Ltda., que disponibilizou todos os equipamentos e ferramentas que se fizeram necessários.

Após o término da fabricação e testes das matrizes, foram confrontados os resultados obtidos em cada etapa por simulações numéricas e experimentais. Mudanças que se fizeram necessárias foram realizadas.

4.7. Construção dos Matrizes

As características do material escolhidas para a fabricação das matrizes foram definidas por intermédio de pesquisa realizada em indústria especializada na área de forjamento e corte, e através de estudo de catálogos dos fabricantes de aços ferramentas. A tabela IV.4 apresenta os materiais utilizados para a confecção das matrizes do segundo pré-projeto, suas respectivas funções nas matrizes e possíveis tratamentos térmicos. A tabela IV.5 apresenta a composição química dos aços ferramentas utilizados para a confecção das matrizes do segundo pré-projeto.

Tabela IV.4 – Relação do Material Utilizado para a confecção das Matrizes

Função	Material	Tratamento Térmico	Máxima Dureza
Base das Matrizes	SAE 1020	–	–
Buchas, Colunas e Placa de Choque	SAE 1045	Têmpera	40 HRC
	Aço Prata	Revenimento	55 HRC
Fêmea e Punções	VC 131	Têmpera	65 HRC
	VND	Revenimento	65 HRC

Tabela IV.5 – Composição Química dos Aços Ferramenta

Composição Química								
Material	Porcentagem							
	% C	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%W	%v	% outros
SAE 1020	0,20	0,45	–	–	–	–	–	–
SAE 1045	0,45	0,75	–	–	–	–	–	–
Aço Prata	0,45	0,30	1,40	–	0,20	2,0	0,20	Si = 1,00
VC 131	2,10	0,30	11,5	–	–	0,70	0,20	–
VND	0,95	1,25	0,50	–	–	0,50	0,12	–

Para as partes principais das matrizes como os punções, as fêmeas e as placas de choque realizou-se o tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento. No teste de dureza realizado nas matrizes inferiores e superiores como também nos punções após o tratamento térmico obteve-se o valor de dureza de 800 Vickers. Com o valor de dureza determinou-se o valor aproximado da tensão de escoamento ⁽⁷³⁾ do material temperado. Como o valor obtido ficou abaixo dos máximos valores obtidos nas simulações, optou-se por alojar a matriz em cada etapa com a finalidade de obter tensões de compressão na matriz. Esse procedimento pode impedir a ruptura da matriz quando essa é solicitada durante a deformação das etapas do segundo pré-projeto. O alojamento da matriz foi efetuado com interferência, no material SAE 1020.

4.8. Teste dos Conjuntos de Matrizes em Prensa

Especial atenção foi dada na construção dos conjuntos de matrizes de modo que fossem adaptados em prensas hidráulica e excêntrica. Inicialmente as matrizes foram adaptadas na prensa hidráulica de simples efeito cujas características foram apresentadas na tabela IV.1. O motivo de tal procedimento foi de obter o valor da carga de deformação e comparar com o valor obtido na simulação numérica. Este valor foi obtido com os dados de pressão e área do cilindro onde se usou a equação .

$$F_d = P_c * A_c \quad (4.3)$$

Onde F_d é a força necessária para a deformação, P_c é a máxima pressão mostrada no visor do manômetro durante o teste e A_c é área do cilindro.

Todas as matrizes, quando colocados em teste na prensa hidráulica de simples efeito, apresentaram o produto com a forma desejada para cada etapa. O teste possibilitou a determinação e comparação das cargas de deformação bem como a seleção das prensas excêntricas. O teste em prensas excêntricas foi realizado com o objetivo de aumentar a velocidade de produção. A tabela IV.6. apresenta as características das prensas excêntricas utilizadas.

Em algumas etapas durante o teste realizado em prensa excêntrica, não ocorreu um completo preenchimento da matriz, porém tal resultado não influenciou no prosseguimento das etapas seguintes.

Tabela IV.6 – Características das prensas excêntricas

Prensas Excêntricas						
Marca	Capacidade	Curso do Martelo	Nº Golpes por minuto	Dimensões da Mesa	Potência	Acionamento
Kaerck	25 tons	70mm	90	(400x500)mm	3CV	Pedal
Calvi	100 tons	130mm	50	(900x730)mm	10HP	Pedal

Na última etapa do segundo pré-projeto (“etapa de ironing”) verificou-se, através de medida e de análise visual, que as dimensões externas e internas do ângulo e do diâmetro da ponta estavam de acordo com a figura 4.2. Porém, a altura final da ponta, (20mm conforme figura 4.2) apresentou variações para maior e menor que 20mm. A primeira providência foi realizar novamente o teste do estampo em uma prensa hidráulica com velocidade de descida do pistão um pouco inferior à prensa excêntrica e superior a prensa hidráulica de simples efeito. A tabela IV.7 apresenta as características desta prensa.

Tabela IV.7 – Característica da Prensa Hidráulica Automática/semi-automática

Marca	Potência Motor	Carga	Diâmetro Do cilindro	Curso do Pistão	Velocidade Do Pistão	Acionamento
Luxor	8(CV)	50ton	220mm	450mm	17mm/s	Botoeira

Como a regulagem do curso desta prensa é realizada por sensores eletrônicos pôde-se regular o curso de trabalho com um maior grau de precisão, o que levou a uma melhor produção de estampo, porém o produto obtido continuou com a altura irregular. Chegou-se à conclusão que tal anomalia poderia ser resolvida acrescentando-se mais uma operação que serviria para uma calibração final. Porém, tal calibração poderia danificar o cone interno da ponta, exigiria a execução de mais uma etapa e conseqüentemente a construção de mais um estampo. Pensou-se em vários caminhos para solucionar o problema, porém todos provocaram uma variação no cone interno e difícil extração da ponta.

Diante dos resultados obtidos até o momento serem satisfatórios, preferiu-se aumentar a altura do tarugo inicial de 10mm para 12mm. O acréscimo proporcionou uma maior medida na altura da ponta. Para se obter a medida da altura total da ponta conforme a figura 4.2, optou-se por realizar um simples faceamento na ponta utilizando o processo convencional de usinagem .

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Dados de Entrada para a Simulação

5.1.1. Composição Química do Material

A tabela V.1 apresenta os elementos encontrados com suas respectivas porcentagens.

Tabela V.1 – Composição Química

Elementos	Pb	Fé	Cr	Ni	P	Al	Mg	Sn	Cu
%	<0.01	0.029	1.02	<0.001	0.028	0.044	0.001	<0.01	Balanço

Os resultados encontrados, principalmente o do cromo (Cr), estão de acordo com os recomendados na literatura ⁽⁸⁾.

5.1.2. Curva Obtida no Ensaio de Tração

A figura 5.1 apresenta a fotografia do corpo de prova de tração antes e após o ensaio e a figura 5.2 apresenta a curva Tensão efetiva x Deformação efetiva obtida.

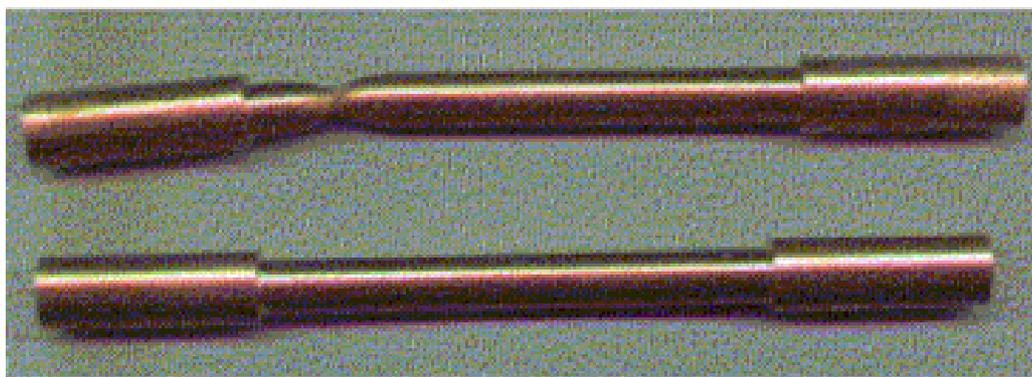


Figura 5.1 – Fotografia do corpo de prova antes e após o ensaio.

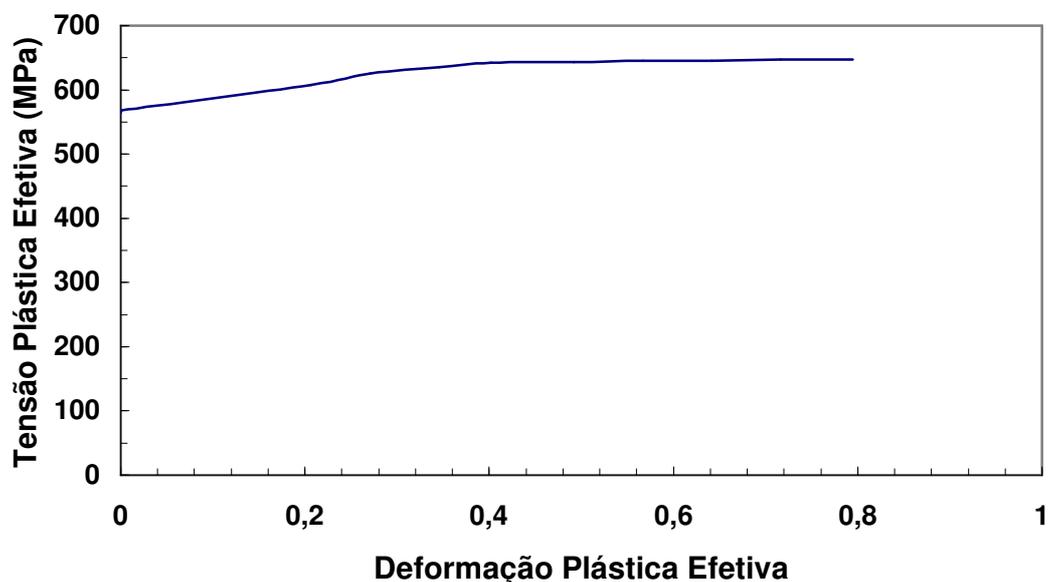


Figura 5.2 – Curva Tensão efetiva x Deformação efetiva plástica para a liga Cu-Cr.

5.1.3. Pré- Projeto Inicial

De acordo com a forma e as dimensões da ponta intercambiável desejada e descrita no item 4.1.3, determinou-se o volume da ponta intercambiável sendo para isto verificado na literatura⁽⁸⁾ a densidade da liga Cu-Cr. A massa foi obtida por intermédio da usinagem pelo método convencional de uma ponta modelo mostrada na figura 4.2, seguido de sua pesagem em balança de precisão. A tabela V.2 apresenta os valores encontrados.

Tabela V.2 – Valores de densidade, massa e volume da liga Cu-Cr

Densidade (g/cm ³)	Massa (g)	Volume (cm ³)
8,93	18,0	2,02

Para um volume de 2,02 cm³, e para uma barra com diâmetro inicial de 16 mm, seria necessário uma altura inicial do tarugo de 10mm, aceitando-se perda nula de material. A

figura 5.3 (a) mostra o tarugo inicial, enquanto a figura 5.3 (b) ilustra o primeiro pré-projeto da primeira etapa. As figuras 5.3 (c) e 5.3(d) mostram as posições inicial e final do punção, respectivamente.

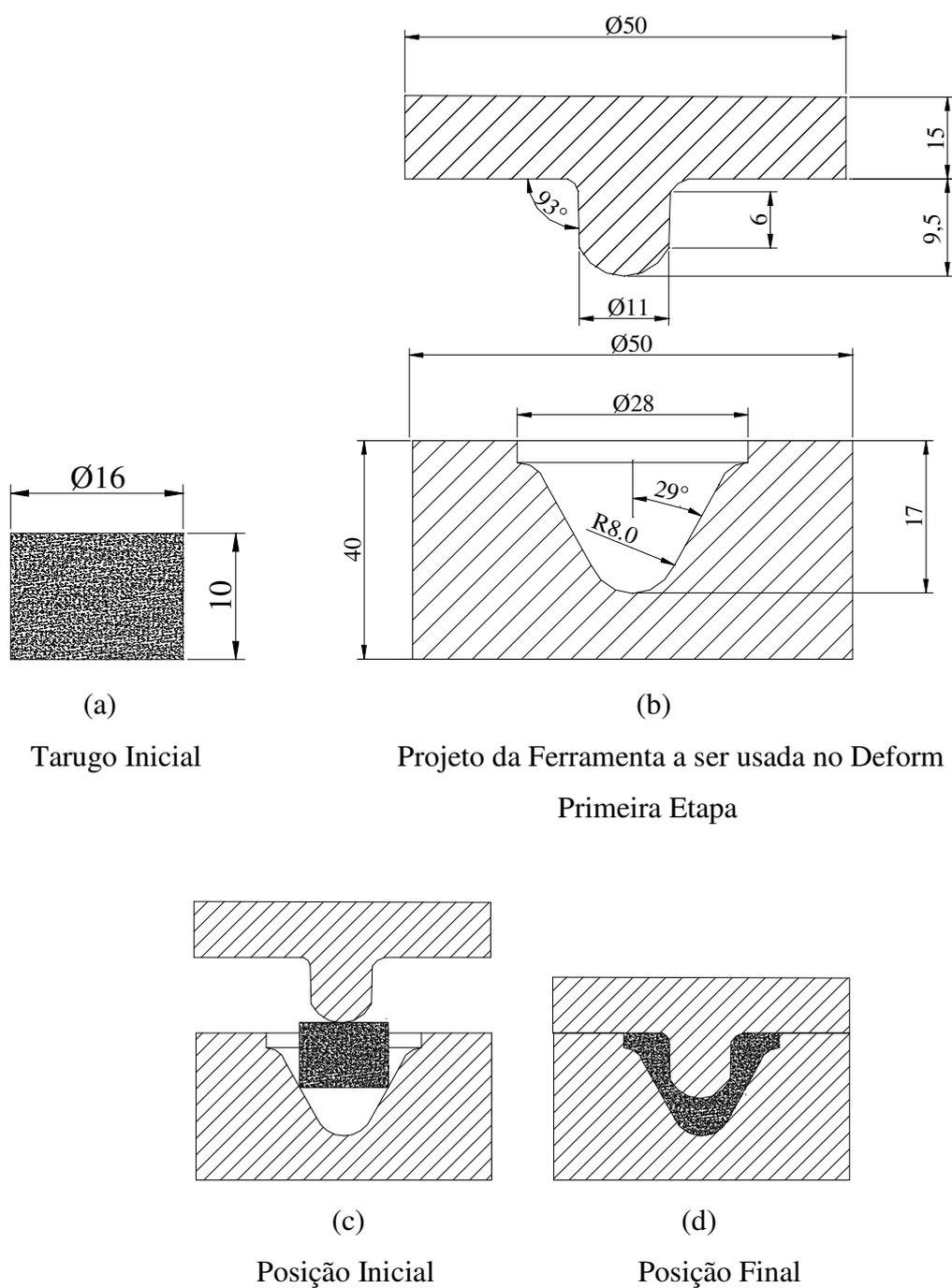


Figura 5.3 – Pré- projeto inicial da primeira etapa.

Na figura 5.4 (a) mostra-se segunda etapa do primeiro pré- projeto a ser utilizado no programa Deform. Na figura 5.4 (b) mostra-se a ferramenta na sua posição inicial juntamente com o formato obtido da posição final da primeira etapa. Na figura 5.4 (c) mostra-se uma previsão do pré-projeto da segunda etapa formando a ponta intercambiável na sua forma final.

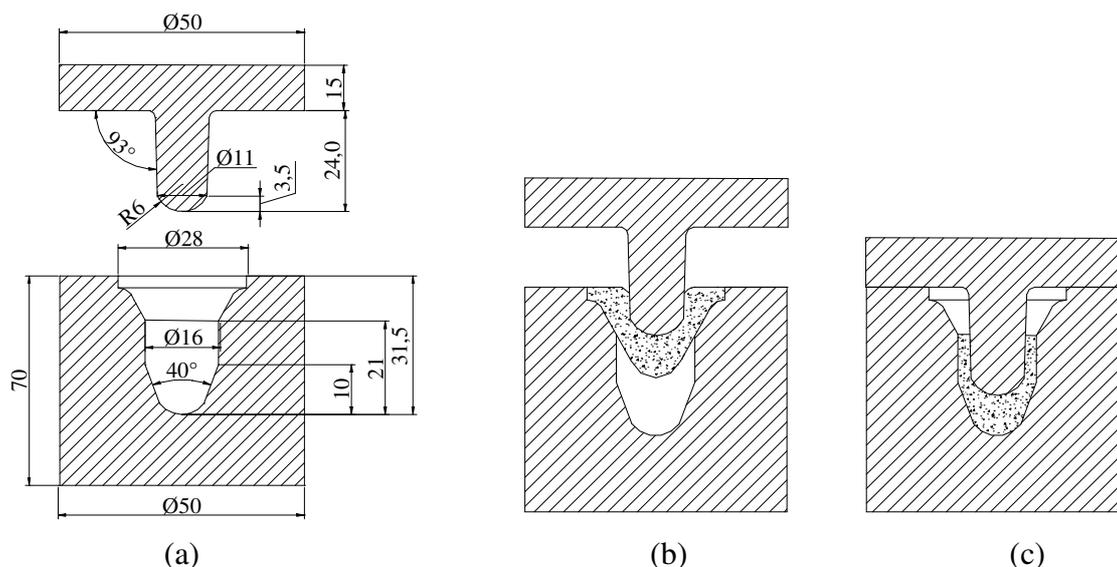
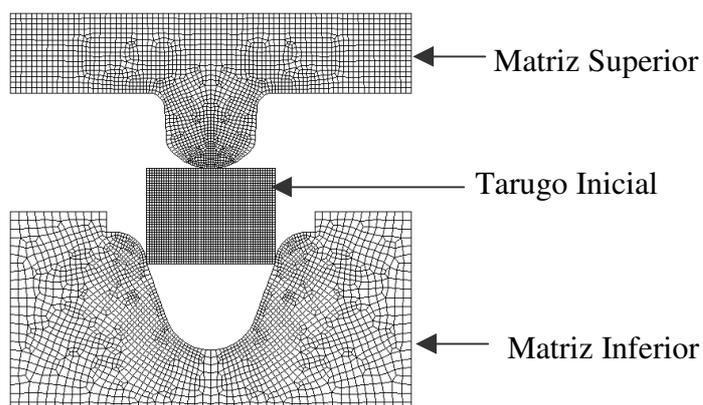


Figura 5.4 – Pré-Projeto Inicial Segunda Etapa.

