



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

EVERTON DUARTE DE SOUZA

ESTUDO COMPARATIVO PARA FABRICAÇÃO DE PEÇAS
AERONAUTICAS: FORJAMENTO X USINAGEM

Guaratinguetá
2015

EVERTON DUARTE DE SOUZA

**ESTUDO COMPARATIVO PARA FABRICAÇÃO DE PEÇAS
AERONAUTICAS: FORJAMENTO X USINAGEM**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2015

Souza, Everton Duarte de

S729 e Estudo comparativo para fabricação de peças aeronáuticas:
forjamento x usinagem / Everton Duarte de Souza. -
Guaratinguetá, 2014

85 f.: il.

Bibliografia: f. 85

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica –
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de
Guaratinguetá, 2014

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

1. Usinagem 2 Forjamento 3. Alumínio I. Título

CDU 621.9

ESTUDO COMPARATIVO PARA FABRICAÇÃO DE PEÇAS AERONAUTICAS:
FORJAMENTO X USINAGEM

EVERTON DUARTE DE SOUZA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA
UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
UNESP/FEG

Janeiro de 2015

Dedico essa obra aos meus pais Miguel Duarte de Souza e Maria Inês de Souza. Pelo incentivo e esforço em garantir minha formação e pela dedicação em me ensinar a enfrentar as dificuldades da vida.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro pela orientação realizada com dedicação, amizade e, sobretudo, perseverança. Sem a sua disposição, paciência e valiosa ajuda esta obra não existiria; aos professores membros da banca examinadora pela disposição em julgar o presente trabalho.

Aos meus familiares, aos colegas Edson dos Santos Gonçalves, Rodrigo Rodrigues de Oliveira pelo auxílio inestimável na conclusão deste curso de engenharia;

Aos meus colegas de trabalho, que me alimentam com novos aprendizados todos os dias;

Aos professores do Curso de Engenharia Mecânica da UNESP de Guaratinguetá pelo profissionalismo e competência com que transmitiram seus conhecimentos a mim ao longo desses anos de convívio.

À minha namorada Darlinda Pereira por estar ao meu lado nos momentos de luta e superação de minha vida.

Ao amigo e irmão Emerson Luis Duarte de Souza por sempre me incentivar a ser uma pessoa melhor e pela boa amizade nesta jornada da vida.

Ao meu irmão de coração Jim Carton de Abreu por estar sempre ao meu lado, principalmente nos momentos ruins.

Ao bom Deus, pelo dom da vida, pelas dádivas, pelas bênçãos e pelo constante aumento da minha fé.

"A nossa maior glória não reside no fato de nunca cairmos, mas sim em levantarmos sempre depois de cada queda."

Olivier Goldsmith

SOUZA, E. **Estudo comparativo para fabricação de peças aeronáuticas: Forjamento x Usinagem**. 2015. Monografia de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise técnico-econômica da substituição de matéria-prima de peças metálicas usinadas compradas em blocos para matéria-prima comprada em uma pré-forma forjada. Ao final do trabalho é mostrado que o ganho econômico com a substituição do processo de usinagem para desbaste da matéria-prima por uma pré-forma forjada é significativo para as amostras apresentadas.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem, forjamento, alumínio.

SOUZA, E. **Comparative study for aeronautical parts manufacturing: Forging x Machining**. 2015. Graduation Monography (Mechanical Engineering Graduation) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

This paper shows a technical-economic analysis of the substitution of raw material machined metal parts for a forged preform. At the end, it shows that the economic gain by the machining process substitution for a forged preform is significant for the samples analysed.

KEYWORDS: machining, forging, aluminum.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Principais partes de um torno paralelo ou universal.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2 - Alguns processos de torneamento: (a) Cilíndrico externo; (b) cônico externo; (c) curvilíneo; (d) cilíndrico interno; (e) cônico interno; (f) sangramento radial.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3 - Torno de Maudslay.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4 - Movimentos de torneamento.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5 - Torno Universal.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6 - Torno Revolver.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 7 - Torno Copiador.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8 - Torno Vertical.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9 - Torno CNC.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 10 - Tipos de operações envolvendo fresadoras.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 11 - Fresadora horizontal.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 12 - Fresadora vertical.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13 - Fresadora copiadora.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 14 - Fresadora universal.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 15 - Fresadora GANTRY.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 16 - Furadeira portátil.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 17 - Furadeira de coluna.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 18 - Furadeira radial.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 19 - Furadeira de árvores múltiplas.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 20 - Peças forjadas.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 21 - Processo de forja na antiguidade.....</i>	<i>39</i>

<i>Figura 22 - Forjamento a quente</i>	41
<i>Figura 23 - Forjamento em matriz aberta</i>	46
<i>Figura 24 - Forjamento em matriz fechada</i>	49
<i>Figura 25 - Forjamento em martelo de queda livre</i>	51
<i>Figura 28 - Prensa de fuso</i>	54
<i>Figura 29 - Prensa excêntrica</i>	55
<i>Figura 30 - Prensa hidráulica</i>	56
<i>Figura 31 - Licalização da rib em uma aeronave</i>	69
<i>Figura 32 - Licalização do Windshield 1 em uma aeronave</i>	70
<i>Figura 33 - Licalização do Windshield 2 em uma aeronave</i>	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>DIN</i>	- <i>Deutsches Institut für Normung</i>
<i>CNC</i>	- <i>Comando numérico computadorizado</i>
<i>IT</i>	- <i>International Tolerance</i>
<i>Ra</i>	- <i>Roughness average</i>
<i>ABNT</i>	- <i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
<i>AA</i>	- <i>aluminum Association</i>
<i>NBR</i>	- <i>Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)</i>
<i>ASTM</i>	- <i>American Society for Testing and Materials</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO BIBLIGRÁFICA.....	15
2.1	TORNEAMENTO.....	16
2.1.1	Evolução Histórica.....	17
2.1.2	Torno Universal.....	20
2.1.3	Torno Revolver.....	21
2.1.4	Torno Copiador.....	21
2.1.5	Torno Vertical.....	22
2.1.6	Torno CNC.....	23
2.2	FRESAMENTO.....	24
2.2.1	Evolução Histórica.....	26
2.2.2	Fresadora horizontal.....	27
2.2.3	Fresadora vertical.....	28
2.2.4	Fresadora copiadora.....	28
2.2.5	Fresadora universal.....	29
2.2.6	Fresadora portal GANTRY.....	30
2.3	FURAÇÃO.....	31
2.3.1	Evolução histórica.....	32
2.3.2	Furadeira portátil.....	33
2.3.3	Furadeira de coluna.....	34
2.3.4	Furadeira radial.....	35
2.3.5	Furadeira de árvores múltiplas.....	36
2.4	FORJAMENTO.....	37
2.4.1	Evolução histórica.....	38

2.4.2	Forjamento a quente.....	39
2.4.3	Forjamento a frio.....	43
2.4.4	Forjamento em matriz aberta.....	45
2.4.5	Forjamento em matriz fechada.....	46
2.4.6	Tratamento térmico em peças forjadas.....	49
2.4.7	Equipamentos para forjamento.....	50
2.4.8	Lubrificação.....	56
2.4.9	Defeitos.....	59
2.5	ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	60
2.5.1	Evolução histórica.....	60
2.5.2	Características.....	61
2.5.3	Classificação das ligas de alumínio.....	62
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	68
3.1	PEÇAS UTILIZADAS PARA AVALIAÇÃO.....	68
3.2	PROCESSO DE FABRICAÇÃO PARA PEÇAS USINADAS.....	70
3.3	PROCESSO DE FABRICAÇÃO PARA PEÇAS FORJADAS.....	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
4.1	DADOS DA FABRICAÇÃO MATÉRIA-PRIMA EM BLOCO.....	72
4.1.1	Custo hora-homem e hora-máquina.....	73
4.1.2	Consumo de matéria-prima.....	74
4.1.3	Reaproveitamento da matéria-prima.....	75
4.1.4	Custo de fabricação.....	76
4.2	DADOS DA FABRICAÇÃO MATÉRIA-PRIMA FORJADA.....	76
4.2.1	Custo hora-homem e hora-máquina.....	78
4.2.2	Consumo de matéria-prima.....	79

4.2.3	Reaproveitamento da matéria-prima.....	80
4.2.4	Custo de fabricação.....	81
5	CONCLUSÕES.....	82
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, 81% das aeronaves fabricadas pela Embraer são oriundas de peças metálicas (<http://www.scielo.br>, acessado em 17/08/2014). O principal processo de fabricação dessas peças é a usinagem.

No processo de usinagem, a geração de cavaco representa um considerável desperdício de matéria-prima. Dados da Embraer indicam que o cavaco representa 82% de todo o material utilizado na fabricação de peças metálicas.

Este simples dado é suficiente para provar que a mais discreta redução nos custos de fabricação dessas peças é suficiente para gerar uma grande economia por aeronave fabricada.

Pelo forjamento da pré-forma, o desperdício de material é reduzido juntamente com a redução dos custos de usinagem.

Por isso, a proposta deste trabalho é analisar a viabilidade da substituição do processo de usinagem na fabricação de algumas famílias de peças pelo processo de forjamento, visando o menor desperdício de material e melhor utilização da capacidade produtiva dos equipamentos da empresa, gerando redução significativa dos custos de fabricação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fabricação de peças pelos processos primários como fundição, forjamento, laminação, etc., geralmente apresentam superfícies grosseiras, que certamente exigirão um acabamento. Estes acabamentos não podem ser alcançados com fundição, forjamento ou laminação.

As operações com metais podem ser divididas em duas grandes classes: Operações de usinagem e operações de conformação.

Segundo a norma DIN 8580, pode se entender usinagem como todo processo de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco (SILVA, 2006).

A remoção de material ocorre através da interferência entre ferramenta e peça, sendo a ferramenta constituída de um material de dureza e resistência muito superior a do material da peça.

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas (TRENT, 1985).

É um processo que também permite a obtenção de algumas características como:

- Acabamento de superfícies de peças para obtenção de melhores tolerâncias dimensionais e aspecto visual melhor;
- Obtenção de furos e outras características que não são possíveis de se obter através de outros processos;
- Fabricação de peças a baixo custo.

