

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Daniel Villas Bôas
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 12/04/99
Sérgio J. Button
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo do Processo de Forjamento a Frio de Peças Automotivas

Autor: **Daniel Villas Bôas**
Orientador: **Sérgio Tonini Button**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Estudo do Processo de Forjamento a Frio de Peças Automotivas

Autor: Daniel Villas Bôas
Orientador: Sérgio Tonini Button

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Campinas, 1999
S.P. – Brasil



5916495

UNIDADE	BC
N.º DEAM	
V.	Ex
	BC/38634
	229/99
	0
	<input checked="" type="checkbox"/>
PRE.	R\$ 11,00
DATA	02/08/99
N.º UPU	

CM-00125833-6

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

V662e

Villas Bôas, Daniel

Estudo do processo de forjamento a frio de peças
automotivas. / Daniel Villas Bôas.--Campinas, SP:
[s.n.], 1999.

Orientador: Sérgio Tonini Button

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Forjamento - Planejamento. 2. Ferramentas. I.
Button, Sérgio Tonini. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
Título.

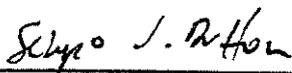
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Estudo do Processo de Forjamento a Frio de
Peças Automotivas**

Autor: Daniel Villas Bôas

Orientador: Sérgio Tonini Button



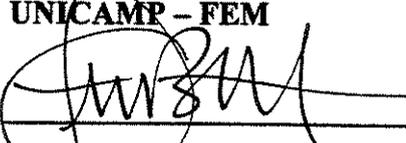
Prof. Dr. Sérgio Tonini Button (Presidente)

UNICAMP – FEM



Prof. Dr. Eugênio José Zoqui

UNICAMP – FEM



Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

USP – EPUSP

Campinas, 12 de abril de 1.999.

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha querida esposa Silvana pelo amor, apoio e compreensão durante todas etapas do trabalho. A nosso filho Guilherme de um aninho por nos ter escolhido como pais, e a imensa felicidade que nos tem proporcionado como filho. Também com carinho a meus pais (in memoriam), especialmente a você meu pai, que não teve oportunidade acadêmica, mas nunca deixou de ser um intelectual.

Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer e homenagear às pessoas e instituições pela realização deste trabalho:

Ao professor Sérgio Tonini Button pela dedicação, orientação e apoio em todas as fases do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), entidade de extrema importância ao desenvolvimento do país e sociedade.

A empresa Robert Bosch do Brasil pela realização do trabalho prático e experimental, em especial aos funcionários dos departamentos ligados de forma direta e indireta ao setor de extrusão, pela colaboração e tempo cedido na realização deste trabalho.

Aos colegas, funcionários e professores do Departamento de Engenharia de Materiais e Engenharia de Fabricação pela amizade e atenção durante o Curso de Mestrado.

A Deus pela oportunidade, vontade e vigor concedidos na realização deste trabalho.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	01
1.1 Justificativas e Objetivos	01
Capítulo 2 - O Processo de Forjamento	06
2.1 Aspectos Gerais dos Processos de Forjamento	06
2.2 Forjamento a Frio de Aços	08
2.3 Tipos de Processos	10
2.4 Limitações do Processo	12
2.5 Limites do Processo Quanto a Redução de Área.	13
2.5.1 Limites na Extrusão a Frio Livre	16
2.5.2 Limites na Extrusão a Frio Confinada	16
2.5.3 Limites na Extrusão Inversa	18
2.6 Tipos de Produtos	19
2.7 Projetos de Ferramentas	22
2.7.1 Critérios para Projetos de Matrizes	22
2.7.2 Critério para Projeto de Punções	26
2.8 Equipamentos	28
2.8.1 Equipamentos Auxiliares	30
2.9 Sequência Típica de Etapas de Fabricação	33
2.9.1 Tratamento Térmico	34
2.9.2 Lubrificação	34

Capítulo 3 - Planejamento de Produção	36
3.1 Conceitos de Planejamento de Produção	36
3.2 Tecnologia de Grupo	36
3.2.1 Áreas Principais de Aplicação	38
3.2.2 Formação de Família de Peças	38
3.2.3 Sistemas de Classificação e Codificação	39
3.3 Padronização do Ferramental	41
3.4 Planejamento do Fluxo da Produção	42
3.4.1 Formação de Estoques em Operações	46
3.4.2 Programação Empurrada e Puxada	48
3.4.3 Conseqüências sobre o Estoque das Programações Empurrada e Puxada	49
3.4.4 Características Principais do MRP	52
3.4.5 Características Principais do JIT	53
Capítulo 4 - O Processo de Fabricação do Pinhão	56
4.1 Descrição do Produto	56
4.2 Processo após Forjamento a Frio	57
4.3 Etapas de Fabricação no Forjamento a Frio do Pinhão	58
4.3.1 Etapas de Forjamento	59
4.3.2 Tratamento Térmico	60
4.3.3 Lubrificação	60
4.4 Ferramentais Típicos dos Estágios	62
4.4.1 Ferramental da Operação de Cisalhamento	62
4.4.2 Operação de Assentar	63
4.4.3 Operação de Extrudar Furo I	64
4.4.4 Operação de Extrudar Furo II	65
4.4.5 Operação de Extrudar Forma Final	66
4.5 Falhas dos Ferramentais	67
4.5.1 Operação de Cisalhamento	68
4.5.2 Operação de Assentar	68
4.5.3 Operação Extrudar Furo I	69

4.5.4 Operação Extrudar Furo II	70
4.5.5 Operação Extrudar Forma Final	70
4.6 Planejamento da Produção	71
4.6.1 Problemas no Fluxo de Produção	72
Capítulo 5 - Planejamento Experimental, Apresentação e Análises de Resultados	74
5.1 Análise da Matéria-prima	74
5.1.1 Entrada de Matéria-prima na Fábrica	75
5.1.2 Análise da Primeira Experiência com o Material Beneficiado	79
5.1.3 Análise da Segunda Experiência com o Material Beneficiado.	80
5.1.4 Influência da matéria-prima beneficiada no processo de extrusão	81
5.1.5 Análise da Terceira Experiência com o Material Beneficiado.	81
5.1.6 Experiência com Redução do Tempo de Tratamento Térmico	83
5.2 Análise das Ferramentas Falhadas	85
5.2.1 Avaliação do Desempenho dos Fornos	85
5.2.2 Análise das Ferramentas	89
5.3 Requisições das Ferramentas Falhadas	94
Capítulo 6 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	97
Referências Bibliográficas	99

Resumo

BÔAS, Daniel Villas, *Estudo do Processo de Forjamento a Frio de Peças Automotivas*, Campinas, : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999, 101 p. Dissertação (Mestrado)

A manufatura pelo processo de forjamento a frio contribui em grande parte do produto da indústria automotiva por ter uma alta escala de produção; é um processo de conformação mecânica e o termo a frio significa que o processo é realizado abaixo da temperatura de recristalização. No processo estão atividades de corte de barras por cisalhamento, etapas de tratamento térmico, lubrificação e etapas de forjamento. Como se trata de um processo que exige grandes solicitações de esforços mecânicos, parte dos esforços são transferidos às ferramentas que estão sujeitas a inúmeras fontes de falhas caso o processo não tenha um bom desempenho. Este estudo foi elaborado junto com uma empresa de autopeças que teve um aumento na frequência de falhas dos ferramentais. Na prática fabril esse aumento era atribuído à troca de fornecedores da matéria-prima trabalhada, porém não existia nenhum registro que comprovasse esse fato. A solução imediata encontrada pela empresa foi o aumento do tempo das operações de tratamento térmico, que acabou acarretando em aumento de custo para o produto. Logo todo estudo que leve a reduzir esse custo é um ganho para empresa, e como as etapas de tratamento térmico e de fabricação das ferramentas são feitas na própria empresa, os custos são relativamente altos. O trabalho teve por objetivo o estudo da matéria prima trabalhada, do processo e do ferramental para conhecer e mapear as falhas que comprometem o processo. Essas falhas foram registradas e documentadas para ações corretivas entre setores da empresa e fornecedores.

Palavras chaves

Forjamento a frio, planejamento do processo e análise de falhas

Abstract

BÔAS, Daniel Villas, *Analysis of the Cold Forging of Automotive Components*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999, 101 p. Dissertação (Mestrado)

Cold forging is an important manufacturing process because of its high productivity; it is a metal forming process and the term cold means that it is held below recrystallization temperature. This process shows many steps like billet cropping, heat treatment, lubrication, extrusion and forging. Part of the forging loads are transferred to the tooling which is subjected to several causes of failure if the process doesn't show a good performance. This work was developed with a manufacturer of automotive parts that was experiencing an increase of tooling failures. At shop-floor level this increase was verified since the supplier of raw material was changed, despite there was no record to confirm that. The immediate solution was the increase of heat treatment time, that caused an increase of the product costs. So, any study that could reduce the costs of heat treatment and tooling manufacturing would be very important to the manufacturer. In this work the raw material, the process and the tooling were studied to record and know the tool failures which could interrupt the process. These failures were recorded and documented to allow corrective actions from divisions of the manufacturer and suppliers of the raw material.

Key words

Cold forging, process planning and failures analysis.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Representação esquemática da variação da conformabilidade de aços em função da temperatura (TF= Temperatura de Fusão).	06
Figura 2.2 - Representação das operações de forjamento a frio de um eixo.	10
Figura 2.3 - Exemplos de variações de processo no forjamento a frio de eixos	11
Figura 2.4 - Limitações de deformação para os processos de forjamento a frio.	14
Figura 2.5 - Critérios para a obtenção das dimensões internas de uma matriz para extrusão livre.	17
Figura 2.6 - Critérios para a obtenção das dimensões da matriz na extrusão confinada.	17
Figura 2.7 - Critérios para o dimensionamento do produto na extrusão inversa.	19
Figura 2.8 - Tipos de produtos obtidos no processo de forjamento a frio.	20
Figura 2.9 - Variações encontradas em dimensões de peças forjadas a frio.	21
Figura 2.10 - Representação esquemática de defeitos em produtos forjados a frio	23
Figura 2.11 - Conjunto matriz e anel de pressão	24
Figura 2.12 - Critérios para dimensionamento de punções de extrusão inversa	28
Figura 2.13 - Fluxograma do processo de forjamento a frio	33
Figura 3.1 - Peças similares na forma e geometria	37
Figura 3.2 - Peças similares nas operações de usinagens	38
Figura 3.3 - Componente composto	42
Figura 3.4 - Formação de gargalo entre operações	47
Figura 3.5 - Programação empurrada versus puxada: a analogia de gravidade.	50
Figura 4.1 – Seqüência de fabricação do pinhão grande	57
Figura 4.2 - Fluxograma do processo de forjamento a frio do pinhão	58

Figura 4.3 - Seqüência das operações de forjamento	59
Figura 4.4 - Esquema do ferramental do estágio cisalhar	63
Figura 4.5 - Esquema do ferramental do estágio assentar	64
Figura 4.6 - Esquema do ferramental do estágio furo I	65
Figura 4.7 - Esquema do ferramental do estágio furo II	66
Figura 4.8 - Esquema do ferramental do estágio extrudar forma final	67
Figura 4.9 - Fluxo e gargalos no processo	73
Figura 5.1 - Microestruturas das matérias-primas dos dois fornecedores.	78
Figura 5.2 - Microestruturas dos materiais beneficiados	82
Figura 5.3 - Microestruturas para análise de redução do tempo de tratamento térmico	84
Figura 5.4 - Esquema de montagem de termopares nos fornos	87
Figura 5.5 - Comportamento dos fornos para homogeneização a 680 °C	87
Figura 5.6 - Variação de temperatura no mesmo forno ate' homogeneização	88
Figura 5.7 - Ferramentas falhadas	92

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores comparativos dos processos de forjamento.	07
Tabela 2.2 - Classificação de aços ligados e não ligados.	15
Tabela 4.1 - Sequência da operação de tratamento térmico	60
Tabela 4.2 - Sequência das operações de lubrificação	62
Tabela 5.1 - Composição química do aço 16MnCrS5 (% em peso)	75
Tabela 5.2 - Comparação entre composição química dos materiais fornecidos	76
Tabela 5.3 - Dureza do tarugo cisalhado - tratado 20 horas a 680°C resfriamento em forno para 500°C e resfriado até a temperatura ambiente	79
Tabela 5.4 - Dureza do tarugo marcado centro - tratado 10 horas a 680°C e resfriado até a temperatura ambiente	79
Tabela 5.5 - Valores de dureza do material beneficiado da segunda experiência	80
Tabela 5.6 - Valores de dureza do material da terceira experiência	82
Tabela 5.7 - Valores de dureza do material como recebido, apenas cisalhado e conforme condições de tratamento térmico (Quadro 5.2)	83
Tabela 5.8 - Composição química das ferramentas falhadas	90
Tabela 5.9 - Resultados de ensaios das ferramentas falhadas	91
Tabela 5.10 - Levantamento das requisições das ferramentas falhadas	95

Notas sobre os capítulos

Este texto é composto por seis capítulos que descrevem a revisão bibliográfica sobre o tema estudado, a metodologia empregada e os resultados obtidos.

O capítulo 1 trata das justificativas e dos objetivos que conduziram este trabalho.

O capítulo 2 descreve o processo de forjamento com ênfase para as operações de conformação realizada a frio.

No capítulo 3 discute-se os principais conceitos sobre planejamento de produção, com o objetivo de servir como referência para pesquisa de profissionais da indústria de conformação a frio.

O capítulo 4 analisa o processo de fabricação estudado neste trabalho.

O capítulo 5 descreve o planejamento experimental empregado, apresenta e analisa os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, bem como sugere temas para trabalhos futuros.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Justificativas e Objetivos

A globalização tem deixado o mercado industrial cada vez mais competitivo e o mercado consumidor exigente, existindo a necessidade de fabricar-se produtos e componentes com alta qualidade e baixo custo. [TURNEY, P., 1991]

As mudanças de mercado e a atual competição nacional e internacional têm levado a demanda de produtos a uma contínua adaptação e reestruturação dentro das indústrias. A modernização requer uma melhoria permanente em busca de processos mais precisos e produtivos, de modo que o processo de conformação mecânica a frio torna-se cada vez mais importante.

A manufatura por esse processo contribui substancialmente nos produtos da indústria automobilística dos países industrializados. Apesar de ser normalmente considerada uma atividade eficiente, a conformação a frio pode ainda ser melhorada., especialmente em um sistema produtivo à base de lotes. [OSAKADA, K., et al., 1988]

A Conformação Mecânica a Frio representada pelo Forjamento tem sido desenvolvida desde 1935, primeiramente na Alemanha. No entanto, ainda é uma tecnologia jovem comparada com outros processos de manufatura. [LANGE, K., 1992]

Com a finalidade de apresentar os objetivos deste trabalho tomemos como exemplo o Japão, país que não detinha a tecnologia do processo de forjamento a frio. A introdução do processo teve início em meados da década de 1950 e hoje ocupa lugar de destaque e liderança nessa área de manufatura.

O rápido crescimento foi promovido pela primeira vez através da tecnologia importada, que levou à necessidade de se obter o conhecimento, gerando portanto, grupos de pesquisas japoneses financiados pelo governo com cooperação entre universidades e indústrias. [KUDO, H., 1992]

A maior razão para esse crescimento foi a necessidade urgente de atender a economia de produção em massa, devido ao aumento da demanda doméstica, e para promover a exportação na economia japonesa, onde recursos naturais para indústria de manufatura são limitados.

A partir das pesquisas, realizavam-se reuniões, seminários, palestras e congressos apresentados por grupos acadêmicos, engenheiros e técnicos, e subsidiados por fundos privados e governamentais, que tinham por objetivo final desenvolverem prensas, ferramentais, matérias-primas, tratamentos térmicos e técnicas de lubrificação para o processo de forjamento a frio.

O sucesso de produção desse processo está ligado inicialmente à indústria japonesa de bicicletas, que era o único bom meio de exportação, que com o tempo foi superado por uma excessiva competição e diminuição das vendas. O sistema de manufatura das transmissões convencionalmente feito por usinagem ou forjamento a quente, foi substituído pelo forjamento a frio recuperando a competitividade e tornando a indústria Shimano líder nessa transição.

Com o passar do tempo tais conhecimentos foram aproveitados e adaptados nas indústrias de motocicletas, e subseqüentemente nas automobilísticas, atingindo altos níveis produtivos e consolidando a produção em massa.

Como no exemplo anterior, foi realizado este trabalho de pesquisa para dissertação de mestrado em conjunto com uma empresa multinacional do ramo de autopeças, que em grande parte de seus

processos de manufatura utiliza o forjamento a frio. Como recentemente essa empresa vem sofrendo grande concorrência no mercado, toda redução de custo e ganho de produtividade torna-se imprescindível na liderança de mercado.

Um dos objetivos deste trabalho foi participar do ambiente fabril, estabelecendo o contato entre a Engenharia de Planejamento Técnico e a Produção, através do levantamento dos dados de falhas do processo, do mapeamento das falhas e da apresentação de soluções que garantam a produtividade do processo, a qualidade do produto e a vida das ferramentas de forjamento.

A empresa por ser uma fornecedora de autopeças e ferramentas elétricas, fabrica componentes de produtos como motores de partida, alternadores, velas de ignição, entre outros, que passam em sua grande maioria pelo processo de forjamento a frio.

Para um bom desempenho do processo é necessário que a matéria-prima fornecida apresente propriedades mecânicas específicas, com composição química, dureza e microestrutura controladas. Porém, dentro do histórico fabril (histórico não documentado) constam divergências entre o controle de qualidade da matéria-prima recebida e o apresentado pelos fornecedores.

A empresa passou por duas fases de fornecimento de matéria-prima devido à mudança de fornecedores ocorrida pela incorporação do primeiro fornecedor pelo atual, que por razões administrativas estratégicas mudou o processo de beneficiamento da matéria-prima. A matéria-prima do primeiro fornecedor era beneficiada a partir do minério. Já o atual fornecedor beneficia a partir de sucata, a princípio, o principal motivo das falhas das ferramentas de forjamento, segundo suposição da produção e da engenharia.

Como o atual fornecedor passou a ser o principal fornecedor de barras de aço ligado para o mercado nacional, de imediato a empresa fabricante de autopeças teve que continuar produzindo com a nova matéria-prima, o que exigiu elevar-se o tempo das operações de tratamento térmico acima do anteriormente utilizado com a antiga matéria-prima, a fim de evitar as falhas de ferramental que passaram a ser observadas.

No entanto a elevação do tempo de tratamento térmico aumentou o custo para essa operação, gerando custos em outras atividades e como consequência, levou a um aumento do custo do produto final.

A fim de avaliar as causas que levavam à falha prematura das ferramentas e analisar-se se a matéria-prima realmente estava afetando a produção, estudou-se o processo de fabricação de um produto considerado crítico e importante na linha de produção e que tem o forjamento a frio como uma das etapas de fabricação. O componente escolhido foi um pinhão que faz parte do Conjunto Indutor do Motor de Partida, com produção mensal em torno de 20.000 peças.

A escolha deveu-se ao alto grau de sensibilidade e dificuldade na fabricação da peça por extrusão a frio, apresentando variações importantes na qualidade dos produtos ao longo do processo e falhas constantes das ferramentas.

Destaca-se que essa peça faz parte de uma família de pinhões, fabricados com a mesma matéria-prima, de modo que os conhecimentos e soluções encontradas serão utilizadas para essa família de produtos e para as ferramentas empregadas.

A matéria-prima fornecida atualmente para fabricação dos pinhões é o aço DIN 16Mn Cr S5 (em barras de seção circular) laminado a quente, recozido para cementita globular, descascado e trefilado a frio.

No início do fornecimento da nova matéria-prima em meados de março de 1996, começaram os problemas no processo de extrusão a frio, sendo necessários retrabalhos de tratamento térmico para novo processamento de vários lotes de peças.

Alguns exemplos de mudança do tratamento térmico da família dos pinhões são mostrados a seguir:

- pinhões pequenos: de ciclo de 8 horas tratados em forno esteira para ciclo de 50 horas

tratados em forno panela;

- pinhão grande: de ciclo de 40 horas tratado em forno panela para ciclo de 50 horas tratado em forno panela.

Os problemas provocados pela alteração da matéria-prima foram:

- ✓ perda na ocupação das prensas e reprogramação de produção,
- ✓ consumo adicional de ferramentas de extrusão e
- ✓ gastos adicionais com tratamento térmico devido a retrabalhos e necessidade de terceirização.

O estudo do planejamento da produção desses componentes na empresa permitirá que se avaliem os principais problemas em cada etapa do fluxo de produção e desta forma, possibilitará a apresentação de soluções para os problemas encontrados quanto à vida do ferramental e à qualidade dos produtos.

Tais evidências justificam e comprovam a necessidade deste trabalho, bem como a linha de pesquisa seguida, os planos de trabalho executados e os procedimentos de análises utilizados.

Capítulo 2

O Processo de Forjamento

2.1 Aspectos Gerais dos Processos de Forjamento

Os processos de conformação são classificados quanto a temperatura em que são realizados em processo a frio, a morno e a quente. O forjamento a frio é realizado abaixo da temperatura de recristalização e o forjamento morno é realizado em temperaturas intermediárias entre o forjamento a frio e o forjamento a quente. Na figura 2.1 é apresentada uma representação esquemática, em que observam-se as faixas de temperatura de realização desses processos e a variação da conformabilidade em função da temperatura.

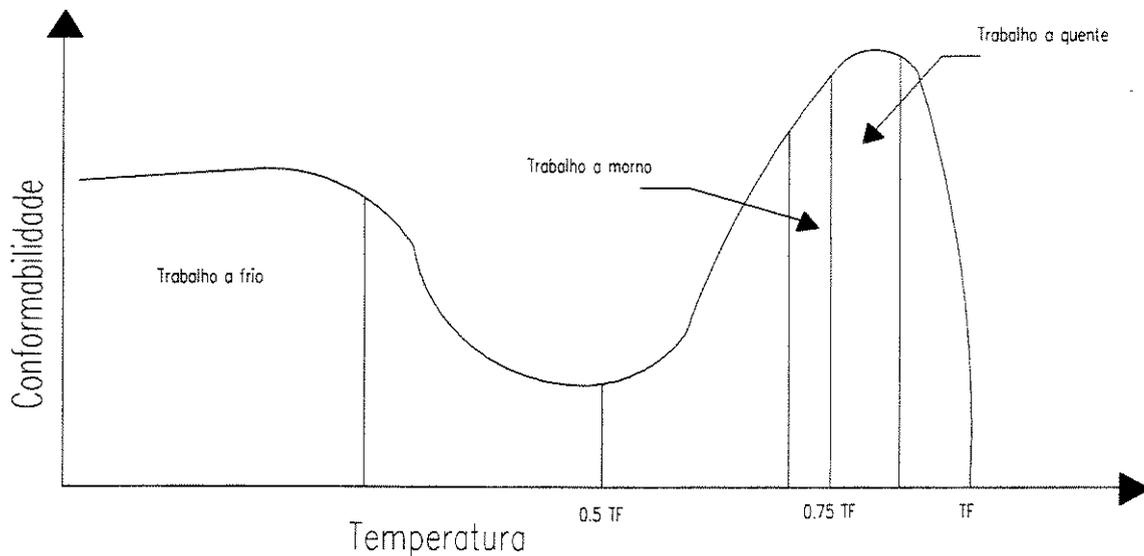


Figura 2.1 - Representação esquemática da variação da conformabilidade de aços em função da temperatura (TF = Temperatura de Fusão) [SEMIATIN, 1988]

Uma comparação de vários aspectos dos processos de forjamento a frio, a morno e a quente é apresentada por Hirschvogel e Dommelen [HIRSCHVOGEL & DOMMELEN, 1992] na tabela 2.1.

	Forjamento a quente	Forjamento a frio	Forjamento a morno
Tolerância	IT 12 - IT 16	IT 7 - IT 11	IT 9 - IT 12
Peso das peças conformadas	5g - 1500kg	1g - 50kg	100g - 50kg
Lotes econômicos (peso de 1kg)	min. 500 peças	min. 3000 peças	min. 1000 peças
Aços conformáveis	todos	aços de baixa liga (C<0,45%; outros elementos <3%)	aços com teores de elementos de liga <10%)
Formas	todas sem reentrâncias	principalmente axissimétricas sem reentrâncias	axissimétricas são desejáveis, sem reentrâncias
Conformabilidade (ϕ)	normalmente não há limite	razão de deformação $\phi < 1,6$	razão de deformação $\phi > 1,6$ (limite superior depende da composição do aço e da temperatura)
Qualidade superficial	>100 μ m	$\approx 10\mu$ m	<50 μ m
Possibilidade de automação	limitada	adequada	vantajosa
Tratamento superficial	não é necessário	recozimento, fosfatização	normalmente não há tratamento superficial
Tratamento intermediário	não é necessário	recozimento, fosfatização	normalmente não é necessário
Vida da matriz	2000-5000 peças	20000-50000 peças	10000-20000 peças
Custos para desenvolvimento e construção de ferramentas	baixo	médio	alto

Tabela 2.1 - Valores comparativos dos processos de forjamento

Vale ressaltar que os valores da tabela 2.1 são apenas referências para apontar tendências e não devem ser tomados como valores absolutos, pois a fabricação de cada tipo de peça é uma situação particular.

2.2 Forjamento a Frio de Aços

De acordo com [BUTTON, S. T., et al., 1995], o processo de forjamento a frio é um processo de conformação plástica, que ocorre no campo plástico da liga metálica sem remoção de material. Segundo [REGNER, P., SCHAEFFER, L., 1983] a designação a frio refere-se ao fato de que durante o processamento, o material conformado encontra-se na maioria dos casos abaixo da temperatura que provoca sua recristalização.

O forjamento do material é feito sem pré-aquecimento do mesmo ou das ferramentas, que podem se aquecer durante o processo de deformação, dependendo da modificação da forma, da velocidade de deformação e de outros parâmetros de processamento.

No trabalho a frio, por definição, os mecanismos de recristalização não são atuantes. Neste caso, à medida que o metal é deformado, ocorre o encruamento, isto é, sua resistência aumenta e a ductilidade diminui.

Em função da deformação a frio pode aparecer também a anisotropia de propriedades. Em contraste com o trabalho a quente, a anisotropia, neste caso, pode ser eliminada por tratamento térmico que restaure a microestrutura original do material.

