

Erlano Campos dos Reis

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E
EXPERIMENTAL NA PRODUÇÃO DE UM
TERMINAL DO CABO DO FREIO DE MÃO EM
PRENSA HIDRÁULICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: José Rubens Gonçalves Carneiro

Belo Horizonte
2008

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

R375s

Reis, Erlano Campos dos

Simulação computacional e experimental na produção de um terminal do cabo do freio de mão em prensa hidráulica / Erlano Campos dos Reis. Belo Horizonte, 2008.
125f. : il.

Orientador: José Rubens Gonçalves Carneiro
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Bibliografia

1. Usinagem – Inovações tecnológicas. 2. Estampagem (Metais). I. Carneiro, José Rubens Gonçalves. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.7

Elaborada pela bibliotecária Erica Fruk Guelfi CRB 6/2068

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que tenho e sou nesta vida; por ter me dado força, garra, persistência e perseverança durante esta árdua, mas gratificante, empreitada.

Aos meus pais, Isaias Almeida Reis e Maria Madalena Reis, pela oportunidade da vida.

À minha esposa e companheira, Silvia, pelo apoio, carinho e compreensão durante esta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Jose Rubens, pela orientação, estímulo, amizade e otimismo.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelo convívio e ensinamentos transmitidos.

À Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, por disponibilizar toda a infra-estrutura necessária para a realização deste trabalho.

À Valéria, pelo grande apoio, do qual ficarei eternamente agradecido.

Aos meus amigos e amigas do Mestrado: Fabiano, Gilmar Cordeiro, Elizângela, Itamar, Paulo Henrique, Isabel, Weberson, André, Arnaldo, Vanessa, Valdomiro, Willian e Tarcisio, pelo apoio, convívio e momentos de descontração que irão deixar saudades.

RESUMO

A extrusão é um dos processos de conformação mais utilizados e se classifica a frente, a ré e lateral. A extrusão é feita em prensas hidráulicas ou mecânicas, resultando em peças de excelente controle dimensional, acabamento superficial com vantagens econômicas sobre a usinagem. Atualmente, apresenta-se desafio a análise por elementos finitos e simulações de processo de conformar materiais e suas propriedades mecânicas do ponto de vista teórico e prático (MACKERLE, J, 2004). Tem sido possível com relativo sucesso, a análise do processo de extrusão a frio bem como sua otimização ainda na fase de projeto. O forjamento é o termo genérico usado para descrever a aplicação prática da deformação plástica de diversos metais dentro de uma enorme variedade de formas controladas tecnicamente. Dependendo da forma desejada, a sua conformação requer vários estágios, sendo que cada estágio é responsável por uma pequena deformação. A constante busca da diminuição dos tempos de produção associado ao avanço tecnológico, fez com que se chegasse às máquinas multiestágios de forjamento a frio, produzindo, numa cadeia muito elevada, diversos componentes. No entanto, a obtenção da seqüência de produção ideal é complicada e, muitas vezes, obtida através de métodos empíricos, o que leva à realização de muitos testes e ajustes, que encarecem o projeto. Este trabalho avaliou as variáveis de processo bem como suas restrições no forjamento em matriz fechada de um terminal do cabo de freio de mão utilizado na indústria automobilística. Concluiu-se que a matéria-prima adequada para conformar o produto é o ABNT 1010 diferentemente do ABNT 12L14 e DIN 9SMn36, fabricação em 4 estágios em prensa hidráulica e economia de material de 72,5% com redução de custo de 62,54%.

Palavras-chave: Usinagem. Inovações Tecnológicas. Estampagem (Metais).

ABSTRACT

The extrusion is one of the forming processes most used and is classified in forward extrusion, backward extrusion and radial extrusion. The extrusion is done in hydraulic or mechanical presses, resulting in parts of excellent dimensional control, superficial finishing with economical advantages over machining. Currently, challenge is presented the finite elements analysis and the simulations of materials forming process and its mechanical properties from the theoretical and practical points of view (MACKERLE, 2004). It has been possible with relative success, the analyses of the cold extrusion process as well as its optimization still in the project phase. The forging is the general term used to describe the practical applying of the deformation plastic of many metals into a great variety of shapes technically controlled. Depending on the desired shape, the forming requires multistages, and each stage is responsible for a small deformation. The constant search for time reduction of associated production to the technological advance, made possibly reaching to the multistage cold forging machines, producing in a very high chain, diverse components. By the way, obtaining the ideal production sequence is complicated and, many times, is obtained through empirical methods, which takes it to many tests and adjusts, making the project more expensive. This paper evaluates process variable as well as its restrictions in forging in closed matrix of a handlebrake cable terminal used in the automobile industry. It was concluded that, the adequate raw material to form the product is the ABNT 1010 steel differently from the ABNT 12L14 steel and DIN 9SMn36 steel, made in 4 stages in hydraulic press and economy of material 72,5% with cost reduction of 62,54%.

Key-Words: Machining. Technological innovations. (Metal) stamping.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Visão conceitual do atrito como função da pressão de contato (WAGONER e CHENOT, 1996). Evolução do atrito em função da tensão normal ...	25
FIGURA 2 Tendências no desenvolvimento de engrenagens obtidas pelo processo de conformação a frio.....	32
FIGURA 3 Formas de escoamento no forjamento	33
FIGURA 4 Detalhe da matriz para a formação da rebarba	34
FIGURA 5 Diagrama esquemático de redes neurais artificiais aplicada em conformação de metal.....	35
FIGURA 6 Mudanças no comprimento e diâmetro de uma peça como resultado de dilatações elásticas e térmicas no forjamento	37
FIGURA 7 Exemplo do processo de extrusão invertida com modelo de malha (a) e radial no qual se mostra o tarugo inicial e a peça conformada (b)	41
FIGURA 8 Exemplo do processo de extrusão invertida e radial mostrando diâmetro do tarugo d_0 , diâmetro do flange, d_B , diâmetro do punção, d_{st} ; o altura do tarugo, h_1 ; altura da peça, h_{st} ; curso do punção, s ; raio da matriz, $r_1=r_2$	42
FIGURA 9 Fatores operacionais que afetam o processo de extrusão	43
FIGURA 10 Princípio de funcionamento de um torno automático de cabeçote fixo (a) e de um torno automático de cabeçote móvel (b).	46
FIGURA11 Etapas de uma simulação computacional envolvendo as três etapas de processamento.....	52
FIGURA 12 Dimensões em mm dos terminais obtidos após operação de usinagem.	55
FIGURA 13 Dimensões em mm dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de tração retirados no fio-máquina na direção de laminação.....	57
FIGURA 14 Dimensões das barras utilizadas na usinagem dos terminais.	61
FIGURA 15 Dispositivo de cobre utilizado na marcação eletrolítica dos corpos-de-prova conformados.....	62
FIGURA 16 Medição da posição dos círculos de marcação,utilizando-se máquina tridimensional.	63

FIGURA 17 Dimensão final do material na usinagem anterior à furação	64
FIGURA 18 Dimensão final do produto na usinagem após operação de torneamento e furação	65
FIGURA 19 Blanque obtido através do procedimento de corte.....	66
FIGURA 20 Amostras do aço ABNT 1010 (a) Din 9SMn36 (b), ABNT12L14 (c) ABNT 10B22 evidenciando a presença de ferrita, perlita, microinclusões e esferoidita (d). Ataque Nital 5% e picrato de sódio ; Aumento 200X.....	72
FIGURA 21 Evolução da tensão de fluxo com a deformação para os aços ABNT 1010 (a) e ABNT12L14 (b) obtida no ensaio de tração em uma velocidade de deformação de 0,2cm/min.....	73
FIGURA 22 Evolução da tensão de fluxo com a deformação para o aço ABNT 10B22 (a) esferoidizado e fosfatizado e DIN9SMn36 (b) obtida no ensaio de tração em uma velocidade de deformação de 0,2cm/min	74
FIGURA 23 Região compreendida entre o limite de escoamento e limite de resistência para os aços ABNT 10B22, ABNT 12L14 e DIN 9SMn36	76
FIGURA 24 Análise de fratura corpo-de-prova de 8,0mm obtido no sentido da laminação do aço ABNT 1010 com aumento de 500X (a) e 2000X (b).....	78
FIGURA 25 Análise de fratura em MEV em corpo-de-prova de Din9SMn36 (a) e ABNT12L14 (b) obtidos no sentido da laminação com aumento de 1000X (a) e 1000X (b).....	79
FIGURA 26 Análise de fratura em MEV em corpo-de-prova de ABNT 10B22 obtidos no sentido da laminação. Aumento : 500X (a) 1000X (b)	80
FIGURA 27 Fratura do punção mostrando início de formação e propagação (a) e partículas de carboneto com trincas e “deformadas” (b).	81
FIGURA 28 Análise de fratura em MEV em corpo-de-prova de aço ABNT D6 fraturado no processo de conformação. Aumento: (a) 100X (b)4000X.	82
A FIGURA 29 Apresenta desenho inicial das seis etapas consideradas necessárias para produção do terminal.....	83
FIGURA 30 Desenho definitivo das cinco etapas consideradas necessárias para produção do terminal.....	85
FIGURA 31 Apresenta a evolução da carga em função dos estágios de fabricação.	85
FIGURA 32 Alteração dimensional do punção do terceiro estágio.....	86
FIGURA 33 Região de fratura no microscópio de varredura (a) e mudança	

dimensional do punção(b).....	87
FIGURA 34 Detalhamento de trinca da figura 33 (b).....	88
FIGURA 35 Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e termino da simulação para o primeiro estágio (b).	89
FIGURA 36 Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e termino da simulação para o segundo estágio (b).....	90
FIGURA 37 Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e termino da simulação para o terceiro estágio (b)	91
FIGURA 38 Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e termino da simulação para o quarto estágio (b)	92
FIGURA 39 Apresenta curva carga versus deslocamento em diferentes ângulos na operação de extrusão invertida	93
FIGURA 40 Evolução da carga em função do ângulo do punção na operação de extrusão invertida	94
FIGURA 41 Deformações segundo os eixos X e Y ao longo da seção longitudinal da peça entre o corte e primeiro estágio.	95
FIGURA 42 Deformações segundo os eixos X e Y ao longo da seção longitudinal da peça entre o primeiro e o segundo estágios.	96
FIGURA 43 Deformações segundo os eixos X e Y ao longo da seção longitudinal da peça entre o segundo e o terceiro estágios	97
FIGURA 44 Deformações segundo os eixos X e Y ao longo da seção longitudinal da peça entre o terceiro e quarto estágios.	98
FIGURA 45 Evolução da microdureza da superfície e centro do fio-máquina ao longo do comprimento.....	99
FIGURA 46 Evolução da microdureza da superfície e centro para o primeiro estágio.	100
FIGURA 47 Evolução da microdureza da superfície e centro para o segundo estágio.	102
FIGURA 48 Evolução da microdureza da superfície e centro para o terceiro estágio.	102
FIGURA 49 Evolução da microdureza da superfície e centro para o quarto estágio.	103

FIGURA 50 Evolução da microdureza nos flanges no sentido da extremidade para o centro no quarto estágio.....104

LISTA DE QUADRO

QUADRO 1 Principais características de alguns softwares comerciais	51
--	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Velocidade máxima de trabalho para outros materiais	40
TABELA 2 Cálculo da carga para deformação de 30% (diâmetro de 9,52mm) nos diferentes equipamentos a partir da equação de regressão	60
TABELA 3 Cálculo da carga para deformação de 30% (diâmetro de 15,94mm) nos diferentes equipamentos a partir da equação de regressão	61
TABELA 4 Valores dos parâmetros utilizados na simulação das operações de extrusão	68
TABELA 5 Composições químicas em porcentagem em peso dos aços ABNT 1010, DIN9SMn36, ABNT12L14 e ABNT 10B22 utilizados nos experimentos	70
TABELA 6 Expressões de Hollomon para os aços DIN9SMn36, ABNT 12L14 e ABNT10B22	75
TABELA 7 Resultado do limite de escoamento, resistência e alongamento, para os aços ABNT 1010, ABNT 12L14, DIN 9 SMn36 e ABNT 10B22.....	77
TABELA 8 Dimensões iniciais para fabricação do terminal por usinagem e conformação.....	105
TABELA 9 Taxas de produção e equipamentos utilizados para o processo de usinagem.....	106
TABELA 10 Etapas de fabricação, taxa de produção e equipamentos utilizados para processo de conformação a frio do terminal.....	106
TABELA 11 Custo total de fabricação para 1000peças usinadas e conformadas...	107

LISTA DE SIGLAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

DIN- Deutsches Institut für Normung

T_h - Temperatura homóloga (Kelvin)

T - Temperatura da peça (Kelvin)

T_f - Temperatura de fusão do material (Kelvin)

K- Unidade de temperatura (Kelvin)

<- Menor

\leq - Menor ou igual

τ - Tensão de atrito (MPa)

μ - Coeficiente de atrito ou constante de Coulomb

m' - Fator de cisalhamento

σ_n - Tensão normal (MPa)

$\dot{\epsilon}$ — Velocidade de deformação (s^{-1})

k- coeficiente de resistência (MPa)

n- coeficiente de encruamento

$\bar{\epsilon}$ - deformação Verdadeira

σ_x – Tensão normal no eixo X (MPa)

σ_y – Tensão normal no eixo Y (MPa)

σ_z – Tensão normal no eixo Z (MPa)

τ_{xy} - Tensão de cisalhamento plano xy (MPa)

τ_{yz} - Tensão de cisalhamento plano yz (MPa)

τ_{zx} - Tensão de cisalhamento plano zx (MPa)

C – Constante

σ_1 – Tensão principal 1 (MPa)

σ_2 – Tensão principal 2 (MPa)

σ_3 – Tensão principal 3 (MPa)

U_0^D - energia elástica de distorção por unidade de volume (Joule/ m^3)

U_0^{D*} - Valor crítico característico do material (Joule/ m^3)

E - Módulo de Elasticidade (MPa)
v- Coeficiente de Poisson
P- Carga (t)
S- Golpe (golpe/min.)
T- Torque (N.m)
H- Capacidade de Torque (m)
t- Carga em tonelada
2r- Comprimento de curso (mm)
n- Número de golpes por minuto
v- Velocidade (m/min.)
d₀ - Diâmetro inicial (mm)
d_B - Diâmetro do flange (mm)
d_{st} - Diâmetro do punção (mm)
h_{st} - Altura da peça (mm)
s - Posição inicial
r₁ = r₂ - raio da matriz (mm)
R_a - Rugosidade média (μm)
R_{a0} - Rugosidade média inicial (μm)
Δ R_{a0} - Variação de rugosidade média inicial (μm)
σ_R - Limite de resistência (MPa)
Q_{MAX} - Carga máxima (kg)
S₀ - Área inicial (mm²)
Δ_S - Variação de área (mm²)
Δl - Variação de comprimento (mm)
l_{ff} - Comprimento final (mm)
l₀ - Comprimento inicial (mm)
θ - Coeficiente de encruamento
φ[%] - Deformação percentual (%)
h_i - Altura inicial (mm)
h_f - Altura final (mm)
ε₁ - Deformação verdadeira direção 1
ε₂ - Deformação verdadeira direção 2

d_{1x} - Diâmetro 1 na direção X (mm)

d_{2x} - Diâmetro 2 na direção X (mm)

d_{1y} - Diâmetro 1 na direção Y (mm)

d_{2y} - Diâmetro 2 na direção Y (mm)

ϕ - Diâmetro (mm)

C_T - Custo total (R\$)

C_M - Custo de matéria prima (R\$)

C_F - Custo de fabricação (R\$)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Generalidades	18
1.2 Objetivos	20
1.3 Estado da arte	20
1.4 Escopo da dissertação	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Elementos da teoria da plasticidade	23
2.2 Curva de fluxo	26
2.3 Critérios de escoamento	27
2.4 Encruamento	29
2.5 Processos de Fabricação	30
2.5.1 Forjamento de Metais	33
2.5.1.1 <i>Deformação elástica do sistema</i>	36
2.5.1.1.2 <i>Geração e transferência de calor no sistema</i>	38
2.5.1.1.3 <i>Equipamentos e métodos</i>	38
2.5.2 Extrusão de metais	40
2.6 Usinagem	44
2.7 Modelagem dos processos de conformação mecânica	47
2.8 Softwares comerciais de simulação computacional por elementos finitos	50
2.8.1.1 <i>Características funcionais do software Deform 2D®</i>	52
2.8.1.2 <i>Pré-processamento</i>	53
2.8.1.3 <i>Processamento</i>	53
2.8.1.4 <i>Pós-processamento</i>	54
3 METODOLOGIA	55
3.1 Análise química e metalográfica do material	56
3.2 Ensaio de tração	56
3.3 Calibração do manômetro da prensa	58
3.4 Usinagem do terminal para marcação eletrolítica	61
3.5 Usinagem do terminal	64
3.6 Fabricação das matrizes para conformação do terminal	66
3.7 Simulação numérica	67
4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS	70
4.1 Análise química / metalográfica, ensaios mecânicos	70
4.2 Simulação do forjamento do terminal	83
4.3 Simulação do forjamento do ABNT 1010	88
5 ANÁLISE ECONÔMICA	105

6 CONCLUSÕES	108
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
REFERÊNCIAS.....	111
ANEXOS	116
ANEXO A- CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO	117
ANEXO B- SEQÜÊNCIA DE FABRICAÇÃO.....	119
ANEXO C- DESENHOS DAS MATRIZES DE FABRICAÇÃO	121
ANEXO D- PUNÇÕES	125

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Conformação de metal é um processo amplamente usado em fabricação em razão do mínimo desperdício, precisão dimensional e propriedades mecânicas ajustadas. Os processos de conformar os materiais são divididos em compressão direta, indireta, tração, dobramento e cisalhamento. Dentre os processos de compressão indireta têm-se trefilação, extrusão e embutimento. Extrusão é o processo pelo qual um bloco de material é reduzido na seção transversal por forçá-lo através de um orifício sob alta pressão. Em razão das elevadas forças envolvidas, a maioria dos materiais são extrudados a quente onde a resistência à deformação é baixa. O processo de extrusão a frio (direto e indireto), é possível para muitos materiais e constitui importante alternativa de processo comercial (DIETER, 1976).

A extrusão é feita em prensas hidráulicas ou mecânicas. Extrusão a frio se relaciona com a conformação a frio de arames e barras para produção de peças tais como eixos, pinos, parafusos e terminais para indústria automobilística. Conformação a frio resulta em alta produção de peças de material de custo baixo com excelente controle dimensional e acabamento superficial. A conformação a frio apresenta vantagens econômicas sobre a usinagem, tais como: economia de material, produtividade e custo operacional.

Os aços mais utilizados na conformação a frio são os aços de baixo carbono tais como ABNT 1010, em substituição aos aços usinados (ABNT 12L14 e DIN 9SMn36) e de baixa liga tratados termicamente (ABNT 10B22). Todos esses aços (exceção do ABNT1010 e ABNT 10B22) são usualmente empregado para fabricação dos terminais em processo de usinagem. Alguns parâmetros que influenciam a conformabilidade de arames foram analisados tais como a composição química, desoxidação, microestrutura, qualidade da superfície, revestimento superficial e velocidade do recalque (WEIDIG, *et al.* 1995; MACCAGNO, *et al.*1993, OCHIAI, *et al.* 1994). A fabricação da matéria-prima conformada a frio deve propiciar ausência

de defeitos antes da operação através do controle de processo e recondicionamento por escarfagem. Os principais defeitos que podem ocorrer na conformação são de forma, dobras, defeitos de preenchimento, trincas e marcas em decorrência da matriz que prejudica o desempenho da peça em serviço.

O aprimoramento da técnica de conformação a frio envolve algumas dificuldades devido ao grande número de parâmetros constituintes do processo. Parâmetros de processo preferidos incluem menor número de etapas de conformação, menos ferramentas abrasivas, menos lubrificação e a estabilização do processo com o mínimo de rejeito possível. A conformação a frio pode se valer dos testes experimentais como um método de desenvolvimento, acarretando com isso, altos custos.

As prensas mecânicas são de alta produtividade e elevado custo inicial em comparação às prensas hidráulicas. Justifica-se, portanto, este trabalho pela possibilidade que a simulação por elementos finitos proporciona em termos de se analisar as restrições do forjamento do terminal do freio de mão feito em prensa hidráulica em detrimento à prensa mecânica de alta velocidade de deformação em aços utilizados, na condição de conformado a frio ou submetido à operação de tratamento térmico.

A modelagem computacional de cada estágio do processo de conformação pelo método de elementos finitos pode tornar o projeto da seqüência mais rápido e eficiente, decrescendo o uso dos métodos convencionais de “tentativa e erro” (LIMA, *et al.* 2000). A existência de um banco de dados obtido experimentalmente e em combinação com “software” específico de simulação de forjamento potencializa o valor da simulação, e, mais importante, a velocidade de desenvolvimento do processo. O presente estudo empregou a modelagem numérica via elementos finitos e métodos experimentais na fabricação de terminal extrudado a frio em prensa hidráulica, para verificar a viabilidade da substituição da usinagem pela conformação a frio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar por meio do método de elementos finitos, utilizando-se o software comercial Deform 2D[®] e simulação física a possibilidade de obtenção em prensa hidráulica de simples efeito um terminal do cabo do freio de mão.

1.2.2 Objetivos específicos

- A substituição do processo de fabricação por usinagem do terminal do cabo de freio de mão por extrusão em prensa hidráulica;
- Avaliação comparativa do processo experimental e numérico, com relação à infra-estrutura necessária e matérias-primas utilizadas;
- Avaliar a evolução dimensional e de carga em função dos diferentes ângulos do punção.

1.3 Estado da arte

A extrusão é um dos processos de conformação mais utilizados dentre diferentes processos e sua história industrial data do século XVIII. Um tarugo é colocado em uma matriz e pressionado pelo punção, causando o fluxo do metal através da abertura da matriz. Pode-se classificar em a frente, a ré e lateral. A extrusão lateral algumas vezes chamada radial oferece um produto com a seção central saliente tendo protuberância completas ou segmentadas. O trabalho de pesquisa para extrusão lateral não é tão abundante quanto para extrusão a frente e

invertida (AKATA, *et al.* 2005).

Atualmente, apresenta-se o desafio pela análise por elementos finitos e simulações de processo de conformar materiais e suas propriedades mecânicas do ponto de vista teórico e prático (MACKERLE, 2004).

Os softwares de simulação numérica estão se mostrando poderosas ferramentas, sendo crescente sua aceitação em análises de processos de fabricação. Necessita-se reduzir os custos de aquisição e aliar os conhecimentos teóricos sobre elementos finitos com a experiência em processo. Neste panorama, inúmeros trabalhos foram publicados e implementados na análise dos mais diversificados problemas e processos de conformação (MACKERLE, 2004).

A modelagem matemática para simulação de fluxo e deformação de ligas foi aplicada à extrusão e recalque. Observou-se que avanços na obtenção de equações constitutivas foram necessários, enquanto que características de deformação, forças envolvidas e defeitos estiveram de acordo com a modelagem (ALTAN, *et al.* 1997). Simulação em 3D tem limitações e não se aplica em todas as situações e, também, ainda não é capaz de prever a microestrutura e propriedades do material conformado. Ferramentas de simulação de processo têm expandido sua capacidade além da modelagem de deformação com o intuito de alcançar uma desejável combinação de microestrutura, propriedades mecânicas, tensões residuais e exatidão dimensional no produto final. A modelagem de tratamento térmico que envolve diversos aquecimentos e ciclos de resfriamento em linha com a conformação está sendo estudada para ligas metálicas.

1.4 Escopo da dissertação

Este trabalho avaliar por meio do método de elementos finitos, utilizando-se o software comercial Deform 2D[®] e simulação física a possibilidade de obtenção em prensa hidráulica de simples efeito um terminal do cabo do freio de mão. apresenta um estudo experimental do comportamento dos aços ABNT 1010, ABNT 12L14, ABNT 10B22 e DIN 9SMn36 submetidos ao processo de extrusão a frio.

No Capítulo 2 foram identificados alguns trabalhos de pesquisadores que estudaram o tema. Abordaram-se conceitos metalúrgicos, de plasticidade, dos processos de fabricação por conformação mecânica, algumas características de alguns softwares comerciais de simulação computacional e das características de uma simulação computacional.

No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia e todo aparato experimental utilizados para a realização dos testes.

No Capítulo 4 apresenta-se os resultados experimentais dos testes realizados, através de gráficos, acompanhados de comentários e análises pertinentes.

No Capítulo 5 apresenta-se a análise econômica.

No Capítulo 6 apresenta-se a conclusões.

No Capítulo 7 apresenta-se a sugestões para trabalhos futuros.

No Capítulo 8 apresenta-se a referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Elementos da teoria da plasticidade

Os materiais de engenharia são utilizados em aplicações onde se necessita de resistência mecânica. As diferenças entre as classes de materiais como ligação química e microestrutura afetam o comportamento mecânico originando as vantagens e desvantagens entre os materiais.

A deformação elástica não se associa à quebra de ligações químicas entre os átomos em um sólido. Se uma carga externa for aplicada a um material, a distância entre os átomos se altera por uma quantidade que depende do material e de sua estrutura e ligação. Essas distâncias, quando acumuladas sobre um pedaço de material de tamanho macroscópico, são chamadas deformações elásticas. A deformação plástica, na maioria das vezes ocorre pelo movimento de discordâncias sob influência de tensões cisalhantes e de átomo a átomo de uma vez e, muitas vezes, concentradas em bandas de escorregamento. Como resultado da deformação plástica, os átomos mudam de vizinhos, retornando à configuração estável com novos vizinhos após a passagem da discordância. A deformação plástica não é um processo reversível como a deformação elástica, depende da maneira segundo a qual é exercida a solicitação mecânica para se atingir o estado final (DOWLING, 1993). A plasticidade depende da história, o que significa que solução analítica inexistente, contrastando com a elasticidade.

A finalidade de aplicar a teoria de plasticidade na conformação de metais é investigar os mecanismos de deformação plástica nesses processos. Os mecanismos de deformação fornecem os meios para determinação como o metal flui, como a geometria desejada é obtida pela deformação plástica e quais são as propriedades mecânicas esperadas da peça produzida. A fim de chegar a uma descrição matemática gerenciável da deformação de metais, diversas hipóteses simplificadoras são feitas (ALTAN, *et al.* 1983):

- deformações elásticas são negligenciadas com exceção da recuperação elástica em dobramento e deflexão de matriz em forjamento de precisão;
- o material é considerado contínuo e o volume é constante;
- dados dos testes de tração e compressão uniaxiais correlacionam-se com a tensão de fluxo em condições de deformação multiaxiais;
- anisotropia e efeito Bauschinger são negligenciados;
- atrito é expresso pela lei de Coulomb ou por uma tensão de cisalhamento constante.

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):

$$T_h = T / T_f \quad (2.1)$$

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

Classicamente, o processo é considerado a quente para $T_h \geq 0,5$, a morno para $0,3 < T_h < 0,4$ e a frio quando $T_h \leq 0,3$. 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.

Na conformação de metal, o fluxo de metal é causado pela pressão transmitida da ferramenta à peça. As condições de atrito na interface material/matriz influenciam o fluxo, a formação de defeitos superficiais e internos, tensões atuantes na matriz, e necessidade de carga e energia. Há três condições básicas de lubrificação que governam a conformação de metais que são a seco, hidrodinâmicas e de contorno. A fim de avaliar o desempenho de vários lubrificantes e prever as pressões de conformação, utilizam-se as Equações 2.2 e 2.3.

$$\tau = \mu \sigma_n \quad (2.2)$$

ou

$$\tau = f \bar{\sigma} = m' \bar{\sigma} \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

onde $0 \leq m' \leq 1$.

A Equação 2.2 indica que a tensão de fricção (τ) é proporcional à tensão normal (σ_n) na interface matriz/material. A Equação 2.3 expressa que (τ) depende da tensão de fluxo ($\bar{\sigma}$) do material e do fator de atrito (f) ou do fator de cisalhamento m' . Os valores de m' variam entre 0,05 e 0,15 na conformação a frio de aço, utilizando-se fosfato como sabão ou óleo como lubrificante. A lubricidade definida pelo fator m' é comumente avaliado pelo teste do anel (ALTAN, *et al.* 1983).

A Figura 1 mostra a visão conceitual do atrito como função da pressão de contato (WAGONER e CHENOT, 1996) e a evolução do atrito em função da tensão normal (HELMAN e CETLIN, 1983).

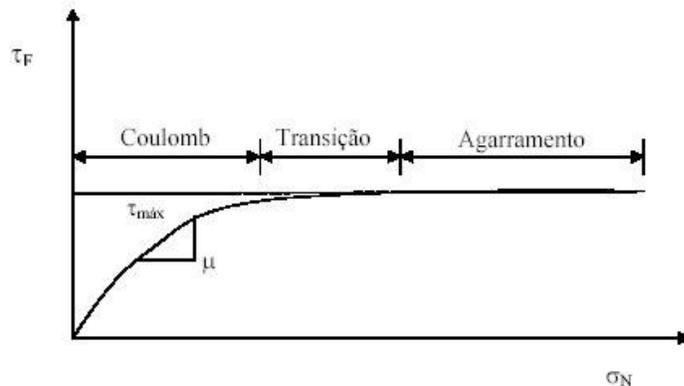


Figura 1: Visão conceitual do atrito como função da pressão de contato (WAGONER e CHENOT, 1996). Evolução do atrito em função da tensão normal
Fonte: Helman; Cetlin, 1983.

2.2 Curva de fluxo

A evolução da tensão com a deformação do material em certa temperatura, velocidade de deformação e microestrutura é chamada curva de fluxo. A curva de fluxo é um fator importante que afeta o comportamento à deformação plástica do material (XINBO, *et al.* 2002). Há três ensaios utilizados para determinação da curva de fluxo, isto é, tração, torção e compressão.

As curvas de fluxo de algumas ligas podem ser descritas pela expressão de Hollomon (Equação 2.4):

$$\sigma = k * \bar{\epsilon}^n \quad (2.4)$$

k- coeficiente de resistência

n- coeficiente de encruamento

As constantes k e n são determinadas a partir da linearização da curva tensão x deformação plástica verdadeira (equação 2.5).

$$\ln \sigma = n * \ln \bar{\epsilon} + \ln k \quad (2.5)$$

A velocidade de deformação é definida como

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt \quad (2.6)$$

O acréscimo na velocidade de deformação aumenta a tensão de escoamento, a temperatura do material e a lubrificação entre ferramenta e peça (DIETER, 1976).

A evolução da tensão com a velocidade de deformação pode ser descrita pela Equação 2.7:

$$\sigma = k' * \dot{\epsilon}^m \quad (2.7)$$

onde m é o índice de sensibilidade à velocidade de deformação. (ALTAN, *et al.*

1983) fornecem valores de k' e m para diferentes materiais nas diferentes temperaturas.