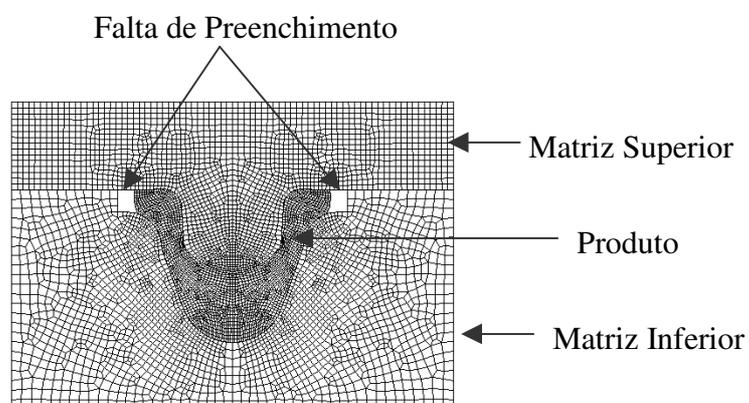
5.2. Resultados da simulação do pré-projeto inicial, 1ª e 2ª etapas

5.2.1 Resultado da Simulação da 1ª Etapa do Pré-Projeto Inicial

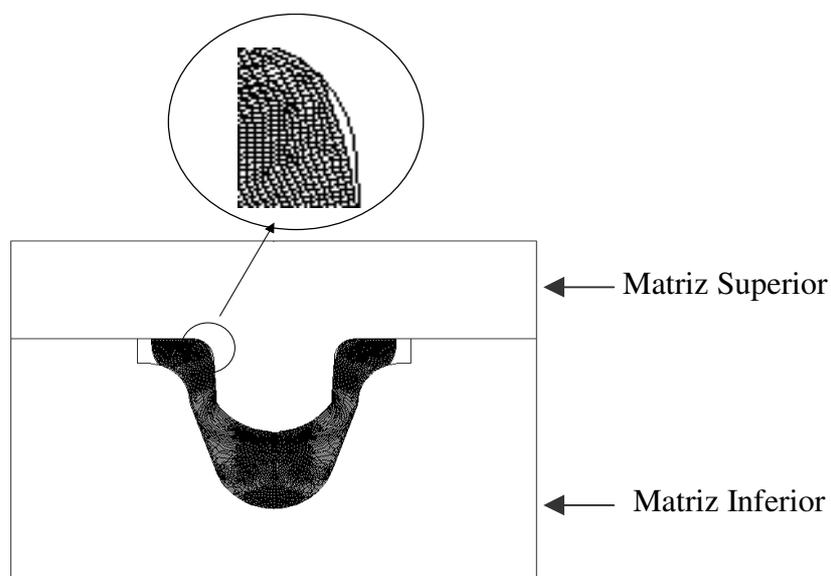
Os desenhos do primeiro pré- projeto foram redesenhados no programa Deform, submetidos às condições de contorno e geração de malha seguida de simulação. Na figura 5.5(a) é apresentado o desenho no Deform antes da simulação; a figura 5.5 (b) mostra o resultado visual do preenchimento da simulação da primeira etapa do pré-projeto inicial. Pela figura 5.5 (c) nota-se a falta de preenchimento em parte do diâmetro de 28mm e na região do punção, o qual não impediu o prosseguimento da simulação. O resultado da falta de preenchimento possibilitou uma melhor extração em torno do diâmetro de 28mm. A figura 5.6 mostra o gráfico Carga x Deslocamento para esta primeira etapa.



(a) Antes da Simulação



(b) Depois da Simulação



(c) Falta de preenchimento

Figura 5.5 – Preenchimento da matriz na simulação da 1ª etapa do pré-projeto inicial.

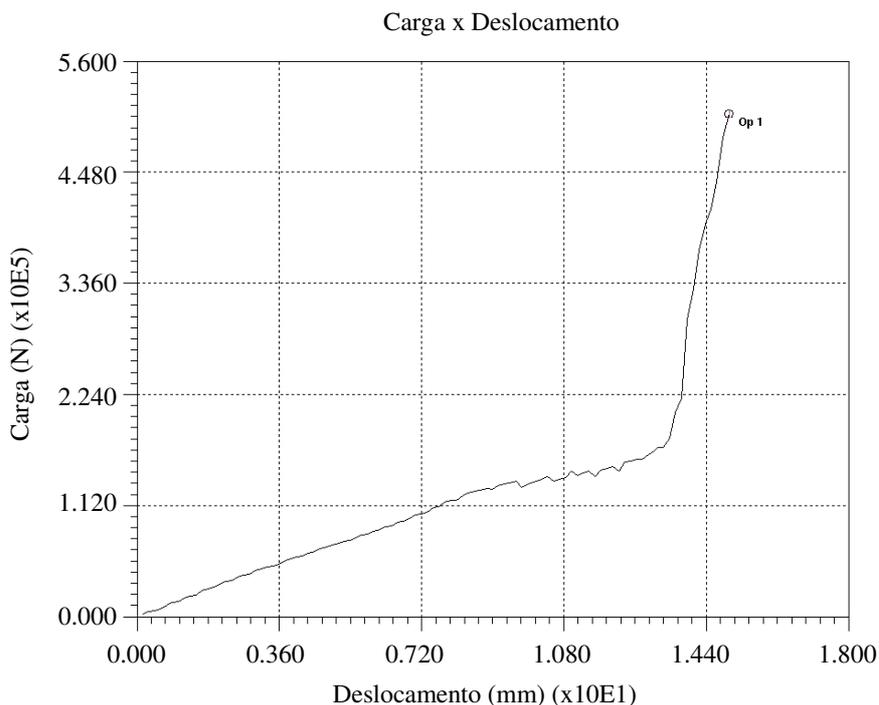


Figura 5.6 – Gráfico carga x deslocamento na 1ª etapa do pré-projeto inicial.

O valor de carga necessária para esta etapa é de aproximadamente de 50 toneladas, que é adequado para a prensa hidráulica de simples efeito na qual será realizado o teste experimental.

A figura 5.7 mostra o dano obtido na simulação da 1ª etapa, calculado pelo critério de Cockroft & Latham Normalizado⁽¹⁸⁾. De acordo com o critério de dano utilizado a região de maior dano representada na figura pela letra H é a região de provável início de fratura. A figura 5.8 apresenta os valores encontrados para a tensão efetiva nas matrizes superior e inferior.

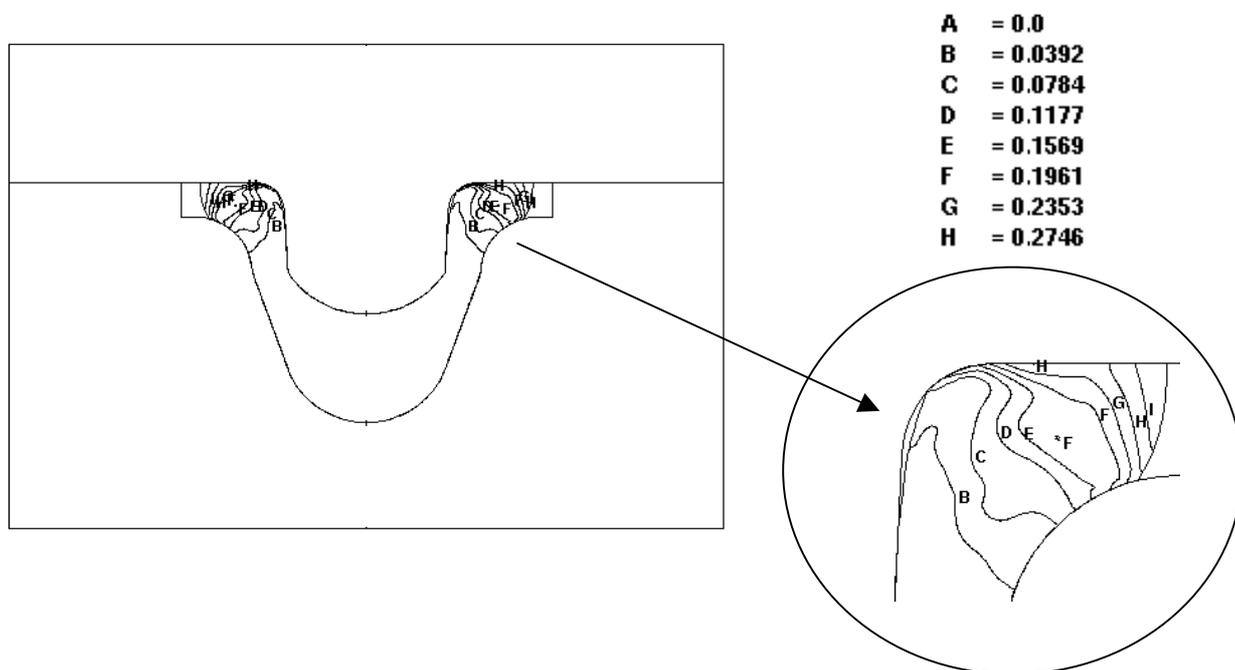


Figura 5.7 – Critério de dano Cockroft & Latham normalizado obtido na simulação da 1ª etapa pré-projeto inicial.

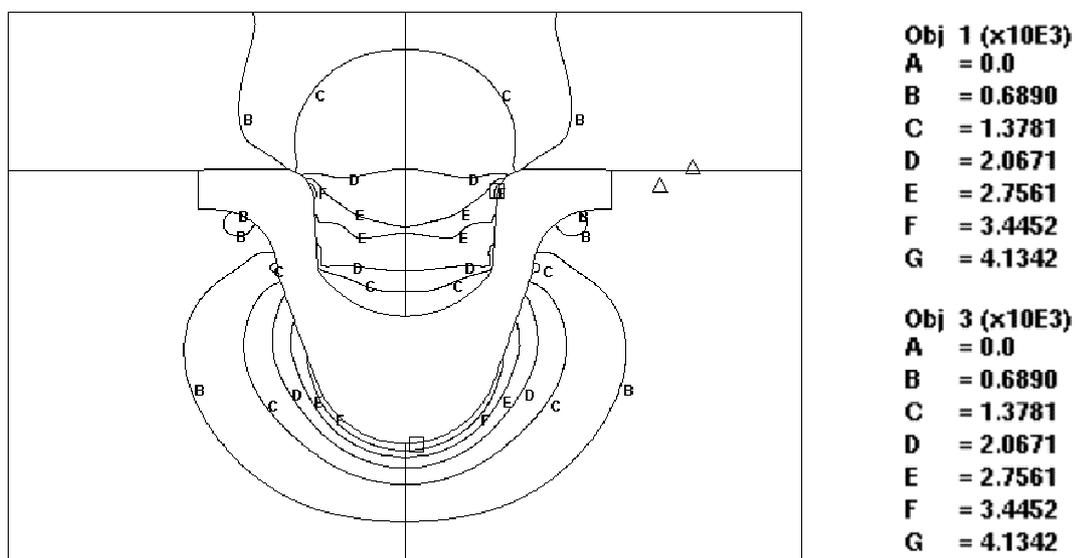


Figura 5.8 – Tensão (MPa) na matriz superior (objeto3); inferior (objeto 1) da 1ª etapa do pré-projeto inicial.

Na figura 5.8 a região de maior tensão está representada na figura por um quadrado. Na matriz inferior esta região está localizada no centro da curvatura e na matriz superior esta região está localizada no início do diâmetro interno da ponta. O valor de tensão encontrado na simulação para a matriz superior e inferior é bem superior à tensão suportada pelo material.

5.2.2. Resultado da Simulação da 2ª Etapa do Pré-Projeto Inicial

Na figura 5.9 mostra-se a parte superior e inferior da matriz, o produto obtido da posição final da primeira etapa do pré-projeto inicial antes da simulação. Na figura 5.10 é mostrada a matriz superior e inferior com o produto rompido na posição final da simulação da segunda etapa do pré-projeto inicial.

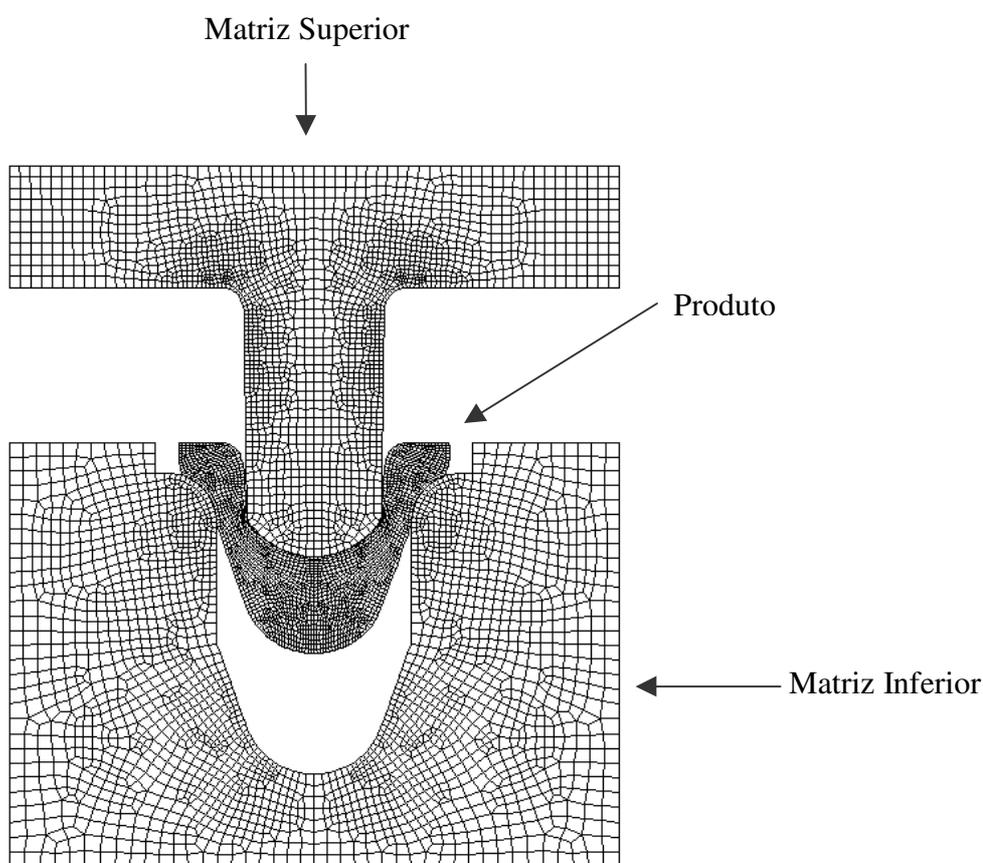


Figura 5.9 – Posição Inicial da segunda etapa do pré-projeto inicial.

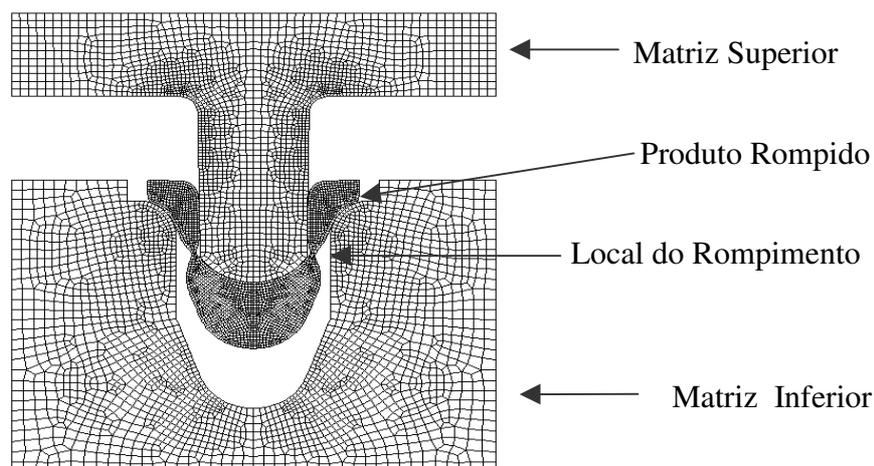


Figura 5.10 – Rompimento do Material.