Como a ductilidade diminui com o progresso da deformação, pode ocorrer ruptura antes de se atingir as dimensões finais desejadas, se a deformação for excessiva.

Para evitar estas dificuldades, as operações de deformação a frio, em geral, são realizadas em etapas, com operações de recozimento intermediárias. Apesar do aumento do custo envolvido, tais operações permitem uma maior flexibilidade, na medida em que possibilitam a obtenção de produtos com diversos graus de encruamento e conseqüentemente, diferentes propriedades mecânicas.[Mei, P., Silva, C. A., 1988]

Assim os produtos forjados a frio apresentam-se encruados com nível de resistência elevado; a capacidade plástica do metal (conformabilidade) é reduzida, reduz-se também a possibilidade de

grandes reduções de área ou a obtenção de geometrias complexas. Portanto, o forjamento a frio é normalmente empregado para a fabricação de peças similares a sólidos de revolução com dimensões e pesos relativamente reduzidos.

O forjamento a frio é um processo para a produção em série de peças, de modo que quanto maior a quantidade de peças, mais econômica torna-se sua aplicação, de acordo com as instalações fabris disponíveis.

As peças forjadas a frio são de precisão considerável em suas medidas e forma, e apresentam uma boa qualidade de superfície. Além disso, o material sofre um aumento pronunciado de resistência mecânica durante o processo de deformação, que pode ser de grande utilidade nas solicitações futuras da peça ou podem resultar numa grande economia de material. [VDI 3139]

Quando comparado com outros processos, o forjamento a frio apresenta as seguintes vantagens:

- ✓ grande economia de material (as vezes até 50%),
- ✓ possibilidade de produzir peças de geometria complexas, com tempo reduzido de processo,
- ✓ grande precisão de medidas e formas combinadas com a alta qualidade superficial e,
- ✓ melhoramento das características mecânicas das peças forjadas a frio mediante aproveitamento do aumento da dureza e da fibração mecânica favorável.

As peças extrudadas a frio com resistência especificada, normalmente podem ser produzidas partindo-se de aços de menor resistência. Às vezes pode-se até dispensar um beneficiamento após o forjamento, ao programar-se adequadamente os vários estágios de conformação nos lugares indicados da peça a ser forjada, obtendo diferentes valores de resistência.

2.3 Tipos de Processos

O forjamento a frio de eixos de aço representa bem dois tipos de processos básicos, que são o recalque e a extrusão. A figura 2.2 apresenta esquematicamente uma sequência de etapas para obtenção de um eixo forjado a frio.

No recalque, a área da seção transversal da peça forjada é aumentada durante o processo, por meio de esforços de compressão que promovem o escoamento radial do material forjado. Já na extrusão, a área da seção transversal do forjado é reduzida ao ser empurrado através de uma ferramenta (matriz) que define as dimensões e a geometria da seção do produto.

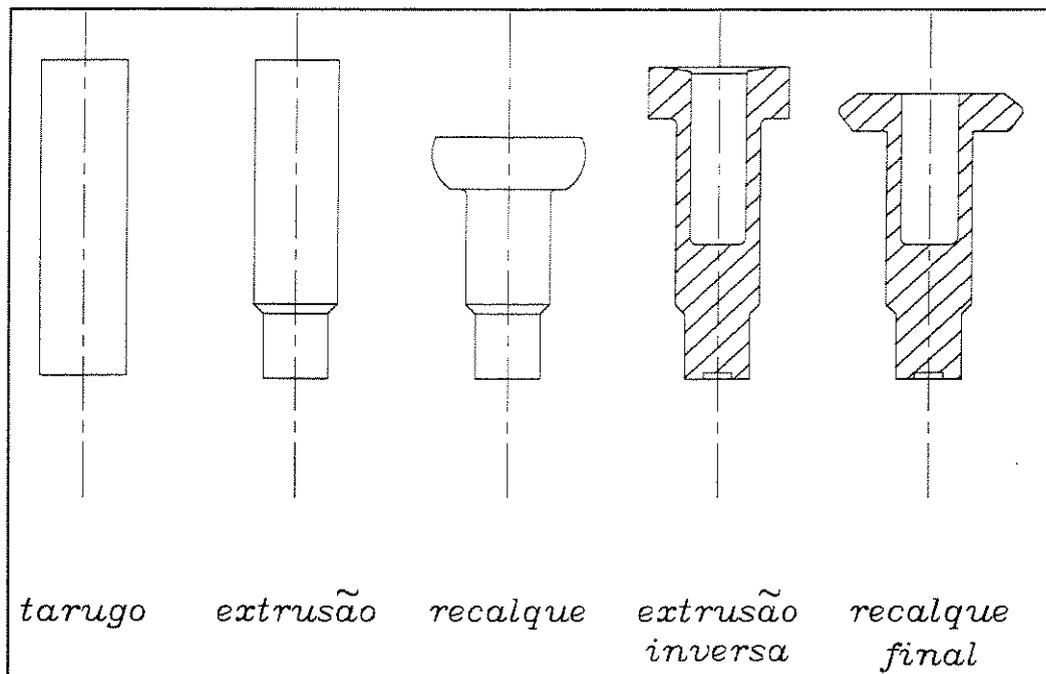


Figura 2.2 - Representação das operações de conformação a frio de um eixo [LANGE, 1985 – p. 15.54]

A figura 2.3 apresenta algumas variações das operações de recalque e de extrusão. O recalque pode ser (a) livre ou (b) contido, caso o diâmetro da peça recalçada seja ou não definido por uma ferramenta, respectivamente. No caso de eixos forjados a frio com cabeça recalçada, o processo apresenta as variações mostradas em (c) recalque frontal e (d) recalque com matriz de sujeição.

A extrusão pode ser (e) aberta (também denominada como de matriz aberta ou de redução) em que o tarugo não está contido numa matriz-guia. Nesse caso, o processo restringe-se a pequenas reduções de seção, impostas pelo risco de flambagem e recalque do tarugo. No caso de utilizar-se matrizes-guias (f), há possibilidade de maiores reduções de seção porém com limites definidos pelo atrito entre o tarugo e a matriz-guia.

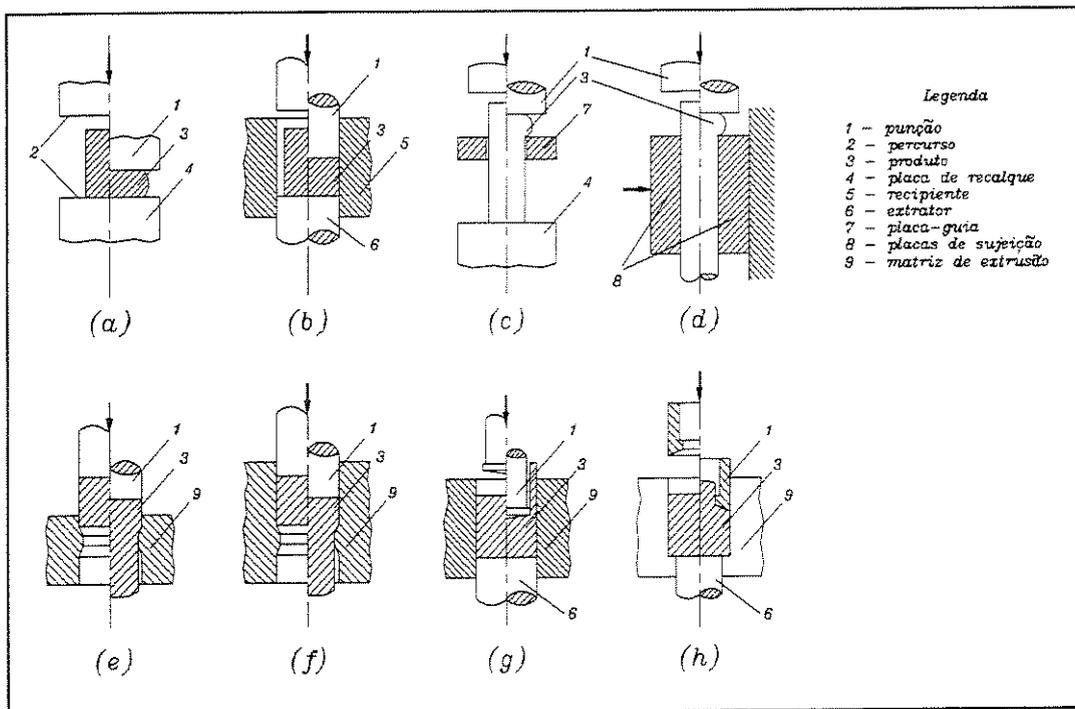


Figura 2.3 - Exemplos de variações de processo no forjamento a frio de eixos [BILLIGMANN & FELDMANN, 1.979]

Tanto (e) como (f) são definidos como extrusão direta (ou para frente) pois o movimento de avanço do produto extrudado coincide com o movimento do punção de extrusão. Já nos casos (g) de extrusão de peças ocas e (h) de extremidades de eixo, define-se a extrusão como sendo inversa (ou para trás), devido aos diferentes sentidos de movimento do punção e do produto.

A norma [VDI 3138 V.1] apresenta uma série de geometrias de produtos possíveis de se obter pelo forjamento a frio.

2.4 Limitações do Processo

Como em qualquer processo de conformação, as limitações do forjamento a frio de eixos de aço referem-se a aspectos econômicos e relativos à própria natureza do processo. Como exemplos de limites impostos por aspectos econômicos tem-se:

- A limitação de capacidade do equipamento de forjamento em termos de energia disponível e dimensões características de produtos forjados.
- As propriedades mecânicas do material empregado na fabricação das ferramentas, em termos de dureza e resistência a compressão.

Esses aspectos fazem com que um dado equipamento seja capaz de produzir forjados com dimensões e geometrias específicas, restringindo seu uso para uma categoria de produtos. As limitações impostas pelas ferramentas apresentam um caráter econômico relacionado com o seu custo e vida de trabalho.

Como apresentado anteriormente, o forjamento a frio apresenta-se como um processo economicamente competitivo em que a escolha adequada do material e dos processos para fabricação do ferramental influi decisivamente.

Respeitadas as limitações impostas pelo equipamento e pelas ferramentas, deve-se considerar as características específicas do processo que restringem a obtenção dos produtos forjados.

Como apresentado, o forjamento a frio consiste basicamente de operações de recalque e de extrusão. No recalque há duas limitações principais: uma relacionada com as dimensões do tarugo e outra com a máxima deformação possível.

A esbeltez do tarugo, ou seja, a razão entre a sua altura e seu diâmetro é limitada pela possibilidade de flambagem do tarugo.

No caso do recalque frontal (figura 2.3-c) uma possível limitação do processo é a força disponível sob a matriz de recalque. Já a máxima deformação possível está associada à conformabilidade do material do tarugo e às condições de lubrificação na interface tarugo-matriz.

No caso da extrusão aberta, o limite da redução de área deve-se a duas restrições: a possibilidade de recalque do tarugo à frente da matriz no caso de tarugos curtos e a possibilidade de flambagem do tarugo antes do início da extrusão, no caso de tarugos longos.

Para a extrusão contida (direta ou inversa), a limitação de redução de seção deve-se principalmente às elevadas tensões desenvolvidas durante o processo que transmitidas às ferramentas podem causar sua falha, mesmo que essas ferramentas sejam adequadamente dimensionadas e reforçadas. Nesse caso, a lubrificação eficiente da interface tarugo-ferramentas promove a redução dessas tensões, a elevação da vida útil do ferramental e possibilidade de aumento da redução de seção.

A figura 2.4 apresenta os valores limites de deformação para as diversas variações de processo encontradas no forjamento a frio.

2.5 Limites do Processo Quanto a Redução de Área.

Como apresentado no item 2.4, os processos de extrusão e recalque a frio definem os limites de redução de seção seja pela limitação de capacidade de deformação das ligas metálicas, seja pela limitação de resistência mecânica dos materiais normalmente empregados na fabricação das ferramentas.

A seguir, serão apresentados valores limites de deformação para as operações de extrusão direta livre e confinada, indireta e para o recalque a frio.

Nos valores limites apresentados para o forjamento a frio dos aços, está incluído o conceito de

Carbono Equivalente.

A composição química dos aços apresenta forte influência sobre a conformabilidade. Segundo a norma [VDI 3138 V.1], tanto para os aços sem liga como para os aços ligados, a resistência a deformação pode ser associada diretamente ao teor de carbono presente, devido a relação direta com a proporção de perlita (menos dúctil) na microestrutura do aço.

Nos aços de baixa liga de Cr e Ni e aqueles com um teor elevado de Manganês ($Mn > 0,6\%$) ao invés do teor de carbono definido na composição química, deve-se utilizar um teor de carbono equivalente C_1 de acordo com a seguinte relação:

$$C_1 = C + \frac{Mn - 0,6}{4} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{20}$$

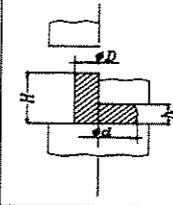
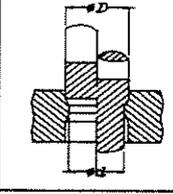
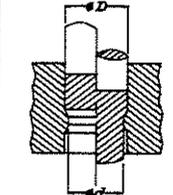
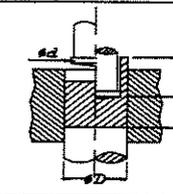
<i>Processo</i>	<i>Limite</i>
	$H < 2.5D$ $d < 2D$ $h > 0.25H$
	$d > 0.85D$
	$d > 0.5D$
	$0.5D < d < 0.85D$ $l < 2.5d$ $t > 0.5(D-d)$

Figura 2.4 - Limitações de deformação para os processos de forjamento a frio [NATIONAL, 1986]

Essa norma também indica que se deve dar preferência aos aços com baixo teor de carbono, devendo evitar aços com teor de carbono equivalente superiores a 0,5%. Como exemplo de cálculo, o aço DIN 16MnCrS5 apresenta C_1 igual a:

$$C_1 = 0,17 + \frac{1,25 - 0,6}{4} + \frac{1,02}{20} + \frac{0,15}{20} = 0,39\%$$

ou seja, esse é um material que se encontra dentro dos limites aceitáveis para deformação a frio.

A tabela 2.2 a seguir classifica alguns aços ligados e não ligados quanto a sua conformabilidade a frio:

CONFORMABILIDADE A FRIO DE AÇOS LIGADOS E NÃO LIGADOS			
ÓTIMA	BOA	REGULAR	RUIM
1008	1018	1035	1045
1010	1020	1038	1050
1013	1022	1040	1060
1016	1024	2330	1070
1017	1030	3140	1080
3115	3120	4130	1340
5015	3130	4130	4340
5115	4037	4140	4640
	5120	5140	6150
	8620	8640	52100

Tabela 2.2 - Classificação de aços ligados e não ligados [BILLIGMANN & FELDMANN, 1.979]

Deve ser lembrado que essa classificação é influenciada pelo processo de conformação a frio executado, pela lubrificação empregada e pelas condições de acabamento do ferramental.

A norma [VDI 3143 V.1] apresenta os critérios para escolha, tratamentos térmicos e ensaios de aços para forjamento a frio. Nessa norma, observa-se que os elementos de liga que mais influem em ordem decrescente na forjabilidade a frio são: C, Si, Cr, Cu, Mn e Ni. Assim, prefere-se aços com teor de carbono menor que 0,5%, Mn menor que 0,6% e Si menor que 0,3% para os aços de fabricação comum.

2.5.1 Limites na Extrusão a Frio Livre

Nesse processo, tem-se dois limites: o primeiro relativo à máxima redução de área que se encontra entre 30 e 35% por passe e é devida a relação entre a tensão de resistência a deformação e a tensão limite de escoamento, pois valores maiores de redução causariam o recalque do tarugo, antes de extrudá-lo. Conclui-se que materiais encruados suportam maiores reduções pois apresentam valores maiores de tensão de escoamento. A segunda limitação refere-se ao comprimento livre do tarugo que deve encontrar-se abaixo de duas vezes e meia o seu diâmetro, a fim de evitar sua flambagem durante a extrusão.

A figura 2.5 apresenta um esquema desse processo, bem como um quadro com os limites e as dimensões típicas para a matriz de extrusão.

2.5.2 Limites na Extrusão a Frio Confinada

Na extrusão a frio confinada (figura 2.6), os limites de redução de seção e comprimento do tarugo são definidos pela resistência mecânica dos materiais empregados na construção das ferramentas, mesmo que sejam utilizados materiais de elevada resistência.

Para os aços de boa conformabilidade define-se a máxima redução de área entre 70 e 75% por passe. Já para aços de baixa e média conformabilidade a redução máxima possível varia entre 50 e 55%. O comprimento do tarugo deve-se limitar entre duas a oito vezes seu diâmetro (de acordo com a conformabilidade do material deformado), devido ao aumento considerável dos esforços de atrito no confinamento.

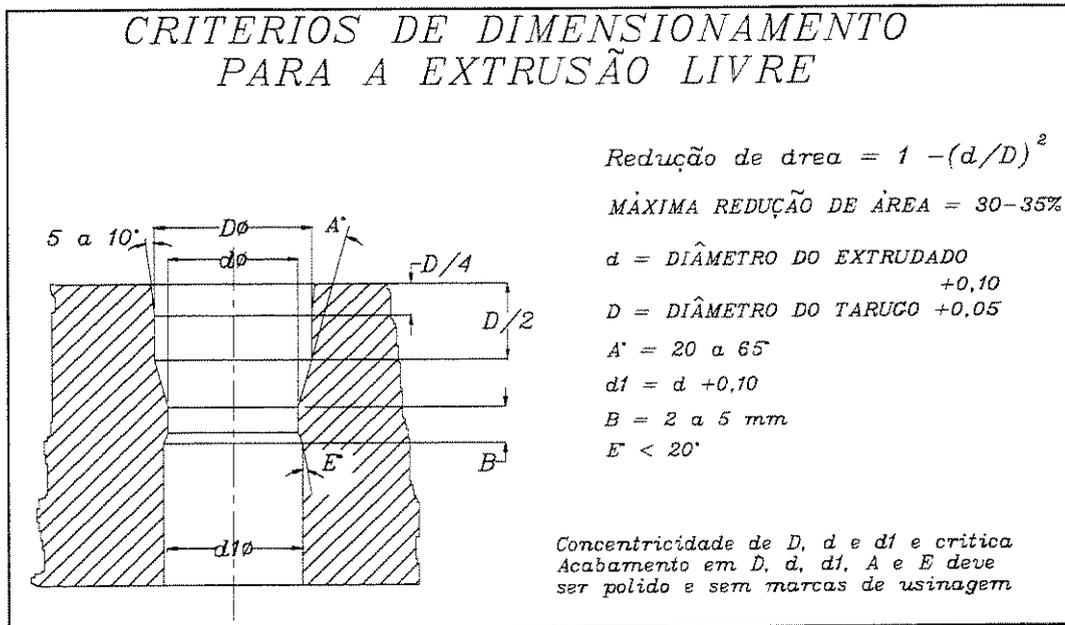


Figura 2.5 - Critérios para obter as dimensões internas de uma matriz para extrusão livre
[NATIONAL, 1986]

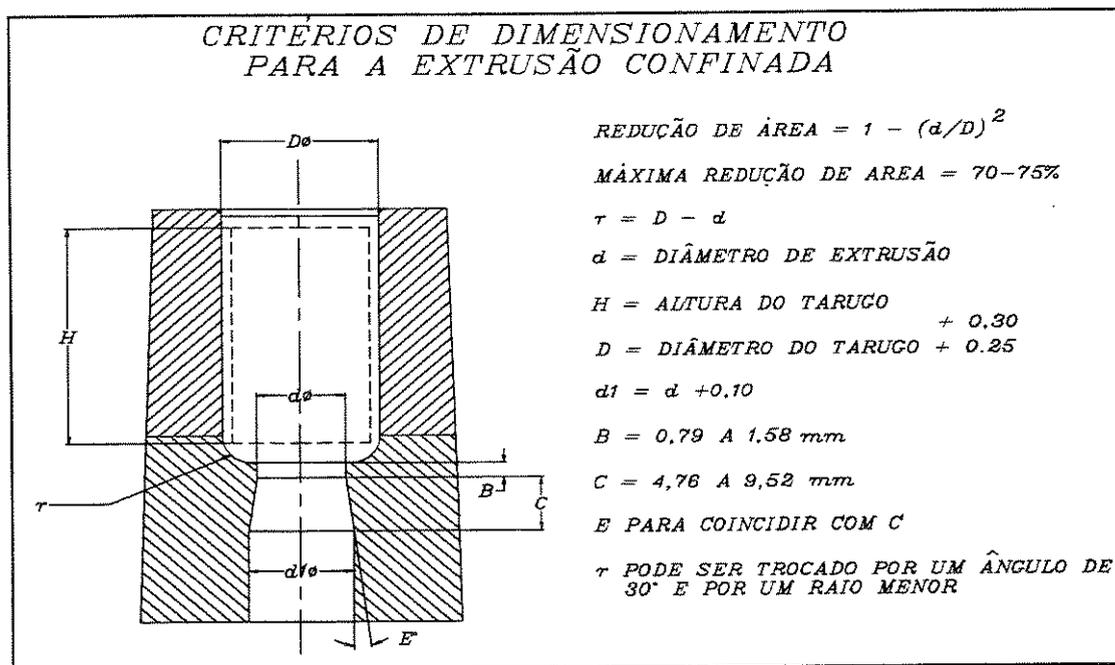


Figura 2.6 - Critérios para a obtenção das dimensões da matriz na extrusão confinada
[NATIONAL, 1986]

Tanto na extrusão direta livre como na confinada, pode-se determinar um ângulo ideal de cone da matriz que minimiza os esforços de extrusão. Porém, normalmente para a extrusão de aços, adota-se um ângulo de trabalho de 30°. Para esse ângulo, os esforços são relativamente baixos e a vida da matriz é maior do que caso fossem utilizados os ângulos calculados, encontrados na faixa de 25 a 35°, para as reduções limites de seção [NATIONAL, 1986].

2.5.3 Limites na Extrusão Inversa

Na extrusão inversa (figura 2.7) como na extrusão confinada, os limites máximos de redução de área (entre 70 e 75% para os aços de boa conformabilidade e entre 50 a 55% para os aços de baixa e média conformabilidade) também estão limitados pela resistência mecânica característica dos materiais empregados nas ferramentas.

No caso de aços de boa conformabilidade, a redução de área ideal está próxima de 50%, para a qual a pressão de extrusão atinge um valor mínimo. Já os valores mínimos de redução de área referem-se ao limite de rigidez do punção de extrusão, pois para reduções de área pequena (relações d/D baixas), a razão diâmetro/comprimento do punção é reduzida, aumentando o risco de flambagem.

A relação entre a altura e o diâmetro da peça extrudada está compreendida entre 1,5 (aços de baixa conformabilidade) a 2,5-3 para aços de boa conformabilidade [NATIONAL, 1986].

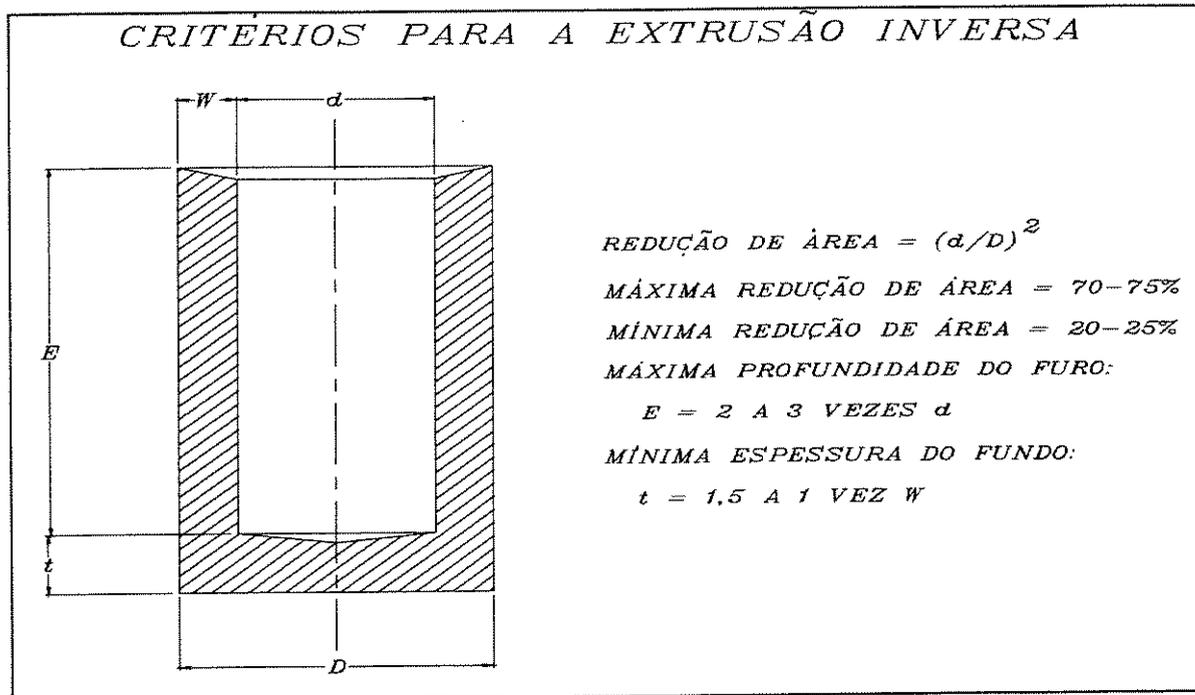


Figura 2.7 - Critérios para o dimensionamento do produto na extrusão inversa [NATIONAL, 1986].

2.6 Tipos de Produtos

O processo de forjamento a frio apresenta algumas características que permitem a obtenção de produtos com elevada qualidade geral (bom acabamento superficial e tolerâncias dimensionais reduzidas). Dentre essas características destacam-se:

- ✓ ausência de problemas relacionados ao aquecimento do tarugo, como oxidação, descarbonetação ou contração térmica,
- ✓ presença de lubrificação eficiente,
- ✓ equipamentos (prensas) com elevada rigidez e tolerâncias dimensionais e geométricas apertadas e
- ✓ ferramentas rígidas com elevada qualidade superficial, dimensional e geométrica.

Novamente a qualidade de trabalho normalmente encontrada na extrusão a frio de aços apresenta-se entre IT 8 e IT 13 (em situações especiais, obtém-se até IT 7), ou seja, qualidades de trabalho semelhantes às encontradas nas operações de usinagem para desbaste e acabamento, como por exemplo o torneamento.