A equação completa que descreve a curva de fluxo é dada por:

$$\sigma = k * \varepsilon^n * \dot{\varepsilon}^m \quad (2.8)$$

2.3 Critérios de escoamento

Qualquer critério de escoamento é um postulado matemático que expressa o estado de tensões que induz o escoamento. A forma geral é dada por:

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}) = C \quad (2.9)$$

ou em termos das tensões principais:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = C \quad (2.10)$$

O critério de escoamento plástico de Tresca estabelece que a deformação plástica iniciar-se-á quando a máxima tensão de cisalhamento, associada ao estado de tensões causado pelo carregamento externo ($\tau_{máx}$), atingir um valor crítico, característico de cada material (Equações 2.11 e 2.12) (WAGONER e CHENOT, 1996).

$$\tau_{máx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_0 = \frac{\sigma_0}{2} \quad (2.11)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad (2.12)$$

Von Mises estabelece que a deformação plástica iniciar-se-á quando a energia elástica de distorção por unidade de volume (U_0^D), armazenada no material devido ao carregamento externo, atingir certo valor crítico característico do material (U_0^{D*}). Matematicamente, o critério afirma que a deformação plástica começará quando:

$$U_0^D = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] = U_0^{D*} \quad (2.13)$$

Para o caso de tração pura, no momento do escoamento vale a equação:

$$\sigma_1 = C_1; \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2.14)$$

que levada à Eq. (2.13), conduz a:

$$U_0^{D*} = \frac{1+\nu}{6E} (2\sigma_1^2) \quad (2.15)$$

O valor C_1 pode ser obtido em ensaios de tração, sendo possível obter U_0^{D*} para cada material. A expressão para o critério será então:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} = C_1 \quad (2.16)$$

O critério de uma forma geral pode ser:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 6C \quad (2.17)$$

Os valores para o escoamento previstos pelos dois critérios diferem no máximo em 15%, e ambos prevêem resultados próximos aos experimentais, com maior exatidão para as previsões do critério de Von Mises (WAGONER e CHENOT, 1996).

2.4 Encruamento

A deformação plástica provoca o fenômeno de chamado encruamento. O encruamento descreve o fenômeno pelo qual a resistência se altera durante a deformação plástica (DOHERTY, 1976). Sob o ponto de vista subestrutural, o encruamento é caracterizado pelo aumento na densidade de discordâncias e pelo tipo de arranjo no qual esses defeitos se apresentam. Durante a deformação plástica sempre estão presentes na rede cristalina as discordâncias. As discordâncias são necessárias para que ocorram mudanças de forma e/ou acomodações em regiões do cristal, nas quais ocorre deformação localizada como em contorno de grão. Outras discordâncias podem vir a acumular-se formando os emaranhados. O encruamento é tanto maior quanto maior for a dificuldade das discordâncias deslizarem e vencerem os campos de tensão gerados na rede cristalina por outras discordâncias existentes anteriormente. Esses bloqueios de discordâncias móveis originam os empilhamentos. A curva tensão-deformação é uma fonte de informação quantitativa relacionada às propriedades de encruamento do material. A modelagem do encruamento pode ser feita através de modelos mecanicistas e fenomenológicos (CARNEIRO, 2000).

O encruamento pode ser isotrópico, cinemático e geral. Wagoner e Chenot (1996) definem a superfície de escoamento e como esta se apresenta para cada um desses encruamentos. A superfície de escoamento de Von Mises não explicita o modelo de encruamento e como se desenvolve a superfície de escoamento com a deformação.

A tensão de fluxo, formulada como variável de estado é dependente dos parâmetros de conformação (deformação, velocidade de deformação e temperatura),

mas, nesse caso, não fornece resultados suficientemente precisos na simulação de processos. Isso ocorre devido às mudanças no material durante o esquema de deformação, que não são consideradas na obtenção das curvas tensão-deformação em laboratório (KARHAUSEN, 1992). A tensão de fluxo do material deve ser considerada como uma variável dependente da história termomecânica e não somente dos parâmetros de conformação. O efeito Bauschinger que ocorre na estrutura do estado trabalhado a frio exemplifica essa situação. Durante a deformação plástica, discordâncias vão se acumulando em barreiras, e eventualmente formam células. Quando a carga é retirada, as linhas de discordâncias não se movem apreciavelmente, pois a estrutura está mecanicamente estável. No entanto, quando a direção do carregamento é invertida, algumas discordâncias podem mover-se por uma distância apreciável sob a ação de tensões cisalhantes baixas, uma vez que as barreiras atrás das discordâncias não são fortes e próximas quanto as barreiras imediatamente à sua frente. Isso provoca um nível mais baixo da tensão de escoamento, quando a direção é invertida. Essa tensão de fluxo é função da estrutura existente e dos parâmetros de conformação.

2.5 Processos de Fabricação

A fabricação de peças pode ser classificada em cinco áreas gerais tais como processos de formação primários, conformação, corte, tratamento e junção (ALTAN, *et al.* 1983). Atualmente, diversas espécies de competição estão presentes, isto é, entre regiões, entre tecnologias e produtos, etc. A conformação a frio, em razão de sua economia de material, aumento de resistência, precisão geométrica dos componentes e altas taxas de produção, tornou-se uma das tecnologias de fabricação mais promissoras na produção de componentes automotivos. Contudo, dificuldades consideráveis podem ser encontradas em razão das elevadas tensões induzidas na peça e ferramentas por causa das cargas de conformação. A previsão e redução destas elevadas tensões no ferramental é de suma importância com efeito econômico significativo alcançado através de um acréscimo na vida dos elementos

do ferramental. A redução no nível de tensões no ferramental por modificações no projeto tem uma maior influência na vida da ferramenta (MCCORMACK, *et al.* 2001).

Os metais possuem características que permitem que sejam trabalhados de várias maneiras, quer seja em seu estado sólido ou a partir do estado líquido. O sistema de conformação de metais depende de 4 grupos de parâmetros influentes:

- matéria-prima - com sua macro e micro geometria, propriedades físicas e mecânicas;

- ferramenta - com sua forma, qualidade de superfície, rigidez, sensibilidade às dilatações térmicas, resistência ao desgaste e à carga;

- máquina de Conformação - com sua cinemática, rigidez e sensibilidade à transferência de calor;

- processo de Conformação - com parâmetros incluindo impacto de lubrificantes, distribuição de deformação, velocidade de deformação e temperatura na peça, expansão da superfície, transferência e geração de calor.

A complexidade e inter-relação dos parâmetros envolvidos, quando se planeja um sistema de conformação de metal e, também, o fato que a fabricação das ferramentas e seus testes podem ser onerosos e demorados leva à conclusão que experiência e fundamento teórico (simulação por elementos finitos, por exemplo) são essenciais para esse planejamento.

Kopp (1985) divide a simulação de processos em três níveis de acordo com os parâmetros objetivados:

- o primeiro nível inclui módulos para descrição integral da deformação verdadeira, carga, resistência à deformação, tensão média, pressão e temperatura média. Os modelos são baseados na teoria elementar de plasticidade;

- no segundo nível, módulos com métodos de cálculo baseados no volume de um elemento contínuo são necessários para a descrição das propriedades locais. Elementos finitos e elementos de contorno são os métodos mais poderosos para o cálculo desses valores locais, tais como as tensões, deformações, velocidade de deformação, temperatura e o fluxo de material;

- no terceiro nível, as condições do material são levadas em consideração nos cálculos tais como a influência do contorno de grão, da textura, de inclusões não-metálicas e da anisotropia (KOPP, 1988).

Quando for possível controlar os problemas estabelecidos na conformação, será possível desenvolver com sucesso, produzir e oferecer novos e competitivos componentes para o mercado global, conforme mostrado na Figura 2.

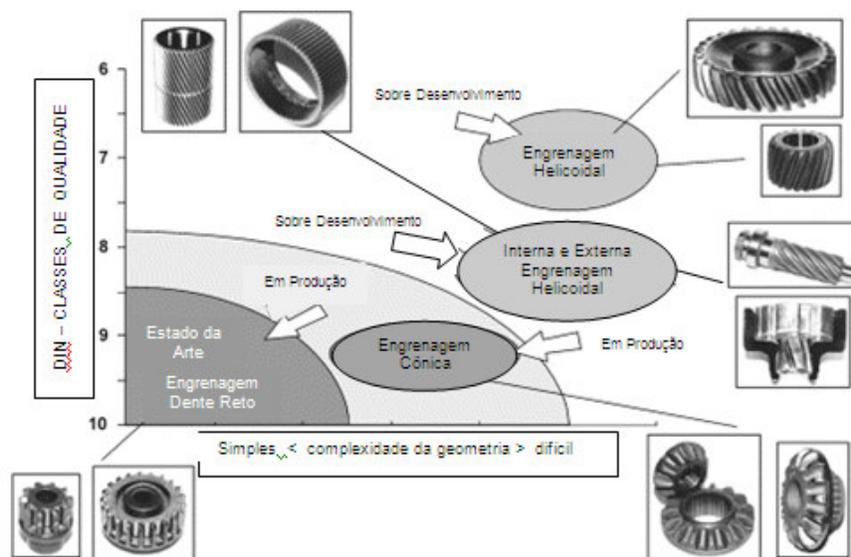


Figura 2: Tendências no desenvolvimento de engrenagens obtidas pelo processo de conformação a frio.

Fonte: Kuzman, 2001

2.5.1 Processos de conformação

Os processos de fabricação por conformação fundamentam-se na deformação plástica, onde se obtém a forma final sem alterar o volume e a massa do metal. Há processos (laminação e forjamento) que se caracterizam pela aplicação de força em uma das superfícies da peça, com o metal se alongando na direção perpendicular ao sentido da força (compressão direta). Nos processos de compressão indireta, a força direta é freqüentemente trativa, mas as tensões compressivas desenvolvidas pela relação matriz-peça atingem valores elevados (trefilação de fios e tubos, a extrusão e o embutimento).

2.5.1 Forjamento de Metais

Forjamento é um processo em que a peça de trabalho é submetida a forças de compressão aplicadas através de várias matrizes e ferramentas com a deformação ocorrendo basicamente por recalque, alargamento e ascensão, conforme esquema apresentado abaixo:

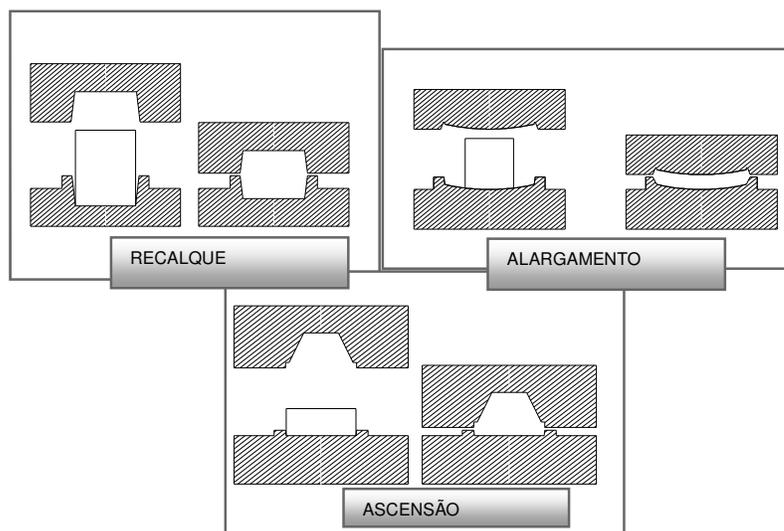


Figura 3: Formas de escoamento no forjamento
Fonte: Mesquita *et al.*, 1995

Atualmente, utilizam-se máquinas e ferramentas complexas, de alta performance, conforme as dimensões das peças forjadas, complexidade geométrica, tempo de fabricação, acabamento, custo e produtividade. O processo de forjamento envolve diversas matrizes e punções usados progressivamente para formar uma peça. A ferramenta é crítica para o processo de conformação e pode ser responsável por 5 a 30% do custo de fabricação. Em razão dos custos iniciais elevados e “setup” de máquina, este processo de conformação é somente viável economicamente com produção em larga escala.

O processo de forjamento pode ser feito em matriz aberta ou fechada. Em matriz fechada, o material é conformado entre duas metades de matriz que

possuem, gravadas em baixo relevo, impressões com o formato da peça que se deseja fornecer (MESQUITA *et al.* 1995). Se a deformação ocorre dentro de uma cavidade totalmente fechada sem zona de escape, é fundamental a precisão na quantidade fornecida de material. Uma quantidade insuficiente de material implica falta de enchimento da cavidade e o excesso de material causa sobrecarga no ferramental, com probabilidade de danos na peça e no maquinário.

Dada à dificuldade de dimensionar a quantidade exata fornecida de material, é comum empregar um pequeno excesso. O material excedente forma uma faixa estreita (rebarba) em torno da peça forjada.

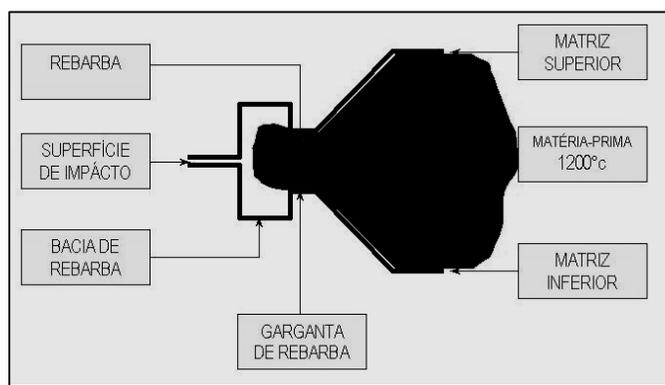


Figura 4: Detalhe da matriz para a formação da rebarba
Fonte: Braga, 2004

A substituição e manutenção de ferramenta reduzem a produtividade e elevam os custos de produção por peça. Há um número de aspectos operacionais que ocasionam as falhas na ferramenta, isto é, fratura, deformação plástica e desgaste. Estes defeitos têm uma influência negativa direta na qualidade dos produtos acabados sob o ponto de vista dimensional e superficial. A incapacidade de detectar e substituir ferramenta defeituosa nas operações de conformação resulta na fabricação de considerável quantidade de produto defeituoso. O desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento “on-line” é desejável para indústria de conformação. Esse sistema passa a detectar e substituir as ferramentas defeituosas, alonga a vida da ferramenta e mantém a qualidade do produto.

Baseado em informações adquiridas utilizando-se um sistema de aquisição de dados, um sistema de gerenciamento de dados foi desenvolvido para pré-processar os dados, comparar os dados à vida da ferramenta projetada e à história da ferramenta real, prever a vida da ferramenta restante, e fornecer um esquema de manutenção ótimo após levar em consideração as condições de utilização da ferramenta. A aplicação de redes neurais artificiais juntamente com o método de elementos finitos pode prever forças, tamanho de tarugos iniciais, projetar geometria do ferramental, localizar fratura da matriz e defeitos no produto.

Há três componentes principais no sistema de monitoramento do ferramental: propriedades do material, condições de processamento, e o modelo usado para prever e monitorar as condições da ferramenta. Propriedades do material incluem aquelas da ferramenta, lubrificante e material da peça. As condições de processamento são velocidade, pressão, temperatura e outros parâmetros que variam durante a produção. O sistema de monitoração on-line fornecerá o estado da ferramenta e indica se a ferramenta necessita ser substituída (KONG, *et al.* 2002).

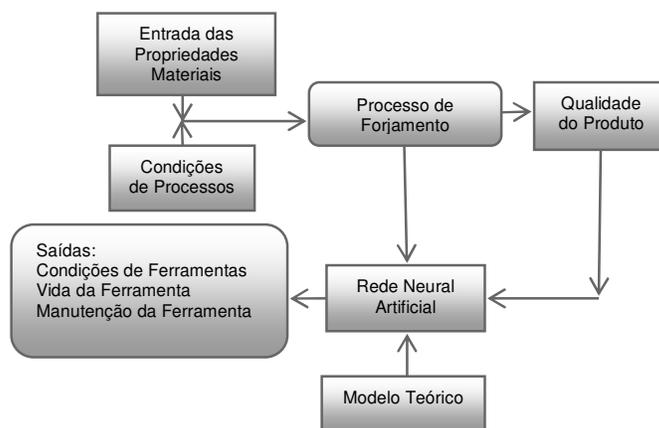


Figura 5: Diagrama esquemático de redes neurais artificiais aplicada em conformação de metal
Fonte: Kong *et al.*, 2002.

O fluxo do material no forjamento depende principalmente da geometria da cavidade, geometria da abertura, geometria inicial e intermediária do tarugo e transferência de calor entre o ferramental e o tarugo (ALTAN, *et al.* 2000).

O forjamento é uma das aplicações de maior demanda dentre os processos de conformação em razão das elevadas cargas e tensões na ferramenta. Projetar materiais com a combinação de resistência e tenacidade para suportar as pressões elevadas típicas do forjamento a frio constitui desafio constante (VAZQUEZ, *et al.* 2000). A seqüência de etapas para o desenvolvimento do material envolve:

- simulação do processo para determinar o ponto de mais alta carga durante o ciclo de forjamento e a distribuição de tensões na interface matriz-ferramenta;
- análise de tensão da ferramenta utilizando-se a distribuição de tensão previamente determinada como dado de entrada;
- utilização do Deform 2D[®] em ambos os casos para simulação.

2.5.1.1.1 Deformação elástica do sistema

O forjamento a frio de metais e especialmente de aços é conhecido como uma tecnologia de elevadas níveis de tensões na ferramenta, alcançando algumas vezes 2000–3000 MPa. As cargas de processo tem impacto na deformação elástica das ferramentas, influenciando a geometria dos produtos. Para demonstrar a faixa de deformações elásticas, representa-se um exemplo (Figura 6), onde é suposto que o punção é livre e carregado somente com a pressão axial.

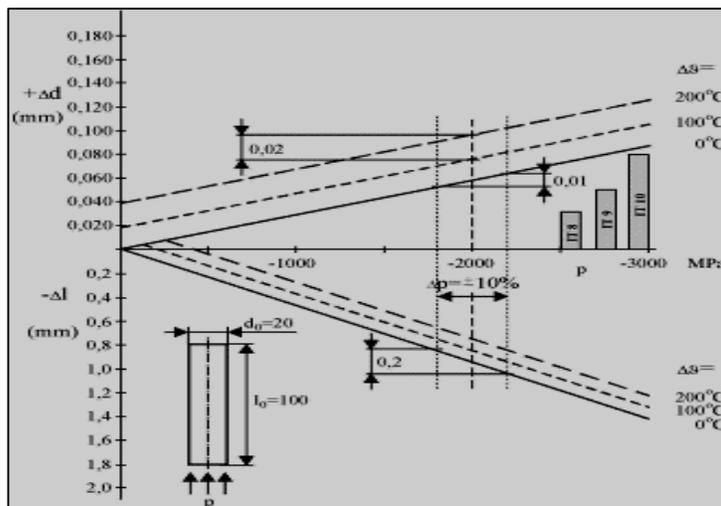


Figura 6: Mudanças no comprimento e diâmetro de uma peça como resultado de dilatações elásticas e térmicas no forjamento
 Fonte: Kuzman, 2001

Desde que as ferramentas de forjamento são deformadas em um regime elástico abaixo das pressões envolvidas, essas deformações devem ser analisadas para melhorar a exatidão da peça forjada. Durante o carregamento, a cavidade da matriz é expandida dentro da região elástica e a peça forjada é deformada para o tamanho da matriz expandida. No descarregamento, a dimensão da cavidade da matriz é reduzida pela força de equilíbrio. Em seguida, a matriz é expandida elasticamente no estágio de expulsão e a peça forjada é expandida uma vez mais pela recuperação elástica após expulsão. Finalmente, as dimensões da peça forjada não são as mesmas da matriz usinada. Assim, a fim de se obter uma peça forjada não usinada, tal como uma engrenagem de precisão, a matriz seria projetada e fabricada considerando-se o comportamento elástico da matriz e peça. Na indústria, as ferramentas são montadas de diferentes componentes, fixadas e guiadas e as tensões são distribuídas no interior do ferramental. Para estimar as deformações elásticas de sistemas com muitos elementos, modernas ferramentas numéricas tais como elementos finitos tornam-se necessárias (ISHIKAWA, *et al.* 2002).

2.5.1.1.2 Geração e transferência de calor no sistema

O trabalho de deformação é quase totalmente transformado em calor que causa a dilatação térmica da montagem inteira, incluindo a peça. Quando o campo de temperatura é estável abaixo de condições de produção estacionárias, seu impacto no processo é controlável. Contudo, a variação do campo de temperatura devido ao trabalho não periódico, paradas imprevistas ou outras interrupções podem afetar o processo e a geometria da peça. No forjamento a frio de aços, o aumento da temperatura por centenas de grau é freqüente. O outro parâmetro que afeta a dimensão final do produto é o tempo de conformação, pois o mesmo afeta a geração e transferência de calor.

2.5.1.1.3 Equipamentos e métodos

Os processos convencionais de forjamento são executados tipicamente em diversas etapas, começando com o corte do material, aquecimento (forjamento a quente), pré-conformação (mediante operações de forjamento livre), forjamento em matriz (em uma ou mais etapas) e rebarbação (KALPAKJIAN, 2001). As prensas deformam o material submetendo-o a uma compressão contínua com velocidade relativamente baixa. A relação da altura/espessura da peça forjada correlaciona-se linearmente com a rigidez da prensa mecânica o que significa que a variação da força de conformação é afetada diretamente pelas alturas das peças e indiretamente (em menor escala) pela variação da resposta elástica de outras dimensões da peça. Dentre as variedades de prensas, a prensa mecânica é usada para fabricação de produtos em razão do menor custo de manutenção e aquisição e oferece elevadas taxas de produção. A capacidade da prensa mecânica é definida pela pressão, torque e capacidade de energia. A capacidade de pressão, algumas vezes chamada de pressão nominal, significa a pressão máxima disponível durante o processo sem dano funcional à prensa. A pressão é usualmente operada a 75-80% de sua pressão

em razão de uma possível sobrecarga e dano ao molde. A capacidade de torque é à distância do ponto morto final do curso que pode adquirir a pressão nominal. A capacidade de energia é a quantidade de trabalho que pode ser consumido durante um ciclo. Quando essas capacidades são usadas para selecionar a prensa, a relação existente entre pressão-curso torna-se importante.

A capacidade da prensa, torque e curso se relacionam pelas Eq. 2.18 e 2.19

$$P = \frac{T}{S \sqrt{\frac{2r}{S} - 1}} \quad (2.18)$$

$$T = p * H * \sqrt{\left(\frac{2r}{H}\right) - 1} \quad (2.19)$$

onde P é pressão, T é o torque, S é o golpe, 2r é o comprimento do curso da pressão, p é a capacidade de pressão e H é a capacidade de torque.

A velocidade de trabalho da prensa é um importante fator a ser considerado em termos de processo (Equação 2.20):

$$v = n * s * \pi \frac{1}{30} \sqrt{\left(\frac{2r}{s}\right) - 1} \quad (2.20)$$

onde n é o número de golpes por minuto, s é a posição inicial do BDC, e 2r é o comprimento do golpe da prensa. A velocidade de trabalho da prensa não pode exceder mais que 25m/min. no caso de aço baixo carbono. A Tabela 1 representa a máxima velocidade de trabalho para outros materiais (PARK, *et al.* 1998).

TABELA 1
Velocidade máxima de trabalho para outros materiais

Material	Aço Inoxidável	Liga de Alumínio	Aço Baixo Carbono	Cobre e Zinco	Alumínio	Latão
Velocidade trabalho (m/min.)	12	13	25	43	53	60

Fonte: Park et al., 1998

Das equações acima, o golpe da prensa do processo convencional para 5500 ton. e 14 SPM pode ser tomado como 520 mm. Neste caso, uma velocidade de trabalho da prensa é 22,5 m/min. que não excede 25m/min. para aço baixo carbono.

2.5.2 Extrusão de metais

As operações básicas da extrusão a frio são recalque, extrusão à frente, à ré e extrusão radial. É aceito classificar a operação de extrusão de acordo com a relação entre o fluxo de material e o movimento do punção.

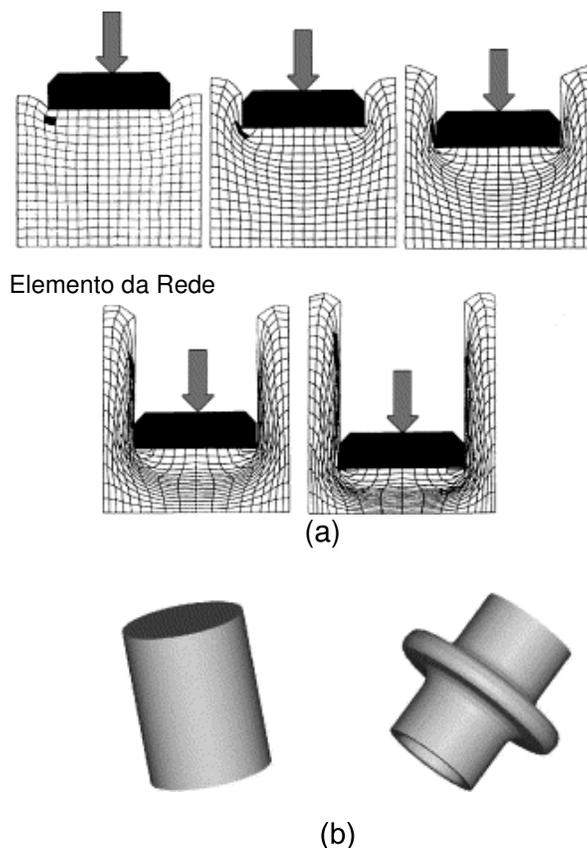


Figura 7: Exemplo do processo de extrusão invertida com modelo de malha (a) e radial no qual se mostra o tarugo inicial e a peça conformada (b)
 Fonte: Choi, *et al.*, 2001.

Wanheim, *et al.* (1998) analisaram o fluxo de material na extrusão radial de componentes tubulares. A obtenção de componentes sem defeitos tais como sucção (parede fina em relação à abertura) foi explicada devido ao fluxo heterogêneo seguido por uma diferença na taxa de encruamento de diferentes regiões do componente.

Há processos de extrusão combinados nos quais um tarugo é extrudado simultaneamente nas direções à frente, a ré, e lateralmente através de orifícios da montagem. Algumas operações básicas são algumas vezes combinadas em uma simples estação para conformar peças relativamente complexas. Extrusão radial e à ré são processos nos quais um ou dois punções movem-se axialmente causando fluxo radial em direção à cavidade da matriz e fluxo invertido entre o punção e matriz

por meio do qual um flange e lata são formados (Figura 8). Este processo fornece vantagens econômicas tais como alta produtividade e ajuste da resistência mecânica do produto. Contudo, nota-se que a extrusão invertida de lata de aço é uma das operações de forjamento a frio mais críticas em razão da pressão normal elevada no punção e às condições severas tribológicas no contato entre o punção e a parede interna da lata.

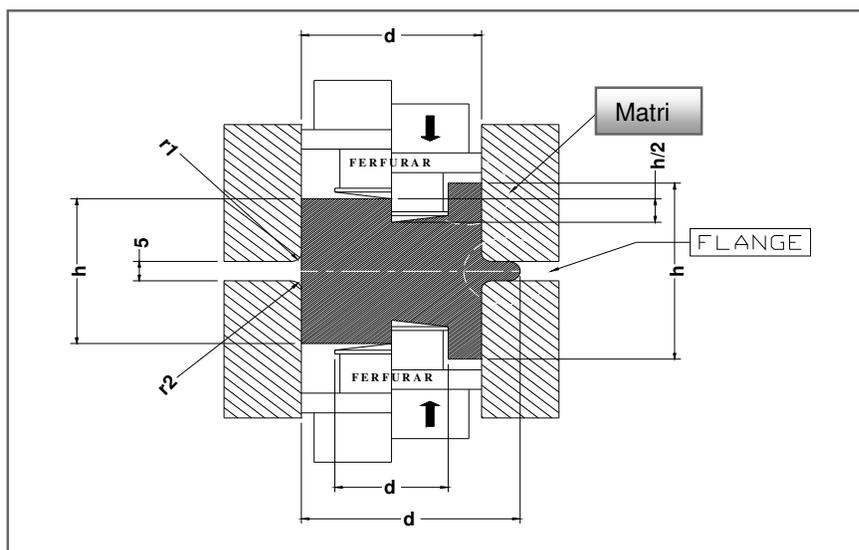


Figura 8: Exemplo do processo de extrusão invertida e radial mostrando diâmetro do tarugo d_0 , diâmetro do flange, d_b , diâmetro do punção, d_{st} , a altura do tarugo, h_1 , altura da peça, h_{st} ; curso do punção, s ; raio da matriz, $r_1=r_2$
 Fonte: Choi, *et al.*, 2001.

No processo de extrusão invertida, microestrutura fibrosa é formada pelo movimento de grão durante o fluxo de material e as propriedades mecânicas são melhoradas na direção do fluxo. Este processo é extensivamente aplicado na fabricação de peças principais da indústria automobilística e aeroespacial que requerem alta dureza, mas durante o processo, fricção entre a peça e ferramenta provoca deformação heterogênea e levam a elevação da força de conformação (KIM *et al.* 2003).

A Figura 9 mostra o processo de extrusão à frente em que se observa os principais fatores que interferem nas dimensões finais do produto.

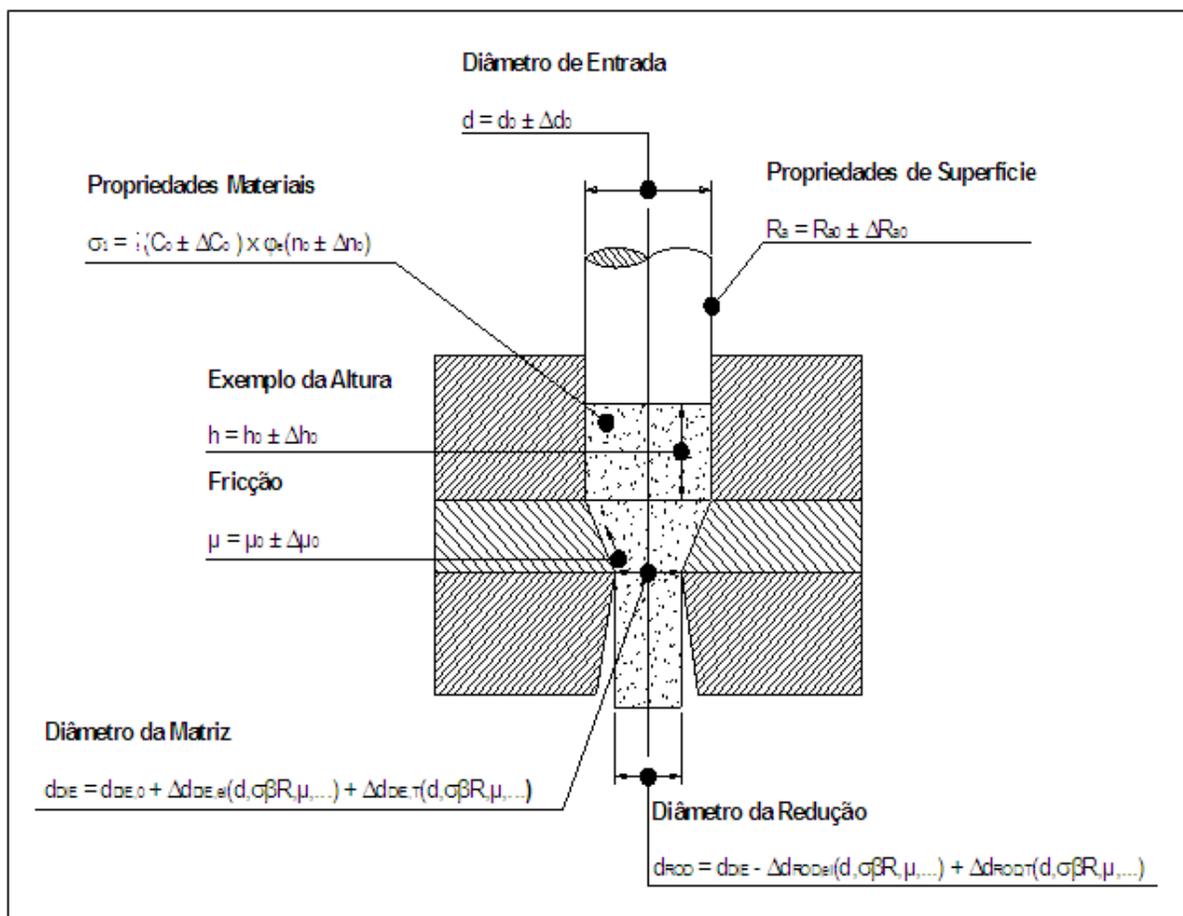


Figura 9: Fatores operacionais que afetam o processo de extrusão
 Fonte: Kuzman, 2001

A análise das operações de conformação requer a avaliação dos parâmetros de processo tais como força e consumo de energia e a determinação das variáveis principais (deformação, força, fluxo) ao longo da peça. O problema é determinar o tipo de modelo (analítico, estocástico ou numérico) que descreve a energia consumida (na forma de força versus movimento do punção) no processo na maneira mais correta em comparação com o experimental (BARISIC, *et al.* 2004). Gouveia, *et al.* (1998) modelaram o processo de extrusão à frente através da formulação de Lagrange e Lagrange-Euler.