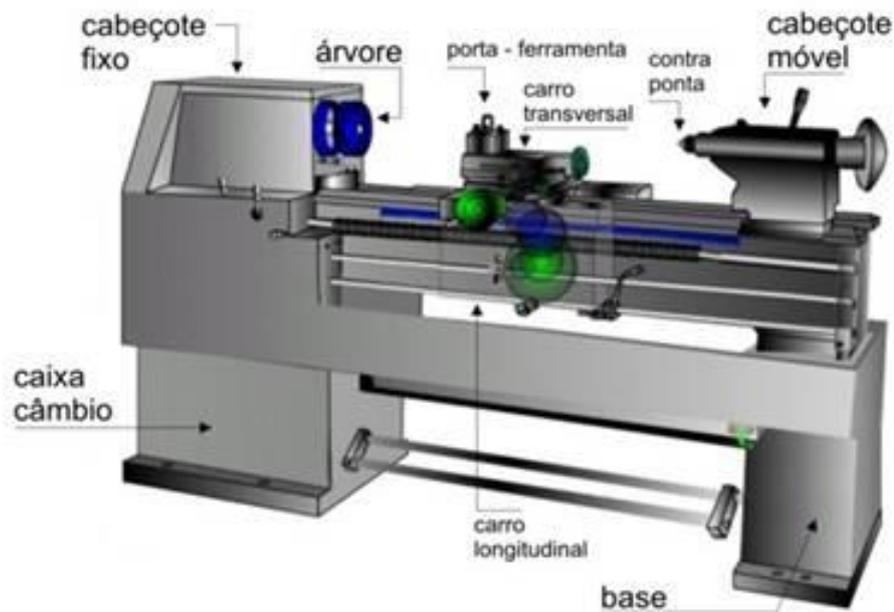
Serão apresentadas agora as principais operações de usinagem convencional executadas com ferramentas de geometria definida. Essas operações geralmente são agrupadas de acordo com a máquina-ferramenta empregada e são divididas em:

- Operações de desbaste: em que o objetivo principal é a garantia da remoção do material, de preferência nas mais elevadas taxas de remoção de material. Nesta operação, o limitador é a potência da máquina ferramenta.
- Operações de acabamento: aqui, o objetivo é dar qualidade no acabamento final da peça. O sobremetal deixado pela operação de desbaste é removido até as dimensões nominais da peça.

2.1 TORNEAMENTO

É o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. (FERRARESI, 1969).

Figura 1 - Principais partes de um torno paralelo ou universal.

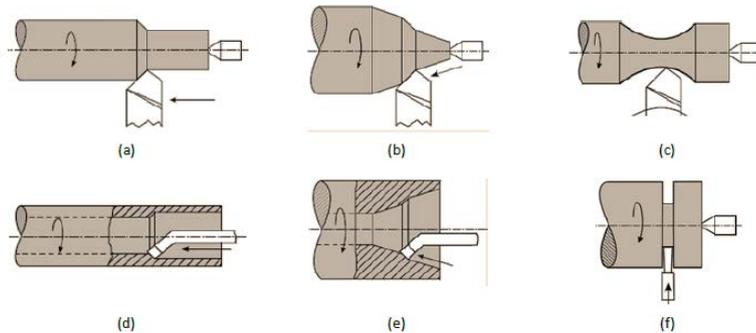


Fonte: (<http://mmborges.com> - acessado em 09/08/2014).

No torneamento, a matéria prima, conhecida como tarugo, geralmente tem uma forma inicial cilíndrica. A forma final é cônica ou cilíndrica.

As várias modalidades de torneamento incluem: torneamento retilíneo (faceamento), torneamento cilíndrico, torneamento cônico, torneamento radial (sangramento), perfilamento, etc.

Figura 2 - Alguns processos de torneamento: (a) Cilíndrico externo; (b) cônico externo; (c) curvilíneo; (d) cilíndrico interno; (e) cônico interno; (f) sangramento radial.



Fonte: (<http://mmborges.com> - acessado em 09/08/2014).

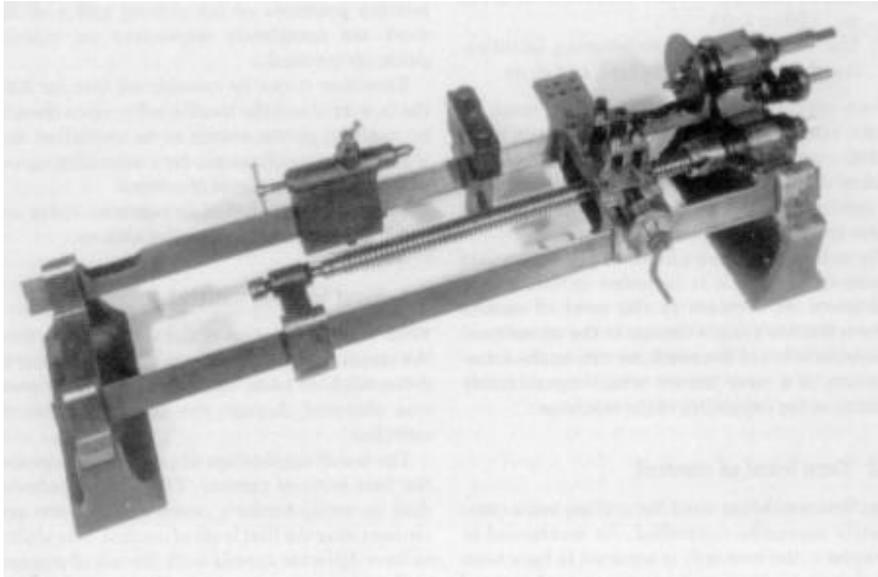
2.1.1 Evolução Histórica

O torno vem sendo usado como meio de fabricar rodas, partes de bombas de água, cadeiras, mesas, e utensílios domésticos desde as antigas civilizações, a exemplo dos egípcios e romanos.

Com a invenção da máquina a vapor por James Watt, os meios de produção como teares e afins foram adaptados à nova realidade. O também inglês Henry Maudslay adaptou a nova máquina a um torno criando o primeiro torno a vapor.

No início do século 18 o torno já havia incorporado todas as modificações feitas por Maudslay. A correia passou a ser movimentada por um conjunto de polias de diferentes tamanhos, o que possibilitou o trabalho com variação na velocidade e rotação. Sua propulsão era obtida por meio de um eixo acoplado a um motor, forçando a máquina a ficar em um local fixo (MOORE, 1989).

Figura 3 - Torno de Maudslay.



Fonte: (MOORE, 1978).

Em 1925 o local fixo deixou de ser um problema. Um motor elétrico é adicionado ao equipamento. A variação de velocidade passou a ser obtida por uma caixa de engrenagens.

Em 1978 as máquinas começaram a vir com a tecnologia chamada CNC. Apesar de não sofrer grandes alterações em sua mecânica, reduziu drasticamente a interface com o operador substituindo os mecanismos responsáveis pela movimentação do cursor por microprocessadores. A usinagem passou a ser feita sem ação do operador, mas sim comandada por um programa armazenado em seu painel.

O torneamento é uma operação muito utilizada pela indústria mecânica por causa do grande número de formas que ele pode conseguir, além de sua alta taxa de remoção de cavaco. O torneamento pode ser classificado em torneamento de desbaste e de acabamento. O torneamento de desbaste tem como objetivo retirar grande quantidade de material da peça e por isso é realizado com valores altos de avanço e profundidade de corte. O torneamento de acabamento tem por finalidade conferir à peça precisão mais elevada e melhor acabamento superficial, e por isso é realizado com baixos valores de avanço e profundidade de corte.

Genericamente pode-se dizer que a operação de torneamento consegue obter qualidades na faixa de IT6 a IT11 e acabamentos superficiais com $R_a = 0,8$ a $6,3$ micrometros, sendo que as tolerâncias e acabamentos mais apertados são conseguidos em torneamentos de acabamento (AGOSTINHO, 2004).

A obtenção ou não de tolerâncias apertadas depende de muitos fatores, dentre os quais os principais são:

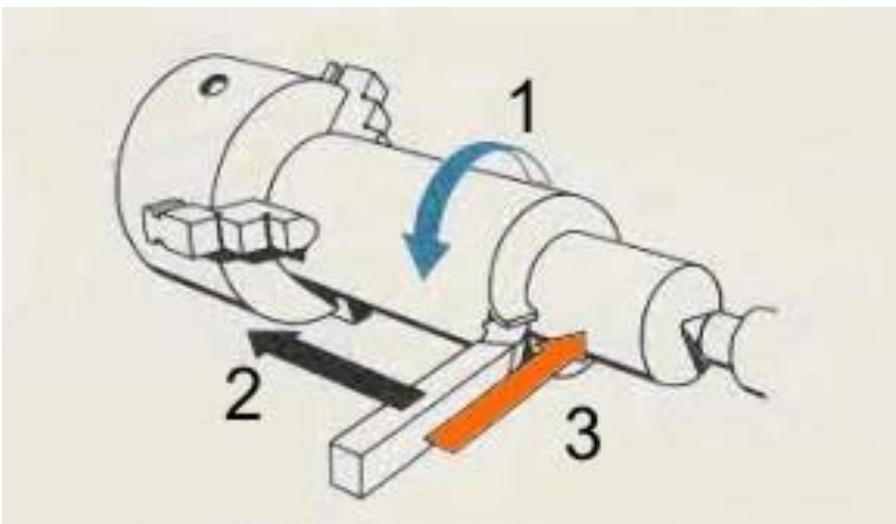
- Condições de usinagem;
- Rigidez da máquina, da ferramenta, dos dispositivos de fixação e da peça;
- Material da peça;
- Geometria da ferramenta;
- Fluido de corte.

Muitas vezes, quando se deseja maior precisão na peça, a operação de torneamento é seguida por uma operação de retificação.

Para executar o torneamento, são necessários três movimentos relativos entre a peça e a ferramenta.