Já a rugosidade superficial média (R_a) dos produtos, varia entre 0,3 e 3,5 μm , de acordo com as condições de redução de seção e de acabamento das ferramentas. Esses valores são característicos de processos como a retificação e o torneamento em produção.

Sempre que possível deve-se considerar a utilização e a funcionalidade dos produtos acabados, observando as regiões que serão necessariamente usinadas, projetando forjados geometricamente mais favoráveis e com tolerâncias dimensionais mais abertas, de modo que a vida das ferramentas seja aumentada e que os custos totais de fabricação sejam reduzidos, com a conseqüente melhoria da produtividade. A figura 2.8 apresenta alguns produtos forjados a frio.

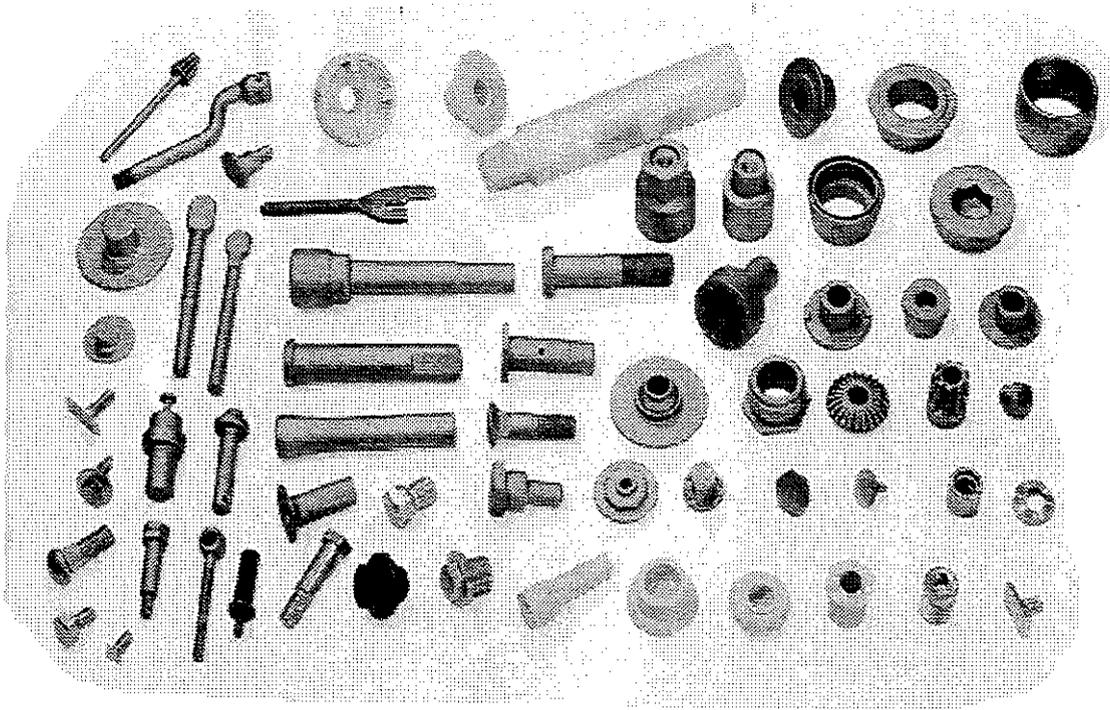


Figura 2.8 - Tipos de produtos obtidos no processo de forjamento a frio. [AÇOPEÇAS]

As variações dimensionais e geométricas encontradas em produtos forjados a frio podem ser explicadas por alguns fatores, como apresentados na figura 2.9.

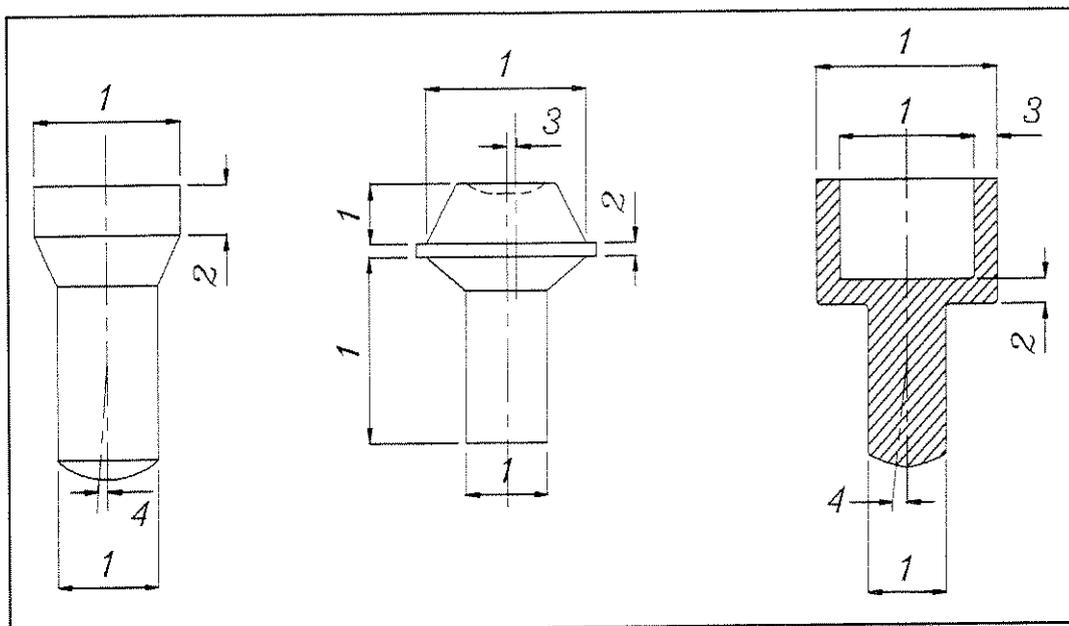


Figura 2.9 - Variações encontradas em dimensões de peças forjadas a frio [NATIONAL, 1986]

1. Dimensão determinada pelas ferramentas e pela recuperação elástica após extração;
2. Dimensão determinada pela precisão de posicionamento do martelo da prensa durante o forjamento;
3. Precisão da dimensão determinada pela precisão dimensional das ferramentas e pela folga existente entre o martelo e a estrutura da prensa. Nesse caso, a excentricidade radial comum está entre 0,1 e 0,2 mm;
4. No caso de eixos longos, a flexão de cerca de 0,1% do comprimento do eixo não pode ser eliminada.

A norma [VI 3138, V.1] apresenta uma série de indicações e restrições para o projeto de peças forjadas a frio. Também nesta norma, são apresentados valores característicos de tolerâncias dimensionais, geométricas e de rugosidade superficial dos produtos forjados.

Os defeitos que surgem em produtos forjados a frio são causados basicamente por fatores como:

- ✓ tratamento térmico incorreto e baixa qualidade superficial dos tarugos de partida,
- ✓ deficiência da lubrificação na interface tarugo-ferramentas,
- ✓ execução de etapas de extrusão ou recalque com graus de deformação excessivos e
- ✓ uso de ferramentas com geometrias inadequadas.

A figura 2.10 (a) esquematiza um defeito de trinca por cisalhamento (a 45°) numa peça de aço recalçada a frio. Nesse caso, o defeito deveu-se a uma escolha inadequada do tratamento térmico do material de partida, utilizado com estrutura perlítica lamelar (de baixa conformabilidade).

Já a figura 2.10 (b) apresenta um defeito de trinca longitudinal em peça recalçada devido à baixa qualidade superficial do material de partida.

A figura 2.10 (c) esquematiza o defeito denominado como "chevron". Esse defeito de ocorrência aleatória apresenta uma série de causas possíveis como, por exemplo, a escolha inadequada das reduções de seção em passes sucessivos de extrusão combinada com o uso de matrizes com ângulo de trabalho incorretos, o uso de lubrificantes ineficazes e materiais de partida com estruturas de baixa conformabilidade. A norma [VDI 3138, V.1] apresenta diversos defeitos encontrados em forjados a frio e aponta suas prováveis causas.

2.7 Projeto de Ferramentas

2.7.1 Critérios para Projeto de Matrizes

A matriz é a parte da ferramenta que dá forma a peça, e no seu projeto deve-se tanto quanto possível evitar a deformação assimétrica do material. Transições bruscas seguidamente causam dificuldades, por isso cantos e arestas devem ser providos de arredondamentos. Cantos vivos podem

ser obtidos por extrusão exigindo, entretanto, maiores forças adicionais. Rebaixos não podem ser extrudados com ferramentas simples. Somente para a produção de grandes lotes se justifica, em certos casos, a construção de ferramentas mais complicadas que permitam a realização de rebaixos já na extrusão a frio. Peças cônicas igualmente exigem elevadas pressões de conformação, de sorte que se deve evitar conicidades.

As solicitações mecânicas do processo, pressões e forças de conformação devem ser absorvidas pela máquina e ferramentas. Devido à geometria da zona de conformação, esforços atuam sobre a ferramenta nas direções axial e radial. As pressões axiais são transferidas pela ferramenta à prensa, onde são absorvidas sem maiores dificuldades. A componente radial atua como pressão interna sobre a parede interna da ferramenta oca (composta por matriz, suporte, anel de pressão e recipiente). Nesta se desenvolvem elevadas solicitações, na forma de tensões de tração, podendo levar a ferramenta à ruptura. Para metais de difícil conformação incluindo-se o aço, são necessárias medidas especiais para a resistir as pressões internas.

Sabe-se que elementos construtivos que devam suportar solicitações externas extremamente elevadas em um sentido são, usualmente, pré-carregados em sentido oposto. Dessa possibilidade se faz uso nas matrizes altamente solicitadas.[VDI 3176]

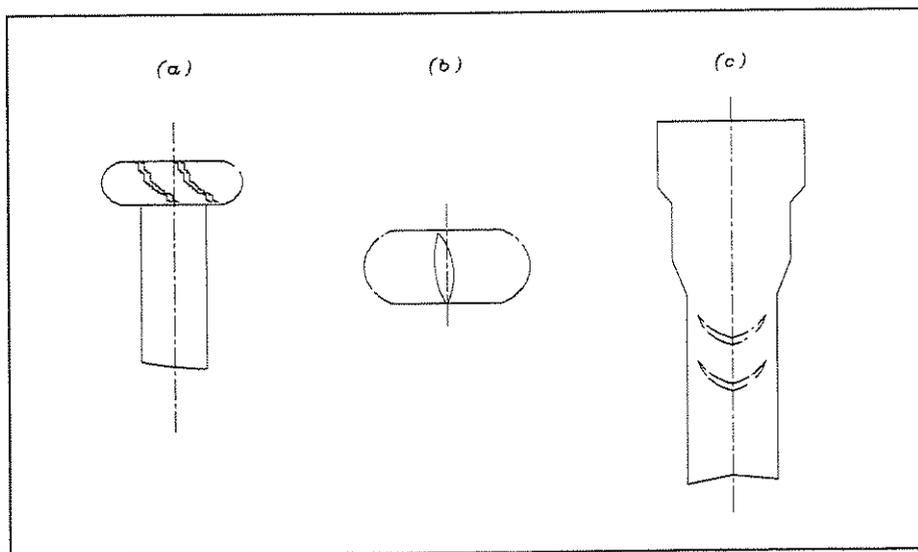


Figura 2.10 - Representação esquemática de defeitos em produtos forjados a frio

O pré-carregamento é conseguido pela subdivisão da ferramenta oca numa matriz interna e num anel de pressão (figura 2.11). Ambas as partes são montadas sob pressão, fazendo com que surjam tensões prévias de compressão nas paredes da matriz, de modo a compensar as tensões surgidas na extrusão.

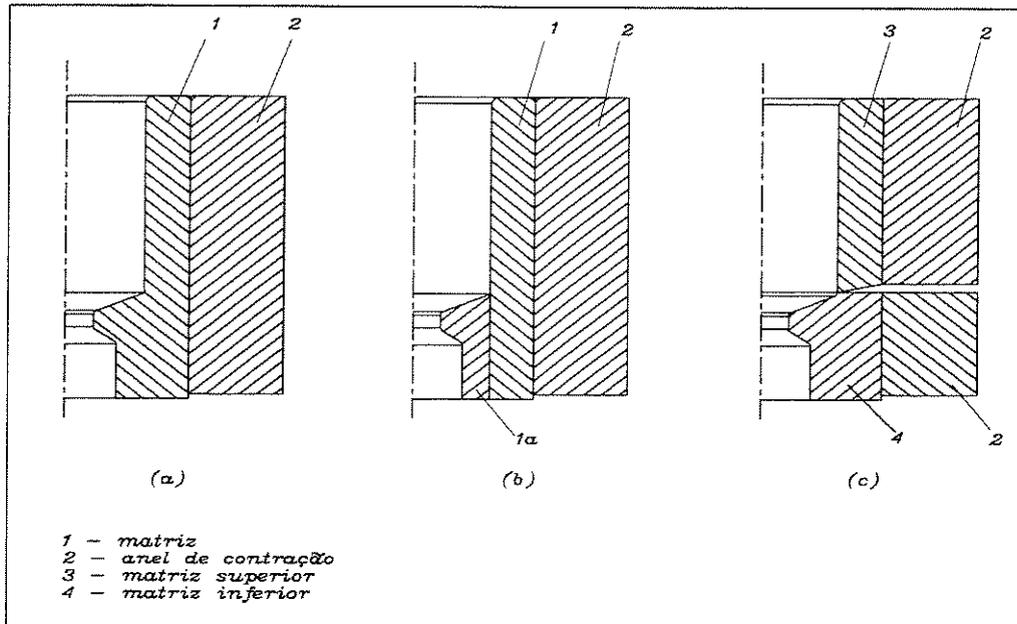


Figura 2.11 - Conjunto matriz e anel de pressão [VDI 3176]

Dispõe-se assim, de uma faixa mais ampla para as solicitações suportadas. Se uma divisão simples da ferramenta não satisfizer, utilizam-se dois, ou mesmo três anéis de pressão, como blindagem para a matriz. O material da matriz, então, será mais bem utilizado quando todos os anéis de pressão forem solicitados até seu limite de escoamento. Uma exceção é representada pelas matrizes blindadas de metal duro, visto que as tensões de compressão deverão ser apenas anuladas, já que os metais duros praticamente não suportam tensões de tração [GRUNING, K., 1976].

A maioria das matrizes são especiais, isto é, são construídas para a produção específica de uma peça. Uma grande parte de detalhes tais como as guias, os batentes, e os punções para furos de mesmo diâmetro podem ser utilizados em outros conjuntos, tornando-os estes mais econômicos. Apesar disto o preço de um conjunto é alto, indo de algumas centenas de dólares para peças pequenas e simples até algumas dezenas de milhares de dólares para matrizes de peças maiores e geometrias complexas.

Muitas matrizes são confeccionadas para executarem operações especiais, recebendo então o nome da operação, tal como matriz de corte, matriz de furação, matriz de estampagem, etc; de acordo com a natureza do serviço que ela executará.

Em geral, podem surgir dois tipos de defeitos em matrizes, de forma isolada ou conjunta:

- Corrosão ou desgaste - Quando na peça prensada aparecem zonas mais claras, arranhões ou ranhuras no sentido do prensado, que podem ser causadas por:
 - ✓ lubrificação errada ou insuficiente,
 - ✓ aspereza da superfície da peça devido a decapagem ou à fosfatização incorretas,
 - ✓ aspereza excessiva da superfície da ferramenta devida à fabricação incorreta ou desgaste excessivo,
 - ✓ baixa dureza da matriz e,
 - ✓ geometria da ferramenta incorreta por exemplo, ângulo de saída para extração pequeno demais.

- Ruptura longitudinal - Este tipo de ruptura é consequência de uma solicitação excessiva. As causas podem ser a pré-tensão insuficiente no anel de contração ou a força de conformação excessiva. No caso de pré-tensão insuficiente deve-se verificar se a tensão pode ser aumentada por:
 - ✓ anéis de contração adicionais,
 - ✓ ampliação do diâmetro externo da matriz e,
 - ✓ utilização de materiais com maior dureza para os anéis.

- Ruptura Transversal - É o tipo mais freqüente. Aparece principalmente no caso das matrizes para extrusão direta ou de tubos, nas proximidades do ângulo de entrada superior. A causa desse tipo de ruptura é um acúmulo de tensão ou um estado de tensão axial relativamente alto. Geralmente trata-se de uma ruptura por fadiga que surge após uma determinada quantidade de peças produzidas. Esses problemas podem ser solucionados pela:

- ✓ utilização de um material de maior tenacidade para a matriz (por exemplo aço em lugar de metal duro) e
- ✓ diminuição da dureza do aço ferramenta de 2 até 5 Rockwell (HRC), quando isto for possível por causa da menor resistência ao desgaste do aço mais mole.

A norma [VDI 3186, V.3], ajuda a completar os critérios para projeto de matrizes de forjamento a frio.

2.7.2 Critério para Projeto de Punções

O punção que é a parte da ferramenta que nos processos de extrusão inversa, origina a forma interna da peça e nos processos de extrusão direta, comprime a peça através de um orifício que dá a forma. A espiga é a parte do punção que na extrusão de tubo é introduzida no punção, modela a superfície frontal e, em alguns casos, é utilizado como ejetor.

A construção do punção (e de uma espiga) pode ser efetuada conforme os seguintes passos:

- ✓ Determinação da força de pressão [VDI 3185 V. 1,2 e 3] [VDI 3138, V. 2];
- ✓ Projeto da forma externa e do dimensionamento das medidas;
- ✓ Escolha de um material de ferramenta adequado, levando em consideração a tenacidade exigida, a durabilidade, os custos e as possibilidades da produção;
- ✓ Examinar, sempre que possível, se os valores de tenacidade exigidos poderão ser alcançados e se serão suficientes.

A vida de uma ferramenta é fator de grande importância. Atualmente ainda não é possível realizar uma análise detalhada de tensões, mesmo utilizando-se métodos estatísticos. Por isso é necessário tomar como base os valores resultantes da experiência e realizar o projeto procurando evitar as concentrações de tensão e tensões de flexão.

O punção flamba quando na presença de uma força o comprimento do punção é grande demais em relação ao diâmetro. Ou vice-versa: numa relação máxima de comprimento/diâmetro, o punção se flamba quando a tensão atinge um determinado valor. Os punções para extrusão inversa apresentam maior tendência à flambagem que os de extrusão direta ou de tubo, uma vez que são mais solicitados por flexão. Também deve ser levado em consideração o fato de que a flambagem freqüente, pode levar a ruptura durante a produção contínua.

Punção para extrusão direta

A construção dos punções para extrusão direta é relativamente simples, uma vez que as tensões não são superiores a 200 N/mm^2 . A folga entre o punção e a matriz é da maior importância e exige compromissos entre:

- ✓ a necessidade de evitar o surgimento de rebarbas na superfície frontal, principalmente no caso de materiais relativamente macios;
- ✓ a necessidade de evitar a danificação do punção e da matriz (por exemplo, devido a sobreposição do punção na matriz);
- ✓ em todos os casos, a folga deve permitir o aumento de diâmetro do punção devido ao recalque elástico.

Punções para extrusão inversa

O punção para extrusão inversa figura 2.12 é normalmente submetido a alta solicitação. Por isso, recomenda-se levar em consideração:

- ✓ deve ser o mais curto possível, levando em consideração o tipo de fixação e a instalação de ejeção;
- ✓ devem ser evitados os diferenciais de secção transversal grandes e sem transição, a fim de manter reduzidas as concentrações de tensão;

- ✓ pelo mesmo motivo, nas transições de secção transversal devem ser previstos pequenos ângulos de cone e grandes raios de transição.

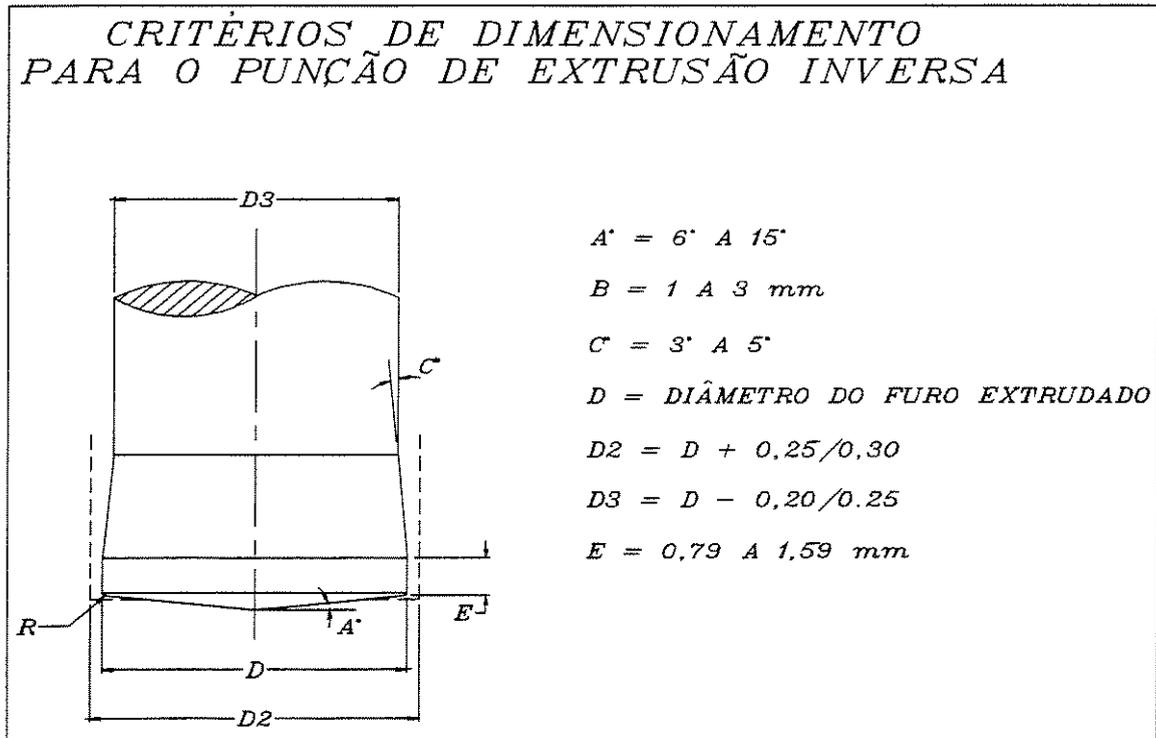


Figura 2.12 - Critérios para dimensionamento de punções de extrusão inversa [NATIONAL, 1986]

2.8 Equipamentos

Os equipamentos empregados na produção de produtos extrudados a frio podem ser classificados em equipamentos para o forjamento propriamente dito e equipamentos auxiliares.

A escolha do equipamento a ser empregado no processo de forjamento normalmente baseia-se em aspectos econômicos como, por exemplo, as instalações e máquinas disponíveis na planta fabril.

Deve-se sempre considerar que a precisão de construção e operação dos equipamentos de forjamento transferem-se ao processo e, conseqüentemente ao produto. De acordo com [LAWRENCE, E. D., 1972] as prensas são as máquinas utilizadas para a conformação de metais a frio, e nas características desejadas para um equipamento de forjamento pode-se destacar:

- Dimensionamento que inclui;
 - ✓ suficiente espaço para acomodar ferramentas,
 - ✓ suficiente curso para levar o punção ao lugar desejado e
 - ✓ suficiente abertura de modo que a peça a ser trabalhada e acabada possa entrar e sair livremente da prensa.
-
- Rigidez para sustentar a força requerida em cada ciclo;
 - Uma fonte de energia para manter a força durante o ciclo;
 - Velocidade para dar os desejados ciclos/minuto;
 - Potência para manter o fornecimento de energia durante a operação;
 - Rigidez e resistência para manter o alinhamento, as tolerâncias e produzir bem por longos períodos.

O forjamento a frio normalmente ocorre em vários estágios, assim, deve-se analisar tecnicamente e economicamente a forma como esses estágios serão distribuídos em um ou mais equipamentos.

Os produtos forjados a frio apresentam qualidade geral bastante elevada pela própria natureza do processo. Assim, a opção pelo equipamento de forjar recai sobre máquinas que possuam características adequadas de energia e força disponível, velocidades, precisão, rigidez, vãos e cursos, além de possibilitar a execução de vários estágios de conformação simultânea ou separadamente.

Dentre os equipamentos normalmente utilizados para conformação de metais, destacam-se para o forjamento a frio, as prensas acionadas tanto mecânica como hidráulicamente, sendo as prensas hidráulicas tanto de construção vertical como horizontal [LANGE, 1985, p. 15.46].

2.8.1 Equipamentos Auxiliares

Como apresentado anteriormente, o processo de forjamento a frio apresenta algumas limitações que podem ser minimizadas ao se preparar os tarugos iniciais. Nesta preparação, destaca-se as operações de corte, tratamentos térmicos, limpeza e lubrificação.

A operação de corte reveste-se de grande importância pois a qualidade das superfícies cortadas influi diretamente na qualidade do produto forjado e em alguns casos, no próprio sucesso de execução do processo. A norma [VDI 3187] apresenta alguns defeitos de corte por tesoura e suas implicações.

O corte em tesouras por cisalhamento é um dos processos mais empregados para a obtenção de tarugos para o forjamento a frio. É um processo rápido com desperdício reduzido que apresenta algumas desvantagens como a deformação e endurecimento das extremidades cisalhadas e o surgimento de trincas nessas extremidades.

Pode-se cisalhar barras de aço com diâmetros até 120 mm. Há uma limitação quanto à relação entre altura e diâmetro do tarugo: caso seja menor que 0,5 torna-se necessário uma operação adicional de recalque para melhorar o paralelismo entre as superfícies cisalhadas.

Um outro processo para separação de tarugos a partir de barras é o corte por serra. Neste caso, o corte é mais lento (cerca de 10 vezes) e o desperdício maior que no processo anterior, além de necessitar de operações de rebarbação para diâmetros maiores. Porém, apresenta como vantagem a qualidade, precisão e paralelismo das superfícies cortadas, sem modificação estrutural, nem encruamento ou formação de trincas.

As operações de tratamento térmico referem-se às etapas de recozimento do tarugo inicial, recozimentos entre etapas de forjamento a frio e recozimento ou beneficiamento do produto forjado.

Tanto o recozimento do tarugo inicial como os recozimentos intermediários tem por objetivo modificar a estrutura do metal deformado de modo a torná-lo mais dúctil e desta forma, aumentar sua capacidade de deformação, possibilitando a realização do processo e prevenindo defeitos no produto.