5.2.3. Modificação da Matriz Inferior da Segunda Etapa do Primeiro Pré-Projeto

Com a finalidade de melhorar o fluxo do material para dentro da cavidade, adotou-se uma inclinação na entrada da matriz inferior, seguida de nova simulação. As figuras 5.11 (a) e (b) apresentam os resultados obtidos, e a figura 5.11(b) indicou que o problema de ruptura da peça persiste. Os motivos apresentados acima levaram a uma modificação do pré-projeto. Diante disto não foram avaliados a carga imposta sobre a matriz, às tensões na matriz e o dano no material para a segunda etapa.

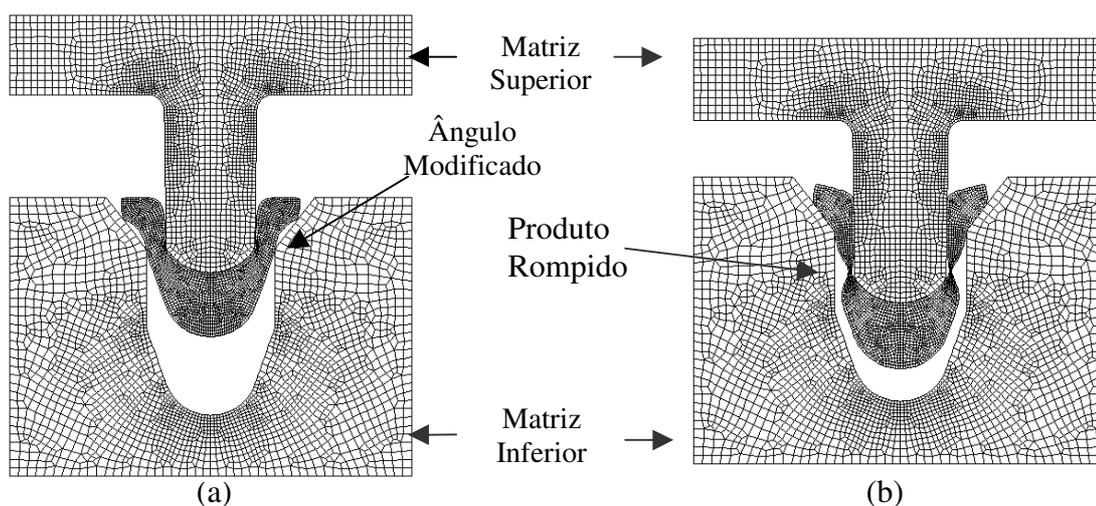


Figura 5.11 – Simulação da segunda etapa do pré-projeto inicial com modificação angular. (a) posição inicial do punção, (b) posição final do punção.

5.3. Resultados da Confecção do Estampo de Corte do Tarugo Inicial

Para a validação do modelo primeiramente foi construído um estampo de corte para a 1ª operação com a finalidade de se obter um tarugo com ϕ 16mm e comprimento de 10mm a partir de uma barra trefilada de 16 mm. A figura 5.12 (a) apresenta as diferentes partes do estampo e a barra que foi cortada. Na figura 5.12 (b) pode-se visualizar o conjunto montado em uma prensa, pronto para a operação. Com o acionamento da prensa, durante o curso de descida do martelo, o corte da barra se dá por cisalhamento. O punção de corte possui o mesmo formato (raio externo) da barra trefilada e quando finalizado o corte o material é coletado em uma caixa situada na parte inferior da prensa (área de descarga). Os ensaios experimentais para esta etapa foram realizada em uma prensa excêntrica modelo Kaerck com capacidade de 22 toneladas.



(a)



(b)

Figura 5.12 - Fotografia do estampo e da barra utilizada: (a) desmontado; (b) montado na prensa.

A figura 5.13 apresenta o tarugo na sua forma inicial, obtido por corte na prensa (primeira operação).

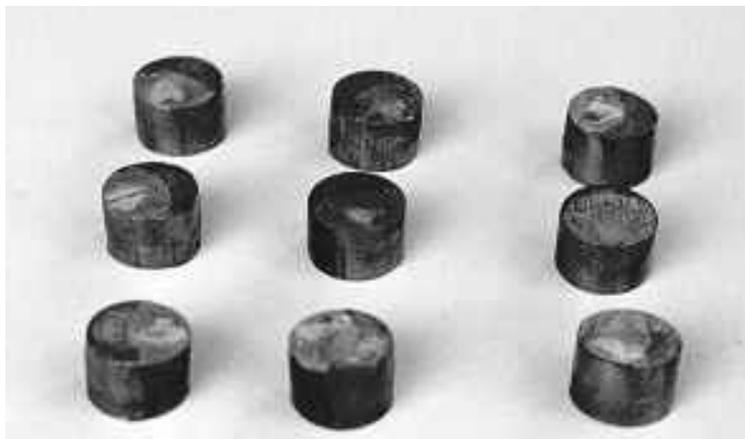


Figura 5.13 – Tarugos obtidos através do procedimento de corte.

A análise visual e as medidas dos tarugos obtidos por cisalhamento indicaram que não se obtém formas perfeitamente cilíndricas no corte, e que houve variações nas dimensões obtidas. Desta forma incluiu-se no segundo pré-projeto uma etapa inicial de calibração do tarugo.

5.4. Resultado da Validação Experimental do Pré-Projeto Inicial

5.4.1. Resultado da Primeira Etapa Experimental do Pré-Projeto Inicial

A primeira etapa produz uma forma de sino, que visa dar forma à parte esférica e cônica do lado externo e iniciar o formato do cone interno da ponta intercambiável. A figura 5.14 apresenta o estampo construído para esta etapa, aberto sobre a mesa da prensa. A figura mostra o formato da cavidade e o alojamento da matriz na placa base inferior, vista por cima. Esta etapa foi realizada em prensa hidráulica e prensa excêntrica. Na prensa hidráulica foi necessária uma carga de 50 toneladas. O resultado de carga obtido na simulação (item 5.2.1) foi de aproximadamente $5,04 \times 10^5$ (N) ou seja 50,4 toneladas, analisando-se os valores obtidos percebe-se a aproximação dos valores encontrados entre a etapa simulada e a etapa experimental. O tempo envolvido nesta etapa foi de

5.4.2. Resultado da Segunda Etapa Experimental do Pré-Projeto Inicial

O objetivo da segunda etapa do pré-projeto inicial foi atingir o formato final da ponta intercambiável, o que não ocorreu devido ao rompimento do material. Esta fratura foi observada no momento em que a forma de sino deveria escoar para dentro da cavidade da matriz da segunda etapa, como mostrado na figura 5.16.



Figura 5.16 – Peças rompidas na segunda etapa do pré-projeto inicial.

Como o resultado obtido no teste experimental foi o previsto na simulação da segunda etapa do pré-projeto inicial (ver item 5.2.2), procurou-se analisar as possíveis causas da ruptura do material. Suspeitas foram levantadas quanto ao volume de material a ser deformado.

A primeira medida tomada foi simular novamente a segunda etapa do pré-projeto inicial variando a inclinação na entrada da matriz inferior e procurando visualizar o comportamento do material.

5.5. Segundo Pré-Projeto

As figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 apresentam o segundo pré-projeto, que foi simulado no programa Deform para a avaliação da substituição das etapas de usinagem pela conformação a frio na fabricação de contatos para soldagem por resistência.

As figuras 5.17 (a) e (b) mostram a primeira etapa do segundo pré-projeto em suas fases inicial e final respectivamente. Esta etapa visa uma calibração inicial do tarugo. As figuras 5.18 (a) e (b) mostram a segunda etapa do segundo pré-projeto nos estágios inicial e final respectivamente. As figuras 5.19 (a) e (b) mostram a terceira etapa do segundo pré-projeto, nos estágios inicial e final respectivamente. As figuras 5.20 (a) e (b) mostram a quarta etapa do segundo pré-projeto, nos estágios inicial e final respectivamente.

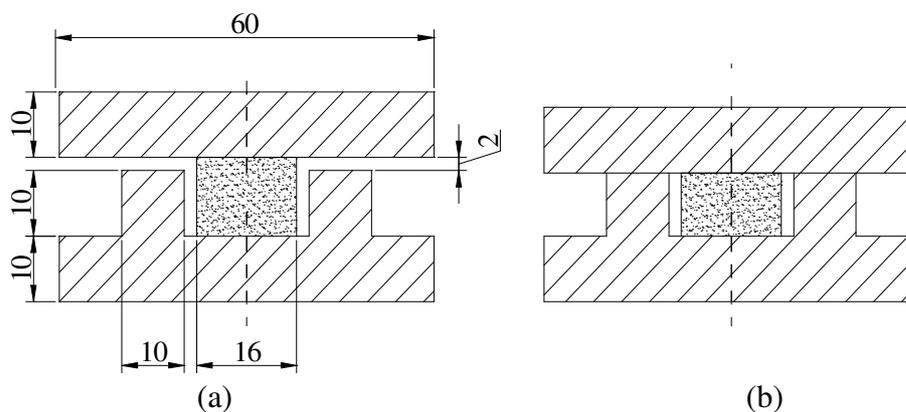


Figura 5.17 - Primeira etapa segundo pré-projeto. (a) posição inicial, (b) posição final.

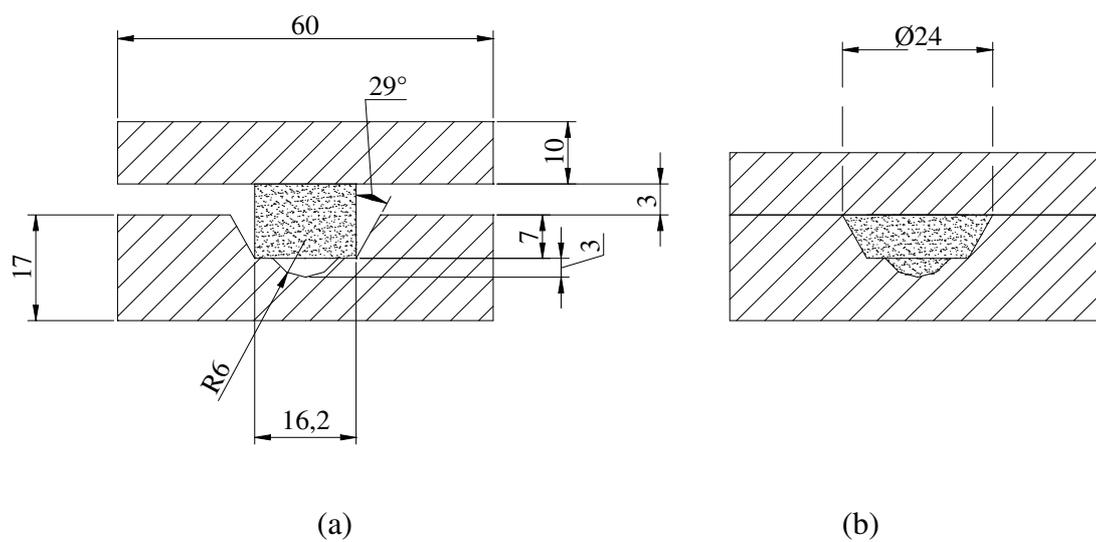


Figura 5.18 - Segunda etapa do segundo pré-projeto. (a) posição inicial, (b) posição final.

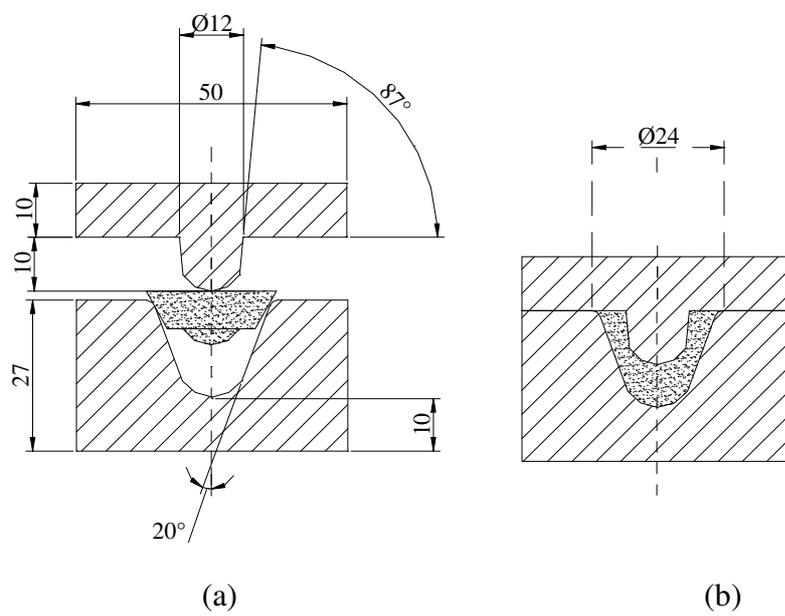


Figura 5.19 - Terceira etapa do segundo pré-projeto. (a) posição inicial, (b) posição final.

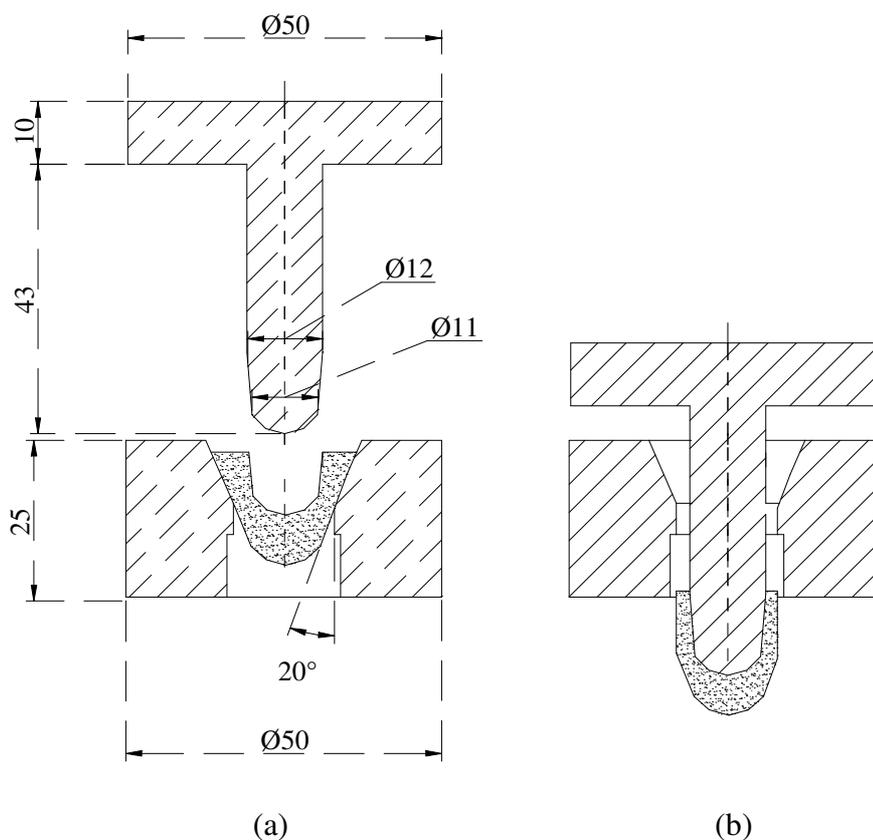


Figura 5.20 - Quarta etapa do segundo pré-projeto. (a) posição inicial, (b) posição final.

5.6. Resultados da Simulação do Segundo Pré Projeto

5.6.1. Segundo Pré Projeto 1ª Etapa

O desenho da primeira etapa do segundo pré-projeto foi redesenhado no programa Deform, submetido às condições de contorno e geração de malha seguida de simulação. Na figura 5.21(a) é apresentado o desenho no Deform antes da simulação; a figura 5.21 (b) mostra o resultado da calibração após a simulação.

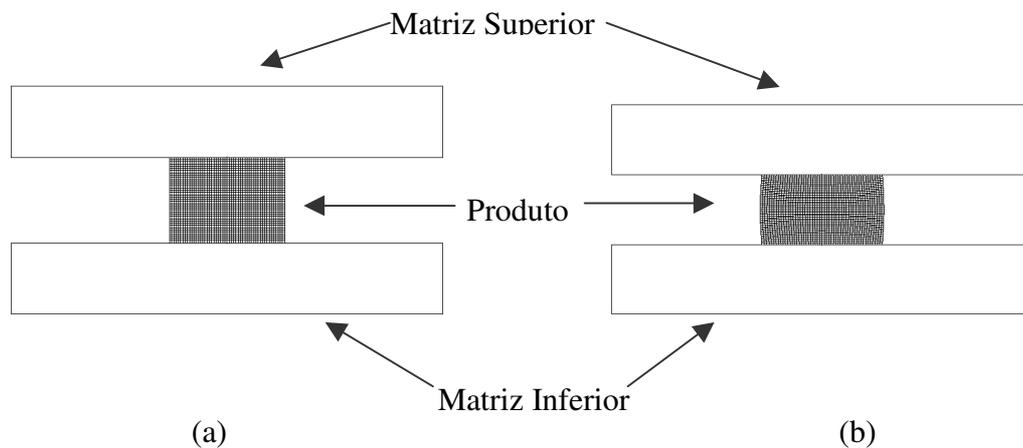


Figura 5.21 – Resultado da simulação da etapa de calibração do tarugo inicial.