- Movimento de corte (1): É o movimento principal. Permite o corte do material. O movimento é rotativo e realizado pela peça.
- Movimento de avanço (2): É o movimento que desloca a ferramenta ao longo da superfície da peça. Sem este movimento a ferramenta de corte gera apenas uma remoção de cavaco durante o curso.
- Movimento de penetração (3): É o movimento que determina a profundidade de corte ao empurrar a ferramenta em direção ao interior da peça e assim regular a profundidade do passe e a espessura do cavaco.

Figura 4 - Movimentos de torneamento



Fonte: (<http://mmborges.com>, acessado em 09/08/2014)

Hoje dispomos de diversos tipos de tornos, cada um desenvolvido especialmente para uma determinada gama de tarefas.

Das máquinas mais simples à mais complexa, todas possuem basicamente as mesmas partes:

- Corpo da máquina;
- Sistema de transmissão de movimento do eixo;
- Sistema de deslocamento da ferramenta;
- Sistema de fixação da ferramenta;
- Comando de movimentos e velocidades.

Abaixo uma breve explicação sobre os tipos de tornos mais conhecidos e utilizados

2.1.2 Torno Universal

É um torno simples e de fácil manuseio, muito utilizado em oficinas e ferramentarias. Possui eixo e barramento horizontal e tem capacidade de realizar todas as operações já citadas.

Possui grande dependência do operador por não possuir automação. Trabalha a baixas rotações e avanços e é utilizado principalmente para peças de baixa complexidade e para fabricação de pequenos lotes. Possui um baixo custo de manutenção.

Figura 5 - Torno Universal



Fonte: (<http://mmborges.com/processos>, acessado em 09/08/2014).

2.1.3 Torno Revolver

É o torno precursor do CNC. Surgiu da necessidade de reduzir o custo da produção em série. Sua principal característica é a utilização de um dispositivo especial em forma de torre giratória que emprega várias ferramentas convenientemente dispostas e preparadas para realizar as operações em forma ordenada e sucessiva. Possui um grau médio de automação, gerando grande dependência do operador. Pode ser utilizado para fabricação de lotes médios de peças, bastante utilizado para produção em série. Trabalha a baixas rotações e avanços. Construtivamente, o torno revólver é semelhante ao torno universal, com a diferença de o barramento ser mais curto e apresentar o castelo porta-ferramenta.

Figura 6 - Torno Revolver



Fonte: (<http://www.gopixpic.com> - acessado em 09/08/2014).

2.1.4 Torno Copiador

Mesmo possuindo alto grau de automação eletrônica e mecânica, é fortemente dependente do operador. Utilizado para fabricação de pequenos e médios lotes. Trabalha a baixas rotações e avanços.

Figura 7 - Torno Copiador



Fonte: (<http://www.maquinaslampe.com.br> - acessado em 09/08/2014)

2.1.5 Torno Vertical

É semelhante ao torno universal, diferindo apenas na disposição do eixo-árvore, que é vertical. Já a fixação da peça é mais simples e exige menos esforço. Por ter um eixo apoiado em mancais altamente resistentes, consomem maior potência. Além disso, a expulsão do cavaco é mais difícil; entretanto, não caem sobre o barramento. Caracteriza-se pelo corte lento gerando cavacos com grande seção transversal. Utilizado para peças de grande porte onde seu volume, diâmetro ou peso não permitam a utilização de um torno convencional. Possui grande robustez, mas sua instalação é dada como complexa em um parque fabril. Possui alto grau de automação diminuindo a dependência do operador. Utilizado para fabricação de peça em pequenos lotes.

Figura 8 - Torno Vertical



Fonte: (<http://www.atlasmaq.com.br> - acessado em 09/08/2014)

2.1.6 Torno CNC

O comando numérico é um equipamento eletrônico capaz de receber informações por meio de entrada própria, compilar estas informações e transmiti-las em forma de comando à máquina-ferramenta, de modo que esta - sem intervenção do operador - realize as operações na sequência programada. O que basicamente o diferencia dos tornos convencionais é a não necessidade de dispositivos para controle dos movimentos uma vez que esses movimentos são comandados através de dados de entrada, proporcionando ao equipamento e à peça uma condição bastante favorável quando comparado com o torno convencional, além do que, são maiores as garantias de uniformidade de qualidade e dimensões de peça para peça e de lote para lote.

Os componentes básicos de um torno com comando numérico são:

- Parte mecânica: máquina-ferramenta propriamente dita, incluindo as unidades motoras, hidráulicas e pneumáticas e ainda, os sistemas de refrigeração, lubrificação, transportadores de cavacos e outros.
- Interface eletroeletrônica: componente que distribui e comanda os diversos elementos da máquina (motores principais do eixo-árvore, motores de bomba hidráulica) e também a abertura e fechamento de válvulas solenóides atuantes em sistemas hidráulicos e pneumáticos.

- Comando eletrônico: equipamento (comando numérico) que recebe as informações em seu painel e atua na interface homem-máquina que, por sua vez, transmite à máquina-ferramenta as operações requeridas. Atua nos motores de avanço através de outra unidade de força de comando, própria pra estes motores, que são os responsáveis pelo movimento dos carros.

Em um torno com comando numérico, todas as suas funções são programáveis, sendo a função principal programar o movimento relativo entre a ferramenta e a peça. O projeto e a construção são de altíssima rigidez e solidez, proporcionando qualidade e tolerâncias ótimas. Como os movimentos são programáveis, pode se obter uma alta repetibilidade de peças com nenhum erro ou interrupção, ou mesmo sem intervenção do operador na máquina (CEDUP-2012).

Figura 9 - Torno CNC



Fonte: (<http://www.moniz.com.br> - acessado em 09/08/2014)

2.2 FRESAMENTO

A operação de fresamento é uma das mais importantes no processo de usinagem mecânica. A operação consiste na retirada do excesso de material ou sobremetal da superfície de uma peça (remover cavaco) com a finalidade de construir superfícies planas retilíneas ou com uma determinada forma e acabamento desejados. No fresamento, a remoção do sobremetal é feita pela combinação de dois movimentos, efetuados ao mesmo tempo. Um dos movimentos é o de rotação da ferramenta ao redor do seu eixo. O outro é o movimento da

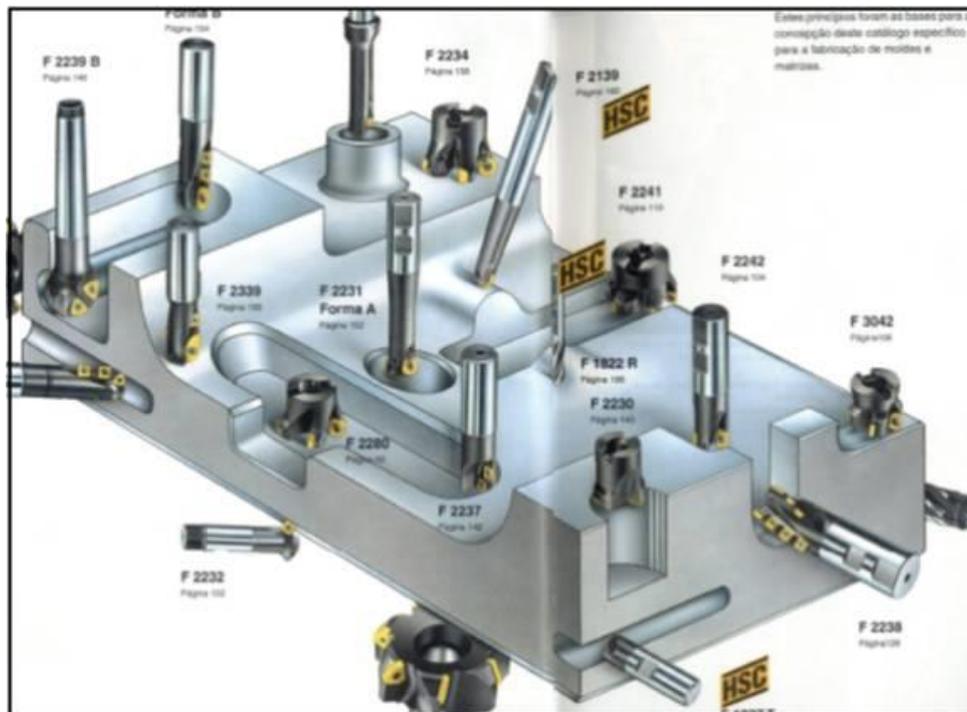
mesa da máquina, onde é fixada a peça a ser usinada. É o movimento da mesa da máquina-ferramenta ou movimento de avanço que leva a peça até a ferramenta de corte e torna possível a operação de usinagem; este movimento pode ser em um, dois, três ou mais eixos (lineares ou giratórios). A ferramenta, chamada fresa, é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo.

O fato da fresa poder se apresentar sobre as mais diferentes formas confere a esta operação um caráter de versatilidade em termos de geometrias possíveis de serem geradas; sendo assim, tem-se uma máquina elaborada para usinar praticamente qualquer tipo de peça com superfícies de todos os tipos e formatos com auxílio de suas ferramentas e dispositivos especiais. Boa parte das superfícies não planas e de não revolução de peças e/ou componentes mecânicos somente pode ser gerada por fresamento.

O fresamento é uma operação que consegue uma tolerância da ordem de IT9 a IT11 e um acabamento superficial na faixa de $Ra = 1,6$ a $6,3 \mu m$ (AGOSTINHO, 2004).

Para atingir tais números, a máquina deve ser projetada para altas solicitações estáticas e dinâmicas, o posicionamento e acionamento da árvore devem ser sem folgas para evitar vibração e garantir precisão dimensional.

Figura 10 - Tipos de operações envolvendo fresadoras



Fonte: (<http://tecmeccanico.blogspot.com.br> - acessado em 09/08/2014).

2.2.1 Evolução Histórica

A fresadora teria sido inventada em 1818, pelo norte-americano Eli Whitney, para a fabricação de peças para rifles. Os EUA estavam em guerra civil e Eli queria fornecer para o governo 10000 armas em um prazo de apenas 2 anos. Esta fresadora não dispunha de motor. O movimento do eixo árvores era conseguido através do giro de um volante que trabalhava sobre um parafuso com rosca-sem-fim (<http://www.vetorcnc.com> - acessado em 09/08/2014).