O tarugo inicial pode-se apresentar recristalizado (recozimento de recristalização) para aços com baixo e médio teor de carbono, ou esferoidizados (recozimento cíclico) para aços com elevado teor de carbono.

O recozimento intermediário deve ser evitado através de um planejamento adequado das etapas de forjamento a frio, a fim de manter a produtividade do processo pela sua continuidade.

Os tratamentos térmicos posteriores ao forjamento a frio variam de acordo com as propriedades mecânicas desejadas para o produto forjado, desde simples recozimentos de recuperação para alívio de tensões, passando por tratamentos de normalização da estrutura ferrítica-perlítica até tratamento de beneficiamento envolvendo etapas de cementação, nitretação, tempera e revenido.

Em todos esses tratamentos deve-se destacar a importância do controle adequado da temperatura, do tempo de permanência e da atmosfera do forno, de modo a garantir-se a qualidade superficial e estrutural da matéria-prima e dos produtos forjados.

A norma [VDI 3143] apresenta informações detalhadas sobre tratamentos, equipamentos e atmosferas. A norma [VDI 3200, V. 2] apresenta as curvas de escoamento para alguns aços nos estados normalizado e recozido ciclicamente.

Como as operações de corte e tratamento térmico, a operação de limpeza é extremamente importante pois prepara a superfície do tarugo para a operação posterior de lubrificação.

Dentre as operações de limpeza destacam-se o desengraxamento e a decapagem. No desengraxamento elimina-se compostos orgânicos que poderiam comprometer a aderência dos lubrificantes a superfície do tarugo. Na decapagem são eliminados os óxidos prejudiciais ao forjamento.

Também na decapagem promove-se a modificação da textura superficial do tarugo favorecendo a aplicação posterior do revestimento para lubrificação.

A norma [VDI 3161] descreve as operações de limpeza e desengraxamento e a norma [VDI 3162], a decapagem de peças para o forjamento a frio.

A lubrificação eficiente exerce um papel preponderante para o sucesso do processo de forjamento a frio e influi diretamente na qualidade dos produtos forjados. Como exemplo tem-se a variação da rugosidade superficial de um produto forjado que passa de 1 a 5 μm para o caso de um tarugo fosfatado para valores entre 5 e 14 μm , no caso de um tarugo não fosfatado.

No caso do forjamento a frio de aços, o procedimento mais usual é a lubrificação dos tarugos através das etapas de fosfatização e ensaboamento.

Após a fosfatização, o revestimento na forma de fosfato atinge espessura de 10 a 15 μm e devido à rugosidade superficial obtida nesse tratamento, esse revestimento funciona como um "portador" do lubrificante (no caso o sabão é carregado entre os vales e picos produzidos pela fosfatização).

A preparação da superfície dos tarugos é definida pela seqüência de operações: desengraxar e/ou decapar, enxaguar com água fria, enxaguar e pré-aquecer com água quente, fosfatizar, enxaguar com água fria, enxaguar e ensaboar com água quente e secar.

As normas [VDI 3164 e 3165] apresentam respectivamente as condições e equipamentos para a fosfatização e ensaboamento e indicações para escolha de lubrificantes para a conformação a frio.

2.9 Seqüência Típica de Etapas de Fabricação

O fluxograma geral do processo de forjamento a frio é apresentado na figura 2.13.

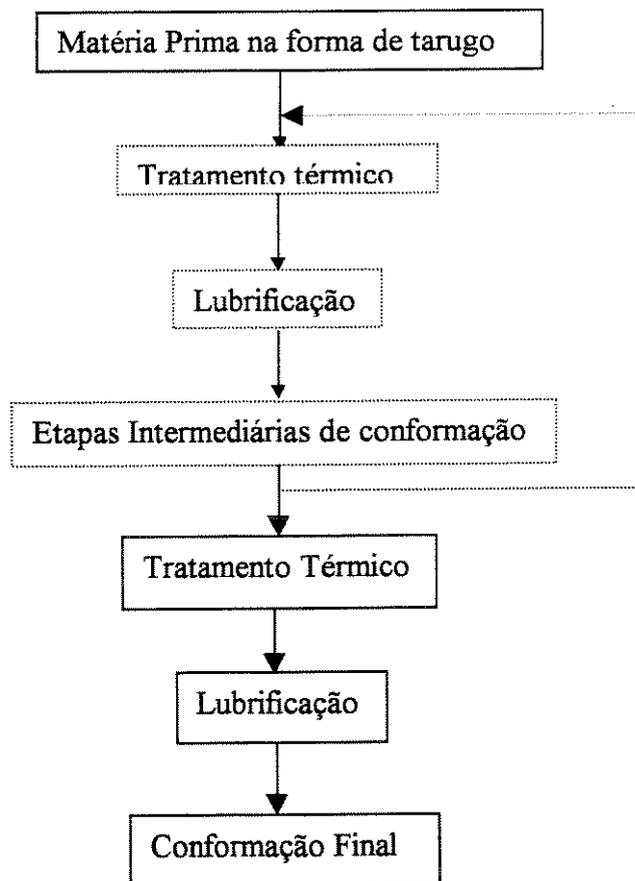


Figura 2.13 - Fluxograma do processo de forjamento a frio

O material é recebido em barras e, dependendo da necessidade, é tratado termicamente para sofrer um coalescimento dos grãos, tornando-se mais adequado para conformação. Após o tratamento térmico, se houver necessidade, o material é lubrificado, pois a condição de atrito entre a matriz e a peça é de grande importância na conformação da peça.

Em seguida o material é submetido a uma etapa de conformação da peça, e repete o ciclo (tratamento térmico, lubrificação, conformação) até que a forma final seja obtida.

2.9.1 Tratamento Térmico

O material submetido ao trabalho a frio apresenta-se encruado, com um nível de resistência mecânica elevado. O encruamento faz com que a capacidade de deformação plástica do metal seja reduzida. Desta forma, reduz-se também a possibilidade de grandes deformações ou obtenção de geometrias complexas. Portanto, em geral, o material precisa sofrer várias etapas de conformação não muito severas, com tratamentos térmicos intermediários, até adquirir sua forma final. Para eliminar o efeito do encruamento da etapa de conformação anterior na etapa posterior, o material é submetido a uma operação de tratamento térmico de recozimento do metal.

2.9.2 Lubrificação

O atrito tem grande influência no fluxo de metal, no preenchimento da matriz, na qualidade superficial e nas tolerâncias das peças. Devido as elevadas pressões de trabalho observadas no forjamento a frio, o uso de lubrificantes eficientes torna-se essencial para a redução dos esforços e consequentemente aumento da vida das ferramentas. [VDI 3165]

Os requisitos de um lubrificante eficaz são:

- ✓ pequeno coeficiente de atrito, pois, em muitos processos, o trabalho para vencer o atrito representa até 50% da energia total empregada,
- ✓ resistência a pressões normais elevadas, que estão presentes no processo de forjamento a frio, evitando o contato peça-matriz,
- ✓ boas propriedades de aderência superficial, garantindo um filme contínuo ao processo e
- ✓ prevenção de soldagem a frio.

No caso de forjamento a frio de aços, os lubrificantes mais adequados são os sabões a base de sódio, o bi-sulfeto de molibidênio (MoS_2) e a grafita. Os sabões são utilizados a temperaturas abaixo de 200°C . Já o MoS_2 pode ser empregado até 400°C , pois oxida-se a partir desta temperatura e é necessário o uso de líquidos como água ou óleo para aspensão do lubrificante.

Esses lubrificantes são sempre aplicados sobre um revestimento rugoso que funciona como um

depósito e tem por função garantir a eficiência da lubrificação na região de deformação, aderindo à peça conformada e conduzindo o lubrificante.

No processos severos como o forjamento a frio de aços, recomenda-se o emprego de revestimento de conversão, como o fosfato de zinco. Ao reagir com o ferro presente no aço, o fosfato passa a apresentar elevada adesão e sua estrutura superficial favorece o transporte e atuação do lubrificante, usualmente um sabão. Caso as pressões sejam extremamente elevadas, pode-se aplicar MoS_2 em pó sobre a camada de fosfato com sabão.[VDI 3164]

A fosfatização e a lubrificação são amplamente utilizadas na extrusão de aços ferríticos. O sucesso da aplicação do fosfato de zinco é influenciado pela composição química do metal, especialmente pelo percentual de cromo. Conseqüentemente, outros revestimentos, como oxalatos, são preferidos para aços inoxidáveis austeníticos. Sabões de estearato, que aderem tenazmente aos revestimentos de fosfato, são comumente utilizados como lubrificantes para forjamento e extrusão de aços a temperatura ambiente. Lubrificantes sólidos como o bi-sulfeto de molibdênio (MoS_2) e grafite são usados sob condições severas de forjamento, em que as superfícies em contato e as pressões de conformação são grandes. [ALTAN, T., et al., 1983].

Capítulo 3

Planejamento de Produção

3.1 Conceitos de Planejamento de Produção

Segundo [GIANESI, G. N., 1995], o módulo de planejamento da produção ocupa-se de auxiliar a decisão dos planejadores quanto aos níveis agregados de estoques e produção período a período, baseando-se também em previsões de demanda agregada (níveis de demanda do conjunto de produtos). É o nível mais agregado de planejamento de produção e por isso pela agregação e moderada quantidade de dados detalhados, presta-se ao planejamento de mais longo prazo, podendo chegar a alguns anos. Como se trata de dados agregados sobre a produção de produtos diferentes, a unidade usada no planejamento é muitas vezes monetária. As decisões referem-se a volumes vendidos, em unidades monetárias e níveis de estoques a serem mantidos também em unidades monetárias.

3.2 Tecnologia de Grupo

A tecnologia de Grupo é geralmente considerada uma técnica ou filosofia de fabricação que identifica e explora a semelhança ou similaridade de peças e de processos no projeto e fabricação. Na fabricação a base de lotes, tradicionalmente cada peça tem sido tratada como sendo única no projeto, no planejamento de processo, no controle da produção, ferramental, produção, etc.

O agrupamento de peças similares dentro de famílias de peças, pode ser baseado em suas características geométricas ou operações, como mostrado nas figuras 3.1 e 3.2, e também se possível, formando grupos de máquinas ou células, que processam as famílias de peças. Por esse agrupamento é possível reduzir custos através da racionalização do projeto e da recuperação de dados de projetos; menores estoques e compras, planejamento de processo e controle de produção simplificados e melhorados, redução de ferramental e de tempos de preparação de máquinas, menor inventário em processo, redução do tempo total de produção, redução de programação de controle numérico e utilização mais eficiente das máquinas de controle numérico e centros de usinagens. O objetivo principal é a utilização de métodos de alta produção e produção em massa para produção de média e baixa séries. [PEKLENIK, J., LOGAR, B., 1991]

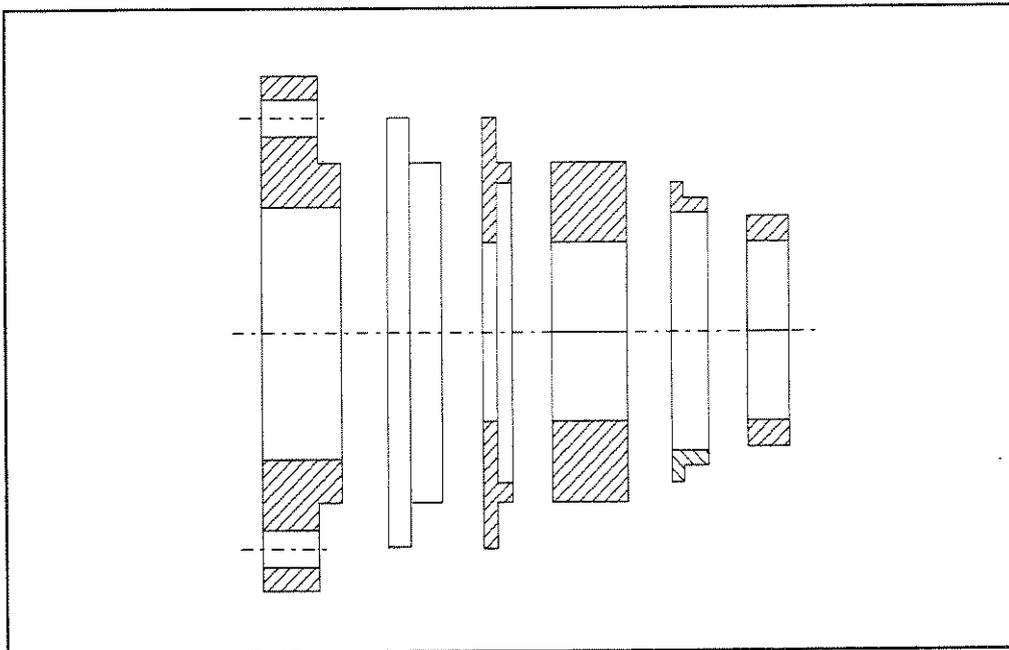


Figura 3.1 - Peças similares na forma e geometria

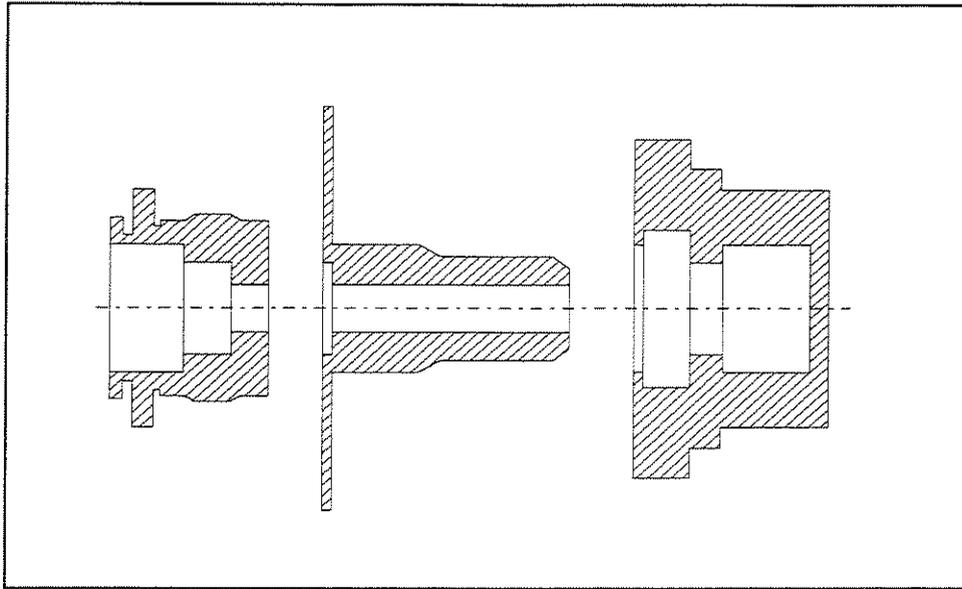


Figura 3.2 - Peças similares nas operações de usinagens

3.2.1 Áreas Principais de Aplicação

A racionalização de várias atividades de engenharia, tais como recuperação de dados de projeto, seleção de processo planejamento de processo, etc, pode ser prontamente alcançada pela implantação do conceito da Tecnologia de Grupo. Tem-se reconhecido o fato de que na fabricação a base de lotes maiores esforços devem ser feitos para um contínuo melhoramento no inventário em processo de carga efetiva de máquina com o objetivo de conseguir maior produtividade.

3.2.2 Formação de Família de Peças

Uma família de peças pode ser definida como um grupo de peças que apresentam similaridades. Elas podem ter um formato similar ou podem repartir requisitos de processos similares como mostrado nas figuras 3.1 e 3.2. As peças podem ser dissimilares na forma, porém podem ser agrupadas como uma família de peças, por causa de algumas operações comuns de produção ou vice-versa.

As peças são consideradas similares com relação às operações de produção, quando as mesmas máquinas e processos são usados e o tipo, requisitos de seqüência e ferramental são similares. No agrupamento das peças em famílias, o número de peças e sua freqüência de fabricação devem ser levados em consideração. Quanto maior as similaridades de requisitos de fabricação e a freqüência do lote, mais efetivo é a formação da família de peças para aplicações práticas do conceito da Tecnologia de Grupo, na formação de grupos de máquinas ou células e na programação para seqüenciamento e carregamento ótimos das máquinas.

O agrupamento de peças similares dentro de famílias de peças é a chave da implantação da Tecnologia de Grupo. O problema que imediatamente se apresenta é como as peças podem ser eficientemente agrupadas dentro de famílias.

Existem três métodos básicos para formar famílias:

- Método Visual
- Sistemas de Classificação e Codificação
- Análise de Fluxo da Produção

O primeiro método é obviamente muito simples, mas limitado em sua efetividade quando trabalhando com um número grande de peças. Em geral, os outros dois métodos são mais comumente usados na formação de família de peças e grupos ou células de máquinas.

3.2.3 Sistemas de Classificação e Codificação

Um sistema de classificação e codificação proporciona um meio efetivo para a seleção de peças codificadas, na formação de famílias de peças, baseado nos parâmetros específicos do sistema, independentemente da origem ou uso das peças. Especialmente para aplicações de CIM (Manufatura Integrada por Computador), tal sistema se torna requisito essencial para uma implantação efetiva dos conceitos da Tecnologia de Grupo. [AGOSTINHO, L. O., 1995]

A classificação implica no arranjo de itens dentro dos grupos de acordo com algum sistema ou princípio pelo qual características parecidas são trazidas juntas em virtude de suas similaridades, e então separadas por uma diferença específica. Um “código” pode ser um sistema de símbolos usados no processamento da informação no qual números ou letras possuem um certo significado.

Os tipos básicos de sistemas de classificação e codificação podem ser colocados dentro de várias categorias, tais como funcional ou descritivo, critérios qualitativos ou quantitativos, orientado para o projeto ou para a produção, estrutura tipo cadeia ou hierárquico, monócodigos versus policódigos, códigos compostos versus códigos separados, códigos longos ou códigos curto, etc. Entretanto na maioria dos casos, cada sistema emprega uma combinação dessas características tornando difícil comparar esses sistemas estritamente desses pontos de vista. Independente de qual sistema seja selecionado, ele deverá ser modificado e adaptado para satisfazer a necessidade específica da indústria.

Um dos fatores mais importante na seleção de um sistema de classificação e codificação é a manutenção de um balanceamento entre a quantidade de informação necessária e o número de dígitos requeridos para proporcionar esta informação, cada dígito adicional aumenta o problema de manipulação. Todavia, necessita-se de numero suficiente de dígitos para codificar todas as características necessárias da peça ou do produto. A classificação é realmente a ferramenta que permite a manipulação de uma vasta quantidade de dados, rapidamente. Assim, milhares de desenhos e folhas de processos podem ser rapidamente recuperadas e comparadas para efeito de projeto, ferramental, programação, etc, através do uso efetivo de códigos de classificação.

Os maiores benefícios de um sistema de classificação e codificação bem projetados para aplicação a Tecnologia de Grupo podem ser resumidos como segue:

- ✓ formação de família de peças e grupos de máquinas (células),
- ✓ recuperação efetiva de desenhos e processos,
- ✓ racionalização e redução de custos em projetos,
- ✓ padronização do projeto do produto,

- ✓ estatísticas de peças seguras e confiáveis,
- ✓ estimativa acurada dos requisitos das máquinas-ferramenta, carga de máquina racionalizada e gastos otimizados de capital,
- ✓ racionalização de ferramental e redução do tempo de preparação da máquina e do tempo total de produção,
- ✓ racionalização do projeto do ferramental e redução do tempo de custo do projeto e fabricação do ferramental,
- ✓ padronização do processo e ferramental,
- ✓ racionalização do planejamento e programação de produção,
- ✓ contabilidade de custos e estimativa de custos mais acurados,
- ✓ melhor utilização das máquinas-ferramenta, dispositivos e mão de obra,
- ✓ melhoria da programação do controle numérico, e uso efetivo de máquinas e centros de usinagem e
- ✓ estabelecimento de uma base de dados principal.

3.3 Padronização do Ferramental

A padronização dos roteiros, processos de fabricação e o respectivo ferramental torna-se a base necessária para a Implantação dos Processos de Fabricação, através de auxílio computacional, também conhecido como CAPP (Computer Aided in Process Planning).

Através da padronização anterior do produto, pode-se determinar o chamado componente composto, que representa a família de peças.

O componente composto proporciona um auxílio para as aplicações do conceito da Tecnologia de Grupo na padronização de peças, padronização de processos, agrupamento de máquinas, projeto dos dispositivos para o grupo, planejamento da preparação ou montagem do ferramental do grupo, programação de controle numérico para a família de peças, etc. A figura 3.3 ilustra um grupo de peças representadas por um componente composto que possui todas as características de forma e de processamento de uma famílias de peças. Se o planejamento do processo e o ferramental são desenvolvidos para o componente composto então qualquer peça da

família pode ser processada com as mesmas operações e ferramental.

De acordo com [AGOSTINHO, L. O., 1995], para se conseguir a utilização máxima da montagem de um ferramental, o ferramental para as operações dentro de uma família de peças, deve ser arranjado de modo que toda as peças, ou maior número da peças da família possa ser processada com um único item do ferramental para o grupo e uma única preparação. Os ferramentais de grupo são projetados para aceitarem cada membro da família de peças, com adaptadores que acomodam as pequenas variações das peças. [HYDE, W. F., 1981], chega a mesma conclusão estabelecendo que a fixação do ferramental e seu ajuste no caso de alterações da família de produtos, evite ao máximo sua remoção durante a produção.

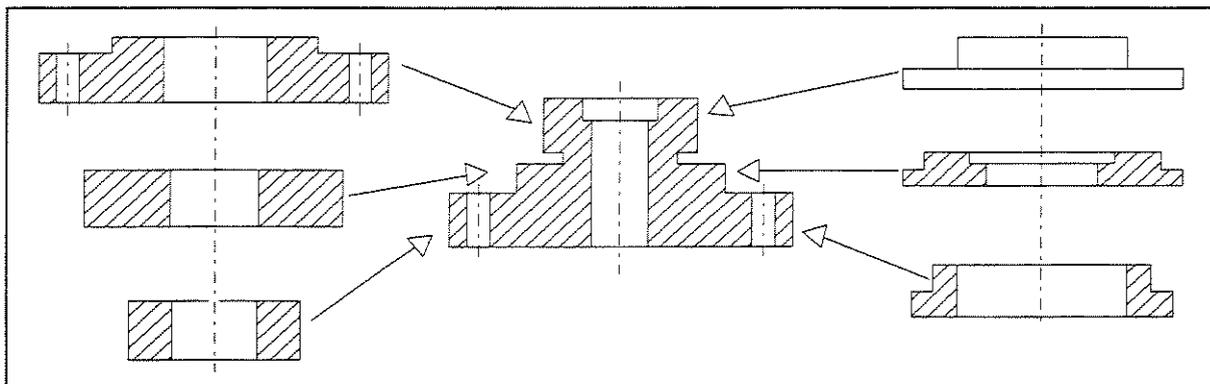


Figura 3.3 - Componente composto

3.4 Planejamento do Fluxo da Produção

A posição de uma operação em um processo que envolve volume produzido e variedade de produtos, pelo fato de influenciar a natureza de seus objetivos de desempenho e suas atividades de projeto, também determina a abordagem geral para gerenciar o processo de transformação. Estas "abordagens gerais" para gerenciar o processo de transformação são chamados tipos de processos nos setores de manufatura. [ALBERNATHY, W.J., 1976]

Na manufatura estes tipos de processos são em ordem de volume crescente e variedade decrescente:

- Processos de projeto - São os que lidam com produtos discretos, usualmente bastante "especiais". Com muita frequência o período de tempo para fazer o produto é relativamente longo, como é o intervalo entre a conclusão de cada produto. Logo baixo volume e alta variedade são característica do processo de projeto. Exemplos de processos de projeto incluem construção de navios e a maioria das atividades das companhias de construção.
- Processos de "jobbing" - São os que lidam com variedade muito alta e baixos volumes, cada produto deve compartilhar os recursos da operação com diversos outros. Os recursos de produção processam uma série de produtos, mas embora todos os produtos exijam o mesmo tipo de atenção, diferirão de acordo com suas necessidades. Exemplos de processos "jobbing" compreendem muitos técnicos especializados, como mestre ferramenteiro de ferramentas especializadas e restauradores de móveis.
- Processos contínuos - São processos que operam em volumes altos e tem variedade muito baixa. Exemplos de processos contínuos são as refinarias petroquímicas e instalações de eletricidade.
- Processos de produção em massa - No processo de forjamento a frio utilizamos o processo de produção em massa, o qual produz bens em altos volumes e variedade relativamente estreita, isto é, em termos dos aspectos fundamentais de projeto do produto. Uma fábrica de automóveis, por exemplo, poderia produzir diversos milhares de variantes de carro se todas as opções de tamanho, do motor, cor, equipamento extra etc, fossem levados em consideração. É entretanto, essencialmente uma operação em massa porque as diferentes variantes de seu produto não afetam o processo básico de produção.

As atividades na fábrica de automóveis, como todas as operações em massa, são essencialmente repetitivas e amplamente previsíveis. Como exemplos de processos de produção em massa tem-se a fábrica de automóveis e as grandes fabricantes de bens duráveis, como aparelhos de televisão.

Projetar o arranjo físico das operações define o seu fluxo. A decisão da localização também

é significativa dentro de cada local individual na rede global de operações. Neste nível, as decisões relativas à localização das máquinas, dos equipamentos, das instalações e das pessoas relativamente uns aos outros, usualmente é denominado arranjo físico da operação. A definição do arranjo físico é especialmente importante porque determina o modelo de fluxo através da operação. [SLACK, N., et al., 1997]

Depois que o processo foi selecionado o tipo básico de arranjo físico deve ser definido, que é a forma geral do arranjo de recursos produtivos da operação. Há muitas maneiras diferentes de se arranjar recursos produtivos de transformação. Além disso, a variedade de arranjos físicos parecerá ainda mais ampla do que na verdade é, porque alguns dos recursos individuais de transformação parecerão muito dissimilares.

Sob estas condições, é difícil detectar as similaridades que se escondem sob estes aparentemente diferentes arranjos físicos.

Apesar disso, a maioria dos arranjos físicos na prática deriva de apenas quatro tipos básicos de arranjo físico, são eles:

- ✓ arranjo físico posicional,
- ✓ arranjo físico por processo,
- ✓ arranjo físico celular e
- ✓ arranjo físico por produto.