A figura 5.22 mostra o gráfico carga x deslocamento para a etapa de calibração do tarugo inicial.

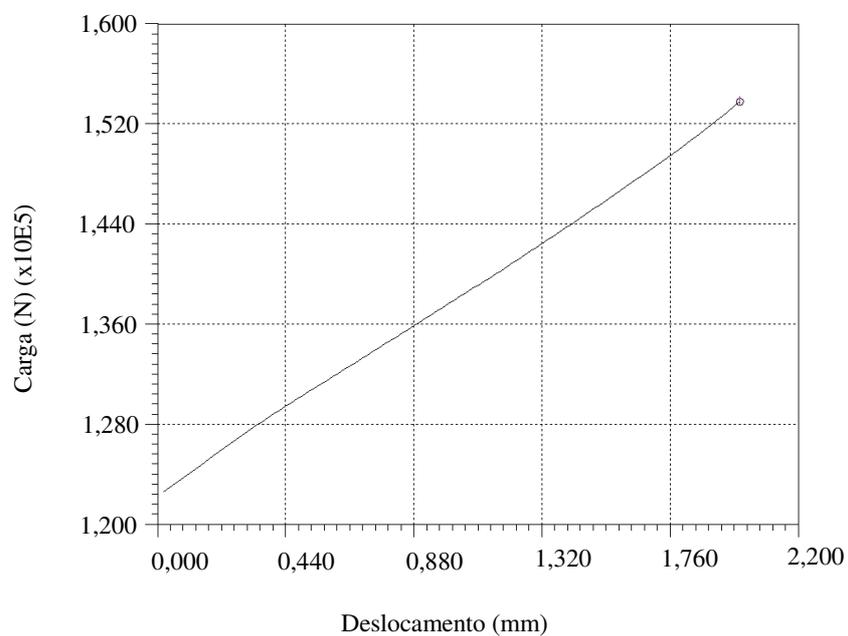


Figura 5.22 – Gráfico carga versus deslocamento.

O resultado de carga obtido após a simulação foi de $1,54 \times 10^5$ (N) ou seja 15,4 toneladas, este valor indicou a possibilidade da etapa experimental para esta operação ser realizada na prensa hidráulica de simples efeito.

A figura 5.23 mostra o dano obtido na simulação da etapa de calibração, calculado pelo critério de Cockroft & Latham Normalizado⁽¹⁸⁾. Conforme o critério de dano utilizado a região F é o local de possível início de ruptura do material.

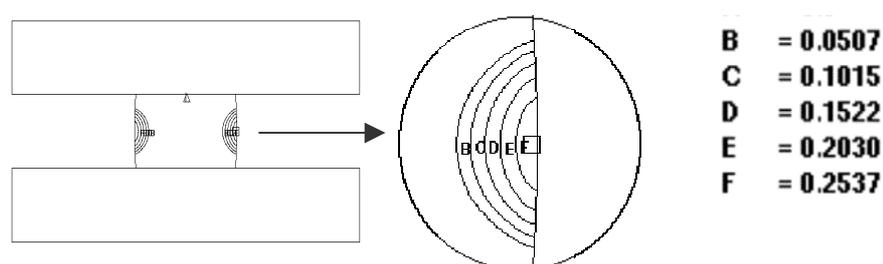


Figura 5.23 – Critério de dano Cockroft & Latham normalizado obtido na simulação da etapa de calibração do tarugo inicial.

A figura 5.24 apresenta os valores encontrados para a tensão efetiva nas matrizes superior e inferior.

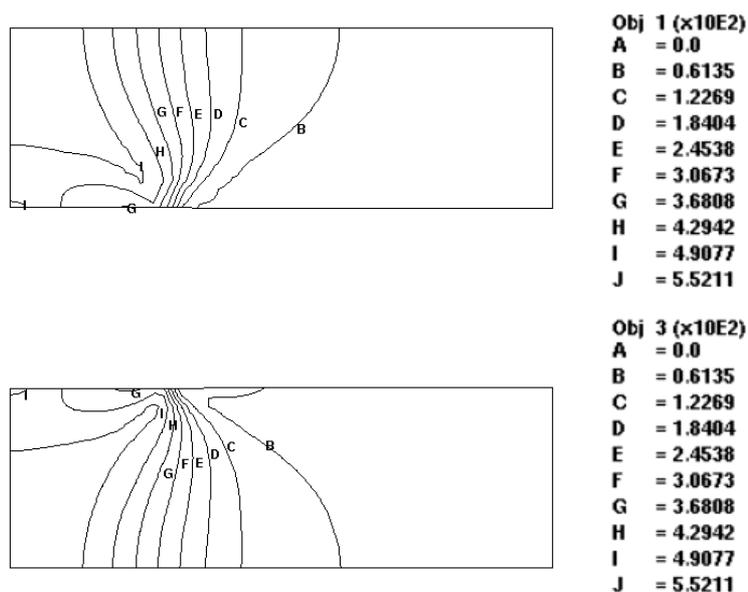


Figura 5.24 – Tensão (MPa) na matriz superior (objeto3); inferior (objeto 1) da 1ª etapa do pré- projeto inicial.

O valor de tensão encontrado na simulação para a matriz superior e inferior da etapa de calibração foi inferior à tensão suportada pelo material. Esse resultado indicou que não há a necessidade de alojar as matrizes para esta operação.

5.6.2. Segundo Pré Projeto 2ª Etapa

O desenho da segunda etapa também foi desenhado no programa Deform, submetido às condições de contorno e geração de malha seguida de simulação a exemplo da primeira operação. Na figura 5.25(a) é apresentado o desenho no Deform antes da simulação; a figura 5.25 (b) mostra o resultado após a simulação.

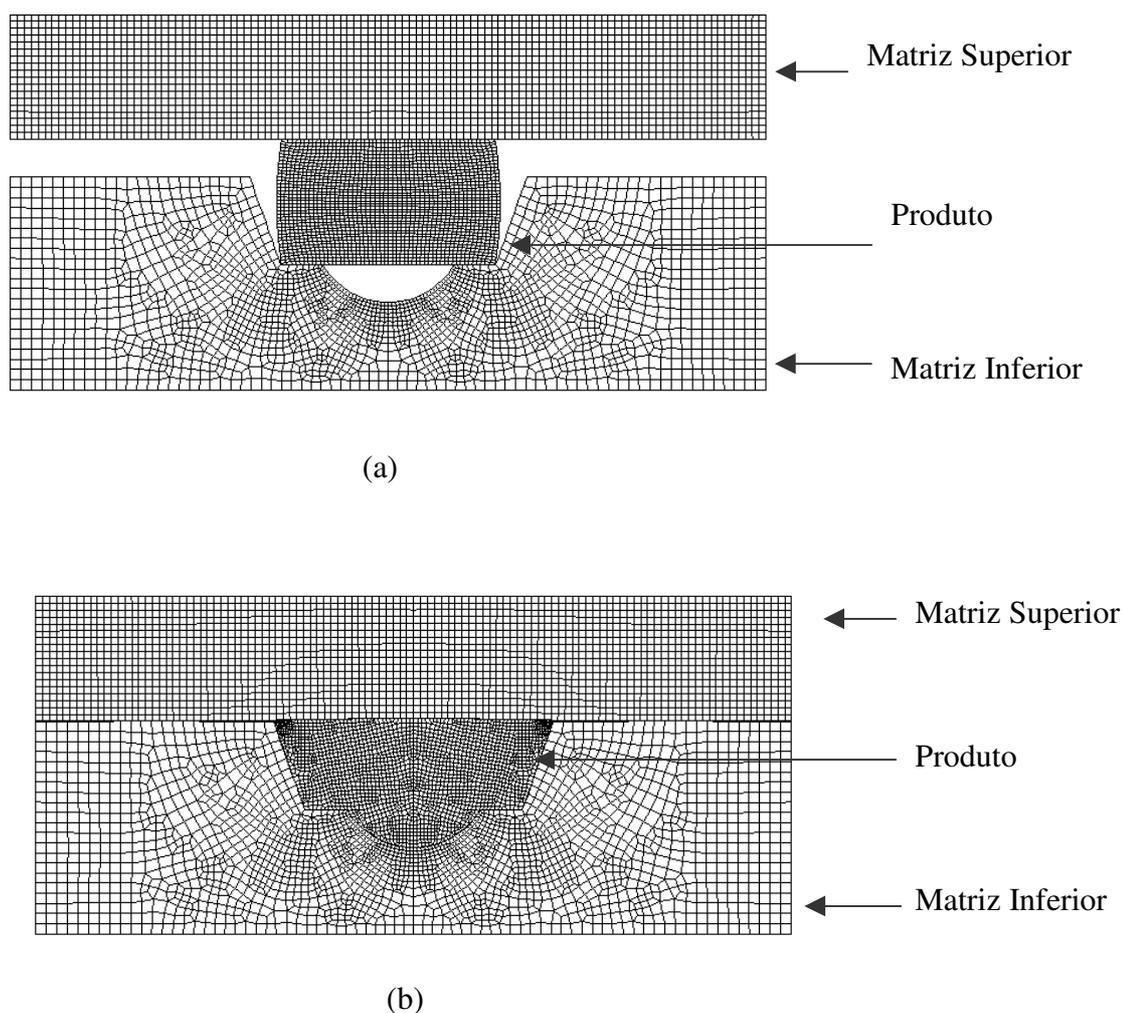


Figura 5.25 – Resultado da simulação da etapa de pré-forma.

A figura 5.26 mostra o gráfico carga x deslocamento para a etapa de pré-forma.

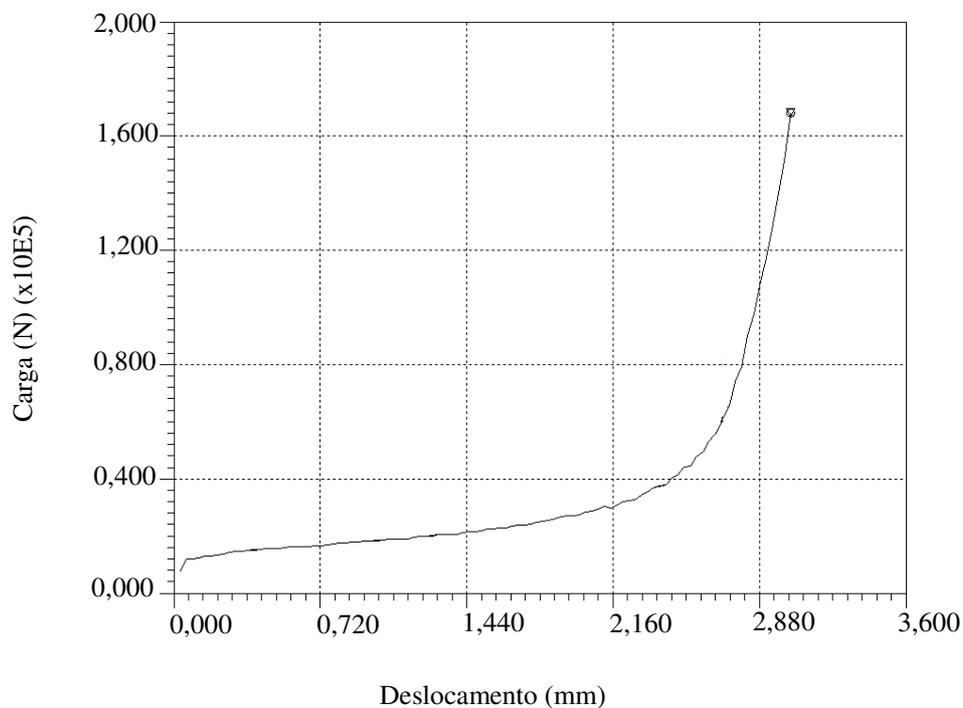


Figura 5.26 – Gráfico carga versus deslocamento da etapa de pré-forma.

A carga após a simulação foi de $1,72 \times 10^5$ (N) ou seja 17,2 toneladas esse valor indicou a possibilidade da etapa experimental para esta operação ser realizada na prensa hidráulica de simples efeito. A figura 5.27 mostra o dano obtido na simulação da etapa de pré-forma, calculado pelo critério de Cockroft & Latham Normalizado⁽¹⁸⁾.

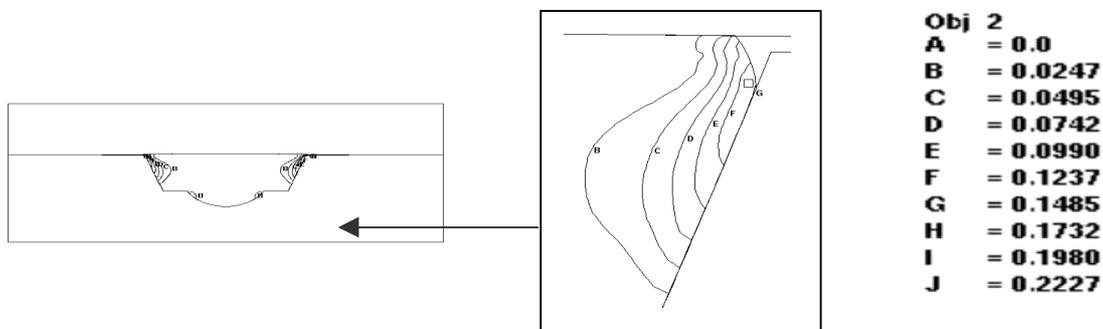


Figura 5.27 – Critério de dano Cockroft & Latham normalizado obtido na simulação da etapa de pré-forma.

A região de maior dano e possível ruptura segundo o critério de dano Cockroft & Latham normalizado está representado na figura pela letra J.

A figura 5.28 apresenta os valores encontrados para a tensão efetiva nas matrizes superior e inferior.

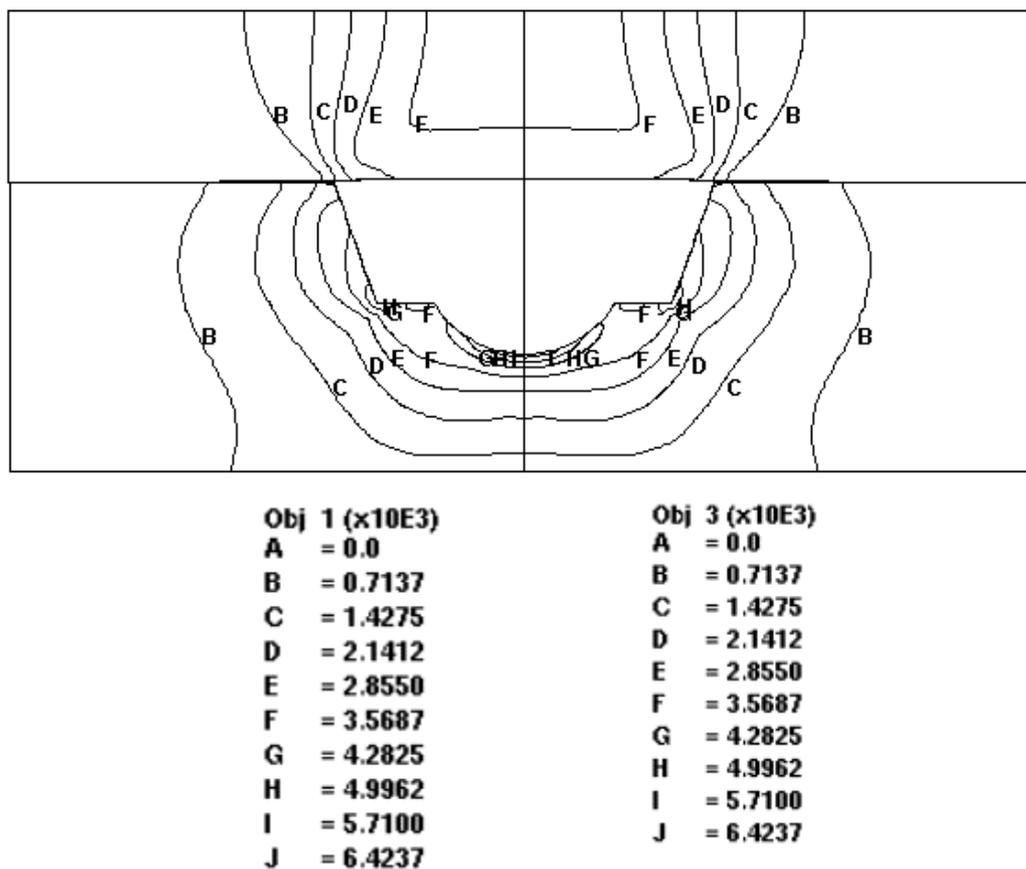


Figura 5.28 – Tensão (MPa) na matriz superior (objeto3); inferior (objeto 1) da etapa de pré-forma.

O valor de tensão encontrado na simulação para a matriz superior e inferior da etapa de pré-forma foi superior à tensão suportada pelo material. Esse resultado indicou a necessidade do alojamento das matrizes para operação da pré-forma. A posição mais crítica encontra-se no centro da matriz superior e inferior.

5.6.3. Segundo Pré Projeto 3ª Etapa

O desenho da terceira etapa foi redesenhado no programa Deform, submetido às condições de contorno e geração de malha seguida de simulação. Na figura 5.29(a) é apresentado o desenho no Deform antes da simulação; a figura 5.29 (b) mostra o resultado da etapa cônica após a simulação.