O modelo de fluxo, a distribuição de deformação e a força de extrusão foram bem simuladas dentro da região deformada plasticamente. Giulano (2005),

utilizando-se de software comercial de elementos finitos propôs um projeto em múltiplo estágio que preveniu defeito de fluxo no processo combinado de extrusão invertido e à frente de um tarugo. Long, *et al* (1998) concluíram que o comportamento elástico e mudanças de temperatura têm influência significativa na exatidão dimensional de componentes de aço ABNT 1015 e alumínio A199.5 na extrusão invertida, não somente durante o carregamento e descarregamento da ferramenta, mas , também, durante a extração e resfriamento do punção e peça. O comportamento elástico da ferramenta e o material da peça têm uma maior influência no dimensional que as mudanças de temperatura geradas durante o processamento. Alterações nas condições de processo incluindo a velocidade do punção, o atrito interfacial e o raio da matriz de transição, também, afetam a dimensão do componente (BALENDRA, *et al.* 1998).

2.6 Usinagem

Usinabilidade pode ser definida como um grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão (DINIZ, *et al.* 2000). A usinabilidade depende da peça e das condições de usinagem, das características da ferramenta, das condições de refrigeração, da rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivo de fixação e dos tipos de trabalhos executados pela ferramenta. A microestrutura e dureza são os fatores metalúrgicos que afetam a usinabilidade. O controle do tipo e morfologia das inclusões não-metálicas no processo melhora a usinabilidade. As inclusões não-metálicas que favorecem a usinabilidade são as de sulfeto de manganês e chumbo, impedindo que o cavaco adere à ferramenta e lubrificando o sistema cavaco-ferramenta.

2.6.1 Processos convencionais de usinagem

Os processos de usinagem utilizam os mecanismos de cisalhamento e abrasão entre a ferramenta e a peça para o arrancamento de cavacos. 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 à obtenção de superfície de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. A peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina (torno mecânico), e a ferramenta desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. 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.

A usinagem no torno automático é feita através dos deslocamentos mecanizados das ferramentas. Uma vez ajustado, o torno automático não requer a intervenção de nenhum operador; o acionamento faz com que cada uma das ferramentas se aproxime da peça em seu devido tempo com velocidade de corte e avanço adequados, e segundo uma seqüência pré-estabelecida (Figura 10 (a) e (b)).

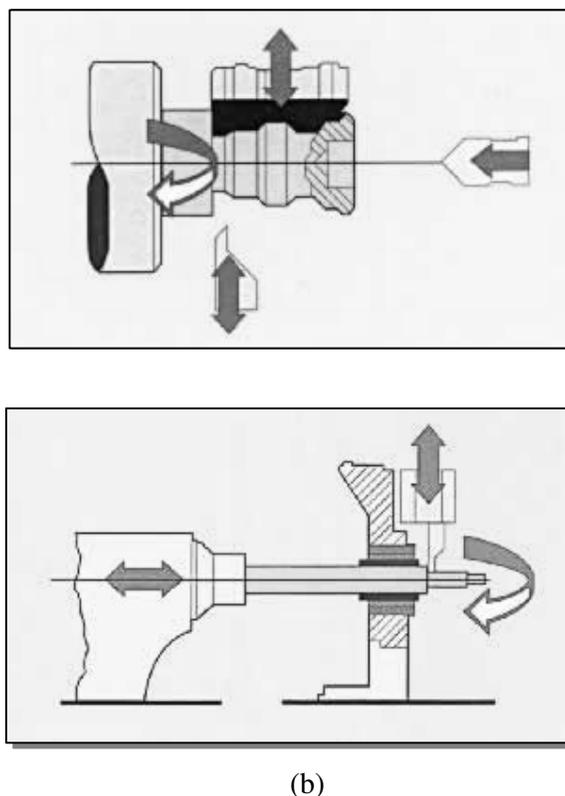


Figura 10: Princípio de funcionamento de um torno automático de cabeçote fixo (a) e de um torno automático de cabeçote móvel (b).
 Fonte: Ferrari, 2006

Há uma diferença fundamental entre usinagem de precisão e conformação. Na usinagem, a informação geométrica sobre a peça a ser produzida é alimentada na máquina, em um processador, onde algoritmos especiais controlam os movimentos da ferramenta de corte. Para alcançar a forma exata de forma, “loops” de controle suportado por sensores adequados afetam o movimento da ferramenta para corrigir ou compensar por algumas oscilações dos parâmetros de processo. Na conformação, a situação é completamente diferente. Aqui todos os parâmetros de processo e geometria da peça são definidos de antemão. A forma da peça a ser fabricada depende principalmente da geometria da ferramenta e da cinemática da máquina de conformação. A exatidão geométrica e uniformidade de forma das peças forjadas a frio e especialmente sua estabilidade durante a produção, depende não somente da ferramenta, mas também, do sistema de conformação inteiro. Para controlar tal sistema, não é somente suficiente identificar os parâmetros, mas,

também, essencial conhecer seus impactos individuais e inter-relações (KUZMAAN, 2001).

A fabricação dos terminais tem sido realizada por usinagem convencional. Esse processo exige operações de torneamento cônico externo, sangramento, furação, torneamento cônico interno e utilização de maquinário dependente de operações conjuntas. 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.

2.7 Modelagem dos processos de conformação mecânica

Os principais métodos de análise de processos de conformação são os métodos dos blocos, das linhas de escorregamento, do limite superior e dos elementos finitos. A necessidade de uma teoria para descrever os mecanismos do processo de conformação mecânica consiste na habilidade de se fazer uma exata previsão da tensão, deformação e velocidades para todos os pontos na região da peça. As várias aproximações diferem na complexidade e no grau para os quais elas encontram estas necessidades.

Os métodos analíticos possuem grandes restrições, e atualmente, tem-se utilizado uma forma baseada em elementos finitos. Este método foi originalmente desenvolvido para análise de problemas estruturais, e tem sido aplicado para problemas de conformação mecânica, envolvendo condições elasto-plástico em deformação plana ou axissimétrica na compressão simples e extrusão.

Kobayashi *et al.* (1989) desenvolveram uma 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 deformações elásticas são desprezadas e 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).

Marcal e King (1967) introduziram a primeira formulação sólida de elementos finitos aplicada a grandes deformações elasto-plásticas/viscoplásticas. Essa formulação explica para a região de transição, onde a resposta do material é elástica no início do passo incremental e plástica para o fim. Refinamentos da formulação são baseados na integração numérica dos elementos que permite diferentes respostas do material estando presente para cada ponto de integração. 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. A aplicação desta formulação aos processos de conformação plástica está na base de alguns programas comerciais de elementos finitos (ABAQUS implicit, MARC).

A rigidez média foi primeiramente descrita por Rice e Tracy (1973), empregando-a em problemas elasto-plásticos. A rigidez média garante aproximação que o estado final de tensão está na superfície de escoamento.

Pode-se escolher a formulação Lagrangiana ou a Euleriana para problemas geometricamente não lineares. No método lagrangiano, a malha de elementos finitos é fixa ao material e se move juntamente no espaço. Já o método euleriano consiste no escoamento de um material através de uma malha fixa no espaço.

Kobayashi *et al.* (1989) destacaram que, durante uma simulação numérica de processos de conformação usando malha lagrangiana, são gerados os seguintes problemas computacionais:

- dificuldades da malha de elementos finitos em incorporar a forma da matriz com o aumento do deslocamento relativo entre a matriz e o corpo-de-prova;
- dificuldades em acomodar grandes deformações em um único sistema de malha;
- formação de elementos instáveis, com o jacobiano negativo, devido às

grandes deformações localizadas.

Quanto aos métodos eulerianos, por considerarem a malha fixa no espaço, não são adequados para situações, onde as superfícies ou interfaces se movem substancialmente. Esse inconveniente pode ser minimizado com o uso de formulações atualizadas onde o estado de tensão e deformação do material é redefinido ao início de cada incremento de tempo.

Trabalhos de simulação computacional de processos de conformação plástica baseados na utilização de formulações dinâmicas 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 consequência 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.

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 foram descritas (SILVA, 2004):

- o método da visioelasticidade permite a determinação dos campos de velocidade, velocidade de deformação, deformação 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.

- utilização de plasticinas 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).

- 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.

- análise microestrutural em microscopia eletrônica de transmissão envolve a observação de discordâncias e sua distribuição espacial.

2.8 Softwares comerciais de simulação computacional por elementos finitos

2.8.1 Conceitos iniciais

Método de elementos finitos se tornou uma ferramenta poderosa na modelagem dos processos de conformação. Modelos termomecânicos utilizados para a previsão do fluxo de material e transferência de calor durante a deformação se tornaram uma ajuda no projeto de processo. Contudo, a exatidão da simulação é crucial para utilidade dos modelos. Essa exatidão depende principalmente da qualidade da descrição das condições de contorno e dados das propriedades do material. Isto é particularmente importante na extrusão que, muitas vezes, envolve instabilidade de deformação (MISIOLEK, 1996).

O avanço na tecnologia de simulação na indústria tem ocorrido simultaneamente com a queda de preço experimentada de “hardware”, aumento de sua velocidade e melhora nas interfaces gráficas com o usuário em programas comerciais.

Conforme Gardner *et al.*(2005), a escolha do software de simulação computacional por elementos finitos é um importante fator na determinação da qualidade e alcance das análises de conformação mecânica. Diferentes softwares possuem diferentes capacidades e diferentes graus de dificuldade de operação, com plataformas amigáveis ou não com o usuário. Além do mais, as diferentes técnicas de resolução de problemas utilizadas pelos softwares geram conseqüências diretas nos resultados obtidos na simulação.

Os programas atuais voltados para a solução de problemas de conformação mecânica possuem algoritmos específicos, que determinam automaticamente

parâmetros como número e tamanho de elementos (definição da malha) e número de incrementos. No entanto, Santos *et al.* (2001) acrescentam que nesses programas alguns parâmetros devem ser definidos pelo usuário e que exigem conhecimento mais aprofundado do “software”. O Quadro 1 apresenta as principais características de alguns softwares comerciais (GARDNER *et al.* 2005; SUPERFORM Command Reference, 2005).

CARACTERÍSTICAS	SOFTWARES			
	SUPERFORM	DEFORM	ADVANTEDGE	ABAQUS
Facilidade de Preparação da Geometria das Ferramentas e Peças de Trabalho	Pode ser importada de outros softwares ou construída manualmente no próprio software.	Pode ser importada de outros softwares ou construída manualmente no próprio software.	Preparação muito rápida. Bibliotecas com as geometrias são fornecidas.	Somente construída manualmente no próprio software.
Características Metalúrgicas dos Materiais	Possui extensa lista de materiais. Permite inserir outros materiais.	Possui extensa lista de materiais. Permite inserir outros materiais.	Possui extensa lista de materiais. Permite inserir ligas aeroespaciais.	Não possui lista de materiais, mas podem ser inseridos com muitos detalhes.
Capacidade de Remalhamento Adaptativo	Utiliza remalhamento adaptativo com parâmetros de ajuste fino.	Utiliza remalhamento adaptativo com parâmetros de ajuste fino.	Utiliza remalhamento adaptativo sem parâmetros de ajuste fino.	Suporte parcial, sem muitos ajustes.
Controle Total	Algum nível de controle é permitido. Mas soluções de FEM não podem ser manipuladas	Algum nível de controle é permitido. Mas soluções de FEM não podem ser manipuladas	Mínimas alterações permitidas.	Muitas alterações permitidas. Funções de solução básica podem ser modificadas.

Quadro 1: Principais características de alguns softwares comerciais
Fonte: Gardner *et al.* 2005

A simulação numérica dos processos de conformação de materiais através do método de elementos finitos auxilia no estabelecimento e otimização das variáveis de processo e projeto de matriz. Os objetivos da modelagem dos processos de conformação são (ALTAN; VAZQUEZ, 1997):

- otimizar processo e projeto de matriz;
- assegurar preenchimento da matriz e prevenir defeitos;
- prever e controlar vida e falha da matriz;
- prever e controlar microestrutura e propriedades da peça conformada;
- reduzir o número de operações necessárias, “try-out” da matriz e tempos de fabricação;
- reduzir perdas de material e rejeição.

A habilidade para analisar processos tridimensionais complexos tem aberto avenidas para aplicação de simulação (TANG, *et al.* 2000).

2.8.1.1 Características funcionais do software Deform 2D®

Um programa de elementos finitos elastoplástico Deform 2D® foi usado para estudar os efeitos do ângulo do punção na geometria do produto e na carga necessária para a deformação em extrusão invertida. A simulação numérica foi confrontada com a simulação física em prensa hidráulica.

Existem três etapas principais na elaboração de uma simulação numérica de um processo qualquer, conforme mostrado na Figura 11.

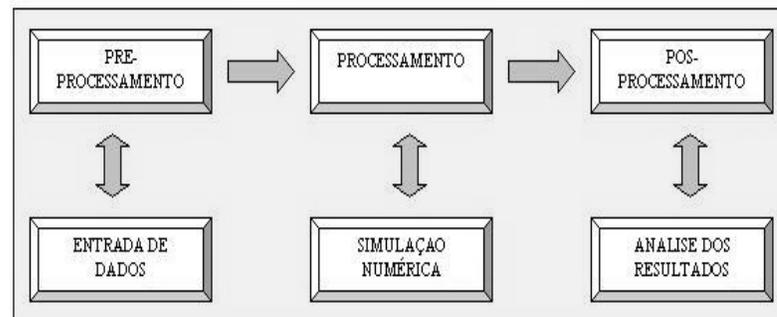


Figura 11: Etapas de uma simulação computacional envolvendo as três etapas de processamento
Fonte: Santos *et al.* 2001.

2.8.1.2 Pré-processamento

Esta etapa compreende a modelagem física e matemática do problema em questão. Na modelagem física, as geometrias das matrizes e da peça inicial devem ser definidas, utilizando-se interface gráfica do software ou sistemas CAD. Posteriormente, em função da geometria do modelo e das condições de carregamento, define-se o tipo de análise axissimétrica, 2D (deformação plana) ou 3D a ser implementada (MSC.SuperForm Command Reference, 2005).

Os dados de entrada correspondentes ao material (curva de escoamento, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, calor específico, condutividade térmica e coeficiente de dilatação) devem ser obtidos experimentalmente em laboratório, uma vez que os dados da literatura podem não ser compatíveis com as características do processo real (temperatura dos componentes e do meio, por exemplo) (SANTOS, *et al.* 2001).

Para executar uma simulação, necessita-se de uma série de dados de entrada específicos que descrevem o processo tais como coeficiente de atrito entre a peça e matrizes, velocidade da prensa, deslocamento das ferramentas, temperatura da peça, matrizes e meio e coeficientes de troca de calor.

2.8.1.3 Processamento

O processamento é a etapa onde se realiza o cálculo computacional com o problema dividido em incrementos de deslocamentos. Nesta etapa, define-se qual a solução a ser adotada, isto é, mecânica, térmica, termomecânica ou microestrutural.

Erros inerentes à discretização acontecem, quando se usa uma malha inadequada do ponto de vista do método dos elementos finitos. Uma discretização apropriada não é obtida visando apenas uma correta representação da geometria, facilidade de imposição de carregamentos e condições de contorno, mas, também, para permitir um desempenho numérico otimizado para os elementos que estão

sendo utilizados. Os resultados numéricos são extremamente sensíveis à distorção dos elementos da malha (COOK *et al.* 1989). Realizam-se as iterações até se atingir convergência para cada incremento (SANTOS *et al.* 2001).

Braga (2004) definiu na simulação do forjamento os critérios de remalhamento no SuperForm a partir da distorção do elemento, da curvatura da ferramenta (o usuário deve inserir qual o valor da distância máxima que a ferramenta pode penetrar na peça), desvio do ângulo ideal. Os parâmetros de remalhamento atuam junto aos critérios de remalhamento, sendo eles o máximo comprimento do lado do elemento, o valor máximo de elementos da malha e elementos prévios.

2.8.1.4 Pós-processamento

Utilizando-se de recursos gráficos, pode-se visualizar distribuição de tensões, deformações, temperatura, fluxo de material, força, velocidade de deformação e evolução microestrutural. As informações obtidas podem variar de acordo com o tipo de análise (mecânica, termomecânica e microestrutural) ou, mais especificamente, com o tipo de software utilizado.

3 METODOLOGIA

Por meio de simulações numéricas e processos experimentais, este trabalho avaliou a possibilidade e a viabilidade de se obter um terminal através do processo de extrusão a frio em uma série de matrizes com um menor número de etapas em aços ABNT 1010, ABNT 10B22, ABNT12L14 e DIN9SMn36. Como esse terminal deve ter um furo passante em operação de usinagem posterior após forjamento, as dimensões finais devem atender a especificação final do produto (Figura 12).

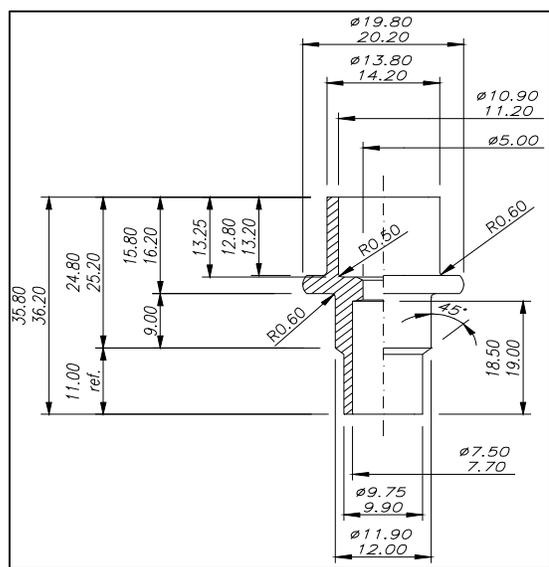


Figura 12: Dimensões em mm dos terminais obtidos após operação de usinagem.
Fonte: Dados da pesquisa

As etapas envolvidas para atingir o objetivo do trabalho serão descritas a seguir.

3.1 Análise química e metalográfica do material

A matéria-prima utilizada neste trabalho é fio-máquina produzido através de lingotamento contínuo, laminação de barra e, em seguida, trefilação, recozimento e fosfatização para a dimensão de 11,3mm de diâmetro.

As análises químicas das ligas foram obtidas em espectrômetro óptico de emissão e Leco. Os elementos químicos, carbono e enxofre foram analisados no Leco a partir de limalhas obtidas com brocas de 3/16" retiradas no fio-máquina de 11,3mm.

As amostras para análise metalográfica foram cortadas no sentido perpendicular à direção da laminação. Essas amostras foram fresadas e, posteriormente, polidas em lixas com granulometrias de 180, 240, 320, 400, 500, 600 e 1000. Em seguida, foi feito polimento de acabamento em feltro impregnado com pasta diamante com dimensões 7, 3 e 1 μm . Após o polimento de acabamento, as amostras foram analisadas sem ataque em microscópio óptico, marca Leitz, com aumento de 200X e microscópio eletrônico de varredura, marca Jeol e tensão de 20kV. As inclusões foram observadas sem ataque, em microscópio óptico.

Para análise da microestrutura, essas amostras foram atacadas com nital 5%.

Foi feito ensaio de microdureza Vickers em microdurômetro, marca Leitz, carga de 100gf para verificação das propriedades mecânicas. As fraturas dos punções e matriz foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura, marca Philipps, tensão de 20kV dotado de espectrômetro de energia dispersiva.

3.2 Ensaio de tração

Os corpos-de-prova do fio-máquina de diâmetro de 11,3mm para os ensaios mecânicos de tração foram cortados e usinados para as dimensões finais, conforme mostrado na Figura 13 (Norma ASTM E-8M).

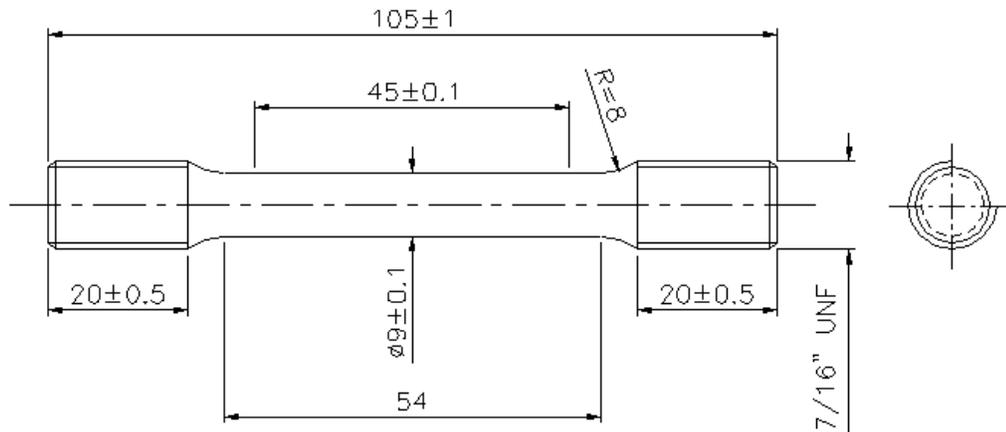


Figura 13: Dimensões em mm dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de tração retirados no fio-máquina na direção de laminação.
Fonte: Dados da pesquisa

Foram retirados 3 corpos-de-prova na direção paralela à laminação. Mediu-se o diâmetro da seção transversal com micrômetro digital Mitutoyo (resolução de 0,001mm).

O equipamento utilizado para o ensaio de tração foi uma máquina universal Instron TTDML, com acionamento servo-hidráulico e célula de carga de 10t. A velocidade de deformação foi de 0,2cm/min.

O valor do limite de escoamento foi obtido do gráfico tensão versus deformação, a partir da deformação de 0,2%. Um extensômetro foi utilizado para a determinação da deformação na direção do comprimento do corpo-de-prova de 50mm. Após esta deformação, retirou-se o corpo-de-prova da máquina e mediu-se, respectivamente, o comprimento e diâmetro finais.

O limite de resistência foi calculado através da Equação 3.1.

$$\sigma_R = \frac{Q_{MAX}}{S_0} \quad (3.1)$$

O valor da carga máxima foi obtido no ponto máximo da curva carga em função da variação do comprimento inicial.

O alongamento foi calculado pela relação:

$$\Delta l = \frac{l_{ff} - l_0}{l_0} \quad (3.2)$$

onde l_0 e l_{ff} são, respectivamente, os comprimentos inicial e final.

A deformação e tensão reais são dadas pelas Equações 3.4 e 3.5

$$\bar{\epsilon} = \ln(1 + \epsilon) \quad (3.3)$$

$$\sigma_r = \sigma(1 + \epsilon) \quad (3.4)$$

onde ϵ é a deformação convencional, e é dada pela razão entre a variação do comprimento e o comprimento inicial.

O coeficiente de resistência k e o coeficiente de encruamento n foram calculados pela disposição de 4 pontos da região plástica em um gráfico da Equação 3.7 linearizada (GARCIA, et al. 2000)

$$\sigma_r = k * \bar{\epsilon}^n \quad (3.6)$$

onde, σ_r e $\bar{\epsilon}$ são, respectivamente, as tensões e deformações reais.

3.3 Calibração do manômetro da prensa

Após a caracterização do material a ser utilizado na pesquisa, foi feito experimento preliminar com o intuito de verificar se a prensa a ser utilizada nos experimentos tem capacidade para processar os aços.

A calibração do manômetro da prensa foi feita através da compressão de amostras de cobre. Os corpos-de-prova de cobre são cilindros, respectivamente, de 15,94mm e 9,52mm de diâmetro e 20 e 10mm de comprimento. Foi utilizado na medida dos corpos-de-prova paquímetro, marca Mitutoyo, com resolução de 0,01mm, faixa de medição de 0,00 a 150,00mm. A calibração do paquímetro foi feita utilizando-se blocos-padrão de 15,00; 25,00; 75,00; 120,00 e 150,0mm. Esses corpos-de-prova foram deformados nas instalações da PUC (máquina Volpert, capacidade de 20t) e no Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN).

A máquina do CDTN é Instron, modelo D30-20 com capacidade 10tf . A calibração desta máquina foi realizada montando-se a célula de carga a calibrar na máquina Instron TDML, através do qual foram aplicadas as cargas previamente estabelecidas. Foram realizadas as leituras das indicações no anel dinamométrico calibrado, série 184, faixa nominal de 10tf, com relógio comparador de faixa nominal de 10mm e resolução de 0,002mm. Foram realizados 3 (três) ciclos de medição, a fim de registrar, também, a repetibilidade de 95% da célula de carga (Campos dos Reis, E. 2004). Após a calibração do paquímetro e máquina de tração do CDTN, foram ensaiados por compressão 27 amostras de cobre com diâmetro de 15,94mm e 36 amostras de diâmetro 9,52mm. Foram utilizados as cargas de 100, 95, 90, 85, 80, 75, 70, 65 kN para o diâmetro de 15,94mm. Para cada carga aplicada, foram medidas as alturas finais dos corpos-de-prova e calculada da deformação, utilizando-se a Equação 3.8.

$$\varphi \% = \left(\frac{h_i - h_f}{h_i} \right) 100 \quad (3.7)$$

Após o cálculo da deformação média, foi obtido o gráfico de carga versus deformação média. Utilizou-se o mesmo procedimento na compressão das amostras de 9,52mm de diâmetro. As cargas utilizadas foram, respectivamente, de 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90 e 100kN. Na PUC MG, para as amostras de 15,94mm

de diâmetro foram utilizadas as cargas de 100, 80 e 60kN, enquanto que, para as amostras de diâmetro de 9,52mm, as cargas utilizadas foram de 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50kN. A partir desses ensaios, foi feita a calibração da carga de compressão na máquina do Centro de Desenvolvimento Tecnologia Nuclear calibrada com o anel e, em paralelo, a máquina calibrada indiretamente pela variação da altura dos corpos-de-prova de cobre da PUC (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999).

A mesma metodologia, isto é, variação da altura das amostras de cobre, com cargas definidas de 20, 40, 60, 80 e 100kN para o corpo-de-prova de 9,52mm e carga de 100, 120, 140, 160, 200, 220, 240, 260, 300, 340 e 380kN para o corpo-de-prova de 15,94mm foi utilizada para calibração da prensa hidráulica que será utilizada na estampagem dos terminais.

A partir da deformação obtida em amostras de cobre, foi possível correlacionar as cargas verificadas nos equipamentos do CDTN, PUC e prensa hidráulica (Tabelas 2 e 3).

TABELA 2

Cálculo da carga para deformação de 30% (diâmetro de 9,52mm) nos diferentes equipamentos a partir da equação de regressão

Deformação(%)	Equipamento	Equação	Resultado(kN)
30	Tração Puc	$Y=0,7143*X+14,05$	35,479
30	Tração CDTN	$Y=1,2079*X-1.5331$	34,7039
30	Prensa	$Y=16,904*X-1233,4$	726,28

Fonte: Dados da pesquisa

TABELA 3

Cálculo da carga para deformação de 30% (diâmetro de 15,94mm) nos diferentes equipamentos a partir da equação de regressão

Deformação (%)	Equipamento	Equação	Resultado (kN)
30	Tração Puc	$Y=1,7662*X+48,252$	101, 238
30	Tração CDTN	$Y=1,452*X+53,306$	96, 866
30	Prensa	$Y=22,047*X-1326,5$	665,09

Fonte: Dados da pesquisa

Concluiu-se pela necessidade de calibração do manômetro da prensa. O manômetro instalado na prensa é da marca Famabras, capacidade de 100t, menor divisão de 1t, com diâmetro do mostrador de 93mm. Ele foi calibrado, utilizando-se bomba de calibração, série 0362, capacidade 1000kgf/cm², conforme norma NBR 14105. A temperatura do local foi de 20+-2°C e umidade relativa de 50+-10%. Utilizou-se calibrador de pressão digital, marca Ascroft, n° de série AQS-8901. O erro total máximo obtido foi menor que 1,0t para pontos entre 25 e 75t (Anexo A).

3.4 Usinagem do terminal para marcação eletrolítica

Os corpos-de-prova dos materiais ABNT 1010, ABNT12L14 e DIN 9SMn36 foram usinados de barras trefiladas com diâmetros de 14mm (Figura 14).

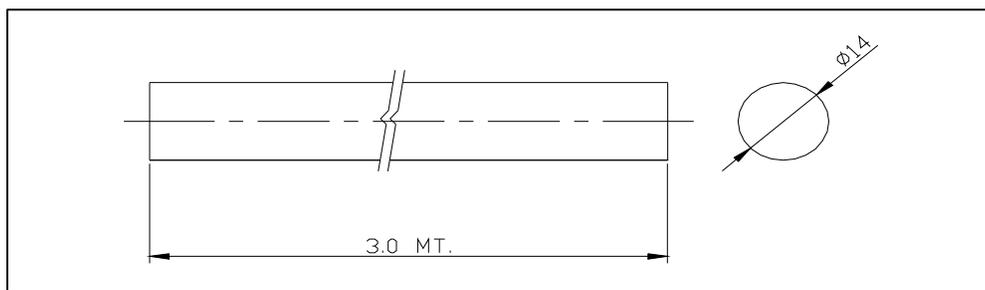


Figura 14: Dimensões das barras utilizadas na usinagem dos terminais.
Fonte: Dados da pesquisa

Um torno marca CNC INDEX 170 MC com revolver de 14 alojamentos de ferramentas, acionamento direto com potência a 100%, força axial de avanço de 9000N e força radial de avanço de 4500 N e rotação variando de 1000 a 2400 RPM foi utilizado na usinagem da barra trefilada. Os insertos utilizados para a usinagem foram o TNMG 1604- classe 9025 e L123 G2 O300 0205 Classe-2135, marca Sandvik, respectivamente, para o faceamento e corte. Esses produtos obtidos nas diferentes operações foram seccionados longitudinalmente e marcados com eletrólito.