Em 1820, o também norte-americano Robert Johnson adaptou a roda de um moinho d'água ao eixo árvore da fresadora para que conseguisse um trabalho mais produtivo. A força da água movia a grande roda que, através de algumas correias e polias levava o movimento até o eixo árvore da máquina.

Em 1848 a “Robbins e Lawrence”, fez uma fresadora mais robusta e precisa. Esta fresadora tinha guias e barramentos, além de um sistema com manivelas com fusos e porcas, bem parecido com o utilizado nas fresadoras atuais. Já havia inclusive um cabeçote vertical que possibilitava uma gama maior de trabalhos e o movimento era conseguido através de moinhos ou motores à vapor.

Em 1862, o engenheiro Joseph R. Brown, inventou a primeira fresadora universal. Ele é o fundador de uma das mais importantes fábricas de máquinas operatrizes existente até hoje, a "Brown e Sharpe". No final do século XIX, a empresa “Brown e Sharpe” já fabricava fresadoras com uma rica gama de acessórios. Ele acrescentou à fresadora o aparelho divisor, alavancas para trocas de velocidade e rotação e a maioria dos acessórios que conhecemos hoje em dia. Esta fresadora inventada por Joseph é praticamente a mesma que é encontrada nas oficinas e no comércio dos dias atuais, existem apenas algumas mudanças estruturais para que as fresadoras modernas sejam mais resistentes e precisas.

A partir da década de 70, com o aparecimento do CNC, as fresadoras ganharam muita rapidez eficiência qualidade no trabalho. Hoje em dia, com o auxílio do computador, estas máquinas conseguem realizar a usinagem de praticamente qualquer peça (UFPA, 2012).

As fresadoras podem ser classificadas de diversas formas, sendo que as principais levam em consideração o tipo de avanço (manual ou automático), a estrutura (de oficina ou de produção), a posição do eixo árvore (vertical, horizontal, universal, etc) e a sua aplicação (convencional, pantográfica, chaveteira, dentadora, copiadora).

Quanto ao sistema de avanço automático pode ser utilizado sistema elétrico ou hidráulico

As fresadoras são classificadas, na maioria dos casos, de acordo com a posição do eixo-árvore em relação à mesa de trabalho. Abaixo uma breve descrição das características de cada tipo:

2.2.2 Fresadora horizontal

Utiliza a fresa montada sobre um eixo horizontal. É utilizado para trabalho de faceamento na horizontal e para efetuar ranhuras e perfis retilíneos. A ferramenta mais empregada é a fresa cilíndrica.

Principais características:

- Coluna é responsável pela movimentação vertical;
- Mesa possui carro transversal onde são fixadas as peças de trabalho.

Com o deslocamento vertical da coluna, a força de avanço não é alterada com o movimento do carro transversal.

Figura 11 - Fresadora horizontal



Fonte: (<http://herramientastop.blogspot.pt> - acessado em 09/08/2014).

2.2.3 Fresadora vertical

Dispõe somente do eixo árvore vertical. São máquinas muito robustas e empregadas em serviços com necessidade de grandes potencias. Isto tudo devido à grande rigidez permitida pela forma da coluna e pela disposição da cadeia cinemática (engrenagens, eixos e rolamentos). Servem para facear e efetuar ranhuras e perfilados retilíneos ou circulares.

Principais características:

- Robustez maior que dos demais modelos
- Fabricação de grandes peças

Figura 12 - Fresadora vertical



Fonte: (<http://spanish.alibaba.com> - acessado em 09/08/2014).

2.2.4 Fresadora copiadora

Esta máquina é chamada duplicadora ou máquina fresadora com copiador automático. Ela possibilita o terceiro movimento à operação executada pela contornadora. O gabarito usado nesta máquina deve ser uma réplica em 3 dimensões da peça a ser executada. O apalpador executa mais a profundidade de corte além dos 2 movimentos do apalpador da máquina anterior.

Principais características:

- Presença de apalpador copiador
- O acionamento de avanço deve ser bastante rígido, pois trabalha conjuntamente com o apalpador
- Apalpadores em versões bidimensionais e 2,5 D
- Os apalpadores bidimensionais trabalham nos eixos x e y
- Os apalpadores 2,5D trabalham no eixo vertical

Figura 13 - Fresadora copiadora



Fonte: (<http://seulance.com.br> - acessado em 09/08/2014).

2.2.5 Fresadora universal

É uma derivada da fresadora horizontal. Pode utilizar as fresas tanto em árvores horizontais como em verticais, podendo inclinar horizontalmente a mesa. Além dos serviços normais da fresadora horizontal, também pode efetuar ranhuras helicoidais sobre superfícies cilíndricas e setores circulares perfilados.

Principais características

- Base, mesa giratória, cabeçote de fresamento flexível
- Usinagem em todas as direções com ferramentas de geometrias complexas
- Fabricação de pequenas e médias peças

Figura 14 - Fresadora universal



Fonte: (<http://www.clarkmachine.com.br> - acessado em 09/08/2014).

2.2.6 Fresadora portal *GANTRY*

O centro de usinagem tipo *GANTRY* é adequado para usinagem de peças complexas, grandes e médias. É versátil e amplamente usado para fresagem, perfuração, mandrilagem, parafusamento, alargamento, e outras operações, em indústrias de automóvel, de aviação, de moldes e outras. É uma máquina de grande precisão na usinagem em alta velocidade e recursos de troca automática de ferramentas e o uso de *kits* e *pallets*.

Figura 15 - Fresadora *GANTRY*



Fonte: (<http://www.zonacnc.com> - acessado em 09/08/2014).

2.3 FURAÇÃO

Furação é um processo de usinagem onde o movimento de corte é circular e o movimento de avanço é linear na direção do eixo de rotação da ferramenta. Este é um processo muito utilizado pela indústria. Cerca de 20% a 25% das máquinas-ferramenta existentes são furadeiras, o que evidencia a posição de destaque que o processo de furação ocupa dentro dos processos de usinagem, dado que a grande maioria das peças de qualquer tipo de indústria possui ao menos um furo. Em geral, as peças têm de ser furadas em cheio ou terem seus furos alargados através deste processo (AGOSTINHO, 2004).

A furação com broca helicoidal não permite obter bons acabamentos superficiais ($R_a = 3,2$ a $6,3 \mu\text{m}$) nem boas tolerâncias dimensionais (IT11). Isso faz com que frequentemente seja necessária a realização de uma operação de acabamento do furo feito com broca helicoidal (AGOSTINHO, 2004).

Essas operações podem ser: alargamento, mandrilamento, brochamento, retificação interna, etc.

No processo de furação devem-se observar os seguintes fatores:

- Diâmetro do furo;
- Profundidade do furo;
- Tolerâncias de forma e de medidas;
- Volume de produção.

2.3.1 Evolução histórica

A evolução do processo de furação não se deu da mesma forma que os processos de torneamento e fresamento. Enquanto a evolução dos processos de torneamento e fresamento se dava pela introdução do metal duro e materiais cerâmicos nas ferramentas de corte (o que gerou um ganho expressivo de produtividade, dado que a velocidade de corte pode ser elevada consideravelmente); no processo de furação a inovação veio da variação na geometria das brocas utilizadas (UFPA, 2012)

Isso permitiu um aumento da vida das ferramentas e um ganho de qualidade nos furos executados, mas não gerou aumento significativo na velocidade de corte dado que o material permaneceu inalterado: aço rápido. A introdução do metal duro como material de fabricação de brocas era impossibilitada pela inexistência de máquinas-ferramenta com potência e capacidade de rotação suficiente para possibilitar a obtenção da faixa de velocidades de corte necessárias. A utilização de brocas de metal duro e cerâmicas implica no aumento da rotação a valores acima da faixa oferecida pelas máquinas convencionais.

O simples aumento da rotação das máquinas-ferramenta não era suficiente para garantir a introdução de novos materiais para fabricação de brocas. Era também necessário que as máquinas apresentassem boas propriedades de potência e rigidez. O desenvolvimento da tecnologia do comando numérico para máquinas-ferramenta disponibilizou os requisitos de potência, rigidez e capacidade de rotação do eixo-árvore.

O advento das máquinas de comando numérico tornou possível a utilização de brocas de metal duro e cerâmica e como esses materiais já tinham passado por um processo de evolução que já durava algumas décadas, foram logo incorporados ao rol dos materiais utilizados na fabricação de brocas. As vantagens da utilização desses materiais são evidentes, como a redução do tempo de usinagem e o melhor acabamento dos furos, obtidas devido à elevação da faixa de velocidades de corte.

A possibilidade de se utilizar brocas de metal duro e de cerâmica fez com que a furação se recuperasse do atraso que se encontrava em relação aos processos de torneamento e fresamento, no que diz respeito à faixa de velocidades de corte empregada. O estudo do desempenho das brocas de metal duro e de cerâmica criou um vasto campo de pesquisas visando o aproveitamento máximo de suas potencialidades.

A recuperação do atraso tecnológico fez com que a furação seguisse as tendências atuais dos demais processos.

As furadeiras são máquinas-ferramenta destinadas à execução de operações de furar, escarear, alargar, rebaixar e roscar com machos. São compostas em geral de um cabeçote, chamado fuso, que põe em rotação a broca.

Há vários equipamentos disponíveis no mercado. Abaixo uma breve descrição das características de cada tipo.

2.3.2 Furadeira portátil

A força de avanço vem do operador que força a furadeira contra o material, enquanto a rotação vem de um motor da própria furadeira.

Seu maior mercado é para fins domésticos, sem apelo industrial, embora também seja bastante utilizado em indústrias para pequenas operações de ajustes e reparos. Pode ser transportada com facilidade e pode-se operá-la em qualquer posição. Atualmente no mercado já é possível encontrar furadeiras portáteis movidas a bateria, eliminando, portanto, a necessidade de uma fonte de alimentação externa. Também são utilizadas com frequência como esmerilhadeira, marteletes, politriz e parafusadeiras.