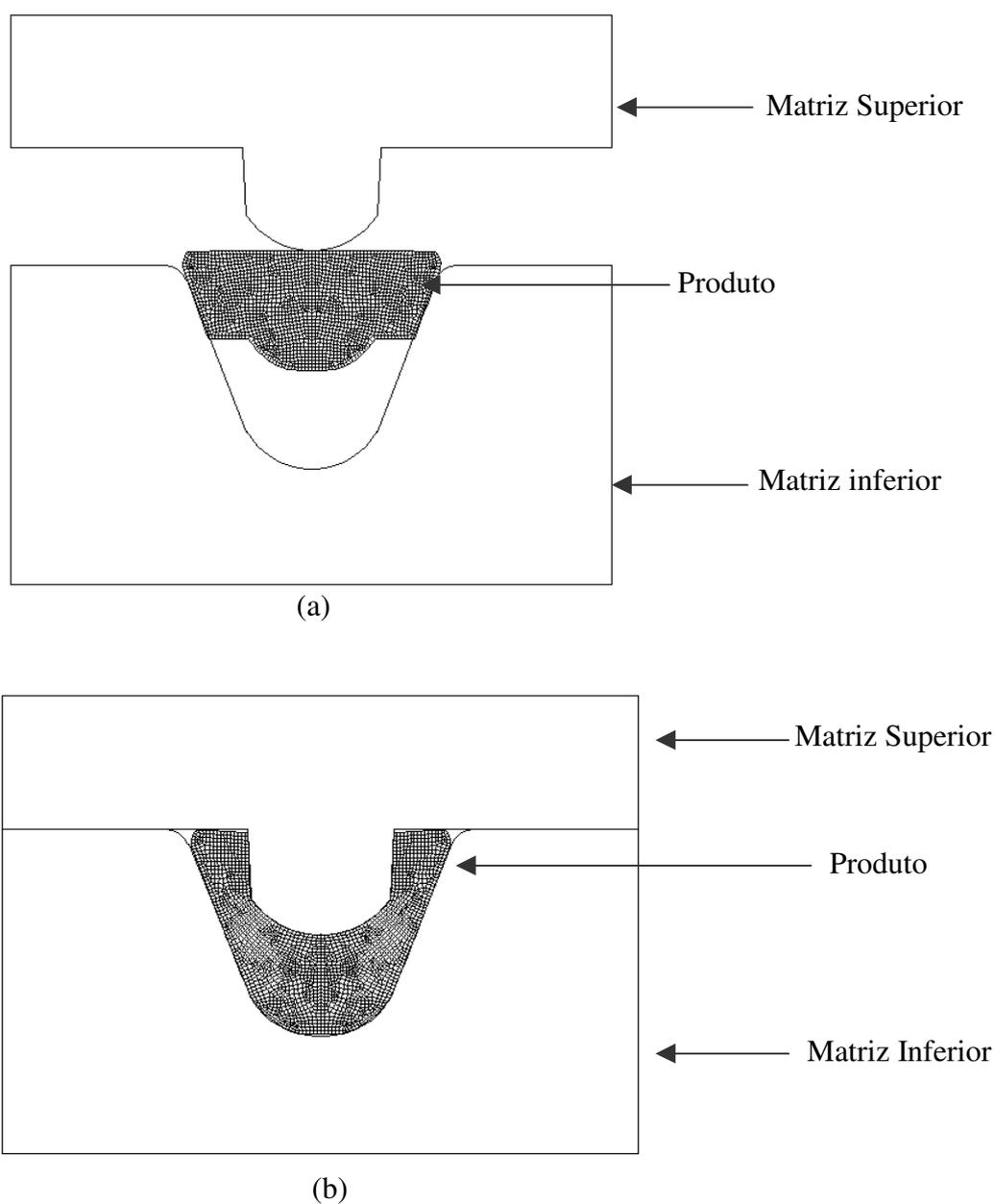


Figura 5.29 – Resultado da simulação da etapa de forma cônica.

A figura 5.30 mostra o gráfico Carga x Deslocamento para a etapa de forma cônica.

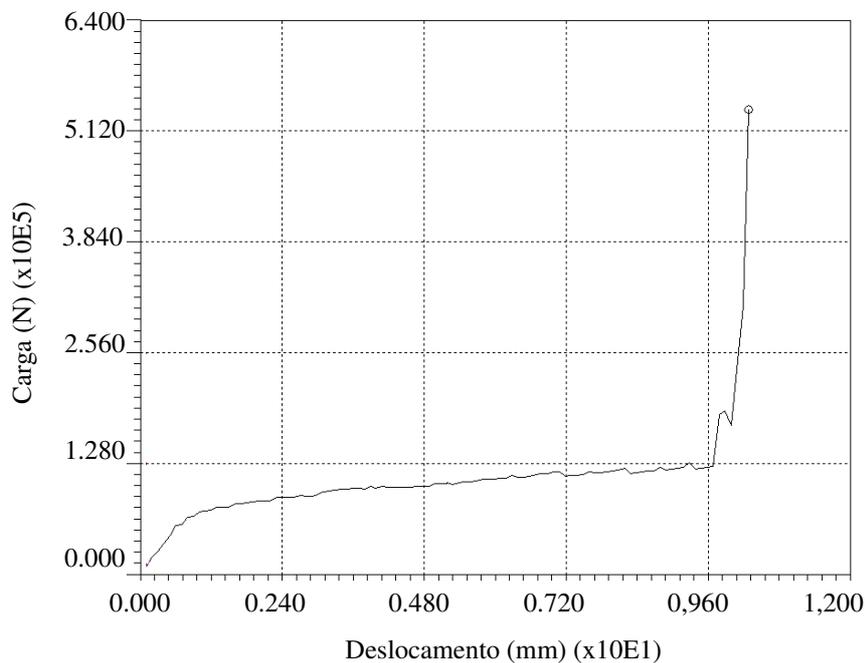


Figura 5.30 – Gráfico carga versus deslocamento da etapa de forma cônica.

O resultado de carga para esta etapa simulada foi de $5,4 \times 10^5$ (N) ou seja 54 toneladas, este valor indicou a possibilidade da etapa experimental ser realizada na prensa hidráulica de simples efeito.

A figura 5.31 mostra o dano obtido na simulação da etapa de pré-forma, calculado pelo critério de Cockroft & Latham Normalizado⁽¹⁸⁾.

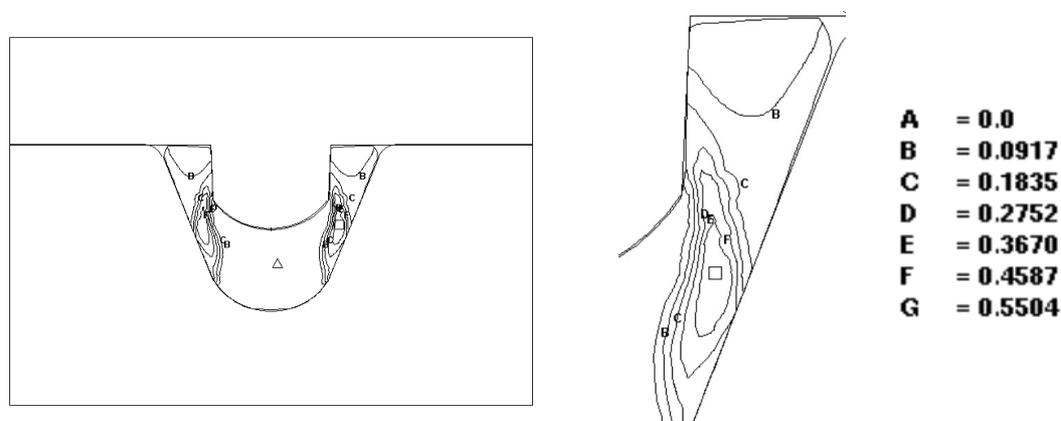


Figura 5.31 – Critério de dano Cockroft & Latham normalizado etapa de forma cônica.

A região de maior dano e possível ruptura segundo o critério de dano utilizado está representada na figura por um quadrado. A figura 5.32 apresenta os valores encontrados para a tensão efetiva nas matrizes superior e inferior para a etapa de forma cônica.

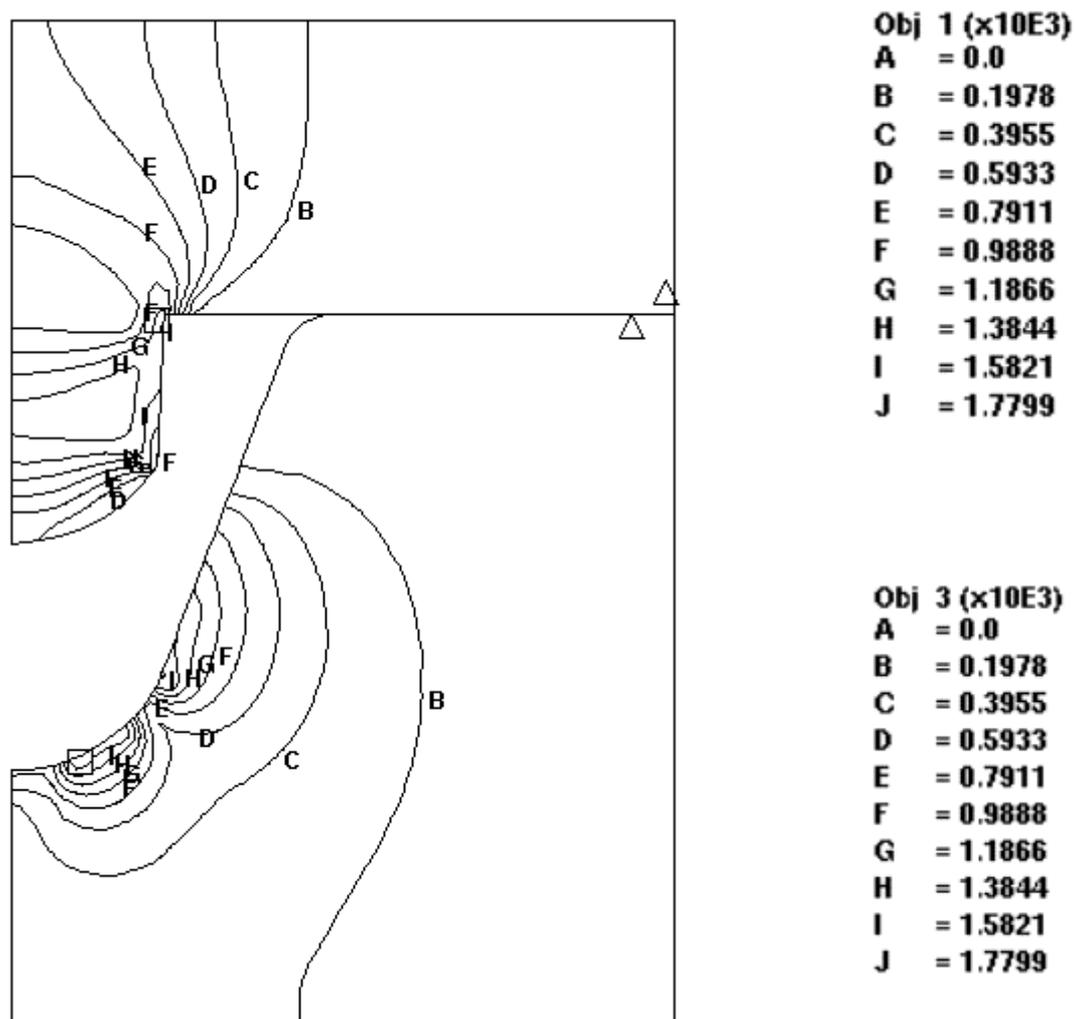
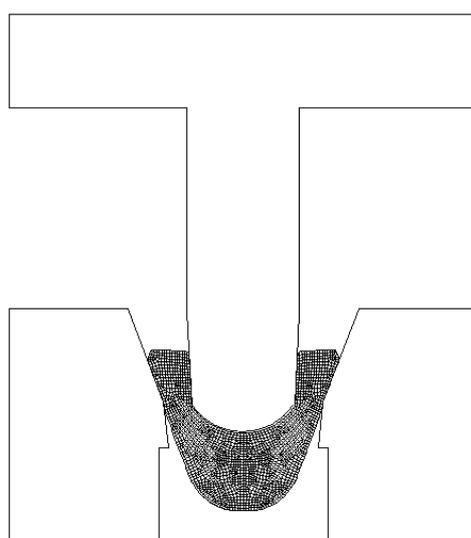


Figura 5.32 – Tensão (MPa) na matriz superior (objeto3); inferior (objeto 1) da etapa de forma cônica.

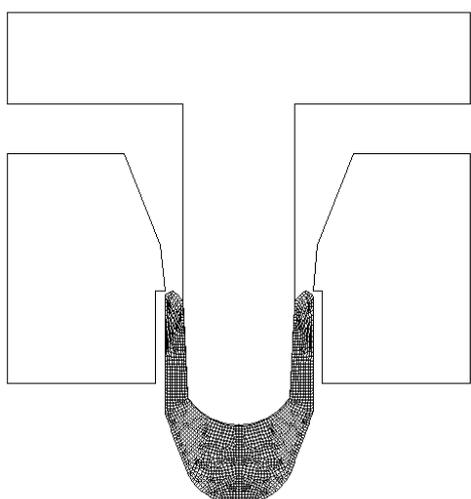
O valor de tensão encontrado na simulação para a matriz superior e inferior da etapa de pré-forma foi inferior à tensão suportada pelo material. Esse resultado indicou que não há necessidade do alojamento das matrizes para operação da etapa de forma cônica. A posição de maior tensão da matriz inferior esta localizada no centro da ferramenta e na matriz superior esta localizado no lateral do punção interno.

5.6.4. Segundo Pré Projeto 4ª Etapa

O desenho da quarta etapa foi desenhado no programa Deform, submetido às condições de contorno e geração de malha seguida de simulação como executado em todas as etapas posteriores. Na figura 5.33(a) é apresentado o desenho no Deform antes da simulação; a figura 5.33 (b) mostra o resultado da etapa de ‘ironing’ após a simulação.



(a)



(b)

Figura 5.33 – Resultado da simulação da etapa de ‘ironing’.

A figura 5.34 mostra o gráfico Carga x Deslocamento para a etapa de ‘ironing’.

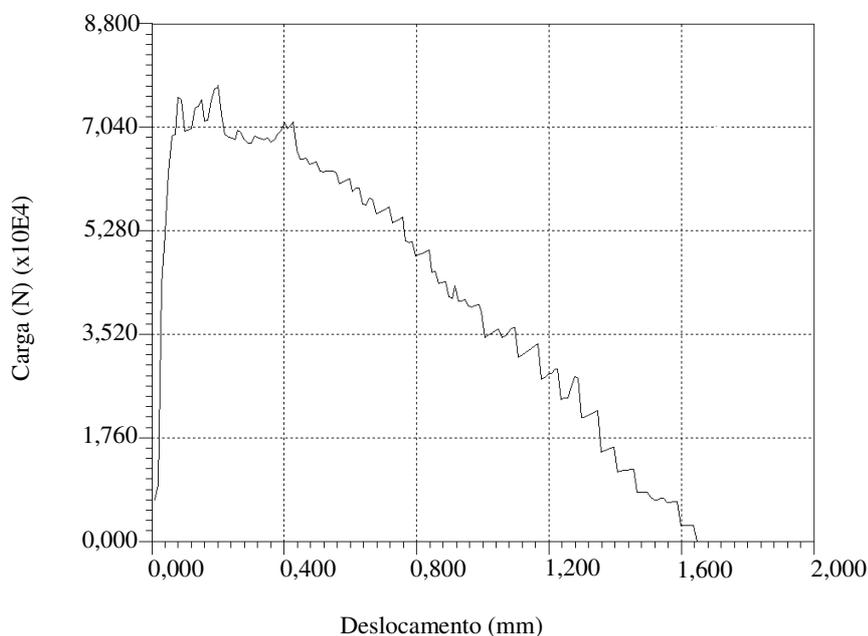


Figura 5.34 – Gráfico carga versus deslocamento da etapa de ‘ironing’.

A figura 5.35 apresenta os valores encontrados para a tensão efetiva nas matrizes superior e inferior para a etapa de ironing. O valor de maior tensão na simulação foi obtido antes do ultimo passo simulado e ficou abaixo do valor de tensão de escoamento do material.