A marcação eletrolítica foi feita, utilizando-se equipamento marcador Erichsen, modelo 190, tela com dimensões de 600 x 400mm com diâmetro de círculo de 3mm. O líquido de gravação RSM1 foi diluído em água destilada na proporção de 10:1. Uma flanela foi umedecida na solução e as peças seccionadas ao meio longitudinalmente foram alojadas no dispositivo de cobre carregado negativamente. Este dispositivo de cobre foi usinado observando as dimensões reais do produto nas diferentes etapas do processo de conformação. Este dispositivo foi inserido em uma moldura de madeira de modo a evitar danos à tela (Figura 15).



Figura 15: Dispositivo de cobre utilizado na marcação eletrolítica dos corpos-de-prova conformados
Fonte: Fotografia de Erlano Campos dos Reis

A tela foi colocada sobre as peças, e, sobre a tela, foi disposta a flanela umedecida. Com a máquina na posição neutra, o rolo polarizado positivamente foi passado 3 vezes sobre a flanela. Em seguida, mudou-se a chave seletora da

máquina para posição contínua, e passou-se o rolo sobre a flanela por 10 vezes. Mudou-se, novamente, a chave seletora para corrente alternada e passou-se o rolo sobre a flanela por 10 vezes. Após a marcação, as peças foram retiradas e colocadas no neutralizante TE1. Um projetor de perfil marca Mitutoyo, modelo PJ 300, com capacidade longitudinal e transversal de 50mm e angular de 360° foi utilizado para definir a localização dos centros dos círculos marcados eletroliticamente. Os eixos coordenados foram estabelecidos e as dimensões avaliadas, conforme Figura 16.

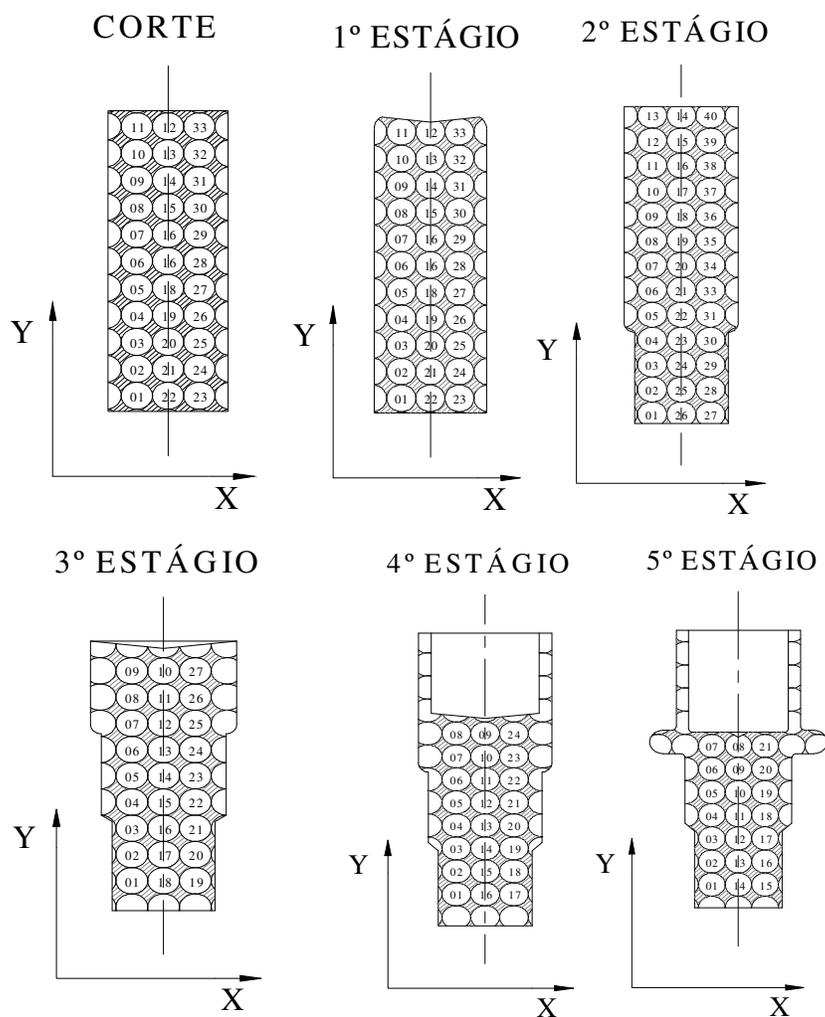


Figura 16: Medição da posição dos círculos de marcação, utilizando-se máquina tridimensional.
Fonte: Dados da pesquisa

Após agrupamento das peças marcadas, foram feitas as deformações correspondentes aos diferentes estágios de produção do terminal. Após a extração das peças, mediram-se os diâmetros d_x e d_y correspondentes a cada posição do círculo marcado. De posse dos diâmetros iniciais e finais dos círculos/elipses, foram calculadas as deformações verdadeiras a partir das equações 3.9:

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_{2x}}{d_{1x}}\right), \quad \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_{2y}}{d_{1y}}\right) \quad (3.8)$$

3.5 Usinagem do terminal

Para efeitos de comparação de custos foi realizado a usinagem da peça. Para fabricação do terminal (Figura 17) foi utilizada a máquina TB-42-CNC, marca Ergomat com revólver, estrela para 06 estações, acionamento direto com potência de 7KW, rotação máxima de 4000 rpm.

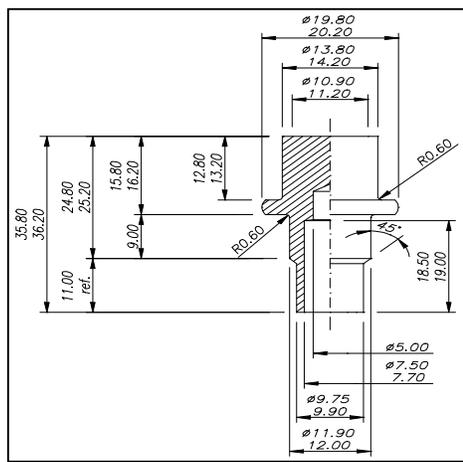


Figura 17: Dimensão final do material na usinagem anterior à furação
Fonte: Dados da pesquisa

Utilizando-se uma barra trefilada com 20mm de diâmetro, foram usinados os materiais DIN 9SMn36 e o ABNT12L14 com rotação de 600 a 2500 rpm, avanço de

0,08 a 0,12mm/rotações , e produção de 98 peças/hora. Para o aço ABNT1010, utilizou-se o avanço de 0,05 a 0,10mm rotação de 600 a 2500rpm e produção de 68 peças/ hora.

Uma vez preparado o torno e posto em movimento, a barra avança automaticamente através do eixo-árvore até um encosto, que determina o comprimento da peça. A seguir, as ferramentas automaticamente iniciam a usinagem, uma após a outra, até realizar todas as operações necessárias para deixar a peça acabada. Duas ou mais ferramentas podem trabalhar simultaneamente, diminuindo os ciclos de trabalho. Quando se trabalha a partir de barras, a última operação é sempre a de corte, que destaca a peça da barra de trabalho. Após o corte da peça, inicia-se um novo ciclo para a fabricação da peça seguinte, e, assim sucessivamente, até o término da barra.

Para realização do furo de 11,20mm com profundidade de 12,80mm foi utilizado torno revolver de avanço manual com broca de HSS, marca Twil(Figura 18).

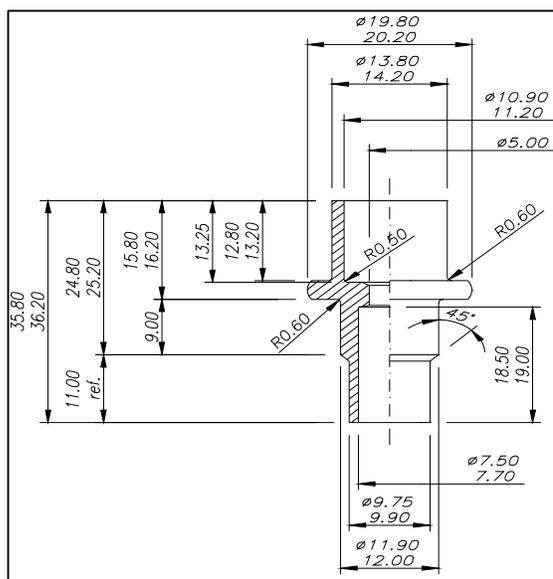


Figura 18: Dimensão final do produto na usinagem após operação de torneamento e furação
Fonte: Dados da pesquisa

Posteriormente, calculou-se o custo de fabricação dos terminais usinados para as diferentes matérias-primas.

3.6 Fabricação das matrizes para conformação do terminal

Nesta etapa foram feitos os desenhos das matrizes que possibilitaram a estampagem do terminal nos diferentes estágios (Anexo B). Essas matrizes foram usinadas e, em seguida, temperadas e revenidas. O alojamento dos dispositivos para cada uma das operações foi feito na matriz. O processo de conformação do terminal requer diferentes etapas de produção entre elas corte, calibração, recalque, primeira e segunda extrusões. Os punções para cada uma das operações foram feitos em aço ABNT D6, temperados e revenidos e retificados conforme desenho. Cada uma dessas matrizes foi testada com o intuito de obtenção do produto com as dimensões desejadas e medição da carga na prensa para a série de operações. As medições do produto nas diferentes operações foram feitas em máquina tridimensional.

Foi construído um estampo de corte para a 1ª operação com a finalidade de se obter um blanche inicial de (ϕ 11,3 X 33,80mm) a partir de uma bobina trefilada de 11,3 mm de diâmetro. A Figura 19 apresenta os blanques que foram cortados.



Figura 19: Blanche obtido através do procedimento de corte.
Fonte: Fotografia de Erlano Campos dos Reis

O corte do blanche foi feito por cisalhamento com o acionamento da prensa, durante o curso de descida do martelo. 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 realizados em prensa excêntrica modelo Kaerck com capacidade de 22 t.

A análise visual e as medidas dos blanques 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 estágio do pré-projeto uma etapa inicial de calibração do tarugo.

A operação de calibração foi realizada em prensa hidráulica. Em sua montagem na prensa hidráulica de simples efeito mediu-se uma carga de 4 t para a operação.

Os desenhos dos produtos e matrizes das etapas consideradas necessárias para produção do terminal estão mostrados (Anexo B e C).

Após a conformação a frio, foi feita a medição do perfil de deformação e microdureza ao longo da seção longitudinal nas posições central e extremidades direita e esquerda da peça em seus respectivos estágios. Para verificar o efeito da alteração do ângulo na extremidade do punção na operação de extrusão invertida foram utilizados punções com (4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 30, 45 e 90) graus. Estes punções foram projetados e fabricados, conforme desenhos (Anexo D).

3.7 Simulação numérica

Os desenhos das matrizes e punções já fabricados foram inseridos no programa DEFORM V-8 2D[®], submetidos às condições de contorno e geração de malha seguida de simulação.

Este software é formado por três módulos, sendo eles o pré-processador, o processador e o pós-processador, estando o primeiro e o terceiro módulo no mesmo ambiente gráfico.

A peça foi considerada rígido-plástica, enquanto a ferramenta foi considerada rígida (SCHÜNEMANN, *et al.* 1996). A Tabela 4 mostra os parâmetros de processo

utilizados nas simulações da extrusão.

TABELA 4
Valores dos parâmetros utilizados na simulação das operações de extrusão

Material	ABNT 1010
Velocidade do Punção (v)	11mm/s
Coeficiente de Atrito (μ)	0,1
Temperatura	25°C
Curva Tensão versus Deformação	Obtida experimentalmente

Fonte: Dados da pesquisa

A velocidade de deslocamento do punção foi mensurada a partir do deslocamento do cilindro da prensa em função do tempo. O intervalo de tempo de cada passo de simulação foi obtido pela divisão entre a velocidade de deslocamento do punção e o número de passos iniciais de 50. Para esse número de passe inicial de 50, verificou-se a convergência dos resultados para números de elementos de malha entre 400 a 2000 elementos. As malhas foram geradas através do procedimento padrão do programa, sendo utilizado elementos isoparamétricos bi-lineares de 4 nós. O coeficiente de atrito utilizado foi estabelecido de acordo com a literatura e constante durante toda a simulação (SCHÜNEMANN, *et al.*1996).

A seqüência de eventos para a simulação consistiu da entrada das variáveis de materiais tais como a curva de Hollomon, coeficiente de atrito, velocidade do punção e definição da geometria inicial da matriz e do punção dos estágios do processo.

Para simulação numérica do pré-projeto utilizou-se o ABNT10B22 e para a simulação experimental foram utilizados ABNT 12L14 e DIN 9SMn36. Para o projeto final foram realizadas simulações numéricas e experimentais no ABNT1010. Os detalhes e as justificativas aparecerão nos resultados com o decorrer da apresentação dos mesmos.

Os resultados obtidos no pós processador foram as cargas de simulação para os diferentes estágios do projeto. Posteriormente, estas cargas de simulação foram comparadas às cargas experimentais obtidas por simulação física.

4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Análise química / metalográfica, ensaios mecânicos

A Tabela 5 mostra a análise química do material da pesquisa, em porcentagem em peso.

TABELA 5

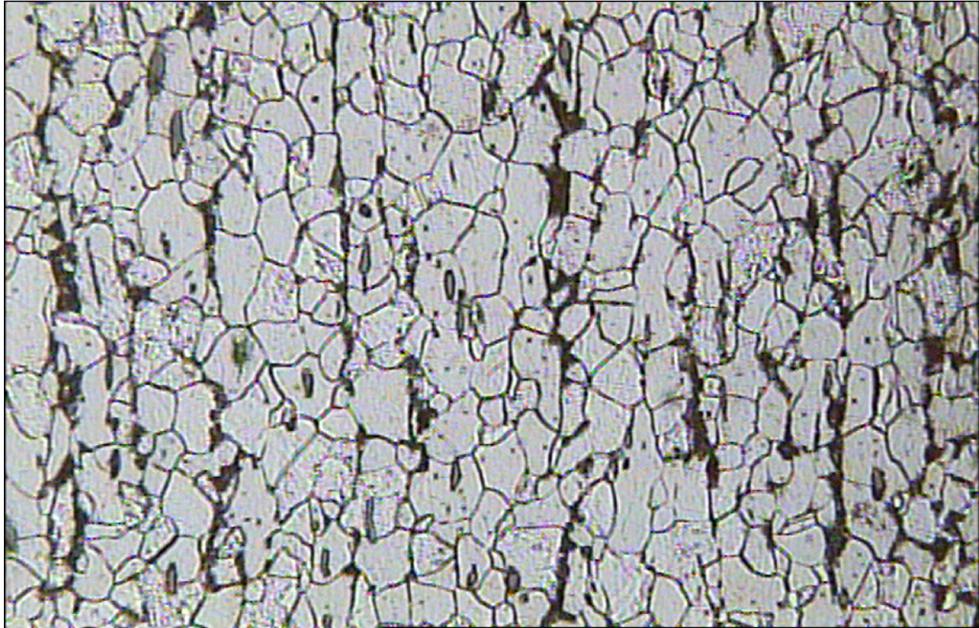
Composições químicas em porcentagem em peso dos aços ABNT 1010, DIN9SMn36, ABNT12L14 e ABNT 10B22 utilizados nos experimentos

AÇO	C	Mn	Si	P	S	Pb	Ti	Al	N (ppm)
ABNT 1010	0,10	0,43	0,10	0,021	0,009	0,00	0,001	0,032	33
DIN9SMn36	0,05	1,11	0,03	0,066	0,598	0,00	0,001	0,004	64
ABNT 12L14	0,08	1,01	0,02	0,058	0,542	0,47	0,001	0,000	47
ABNT10B22	0,20	1,09	0,13	0,016	0,0024	0,00	0,0398	0,025	70

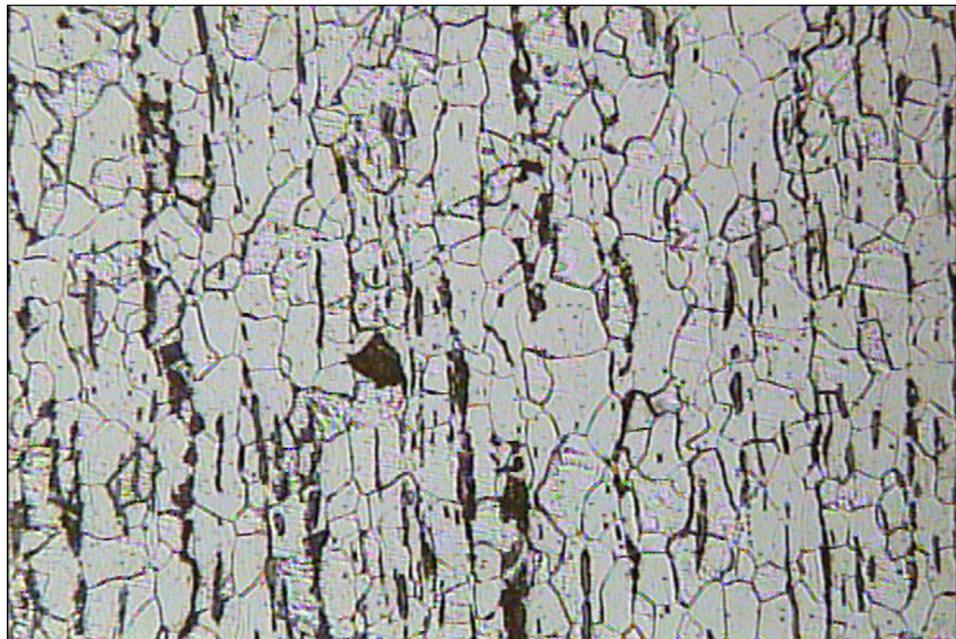
Fonte: Dados da pesquisa

Observa-se que o aço ABNT 1010 foi desoxidado com o alumínio, enquanto os aços DIN 9SMn36 e ABNT 12L14 foram desoxidados pelo silício. Como o projeto desses aços é para melhorar a usinabilidade não se pode ter inclusões de partículas duras de óxidos e, sim, a presença de inclusões de chumbo e enxofre para refrigerar a ferramenta de corte. Os níveis de outros elementos desoxidantes tais como Ti foi também, baixo. No aço ABNT 10B22, a presença do Ti= 0,0398 se justifica pela fixação do nitrogênio em detrimento do boro. A efetividade do boro na temperabilidade se faz quando ele se encontra na condição de solução sólida e não combinado com o nitrogênio.

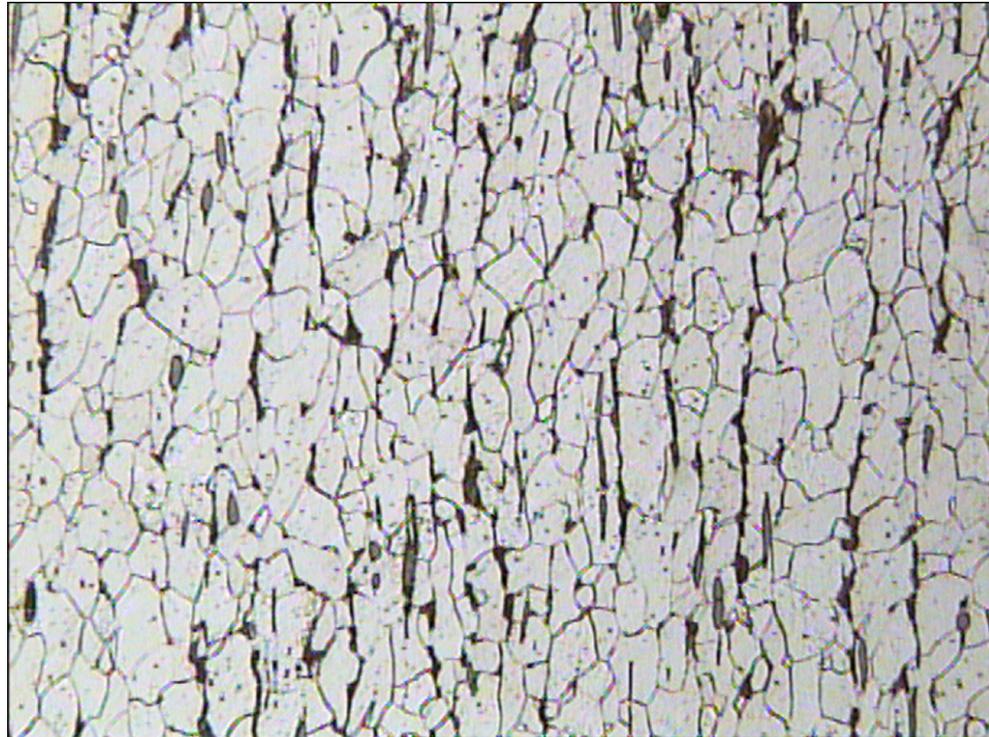
Evidenciou-se a presença de ferrita e perlita, nas amostras obtidas segundo as direções de laminação nos aços ABNT 1010, DIN 9SMn36 e ABNT 12L14 e esferoidita no ABNT 10B22 (Figura 20 (a),(b) (c) e(d)).



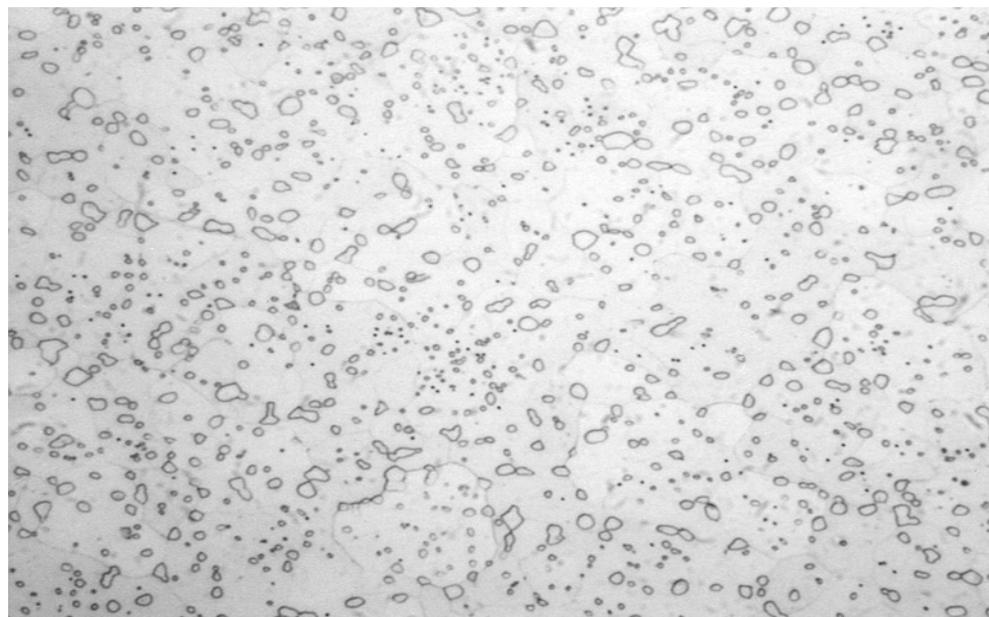
(a)



(b)



(c)

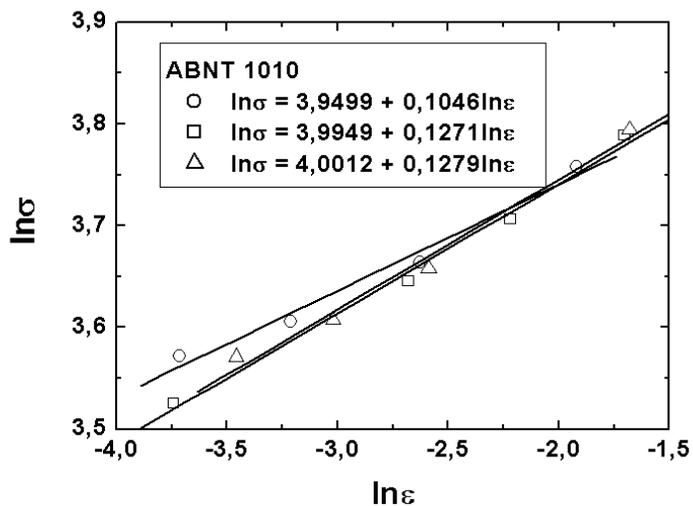


(d)

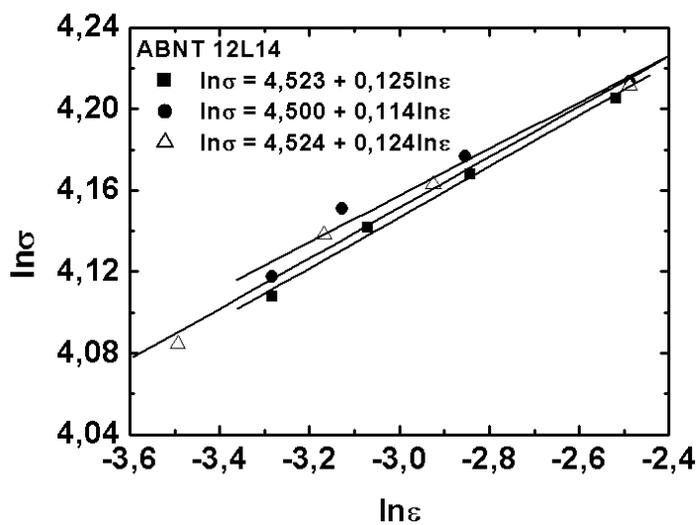
Figura 20: Amostras do aço ABNT 1010 (a) Din 9SMn36 (b), ABNT12L14 (c) ABNT 10B22 evidenciando a presença de ferrita, perlita, microinclusões e esferoidita (d). Ataque Nital 5% e picrato de sódio ; Aumento 200X

Fonte: Fotografia de Erlano Campos dos Reis

As Figuras 21 (a) e (b) e Figuras 22 (a) e (b) mostram as curvas $\log \sigma$ versus $\log \epsilon$ para os corpos-de-prova dos aços ABNT 1010, 12L14, 10B22 e DIN 9SMn36.

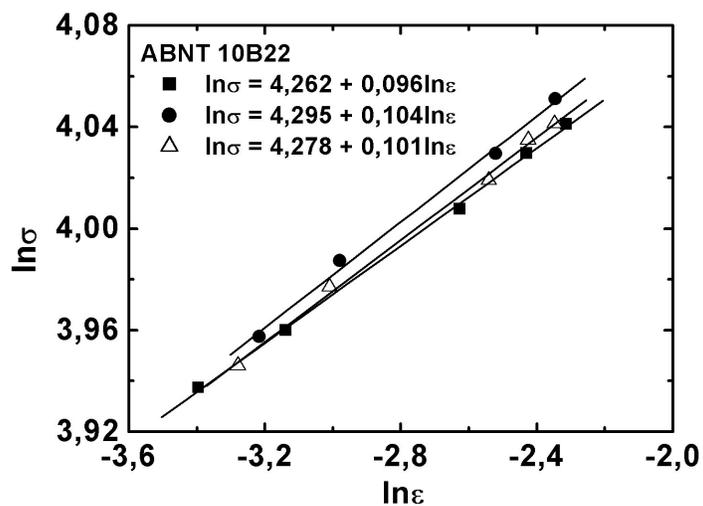


(a)

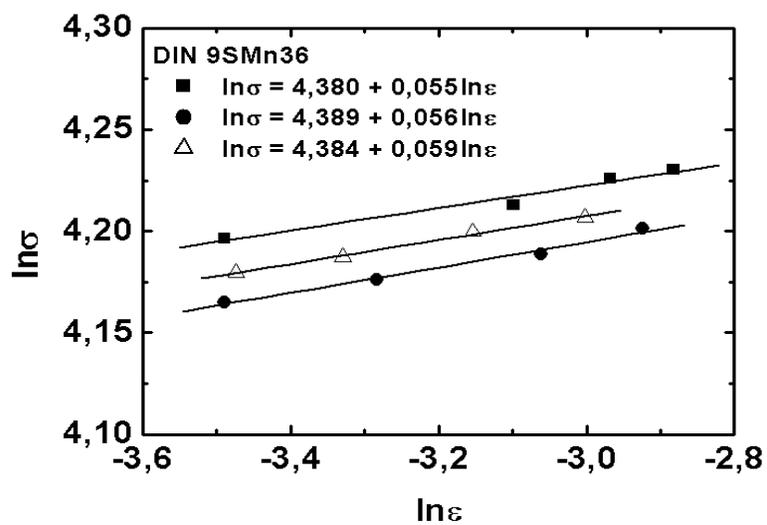


(b)

Figura 21: Evolução da tensão de fluxo com a deformação para os aços ABNT 1010 (a) e ABNT12L14 (b) obtida no ensaio de tração em uma velocidade de deformação de 0,2cm/min. Fonte: Dados da pesquisa



(a)



(b)

Figura 22: Evolução da tensão de fluxo com a deformação para o aço ABNT 10B22 (a) esferoidizado e fosfatizado e DIN9SMn36 (b) obtida no ensaio de tração em uma velocidade de deformação de 0,2cm/min

Fonte: Dados da pesquisa

A Tabela 6 mostra as expressões de Hollomon para os aços DIN 9SMn 36, ABNT 12L14, ABNT 10B22 e ABNT 1010, obtida através da regressão linear entre os pontos do regime plástico.

TABELA 6
Expressões de Hollomon para os aços DIN9SMn36, ABNT 12L14 e ABNT10B22

AÇO	Hollomon
DIN 9SMn36	$\sigma_r = 785.(\bar{\epsilon})^{0,058}$
ABNT 12L14	$\sigma_r = 897.(\bar{\epsilon})^{0,12}$
ABNT 10B22	$\sigma_r = 733.(\bar{\epsilon})^{0,10}$
ABNT 1010	$\sigma_r = 525.(\bar{\epsilon})^{0,12}$

Fonte: Dados da pesquisa

A expressão de Hollomon média para três corpos-de-prova do aço ABNT 1010 foi:

$$\sigma_r = 525.(\bar{\epsilon})^{0,12}$$

A curva de fluxo para material ABNT 1010 esferoidizado e fosfatizado obtida no ensaio de compressão (ISHIKAWA, *et al.* 2002) leva à seguinte expressão:

$$\sigma_r = 759.(\bar{\epsilon})^{0,24}$$

O tratamento térmico aliado à presença de inclusões podem justificar a discrepância desses resultados.

A Figura 23 apresenta as deformações referentes ao campo plástico no ensaio de tração para os aços ABNT 12L14 , ABNT 10B22 e DIN8SMn36.