Principais características:

- Versátil;
- Baixa qualidade dimensional e de acabamento dos furos;
- Baixa potência;
- Sem necessidade de fonte de alimentação externa;
- Avanço manual.

Figura 16 - Furadeira portátil



Fonte: (<http://www.solucoesindustriais.com.br> - acessado em 09/08/2014).

2.3.3 Furadeira de coluna

A furadeira de coluna é uma máquina versátil que possibilita diversos tipos de serviços como furação, rosqueamento e até pequenas fresagens usando uma mesa coordenada, visto que ela possui uma grande facilidade e segurança em suas operações tornando os furos mais precisos e robustos.

A furadeira de coluna possibilita furações de média escala e diâmetro, ela possui sua base muito rígida, larga e pesada que é responsável por sustentar a máquina. A furadeira de coluna é composta por sua base, coluna, cabeçote engrenado, motor e *spindle* com avanço manual.

A furadeira de coluna serve como um meio preciso de localizar e manter a direção do furo que deve ser feito, além de possuir uma alavanca que facilita a introdução da broca no material. A furadeira de coluna possui diferentes velocidades de rotação adequadas para os diferentes tipos de trabalho.

Principais características:

- Simples;
- Melhor acabamento;
- Avança automático ou manual.

Figura 17 - Furadeira de coluna



Fonte: (<http://www.solaiautomacao.com.br> – acessado em 09/08/2014).

2.3.4 Furadeira radial

A furadeira radial possui um cabeçote móvel radialmente em 360° horizontalmente, além de possuir suporte de ferramentas com inclinação variável em 360° verticalmente. Em geral possui uma mesa de coordenadas em três eixos (x,y,z), além de ter inclinações da mesa em 180°. É destinada à furação de peças grandes em vários pontos, dada a possibilidade de deslocamento do cabeçote.

Possui avanços automáticos e refrigeração da ferramenta por meio de bomba.

O sistema de cabeçote móvel elimina a necessidade de reposicionamento da peça quando se deseja executar vários furos. Pode-se levar o cabeçote a qualquer ponto da bancada, diminuindo o tempo de produção. Recomendada para peças de grandes dimensões, a serem furadas em pontos afastados da periferia.

Principais características:

- Indicado para peças pesadas;
- Maior possibilidade de movimentação do cabeçote, permitindo efetuar a furação sem movimentar a peça;
- Avanço automático.

Figura 18 - Furadeira radial



Fonte: (<http://www.atlasmaq.com.br> - acessado em 09/08/2014).

2.3.5 Furadeira de árvores múltiplas

Úteis para trabalhos em peças que têm que passar por uma série de operações, como furar, contrapuncionar, mandrilar, alargar furos e rebaixar cônica e cilíndricamente.

No caso de furadeiras de múltiplas árvores pode-se ter, basicamente, dois tipos distintos de acordo com o motor. Pode-se ter máquinas onde cada árvore possui seu próprio motor ou quando todas as árvores compartilham de um mesmo motor.

As furadeiras múltiplas são as máquinas utilizadas nas linhas de produção, pois aceleram a fabricação. Podem ser ajustadas para executar as várias etapas de um furo, como furar, alargar, escarear, rebaixar, etc., em sequência. Também podem ser ajustadas para efetuar diversos furos em uma só operação. Em algumas destas máquinas pode-se ajustar cada árvore livremente, dentro de seus limites, e ter sua própria velocidade de rotação.

Principais características:

- Possibilidade de efetuar vários furos simultaneamente;
- Avanço comum para todos os furos;
- Rotação independente para cada árvore;
- Maior produtividade.

Figura 19 - Furadeira de árvores múltiplas



Fonte: (<http://www.cimm.com.br> – acessado em 09/08/2014).

2.4 FORJAMENTO

Forjamento é o nome genérico de operações de conformação mecânica efetuada com golpes rápidos e repetidos (martelo de queda livre ou acionados) ou por esforço de compressão sobre um material dúctil, de tal modo que ele tende a assumir o contorno ou perfil da ferramenta de trabalho. Na maioria das operações de forjamento emprega-se um ferramental constituído por um par de ferramentas de superfície plana ou côncava, denominado matriz ou estampo. A maioria das operações de forjamento é executada a quente; contudo, uma grande variedade de peças pequenas, tais como parafusos, pinos, porcas, engrenagens, pinhões, etc., são produzidas por forjamento a frio.

A indústria do forjamento emprega cerca de 32 mil pessoas na Europa. Cerca de 50% da sua produção destina-se ao mercado automotivo, máquinas agrícolas e de movimentação de terras; 25% à indústria aeroespacial e a parcela restante à indústria metal-mecânica em geral (UTL, 2011).

Em média, um carro de passageiros incorpora mais de 250 componentes forjados como válvulas e bielas, engrenagens, juntas, anéis, cubos de roda, braço de suspensão, etc (UTL, 2011).

Figura 20 - Peças forjadas



Fonte: (<http://esperancaforjados.com.br> - acessado em 10/08/2014).

2.4.1 Evolução histórica

O forjamento é o mais antigo processo de conformar metais, tendo suas origens no trabalho dos ferreiros de muitos séculos antes de Cristo. Há evidências de que o forjamento foi usado no Egito antigo, Grécia, Pérsia, Índia, China e Japão para a fabricação de armas, joias e uma variedade de utensílios. Naquela época, os artesãos que dominavam as técnicas do forjamento eram tratados com muito respeito e consideração. Por volta de 1600 A.C., na ilha de Creta antiga, placas de pedra gravadas eram usadas como matrizes para gravação em ouro e prata. Isto evoluiu para a fabricação de moedas, mediante um processo semelhante, cujos registros datam de cerca de 800 A.C. Matrizes mais complexas foram usadas em Roma, por volta de 200 A.C. (SINGER, 1967). A evolução do forjamento permaneceu estagnada durante muitos séculos, até o surgimento do martelamento com guia, no final do século VIII D.C. Este desenvolvimento permitiu o ingresso definitivo do forjamento na indústria, como processo de fabricação. A substituição do braço do ferreiro ocorreu nas primeiras etapas da Revolução Industrial. Atualmente existe um variado maquinário de forjamento, capaz de produzir peças das mais variadas formas e tamanhos, desde alfinetes, pregos, parafusos e porcas, até rotores de turbinas e asas de avião (SINGER, 1967).

Figura 21 - Processo de forja na antiguidade



Fonte: (SINGER, 1967).

O forjamento pode ser dividido em dois grandes grupos de operações: Forjamento em Matriz Aberta ou Forjamento Livre e Forjamento em Matriz Fechada. Também pode ser dividido entre Forjamento a Frio e Forjamento a Quente; essa classificação é dependente da temperatura na qual as operações de forjamento ocorrem.

Quadro 1 - Classificação do processo quanto a temperatura

	TEMPERATURA
Frio	$< 0.3 T_{\text{fusão}}$
Quente	$> 0.6 T_{\text{fusão}}$

Fonte: (adaptado de MAKENZIE. sd).

2.4.2 Forjamento a quente

O forjamento a quente é o processo de conformação onde o metal a ser forjado se encontra acima da temperatura de recristalização. Isto faz com que durante a deformação os mecanismos de recuperação e recristalização aconteçam, inibindo a geração de tensões internas e favorecendo a ductilidade pela formação e aumento dos grãos. Abaixo é apresentado um quadro que relaciona alguns metais e suas faixas de temperatura para forjamento.

Quadro 2 – Faixa de trabalho dos metais e ligas

Metal ou ligas	Faixa aproximada de temperatura de forjamento, °C
Ligas de alumínio	400-550
Ligas de cobre	600-900
Aços carbono e de baixa liga	850-1150
Aços inoxidáveis martensíticos	1100-1250
Aços "Maraging"	1100-1250
Aços inoxidáveis austeníticos	1100-1125
Ligas de níquel	1000-1150
Aços inoxidáveis semi-austeníticos PH	1100-1250
Ligas de titânio	700-950
Superligas a base de ferro	1050-1180
Superligas a base de Cobalto	1180-1250
Ligas de nióbio	950-1150
Ligas de tântalo	1050-1350
Ligas de molibdênio	1150-1350
Superligas a base de níquel	1050-1200
Ligas de tungstênio	1220-1300

Fonte: (MAKENZIE, sd).

Para que o forjamento seja bem sucedido é necessário que todo o corpo esteja a uma temperatura uniforme.

No forjamento a quente, deve-se ter um cuidado especial por conta da formação da carepa (um óxido originado ao redor da peça aquecida que pode chegar de 2% a 4% do peso) que como qualquer óxido, tem como característica uma dureza elevada podendo ocasionar defeitos a peça ou até mesmo danificar a matriz (MAKENZIE, sd).

Assim como no forjamento a frio, este processo se utiliza de prensas martelo, hidráulicas e excêntricas diferindo na energia/força que será aplicada (menor, pois o metal aquecido flui com maior facilidade) e na resistência as altas temperaturas.

As matrizes podem ser tanto abertas (livres) quanto fechadas, sendo que a primeira é bastante utilizada para se conseguir as dimensões necessárias a segunda. Normalmente são necessárias varias etapas para se obter a peça final.

As variações estruturais devido ao trabalho a quente proporcionam um aumento na ductilidade e na tenacidade, comparado ao estado fundido. Geralmente, a estrutura e propriedades dos metais trabalhados a quente não são tão uniformes ao longo da seção reta como nos metais trabalhados a frio e recozidos, já que a deformação é sempre maior nas camadas superficiais. O metal possuirá grãos recristalizados de menor tamanho nesta região. Como o interior do produto estará submetido a temperaturas mais elevadas por um período de tempo maior durante o resfriamento do que as superfícies externas pode ocorrer crescimento

de grão no interior de peças de grandes dimensões, que resfriam vagarosamente a partir da temperatura de trabalho.

Figura 22 - Forjamento a quente



Fonte: (<http://www.revistaforge.com.br/> - acessado em 10/08/2014).