No processo de produção em massa o arranjo físico por produto se destaca, envolvendo localização de recursos produtivos transformadores inteiramente segundo a melhor conveniência do recurso que está sendo transformado. Cada produto, elemento de informação ou cliente segue um roteiro predefinido no qual a sequência das atividades requerida coincide com a sequência na qual os processos foram arranjados fisicamente. Este é o motivo pelo qual às vezes este tipo de arranjo físico é chamado de arranjo físico em "fluxo" ou em "linha".

O fluxo de produtos, informações ou clientes é muito claro e previsível no arranjo físico por

produto, o que faz dele um arranjo relativamente fácil de controlar. De fato, em algumas operações de processamento de clientes, um arranjo físico por produto é adotado ao menos em parte para ajudar a controlar o fluxo de clientes ao longo da operação.

Predominantemente, entretanto, é a uniformidade dos requisitos dos produtos ou serviços oferecidos que leva a operação a escolher um arranjo físico por produto.

Novamente cita-se a montagem de automóveis como exemplo, onde quase todas as variantes do mesmo modelo requerem a mesma seqüência de processos.

Uma vez que o tipo básico de arranjo físico foi definido, o próximo passo é decidir o projeto detalhado do arranjo físico, que é o ato de operacionalizar os princípios gerais implícitos na escolha dos tipos básicos de arranjo físico.

As saídas do estágio de projeto detalhado de arranjo físico são:

- ✓ a localização física de todas as instalações, equipamentos, máquinas e pessoal que constituem os centros de trabalho da operação;
- ✓ espaço a ser alocado a cada centro de trabalho e
- ✓ as tarefas que serão executadas por centro de trabalho.

O projeto detalhado de qualquer tipo de arranjo físico preocupa-se em termos gerais, onde localizar recursos. Poderia parecer, então, que é necessário pouco trabalho de projeto detalhado de arranjo físico por produto pois ele envolve arranjar os recursos de forma a conformar-se às necessidades de processamento do produto ou serviço produzido. Entretanto, embora a consideração do produto realmente domine o projeto do arranjo físico por produto, são ainda necessárias numerosas decisões quanto a este tipo de projeto detalhado.

A natureza da decisão do projeto também muda um pouco. Em outros tipos de arranjo físico a decisão é do tipo "onde localizar o que". No arranjo físico por produto, a decisão é mais sobre "o que localizar onde", pois em geral a decisão sobre a localização está tomada e então, as

tarefas são alocadas a localização decidida. Por exemplo, pode-se ter sido decidido que quatro estações de trabalho serão necessárias para produzir uma peça forjada.

A decisão então é sobre quais tarefas necessárias à produção da peça serão alocadas a cada estação de trabalho. Esta decisão de projeto é chamada de "balanceamento de linha" e é apenas uma das decisões envolvidas no projeto detalhado de arranjo físico por produto. Estas decisões são as seguintes:

- Que tempo de ciclo é necessário;
- Quantos estágios são necessários;
- Como lidar com variações no tempo para cada tarefa;
- Como balancear o arranjo físico;
- Como arranjar os estágios.

3.4.1 Formação de Estoques em Operações

Ao observarmos qualquer operação produtiva, veremos diversos tipos de materiais armazenados. Alguns são relativamente triviais para a produção em questão: por exemplo, os materiais de limpeza que são armazenados em uma fábrica de auto peças são muito menos importantes do que os estoques de aços, plástico e componentes, que também são mantidos. O valor dos materiais de limpeza mantidos pela fábrica será consideravelmente menor do que o valor do aço, do plástico e dos componentes. De forma mais importante, a fábrica de auto peças não pararia se ficasse sem materiais de limpeza, enquanto que se ficasse sem peças e componentes, suas atividades seriam severamente perturbadas.

Em algumas operações, os diversos itens são armazenados diversas vezes. Por exemplo, na fábrica de autopeças, uma simples peça provavelmente passará por diferentes estágios antes de finalmente deixar a operação como parte do produto acabado. Entre os estágios, provavelmente terá sido armazenada como estoque. [SLACK, N., et al., 1997]

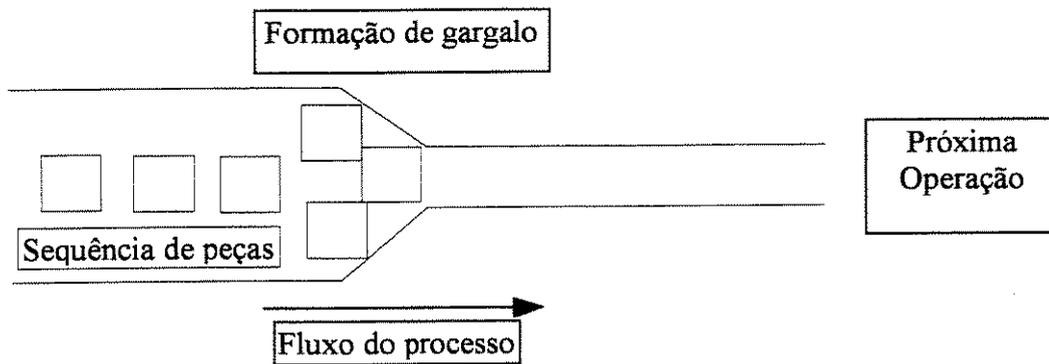


Figura 3.4 - Formação de gargalo entre operações

Esse estoque conhecido como “gargalo” tem grande importância no aumento de inventário do processo de fabricação, que representado como tempo de fila, e aliado ao tempo de "set-up", tempo de processo e o tempo de inspeção, formam o que é conhecido como "lead-time".

[BAUER, A., et al., 1994], define para “lead-time” de manufatura, o tempo total requerido para manufaturar um item, incluindo a ordem de tempo de recebimento e preparação do material, tempo de espera na fila, tempo de "set-up", tempo de fluxo do material no processo, tempo de movimento e tempo para chegar até o cliente. Em particular o longo tempo de espera na fila resulta em um aumento de inventário, aumentando por sua vez os custos.

Os gargalos definem o fluxo do sistema produtivo porque são o limitante de capacidade, entretanto, são também os principais condicionantes dos estoques, pois estes são dimensionados e localizados em pontos tais que consigam isolar os gargalos e flutuações estatísticas propagadas por recursos não gargalos que os alimentam.

Cria-se, por exemplo, um estoque antes da máquina gargalo de modo que qualquer atraso (seja ele causado pela flutuação estatística ou por eventos aleatórios) não repercuta em paradas do gargalo por falta de material. Isto é feito criando um estoque temporário antes do recurso gargalo. Em outras palavras, programa-se os materiais para chegarem ao recurso-gargalo com determinado tempo (de segurança) antes do instante em que o recurso gargalo está programado para começar a sua operação. Dessa forma, se qualquer atraso ocorre com os recursos que alimentam o recurso-gargalo, este pode ser absorvido por este tempo de segurança.

[PLSSL, GEORGE, W., 1985], recomendam as seguintes técnicas para reduzir cada elemento do “lead-time”:

- ✓ "lay-out" do processo de produção para facilitar o fluxo de produtos,
- ✓ planejamento de produto para estágio de manufatura,
- ✓ uso de recursos flexíveis,
- ✓ uso de balanceamento de linha,
- ✓ definição de operações padrões e
- ✓ redução de "set-up".

Não importa o que está sendo armazenado como estoque, ou onde ele está posicionado na operação, ele existirá porque existe uma diferença de ritmo ou de taxa de fornecimento e demanda. Se o fornecimento de qualquer item ocorresse exatamente quando fosse demandado, o item nunca seria estocado. Quando a taxa de fornecimento excede a taxa de demanda, o estoque aumenta, quando a taxa de demanda excede a taxa de fornecimento o estoque diminui. O ponto óbvio a ressaltar é que se uma operação pode fazer esforços para casar as taxas de fornecimento e de demanda, acontecerá uma redução em seus níveis de estoque. Este ponto importante é a base da abordagem “Just in Time” para estoque.

3.4.2 Programação Empurrada e Puxada

Em um sistema de planejamento e controle empurrado, as atividades são programadas por meio de um sistema central e completadas em linhas com instruções centrais, como em um sistema MRP (Planejamento dos Recursos de Manufatura). Cada centro de trabalho empurra o trabalho, sem levar em consideração se o centro de trabalho seguinte pode utilizá-lo. Os centros de trabalho são coordenados por meio de um sistema central de planejamento e controle de operações. Na prática, todavia, há muitas razões pelas quais as condições reais diferem das planejadas. Como consequência, tempo ocioso, estoque e filas frequentemente caracterizam sistemas empurrados. [SLACK, N., et al., 1997]

Em um sistema de planejamento e controle puxado, o passo e as especificações de o que é

feito são estabelecidos pela estação de trabalho do "consumidor", que "puxa" o trabalho da estação de trabalho antecedente (fornecedor). O consumidor atua como o único "gatilho" do movimento. Se uma "requisição" não é passada para trás pelo consumidor para o fornecedor, não é autorizado a produzir nada ou mover qualquer material. Uma requisição de um consumidor não só aciona a produção no estágio de fornecimento, ela também prepara o estágio fornecedor, para requisitar uma outra entrega de seus próprios fornecedores.

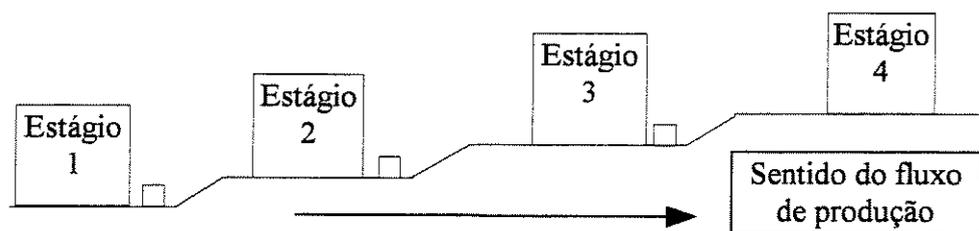
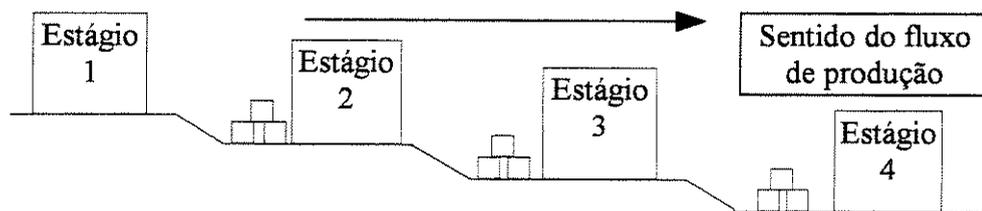
Dessa forma, a demanda é transmitida para trás ao longo das etapas, a partir do ponto da demanda original pelo consumidor original.

3.4.3 Conseqüências sobre o Estoque das Programações Empurrada e Puxada

Compreender os diferentes princípios das programações empurrada e puxada é importante, porque eles tem diferentes efeitos em termos das propensões das duas a acumular estoque na operação. Os sistemas puxados são muito menos prováveis de resultar em criação de estoque e são, portanto, favorecidos pelas operações "Just in Time".

Para entender porque isso é assim, consideramos duas analogias. A analogia da "gravidade" (figura 3.5). Aqui um sistema puxado é representado por uma operação, cada etapa da qual está em um nível mais baixo do que a anterior. Quando as peças são processadas em cada etapa, estas as empurram rampa abaixo para o próximo estágio. Qualquer atraso ou problema nesta etapa resultará nas peças acumulando-se na forma de estoque. No sistema puxado, as peças não podem naturalmente fluir para cima, de modo que somente podem progredir se o estágio seguinte deliberadamente as puxar. Sob essas circunstâncias, o estoque não acumula facilmente.

(a) Um sistema empurrado que os materiais são movidos para a etapa seguinte logo que são processados



(b) Um sistema puxado em que os materiais são movidos somente quando a próxima etapa os solicita

Figura 3.5 - Programação empurrada versus puxada: a analogia de gravidade [SLACK, N., et al., 1997]

Em seu aspecto mais básico, pode-se tomar o conceito literal do "Just in Time" ou JIT, que significa produzir bens e serviços exatamente no momento em que são necessários, não antes para que não se transformem em estoque, e não depois para que seus clientes não tenham que esperar. Além desse elemento temporal do JIT, podemos adicionar as necessidades de qualidade e eficiência.

Produzir mais do que é imediatamente necessário para o próximo processo na produção é a maior das fontes de desperdício, de acordo com a Toyota. O tempo de espera também constitui uma fonte de desperdício, eficiência de máquina e eficiência de mão de obra são duas medidas comuns e são largamente utilizadas para avaliar os tempos de espera de máquinas e mão de obra, respectivamente. Menos óbvio é o montante de tempo de espera que ocorre quando os operadores estão ocupados produzindo estoque em processo, que não é necessário naquele

momento.[CHENG, T.C., 1993]

Embora o transporte claramente não agregue valor ao produto, as empresas normalmente aceitam esta atividade em seu processo como um "dado". A movimentação de materiais dentro da fábrica, assim como a dupla ou tripla movimentação do estoque em processo entre vários pontos de estocagem, pode tornar-se parte da prática padrão.

Dentro da filosofia JIT, todo estoque se torna alvo para a eliminação. Segundo o JIT, pode-se distinguir uma companhia excelente de uma medíocre através do montante do estoque que ela carrega. Entretanto, somente podem-se reduzir os estoques através da eliminação de suas causas. A plena aceitação dos princípios e técnicas do JIT, vieram nos anos 80, depois que muitas empresas de manufatura tinham feito uso dos sistemas baseados no MRP.

O MRP I era essencialmente voltado para o planejamento e controle de produção e estoques, em empresas de manufatura. Entretanto, os conceitos têm sido estendidos a outras áreas da empresa.

Este conceito estendido foi dominado por Oliver Wight, um dos pais do MRP, MRP II. Oliver definiu o MRPII, como um plano global para o planejamento e monitoramento de todos os recursos de uma empresa de manufatura: manufatura, marketing, finanças, e engenharia.[WIGHT, O., 1994]

As filosofias do MRP e do JIT, parecem ser fundamentalmente opostas. O JIT incentiva um sistema de planejamento e controle "puxado", enquanto o MRP é um sistema "empurrado". O JIT tem objetivos que vão além da atividade de planejamento e controle da produção, enquanto o MRP é essencialmente um "mecanismo de cálculo" para planejamento e controle.

Contudo, as duas abordagens podem coexistir no mesmo sistema produtivo, desde que suas respectivas vantagens sejam preservadas.

3.4.4 Características Principais do MRP

- Embora projetado como um sistema puxado (o programa-mestre fornece o sinal para puxar todo o sistema), a maneira com a qual o MRP é na verdade utilizado, configura-o como um sistema empurrado. O estoque é empurrado através de cada processo, em respostas a planos detalhados no tempo, calculados para cada item.
- MRP utiliza ordens de produção derivadas do programa mestre como unidades de controle. Conseqüentemente, o sucesso do programa é um aspecto-chave do monitoramento e controle.
- Os sistemas MRP normalmente requerem uma organização complexa, centralizada e computadorizada, para suportar os sistemas "hardware" e "software" necessários. Isto pode fazer com que as necessidades do cliente pareçam distantes para os funcionários cujas responsabilidades estão dois ou três níveis abaixo na estrutura organizacional.
- O MRP é altamente dependente da precisão dos dados derivados das listas de materiais, registros de estoques, entre outros.
- Os sistemas de MRP assumem um ambiente de produção fixo, utilizando "lead-times" fixos para calcular quando os materiais devem chegar ao próximo centro de trabalho. Entretanto, as condições de carga de trabalho e outros fatores fazem com que os "lead-times" sejam na realidade bastante variáveis. Os sistemas MRP têm dificuldade de lidar com "lead-times" variáveis.
- É necessário um longo tempo para atualizar os registros MRP. Em teoria, cada transação requer uma atualização completa na atualização de dados. Na prática, é mais usual que as alterações sejam efetuadas semanalmente ou mensalmente.
- Mesmo os sistemas MRP sofisticados, que permitem atualizações apenas das mudanças líquidas, numa base diária, não são sensíveis a mudanças feitas na hora.

3.4.5 Características Principais do JIT

- O fluxo entre cada estágio do processo de manufatura é "puxado" pela demanda do estágio posterior.
- O controle do fluxo entre estágios é conseguido pela utilizações de cartões simples, fichas ou quadrados vazios, os quais disparam a movimentação e a produção dos materiais. O resultado é sistema de controle simples visual e transparente.
- As decisões de planejamento e controle são relativamente descentralizadas, não necessitando de um sistema de informação computadorizado.
- A programação JIT é baseada em taxas de produção (calculadas em termos da quantidade de itens por unidade de tempo), ao invés de volume produzido (o número absoluto de itens a serem feitos).
- O JIT assume (e incentiva) a flexibilidade dos recursos e "lead-times" reduzidos.
- Os conceitos de planejamento e controle JIT são apenas uma parte de uma filosofia de produção JIT mais ampla.

As vantagens e desvantagens do JIT e MRP que indicam quando utilizar versões "puras" de um dos dois ou sistemas combinados. Há dois pontos de vistas nesta questão: um deles se refere, como a principal determinante da decisão, a habilidade do sistema de lidar com ambientes complexos; o outro combina as características de volume e variedade de processo, assim como o nível de controle requerido, para indicar a melhor decisão.

Os produtos com estrutura simples, cujo roteiros são altamente repetitivos, são fortes candidatos para o controle puxado. O JIT pode facilmente dar conta de suas necessidades. A medida em que as estruturas de produtos e o roteiros se tornam mais complexos, o poder do computador se torna mais necessário para explodir as estruturas de produtos e determinar ordens

de compra para os fornecedores.

Usando a terminologia de itens de alto fluxo, repetitivos e eventuais, descritas anteriormente, pode-se usar a programação puxada do "kanban" para os itens "de alto fluxo" e "repetitivos". O sistema de controle MRP pode, então, ser usado para os itens eventuais para determinar o que deve ser feito em cada estágio, sendo o trabalho monitorado de forma a empurrar os materiais ao longo dos estágios de manufatura. A vantagem disso é que o aumento do fluxo e a redução dos estoques faz com que valha a pena aumentar o número de produtos de alto fluxo e repetitivos, através da simplificação do projeto.

[GIANESI, G. N., 1995] também apresenta um sistema de produção o OPT (Otimização da Tecnologia de Produção). A abordagem do OPT advoga que o objetivo básico das empresas é "ganhar dinheiro". Considera também que a manufatura deve contribuir com este objetivo básico através da atuação sobre três elementos: Fluxo de materiais passando através da fábrica, Estoques e Despesas operacionais.

Segundo o OPT, para a empresa ganhar mais dinheiro, é necessário que no nível da fábrica, se aumente o fluxo e ao mesmo tempo se reduzam os estoques e as despesas operacionais. Estes termos devem ser definidos para evitar confusão com seus significados semânticos mais usuais. Segundo a abordagem do OPT:

Fluxo: é a taxa segundo a qual o sistema gera dinheiro através da venda de seus produtos. Deve-se notar que o fluxo refere-se ao fluxo de produtos vendidos. Os produtos feitos, mas não vendidos ainda são classificados como estoques.

Estoque: quantidade pelo dinheiro que a empresa empregou nos bens que pretende vender. Refere-se ao valor apenas das matérias-primas envolvidas. Não se inclui o "valor adicionado" ou o "conteúdo de trabalho". O tradicional "valor adicionado" pelo trabalho se inclui nas despesas operacionais.

Despesas operacionais: o dinheiro que o sistema gasta para transformar estoque em fluxo.

Os defensores do OPT argumentam que, se uma empresa atingir simultaneamente os objetivos de aumentar o fluxo, reduzir os estoques e reduzir as despesas operacionais estará também melhorando seu desempenho nos objetivos de aumentar o lucro líquido, o retorno sobre investimento e o fluxo de caixa.

Capítulo 4

O Processo de Fabricação do Pinhão

4.1 Descrição do Produto

As informações contidas neste capítulo foram obtidas de planos de fabricação, montagem, tratamento térmico e lubrificação contidos em relatórios internos da empresa onde se realizou o trabalho de pesquisa.

Embora os processos de fabricação dos pinhões sejam semelhantes, por fazerem parte da mesma família de peças, neste trabalho serão descritas as etapas de fabricação de um pinhão (figura 4.1) considerado grande e que apresenta um lote mensal de produção definido como médio em relação aos outros pinhões fabricados.

Esse pinhão é definido no projeto para a montagem que formará o conjunto "Impulsor", o qual será montado no Motor de Partida da Linha DA.

Devido a uma grande solicitação de trabalho, é necessário que o Pinhão DA atenda certas propriedades mecânicas para resistir a inúmeros tipos de esforços (torção, compressão, flexão), tanto que desde sua matéria-prima até etapas importantes de seu processo de fabricação, as condições de processamento são seguidas atentamente, a fim de garantir as propriedades especificadas.

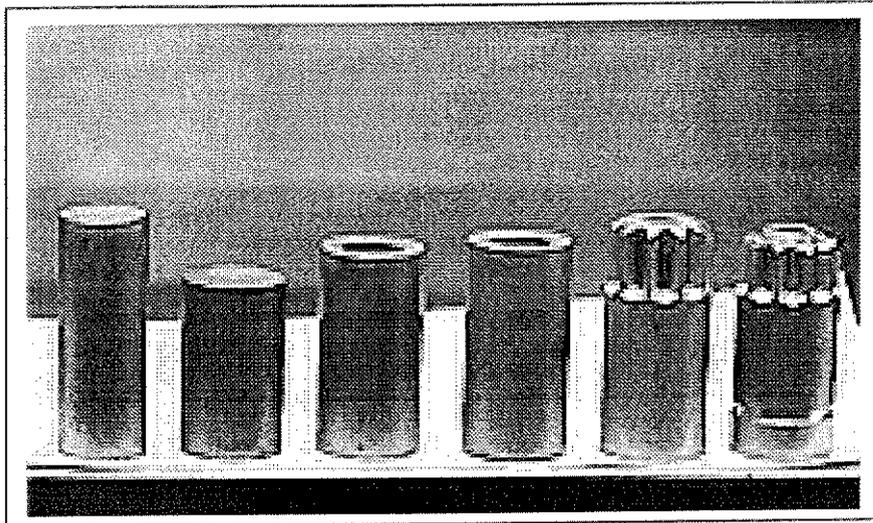


Figura 4.1 – Seqüência de fabricação do pinhão grande.

4.2 Processo após Forjamento a Frio

Após o processo de forjamento a frio o produto é considerado como pré-acabado, pois já apresenta forma e dimensões muito próximas do produto acabado, o que se denomina um processo "near-net-shape". Após esse pré-acabamento, ele passará por etapas de usinagem que definirão sua formas, dimensões e acabamento finais para dar seqüência à montagem.

As operações de usinagem são:

- Torneamento
 - ✓ lado dos dentes,
 - ✓ lado das pistas dos dentes,
 - ✓ diâmetro externo do pinhão,
 - ✓ diâmetros internos do furo 1 e do furo 2 e
 - ✓ canal do pinhão para fixação do anel elástico.

- Fresamento
 - ✓ entrada dos dentes,
 - ✓ chanfrar

- Tratamento Térmico
 - ✓ Cementação e perlitização,
 - ✓ Tempera e revenido.

- Retificação
 - ✓ diâmetro externo do pinhão,
 - ✓ diâmetros internos do furo 1 e do furo 2.

4.3 Etapas de Fabricação no Forjamento a Frio do Pinhão

As principais etapas de fabricação do pinhão são o corte, o tratamento térmico, a lubrificação e os estágios de forjamento. O fluxograma da figura 4.2 apresenta as etapas do processo, sendo algumas delas repetidas até obter-se a forma final do pré-acabado.

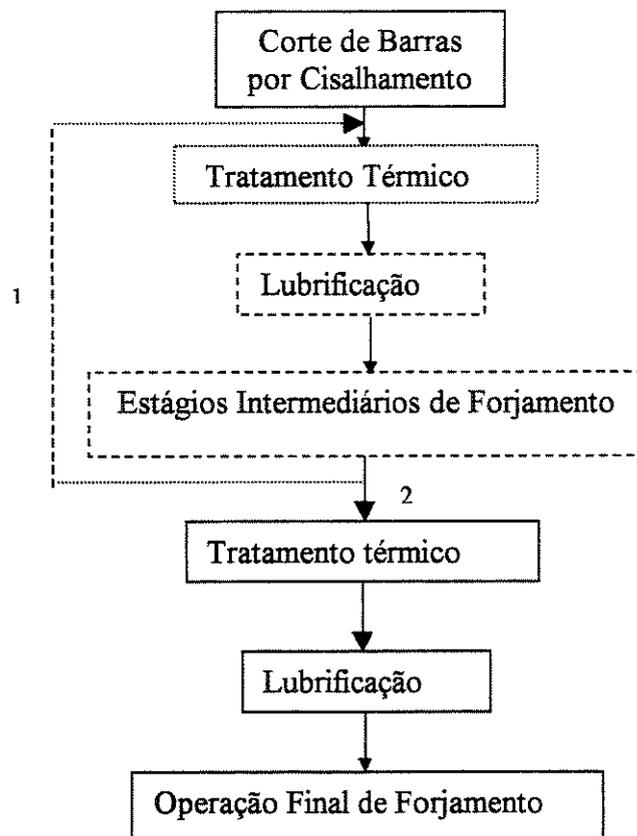


Figura 4.2 - Fluxograma do processo de forjamento a frio do pinhão

1. Etapas Intermediárias
2. Etapa Final

4.3.1 Etapas de Forjamento

As etapas de forjamento se dividem em estágios, conforme seqüência numérica mostrada na figura 4.3.