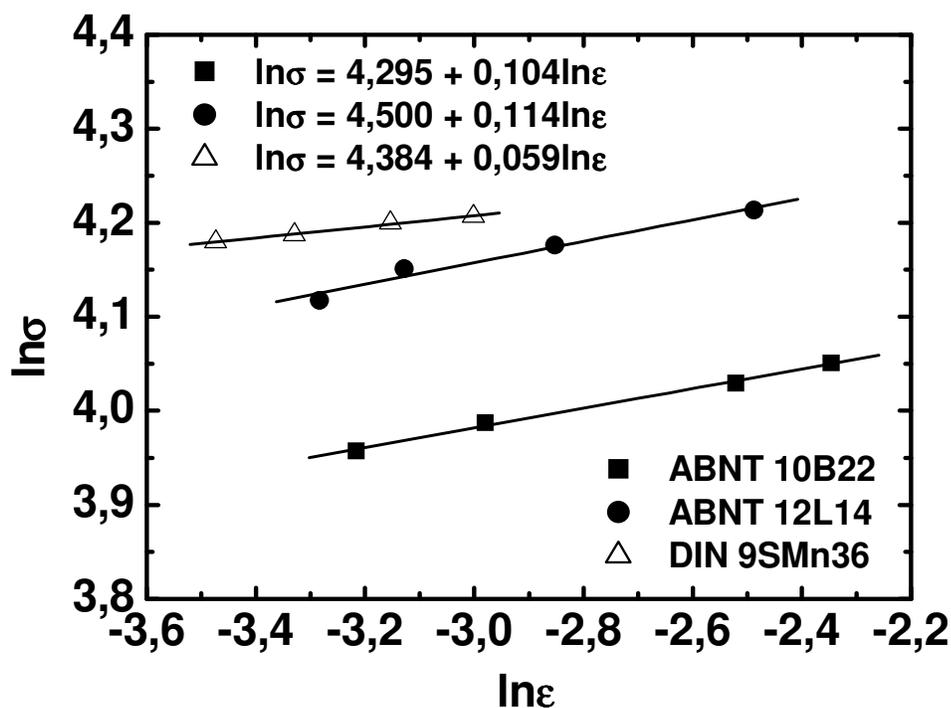


Figura 23: Região compreendida entre o limite de escoamento e limite de resistência para os aços ABNT 10B22, ABNT 12L14 e DIN 9SMn36
Fonte: Dados da pesquisa

Observa-se que o campo de deformação plástica do material DIN 9SMn36 é menor em relação aos materiais ABNT 10B22 e ABNT 12L14. Comprova-se, então que o projeto da liga DIN 9SMn36 foi feito para produção de materiais usinados.

A Tabela 7 mostra os resultados do limite de escoamento, limite de resistência e alongamento obtidos no ensaio de tração dos corpos-de-prova dos aços ABNT 1010, ABNT 12L14, DIN 9SMn 36 e ABNT 10B22 .

TABELA 7

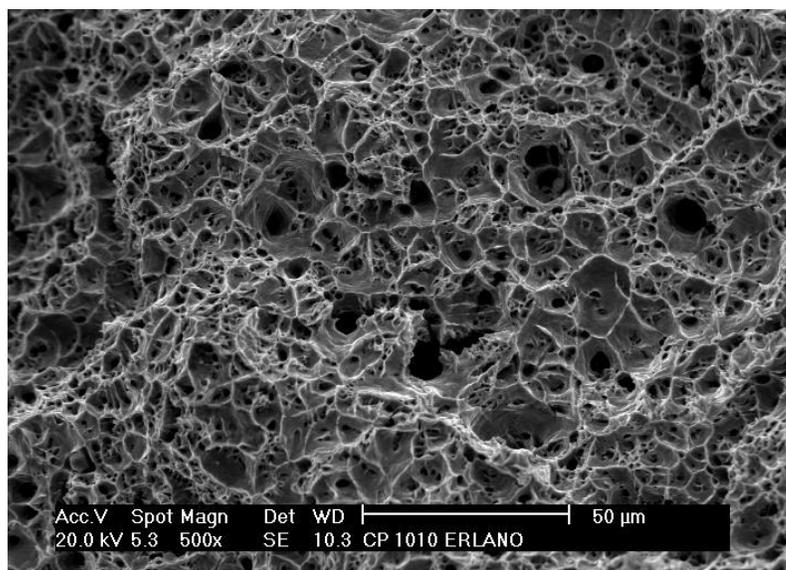
Resultado do limite de escoamento, resistência e alongamento, para os aços ABNT 1010, ABNT 12L14, DIN 9 SMn36 e ABNT 10B22

Tipo de Aço	Limite Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
ABNT 1010	324,70+ - 4,17	361,57+ - 0,96	30,6 + - 1,5
ABNT 12L14	540,77+ - 2,77	608,00 + -1,65	12,2 + - 0,2
DIN 9SMn36	618,55+ -12,47	627,76+ - 8,68	8,3 + - 1,5
ABNT 10B22	483,0+ - 5,50	519,40+ - 4,50	21,3+- 1,0

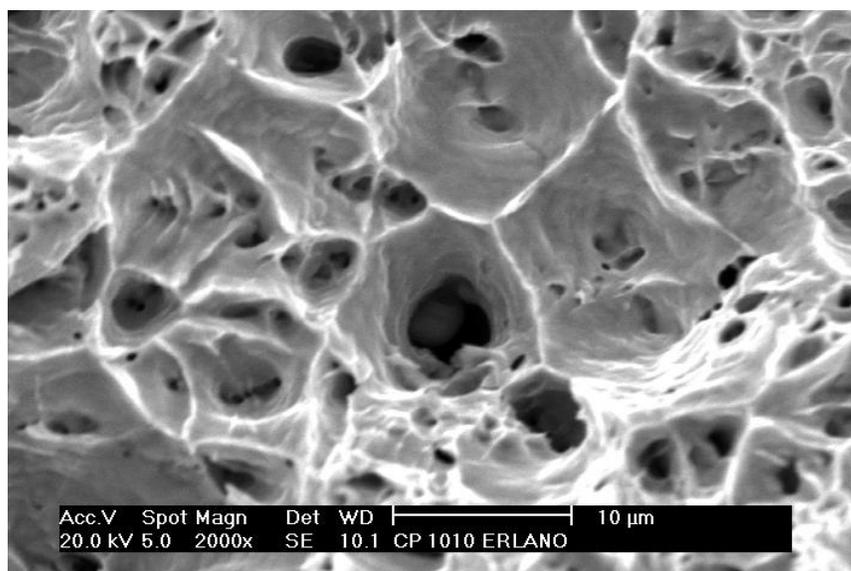
Fonte: Dados da pesquisa

Observa-se que o valor do alongamento do aço ABNT 1010 é superior aos aços ABNT 12L14, DIN 9SMn36 e ABNT 10B22. Os valores de resistência mecânica são inferiores, o que não é justificado pela presença do carbono na composição química.

Posteriormente, a fratura dos corpos-de-prova do ensaio de tração do ABNT 1010 foi observada no MEV em aumento de 500 e 800X (Figura 24 (a) e (b)). Essas Figuras mostram a presença de “dimples” na superfície de fratura, o que justifica o valor de alongamento encontrado. Constatou -se inclusões na área de fratura cujas análises por EDS, revelaram ser de Al_2O_3 , FeO e $Al_2O_3 \cdot FeO$ (Figura 24(a)).



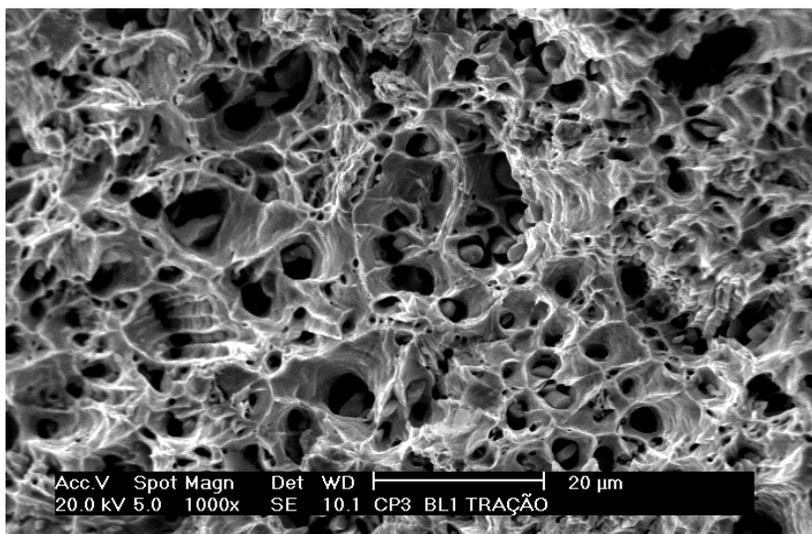
(a)



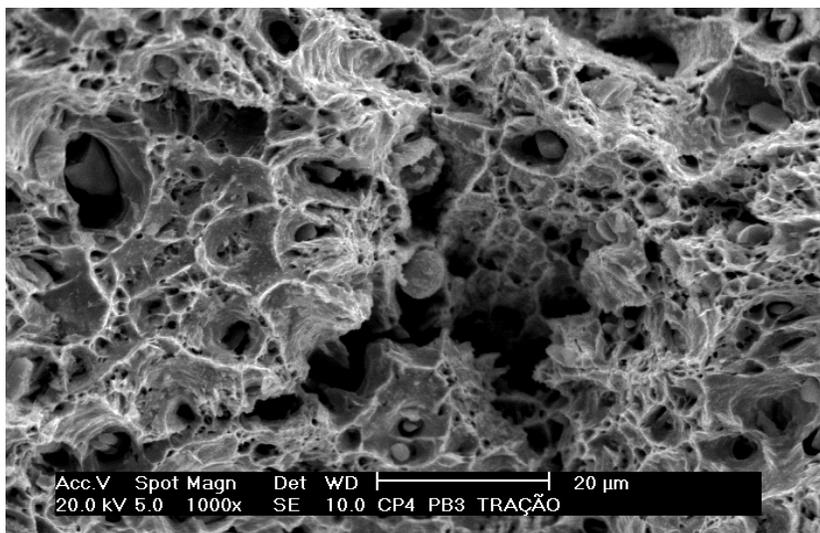
(b)

Figura 24: Análise de fratura corpo-de-prova de 8,0mm obtido no sentido da laminação do aço ABNT 1010 com aumento de 500X (a) e 2000X (b).
Fonte: Fotografia de Erlano Campos dos Reis

Para os aços DIN 9SMn36 e ABNT 12L14, é provável que a presença de poros e o seu coalescimento durante a sollicitação tenha contribuído para a queda da ductilidade e o baixo valor de alongamento verificado, Figura 25 (a) e (b).



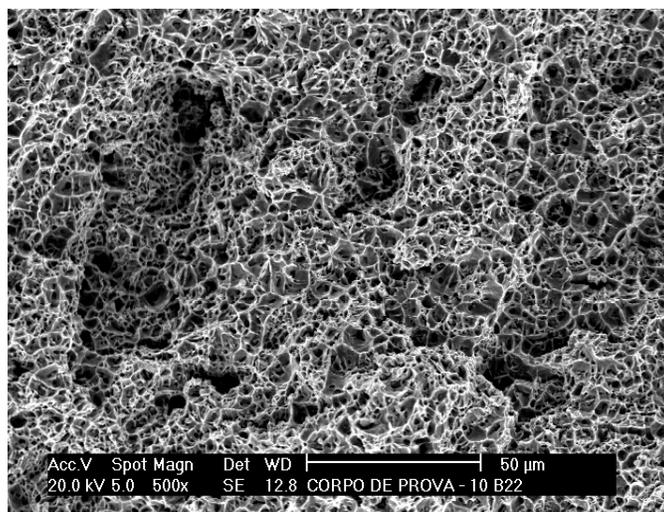
(a)



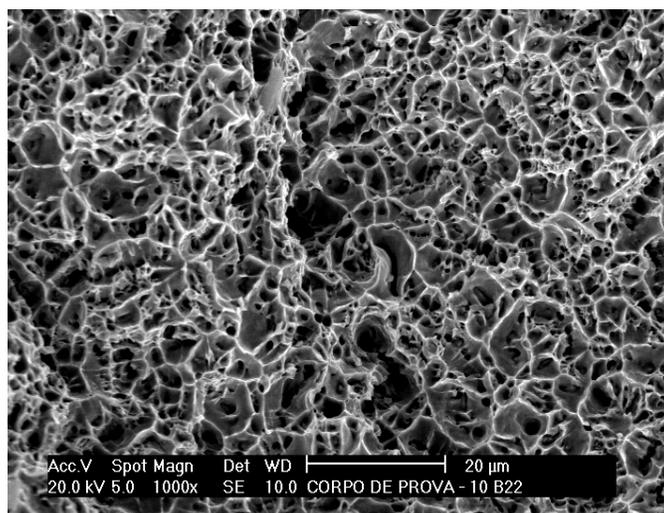
(b)

Figura 25: Análise de fratura em MEV em corpo-de-prova de Din9SMn36 (a) e ABNT12L14 (b) obtidos no sentido da laminação com aumento de 1000X (a) e 1000X (b).
Fonte: Fotografia de Erlano Campos dos Reis

A Figura 26 mostra a análise de fratura em MEV em corpo-de-prova de aço ABNT10B22. Observa-se a presença de “dimples” evidenciando fratura dúctil e a coalescência de microporos, ocasionando microtrincas que, ao se propagarem, fraturam o corpo-de-prova. Esses microporos se apresentam alinhados com o coalescimento (b). Eventualmente, os poros continham partículas de inclusão, entre as quais FeO.MnO.



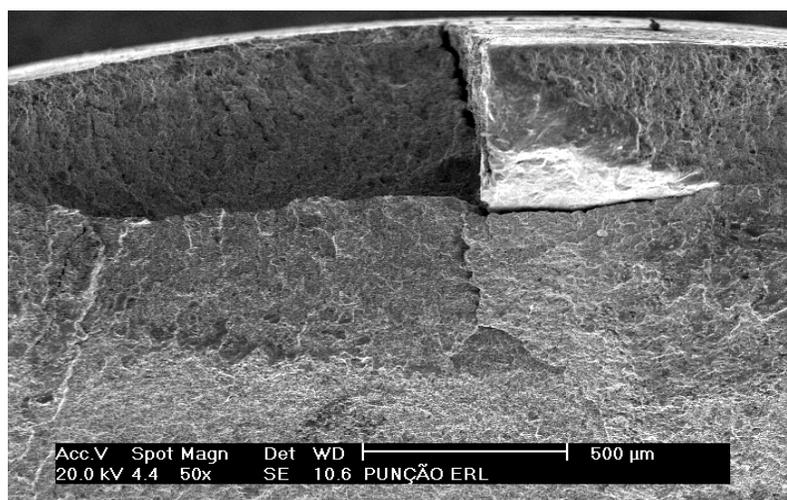
(a)



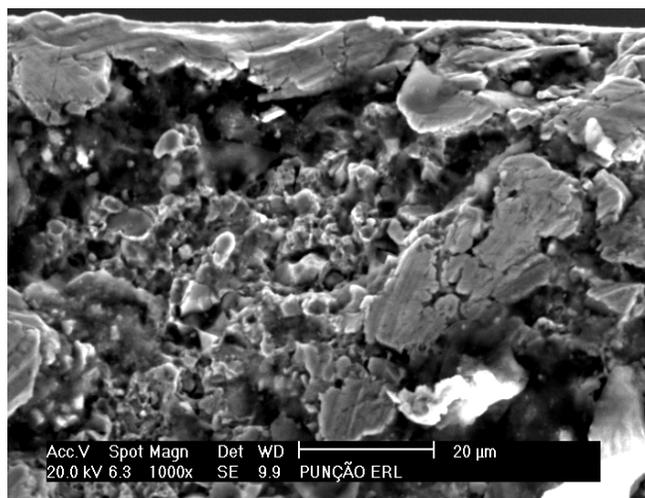
(b)

Figura 26: Análise de fratura em MEV em corpo-de-prova de ABNT 10B22 obtidos no sentido da laminação. Aumento : 500X (a) 1000X (b) .
Fonte: Fotografia de Erlano Campos dos Reis

A Figura 27 (a) mostra-se o aspecto da fratura na seção transversal do punção, onde se observa o surgimento de trinca na mudança de diâmetro de 12 mm para 11,20 mm. As trincas iniciam-se em diferentes pontos da superfície e, ao se propagarem, encontram-se e alteram o sentido de propagação. Partículas de carboneto próximas à superfície foram cisalhadas ou deformadas em razão das elevadas cargas do processo de conformação (Figura 27 (b)).



(a)



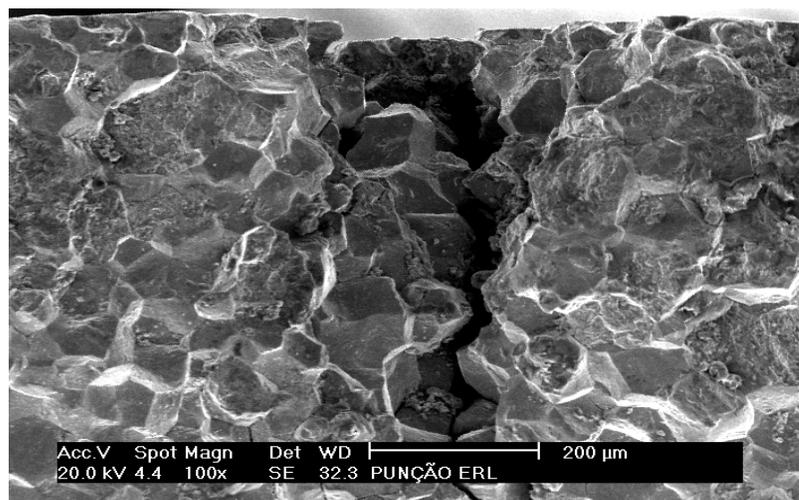
(b)

Figura 27: Fratura do punção mostrando início de formação e propagação (a) e partículas de carboneto com trincas e “deformadas” (b).

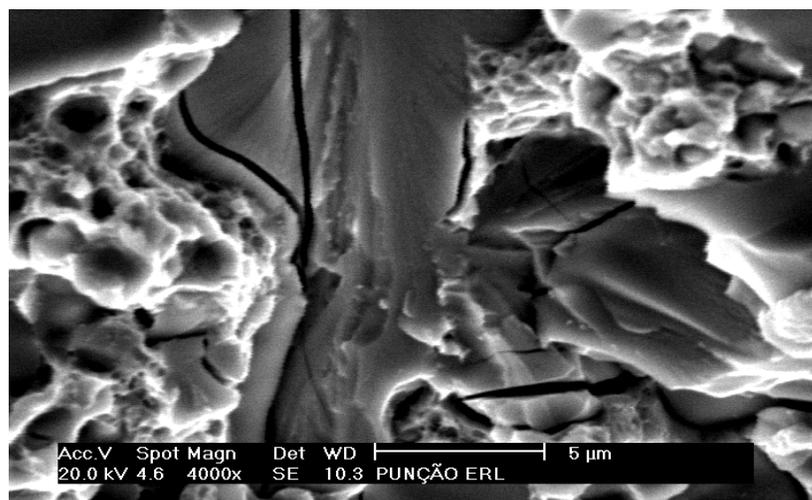
Fonte: Fotografia de Erlano Campos dos Reis

Outro punção apresentou trinca intergranular, partindo-se da superfície. A granulação do material é grosseira, o que evidencia deficiência no tratamento térmico com temperaturas elevadas de austenização (Figura 28 (a)).

Outra fratura em novo punção apresentou microtrinca na região central entre as partículas de carboneto ou cortando essas mesmas partículas. A análise dessas partículas mostrou a presença de cromo, carbono e vanádio, o que possivelmente deve ser FeCrC_6 (Figura 28(b)).



(a)



(b)

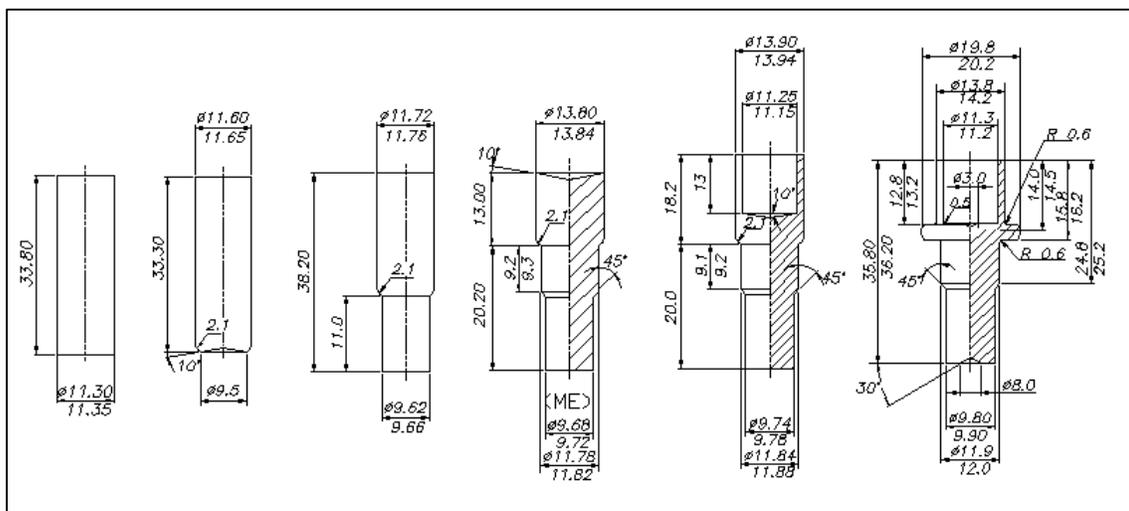
Figura 28: Análise de fratura em MEV em corpo-de-prova de aço ABNT D6 fraturado no processo de conformação. Aumento: (a) 100X (b)4000X.
Fonte: Fotografia de Erlano Campos dos Reis

Em função da fratura do punção se tratar de problema de tratamento térmico e presença de carbonetos grosseiros de cromo, alterou-se o material do punção para AISI M2 e foi feito tratamento térmico em banho de martêmpera.

4.2 Simulação do forjamento do terminal

4.2.1 Pré-projeto

A seqüência abaixo mostra as etapas definidas inicialmente para a confecção do terminal (Figura 29). Observa-se que a produção envolveu o corte do tarugo inicial e cinco estágios sendo eles: calibração; primeira extrusão a frente; segunda extrusão a frente; extrusão invertida; recalque e término da extrusão. ””””



A Figura 29: Apresenta desenho inicial das seis etapas consideradas necessárias para produção do terminal.

Fonte: Dados da pesquisa

4.2.2 Resultado da simulação do pré-projeto

Na simulação do aço ABNT 10B22, constatou-se que foi possível a produção do produto nas dimensões do projeto, utilizando-se ou não o primeiro estágio que é a etapa de calibração. Sendo assim, foi eliminado esse primeiro estágio nas etapas posteriores de experimentação em razão do valor de carga encontrado e obtenção do produto sem este estágio. Houve, também, o aparecimento de dobra na quinta etapa de simulação do material ABNT 10B22. Verificou-se na simulação numérica que essa dobra ocorria em razão da profundidade da extrusão invertida com o recalque para a obtenção da flange. Para a correção desta anomalia, foi reduzida a profundidade da extrusão invertida do quinto estágio e alterado o projeto. O dimensional da altura de 13mm do diâmetro de (\varnothing 11)mm foi alterado para a altura de 10,5mm (MACHADO, 2006). Com isto, na operação posterior, houve a formação da flange através do recalque sendo esta nova seqüência utilizada para a simulação física dos materiais ABNT 1010, DIN9SMn36, ABNT12L14.

4.2.3 Resultado experimental / simulação do projeto final

Baseado nos resultados da simulação, o projeto final envolveu o corte do tarugo inicial e quatro estágios sendo eles: primeira extrusão a frente; segunda extrusão a frente; extrusão invertida; recalque e término da extrusão (Figura (30)).

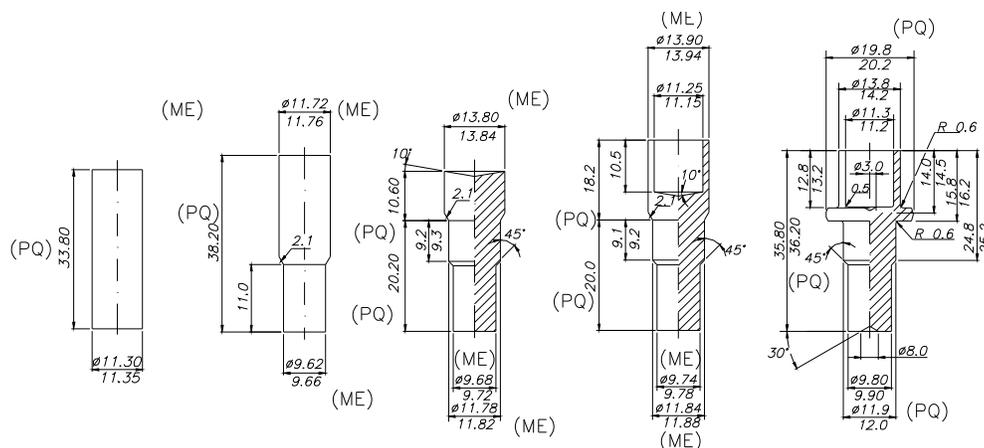


Figura 30: Desenho definitivo das cinco etapas consideradas necessárias para produção do terminal
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 31 mostra a evolução da carga em função dos estágios. Observa-se que a elevação de carga foi mais acentuada no terceiro e quarto estágios. Até ao segundo estágio foi possível a deformação das ligas DIN9SMn36, ABNT12L14 e ABNT 1010.

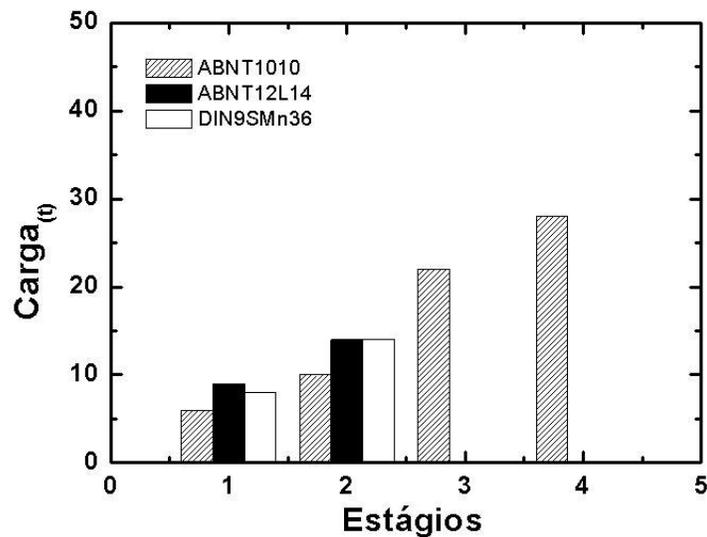


Figura 31: Apresenta a evolução da carga em função dos estágios de fabricação.
Fonte: Dados da pesquisa

O punção sofreu alteração dimensional no terceiro estágio para os materiais DIN9SMn36 e ABNT12L14, conforme mostrado na Figura 32.

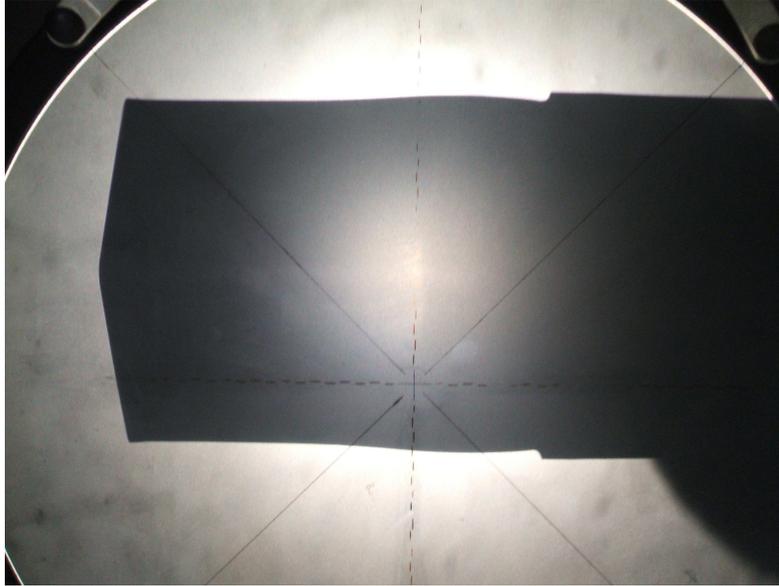
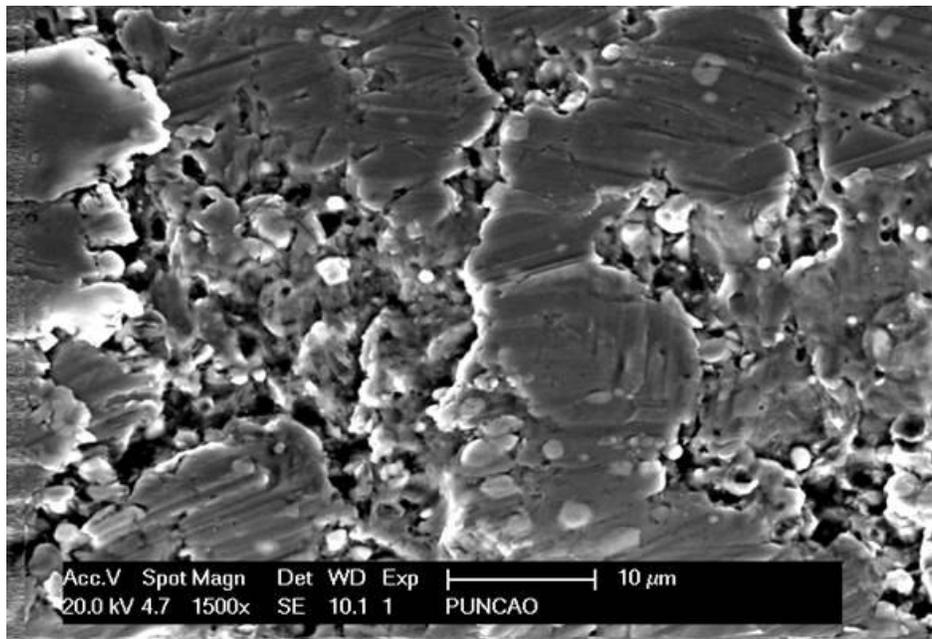
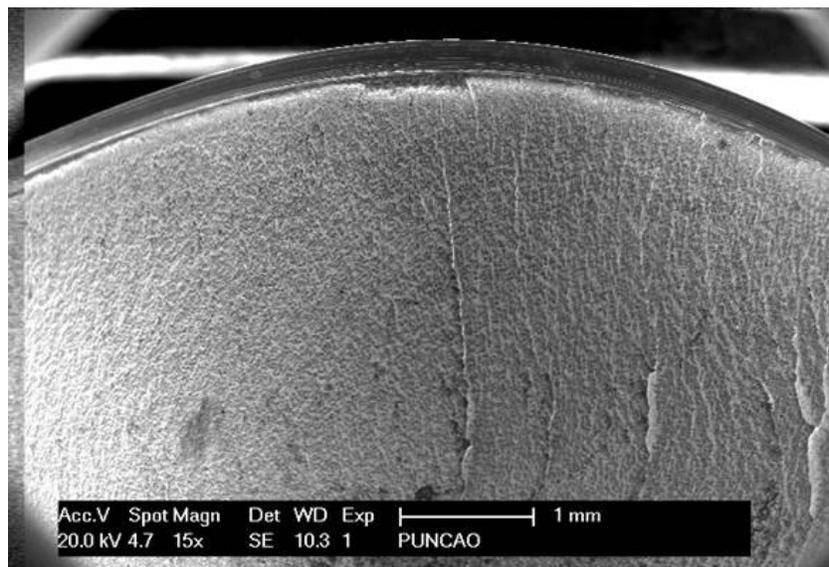


Figura 32: Alteração dimensional do punção do terceiro estágio
Fonte: Fotografia de Erlano Campos dos Reis

A Figura 33(a) mostra a região de fratura no microscópio de varredura do punção no terceiro estágio (extrusão invertida) utilizado no experimento dos aços DIN 9SMn36 e ABNT12L14. Nota-se a presença de estrias evidenciando a presença de deformação plástica intensa. Observa-se também a presença de carbonetos sem trinca. A Figura 33(b) mostra região de mudança dimensional do punção e também diversas trincas partindo desta região. Esta região que sofreu deformação plástica evolui e, ao encontrar a mudança de seção, gera a trinca que se propaga no sentido radial do punção, reduzindo a sua seção resistente.