A maioria das operações de trabalho a quente é executada em múltiplos passes ou estágios; em geral, nos passes intermediários a temperatura é mantida bem acima do limite inferior do trabalho a quente para se tirar vantagem da redução na tensão de escoamento, embora com o risco de um crescimento de grão. Como, porém, deseja-se usualmente um produto com tamanho de grão pequeno, a temperatura dos últimos passes (temperatura de acabamento) é bem próxima do limite inferior e a quantidade de deformação é relativamente grande. Pequenos tamanhos de grãos darão origem a peças com melhor resistência e tenacidade (MAKENZIE, sd).

Na conformação a quente deve-se tomar cuidado com as quedas de temperatura. Esta queda de temperatura pode ocorrer devido ao esfriamento da peça em contato com o ar e a transmissão de calor da peça para a ferramenta fria. Sendo que os fatores que influem na transmissão do calor são tempo de contato peça-ferramenta e a superfície da peça.

Durante a conformação ocorre também um aquecimento da peça devido à energia de deformação, porém menos importante do que as perdas acima mencionadas.

Somente em casos de aços de alta liga, submetido à elevada conformação, é possível que este aquecimento se sobreponha ao esfriamento.

Deve-se observar no forjamento o fenômeno de contração do metal. O metal aquecido à temperatura de forjamento dilata, logo, ao resfriar-se ele se contrai. Isso deve ser levado em

consideração quando se projeta uma matriz para forjamento, sendo que esta deverá ser construída um pouco maior, porque se isso não ocorrer, a peça resultante apresentará dimensões menores do que projetada. Na prática, podem-se considerar os seguintes valores para a contração, mostrados no quadro seguinte.

Quadro 3 – Fator de contração para forjamento a quente

Material	Contração
Aço	1 % (de 1020 a 20 ⁰ C)
Cobre e bronze	0,8% (de 520 a 20 ⁰ C)
Latão	0,9% (de 520 a 20 ⁰ C)
Ligas leves	0,9% (de 420 a 20 ⁰ C)

Fonte: (MAKENZIE, sd).

De um ponto de vista prático o Trabalho a quente – que é o estágio inicial da conformação dos materiais e ligas – apresenta um certo número de vantagens, mas também de problemas, como listado em seguida.

VANTAGENS

- Menor energia requerida para deformar o metal, já que a tensão de escoamento decresce com o aumento da temperatura;
- Aumento da capacidade do material para escoar sem se romper (ductilidade);
- Homogeneização química das estruturas brutas de fusão em virtude da rápida difusão atômica interna;
- Eliminação de bolhas e poros por caldeamento;
- Eliminação e refino da granulação do material fundido, proporcionado grãos menores, recristalizados e equiaxiais;
- Aumento da tenacidade e ductilidade do material trabalhado em relação ao bruto de fusão.

DESVANTAGENS

- Necessidade de equipamentos especiais (fornos, manipuladores, etc.) e gasto de energia para aquecimento das peças;
- Reações do metal com a atmosfera do forno, levando a perdas de material por oxidação e outros problemas relacionados (p.ex., no caso dos aços, ocorre também decarbonetação superficial; metais reativos como o titânio fica severamente fragilizado

pelo oxigênio e tem de ser trabalhado em atmosfera inerte ou protegido do ar por uma barreira adequada);

- Formação de óxidos, prejudiciais para o acabamento superficial;
- Desgaste das ferramentas é maior e a lubrificação é difícil;
- Necessidade de grandes tolerâncias dimensionais por causa de expansão e contração térmica;
- Estrutura e propriedades do produto resultam menor uniformidade do que em caso de trabalho a frio seguido de recozimento, pois a deformação sempre maior nas camadas superficiais produz nas mesmas uma granulação recristalizada mais fina, enquanto que as camadas centrais, menos deformadas e sujeitas a um resfriamento mais lento, apresentam crescimento de grãos;
- Geração de carepas;
- A matriz fechada deve possuir calhas de rebarba.

2.4.3 Forjamento a frio

O Forjamento a frio tem esse nome, pois é uma deformação plástica de metais, realizada a uma temperatura abaixo da temperatura de recristalização do material forjado, onde o material é forçado por compressão, a fluir entre uma matriz e um macho, resultando na obtenção de peças com forma e tolerâncias de precisão.

É um método usado para mover, sem remover o metal. Esta tecnologia já provou ser altamente econômica. Suas aplicações estão crescendo rapidamente juntamente com seu potencial e desenvolvimento para peças com formas geométricas mais complexas, fabricadas com matérias-primas que permitem maior grau de deformação.

O trabalho a frio é acompanhado do encruamento do metal, que é ocasionado pela interação das discordâncias entre si e com outras barreiras – tais como contornos de grão – que impede o seu movimento através da rede cristalina. A deformação plástica produz também um aumento no número de discordâncias, as quais, em virtude de sua interação, resultam num elevado estado de tensão interna na rede cristalina. Tudo isto resulta macroscopicamente num aumento de resistência e dureza e num decréscimo da ductilidade do material (FILHO. 1997).

Por encontrar-se em baixas temperaturas, a tensão de deformação do material é alta e, portanto exige altas pressões por parte das máquinas e, conseqüentemente, exige forjas de

grande ou médio porte. A carga utilizada para a conformação pode chegar a 15000 toneladas para prensas de grande porte (IFES, 2009). A velocidade de trabalho também influencia na vida da ferramenta, e um patamar de velocidade deve ser escolhido de acordo com a carga aplicada. A vantagem que encontra sobre o forjamento a quente é que após o processo a peça encontra-se já em suas dimensões acabadas, pois não sofreu dilatações por causa do aumento de temperatura.

Todos os materiais que apresentam uma ductilidade à temperatura ambiente podem ser deformados a frio. Fundamentalmente o processo a frio passa a ter vantagens econômicas, dependendo do volume do material e de quanto à peça forjada se aproxima em geometrias da peça pronta.

A maioria dos aços trabalhados no forjamento possui uma resistência mecânica muito alta, o que torna a carga necessária de conformação elevada e conseqüentemente diminui a vida das ferramentas utilizadas. Para que se diminua a resistência desses aços e torne mais amena a carga de aplicação, é interessante que o aço passe por um tratamento térmico de esferoidização.

A cementita em forma de esferas torna mais fácil o escoamento do material entre os grãos, o que diminui a força necessária para a fluidez do aço trabalhado. Para se formar cementita, o aço deve ser aquecido próximo à faixa de sua temperatura de austenitização e depois resfriado lentamente ao ar livre (FILHO, 1997).

O Trabalho a frio também apresentam vantagens e limitações na sua aplicação, como listado em seguida.

VANTAGENS

- Menor quantidade de matéria-prima requerida (a peça pode ser obtida em sua forma final sem nenhuma perda de material ou com pequena quantidade de sobremetal para usinagem ou ainda necessitando apenas operações de furação ou rebarbagem);
- Melhoria das propriedades mecânicas da peça devido ao trabalho de conformação realizado no material (geralmente aumenta o limite de ruptura, o limite de escoamento e a dureza, além de se obter uma estrutura granular orientada na direção do trabalho mecânico aplicado);
- Possibilidade de utilização de matéria-prima mais barata;
- Obtenção de formas especiais (é possível obter peças que não seriam produzidas economicamente por nenhum outro processo);
- Alta produtividade;

- Precisão dimensional;
- Bom acabamento superficial;
- A proteção contra a corrosão é aumentada devido à operação de fosfatização;
- Possibilita a substituição de um material de custo maior (alta liga) forjado a quente, por outro de custo menor (aço carbono) forjado a frio, obtendo-se assim peças forjadas com propriedades mecânicas equivalentes.

DESVANTAGENS

- Necessidade de prensas de maior capacidade;
- Pressões elevadas nas ferramentas, necessitando assim de materiais especiais e geralmente de alto custo;
- Necessidade de recozimentos intermediários para obterem-se grandes deformações;
- Viável economicamente apenas para lotes grandes de peças;
- Tempos de preparação de máquinas e ajuste do ferramental, maiores.

Toda a operação de forjamento precisa de uma matriz. Ela ajuda a fornecer o formato final da peça forjada, além de ser determinante na classificação dos processos de forjamento em aberto ou fechado.

As matrizes de forjamento são submetidas a altas tensões de compressão, altas solicitações térmicas e, ainda, a choques mecânicos. Devido a essas condições de trabalho, é necessário que essas matrizes apresentem alta dureza, elevada tenacidade, resistência à fadiga, alta resistência mecânica a quente e alta resistência ao desgaste. Por isso, elas são feitas, em sua maioria, de blocos de aços-liga forjados e tratados termicamente. Quando as solicitações são ainda maiores, as matrizes são fabricadas com metal duro.

2.4.4 Forjamento em matriz aberta

No Forjamento em matriz aberta, o material é conformado entre matrizes planas ou de formato simples, que normalmente não se tocam. Neste processo são empregadas matrizes abertas ou ferramentas especiais.

Quando se trata de processo de martelo pela ação da queda, a sequência de deformação e a obtenção da forma da peça são definidas pela habilidade do operador do equipamento. A peça deve ser manipulada frequentemente (girando-a periodicamente e/ou movendo-a pra frente e pra trás) para se atingir a mudança de forma desejada. Associando-se

tais fatores, conclui-se que a qualidade geral esperada para a peça é baixa se comparada à obtida no forjamento em matriz fechada. É usado geralmente para fabricar peças grandes, com forma relativamente simples (por exemplo, eixos de navios e de turbinas, ganchos, correntes, âncoras, alavancas, excêntricos, ferramentas agrícolas, etc.) e em pequeno número; e também para pré-conformar peças que serão submetidas posteriormente a operações de forjamento mais complexas, com o objetivo de redistribuir o metal para posições mais adequadas ao forjamento subsequente.

Uma importante contribuição do forjamento livre a quente é a obtenção de uma estrutura metalúrgica favorável no metal, devida não só aos fenômenos de recuperação e recristalização, mas, também à diminuição da porosidade interna nas peças forjadas.

Figura 23 - Forjamento em matriz aberta



Fonte: (<http://forjaria.weebly.com> - acessado em 10/08/2014).