1. Operação - Cisalhar
2. Operação - Assentar
3. Operação - Extrudar Furo I
4. Operação - Extrudar Furo II
5. Operação - Estampar Furo
6. Operação - Extrudar Forma (Dentes)

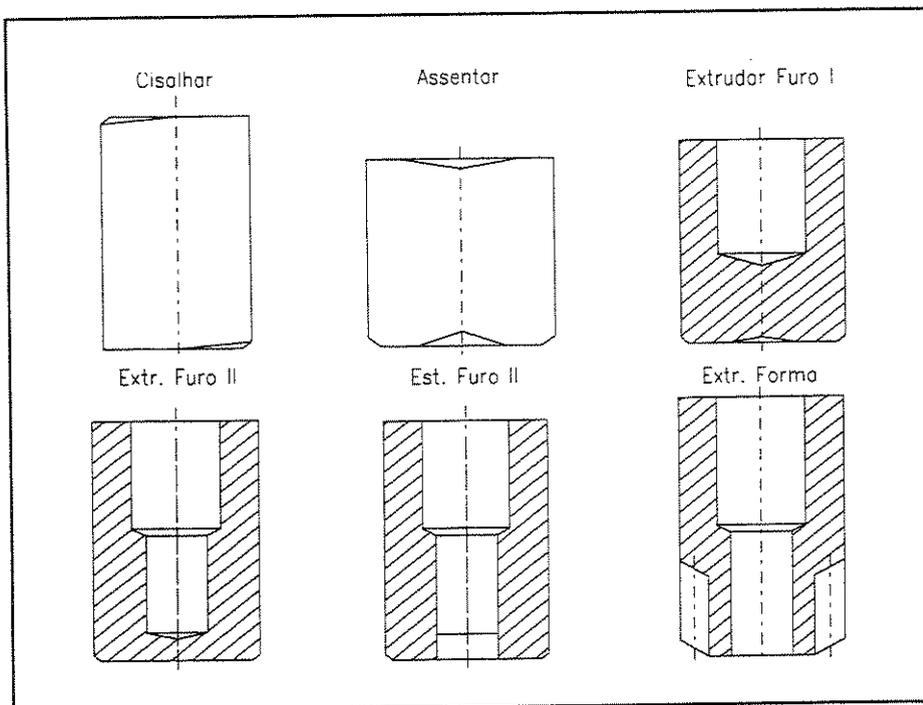


Figura 4.3 - Seqüência das operações de forjamento

4.3.2 Tratamento Térmico

Após cada estágio de conformação ocorre o encruamento do material, e para dar seqüência ao processo, existe a necessidade de se realizar etapas intermediárias de tratamento térmico como mostrado na tabela 4.1.

Operação - Conformação	Operação - Tratamento Térmico
1. Cisalhar	1. Reozimento para recristalização 30 Horas a 680°C, resfriamento em forno para 500°C e resfriamento ao ar
2. Assentar	2. Reozimento para recristalização 15 Horas a 680°C e resfriamento ao ar
3. Extrudar Furo I	3. Reozimento para recristalização 7 Horas a 680°C e resfriamento ao ar
4. Extrudar Furo II	Não tem tratamento térmico
5. Estampar Final	4. Reozimento para recristalização 7 Horas a 680°C e resfriamento ao ar
6. Extrudar Forma	5. Cementação e Tempera Cementação: 4 Horas a 920°C para atingir o teor de C= 1% Aquecimento para tempera: 60 minutos a 860°C

Tabela 4.1 - Seqüência da Operação de Tratamento Térmico

4.3.3 Lubrificação

Durante as etapas de conformação a frio ocorre elevado atrito nas interfaces matriz-peça e punção-peça. Para um bom desempenho para o próximo estágio é necessária a ação de um lubrificante atuando nessas interfaces e reduzindo o atrito.

Da operação de lubrificação fazem parte a lavagem, a decapagem, nova lavagem, a fosfatização e a aplicação do lubrificante MoS₂:

- Lavagem

A lavagem é feita com a mistura de água e sabão quente e enxaguada com água fria, cuja finalidade principal é retirar impregnação de óleo ou graxa ou neutralizar o efeito do ácido no material após a decapagem.

- Decapagem

A decapagem é feita com ácido sulfúrico e sua finalidade é retirar os óxidos e carepas causados pelos processos intermediários de tratamento térmico.

- Fosfatização

A fosfatização é responsável pela garantia da aderência do lubrificante ao material, formando vales que serão preenchidos pelo lubrificante.

- Lubrificação

O lubrificante utilizado nesse processo que apresenta grandes deformações plásticas é o bi-sulfeto de molibdênio (MoS_2), que possibilita a redução do atrito e escoamento do material durante o processo, criando um filme entre a interface matriz-ferramenta.

A tabela 4.2 mostra a seqüência da operação de lubrificação, onde "sim" é detalhado como a operação completa, ou seja lavagem, decapagem, fosfatização e lubrificação.

Operação - Conformação	Operação - Tratamento Térmico	Operação de Lubrificação
1. Cisalhar	1. Reozimento para recristalização 30 Horas a 680°C, resfriamento em forno para 500°C e resfriamento ao ar	Sim
2. Assentar	2. Reozimento para recristalização 15 Horas a 680°C e resfriamento ao ar	Sim
3. Extrudar Furo I	3. Reozimento para recristalização 7 Horas a 680°C e resfriamento ao ar	Sim
4. Extrudar Furo II		Não
5. Estampar Final	4. Reozimento para recristalização 7 Horas a 680°C e resfriamento ao ar	Sim
6. Extrudar Forma	5. Cementação e Tempera Cementação: 4 Horas a 920°C para atingir o teor de C= 1% Aquecimento para tempera: 60 minutos a 860°C	Sim

Tabela 4.2 - Seqüência das operações de lubrificação

4.4 Ferramentais Típicos dos Estágios de Conformação

As montagens dos ferramentais são feitas conforme os desenhos e os procedimentos apresentados a seguir.

4.4.1 Ferramental da Operação de Cisalhamento

O ferramental da operação de cisalhamento corta a barra em tarugos com dimensão pré-determinada (figura 4.4):

1. Bucha de Corte
2. Faca

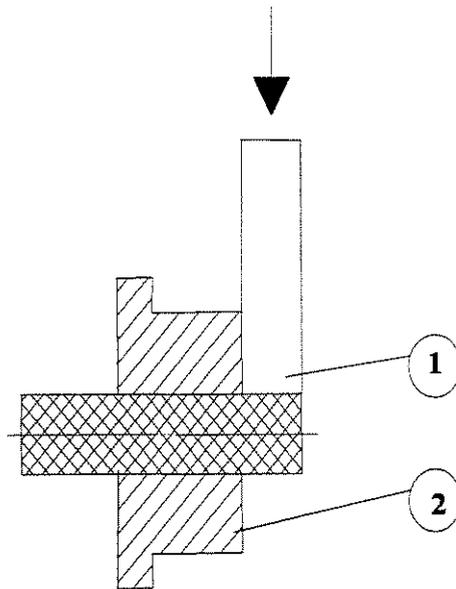


Figura 4.4 - Esquema do ferramental do estágio cisalhar

4.4.2 Operação de Assentar

O assentamento é uma operação de forjamento por recalque contido, usada para uma padronização das variações dimensionais do tarugo causadas pelo corte. No assentamento o material escoia até atingir o diâmetro interno da matriz (figura 4.5).

1. Pino Extrator
2. Matriz
3. Punção

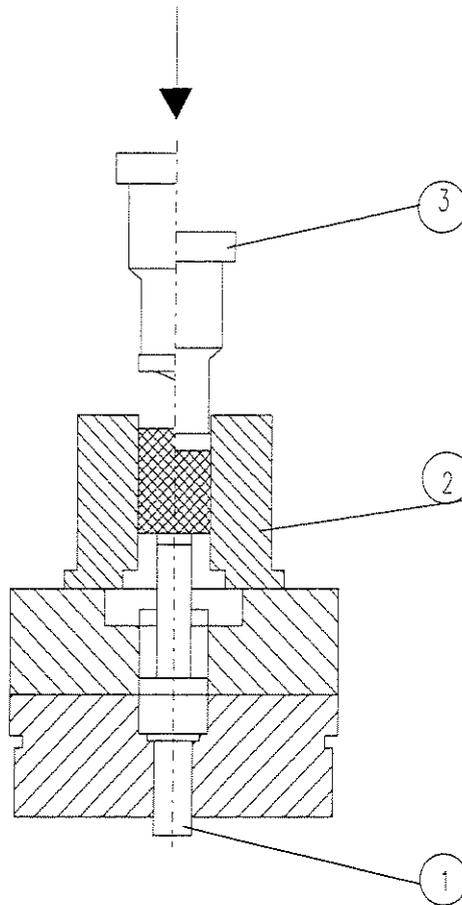


Figura 4.5 - Esquema do ferramental do estágio assentar

4.4.3 Operação de Extrudar Furo I

Essa operação conforma o primeiro furo do pinhão e é denominada extrusão inversa, pois o material escoar em sentido contrário ao do punção (figura 4.6).

1. Matriz
2. Bucha Guia
3. Punção
4. Extrator

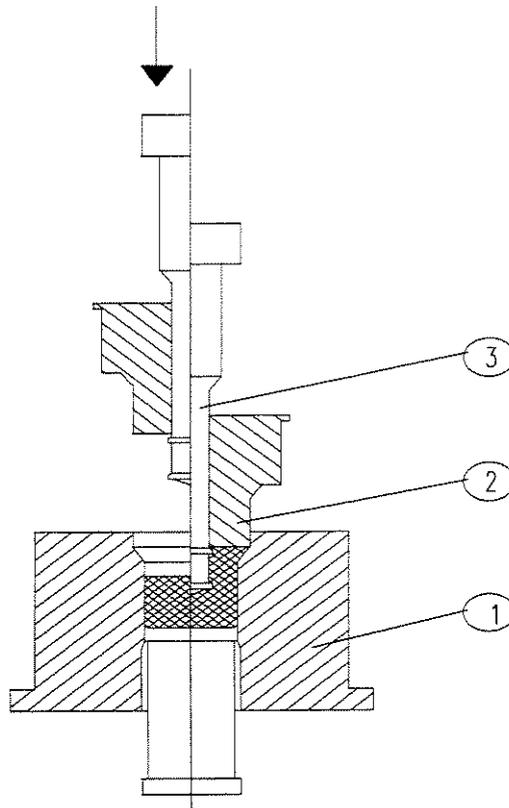


Figura 4.6 - Esquema do ferramental do estágio furo I

4.4.4 Operação de Extrudar Furo II

Essa operação também é uma operação de extrusão inversa, e faz o segundo furo do pinhão (figura 4.7).

1. Matriz
2. Bucha Guia
3. Punção

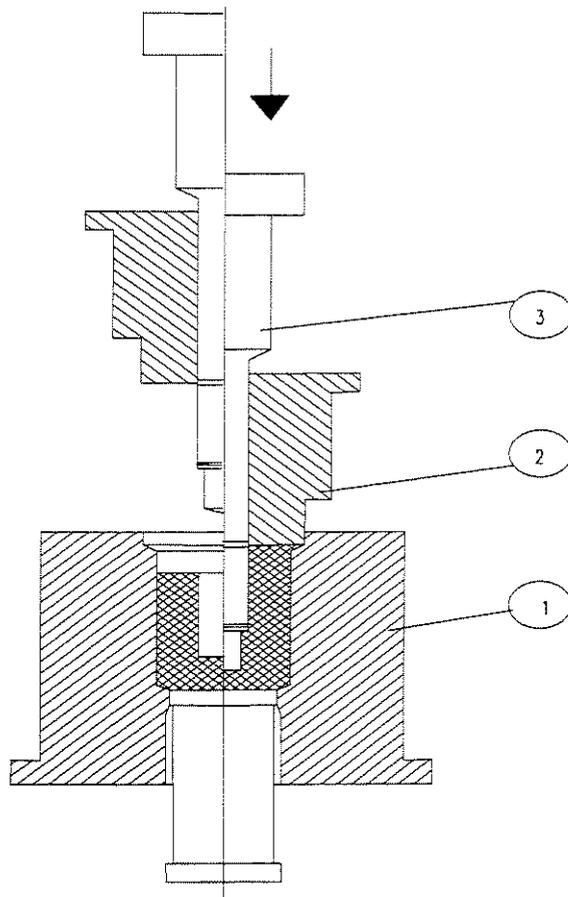


Figura 4.7 - Esquema do ferramental do estágio furo II.

4.4.5 Operação de Extrudar Forma Final

Uma das mais importantes operações devido à formação dos dentes do pinhão. Trata-se de uma extrusão para frente, o material escoar no mesmo sentido do punção (figura 4.8).

1. Matriz dentada
2. Matriz
3. Punção
4. Contra Punção

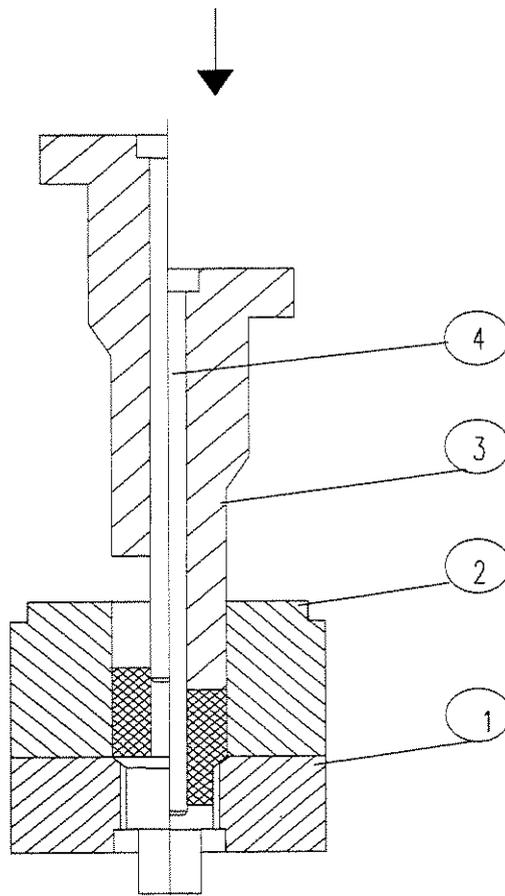


Figura 4.8 - Esquema do ferramental do estágio extrudar forma final

4.5 Falhas dos Ferramentais

As falhas dos ferramentais são frequentes e imprevisíveis, chegando em alguns casos a exigir a parada de máquina para reposição de item do ferramental, e até mesmo interromper e comprometer a produção. No entanto as falhas não ocorrem com todos os itens do ferramental e em todos os estágios do processo de fabricação do pinhão. A seguir apresentam-se os principais itens de ferramental que falham durante o processo.

4.5.1 Operação de Cisalhamento

Bucha de Corte (item 1 - figura 4.4)

A operação de corte trabalha por golpes e causa inúmeros impactos na bucha que tem a vida útil estimada em torno de 100.000 peças e passa por afiação a cada 15.000 cortes. Porém podem ocorrer falhas entre intervalos de 5.000 a 15.000 peças. Na maioria das vezes ocorrem trincas e até mesmo a ruptura da bucha.

Faca (item 2 - figura 4.4)

A faca é o elemento que transfere os golpes da prensa para a barra, cisalhando-a rente à bucha de corte. As facas normalmente não apresentam falhas durante o processo.

4.5.2 Operação de Assentar

Pino Extrator (item 1 - figura 4.5)

A sua função é extrair a peça de dentro da matriz após a operação. Durante o recalque o encontro do material com a matriz, ou seja na interface matriz-tarugo, as forças de compressão são elevadas, e conseqüentemente a força de atrito nessa interface também é elevada, causando um elevado esforço para extrair-se a peça.

O pino extrator tem uma vida útil curta devido à exigência de grandes solicitações, sofre flambagem durante o processo, e essa flambagem leva a uma possível ruptura estilhaçando-o, danificando o extrator da prensa e interrompendo o processo.

Matriz (item 2 - figura 4.5)

Ela dá forma ao material e absorve elevados esforços. Durante este estudo não foram observadas falhas. A sua vida útil está estimada em 100.000 peças e normalmente não se verificaram falhas.

Punção (item 3 - figura 4.5)

A sua função é empurrar e fazer escoar o material até preencher a matriz, normalmente não se observam falhas nem o comprometimento do processo.

4.5.3 Operação Extrudar Furo I

Matriz (item 1 - figura 4.6)

Ela limita o escoamento e dá forma à matéria-prima. Normalmente não se observam falhas, nem o comprometimento do processo.

Bucha Guia (item 2 - figura 4.6)

Sua função é guiar o punção durante toda a operação. Sua vida útil está em torno de 100.000 peças, mas podem ocorrer falhas como trincas e rupturas devido ao travamento entre punção e bucha guia.

Punção (item 3 - figura 4.6)

Ele faz o primeiro furo do pinhão e apresenta vida útil estimada de 25.000 peças. Devido a falhas que ocorrem por flambagem e travamento durante o deslizamento na bucha, há punções que não atingem a produção de 5000 peças.

4.5.4 Operação Extrudar Furo II

Matriz (item 1 - figura 4.7)

Ela também limita o escoamento e dá forma a matéria-prima. Normalmente não se observam falhas, nem o comprometimento do processo.

Bucha Guia (item 2 - figura 4.7)

Sua função é guiar o punção em toda operação. Sua vida útil está estimada em torno de 100.000 peças e normalmente não se observam falhas nem o comprometimento do processo.

Punção (item 3 - figura 4.7)

Trata-se de um punção escalonado: na primeira região do escalonamento fica a ponta de contato que vai fazer o segundo furo do pinhão, e a segunda região que vai apenas manter as dimensões do diâmetro do primeiro furo. A sua vida útil também está estimada em 25.000 peças, porém há punções que não atingem 5.000 peças devido a falhas por ruptura na ponta de contato com o material deformado.

4.5.5 Operação Extrudar Forma Final

Matriz dentada (item 1 - figura 4.8)

A matriz dentada dá forma aos dentes do pinhão. Normalmente não ocorrem falhas durante o processo com essa ferramenta.

Matriz (item 2 - figura 4.8)

Sua função é manter as dimensões do diâmetro externo do pinhão. Também, nessa ferramenta não se observam falhas devidas ao processo.

Punção (item 3 - figura 4.8)

Ele empurra e faz escoar o material na matriz dentada para formar os dentes, nele também não se observam falhas durante o processo.

Contra Punção (item 4 - figura 4.8)

O contra punção tem uma finalidade importante que é de manter as dimensões do diâmetro do segundo furo do pinhão. Também não se observam falhas durante o processo nessa ferramenta.

4.6 Planejamento da Produção

O planejamento da produção do pinhão, bem como de outros produtos forjados, na empresa estudada é baseado diretamente em vendas. O setor de produção, ou forjaria, só produz pinhões quando é acionado pelo setor de vendas, o que caracterizaria uma produção JIT o que não é verificado atualmente na empresa, que tem adotado um modelo de produção em massa.

Como o aumento de produção depende das vendas, que por sua vez dependem das indústrias montadoras de carros, quando o consumo de veículos atinge seu máximo a produção aumenta exigindo três turnos de trabalho; na pior situação de consumo, a produção diminui gerando mão-de-obra ociosa e paradas de máquinas. Essa situação reforça a necessidade de implantação do JIT.

Essa situação leva a dispensas de mão-de-obra chegando-se a eliminar turnos de trabalho, com máquinas paradas, setores com ociosidade de mão-de-obra e uma conseqüente queda na

qualidade de serviços internos da empresa, sendo a forjaria um setor com grande sensibilidade a essas mudanças econômicas.

4.6.1 Problemas no Fluxo de Produção

O fluxo de produção de forjamento dos pinhões passa por áreas de corte, tratamento térmico, lubrificação e extrusão que compõem o “lead time”, que é o tempo necessário para produção igual à soma do tempo de processo, do tempo de "set-up", do tempo de transporte e do tempo de espera na fila para diversas etapas de fabricação.

Em vários acompanhamentos do fluxo de produção observam-se entre algumas etapas de operações, estoques de peças esperando para entrar em processo, o que acarreta inventários, que originam novos custos.

Esses estoques ficam em setores conhecidos como "gargalos" (figura 4.9) devido à diminuição do fluxo de produção. O tratamento térmico é a operação crítica do fluxo por ocupar o maior tempo de produção (maior que sete horas) e desta forma, deve-se garantir que o material que atinge essa operação esteja com sua qualidade garantida.

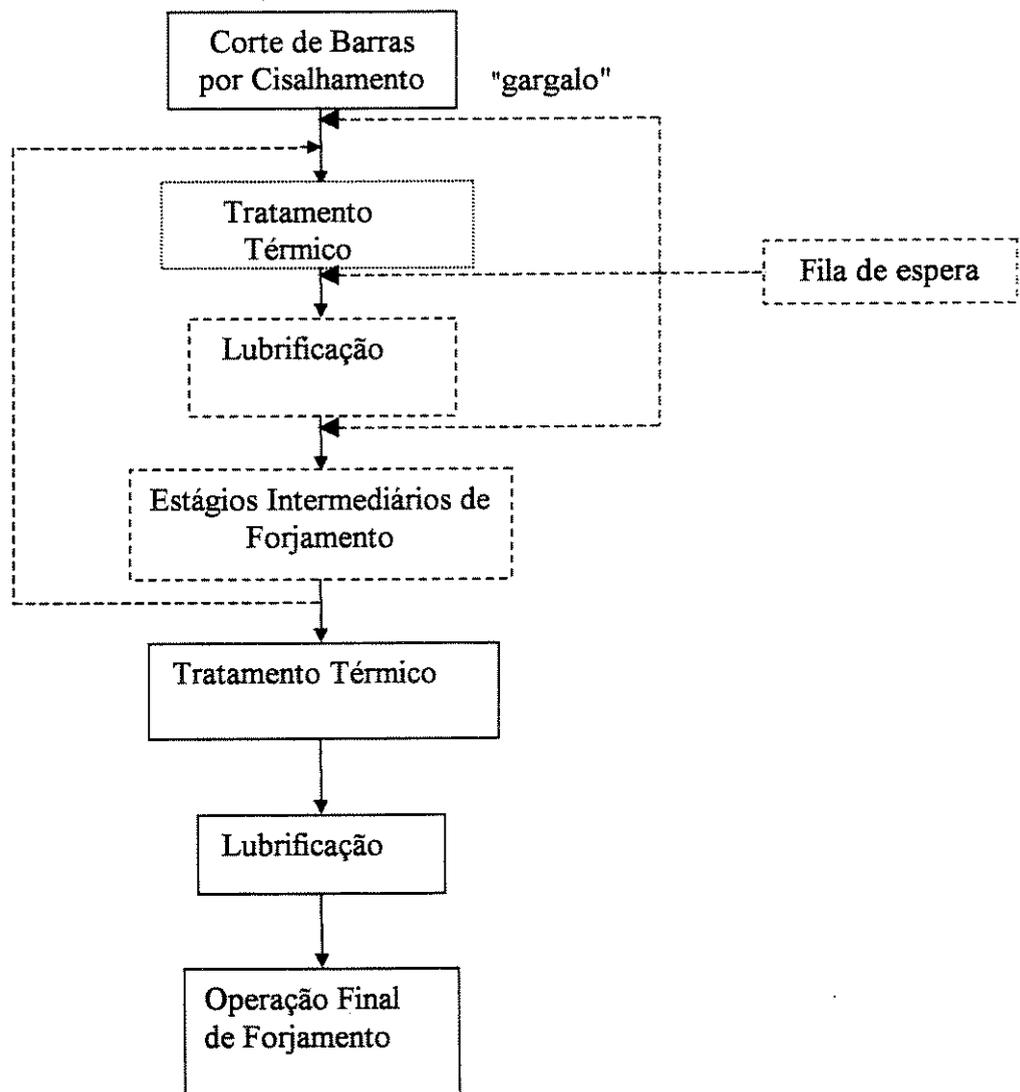


Figura 4.9 - Fluxo e “gargalos” no processo

Capítulo 5

Planejamento Experimental, Apresentação e Análises de Resultados

Como apresentado no item 1.1, o objetivo deste trabalho é otimizar o processo, reduzindo o tempo de tratamento térmico e a ocorrência de falhas de ferramentas que a princípio passaram a ser mais freqüente, supostamente pela troca de fornecedores de matéria-prima.

5.1 Análise da Matéria-prima

Como o histórico fabril direcionava os problemas ocorridos no processo como função da matéria-prima, o planejamento experimental foi feito inicialmente para avaliá-la. No entanto, esse histórico não era documentado e sim informal, o que tornava os dados na maioria das vezes duvidosos.

Com o objetivo de reduzir os custos finais do produto, a finalidade principal desta pesquisa foi a diminuição do tempo de tratamento térmico, que exigiu a utilização de diferentes procedimentos de ensaios para avaliar a matéria-prima e sua influência no processo.

Esses ensaios tiveram por objetivo caracterizar a matéria-prima no seu fornecimento e durante todo o fluxo do processo. Os procedimentos abrangiam as seguintes etapas:

- Entrada da matéria-prima na fábrica: Análise de composição química, dureza e microestrutura.
- Matéria-prima durante todo o fluxo do processo: Análise de dureza e microestrutura.

As análises foram executadas por corrida de matéria-prima, colhendo-se sempre três amostras de forma aleatória das barras fornecidas, também entre cada estágio crítico, ou seja, que causavam falhas em ferramentas, bem como após as etapas de tratamento térmico, a fim de verificar as propriedades mecânicas das peças para o próximo estágio de forjamento.

O pinhão escolhido para os ensaios foi o apresentado na figura 4.1, por ter um longo período de tratamento térmico e por apresentar um elevado número de falhas durante o processo.

A matéria-prima utilizada é o aço ligado DIN 16MnCrS5, e seu estado normal de fornecimento é o estado laminado a quente, recozido para cementita globular (70 A 80%), descascado e trefilado a frio com dureza especificada de 160 - 190 HB, de acordo com a norma interna da empresa.

A tabela 5.1 apresenta a composição química da matéria-prima especificada pela empresa.

Elementos	% peso
C	0,14 - 0,21
Si	0,15 - 0,35
Mn	0,96 - 1,35
Cr	0,75 - 1,15
P	máx. 0,040
S	0,015 - 0,040

Tabela 5.1 - Composição química do aço DIN 16MnCrS5 (% em peso)

5.1.1 Entrada de Matéria-prima na Fábrica

Composição Química

A composição química do material do segundo fornecedor estava de acordo com o certificado de matéria-prima e com a norma interna adotada, porém existiam algumas diferenças

quando comparada com antigas análises de composição química da matéria-prima do primeiro fornecedor, como destacado na tabela 5.2.

Segundo [SOUZA, A. S., 1977] os ensaios mecânicos podem servir para a comparação de materiais distintos e juntamente com a análise química do material avaliar a grosso modo a história prévia de um material desconhecido.

Elementos	Segundo fornecedor % peso	Primeiro fornecedor % peso
C	0,170	0,167
Si	0,250	0,340
Mn	1,290	1,210
Cr	1,000	1,030
Ni	0,160	0,015
Mo	0,030	0,001
P	0,032	0,019
S	0,034	0,028
Ca	0,130	0,002
Al	0,031	0,037
Co	0,005	0,004
V	0,000	0,010
Nb	0,001	0,007
Ti	0,003	0,004

Tabela 5.2 - Comparação entre composição química dos materiais fornecidos (% em peso).