(a)



(b)

Figura 33: Região de fratura no microscópio de varredura (a) e mudança dimensional do punção(b).
Fonte: Fotografia de Erlano Campos dos Reis

A Figura 34 apresenta o detalhe da Figura 33 na qual se observa sinal de deformação plástica culminando com trinca radial

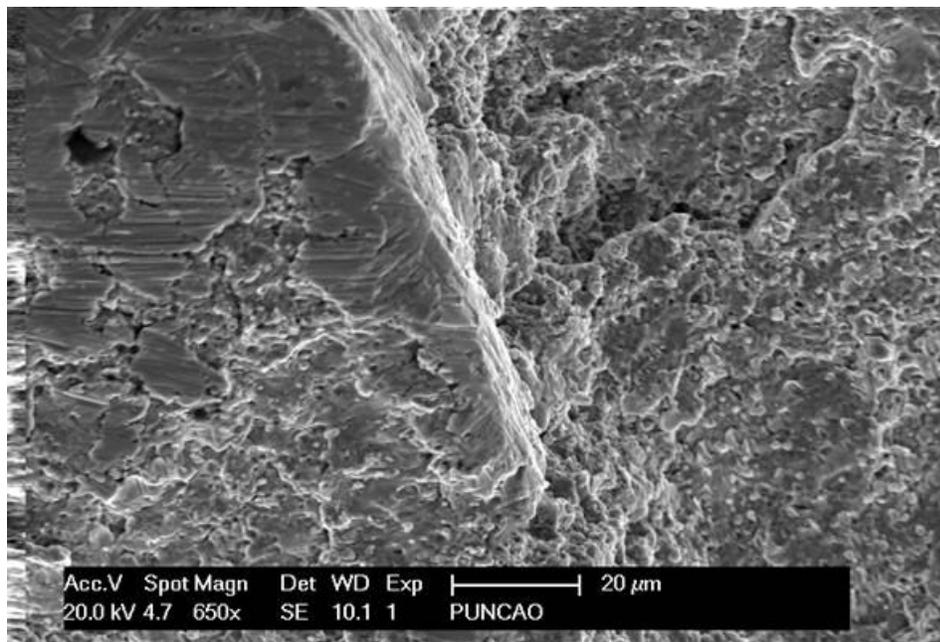


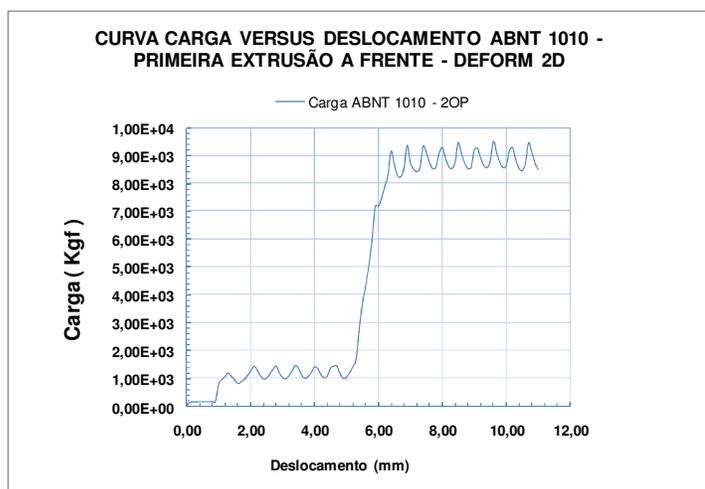
Figura 34: Detalhamento de trinca da Figura 33 (b).
Fonte: Fotografia de Erlano Campos dos Reis

A partir dos dados obtidos deu-se início à simulação experimental e numérica somente para o material ABNT1010.

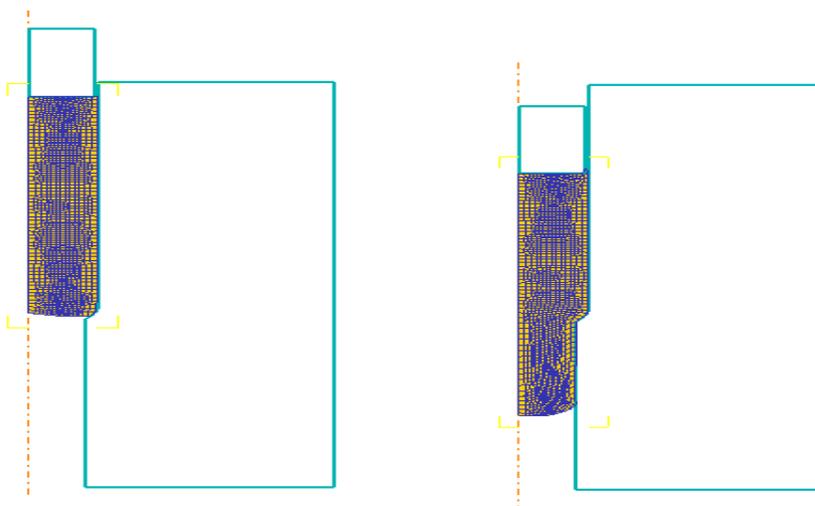
4.3 Simulação do forjamento do ABNT 1010

A Figura 35(a) mostra a curva carga versus deslocamento para a primeira etapa extrusão a frente do material ABNT 1010 e a Figura 35 (b) mostra o início e término da simulação para o primeiro estágio. Observa-se que a carga evolui até 1000 kgf, estabiliza neste valor e em seguida cresce até 9000 kgf. Esta estabilização em 1000 kgf ocorreu devido a compressão do material para a formação do diâmetro

9,62mm. A elevação da carga para 9000 kgf foi devido ao escoamento do material na região de mudança do diâmetro de 11mm para o diâmetro de 9,62mm. Nota-se que a carga permaneceu constante após o escoamento do material com a formação do diâmetro de 9,62mm.



(a)



(b)

Figura 35: Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e término da simulação para o primeiro estágio (b).

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 36(a) e (b) mostram a curva carga versus deslocamento para a segunda etapa da extrusão a frente e o início e término da simulação do material ABNT 1010 respectivamente. Verifica-se que o deslocamento inicial foi de 11 mm em razão da conformação da primeira operação ter sido a base para o segundo estágio. Nos diferentes estágios da simulação, foram obtidas as novas propriedades mecânicas no programa Deform 2D a partir da curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira inicial. No intervalo de deslocamento de (11 a 15)mm houve acréscimo na carga de (0 a 1000) kgf devido à deformação por compressão para a calibração dos diâmetros de 9,72 mm e 11,68 mm. Em seguida, a carga elevou-se de (1000 a 6750) kgf para a formação do diâmetro de 13,84mm.

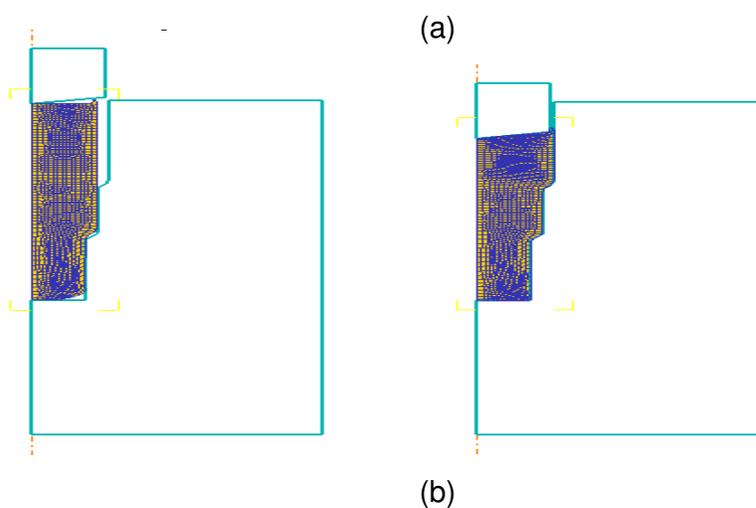
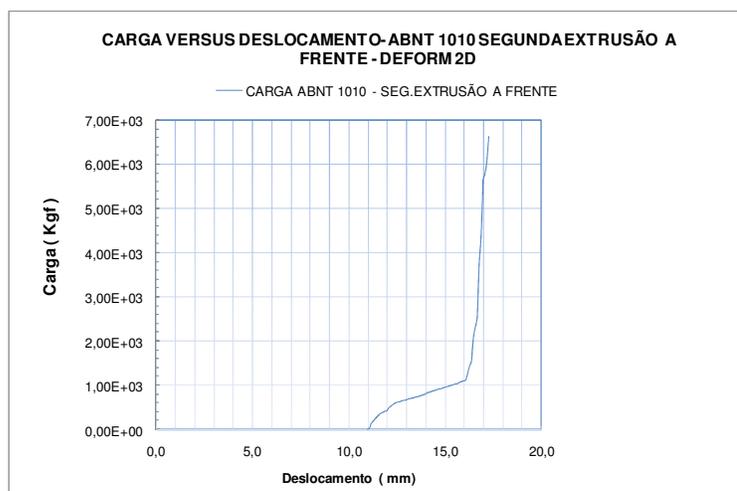
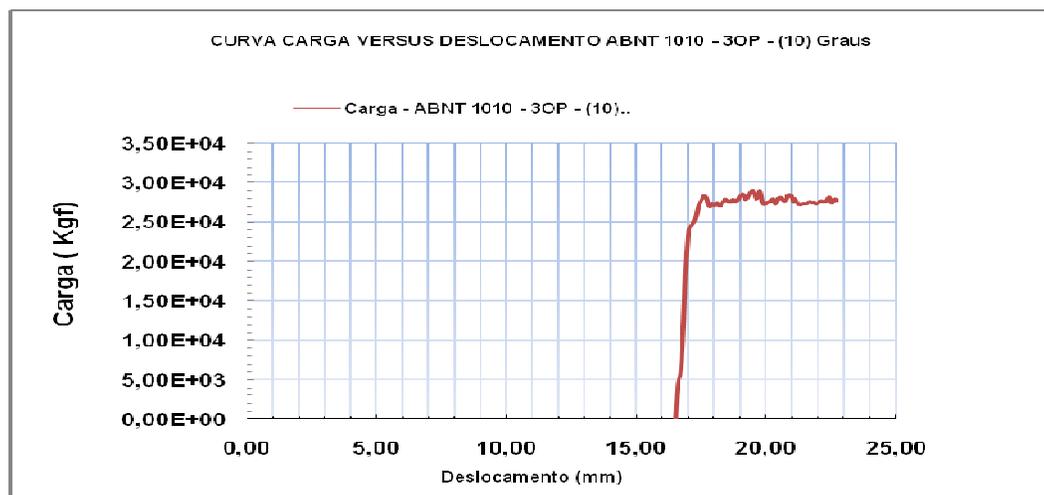
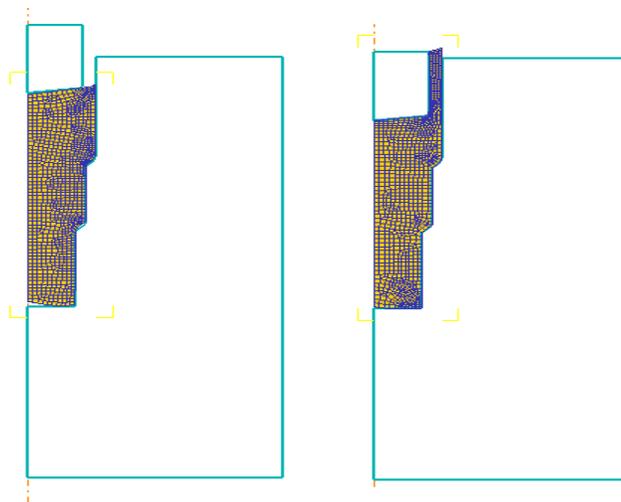


Figura 36: Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e término da simulação para o segundo estágio (b).
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 37(a) e (b) mostram a curva carga versus deslocamento para a terceira etapa de extrusão a frente e o início e término da simulação do material ABNT 1010 respectivamente. Verifica-se que a carga necessária para a ascensão e formação do anel circular ($\varnothing 13,90 \times \varnothing 11,25 \times 10,5$)mm foi de 28000 kgf.



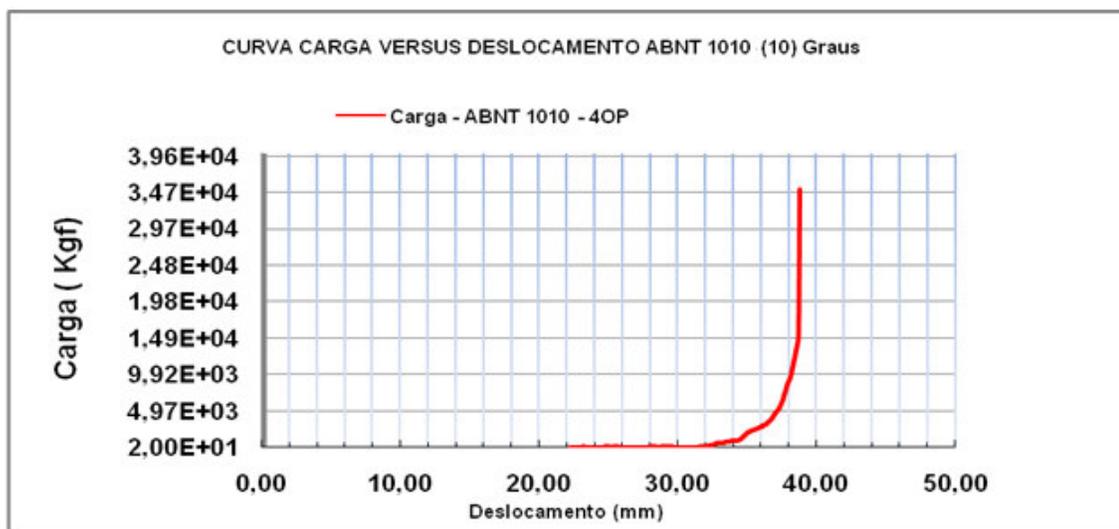
(a)



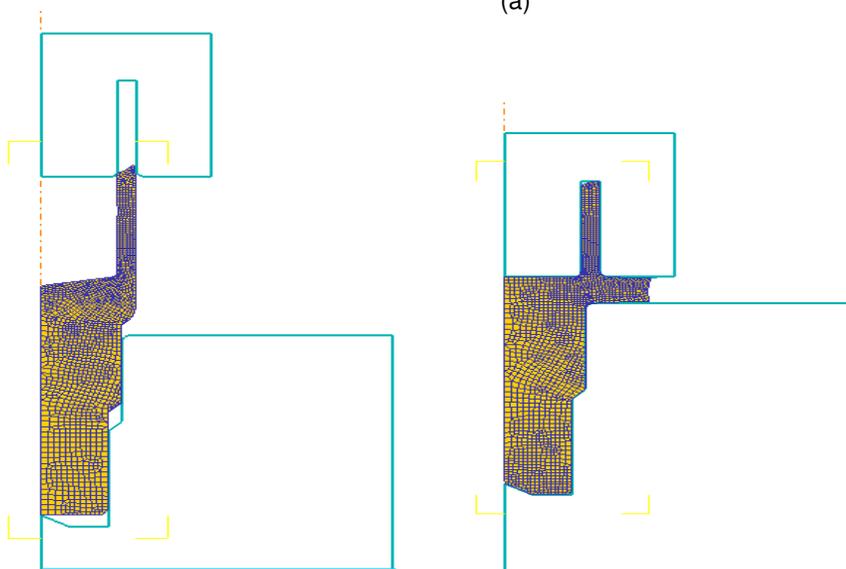
(b)

Figura 37: Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e término da simulação para o terceiro estágio (b)
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 38(a) e (b) mostram a curva carga versus deslocamento para o quarto estágio (recalque para a formação do flange) e o início e término da simulação do ABNT 1010 respectivamente. Verifica-se que a carga necessária para a formação do flange foi de 35000 kgf.



(a)



(b)

Figura 38: Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e término da simulação para o quarto estágio (b)
Fonte: Dados da pesquisa

Acredita-se que as divergências entre os valores de cargas experimentais e numéricas foram devido a não utilização de um fim de curso na prensa hidráulica de simples efeito durante a etapa experimental.

Como havia a possibilidade de alteração do projeto, objetivando a redução de carga, optou-se pelo estudo da variação do ângulo do punção de 0 a 45 graus para o terceiro estágio.

A Figura 39 mostra as curvas de carga em função da variação do ângulo do punção para o terceiro estágio. Observa-se que a carga final foi praticamente a mesma para os diferentes ângulos de punção (0, 3, 15, 20, 30 e 45) graus, mas o deslocamento do punção foi maior para maiores ângulos, e cresceu mais rapidamente para os ângulos de 30 e 45 graus. A operação ocorre pelo preenchimento inicial de material dos diâmetros de 9,74 e 11,84 mm e, somente depois a compressão do material sob o punção, e, em seguida, a extrusão a ré do material sob o punção. Para os ângulos de 30 e 45 graus, a compressão do material sob o punção demanda mais tempo em função maior volume de material a ser deslocado.

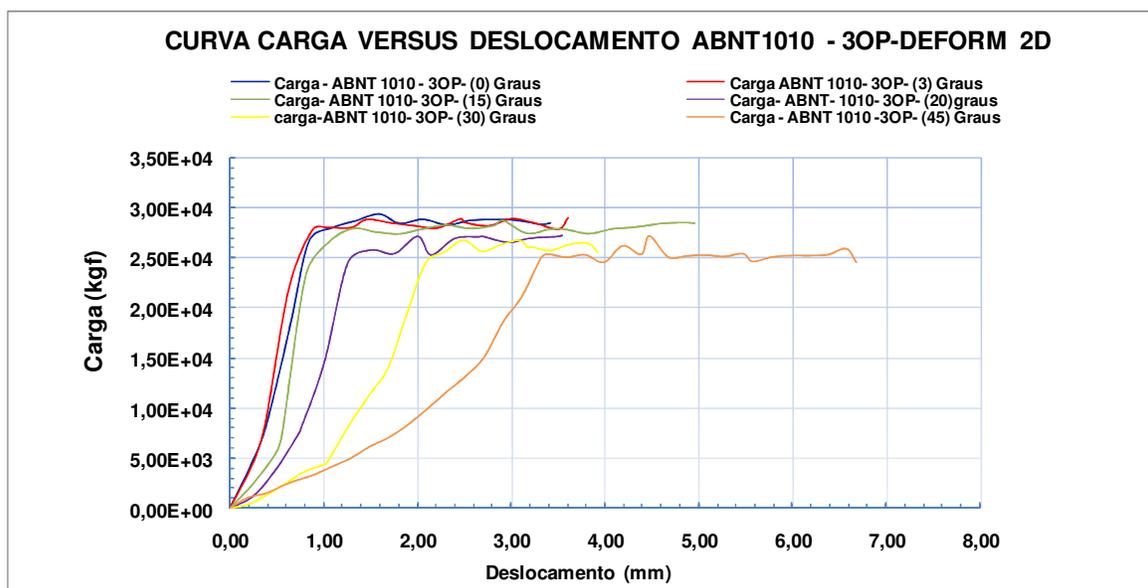


Figura 39: Apresenta curva carga versus deslocamento em diferentes ângulos na operação de extrusão invertida

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 40 mostra a evolução da carga em função do ângulo do punção para o 3° estágio que corresponde a extrusão invertida. Observa-se que a carga dependida na prensa não apresentou variação com os ângulos de punção de 0, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 13, 15, 20, 30 e 45 graus e correspondeu aos valores obtidos na simulação. Constatou-se, também, experimentalmente, que a alteração do ângulo do punção afeta o tempo de extrusão e a produtividade da operação.

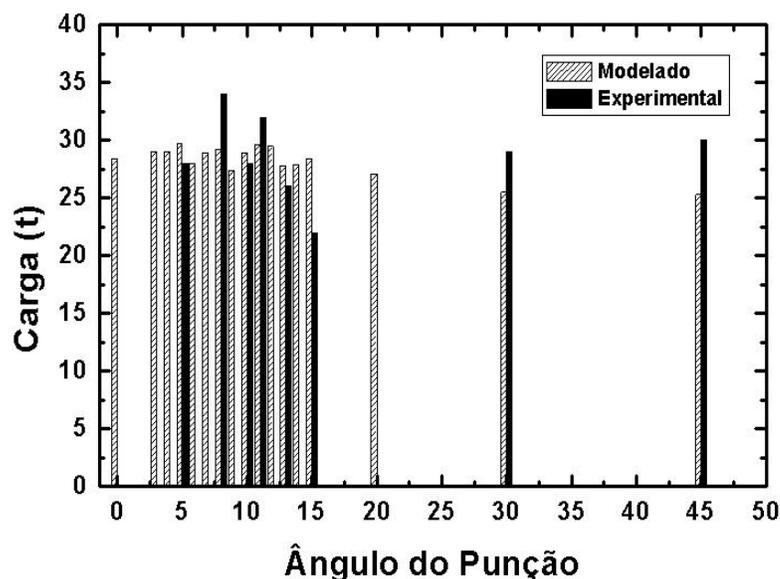


Figura 40: Evolução da carga em função do ângulo do punção na operação de extrusão invertida
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 41 mostra as deformações verdadeiras segundo os eixos X e Y entre o corte e o primeiro estágio. Nota-se que a região inferior do produto plano 1 apresentou deformação compressiva segundo o eixo X e deformação trativa segundo o eixo Y (pontos 1, 2, 21, 22, 23 e 24), e as regiões intermediária (plano 2) e superior (plano 3) não experimentaram qualquer deformação (pontos 20 e 25 mostraram estiramento possivelmente devido a cisalhamento entres as partes agrupadas da peças no interior da matriz).

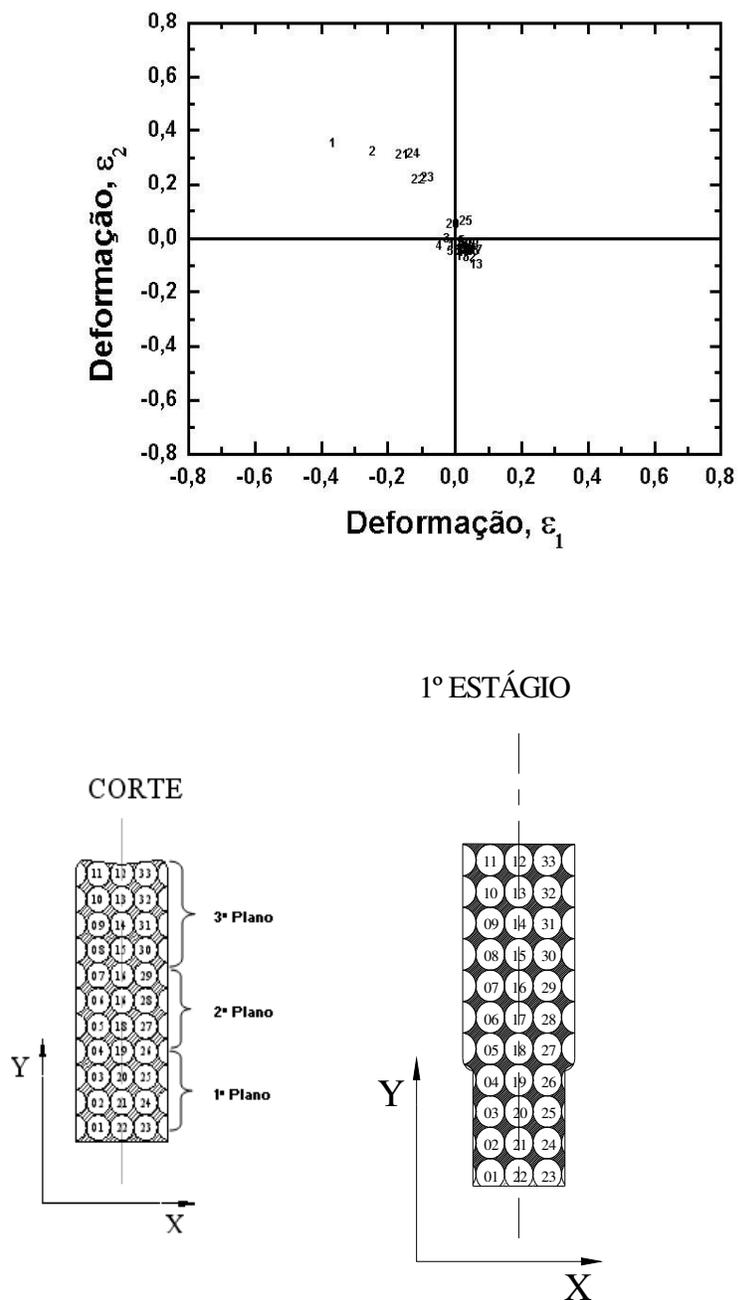


Figura 41: Deformações segundo os eixos X e Y ao longo da seção longitudinal da peça entre o corte e primeiro estágio.

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 42 mostra as deformações verdadeiras segundo os eixos X e Y entre o primeiro e o segundo estágio. Nota-se que a região correspondente ao plano 1 apresentou deformação compressiva segundo o eixo X e deformação trativa segundo o eixo Y (pontos 3 4 19 20 25 e 26), e os planos 2 (pontos 8, 9, 14, 15 e 30) e 3 (pontos 10, 13, 31 e 32) experimentaram deformação compressiva segundo eixo Y e trativa segundo o eixo X.

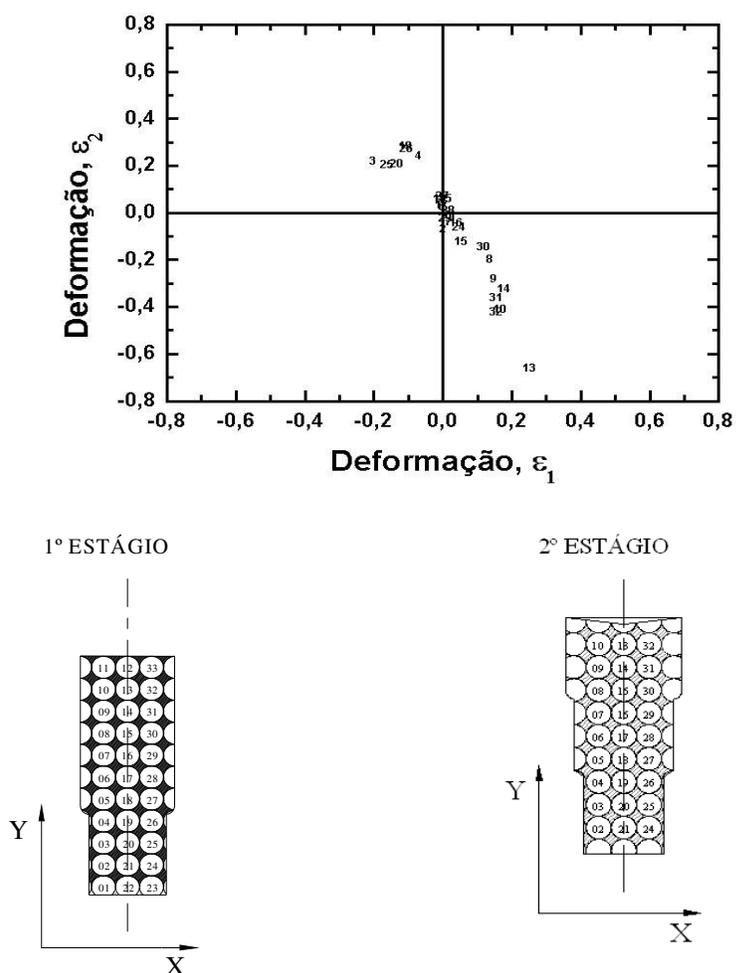


Figura 42: Deformações segundo os eixos X e Y ao longo da seção longitudinal da peça entre o primeiro e o segundo estágios.
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 43 mostra as deformações verdadeiras segundo os eixos X e Y entre o segundo e o terceiro estágio. Nota-se que a região correspondente ao plano 1 (pontos 3, 4, 19, 20, 25 e 26) e ao plano 2 (pontos 5, 6, 7, 8, 15, 16, 17, 18, 27, 28, 29, e 30) apresentou baixa deformação compressiva segundo o eixo X e deformação trativa segundo o eixo Y. Não foi possível medir a deformação no plano 3 devido a espessura da parede após a extrusão invertida.

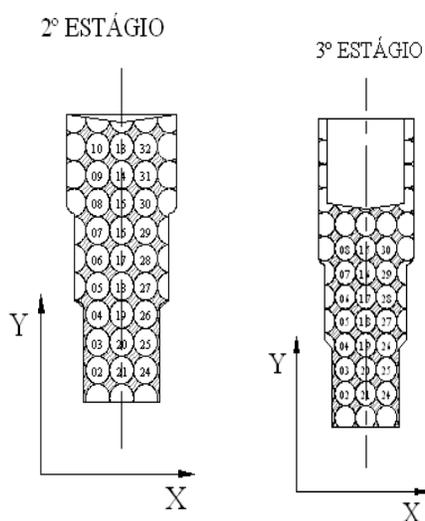
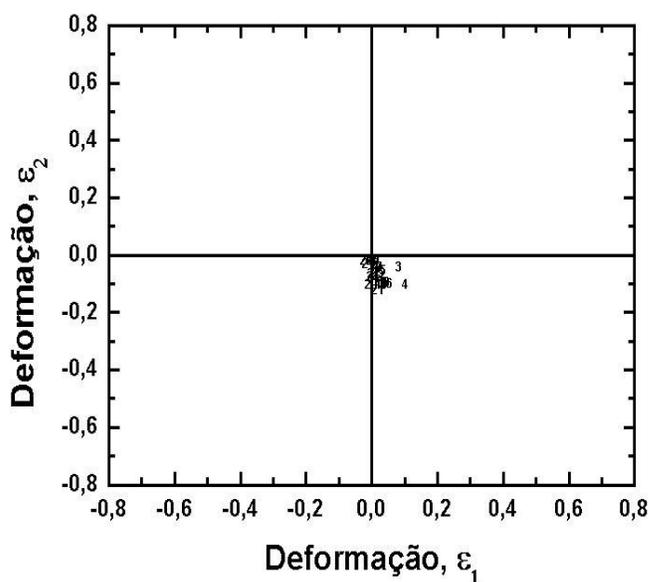


Figura 43: Deformações segundo os eixos X e Y ao longo da seção longitudinal da peça entre o segundo e o terceiro estágios
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 44 mostra as deformações verdadeiras segundo os eixos X e Y entre o terceiro e o quarto estágio. Nota-se que a região correspondente ao plano 1 (pontos 3, 4, 25 e 26) e ao plano 2 (pontos 5, 6, 7, 8, 15, 16, 17, 27, 28, 29, e 30) apresentou baixa deformação compressiva segundo o eixo Y e deformação trativa segundo o eixo X. O estiramento que ocorreu no plano 2 (ponto 18) é devido à formação do flange radial.