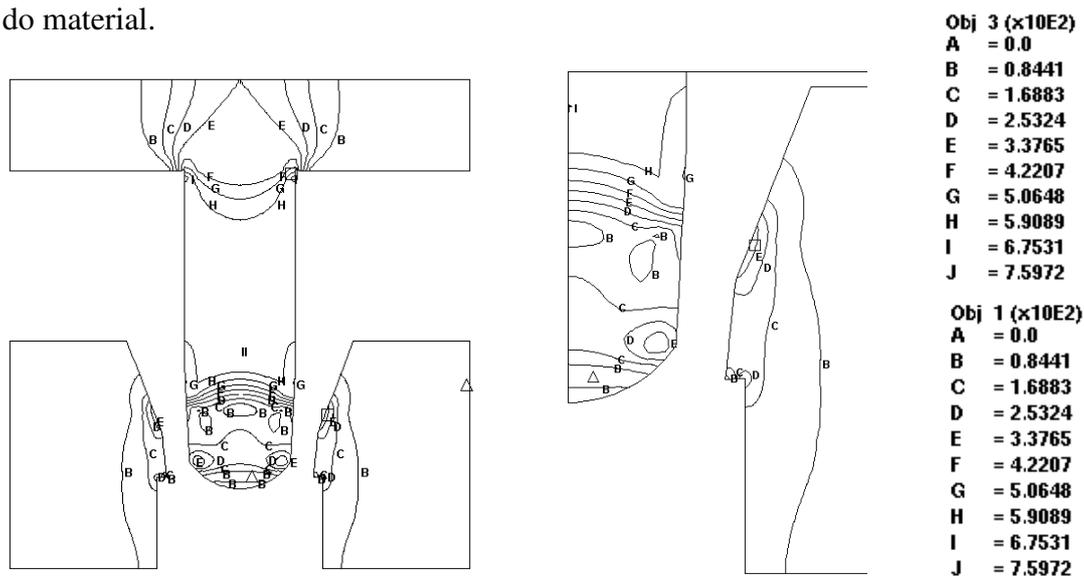


Figura 5.35 – Tensão (MPa) na matriz superior (objeto3); inferior (objeto 1) da etapa de ‘ironing’.

A figura 5.36 mostra o dano obtido na simulação da etapa de ‘ironing’, calculado pelo critério de Cockroft & Latham Normalizado⁽¹⁸⁾.

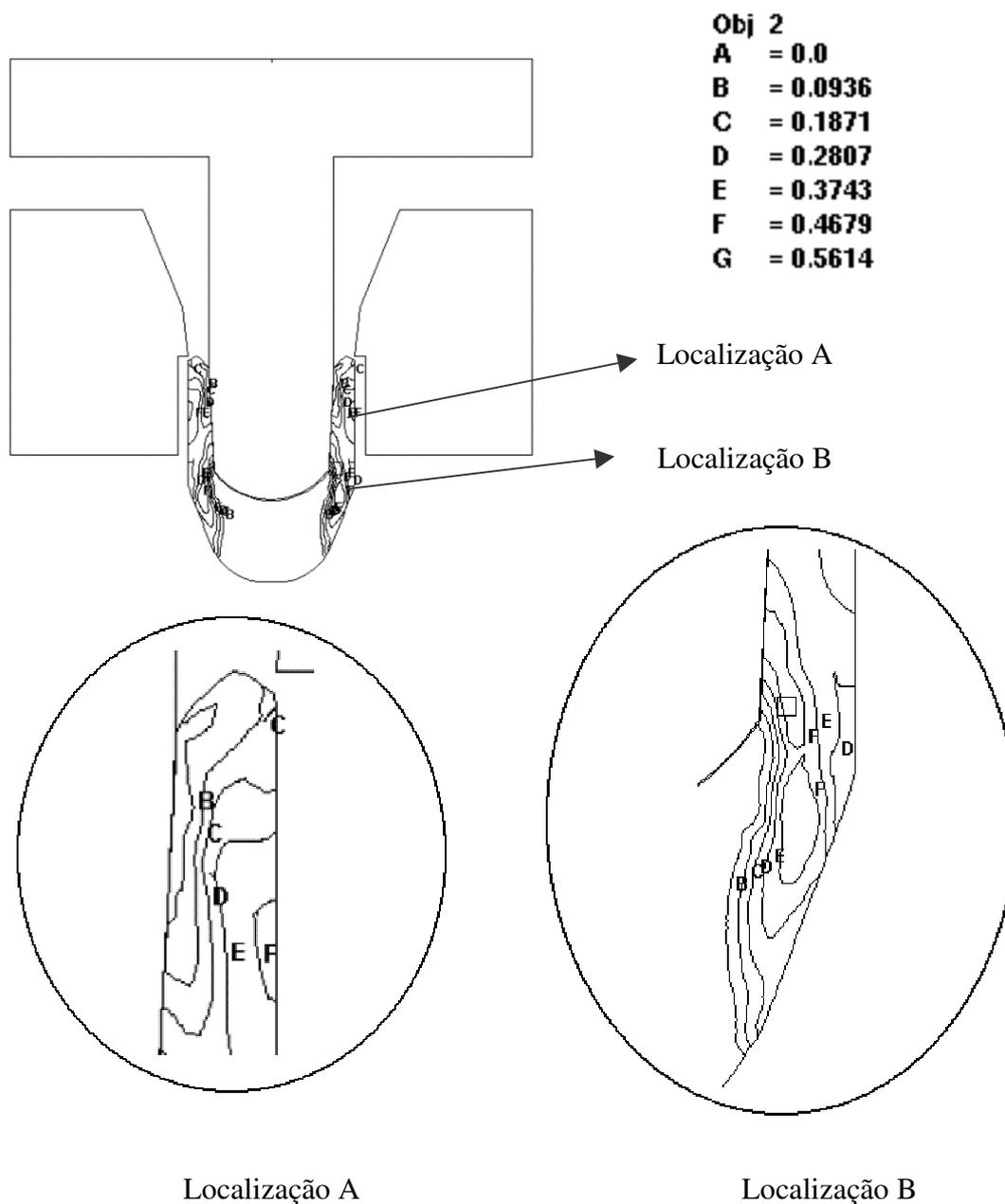


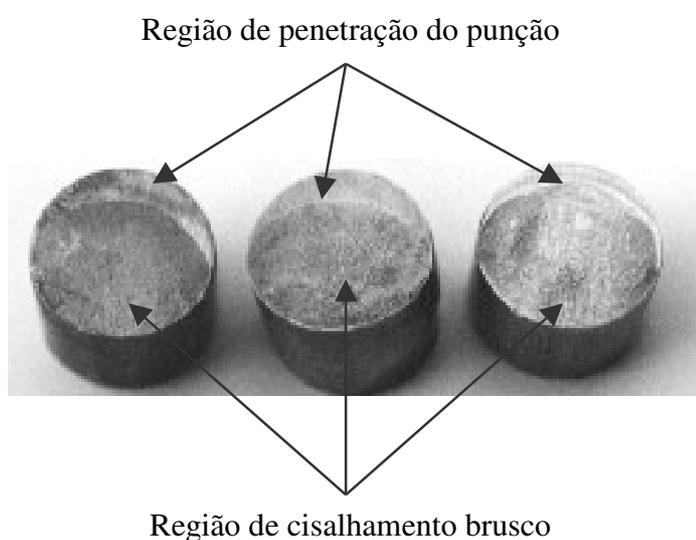
Figura 5.36 – Critério de dano Cockroft & Latham normalizado obtido na simulação da etapa de forma cônica.

A região de maior dano e possível ruptura segundo o critério encontra-se ampliada na região de localização B da figura e está representada por um quadrado.

5.7. Resultados das Etapas Experimentais do Segundo Pré-Projeto

5.7.1. Resultado da Primeira Etapa Experimental do Segundo Pré-Projeto

A primeira etapa recebeu o nome de calibração inicial e sua finalidade foi à correção de irregularidades no corte, associadas às regiões de penetração do punção de corte e ao cisalhamento brusco no final da operação. A figura 5.37 (a) e (b) apresentam a foto do tarugo inicial antes da calibração com as suas irregularidades.



(a) Região superior: área de penetração do punção. Região inferior: área de cisalhamento brusco.



(b) Variação na altura do tarugo inicial após o corte.

Figura 5.37 – Irregularidades no tarugo inicial.

A operação de calibração foi realizada em prensa excêntrica de 25 toneladas e prensa hidráulica. Em sua montagem na prensa hidráulica de simples efeito mediu-se uma carga de 4 toneladas para a operação. O resultado de carga foi menor que o resultado simulado (15,4 toneladas item (5.6.1)). Na figura 5.38 é mostrado o estampo montado em prensa excêntrica de 25 toneladas, com um tarugo inicial pronto para ser calibrado.

Após a calibração o tarugo inicial apresentou bom paralelismo de suas faces superior e inferior e uma pequena inclinação na altura com relação às faces. A altura do tarugo inicial após a calibração foi de 10 mm. As figuras 5.39 (a) e (b) apresentam os tarugos iniciais após a calibração, vista por cima e lateralmente, respectivamente.



Figura 5.38 - Estampo utilizado para calibração do tarugo inicial.

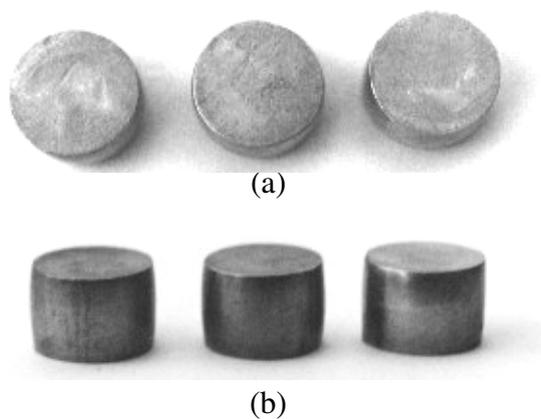


Figura 5.39 – Fotografia do tarugo inicial após a etapa de calibração (a) (vista por cima) e (b) (vista lateral).

5.7.2. Resultado da Segunda Etapa Experimental do Segundo Pré-Projeto

A segunda etapa produz uma pré-forma para a ponta intercambiável. Esta etapa foi realizada em prensa hidráulica e em prensa excêntrica. O teste em prensa hidráulica de simples efeito, cujas características foram mostradas na tabela IV.1, exigiu um tempo para a etapa de 10 segundos /peça e 18 toneladas de carga. O valor de carga obtido na simulação (17,2 toneladas) ficou próximo ao obtido na etapa experimental. O estampo construído para esta operação é mostrado na figura 5.40.



Figura 5.40 – Fotografia do estampo para a segunda etapa do segundo pré-projeto.

Esta figura mostra que o estampo foi construído com um conjunto extrator acionado manualmente através de uma haste lateral, uma placa base superior, uma inferior e uma matriz com o formato da pré-forma. O anexo nº 2 mostra os desenhos utilizados na oficina para a fabricação de todos os estampos. A figura 5.41 apresenta o estampo montado na prensa hidráulica de simples efeito.

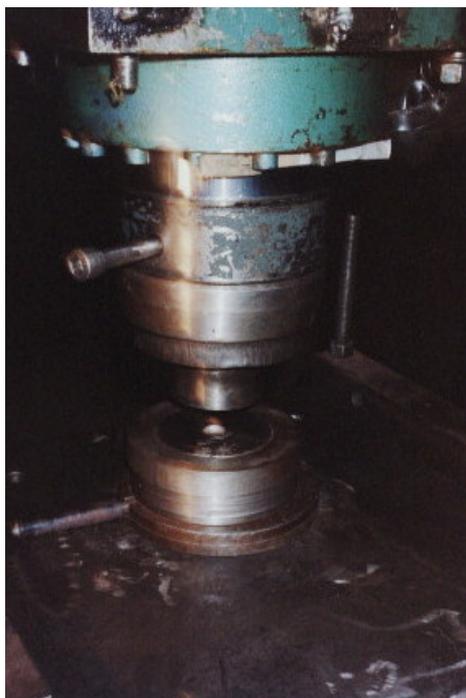


Figura 5.41 – Estampo da segunda etapa do segundo pré-projeto, montado em prensa.

A figura 5.42 apresenta a foto do produto obtido após o teste do estampo. Percebe-se pela fotografia do produto que não ocorreu um completo preenchimento da matriz em torno parte esférica.



Figura 5.42 – Foto do produto da segunda etapa do segundo pré-projeto.

5.7.3. Resultado da Terceira Etapa Experimental do Segundo Pré-Projeto

A terceira etapa produz uma forma cônica, que visa dar forma à parte esférica e cônica do lado externo e iniciar o formato do cone morse interno da ponta intercambiável. A figura 5.43 apresenta uma vista de cima do estampo construído para esta etapa, onde se pode visualizar o alojamento da matriz inferior na placa base inferior, e o alojamento da bucha de deslizamento do punção na placa flutuante intermediária.

Alojamento da matriz inferior na placa base

Alojamento da bucha de deslizamento do punção

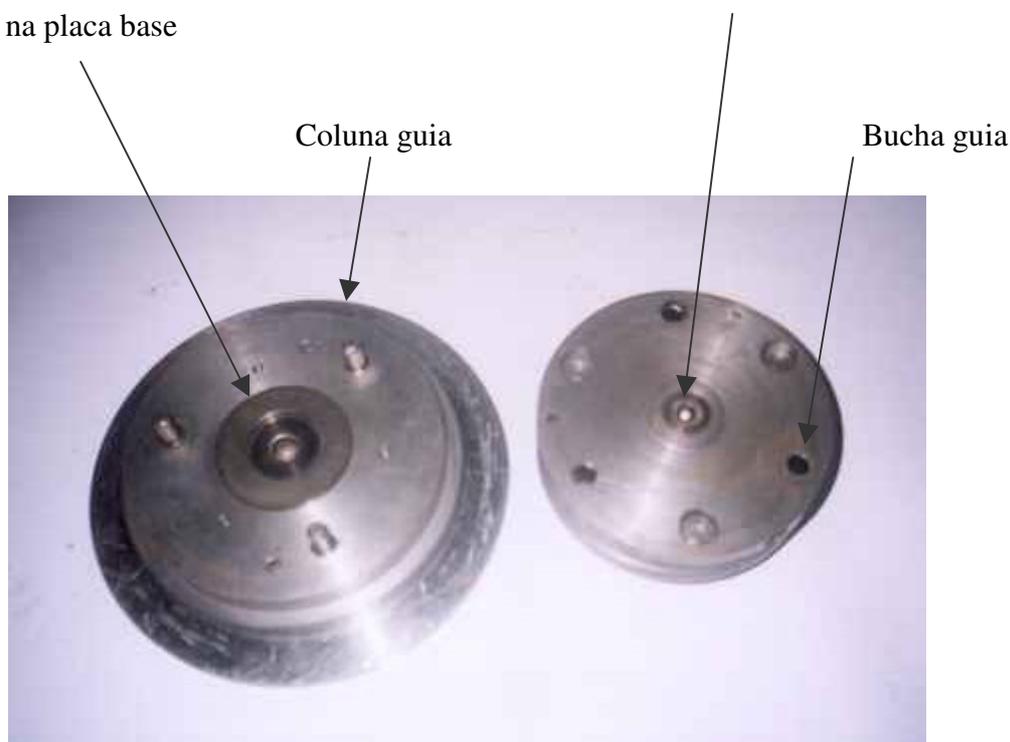


Figura 5.43- Vista de cima do estampo da terceira operação do segundo pré-projeto.

A etapa da forma cônica foi realizada em prensa hidráulica e em prensa excêntrica; na prensa hidráulica foi necessária uma carga de 55 toneladas. O resultado obtido na etapa experimental ficou próximo do resultado obtido na etapa simulada (54 toneladas) item 5.6.3. Esse estampo apresentou uma maior velocidade de produção quando montado em prensa excêntrica. A figura 5.44 apresenta o estampo montado e pronto para operação em uma prensa excêntrica modelo Jundiaí com capacidade de 100 toneladas. O tempo

envolvido nesta etapa foi de aproximadamente de 5 segundos/peça. A figura mostra a placa flutuante; uma das suas funções é extrair o produto do punção.

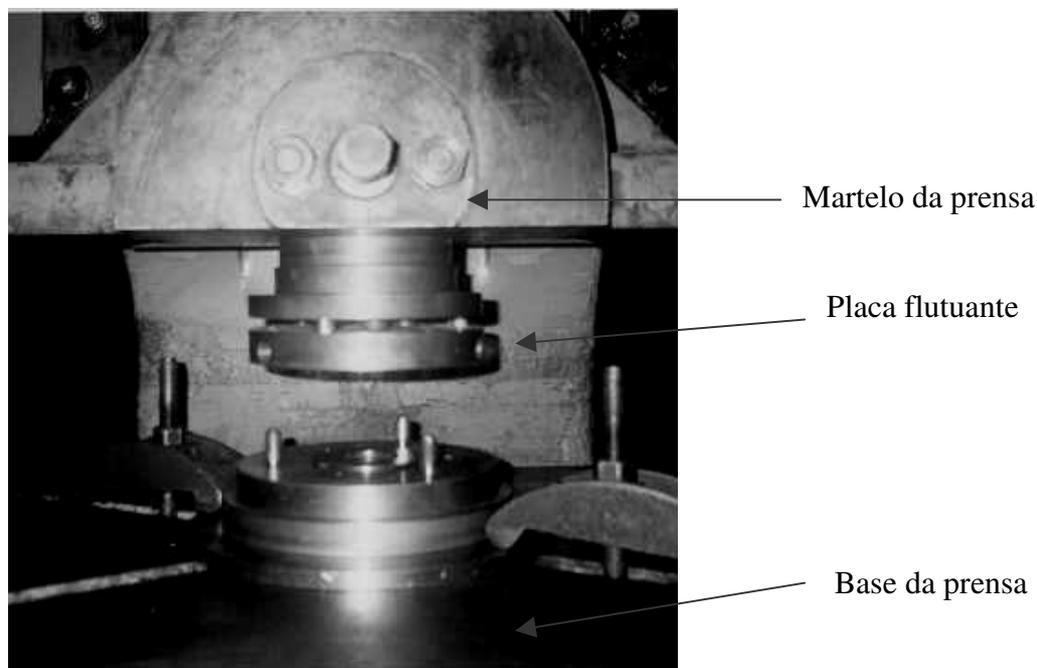


Figura 5.44 – Estampa da terceira etapa do segundo pré-projeto montado em prensa excêntrica.