Dureza

A dureza do material do fornecedor atual variou entre 158 e 195HB, portanto algumas vezes fora das especificações da norma interna da empresa.

Microestrutura

A microestrutura especificada pela norma interna é o coalescimento com 70% a 80% de cementita globular distribuída na matriz ferrítica. Porém existem divergências na prática industrial quanto ao grau de distribuição de cementita globular e sua influência no processo.

Assim procurou-se conhecer o procedimento empregado em outras empresas com profissionais da área, com a finalidade de estabelecer um critério para análise de porcentagem de distribuição de cementita globular, bem como para comparar com a microestrutura do material anteriormente fornecido.

A figura 5.1 mostra as microestruturas dos materiais dos dois fornecedores, na qual observa-se:

- ✓ 5.1a - fornecedor 1, apresenta a microestrutura em condições adequadas de coalescimento, com cementita globular uniformemente distribuída em toda matriz ferrítica.
- ✓ 5.1b - fornecedor 2, apresenta a microestrutura com condições irregulares de coalescimento em certas regiões, com perlita em dissociação e agrupamento de cementita em grãos primários.
- ✓ 5.1c - fornecedor 2, trata - se da mesma corrida da figura 5.1b, porém com barras diferentes, obtendo-se resultados semelhantes em termos da microestrutura.

Em outros ensaios realizados com a matéria-prima do segundo fornecedor, sempre observou-se a semelhança com as análises aqui apresentadas, que comprova a variação de dureza observada em determinadas regiões da mesma barra.

Para atender adequadamente o processo de extrusão a frio da empresa, é necessário que o coalescimento, ou porcentagem de coalescimento, ou grau de distribuição de cementita globular na matriz ferrítica esteja próxima à apresentada na figura 5.1a, pois condições semelhantes às figuras 5.1b e 5.1c não garantem boas condições ao processo devido à heterogeneidade microestrutural.

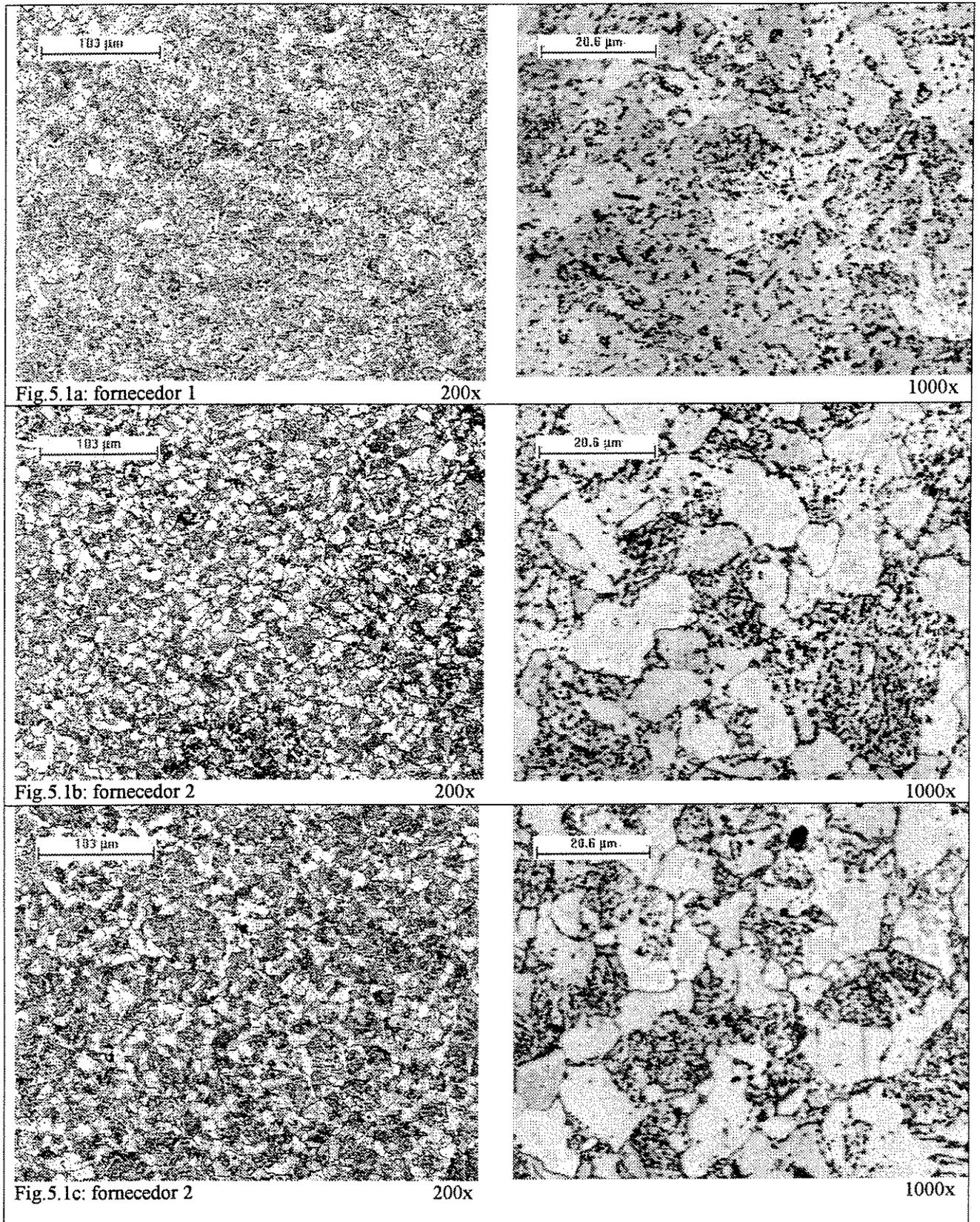


Figura 5.1 - Microestruturas das matérias-primas dos dois fornecedores

Devido às dificuldades do atual fornecedor para o fornecimento da matéria-prima coalescida conforme determinação da empresa, foi sugerido pelo mesmo experiências com a matéria-prima beneficiada.

Logo foi solicitado o fornecimento do material beneficiado, ou seja descascado sem trefilação posterior, seguido de tratamento térmico de tempera, com a finalidade de se obter uma estrutura mais homogênea após tratamento térmico de coalescimento na empresa.

5.1.2 Análise da Primeira Experiência com o Material Beneficiado.

Preliminarmente esse material beneficiado foi cisalhado e tratado termicamente por 20 horas a 680°C, resfriado em forno para 500°C e resfriado até a temperatura ambiente. Após o cisalhamento dos tarugos e marcado o centro para pinhão pequeno, o material analisado teve sua dureza medida (tabelas 5.3 e 5.4) e microestrutura analisada figura 5.2 (a).

Dureza (HB)	Amostras	Média	Desvio Padrão
Superfície da peça	143-141-145	143	2
Núcleo da peça	170-170-173	171	1,7

Tabela 5.3 - Dureza do tarugo cisalhado - tratado 20 horas a 680°C resfriamento em forno para 500°C e resfriado até a temperatura ambiente

Dureza (HB)	Amostras	Média	Desvio Padrão
Superfície da peça	127-130-124	127	3
Núcleo da peça	137-137-139	137,6	1,2

Tabela 5.4 - Dureza do tarugo marcado centro - tratado 10 horas a 680°C e resfriado até a temperatura ambiente

A microestrutura da figura 5.2 (a) está coalescida e distribuída na matriz ferrítica, o que proporcionou mais homogeneidade em termos de dureza, e possivelmente melhores condições de extrusão para todos os estágios do processo. Devido a falta de dados pelo fato do material não ter sido acompanhado (“rastreado”) durante a produção dos pinhões, optou-se por um segunda experiência com o material beneficiado.

5.1.3 Análise da Segunda Experiência com o Material Beneficiado

Devido aos bons resultados obtidos na primeira experiência, partiu-se para a segunda experiência com o material beneficiado, optando-se pelo pinhão grande (figura 4.1), elaborando-se um novo plano de tratamento térmico (Quadro 5.1) e acompanhando-se (avaliando-se) todos os estágios de extrusão.

1° Estágio: Cisalhar = 15 horas a 680°C - resfriamento até temperatura ambiente
2° Estágio: Marcar Centro = 15 horas a 680°C - resfriamento até temperatura ambiente
3° Estágio: 1° furo = 10 horas a 680°C - resfriamento até temperatura ambiente
4° Estágio: 2° furo = eliminar tratamento térmico

Quadro 5.1 - Estágios de tratamento térmico

O material tratado termicamente após o corte do tarugo foi analisado em sua dureza (tabela 5.5).

Dureza (HB)	Amostras	Média	Desvio Padrão
Superfície da peça	186-179-190	185	5,6
Núcleo da peça	190-186-179	185	5,6

Tabela 5.5 - Valores de dureza do material beneficiado da segunda experiência

A microestrutura obtida figura 5.2 (b) não se apresentou coalescida, o que causou a heterogeneidade de dureza observada (tabela 5.5), e possivelmente condições inadequadas de extrusão para os diversos estágios do processo.

5.1.4 Influência da matéria-prima beneficiada no processo de extrusão

Apesar de observar-se uma microestrutura a princípio inadequada para o processo de extrusão, o material dessa segunda experiência foi processado segundo a seqüência do quadro 5.1, conforme as decisões da engenharia e tratamento térmico.

Devido à heterogeneidade da microestrutura e da dureza surgiram problemas quanto à vida das ferramentas:

- após o primeiro estágio, operação de marcar centro:
 - quebra de pino extrator
 - quebra de duas matrizes e
 - falhas de preenchimento

- após o segundo estágio, operação de extrudar o primeiro furo:
 - problemas de tolerância com excentricidade ao longo do comprimento do furo e
 - comprometimento da vida útil do punção devido a flambagem.

Tendo em vista os problemas observados com as ferramentas, propôs-se um novo plano de tratamento térmico descartando-se o adotado nessa segunda experiência.

5.1.5 Análise da Terceira Experiência com o Material Beneficiado

A terceira experiência constava no recebimento da matéria-prima nas mesmas condições de beneficiamento da segunda experiência. Novamente, foram realizados ensaios de microestrutura e dureza da matéria-prima no seu estado de fornecimento, que se mostraram semelhantes ao material da segunda experiência que causou problemas no processo figura 5.2) 3. experiência.

Portanto, com o objetivo de preservar o ferramental e evitar retrabalhos de tratamento térmico, a terceira experiência não teve êxito.

Dureza (HB)	Amostras	Média	Desvio Padrão
Núcleo da peça	198-200-194	197	3,1

Tabela 5.6 - Valores de dureza do material da terceira experiência.

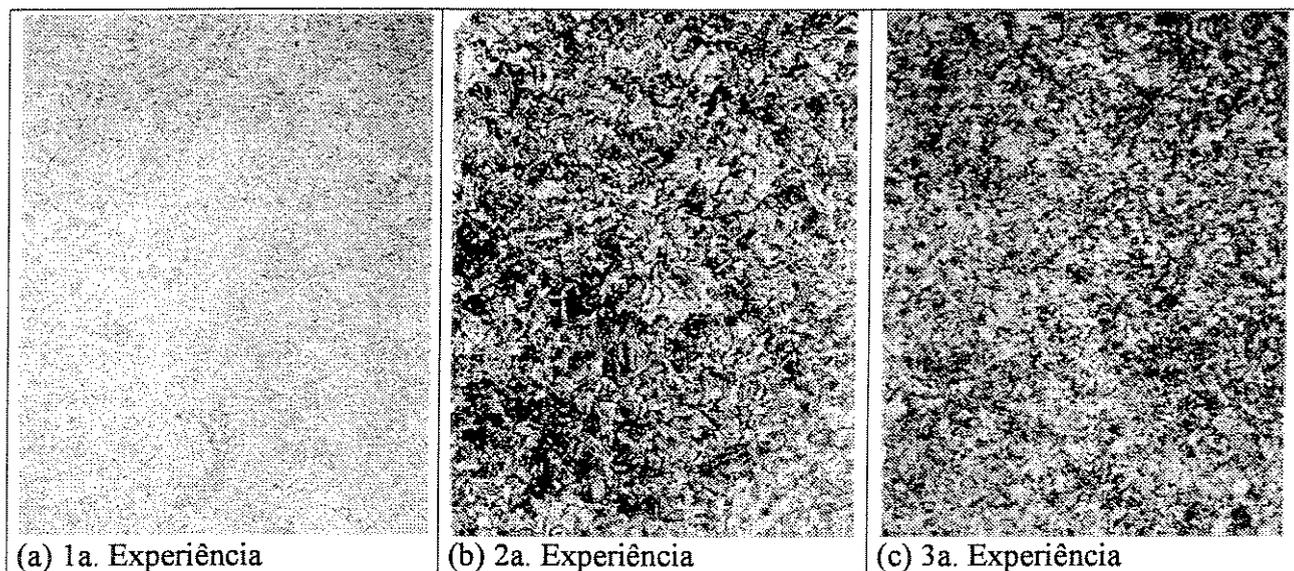


Figura 5.2 – Microestruturas dos materiais beneficiados (Aumento: 400X)

A microestrutura da figura 5.2 (c), apresenta-se com estrutura martensítica, ou seja, no estado original de tempera semelhante ao fornecimento do material da segunda experiência, que acabou por inviabilizar o emprego do material beneficiado.

Devido à dificuldade de garantir-se a uniformidade do material beneficiado já no seu fornecimento, o que foi constatado pelas análises apresentadas, buscou-se simultaneamente a otimização do tempo de tratamento térmico do material como anteriormente fornecido (coalescido), ou seja sem beneficiamento como mostrado a seguir.

5.1.6 Experiência com Redução do Tempo de Tratamento Térmico

Como a maior porcentagem do tempo de tratamento térmico estava no primeiro estágio após operação de cisalhar tarugo (tabela 4.1), foi iniciada a experiência de redução a partir dessa primeira etapa de tratamento térmico na empresa. A experiência foi dividida em 5 tratamentos (quadro 5.2), recolhendo-se 30 amostras para cada tratamento de forma aleatória na mesma corrida de matéria-prima. Após a realização do tratamento também eram recolhidas 3 amostras de forma aleatória e realizadas análises de dureza e microestrutura, entre as três era extraída a amostra com maior divergência para o registro de dados, sendo 2 descartadas e as 27 restantes acompanhadas e avaliadas até o final do processo de conformação (figura 4.3).

Condição	Tratamento Térmico do Tarugo
A	tratado 30 horas a 680° C, resfriamento em forno até 500° C e resfriamento a temperatura ambiente
B	tratado 25 horas a 680° C, resfriamento em forno até 500° C e resfriamento a temperatura ambiente
C	tratado 20 horas a 680° C, resfriamento em forno até 500° C e resfriamento a temperatura ambiente
D	tratado 20 horas a 680° C e resfriamento a temperatura ambiente
E	tratado esteira dupla a 650° C em 3m/h

Quadro 5.2 - Condições de Tratamento térmico

Condição	Dureza superficial (HB)	Média	Desvio Padrão	Dureza de Núcleo (HB)	Média	Desvio Padrão
Como recebido	176-179-190-182	181,8	6,0	176-179-190-182	182	6
cisalhado	190-190-186-190	189	2	192-190-196-194	193	2,6
A	122-124-128-124	124,5	2,5	149-147-149-147	148	1,2
B	121-122-121-116	120	2,7	149-141-151-153	148,5	5,3
C	135-139-131-141	136,5	4,4	151-153-151-153	152	1,2
D	135-141-141-141	139,5	3	155-161-158-164	159,5	3,9
E	153-153-158-153	154,3	2,5	145-149-153-151	149,5	3,4

Tabela 5.7 - Valores de dureza do material como recebido, apenas cisalhado e conforme condições de tratamento térmico (Quadro 5.2)

A seguir na figura 5.3 são mostradas as microestruturas da matéria-prima nas condições de recebimento, e nas condições de tratamento térmico conforme quadro 5.2.

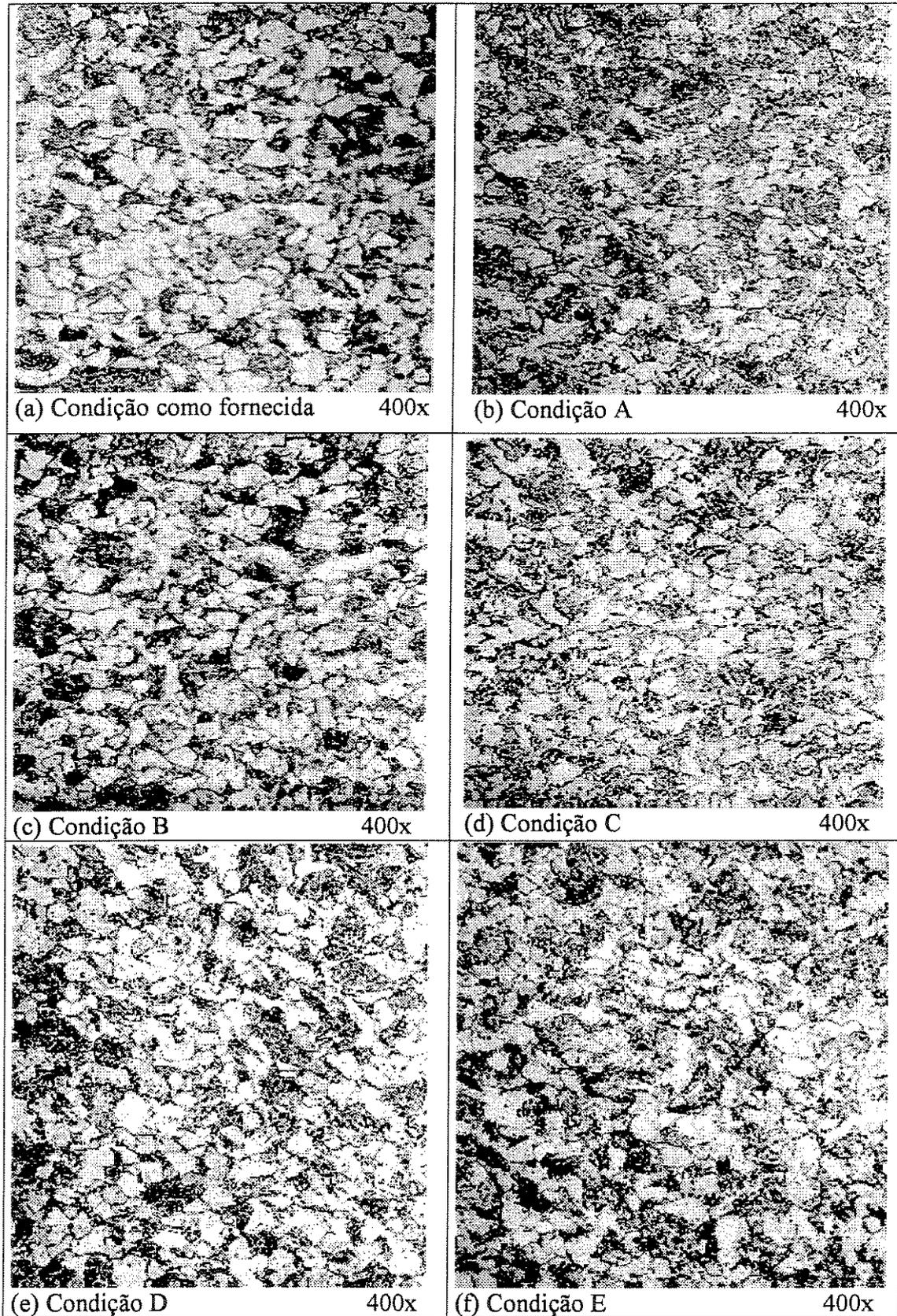


Figura 5.3 – Microestruturas para análise de redução do tempo de tratamento térmico

A análise dos resultados obtidos com as diferentes condições de tratamento mostra que:

- ✓ a dureza tende a aumentar com a redução do tempo de permanência no forno, porém até valores que ainda são adequadas à conformação a frio [REGNER, P., SCHAEFFER, L., 1983]
- ✓ as microestruturas não apresentam diferenças significativas entre si ou com a matéria-prima fornecida normalmente.

Conclui-se que o tempo de permanência elevado na temperatura de 680°C não promove coalescimento do material, ou seja, a microestrutura original é mantida e somente ocorre um alívio de tensões, reduzindo-se a dureza.

5.2 Análise de Falhas nos Estágios do Processo

Observou-se que nas diversas etapas de fabricação do pinhão ocorriam falhas nas ferramentas de modo aleatório, aparentemente sem relacionar-se com a condição microestrutural do material trabalhado. De acordo com informações dos operadores, tarugos de um mesmo lote apresentavam comportamentos diferentes durante o processo, sendo que em alguns casos havia a necessidade de um novo tratamento térmico e lubrificação (retrabalho) para continuidade do processo. Assim, decidiu-se analisar o comportamento dos fornos de tratamento em termos de temperatura e tempo de aquecimento para verificar a uniformidade das peças trabalhadas.

5.2.1 Avaliação do Desempenho dos Fornos

O forno típico de tratamento térmico é um forno elétrico de aquecimento resistivo que aquece duas panelas, que contêm em média cada uma 7500 peças (ou tarugos) do pinhão grande extrudado. Para o tratamento o forno é ligado, a temperatura (680°C) e o tempo de tratamento são definidos, quanto as peças que foram tratadas, essas foram escolhidas com dimensões e massas iguais.

O procedimento empregado para avaliar-se o desempenho dos fornos foi de monitorar-se três pontos na altura do forno e no centro das panelas, empregando termopares do tipo K (figura 5.4) e medindo-se os tempos necessários para homogeneização da temperatura e de permanência na temperatura de tratamento (figuras. 5.5 e 5.6).

Na figura 5.5 observa-se que existe uma variação importante nos tempos de homogeneização e de permanência entre os fornos analisados quando define-se um tempo total de 35 horas, concluindo-se que o tempo de tratamento à temperatura de 680°C variará com o forno empregado e causará o fornecimento de peças tratadas com diferentes condições microestruturais.

Também a temperatura máxima observada (figura 5.6) apresenta diferenças importantes entre os diversos fornos e também entre as panelas de cada forno, sendo que as panelas superiores apresentam sempre menores temperaturas máximas.

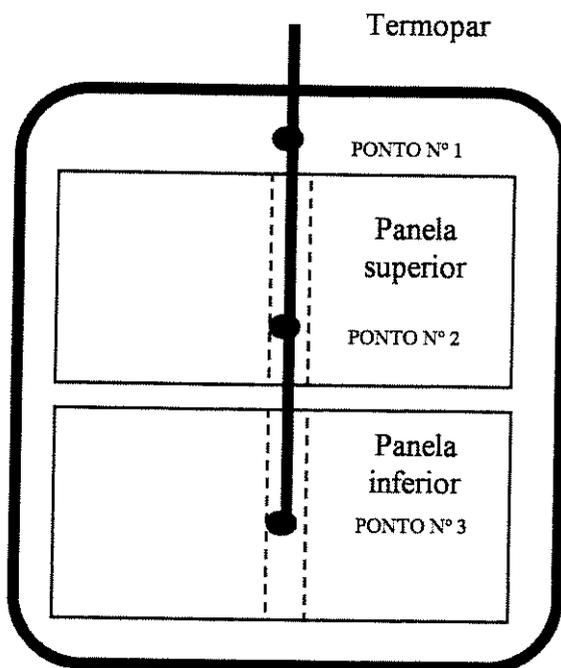


Figura 5.4 - Esquema de montagem de termopares nos fornos

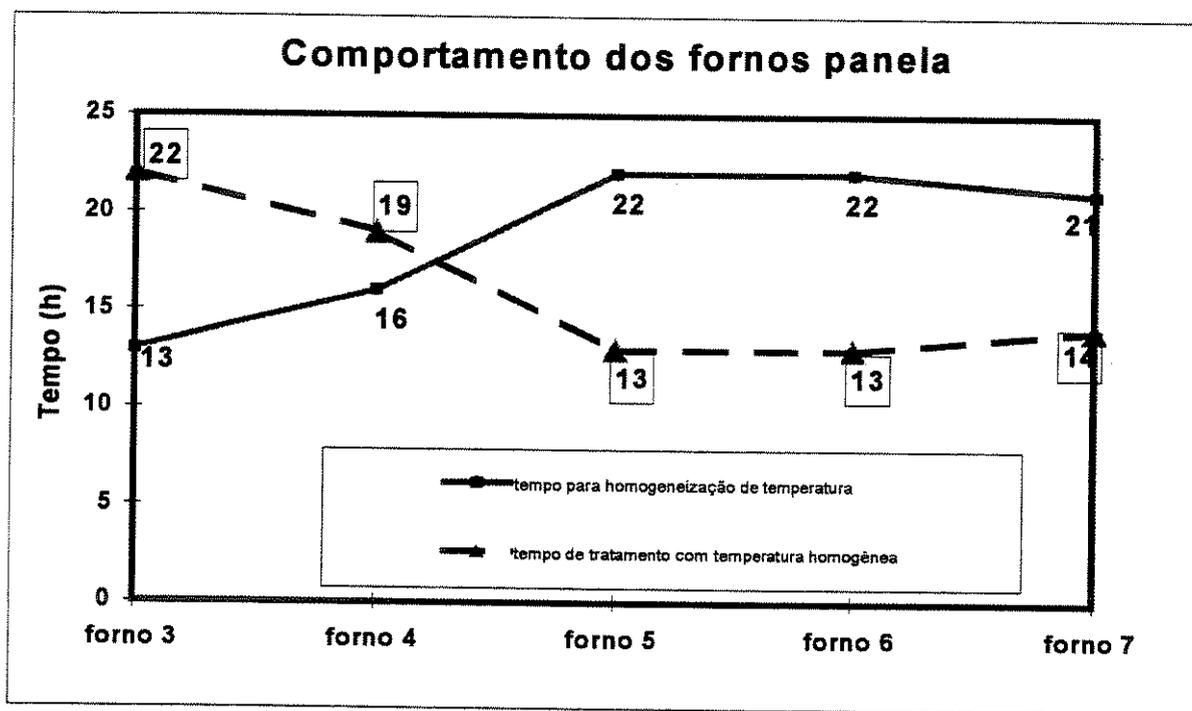


Figura 5.5 – Comportamento dos fornos para homogeneização a 680°C.