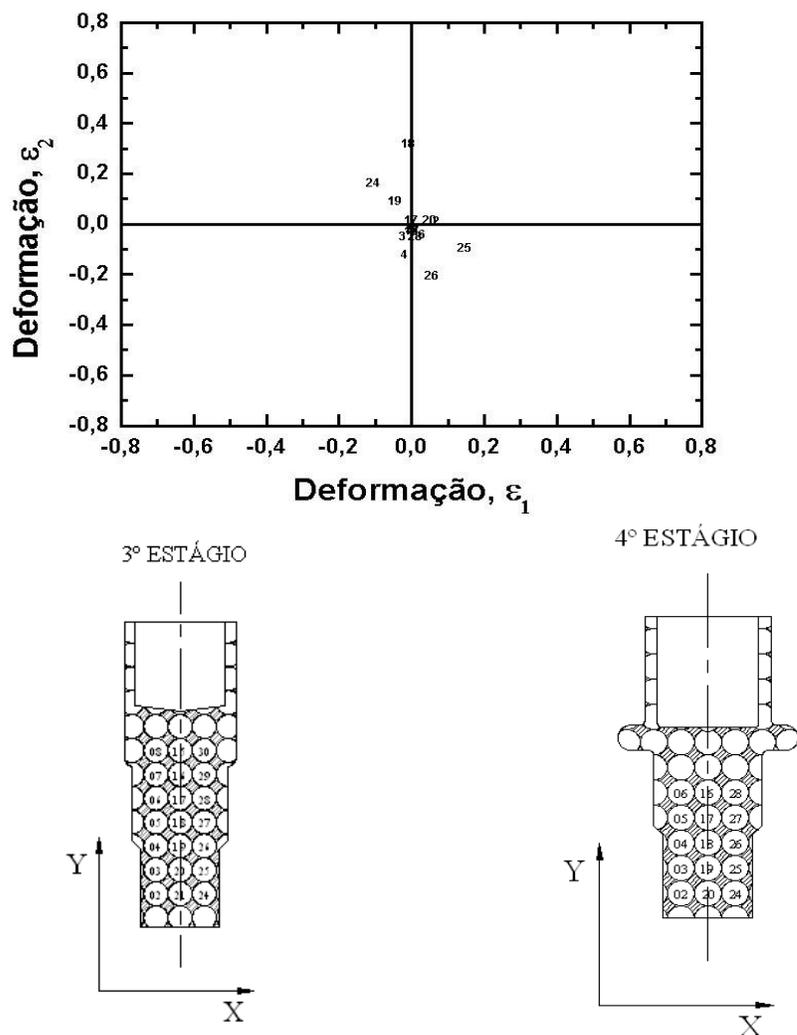


Figura 44: Deformações segundo os eixos X e Y ao longo da seção longitudinal da peça entre o terceiro e quarto estágios.

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 45 mostra a evolução da microdureza Vickers da superfície e centro do fio máquina ao longo do seu comprimento. Não houve alteração significativa na dureza da superfície e centro provavelmente devido ao tratamento de recozimento após a trefilação do fio - máquina. Simultaneamente essa uniformidade se apresentou ao longo do comprimento.

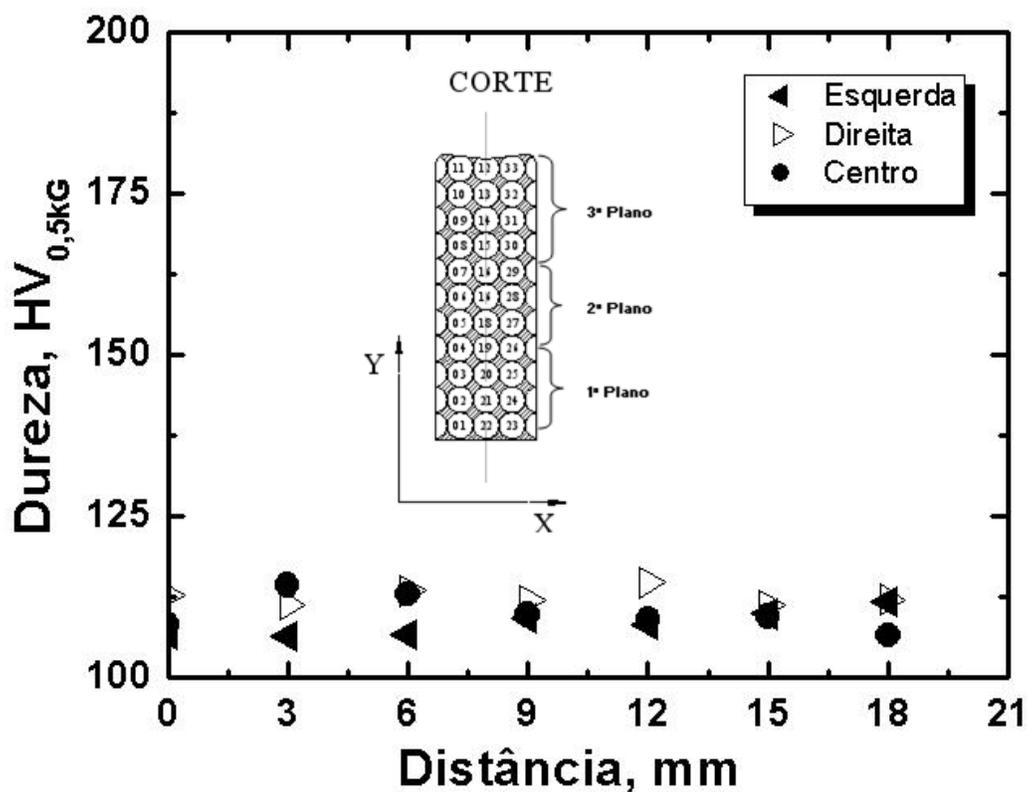


Figura 45: Evolução da microdureza da superfície e centro do fio-máquina ao longo do comprimento.
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 46 mostra a evolução da microdureza da superfície e centro para o primeiro estágio (primeira extrusão à frente). Houve acréscimo nos valores de microdureza tanto na superfície como no centro até a distancia de 9mm em relação a face inferior do primeiro plano. Não houve variação da microdureza em relação ao fio-máquina no segundo e terceiro planos em razão da deformação ter acontecido no primeiro plano.

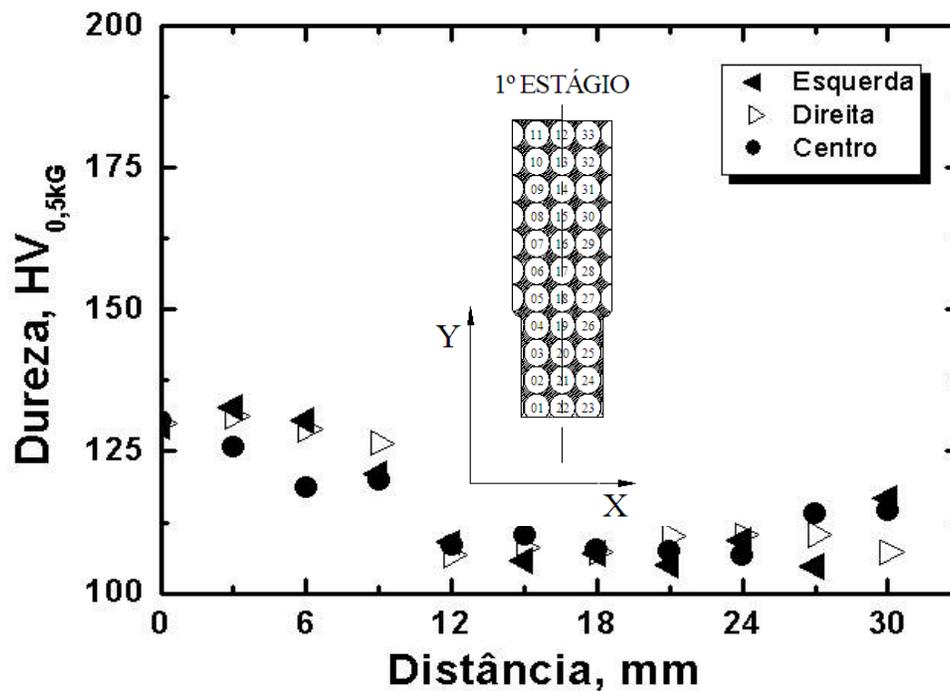


Figura 46: Evolução da microdureza da superfície e centro para o primeiro estágio.
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 47 apresenta a evolução da microdureza da superfície e centro para o segundo estágio (segunda extrusão). Não houve alteração da microdureza até a altura de 18mm do blanche correspondente aos planos um e dois, uma vez que o deslocamento do material ficou restrito ao terceiro plano, o que aumentou a microdureza da região.

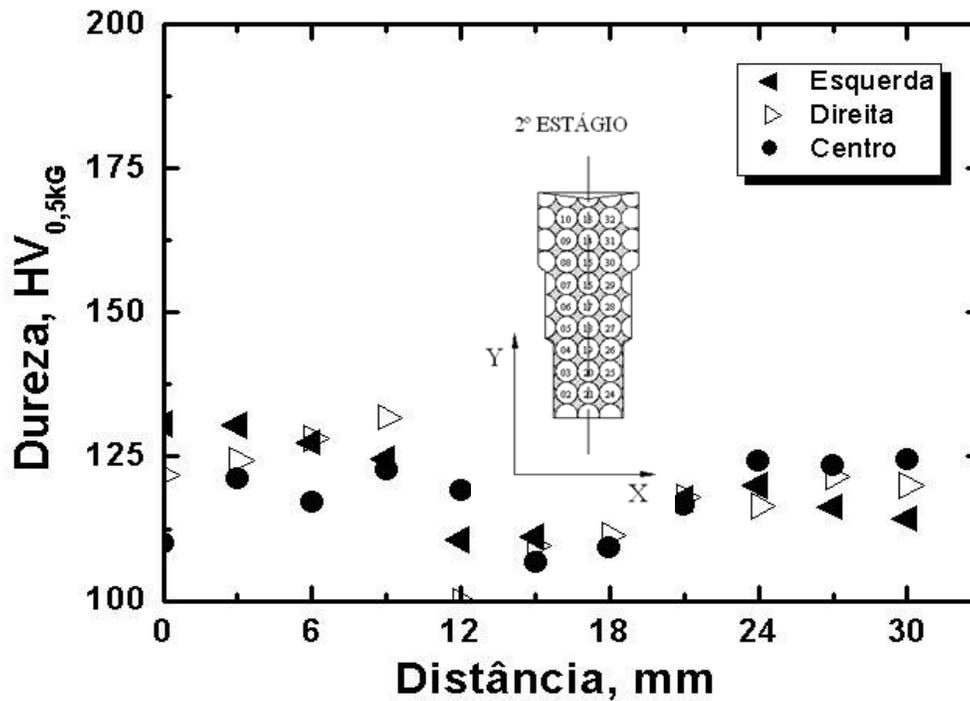


Figura 47: Evolução da microdureza da superfície e centro para o segundo estágio.
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 48 apresenta a evolução da microdureza da superfície e centro para o terceiro estágio (extrusão invertida). Não houve alteração da microdureza até a altura de 18mm do blanque correspondente aos planos um e dois, uma vez que o deslocamento do material ficou restrito ao terceiro plano, o que aumentou a micro dureza da região. Mediu-se no centro a microdureza somente na altura de 24mm correspondente ao contato do punção com o blanque. O valor de microdureza encontrado foi maior em razão da compressão entre o punção e blanque. Na superfície, após 24mm de altura, o acréscimo de micro dureza foi em ambos os lados em razão do estiramento no sentido contrario ao deslocamento do punção.

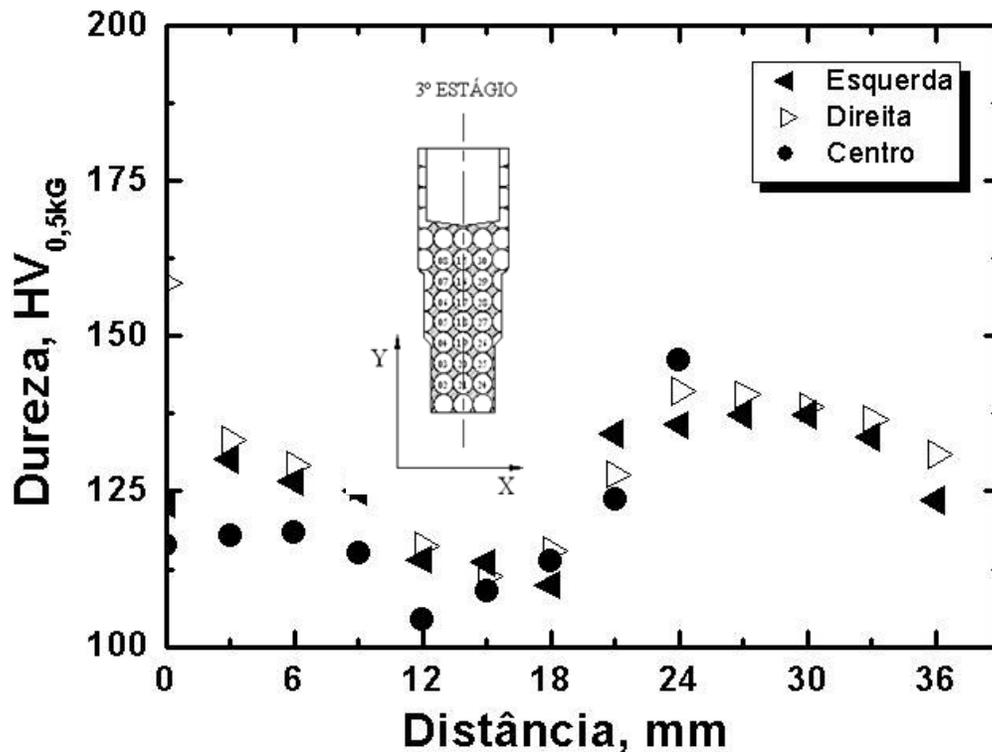


Figura 48: Evolução da microdureza da superfície e centro para o terceiro estágio.
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 49 apresenta a evolução da microdureza da superfície e centro para o quarto estágio (formação da flange). Não houve alteração da microdureza até a altura de 18mm do blanque correspondente aos planos um e dois, uma vez que o deslocamento do material ficou restrito ao terceiro plano, o que aumentou a micro dureza da região. Mediu-se no centro a microdureza somente na altura de 18mm correspondente ao contato do punção com o blanque. Na superfície, após 18mm altura, não houve alteração da microdureza em ambos os lados.

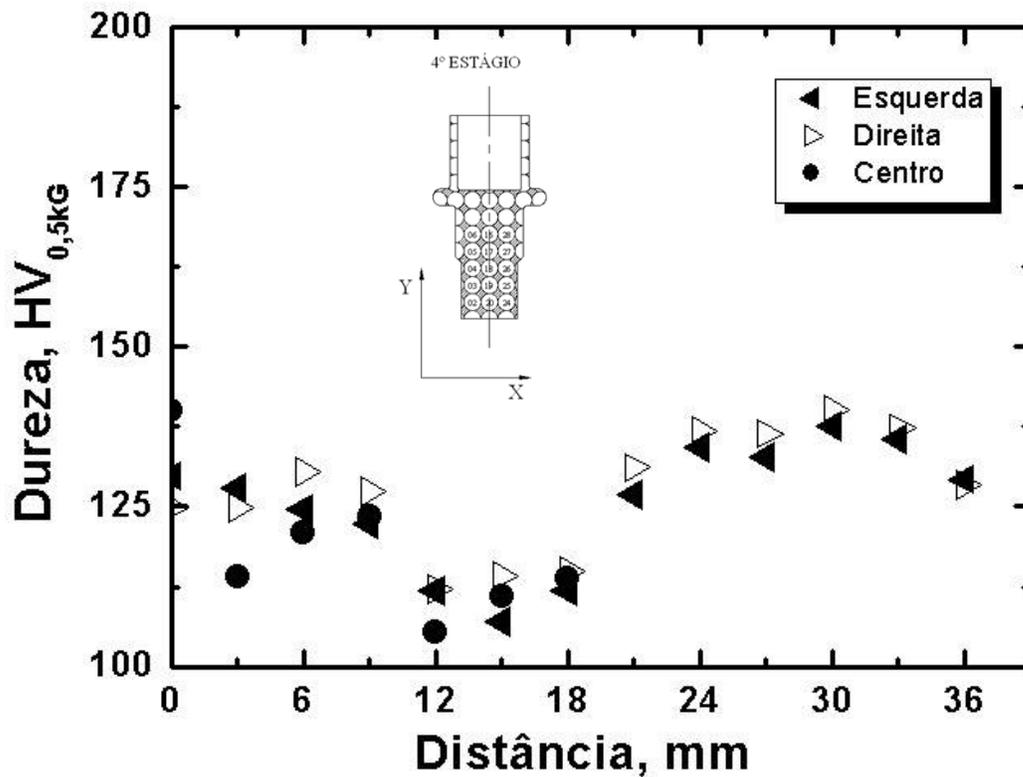


Figura 49: Evolução da microdureza da superfície e centro para o quarto estágio.
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 50 mostra a evolução de microdureza ao longo da espessura do flange em distâncias de 1mm a partir da extremidade. Observa-se o acréscimo de microdureza da extremidade em direção à região de contato do punção, evidenciando maior deformação nesta face em comparação à extremidade do flange. Como o sentido de deslocamento do fluxo de material alterou em relação aos outros estágios, somente esta maior deformação não justificaria esta alteração de propriedade mecânica. Necessita-se, então, de estudo complementar no sentido de justificar esta alteração de propriedades mecânicas, mas, também, este acréscimo de resistência aliado à concentração de tensão no contato do punção pode ter contribuído para formação de dobra no pré-projeto.

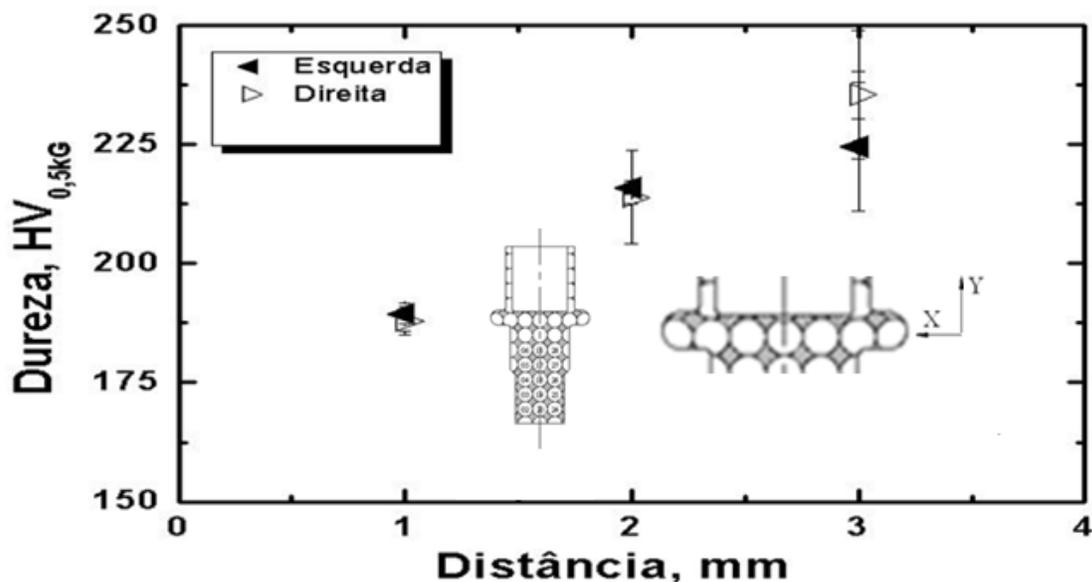


Figura 50: Evolução da microdureza nos flanges no sentido da extremidade para o centro no quarto estágio.

Fonte: Dados da pesquisa

5 ANÁLISE ECONÔMICA

O método de conformação mecânica a frio proposto para a fabricação do terminal do cabo de freio de mão não apresentou problemas superficiais e as dimensões obtidas do produto final atenderam à especificação de projeto. A Tabela 8 mostra as dimensões do tarugo necessárias para a fabricação das peças por usinagem e pela conformação proposta.

TABELA 8

Dimensões iniciais para fabricação do terminal por usinagem e conformação

Método	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Peso(Kg)
Usinagem	20	38,80	0,09568
Conformação	11,3	33,80	0,026360

Fonte: Dados da pesquisa

A economia de material na fabricação do terminal pelo processo de conformação a frio foi de 72,45% em relação ao terminal usinado.

A Tabela 9 mostra os equipamentos e a taxa de produção do terminal para os materiais ABNT1010, DIN9SMn36 e ABNT12L14 obtidos pelo processo de usinagem.

TABELA 9

Taxas de produção e equipamentos utilizados para o processo de usinagem

Materiais	Taxa de Produção (peças/horas)		Equipamentos
	Usinagem	Furo Diâmetro de 11x 13 mm	
ABNT 1010	68	100	TB-42CNC/ Torno revólver manual
DIN9SMn36	98	120	TB-42CNC/ Torno revólver manual
ABNT 12L14	98	120	TB-42CNC/ Torno revólver manual

Fonte: Dados da pesquisa

A velocidade de corte média de 45m/min. e avanço 0,5mm/rotação do ABNT 1010 justificam a taxa de produção menor em comparação aos aços DIN. 9SMn36 e ABNT 12L14(velocidade de corte de 70m/min., avanço 0,12mm/rotação). A Tabela 10 mostra para conformação a frio a taxa de produção e os equipamentos utilizados.

TABELA 10

Etapas de fabricação, taxa de produção e equipamentos utilizados para processo de conformação a frio do terminal

Etapas	Taxa de Produção (peças/horas)	Equipamentos
Corte do tarugo	720	Prensa excêntrica de 22 toneladas
Primeira extrusão a frente	300	Prensa hidráulica de simples efeito
Segunda extrusão a frente	300	Prensa hidráulica de simples efeito
Extrusão invertida	300	Prensa hidráulica de simples efeito
Formação da flange	300	Prensa hidráulica de simples efeito

Fonte: Dados da pesquisa

Considerou-se a operação manual, o que torna o processo lento em comparação a prensa mecânica de multiestágio com “transfer”. A análise de custo da peça produzida pode ser feita através da equação 4.3:

$$C_T = C_M + C_F \quad (4.3)$$

Onde C_T é o custo total, C_M é o custo do material (peso do produto x custo do material) e C_F é o somatório dos custos de fabricação (custo de hora máquina dividido pela quantidade de peça produzida). A partir do conhecimento do custo das matérias-primas e hora-máquina foi possível determinar o custo final dos produtos usinados e conformados (Tabela 11).

TABELA 11
Custo total de fabricação para 1000peças usinadas e conformadas

Matéria prima	Processo	$C_T = (C_M + C_F) \times 1000$
ABNT 1010 trefilado	Usinagem	R\$ 910,36
ABNT12L14 trefilado	Usinagem	R\$ 829,13
DIN 9SMn36 trefilado	Usinagem	R\$ 783,97
ABNT 10B22 fio máquina	Conformado a frio	R\$ 350,79
ABNT 1010 fio máquina	Conformado a frio	R\$ 341,03

Fonte: Dados da pesquisa

Na análise econômica não se computaram custos adicionais como preparação das matrizes, “set up” das prensas, desgaste de matrizes, desgaste de punções, preparação da programação numérica dos tornos e afiação periódica de suas ferramentas cortantes. Pode-se observar que apesar do custo inicial elevado para fabricação das matrizes, torna-se viável a fabricação do terminal pelo processo de conformação a frio no material ABNT 1010.

6 CONCLUSÕES

- O aço ABNT 1010 mostrou-se mais eficiente para o processo de conformação do terminal em comparação aos aços ABNT 12L14 e DIN 9SMn36, uma vez que estes últimos aços apresentaram o campo plástico reduzido e inclusões que, possivelmente, provocaram a fratura no terceiro estágio. Comprovou-se, então, que o projeto destas ligas DIN 9SMn36 e ABNT 12L14 foram concebidos para produção do terminal em usinagem.

- A fratura do punção ocorreu em virtude de tratamento térmico inadequado com tamanho de grão grosseiro e presença de carboneto com trincas na microestrutura e processo de usinagem inadequado com concentrador de tensões.

- Utilizando-se o programa de elementos finitos 2D foi possível simular os diferentes estágios de fabricação eliminando-se a formação de dobra na extrusão invertida e redução dos estágios de fabricação. Eliminou-se o estágio de calibração do pré-projeto.

- Foi possível realizar a simulação física dos diferentes estágios de fabricação na prensa hidráulica. A evolução da carga em função do ângulo do punção para o 3º estágio que corresponde à extrusão invertida correspondeu aos valores obtidos na simulação física, constatando-se, também, experimentalmente que a alteração do ângulo do punção afeta o tempo de extrusão e a produtividade da operação.

- A evolução do perfil de microdureza do terminal para os diferentes estágios evidenciou que a superfície apresenta maior acréscimo de microdureza em virtude da compressão nos dois primeiros estágios. Na extrusão invertida, ocorreu, por sua vez, alteração de microdureza no anel circular. No flange, por sua vez, a microdureza decresceu da extremidade à face de contato do punção o que necessita de estudo posterior para justificar.

- A quantificação do perfil de deformação não trouxe informações relevantes tais como relação entre a altura da extrusão invertida em função da espessura de parede em virtude da impossibilidade de medição após a extrusão. Pode ocorrer escorregamento de uma superfície em relação à outra durante a deformação, alterando o perfil de deformação.

- A economia de material na fabricação do terminal pelo processo de conformação a frio foi de 72,45% em relação ao terminal usinado com redução de custo de 62,54%.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a relação entre a altura da extrusão invertida e a espessura de formação do flange.
- Estudar a formação do furo do diâmetro de 7,5mm na extrusão a frente em comparação à usinagem.
- Estudar a vida útil do punção com a produção do terminal conformado.
- Estudar as distribuições de deformação ao longo das etapas na simulação numérica e comparar com as experimentais.
- Estudar a técnica dos perfis de microdureza e determinar as distribuições de deformação e comparar com a microdureza experimental.
- Estudar a deformação efetiva/acumulativa e comparar com as deformações locais experimentais.

REFERÊNCIAS

ALTAN, T., VAZQUEZ, V., Status of Process Simulation Using 2D and 3D Finite Element Method. **Journal of Materials Processing Technology**, v.71, p.49-63, 1997.

ALTAN, T., VAZQUEZ, V. Die design for flashless forging of complex parts. **Journal of Materials Processing Technology**, v.98, p81-89, 2000.

ALTAN, T., Oh, S., GEGEL, H.L. **Metal Forming Fundamentals and Applications**, American Society for Metals Metals Park. 6. ed. 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6674**: materiais metálicos - calibração de instrumentos de medição de força utilizados na calibração de máquinas de ensaios uniaxiais. Rio de Janeiro: ABNT, 1999. 16p.

ASTM E 8M-95a. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. Philadelphia, p. 77-97, 1995.

BARISIC, B ; CUKOR, G. ; MATH. M. Estimate of consumed energy at backward extrusion process by means of modeling approach. **Journal of Materials Processing Technology**, v.153, p.907-912, 2004.

BALENDRA, R. *et al.* LONG, H. FE simulation of the influence of thermal and elastic effects on the accuracy of cold-extruded components. **Journal of Materials Processing Technology**, v.84, p247-260, 1998.

BRAGA, Lincoln Ferreira. **Simulação computacional por elementos finitos do processo de forjamento em matriz fechada de rodas SAE 4140 de utilização em ponte rolante**. 2005. 110f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

CAMPOS Reis, E. **Determinação da Incerteza das medições utilizando-se a curva de calibração da prensa hidráulica no experimento de conformação do terminal produto 4.02.178.0655**, 2004.

CARNEIRO, José Rubens Gonçalves. **Modelamento de curvas de fluxo para aços livres de intersticiais e microligados ao Ti, Nb e Nb-B na austenita**. 2000. enc.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais.

SILVA, Gilmar Cordeiro da. **Substituição das etapas de usinagem pela conformação mecânica na fabricação de contatos para soldagem por resistência.** 2003 enc. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais.

CHOI, H; CHOI, J; HWANG, B. **The forming characteristics of radial - backward extrusion** - Journal of Materials Processing Technology, v. 113, p. 141-147, 2001.

COOK, R.D., MALKUS, D.S., PLESHA, M.E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**, 3 ed, New York: Wiley & Sons, 1989.

DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**, 2 ed, Boston: McGraw Hill, 1976.

DOHERTY, R.D; MARTIN, J.W. **Stability of Microstructure in Metallic Systems** Cambridge: University Press, 1976. 420p

DINIZ, E.D; MARCONDES, F.C; COPPINI, N.L **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 2.ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda. s.d.

DOWLING, Norman E. **Mechanical behavior of materials:** engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1993. 773p.

DUBOIS, A; LAZZAROTTO, L; DUBAR,L; OUDIN, J. A multi-step lubricant evaluation strategy for wire drawing-extrusion-cold heading sequence. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 249, p. 951-961, 2001.

FERRARI, A. V. F. **A evolução dos tornos automáticos.** Disponível em: <<http://avferrari.blog.uol.com.br/listArchive.html>>. Acesso em: 12 set.2007.

GARCIA, A., SPIM, J.A., SANTOS, C.A. **Ensaio dos Materiais.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000.

GIULIANO, G. Process design of the cold extrusion of a billet using finite element method: Short Communication. **Journal of Materials Processing Technology.** p. 130-134, 2005.

GOUVEIA, B.P.P.A; RODRIGUES, J.M.C; MARTINS, P.A.F. Finite element modelling of cold forward extrusion updated Lagrangian and combined Eulerian-Lagrangian formulations. **Journal of Materials Processing Technology**, v.80-81, p. 647-652, 1998.

HELMAN, H., CETLIN, P.R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**, Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.

ISHIKAWA, T; LEE, J.; LEE, Y. Analysis of the elastic characteristics at forging die for the cold forged dimensional accuracy. **Journal of Materials Processing Technology**, v.130, p. 130-131, 2002.

KARHAUSEN, K;KOPP, R. **Model for Integrated Process and Microstructure Simulation in Hot Forming Steel Research**, v. 63, p. 247-256, 1992.

KIM, Y.H; PARK; J.H. Upper bound analysis of torsional backward extrusion process. **Journal of Materials Processing Technology**, v.143-144, p.735-740, 2003.

KONG, L.X ; NAVAVANDI, S. On-line tool condition monitoring and control system in forging processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v.125, p.. 464-470, 2002.

KOPP,R; ARFMANN,G. **The Application of CAD/CAE/CAM from the viewpoint of plastic working technology Steel Research** , v.56, n.3, p. 153-156, 1985.

KOPP, R; CHO, M.L; SOUZA, M.M. **Multi-level Simulation of Metal-Forming Processes Steel Research** , v.59, n. 4, p. 161-164, 1988.

KOBAYASHI, S., OH, S.I., ALTAN, T. **Metal Forming and the Finite Element Method**. New York: Oxford University Press, 1989.

KUZMAN, K. Problems os accuracy control in cold forming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 113, p 10-15, 2001.

LIMA ROQUE, C.M.O,BUTTON, S.T. **Application of the Finite Element Method In Cold Forging Processes. Journal of the Brazilian Society Mechanical Sciences**, v.23, n. 2, p. 189-2000, 2000.

LINK, W. **Metrologia Mecânica Expressão da incerteza de Medição**. São Paulo: Editora Blucher. 1997.

LONG, H.; BALENDRA, R. Evaluation of elasticity and temperature effects on the dimensional accuracy of back-extruded components using finite element simulation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 80-81, p. 665-670, 1998.