A figura 5.45 apresenta a forma cônica após o teste do estampo. Nota-se o início da forma do cone morse interno, a forma final do raio externo da ponta e a forma final do cone externo.



Figura 5.45 – Foto do produto obtido na terceira etapa do segundo pré-projeto.

5.7.4. Resultado da Quarta Etapa Experimental do Segundo Pré-Projeto

A quarta etapa do segundo pré-projeto foi denominada ‘ironing’, e foi realizada em uma prensa hidráulica semi/automática modelo Luxor com capacidade de 40 toneladas. O ciclo de tempo foi de aproximadamente de 6 segundos/ peça, foi necessário uma carga de 7 toneladas para esta operação. O resultado de carga da etapa simulada (7,5 toneladas, item 5.6.4) ficou próximo ao obtido na etapa experimental. A figura 5.46 apresenta a foto do estampo vista por cima, onde se percebe o alojamento da matriz de ironing e o alojamento do punção. A figura 5.47 mostra a fotografia do alojamento da matriz inferior vista por baixo onde pode ser visualizado o local de atuação dos extratores internos em forma de cunha e as molas. As partes internas do estampo, com o escalonamento angular que facilita a centragem e entrada no material no estampo podem ser visualizados no desenho do estampo que segue anexo A.

Alojamento da matriz inferior

Alojamento do punção



Figura 5.46 – Foto do estampo da etapa de "ironing" vista por cima.

A figura 5.48 apresenta o estampo de ‘ironing’ montado em prensa hidráulica, onde se pode perceber o acionamento por botoeiras e o conjunto de micro-switches que é utilizado para regulagem do curso de trabalho do pistão. Percebe-se também pela figura que o estampo é composto de três colunas guia e que entre a base de fixação do estampo e a base da prensa esta localizada a área de descarga do produto.

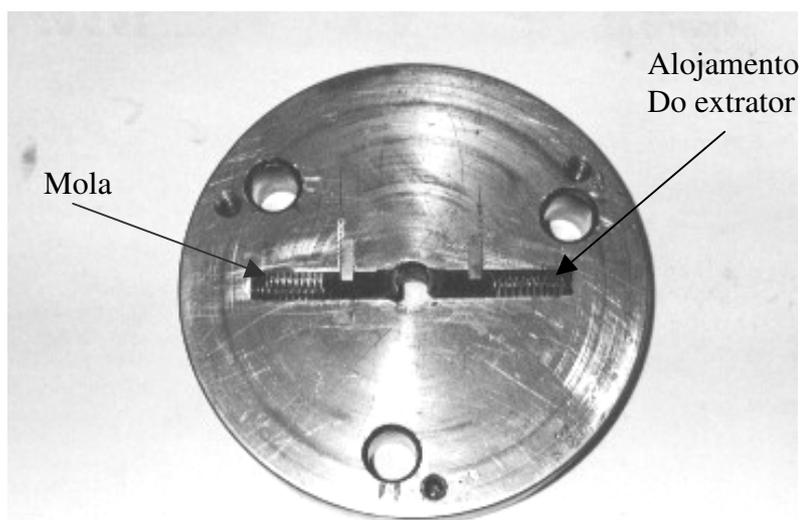


Figura 5.47 - Foto do sistema de extração do estampo da etapa de 'ironing'.

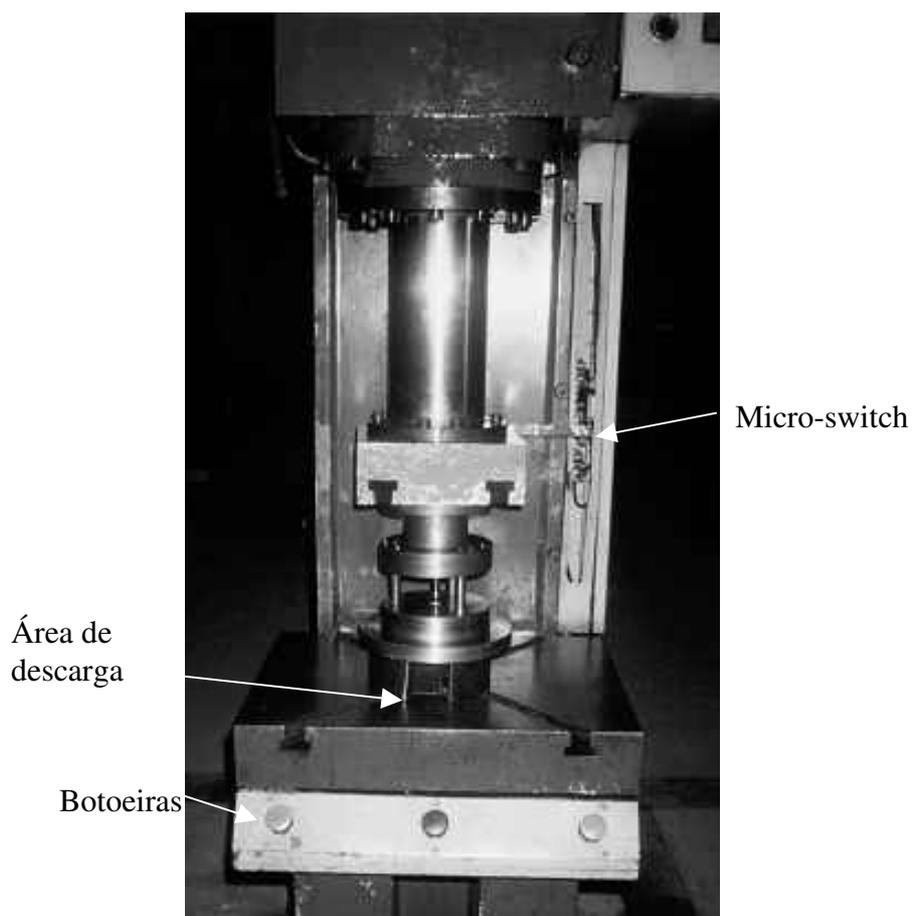


Figura 5.48 - Foto do estampo da etapa de 'ironing' montado em prensa hidráulica.

A figura 5.49 apresenta a foto do produto obtido após o teste do estampo, percebe que a forma final do produto foi atingida de acordo com a figura 4.2.

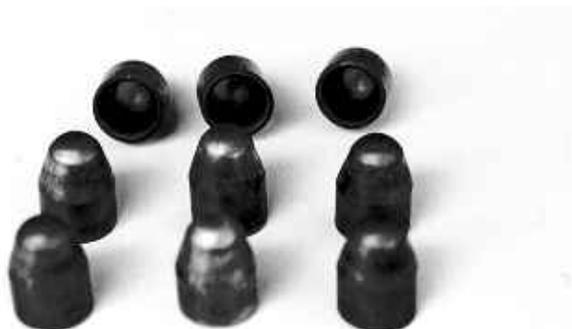


Figura 5.49 – Foto do produto obtido após o teste do estampo de ‘ironing’.

5.8. Análise Econômica.

A avaliação do método de conformação mecânica a frio proposta para a fabricação das pontas foi realizada através da análise da qualidade dos produtos conformados e da taxa de produção.

Na análise macroscópica das peças obtidas não foi possível detectar quaisquer problemas superficiais. Os testes em serviço realizados pelo usuário indicaram um bom desempenho no tocante a resistência mecânica, condutividade térmica e elétrica. Na avaliação da vida útil as peças forjadas apresentaram melhor desempenho que as peças usinadas.

Na tabela V.5 são apresentadas as dimensões do tarugo necessárias para a fabricação das peças por usinagem e pela conformação proposta. Os dados indicam uma economia de material nas pontas forjadas da ordem de 50% em relação as pontas usinadas.

Tabela V.3 – Dimensões necessárias na fabricação por peça

Método	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
Usinagem	16	24
Forjamento	16	12

Os valores de tempo necessários para fabricar cada ponta em uma dada etapa do processo, assim como os maquinários empregados, podem ser visualizados na tabela V.4. Calcula-se, a partir desses dados, que para a produção de uma peça é necessário um tempo total de conformação de 27 segundos. Considerando a etapa de acabamento final e as especificidades de cada operador, pode-se considerar que o tempo de fabricação da peça fica em torno de 35 segundos. Comparando-se este valor com os 120 segundos necessários para produzir a peça por usinagem, verifica-se que o método proposto é de grande eficácia.

Tabela V.4 – Taxas de produção e maquinário utilizado em cada etapa do forjamento

Etapas	Taxa de Produção (segundo/peça)	Maquinário Utilizado
Corte do tarugo	3	Prensa excêntrica 22 tolenadas
Calibração	3	Prensa excêntrica 22 tolenadas
Pré-forma	10	Prensa hidráulica de simples efeito
Forma cônica	5	Prensa excêntrica 100 tolenadas
Etapa de "ironing"	6	Prensa hidráulica semi/automática

A análise de custo da peça produzida pode ser feita através da equação 5.1:

$$C_T = C_M + C_F \quad (5.1)$$

Onde C_T é o custo total, C_M é o custo do material e C_F é o custo de fabricação, sendo que no custo de fabricação é computado o tempo gasto na fabricação e valor hora máquina. Os valores relativos desses custos tanto para fabricação da ponta por conformação como por usinagem são apresentados na tabela V.5.

Tabela V.5 – Custo total e parcial da ponta fabricada por usinagem e forjamento, em valores relativos a unidade

Custo		Ponta Usinada	Ponta Forjada
Material		1	0,50
Fabricação	Tempo	1	0,3
	Hora Máquina	1	0,50
Total		3	1,30

Observa-se que a fabricação das pontas por conformação promove uma economia de aproximadamente 56% no custo total.

Na análise econômica realizada não foram computados custos adicionais como preparação das matrizes e setup das prensas referente ao processo de forjamento. No processo de usinagem, por sua vez não foram computados custos adicionais como preparação da programação numérica dos tornos e afiação periódica de suas ferramentas cortantes.

6. CONCLUSÕES

O resultado de simulação, obtido por meio do método de elementos finitos, foi eficaz no presente trabalho. Na avaliação do preenchimento de material na matriz, o deslocamento dos nós na malha de elementos finitos indicou o fluxo do material durante o processo. A avaliação da distribuição das tensões e deformações na peça ao longo do processamento também foi obtida através do método, possibilitando a análise das regiões mais solicitadas durante a conformação. Pode-se ainda avaliar o surgimento de trincas, por meio da utilização do critério de dano Cockroft & Latham normalizado.

Os inúmeros ensaios realizados indicaram que a conformação mecânica a frio é uma alternativa técnica para a produção da ponta intercambiável. Também foi comprovado que as mesmas, quando obtidas no processo de conformação a frio, utilizando-se a liga cobre-cromo, apresentam uma economia de material e grande agilidade de produção, ou seja, há uma melhora da qualidade e desempenho do produto e uma significativa redução de custos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar a possibilidade de redução das etapas de fabricação das pontas intercambiáveis.

Estudar a influência e a viabilidade do uso de lubrificante na carga, no acabamento, no controle dimensional na fabricação da ponta intercambiável.

Modelar em elementos finitos a fabricação de outros modelos de pontas intercambiáveis utilizados em grande escala.

Estudar a influência do tratamento de envelhecimento na resistência das pontas intercambiáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MACHADO, I. G. Soldagem por Resistência Elétrica. In: MACHADO, I. G. *Soldagem e Técnicas Conexas: Processos*. Porto Alegre: 1996. cap. 11, p. 244-267.
- (2) GRÜNING, K. *Técnica da Conformação*. São Paulo: Polígono S.A., 1973. 11p.
- (3) REHDER, H. *Eletrodos para Soldas por Resistência – Curso de Soldagem*. 14^a ed. São Paulo: ABM, 1979. p. 657-701.
- (4) BRACARENSE, A. Q. *Processo de Soldagem por Resistência*. Belo Horizonte: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG. 2000. 01-18p.
- (5) KAISER, J. G.; DUNN, G. J. and EAGAR, T. W. The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding. *Welding Research Supplement*, Massachusetts, p. 167s-174s, June 1982.
- (6) BAKER, J. C. and MEITZNER, C. F. Resistance Welding of Galvalume Sheet Steel. *Welding Journal*, Pennsylvania, p. 21-28, June 1982.
- (7) AZAMBUJA, S. e BARCELOS, E. J. Soldagem de Chapas Zincadas Convencionais pelo Processo a Ponto por Resistência Elétrica. *Associação Brasileira de Soldagem*. São Paulo, nº . 18, p. 1-18, out/dez. 1987.
- (8) Metals Handbook. – Heat Treating of Copper and Copper Alloys. p. 239-260.
- (9) FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. 9^a ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1995. vol. 1. 751 p.
- (10) MARTY, C. *Usinages par Procédés non Conventionnels*. Paris: Masson, 1971.

- (11) WELLER, E. S. *Nontraditional Machining Processes*, SME, 1984.
- (12) CRUZ, C., 1999. *Usinagem Não Tradicional*, Apostila, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- (13) MACHADO, A. *Comando Numérico Aplicado às Máquinas-Ferramentas*. 2ª ed. São Paulo: Ícone, 1987. 396p.
- (14) MACCORMACK, C. and MONAGHAN, J. Failure analysis of cold forging dies using FEA. *Journal of Materials Processing Technology*, Dublin, n. 117, p.209-215, set. 2001.
- (15) ALTAN, T. and GEGEL, S. OH. H. *Metal Forming; Fundamentals and Applications*. 231 p.
- (16) CETLIN, P. R., *Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 100 p.
- (17) DIETER, G. E. *Workability Testing Techniques*. Ohio: American Society for Metals. 1984. 294 p.
- (18) LANDRE, J. Jr. *Fraturas no Forjamento a Frio de Metais*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2001. (Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- (19) AVITZUR, B. *Handbook of metal forming process*, John Wiley, New York, 1983.
- (20) MESQUITA, N. G. M.; Melo, I. V. *Fatores de Influência sobre as superfícies de peças forjadas – Forjamento de precisão*, pág. 308-314, *Metalurgia e Materiais*, abril 1995.

- (21) ALMEIDA, T. J. *Estudo da Conformabilidade de Chapas de Aço Livre de Intersticiais em Prensas Hidráulicas de Simples Efeito*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1998. 90p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).
- (22) ODELL, E. I. A Study of Wall Ironing by the Finite Element Technique, *Journal of Engineering for Industry*, v. 100, p. 31-36. 1978.
- (23) DINIZ, R. O. *Estudo da Conformabilidade de Chapas de Aço Livre de Intersticiais em Processamento por "Ironing"*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000. 131p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).
- (24) SCHÜNEMAN, M.; AHMETOGLU, M. A., ALTAN, T. Prediction of Process Conditions in Drawing and Ironing of Cans, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 59, p. 1-9. 1996.
- (25) KAWAI, N., SAITO, M., SAIKI, H. Experimental Analysis of Ironing of Thin Metal Cups, *ASME Journal of Engineering for Industry*, v. 111, p. 56-64, 1989-1.
- (26) BEZERRA, K. Ironing Extends Deep Drawing Process for High Quality Tubular Components, *Aluminium Today*, v. 6, p. 42. 1994.
- (27) BAILLET, L., BRUNET, M. E BERTHIER, Y. Experimental and Numerical Dynamic Modeling of Ironing Process, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 60, p. 677-684, 1996.
- (28) KAWAI, N.; DOHDA, K.; SAITO, N.; HAYASHI, M., WANG, Z. Friction Behavior in the Cup Ironing Process of Aluminum Sheets, *ASME Journal of Engineering for Industry*, v. 114, p. 175-180, 1992.

- (29) MURAKI, M., NAKAMURA, T. Frictional Behavior of Lubricants During Deep Drawing and Ironing Processes for Zinc-Coated Steel Sheets, *Journal of Engineering Tribology Proceedings*, v. J210, p. 189-197, 1996.
- (30) MURTY, S. S. N., SEKHAR, V. C. Experimental and Theoretical Investigation of the Flexible-Mandrel Ironing Process, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 41, p. 213-226, 1994.
- (31) CHANG, D. F. An Analytical Model of the Ironing Process Including Redundant Work Effect, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 75, p. 253-258, 1998.
- (32) KUDO H., Some analytical and experimental studies of axisymmetric cold forging and extrusion - I, *Int. J. Mech. Sci.*, 2, 102, 1960.
- (33) KUDO H., Some analytical and experimental studies of axisymmetric cold forging and extrusion - II, *Int. J. Mech. Sci.*, 3, 91, 1961.
- (34) HALLING J. and MITCHELL L., An upper bound solution for axisymmetric extrusion, *Int. J. Mech. Sci.*, 7, 1965.
- (35) AVITZUR B., Metal forming: processes and analysis, *McGraw Hill*, New York, 1968.
- (36) MCDERMOTT R. P. and BRAMLEY A. N., An elemental bound technique for general use in forging analysis, *Proc. 15th Int. MTDR Conf.*, 1974.
- (37) YANG D. and LEE C., Analysis of three-dimensional extrusion of sections through curved dies by conformal transformation, *Int. J. Mech. Sci.*, 20, 541, 1978.