2.4.5 Forjamento em matriz fechada

No Forjamento em matriz fechada, o material é conformado entre duas metades de matriz que possuem, gravadas em baixo-relevo, impressões com o formato que se deseja fornecer à peça. A deformação ocorre sob alta pressão em uma cavidade fechada ou semifechada, permitindo assim, obter-se peças com tolerâncias dimensionais melhores do que no forjamento em matriz aberta. Neste processo, a influência do operador é mínima; a prensa, seja mecânica ou hidráulica, trabalha com a velocidade de deformação controlada.

Peças de formas complexas ou de precisão não podem ser obtidas por técnicas de forjamento em matriz aberta, exigindo matrizes especialmente preparadas que contenham o

negativo da peça a ser produzida. Tais matrizes são caras, exigindo na maioria das vezes, alta produção para justificar seu custo.

A obtenção de um formato complexo normalmente não é possível com uma única etapa de trabalho, exigindo uma ou mais etapas de pré-forjamento.

Diante da dificuldade para se distribuir precisamente o material nas etapas de forjamento precedentes, utiliza-se na maioria dos casos um excesso de material, que já na etapa de esboço se permite escapar por entre as duas matrizes, formando uma rebarba que por vezes é removida (cortada) antes do forjamento final nas matrizes de acabamento.

Nos casos em que a deformação ocorre dentro de uma cavidade totalmente fechada, sem zona de escape, é fundamental a precisão na quantidade fornecida de material. Uma quantidade insuficiente implica falta de enchimento da cavidade e falha no volume da peça; um excesso de material causa sobrecarga no ferramental, com probabilidade de danos ao mesmo e ao maquinário.

Dada a dificuldade de dimensionar a quantidade exata fornecida de material, é mais comum empregar um pequeno excesso.

As matrizes são providas de uma zona oca especial para recolher o material excedente ao término do preenchimento da cavidade principal. O material excedente forma uma faixa estreita (rebarba) em torno da peça forjada. A rebarba exige uma operação posterior de corte (rebarbação) para remoção.

Essa rebarba precisa ser fina para assegurar o preenchimento total da matriz e tolerâncias rigorosas. Isto porque uma rebarba fina, em presença de atrito, gera alta pressão de conformação. Tais características levam à obtenção de produtos de elevada qualidade, que em alguns casos apresentam-se quase que totalmente acabados, principalmente se considerar o forjamento a frio onde as tolerâncias dimensionais e o acabamento superficial conseguido aproximam-se dos obtidos na usinagem por torneamento.

De um modo geral, todos os materiais conformáveis podem ser forjados. Os mais utilizados para a produção de peças forjadas são os aços (comuns e ligados, aços estruturais, aços para cementação e para beneficiamento, aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, aços ferramenta), ligas de alumínio, de cobre (especialmente os latões), de magnésio, de níquel (inclusive as chamadas superligas, como Waspaloy, Astraloy, Inconel, Udimet 700, etc., empregadas principalmente na indústria aeroespacial) e de titânio (<http://presstecnica.com.br> – acessado em 10/08/2014).

O material de partida é geralmente fundido ou, mais comumente, laminado - condição esta que é preferível, por apresentar uma microestrutura mais homogênea. Peças forjadas em matriz, com peso não superior a 2 ou 3 kg, são normalmente produzidas a partir de barras laminadas; as de maior peso são forjadas a partir de tarugos, quase sempre também laminados, e cortados previamente no tamanho adequado. Peças delgadas como chaves de boca, alicates, tesouras, facas, instrumentos cirúrgicos, etc., podem ser forjadas a partir de recortes de chapas laminadas (<http://presstecnica.com.br> – acessado em 10/08/2014).

A decomposição da conformação de uma peça complexa entre diversas etapas de trabalho e ferramentas permite em muitos casos economizar energia e material, reduzir o desgaste das ferramentas e aumentar a precisão do produto forjado.

As operações de obtenção das formas intermediárias de uma peça constituem a conformação intermediária, que se compõe normalmente de três etapas: distribuição de massas, dobramento (se for o caso) e formação da seção transversal (fase de esboço).

Na etapa de distribuição de massas ocorre a retirada de material das porções nas quais a seção transversal deva ser reduzida, e o acúmulo do material nas posições onde a seção deva ser aumentada.

As operações de forjamento livre mais empregadas para esta etapa são o estiramento, o encalcamento, o alargamento e o rolamento, sendo o recalque usado para aumentar a secção transversal.

O dobramento (segunda etapa) pode ser executado durante o forjamento, sem um estágio especial, quando for paralelo ao movimento da ferramenta. Em caso contrário, é efetuado numa etapa específica durante ou mesmo após o forjamento da peça. Pode envolver ou não uma redução da seção transversal da peça e uma defasagem do eixo da mesma, como o caso do forjamento de virabrequins.

A formação da seção transversal, ou fase de esboço, é a última etapa da conformação intermediária, na qual as seções transversais são aproximadas das secções definitivas da peça, de modo que as ferramentas acabadoras imprimam a forma e dimensões exatas da peça, com um consumo mínimo de energia. Esta etapa envolve uma distribuição de massa perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça.

É preciso observar que, às vezes, é necessário mais de um estágio de esboço, quando uma única ferramenta não é capaz de estabelecer o fluxo adequado de metal ou exige um consumo de energia além da capacidade do equipamento disponível.

Na etapa de conformação final, ao iniciar-se a formação da rebarba, em virtude da presença do estrangulamento ou garganta da rebarba entre as duas matrizes, as tensões

compressivas na cavidade das matrizes elevam-se consideravelmente e causam o preenchimento de todos os recessos dessa cavidade.

As funções da rebarba, portanto, são duas:

- Atuar como "válvula de segurança" para o excesso de metal na cavidade das matrizes;
- Regular o escapamento do metal, aumentando a resistência ao escoamento do sistema de modo que a pressão cresça até valores elevados, assegurando que o metal preencherá todos os recessos da cavidade.

Procura-se dimensionar a rebarba de modo que a extrusão do metal através da garganta seja mais difícil do que o preenchimento do mais intrincado detalhe das matrizes; mas isto não deve ser feito em excesso de modo a criar cargas de forjamento intensas demais, com os consequentes problemas de desgaste ou quebra das matrizes. O ideal é projetar a relação de rebarba mínima necessária para o total preenchimento das matrizes.

A rebarba da forma final é removida em uma operação posterior de rebarbação, representando uma perda inevitável de material no processo.

Figura 24 - Forjamento em matriz fechada



Fonte: (<http://www.volani.com.br> – acessado em 10/08/2014).

2.4.6 Tratamento térmico em peças forjadas

As peças forjadas são submetidas a tratamentos térmicos posteriores com a finalidade de remoção das tensões internas introduzidas durante o forjamento e o resfriamento do

forjado, homogeneização da estrutura da peça forjada e melhoria de sua usinabilidade e de suas propriedades mecânicas.

Os principais tratamentos térmicos empregados em produtos de aços forjados são recozimento e normalização que visam melhorar as propriedades mecânicas e a usinabilidade dos forjados.

Dependendo da aplicação de uma peça forjada, suas propriedades mecânicas também podem ser melhoradas por um tratamento térmico, anterior ou posterior à operação de forjamento.

Abaixo segue breve descrição dos principais tratamentos térmicos aplicados em peças forjadas.

- **Têmpera**

Tratamento térmico de endurecimento, realizado em todos os aços temperáveis. Realiza-se têmpera com resfriamento em óleo ou em água em fornos com atmosfera controlada e protetora.

- **Revenido**

Tratamento térmico que visa corrigir certos efeitos da têmpera, quando se manifesta uma dureza ou fragilidade excessiva ou quando se receiam tensões internas perigosas. Realizado em forno tipo poço com circulação de ar forçada.

- **Recozimento**

Este processo deve anteceder o forjamento para que o material se torne menos quebradiço, ou mais maleável e dúctil, e também reduzir as tensões internas. Este tratamento é feito aquecendo-se o aço acima da zona crítica e deixá-lo resfriar lentamente.

- **Normalização**

É feito para melhorar a estrutura cristalina do aço, obtendo assim melhores propriedades mecânicas. É feito aquecendo-se o material acima da zona crítica e deixando-o resfriar ao ar. Isto permite um refinamento no tamanho do grão.

2.4.7 Equipamentos para forjamento

Basicamente existem duas grandes famílias de equipamentos para forja, as prensas e os martelos.

Os martelos de forja deformam o metal através de rápidos golpes de impacto na superfície do mesmo. Geram deformação irregular nas fibras superficiais, dando grande resistência mecânica a pontas de eixo, virabrequins, etc.

Os três tipos básicos de martelo são descritos a seguir.

- **Martelo de queda livre com prancha**

No martelo de queda livre, a matriz superior e a massa cadente são elevadas por rolos de atrito engrenados à uma prancha, correntes ou outros mecanismos.

Quando o mecanismo é liberado, a massa cadente cai sob a influência da gravidade para produzir a energia da pancada. Após o impacto, o mecanismo é imediatamente elevado para nova pancada.

O forjamento com um martelo é normalmente feito com pancadas repetidas. Os martelos podem atingir entre 60 e 150 pancadas por minuto dependendo do tamanho e capacidade. A energia suprida pelas pancadas é igual à energia potencial devido ao peso da massa cadente e da altura de queda (BRESCIANI, 2011).

Os martelos de queda são classificados pelo peso da massa cadente. Entretanto, uma vez que o martelo é uma máquina limitada energeticamente, no qual a deformação se processa até que a energia cinética seja dissipada pela deformação plástica da peça de trabalho ou pela deformação elástica das matrizes e da máquina, é mais correto classificar essas máquinas em termos da energia transmitida (BRESCIANI, 2011).

Figura 25 - Forjamento em martelo de queda livre



Fonte: (<http://conformacaomecanica.blogspot.pt> - acessado em 10/08/2014)

- **Martelo de duplo efeito**

Uma capacidade maior de forja é atingida com um martelo de duplo efeito no qual o martelo é acelerado no seu curso descendente por pressão de vapor ou ar comprimido em adição à gravidade. O vapor ou ar comprimido podem também ser usados para elevar o martelo no seu curso ascendente (BRESCIANI, 2011).