MACHADO, A.A. **Simulação Computacional para Fabricação Terminal Elétrico**: Monografia Final de Curso Engenharia Mecânica. 2006.

MACKERLE, J. “**Finite Element Analyses and Simulations of Manufacturing Processes of Composites and Their Mechanical Properties**: a bibliography (1985-2003)”, *Computational Materials Science*, v.31, p. 187-219, 2004.

MCCALLUM, R. ; JONAS, J.J; YUE, S. The drawability of low carbon steel wire: Wire. **Journal International**, February, p. 102-107.

MESQUITA, N.G.M., MELO, I.V. **Fatores de Influência sobre Superfícies de Peças Forjadas**, *Forjamento de Precisão, Metalurgia e Materiais*, p. 308-314, 1995.

MCCORMACK, C; MONAGHAN, J. A finite element analysis of cold-forging dies using two and three dimensional models. **Journal of Materials Processing Technology**, v.118, p. 286-292, 2001.

MISIOLEK, W.Z. Material physical response in the extrusion process. **Journal of Materials Processing Technology**, v.60, p.117-124, 1996.

MARCAL, P.V., KING, I.P. Elastic-Plastic Analysis of Two-Dimensional Stress Systems by the Finite Element Method. **Int. J. Mesh**. 1967.

PARK, C; LIM, J.Y; HWANG, B.B. A process–sequence design of an axle-housing by cold extrusion using thick-walled pipe. **Journal of Materials Processing Technology**, v.75, p. 33-44, 1998.

RICE, J.R., TRACY, D.M. **Computational Fracture Mechanics**”, *Proc. Symp. on Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics*. 1973.

REIS SOUZA,C; CETLIN,P.R. The influence of aluminum, silicon and titanium on cold headability of 0,2 percent carbon steel wire Wire. **Journal International**, Aug., p. 80-83, 1993.

SANTOS, J.W.S., *et al.* Recursos Informáticos Agilizam o Processo de Conformação. **Revista Metalurgia e Materiais**, set., p. 146-157, 2001.

SCHÜNEMANN, 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.

SUPERFORM Command Reference, 2005.

SUPERFORM User's Guide, 2005.

TANG, J; *et al.* Recent development of process simulation for industrial applications. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 98, p. 205-211, 2000.

VAZQUEZ, V., HANNAN, D., ALTAN, T. Tool Life in Cold Forging - an Example of Design Improvement to Increase Service Life. **Journal of 2000Materials Processing Technology**, n. 98, p90-96, 2000.

XINBO, L; *et al.* Research on the flow stress characteristics of AISI 1006 and AISI 5140 in the temperature range of warm forging by means of thermo-mechanical experiments. **Journal of Materials Processing Technology**, v.122, p. 38-44, 2002.

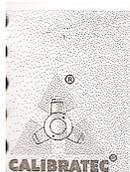
WAGONER, R.H., CHENOT, J.L. **Fundamentals of Metal Forming**. 1996.

WANHEIM, T. *et al.* The influence of the constitutive behaviour of materials on the formability in the radial extrusion of tubular components. **Journal of Materials Processing Technology**, v.75, p. 122-126, 1998.

YILMAZ, Ç. ALTINBALIK, T. AKATA, H. E., A study of lateral extrusion of gear like elements and splines. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 166, p. 128-134, 2005.

ANEXOS

ANEXO A- CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO



O.S.: 02674/06-01

1/2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° 19382/06

Contratante:	COMAM INDÚSTRIA LTDA.
	Av. Prefeito Alberto Moura, 200 - Sete Lagoas - MG.
Solicitante:	O mesmo.

Descrições:

Instrumento:	Manômetro		
Marca:	Famabras	Identificação:	MAN-003
Modelo:	S/m	Série:	S/n°
Capacidade:	0 a 100 ton	Menor divisão:	1 ton
Ø do mostrador:	93 mm		

Procedimentos: Conforme solicitação, nosso Laboratório realizou calibração no instrumento acima, com base em nosso procedimento de confirmação metrológica PGQ-005 revisão 02 e instrução de processo IPR-009 revisão 02.

Norma de referência: NBR 14105 Jun/98.

Padrão utilizado: Calibrador de pressão digital, marca Ascroft, n° de série AQS-8901, nosso n° MO.002, certificado n° PR-0062/03, calibrado pelo IFM em 21.01.03.
Próxima calibração: Jan/2007.

RESULTADOS

CRESCENTE				
Indicação no Instrumento	Indicação no Padrão	Desvio Encontrado	Ue 95% (±)	Erro Total
(ton)	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)
10	10,1	-0,1	0,2	0,3
30	30,7	-0,7	0,2	0,9
50	50,8	-0,8	0,2	1,0
70	70,7	-0,7	0,2	0,9
90	91,1	-1,1	0,2	1,3

DECRESCENTE				
Indicação no Instrumento	Indicação no Padrão	Desvio Encontrado	Ue 95% (±)	Erro Total
(ton)	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)
10	10,2	-0,2	0,2	0,4
30	30,5	-0,5	0,2	0,7
50	50,6	-0,6	0,2	0,8
70	70,8	-0,8	0,2	1,0
90	91,0	-1,0	0,2	1,2

Os valores obtidos foram considerados após média de três medições.

Classe de tolerância: A.

Erro máximo admissível para essa classe de manômetro: 1% da faixa total da escala para pontos entre 25 e 75% da faixa; 2% do total da escala para os demais pontos.



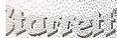
LABORATÓRIO QUALIFICADO
PELO CISA
NORMA ISO 17025:2001

LABORATÓRIO QUALIFICADO
EM CONFORMIDADE
NORMA ISO 17025:2001



LABORATÓRIO QUALIFICADO
EM CONFORMIDADE
NORMA ISO 17025:2001

LABORATÓRIO QUALIFICADO
EM CONFORMIDADE
NORMA ISO 17025:2001



LABORATÓRIO QUALIFICADO
EM CONFORMIDADE
NORMA ISO 17025:2001

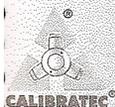
LABORATÓRIO QUALIFICADO
EM CONFORMIDADE
NORMA ISO 17025:2001

CALIBRATEC
Comércio e Calibrações de Instrumentos de Medição Ltda.
Rua Doutor Nestor, 14 - Fonte Grande • CEP 32013-620 - Contagem - MG
Telefax: (31) 3398 9022 • Home-page: www.calibratec.com.br / E-mail: calibratec@terra.com.br

Unidade São Paulo - SP
Rua Djalma Dutra, 256 - Luz - CEP 01103-010 - São Paulo - SP
Fone: (11) 3326-0077 - Fax: (11) 227-7813 E-mail: calibratec@calibratec.com.br

Desde 1983

Unidade Curitiba-PR
Trav. Otávio Ribas Guimarães, 91 - Vila Isabel - CEP 80320-1-
Fone: (41) 3345-0022 Fax: (41) 3345-0101 E-mail: calibratec@calibratec.com.br



CALIBRATEC®

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 19382/06

2/2

Nota: Instrumento calibrado sem ajuste.

$$\text{Erro total} = (|\text{Desvio encontrado}| + |\text{Ue } 95\%|).$$

As incertezas declaradas são baseadas em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência $k = 2$, para um nível de confiança de aproximadamente 95%, de acordo com EA-4/02, conforme nosso procedimento PGQ-018 revisão 01.

Condições Ambientais: Temperatura: $20 \pm 2^\circ\text{C}$.
Umidade relativa: $50 \pm 10\%$.

Considerações Finais: Data do recebimento: 18/07/2006.
Data da calibração: 21/07/2006.
Data da emissão do certificado: 23/08/2006.

LABORATÓRIO QUALIFICADO
PELA ANFAVEA
NORMA ISO 17025:2001



ITEM DA QUALIDADE
EM CONFORMIDADE
NORMA ISO 17025:2001

ITEM DA QUALIDADE
CERTIFICADO PELO PMQP-100
CONSTRUÇÃO CIVIL

Assistência
Técnica Especializada

Thiago Machado
Técnico Executante

Gleício Abreu
Gerente Técnico

Este certificado é válido exclusivamente para o instrumento calibrado descrito, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros, mesmo que similares.

A sua reprodução total ou parcial dependerá de prévia autorização formal da Calibratec.

Este certificado está em conformidade com a norma NBR - ISO IEC-17025/2001.

Fasc/

CALIBRATEC

Comércio e Calibrações de Instrumentos de Medição Ltda.

Rua Doutor Nestor, 14 - Fonte Grande • CEP 32013-620 - Contagem - MG

Telefax: (31) 3398 9022 • Home-page: www.calibratec.com.br / E-mail: calibratec@terra.com.br

Unidade São Paulo - SP

Rua Djalma Dutra, 256 - Luz - CEP 01103-010 - São Paulo - SP

Fone: (11) 3326-0077 - Fax: (11) 227-7813 E-mail: calibratec@calibratec.com.br

Desde 1983

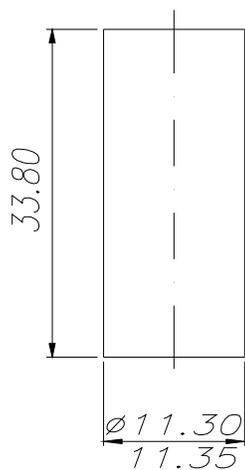
Unidade Curitiba-P

Trav. Otávio Ribas Guimarães, 91 - Vila Izabel - CEP 80320-1

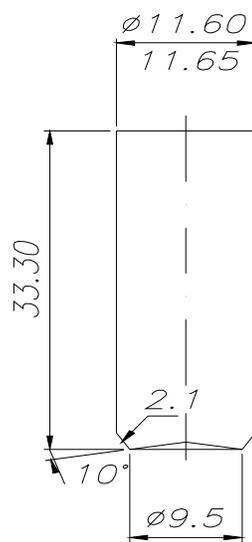
Fone: (41) 3345 0033 Fax: (41) 3345 0101 E-mail: calibratec@calibratec.com.br

ANEXO B - SEQÜÊNCIA DE FABRICAÇÃO

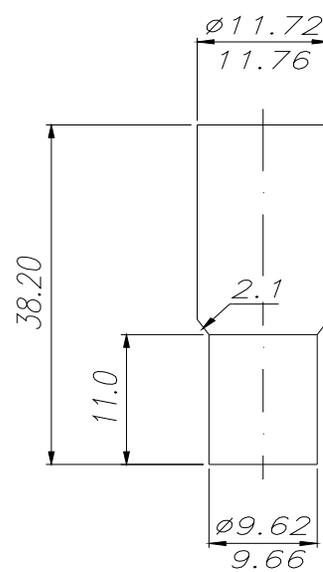
BLANQUE



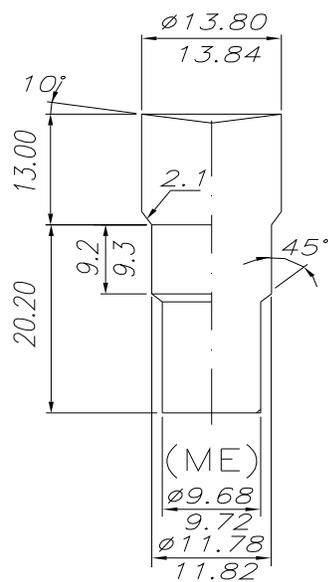
1º ESTÁGIO



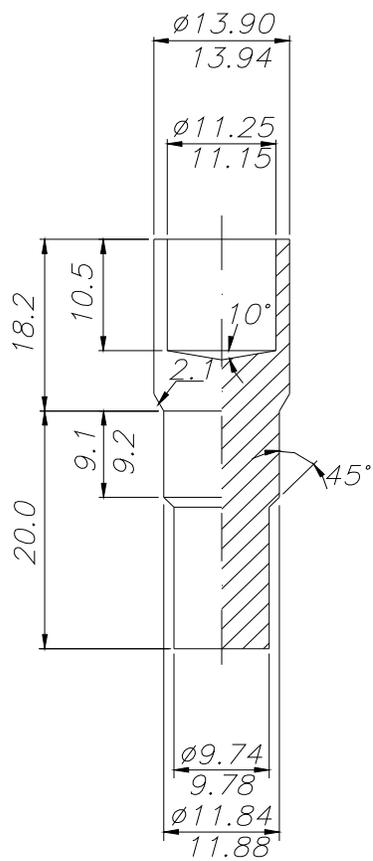
2º ESTÁGIO



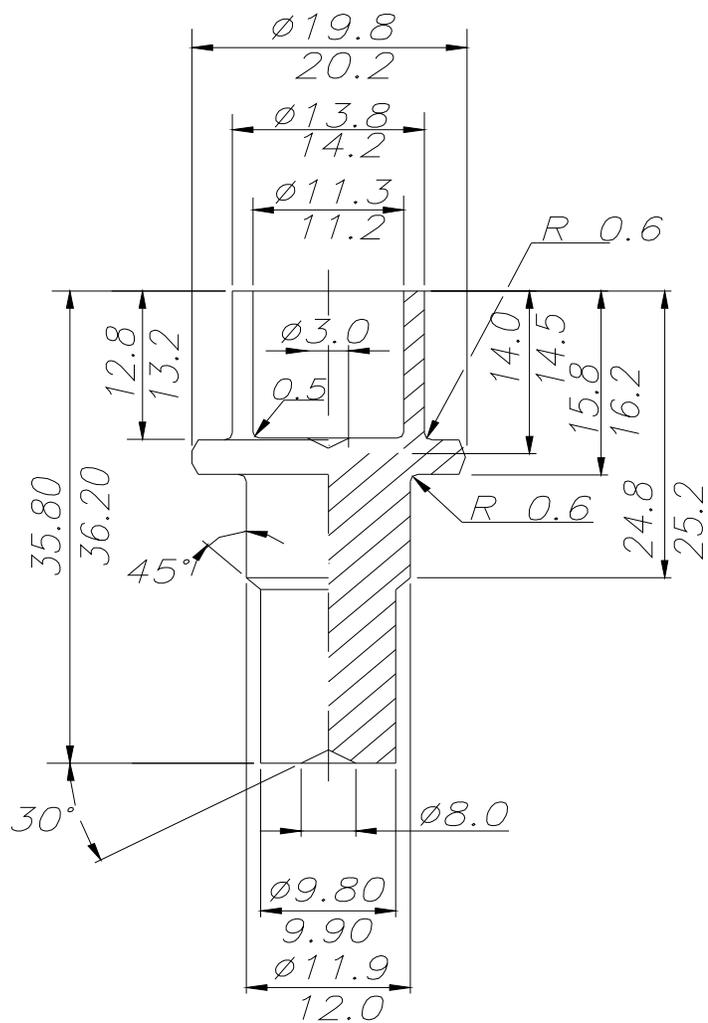
3º ESTÁGIO



4° ESTÁGIO

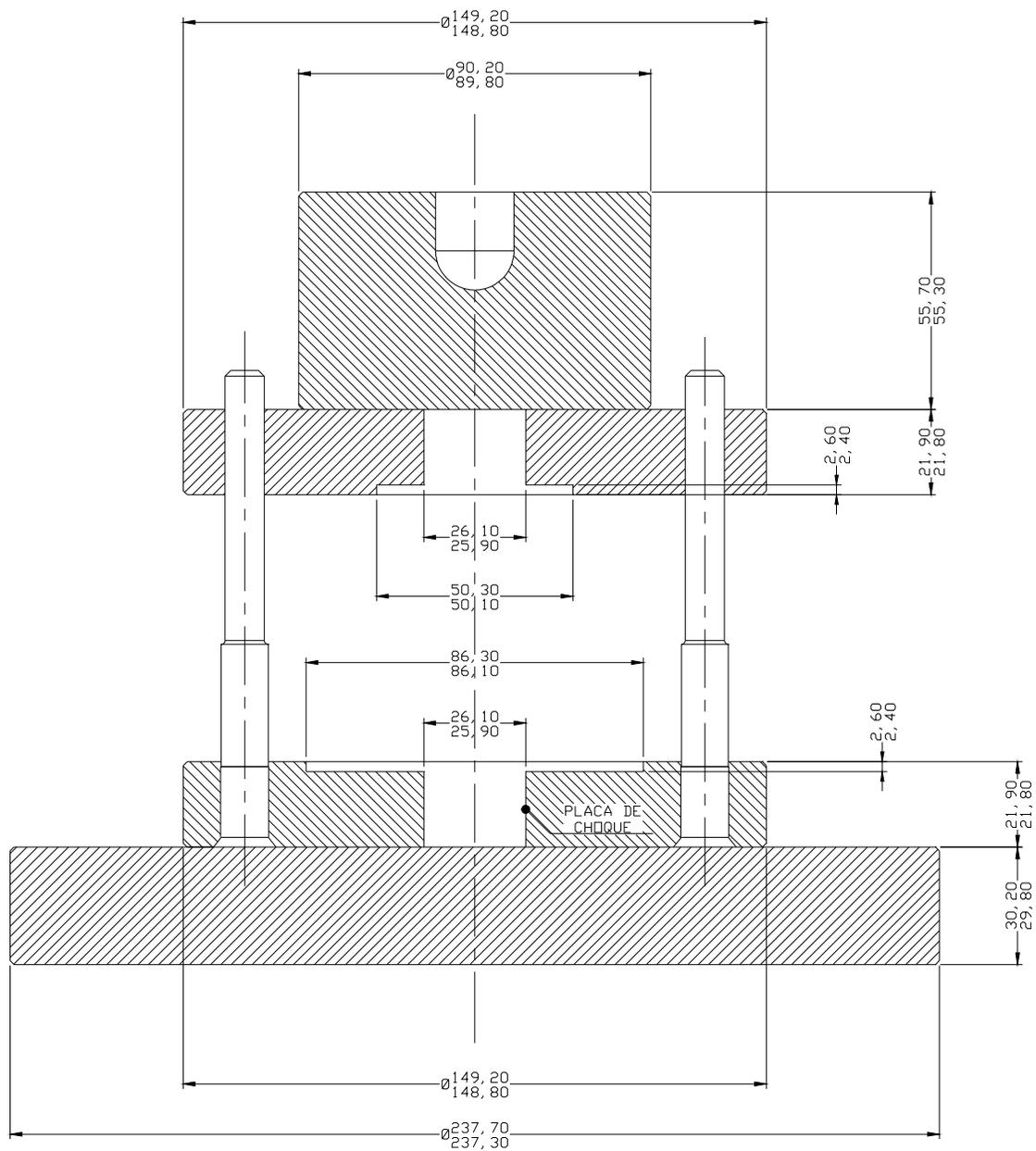


5° ESTÁGIO

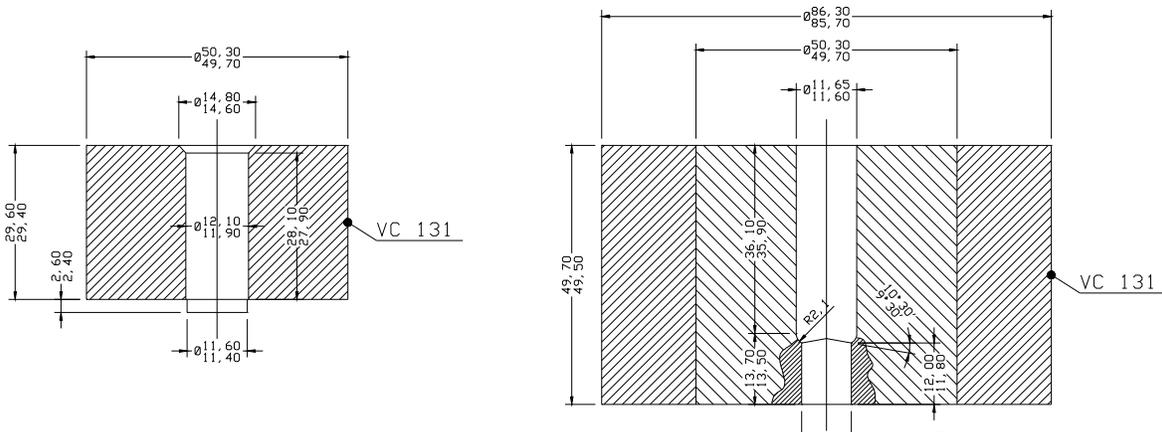


ANEXO C - DESENHOS DAS MATRIZES DE FABRICAÇÃO

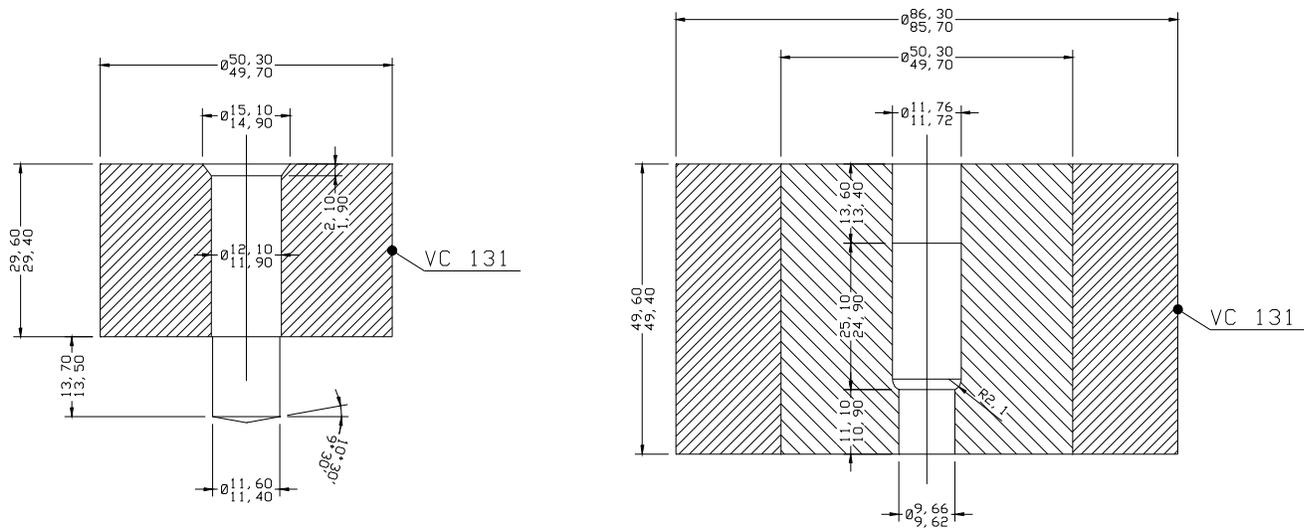
Placa de Choque



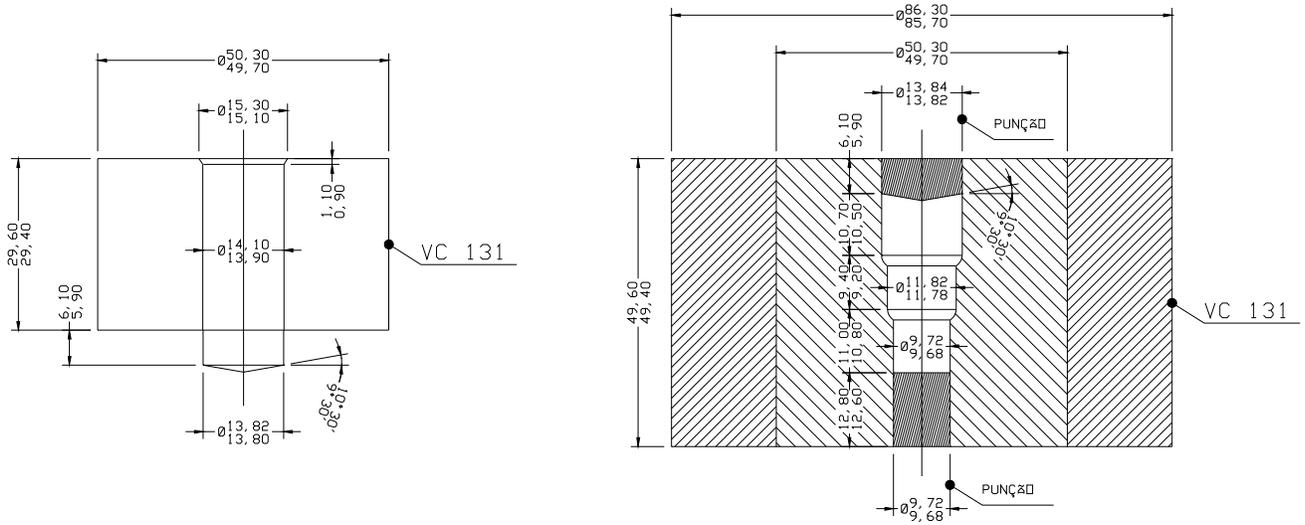
1 ° ESTÁGIO



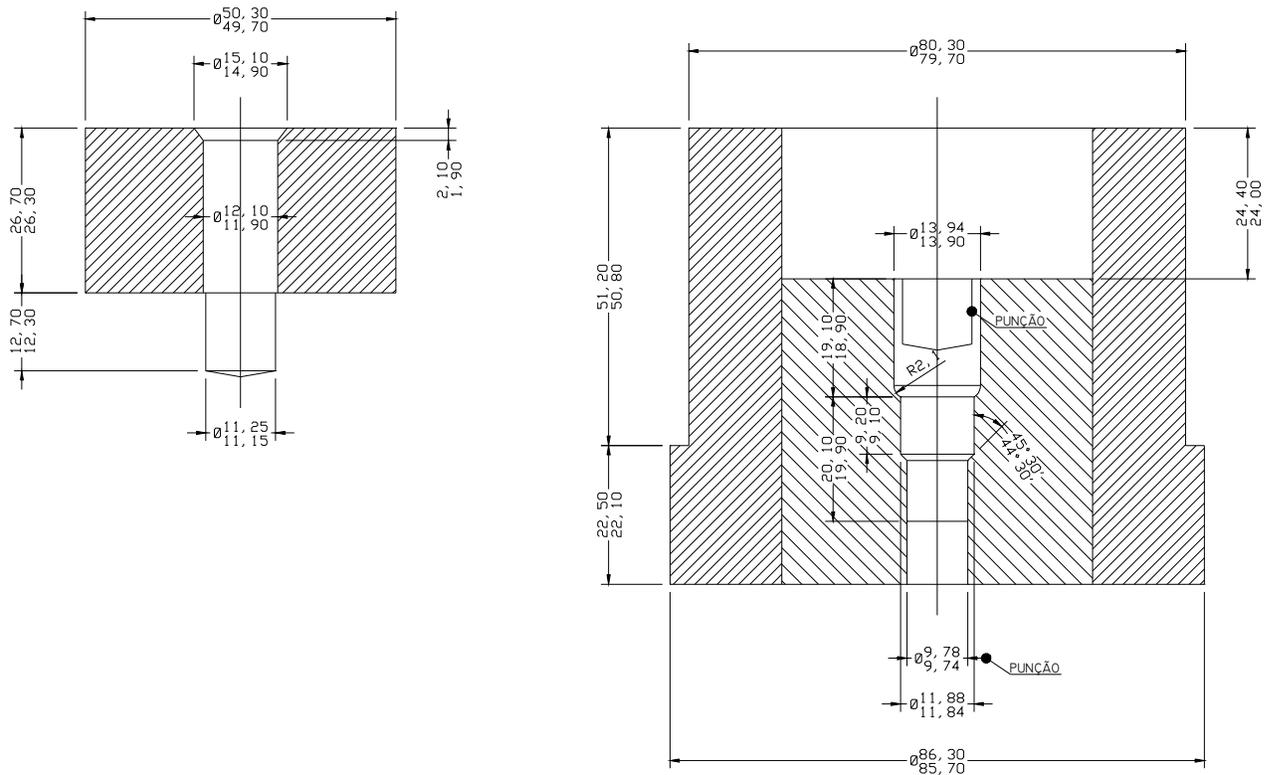
2 ° ESTÁGIO



3 ° ESTÁGIO

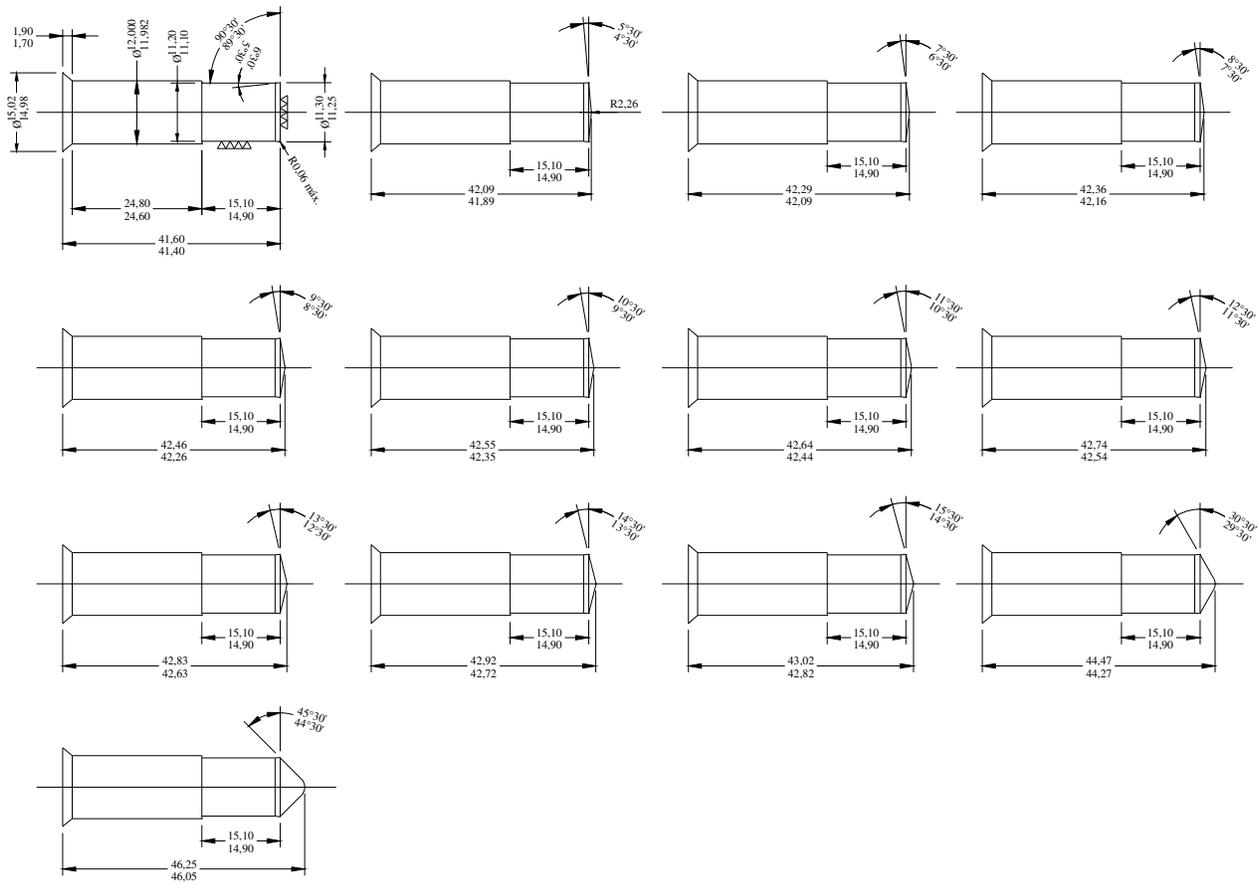


4 ° ESTÁGIO



ANEXO D - PUNÇÕES

PUNÇÕES



Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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