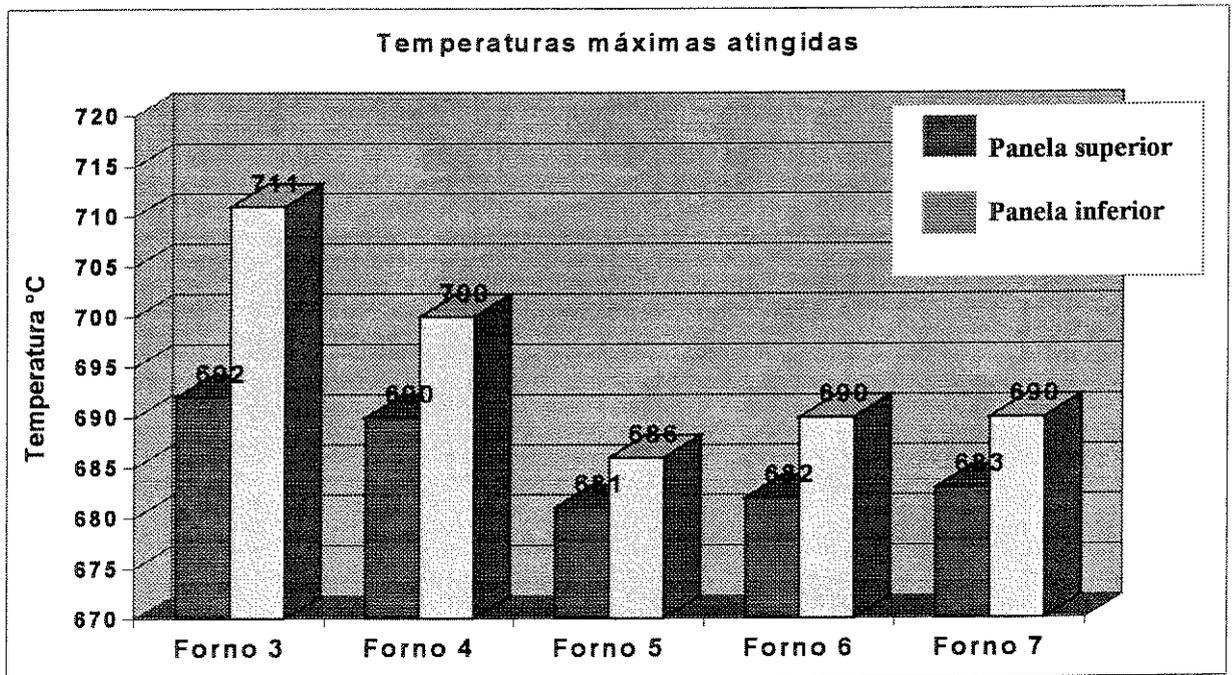


Figura 5.6 – Variações de temperatura no mesmo forno até homogeneização

Essas variações de temperatura também devem causar variações da condição do material tratado se considerar-se que a temperatura estipulada para o tratamento é de 680°C.

Dessa análise conclui-se que os fornos não devem ser empregados para tratamentos de coalescimento devido à dificuldade de controlar-se tempo e temperaturas de aquecimento, mas podem ser empregados para o recozimento entre etapas de conformação.

Novas medidas de tempo e temperatura devem ser feitas para avaliar o desempenho desses fornos no aquecimento de outras peças produzidas pela empresa, a experiência deve ser feita com peças de dimensões e massas iguais. Após o conhecimento do desempenho o setor de planejamento de produção deve aproveitar essa informação para planejar o tratamento de peças com dimensões e massas intermediárias no mesmo forno, caso tenham-se repetido na nova experiência os resultados apresentados nas figuras 5.5 e 5.6.

Nessa situação o sistema vai se tornar mais eficiente com melhor aproveitamento do tempo dos fornos e diminuição da fila de espera de peças, ou seja, o fluxo de produção ficará mais rápido e a produtividade aumentará.

5.2.2 Análise das Ferramentas

Durante o acompanhamento do processo na forjaria foram observadas algumas falhas em ferramentas novas sendo as causas dessas falhas desconhecidas, pois no momento de uma dada falha a matéria-prima trabalhada era analisada em sua microestrutura e dureza e não apresentava-se fora das especificações já conhecidas, como apresentadas e discutidas anteriormente neste trabalho. Devido à necessidade de se conhecer melhor a qualidade das ferramentas, foi elaborado um procedimento de ensaios para as ferramentas falhadas.

No procedimento ficou estabelecido que logo após as falhas de itens considerados críticos, os mesmos deveriam ser analisados e emitido relatório técnico com a finalidade de documentar essas falhas. A composição do material dessas ferramentas foi analisada com o objetivo de verificar-se se não haviam materiais fora das especificações que levassem à falha das ferramentas devido a problemas em seu tratamento térmico.

A tabela 5.7 apresenta os resultados de composição química, sendo que não se observam valores fora dos especificados.

Também analisou-se a dureza, a microestrutura e a superfície de fratura das peças falhadas (tabela 5.8).

A seguir apresenta-se a análise de cada ferramenta falhada.

Item de Ferramenta	Tipo de Aço	Composição Química Especificada (%)	Encontrado (%)
Bucha para cisalhar barras	AISI D6 VC 131 - Villares	C- 1,95/2,30 Si- 0,07/0,43 Mn- 0,11/0,49 Cr- 10,85/12,15 W- 0,55/0,85 P- máximo 0,035 S- máximo 0,035	1,98 0,29 0,40 11,80 0,71 0,018 0,021
Punção da extrusão do furo I	AISI M2 VMM2 - Villares	C- 0,83/0,97 Cr- 3,70/4,60 Mo- 4,60/ 5,30 V- 1,60/2,10 W- 5,85/6,85 Si- máximo 0,48 Mn- máximo 0,44 P- máximo 0,035 S- máximo 0,035	0,84 3,82 4,85 1,73 6,23 0,24 0,14 0,02 0,01
Pino extrator da operação de assentar	AISI D6 VC 131 - Villares	C- 1,95/2,30 Si- 0,07/0,43 Mn- 0,11/0,49 Cr- 10,85/12,15 W- 0,55/0,85 P- máximo 0,035 S- máximo 0,035	2,23 0,27 0,34 11,32 0,65 0,020 0,023
Bucha guia da extrusão do furo I	AISI D6 VC 131 - Villares	C- 1,95/2,30 Si- 0,07/0,43 Mn- 0,11/0,49 Cr- 10,85/12,15 W- 0,55/0,85 P- máximo 0,035 S- máximo 0,035	2,03 0,34 0,38 11,22 0,68 0,09 0,008
Matriz de marcar centro	AISI D6 VC 131 - Villares	C- 1,95/2,30 Si- 0,07/0,43 Mn- 0,11/0,49 Cr- 10,85/12,15 W- 0,55/0,85 P- máximo 0,035 S- máximo 0,035	1,97 0,063 0,59 12,63 1,01 0,025 0,017

Tabela 5.8 - Composição química das ferramentas falhadas

Item de Ferramenta	Dureza HRC Especificada	Dureza HRC Encontrada	Microestrutura	Análise de Fratura
Bucha para cisalhar barras	59 a 57	58	Martensita + carbonetos. Teor de austenita retida: 33,2%	Aspecto de ruptura sob elevado esforço mecânico
Punção da extrusão do furo I	63 a 65	64	Martensita fina revenida + carbonetos distribuídos	Aspecto de ruptura abrupta sob elevado esforço mecânico
Pino extrator da operação de assentar	58 a 60	59	Martensita fina revenida + carbonetos distribuídos homogeneamente na matriz. Teor de austenita retida: 15,4%	Idem anterior
Bucha guia da extrusão do furo I	58 a 60	58	Martensita fina revenida + carbonetos distribuídos homogeneamente na matriz. Teor de austenita retida: 31,4/34,4%	Idem anterior
Matriz de marcar centro	58 a 60	59/60	Martensita fina revenida + carbonetos, teor de austenita retida 25,5%	Aspecto de ruptura por fadiga

Tabela 5.9 - Resultados de ensaios das ferramentas falhadas

A seguir na figura 5.7 é apresentada as falhas das ferramentas, e suas análises em seguida.

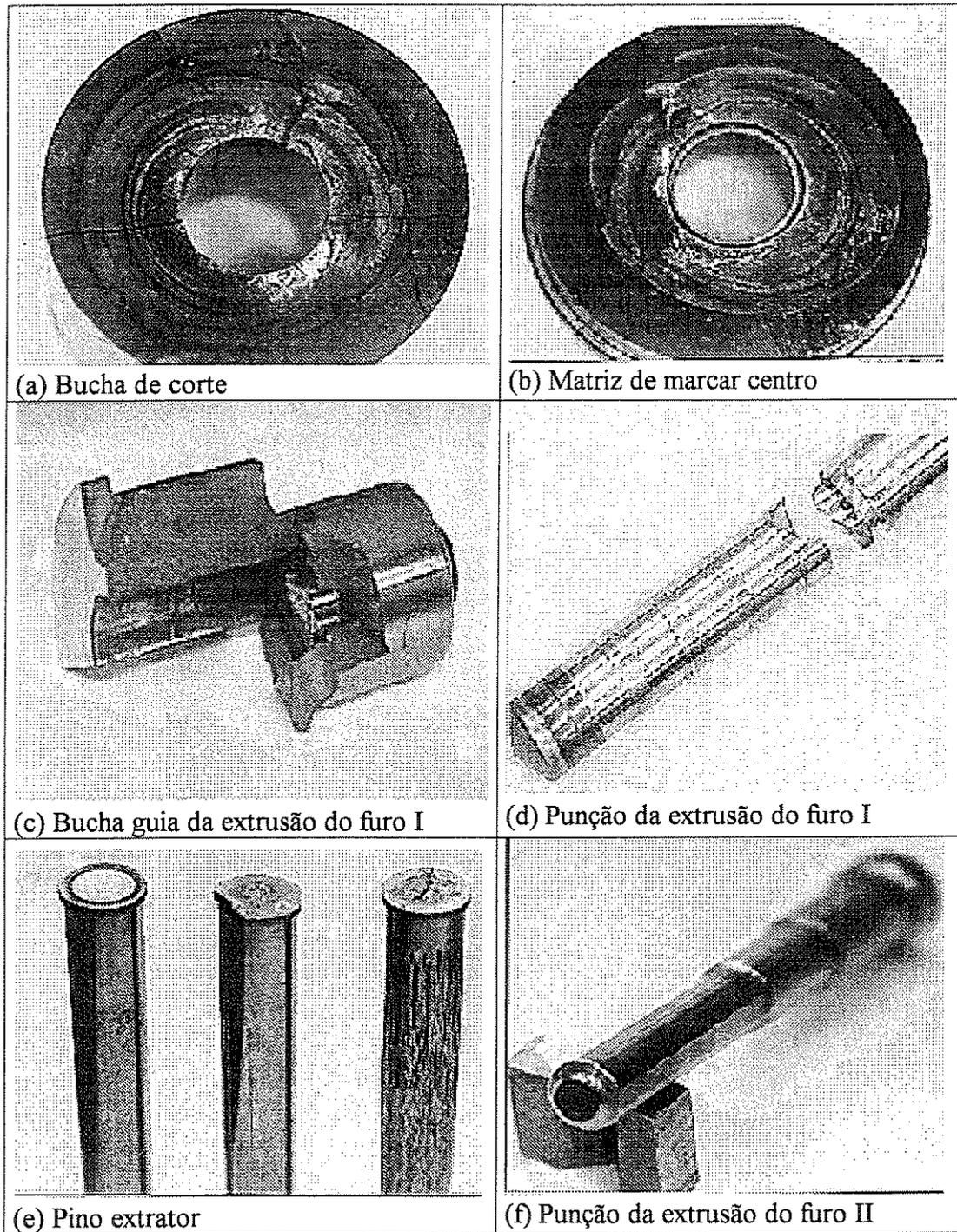


Figura 5.7 – Ferramentas falhadas

- Bucha de corte - Figura 5.7 (a)

A composição química e a dureza especificadas após o tratamento térmico encontram-se dentro dos intervalos recomendados, mas foi encontrado um grau de austenita retida muito alto. Como a deformação a frio que ocorre nos estágios do processo facilita a transformação de austenita retida em martensita (MEI & SILVA, 1985), pode ocorrer um aumento de volume da bucha, causando variações dimensionais na ferramenta e como consequência, levá-la à falha durante o processo se o diâmetro interno da bucha diminuir. A solução é o tratamento de duplo revenido após tempera, que promove a transformação da austenita retida em martensita, reduzindo sua porcentagem na ferramenta tratada e minimizando a possibilidade de falha.

- Matriz de marcar centro - Figura 5.7 (b)

Também nessa ferramenta foi observado um alto grau de austenita retida, de modo que podem ocorrer problemas semelhantes aos da bucha de corte. Porém neste caso, verificou-se que a fratura ocorreu por fadiga, possivelmente devida às experiências com o material beneficiado, ou seja, conclui-se que essa ferramenta é sensível a alterações nas propriedades mecânicas do material trabalhado.

- Bucha guia da extrusão do furo I - Figura 5.7 (c)

Nessa ferramenta observa-se uma falha provocada pelo alto grau de austenita retida na bucha, em que devido à diminuição do seu diâmetro interno, a bucha passou a interferir no curso do punção ocorrendo o travamento e sua ruptura.

- Punção da extrusão do furo I - Figura 5.7 (d)

A falha nesse punção deu-se aparentemente devido a esforços elevados durante a operação, possivelmente pelo fato da geometria do punção não estar de acordo com a norma [VDI 3186, V2], principalmente na região onde o punção é dimensionado para suportar os maiores esforços.

- Pino extrator da operação de assentar - Figura 5.7 (e)

Os pinos extratores apresentaram problemas na relação diâmetro/altura, ocorrendo a falha na maioria das vezes por flambagem, o que pôde ser verificado ao longo de sua vida útil.

- Punção da extrusão do furo II - Figura 5.7 (f)

Esse punção também não apresentava a geometria definida pela norma [VDI 3186, V2], rompendo devido a elevados esforços.

Da análise das ferramentas falhadas, conclui-se que as principais causas de ruptura são o tratamento térmico incorreto que leva a uma elevada porcentagem de austenita retida, principalmente no caso de buchas e matrizes, e o projeto inadequado da geometria dos punções. Para os punções que falham normalmente por fadiga, pode-se indicar após a produção de um determinado número de peças, o revenido para alívio de tensões que aumentaria sua vida útil [REGNER & SCHAEFFER, 1983].

5.3 Requisições para Reposição de Ferramentas

A partir de informações dos operadores da forjaria de que o número de falhas de ferramentas em anos anteriores era bem menor que os observados durante a realização deste trabalho, e observando-se junto à produção, prensas paradas aguardando ferramentas serem confeccionadas pela ferramentaria da empresa, definiu-se a necessidade de estabelecer-se um procedimento de requisições de ferramentas com a finalidade de avaliar o que ocorria em anos anteriores e o verificado atualmente, para definir se realmente as requisições eram mais freqüentes, em que itens do ferramental ocorriam e se estavam associadas às falhas apresentadas no item anterior.

O procedimento empregado foi baseado no levantamento de dados sobre a requisição de itens de ferramental solicitados na ferramentaria, utilizando o conceito de Tecnologia de Grupo, ou seja, verificando-se o consumo de ferramentas para uma família de produtos, no caso a linha de pinhões.

As requisições eram emitidas pelo almoxarifado de produção na forjaria a partir da falha de um item do ferramental. Esses dados estavam informatizados e foram levantados desde de janeiro de 1995 até dezembro de 1997.

A tabelas 5.10 mostra os principais itens de ferramentas falhadas e requisitadas para produção da família dos pinhões.

Operação	Ferramentas	Produção			Consumo			Produção / Consumo		
		95	96	97	95	96	97	95	96	97
Marcar centro	Punção	488.731	419.156	395.867	26	19	10	18.800	22.000	39.600
	Punção	1.496.329	1.687.988	1.413.907	24	27	21	62.350	62.500	67.300
	Matriz	1.496.329	1.687.988	1.413.907	5	3	10	299.260	562.600	141.390
	Matriz	488.731	419.156	395.867	4	1	5	122.200	419.156	79.100
	Bucha	1.496.329	1.687.988	1.413.907	6	8	28	25.000	21.100	50.000
	Bucha	488.731	419.156	395.867	10	3	19	48.800	139.700	20.800
	Pino	1.985.060	2.107.154	1.809.774	0	0	0			
Furar	Bucha Guia	488.731	419.156	395.867	11	4	5	44.430	104.800	79.200
	Sacador	488.731	419.156	395.867	5	6	3	97.750	70.000	131.200
	Sacador	1.496.329	1.687.998	1.413.907	16	12	14	93500	140.600	10.100
	Matriz	1.496.329	1.687.998	1.413.907	3	0	1	49.900		1.413.907
	Matriz	488.731	419.156	395.867	2	0	2			
Extrudar final	Punção	488.731	419.156	395.867	8	2	0	61.100	209.600	
	Punção	128.981	108.585	97.326	3	15	16	43.000	7.250	6.000
	Punção	1.367.348	1.579.413	1.316.581	13	8	2	105.200	197.430	658.300
	Piloto	1.856.079	1.998.569	1.712.448	32	17	12	58.000	117.560	142.700
	Piloto	128.981	108.585	97.326	0	0	4			24.300
	Matriz superior	488.731	419.156	395.867	4	2	0	122.180	209.600	
	Matriz superior	1.496.329	1.687.998	1.413.907	2	1	2	748.150	1.687.998	707.000
	Matriz inferior	1.478.021	1.653.051	1.348.396	3	0	10	492.700		134.840
	Matriz inferior	18.308	34.947	65.511	0	0	0			
	Matriz inferior	77.471	24.858	41.408	2	0	0	38.750		
Matriz inferior	411.260	394.298	354.459	2	3	12	205.630	131.430	29540	

Tabela 5.10 - Levantamento das requisições das ferramentas falhadas

Analisando a tabela 5.10, observa-se que não há um comportamento comum para todos os itens de ferramental visto que há ferramentas que apresentaram aumento de consumo ao longo dos anos (matriz e buchas de marcar centro, e matriz inferior de extrudar), enquanto outras apresentaram uma queda nesse consumo (punção de marcar centro e piloto de extrudar). Assim, não se pode a princípio, relacionar essas falhas com possíveis modificações nas propriedades da matéria-prima ou com modificações no processo de fabricação dessas ferramentas.

Itens críticos como a matriz e as buchas de marcar centro podem ter apresentado aumento do consumo de ferramentas pelos problemas apresentados no item 5.2.2, figuras 5.7 (b) e 5.7 (c), quando as falhas deveram-se à presença de uma porcentagem elevada de austenita retida. A solução proposta é de promover o duplo revenido das ferramentas de modo a reduzir essa porcentagem de austenita retida.

Outra causa possível pode ser o projeto inadequado de itens para a fabricação de produtos para os quais a princípio as ferramentas falhadas não haviam sido projetadas, como por exemplo, um aumento de dureza do material trabalhado. Esse problema foi observado durante a montagem de alguns ferramentais nas prensas, em que os pinos-extratores tinham uma seção pequena para os elevados esforços de extração verificados. A solução possível é a modificação do plano de montagem com o uso de pinos-extratores com maior seção e que são normalmente empregados na fabricação de outros produtos extrudados, com isso haveria uma redução do número de falhas e também do número de itens de ferramental, o que reduziria o inventário da ferramentaria.

Da observação dos números apresentados para o consumo de ferramentas destaca-se a importância de se acompanhar estatisticamente esse consumo, procurando determinar as causas das falhas, relacionando-as com trocas de fornecedores de matéria-prima, modificações no tratamento térmico e superficial de ferramentas. Esse acompanhamento permitiria a eliminação dessas causas de modo a reduzir os custos envolvidos que englobam a fabricação das ferramentas, o tempo parado de prensas à espera dessas ferramentas e os tempos de preparação dessas prensas com a desmontagem e montagem dos ferramentais.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos na observação das diversas etapas do processo de fabricação de pinhões para motores de partida e também obtidos nas experiências realizadas com a matéria-prima e com as ferramentas falhadas, pode-se apresentar as seguintes conclusões:

- deve haver um controle minucioso das condições de tratamento térmico da matéria-prima de modo a garantir a homogeneidade da microestrutura e conseqüentemente da dureza, a fim de garantir a continuidade do processo, sem a necessidade de retrabalho e com um consumo mínimo de ferramentas;
- os diversos tratamentos térmicos propostos à temperatura de 680°C, com diferentes tempos de homogeneização não apresentaram modificações microestruturais importantes em termos de esferoidização, observando-se apenas um alívio de tensões;
- os fornos empregados nas etapas de tratamento térmico durante o processo de fabricação, apresentaram variações importantes no tempo e na temperatura de aquecimento, levando à obtenção de peças tratadas com diferentes propriedades de acordo com o forno empregado e num mesmo forno, de acordo com a região onde se encontrava cada peça. Assim, a princípio, esses fornos não devem ser empregados para o coalescimento e devem ter sua utilização planejada para não interferirem no fluxo de produção;

- as falhas observadas nas ferramentas tiveram como causa o tratamento térmico inadequado para as buchas e matrizes que apresentaram uma elevada porcentagem de austenita retida e, o projeto inadequado da geometria no caso dos punções;
- a análise do consumo de itens de ferramental devido às ferramentas falhadas não apresentou um comportamento comum para todos os itens analisados o que dificulta relacionar essas falhas com possíveis alterações da matéria-prima fornecida. Concluiu-se pela necessidade de uma metodologia para analisar cada ferramenta falhada, documentando o tipo de falha observada, sua possível causa e a quantidade de peças produzidas.

Como sugestões para trabalhos futuros, tem-se:

- dar continuidade à análise da matéria-prima beneficiada, buscando um tratamento térmico viável na empresa que garanta condições de microestrutura e dureza adequadas para o processo de conformação a frio;
- estudar a implantação de um procedimento para acompanhamento estatístico das falhas observadas nas ferramentas, relacionando essas falhas a alterações promovidas no processo e na matéria-prima empregada;
- estudar a redução do inventário da ferramentaria pela utilização de itens comuns de ferramental, empregando os conceitos de tecnologia de grupo.

Referências Bibliográficas

AÇOPEÇAS – Extrusão a Frio, Catálogo de produtos.

AGOSTINHO, O. L., Sistemas de manufatura. Apostila do curso de Pós-graduação, UNICAMP, 1995.

ALBERNATHY, W.J., Production process structure and technological change. Design Sciences, v. 7, no. 4, 1976.

ALTAN, T., OH, S. I., GEGEL, H. Metal forming – fundamentals and applications. ASM, 1983.

BAUER, A. Shop floor control systems: from design to implementation. London: Chapman and Hall, 1994.

BILLIGMANN, J. & FELDMANN, H.D., Estampado y Prensado à Máquina: Ed. Reverté, 2a. ed., 1.979.

BUTTON, S. T., ROQUE, C. M., CAPORALLI, A. Planejamento do processo de ferramentas para o forjamento a frio de eixos de aços. Apostila do curso de graduação, UNICAMP, 1995.

GIANESI, G. N. Just in Time, MRP II e OPT : Um enfoque estratégico. São Paulo: Atlas, 1995, 186p.

GRUNING, K. Técnica da conformação. São Paulo: Polígono, 1976, 251p.

HIRSCHVOGEL, M., DOMMELEM, H.V. Some applications of cold and warm forging. In: Journal of Materials Processing Technology, 1992. v.35, p.343-356.

HYDE, W. F. Improving productivity by classification, coding, and data base standardization: the key to maximizing CAD/CAM and group technology. New York: M. Dekker, 1981.

KUDO, H. Academic industrial cooperation to improve and expand cold-forging technology in Japan. In: Journal of Materials Processing Technology, 3-4, oct 1992. v.35, p.259-274.

LANGE, K. (ed.), Handbook of Metal Forming: McGraw-Hill, 1985.

LANGE, K. Some aspects of the development of cold forging to a high-tech precision technology. In: Journal of Materials Processing Technology, 3-4, oct 1992. v.35, p.245-257.

LAWRENCE, E. D. Processos de fabricação e materiais para engenheiros. São Paulo: Edgard Blucher; 1972, 639p.

MEI, P., SILVA, C. A., Aços e ligas especiais. 2.ed. Sumaré: Eletrometal, 1988, 528p.

NATIONAL MACHINERY, Tool Seminar, São Paulo, 1986.

NORMAS VDI:

3138 - Forjamento a frio de aços e metais não ferrosos

V.1 - Princípios básicos

V.2 - Utilização

3139 - Extrusão a frio de aços – exemplos práticos

3143 - Aços para forjamento a frio

V.1 Escolha e tratamento térmico

3161 - Limpeza e desengraxamento de superfícies metálicas

3164 - Fosfatação para facilitar o forjamento a frio

3165 – Lubrificantes para conformação a frio

3186 - Ferramentas para extrusão a frio de aços

V.3 Cálculos de Matrizes e anéis de contração

3187 - Corte de barras por tesoura – falhas de corte

3200 – Curvas de deformação de materiais metálicos

V.2 Aços carbono e aços liga

OSAKADA, K., KADO, T. and Yang, G. B. Application of AI – technique to process planning of cold forging. In: Annals of the Cirp, 1, 1988. v.37, p.239-242.

PEKLENIK, J., LOGAR, B. Feature - based part database design and automatic forming of part families for GT. In: Annals of the Cirp, 1, 1991. v.40, p.153-156

PLSSL, GEORGE, W. Production and inventory control: principles and techniques. 2 ed. Englewood Cliffs: Prentice – Hall, 1985.

REGNER, P. & SCHAEFFER, L. Aspectos gerais sobre forjamento: Anais do Seminário Nacional de Forjamento, Porto Alegre, 1983, 301p.

SEMIATIN, S.L., Introduction fo forming and forging processes, Metals Handbook, vol. 14, Forming and Forging, ASM International, 1988, p. 15-21.

SLACK, N., CHAMBERS, S., HARLAND, C., HARRISON, A., JOHNSTON, R. Administração da produção. São Paulo: Atlas, 1997, 726p.

SOUZA, A. S. Ensaio dos materiais metálicos.3.ed. São Paulo: Blucher, 1977, 222p.

TURNEY, P. Common Cents: The ABC performance breakthrough (how succeed with activity-based costing). United States of America: Library of Congress Cataloging in Publication Data, 1992, 322p

WIGHT, O. Guia para excelência operacional: checklist para melhorar o desempenho das empresas. 4 ed. Rio de Janeiro: Campus, 1994, 107 p.