- (38) BARATA MARQUES M. J. M., Hydrostatic extrusion of tubes, *Ph.D. Thesis, Imperial College, London, 1980.*
- (39) NAGPAL V. and ALTAN T., Analysis of three dimensional metal flow in extrusion of shapes with the use of dual stream functions, *Proc. 3rd NAMRC, 1975.*
- (40) BARATA MARQUES M. J. M., Analysis of tube extrusion by a flow function, *1st Int. Conf. Comp. Plast., Barcelona, 1989.*
- (41) TURNER M., CLOUGH R., MARTIN H. and TOPP L., Stiffness and deflection analysis of complex structures, *J. Aero. Science, 23, 805, 1956.*
- (42) ARGYRIS J. H. and KELSEY S. Energy theorems and structural analysis, *Butterworth Scientific Publications, London, 1960.*
- (43) CLOUGH R. The finite element method in plane stress analysis, *J. Struct. Div. ASCE, Proc. 2nd Conf. Elec. Comp., 345, 1960.*
- (44) MARÇAL P. V. and KING I. P. Elastic Plastic analysis of two dimensional stress systems by the finite element method, *Int. J. Mech. Sci., 9, 143, 1967.*
- (45) YAMADA Y., YOSHIMURA N. and SAKURAI T. Plastic stress-strain matrix and its application for the solution of elastic plastic problems by the finite element method, *Int. J. Mech. Sci., 10, 343, 1968.*
- (46) ZIENKIEWICZ O. C., VALLIAPPAN S. and KING I. P. Elasto plastic solutions of engineering problems by an 'initial stress' finite element approach, *Int. J. Num. Meth. Engn., 1, 75, 1969.*

- (47) LEE C. H. and KOBAYASHI S. Analysis of axisymmetric upsetting and plane-strain side pressing of solid cylinders by the finite element method, *Trans. ASME, J. Engn. Industry*, 93, 445, 1971.
- (48) LEE C. H. and KOBAYASHI S. New solutions to rigid plastic deformation problems using a matrix method, *Trans. ASME, J. Engn. Industry*, 95, 865, 1973.
- (49) CORNFIELD G. C. and JOHNSON R. H. Theoretical prediction of plastic flow in hot rolling including the effect of various temperature distributions, *J. Iron and Steel Inst.*, 211, 567, 1973.
- (50) ZIENKIEWICZ O. C. and GODBOLE P. N. Flow of plastic and viscoplastic solids with special reference to extrusion and forming processes, *Int. J. Num. Meth. Engn.*, 8, 3, 1974.
- (51) WANG N. M. A variational method for problems of large plastic deformation of metal sheets, *General Motors Research Publication*, GMR-1038, 1970.
- (52) KOBAYASHI S. and KIM J. H. Deformation analysis of axisymmetric sheet metal forming processes by the rigid-plastic finite element method, *Mechanics of sheet metal forming*, Plenum Press, 341, 1978.
- (53) OÑATE E. and ZIENKIEWICZ O. C. A viscous shell formulation for the analysis of thin sheet metal forming, *Int. J. Mech. Sci.*, 25, 305, 1983.
- (54) TOH C. H. and KOBAYASHI S. Finite element process modelling of sheet metal forming of general shapes, *First Symposium on Grundlagen der Umformtechnik*, 39, 1983.
- (55) KECK P., WILHELM M., LANGE K. and HERRMANN M. Comparison of different finite element models for the simulation of sheet metal forming, *Third*

International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, NUMIFORM 89, USA, 481, 1989.

- (56) WAGONER R. H., NAKAMACHI E. and GERMAIN Y. Experience with explicit and implicit finite element programs for sheet metal forming analysis, Modelling of Metal Forming Processes, Euromech 233, France, 131, 1988.
- (57) HIBBIT H. D., MARÇAL P. V. and RICE J. R. A finite element formulation for problems of large strain, large displacement, Int. J. Solids and Struct., 6, 1069, 1970.
- (58) MCMEEKING R. M. and RICE J. R. Finite element formulation of problems of large elastic-plastic deformation, Int. J. Solids and Struct., 11, 601, 1975.
- (59) MATTIASSON K, BERNSPANG L., HONECKER A., SCHEDIN E., HAMMAN T., MELANDER A. On the use of explicit time integration in finite element simulation of industrial sheet forming processes, FE-simulation of 3-D sheet metal forming processes in automotive industry, VDI Berichte Nr. 894, 479, 1991.
- (60) HUO T and NAKAMACHI E. Evaluation of dynamic explicit/elasto viscoplastic finite element method in sheet forming simulation, Numerical simulation of 3-D sheet metal forming processes-Verification of simulation with experiment, NUMISHEET'93, 173, 1993.
- (61) BRÄNNBERG N. and MACKERLE J. Finite element methods and material processing technology, Eng. Computations, 11, 413, 1994.
- (62) THOMSEN E. G., YANG C. T. and BIERBOWER J. B. An experimental investigation of the mechanics of plastic deformation of metals, Univ. California Pub. Engn., 5, 1954.

- (63) SHABAIK A. and KOBAYASHI S. Computer application of the viscoplasticity method, *Trans. ASME, J. Engr. Industry*, 339, 1967.
- (64) SHABAIK A. and THOMSEN E. G. Some additional studies of the mechanics of axisymmetric extrusion by the viscoplasticity method, *Ann. CIRP*, XVI, 41, 1968.
- (65) STECK E. Numerische behandlung von verfahren der unformtechnik, Institut fur Unformtechnik, Stuttgart University, 1971.
- (66) KEELER S. P. Understanding sheet metal formability, *Machinery Magazine*, February-July, 1968.
- (67) GOODWIN G. M. *Metall. Ital.*, 60, 767, 1968.
- (68) BODSWORTH C., HALLING J. and BARTON J. W. The use of paraffin wax as a model material to simulate the plastic deformation of metals, *J. Iron and Steel Inst.*, 185, 375, 1957.
- (69) WANHEIM T. The physical modelling of plastic working processes, *Proc. 1st. Int. Conf. Tech. Plasticity, Tokyo, II*, 984, 1984.
- (70) ARENTOFT M. Prevention of defects in forging by numerical and physical simulation, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, 1996.
- (71) OSAKADA K. and NIIMI Y. A study on radial flow field for extrusion through conical dies, *Int. J. Mech. Sci.*, 17, 241, 1975.
- (72) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro. NBR 6152. Materiais Metálicos - Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração. Rio de Janeiro, 1992. 13p.

- (73) DINIZ, O. R. *Estudo da Conformabilidade de Chapas de Aço Livre de Interciais no Processamento por "Ironing"*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2000. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).

Anexo A – Equipamentos pertencentes à Brasição e utilizados no experimento**A.1 – Torno Universal**

Marca: NARDINI

Modelo: NDT 650

Capacidades: Diâmetro útil: 650mm
Distância entre pontas: 1550mm
Rotação máxima: 2000rpm

Dados técnicos do Motor: Potência: 10CV
Rotação: 1750rpm
Tensão: 220V
Frequência: 60Hz

A.2 – Furadeira Frezadora

Marca: ROCCO

Modelo: KF 40 A

Capacidades: Diâmetro máximo de furo: 40mm
Curso máximo vertical: 200mm
Curso máximo horizontal: 400mm
Curso máximo transversal: 200mm
Rotação máxima: 3000rpm

Dados técnicos do Motor: Potência: 3CV
Rotação: 1750rpm
Tensão: 220V
Frequência: 60Hz

A.3 – Forno

Marca: LAVOISIER

Modelo: 400 L

Dados técnicos:

Temperatura máxima:	1200°C
Dimensões:	400 x 400 x 300mm
Potência:	15KVA
Corrente:	70A
Tensão:	220V
Frequência:	60Hz

A.4 – Retificadora Tangencial

Marca: EBERLE

Modelo: E 400/200

Capacidades:

Curso máximo vertical:	300mm
Curso máximo horizontal:	400mm
Curso máximo transversal:	200mm
Rotação máxima:	3500rpm

Dados técnicos do Motor:

Potência:	3CV
Rotação:	3500rpm
Tensão:	220V
Frequência:	60Hz

A.5 – Prensa Hidráulica

Marca: SIWA

Modelo: S 100

Capacidades:

Carga Máxima:	100tons
---------------	---------

Curso máximo: 400mm
Velocidade do êmbolo: 20mm/s
Diâmetro do cilindro: 250mm
Pressão máxima da bomba: 200bar

Dados técnicos do Motor: Potência: 5CV
Rotação: 1750rpm
Tensão: 220V
Frequência: 60Hz

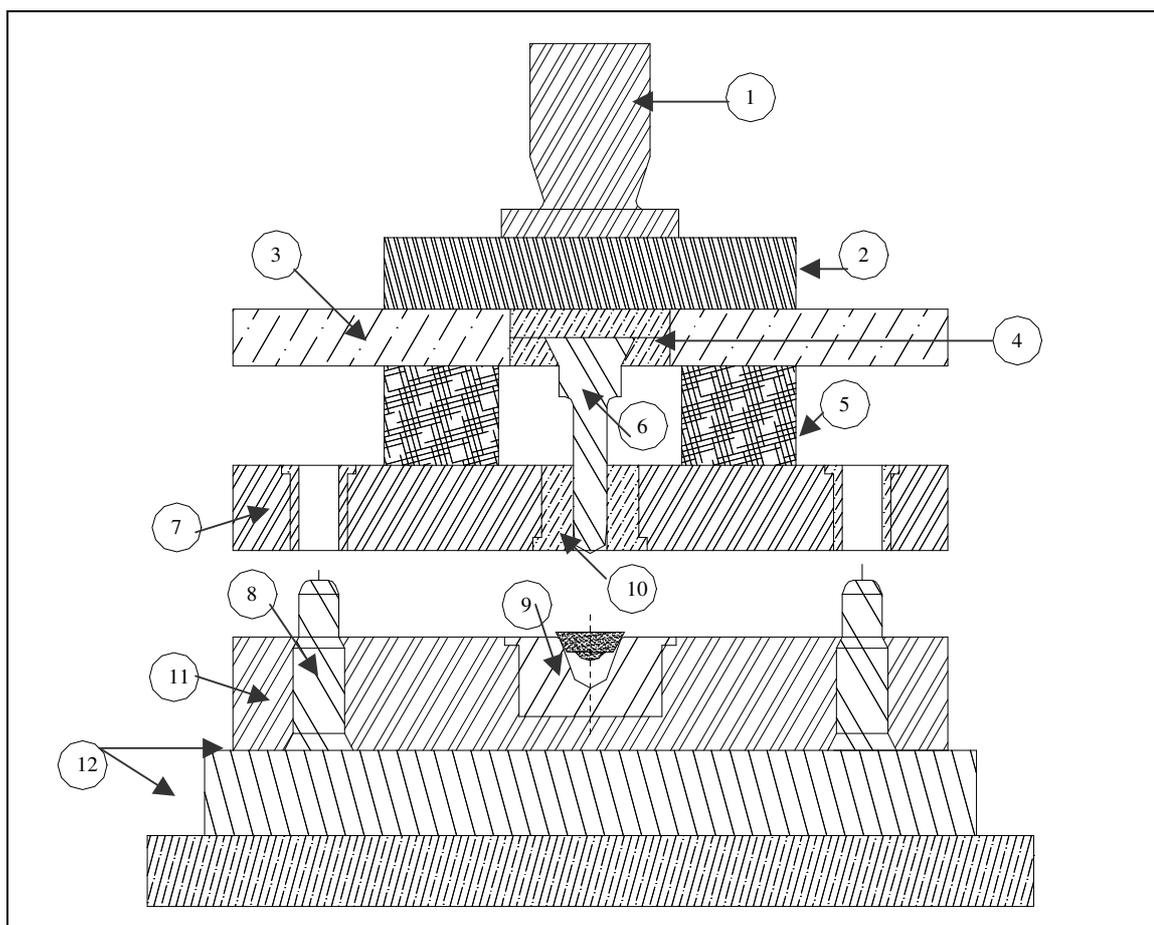
A.6 – Guilhotina

Marca: SORG
Modelo: S12/32

Capacidade: 1220 x 3,2mm em aço baixo carbono

Dados técnicos do Motor: Potência: 5CV
Rotação: 1750rpm
Tensão: 220V
Frequência: 60Hz

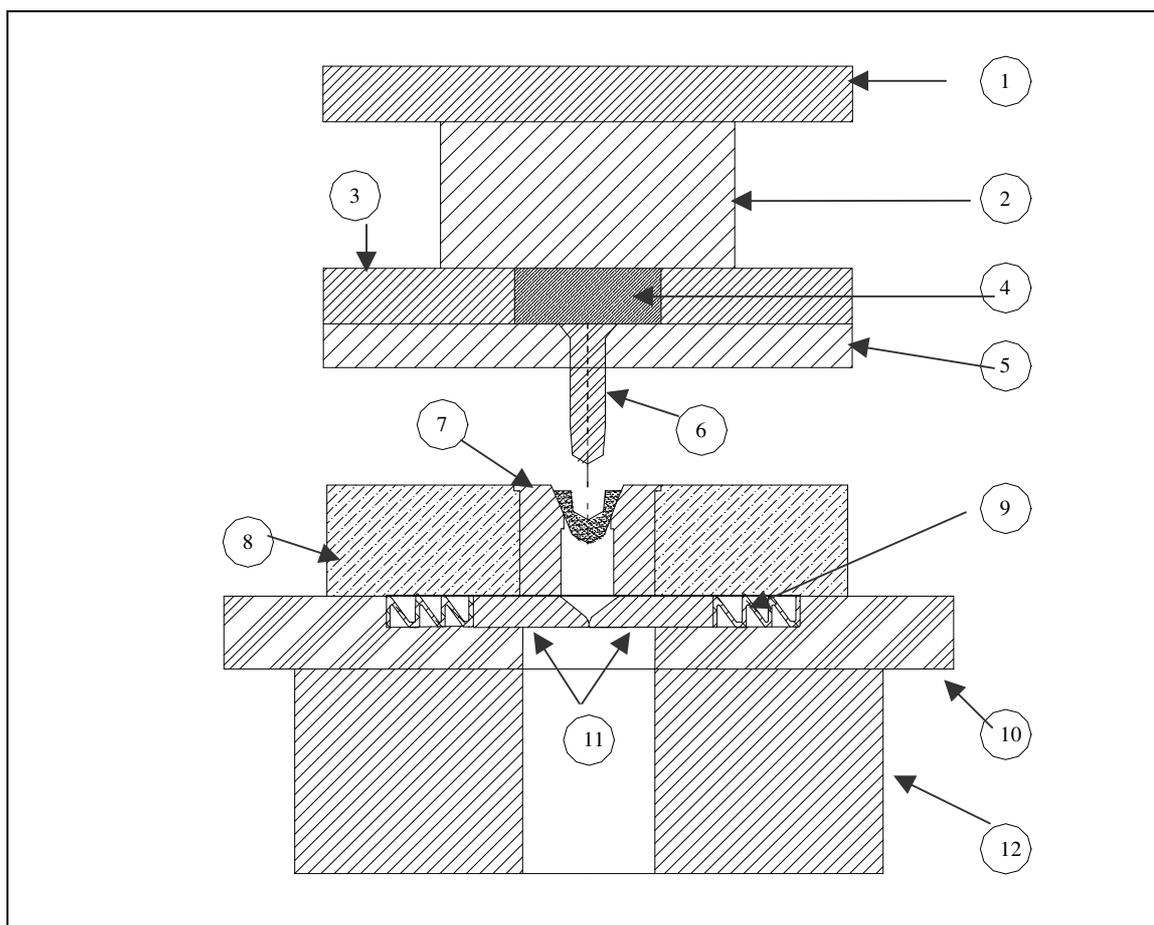
Anexo B – Desenhos das Matrizes.



12	Placas de fixação	SAE 1020	Normalizado
11	Placa Alojamento Matriz Inferior	SAE 1020	Normalizado
10	Bucha Porta Punção	VC131	Temperado e Revenido
9	Matriz Inferior	VND	Temperado e Revenido
8	Coluna Guia	VC 131	Temperado e Revenido
7	Placa Flutuante	SAE 1020	Normalizado
6	Punção	VND	Temperado e Revenido
5	Molas de Plastiplene	Plastiplene	-
4	Placa de Choque	VC 131	Temperado e Revenido
3	Alojamento Placa de Choque	SAE 1020	Normalizado
2	Porta Espiga	SAE 1020	Normalizado
1	Espiga para Fixação	SAE 1020	Normalizado
Item		Material	Observação

Ferramenta da Forma Cônica

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas



12	Placa Base Inferior	SAE1020	Normalizado
11	Extrator em Cunha	VND	Temperado e Revenido
10	Alojamento extrator e mola	SAE 1020	Normalizado
9	Mola	SAE 1070	Temperado e Revenido
8	Matriz Inferior	VC 131	Temperado e Revenido
7	Alojamento Matriz Inferior	SAE 1020	Normalizado
6	Punção	VND	Temperado e Revenido
5	Placa Porta Punção	SAE 1020	Normalizado
4	Placa de Choque	VC 131	Temperado e Revenido
3	Alojamento Placa de Choque	SAE 1020	Normalizado
2	Calço	SAE 1020	Normalizado
1	Placa Base Superior	SAE 1020	Normalizado
Item	Descrição	Material	Observação

Ferramenta da Etapa de “ Ironing “:

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