Figura 26 - Forja em martelo de duplo efeito



Fonte: (<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/> - acessado em 10/08/2014).

- **Martelo de contragolpe**

Nos martelos de queda o choque produzido pela queda da massa é transmitido para toda a estrutura da máquina, bem como para as fundações. Para amenizar este fato foram desenvolvidos os martelos de contragolpe, em que ambas as partes (superior e inferior) se movimentam ao mesmo tempo encontrando-se no meio do percurso. Desta forma a reação do choque praticamente inexiste e não é transmitida para a estrutura da máquina e fundações (BRESCIANI, 2011). Mas dada a configuração deste tipo de martelo temos como desvantagens:

- Maior desalinhamento entre as partes superior e inferior da matriz;
- A força de forjamento deve estar localizada no meio da matriz para evitar grandes atritos entre as massas e as guias;

- Não é possível manipular a peça durante o movimento do martelo;
- Maiores despesas de manutenção.

Figura 27 - Forja em martelo de contragolpe



Fonte: (<http://pt.forginghammer.cn/p4.asp> - acessado em 10/08/2014).

Uma característica comum aos martelos é que em função do forjamento ser feito por meio de golpes, o martelo adquire grande flexibilidade, pois enquanto as prensas são limitadas em termos de força (só podem ser aplicadas se a força requerida for menor que a disponível), nos martelos esta limitação não existe uma vez que o martelo aplicará golpes sucessivos até que a conformação desejada se processe. Desta forma os martelos são mais indicados para o uso com matrizes de múltiplas cavidades em que em um único bloco existem as cavidades para pré-conformação e conformação final.

Outro aspecto relativo aos martelos é que estes requerem em média 400% mais energia, que as prensas, para executar a mesma deformação (Escola Federal de Engenharia – ITAJUBA, sd).

- **Prensa de fuso**

São constituídas de um par porca/parafuso, com a rotação do fuso, a massa superior se desloca, podendo estar fixada no próprio fuso ou então fixada à porca que neste caso deve ser móvel, dando origem a dois subtipos de prensas; as de fuso móvel; e as de porca móvel.

Ligado ao fuso há um disco de grande dimensão que funciona como disco de inércia, acumulando energia que é dissipada na descida. O acionamento das prensas de fuso pode ser de três tipos:

- através de discos de fricção;
- por acoplamento direto de motor elétrico;
- acionado por engrenagens.

O movimento de subida da prensa é realizado pela inversão de rotação do fuso. Este tipo de prensa é muito comum na Europa e se constitui no tipo de prensa mais antigo.

Comparada com as prensas hidráulicas se caracterizam por serem mais rápidas, ocuparem um espaço menor, e possuírem uma manutenção mais simples. Comparada com os martelos se caracterizam por serem mais silenciosas, desgastarem menos as matrizes, necessitarem de fundações menos robustas e serem mais eficiente, aproveitando melhor a energia disponível (Escola Federal de Engenharia – ITAJUBA, sd).

Figura 28 - Prensa de fuso



Fonte: (www.rossimaquinas.com - acessado em 03/09/2014).

- **Prensa excêntrica**

Depois do martelo de forja, a prensa excêntrica é o equipamento mais comumente utilizado.

Pode ser constituído de um par biela/manivela, para transformar um movimento de rotação, em um movimento linear recíproco da massa superior da prensa. Para melhorar a rigidez deste tipo de prensa algumas variações do modelo biela/manivela foram propostos assim nasceram as prensas excêntricas com cunha e as prensas excêntricas com tesoura (Escola Federal de Engenharia – ITAJUBA, sd).

As prensas mecânicas excêntricas são muito usadas para forjar peças de tamanhos médios e pequenos, devido à facilidade de manuseio e ao baixo custo de operação.

O curso do martelo neste tipo de prensa é menor que nos martelos de forjamento e nas prensas hidráulicas. O máximo de carga é obtido quando a massa superior está a aproximadamente 3 mm acima da posição neutra central. São encontradas prensas mecânicas de 300 a 12.000 toneladas (BRESCIANI, 2011). A pancada de uma prensa é mais uma aplicação de carga crescente do que realmente um impacto. Por isto as matrizes sofrem menos e podem ser menos maciças. Porém o custo inicial de uma prensa mecânica é maior que de um martelo.

Figura 29 - Prensa excêntrica



Fonte: (www.ruapiratininga.com.br - acessado em 03/09/2014).

- **Prensa hidráulica**

As prensas hidráulicas são máquinas limitadas na carga, na qual a prensa hidráulica move um pistão num cilindro. A principal característica é que a carga total de pressão é transmitida em qualquer ponto do curso do pistão. Essa característica faz com que as prensas hidráulicas sejam particularmente adequadas para operações de forja do tipo de extrusão. A velocidade do pistão pode ser controlada e mesmo variada durante o seu curso.

A prensa hidráulica é uma máquina de velocidade baixa, o que resulta em tempos longos de contato com a peça que pode levar a problemas com a perda de calor da peça a ser trabalhada e com a deterioração da matriz. Por outro lado, a prensagem lenta de uma prensa hidráulica resulta em forjamento de pequenas tolerâncias dimensionais.

O custo inicial de uma prensa hidráulica é maior do que o de uma prensa mecânica da mesma capacidade (BRESCIANI, 2011).

As prensas hidráulicas são disponíveis numa faixa de 500 a 18.000 toneladas, já tendo sido construídas, também, prensas hidráulicas de 50.000 toneladas (Escola Federal de Engenharia – ITAJUBA, sd).

Figura 30 - Prensa hidráulica



Fonte: (www.jefersonmaquinas.com.br - acessado em 03/09/2014).

2.4.8 Lubrificação

Em diversas situações práticas o principal efeito do atrito é influenciar o acabamento da superfície do produto ou afetar o desgaste das matrizes e ferramentas.

Quando uma superfície sólida em um par que desliza em contato for muito mais dura que a outra (como é típico na combinação ferramenta-peça) as asperezas da superfície mais dura penetrarão na superfície mais mole, deslocando um volume de metal proporcional ao percurso total de deslizamento e à área da seção reta das asperezas, fato que é conhecido como aragem (Escola Federal de Engenharia – ITAJUBA, sd).

A resistência ao atrito devido à aragem é aditiva àquela resultante do cisalhamento de asperezas unidas por aderência. A força de aragem está relacionada com as propriedades de

escoamento da peça e com o tamanho e forma das asperezas. Assim, matrizes lisas são importantes para reduzir a contribuição da aragem ao atrito total. O problema mais sério que se origina de uma lubrificação inadequada é a transferência de material da peça para as ferramentas, que é denominado *pickup*. A transferência de metal ocorre de duas maneiras. Se o filme de lubrificante é desfeito na interface de uma superfície áspera de uma ferramenta, a peça é forçada a penetrar em rebaixos na superfície da ferramenta. Um movimento tangencial subsequente cisalha o metal mole que se projeta para o interior dos vazios superficiais da ferramenta, resultando em absorção de material pela ferramenta (*tool pickup*) e num acabamento ruim da superfície da peça. Se o filme de lubrificante se desfaz sob a ação de pressões elevadas, ocorre uma soldagem a frio localizada entre a ferramenta e a peça (Escola Federal de Engenharia – ITAJUBA, sd).

Quando um pedaço de metal se desprende da superfície da peça, este deixa exposto uma porção limpa de metal que é ainda mais suscetível à colagem a frio. Assim, quando se inicia a absorção de material desprendido (*pickup*), ela geralmente se torna progressivamente pior, levando ao colamento (*galling* e *seizure*). Já que as superfícies das ferramentas estão sujeitas a vários ciclos de deslizamento, elas sofrem um desgaste contínuo durante a utilização. O principal mecanismo de desgaste é a abrasão devida à presença de partículas duras de óxido na superfície (BRESCIANI, 2011).

Uma outra fonte de desgaste é a fadiga superficial proveniente de ciclos de aumentos e decréscimos na pressão interfacial. As tensões térmicas devido ao aquecimento e resfriamento das ferramentas podem também originar o surgimento de fissuras em suas superfícies. Ao se selecionar um lubrificante, a peça, a matriz e o lubrificante devem ser considerados como um único sistema. São várias as funções de um lubrificante em processos de conformação:

- Reduzir atrito de deslizamento entre a matriz e o material;
- Agir no sentido de evitar a soldagem localizada na matriz e na superfície do componente forjado;
- Possuir propriedade isolante para reduzir a troca de calor a fim de minimizar a variação da temperatura na superfície da matriz;
- Possuir propriedade não abrasiva e nem corrosiva;
- Eliminar a carepa e outras impurezas;
- Desenvolver uma pressão balanceada do gases, para auxiliar a rápida extração do forjado da gravura;
- Ser livre de poluentes ou componentes tóxicos e não produzir fumaça;

- Aumentar o limite de deformação que antecede a fratura;
- Controlar acabamento superficial.

Existem diversos requisitos, às vezes contraditórios, para um bom lubrificante adequado para o uso em conformação. Este deve ser capaz de funcionar para um variado espectro de pressões, temperaturas e velocidades de deslizamento. Como uma das características da maioria dos processos de trabalho mecânico é a geração de uma grande quantidade de áreas superficiais novas, o lubrificante deve possuir propriedades de espalhamento e molhabilidade favoráveis. Deve também ser compatível tanto com a matriz quanto com o material da peça com relação à molhabilidade e ao ataque químico, devendo possuir boa estabilidade térmica e resistência a ataque bacteriológico e outros contaminantes de menor importância. Um bom lubrificante produz resíduos que não causam manchas após soldagem ou tratamentos térmicos subsequentes, sendo facilmente removíveis. Finalmente, um lubrificante não deve ser tóxico, inflamável e caro (Escola Federal de Engenharia – ITAJUBA, sd).

Existem duas categorias gerais de lubrificação: parcial e hidrodinâmica. Na lubrificação parcial as superfícies não estão totalmente separadas por um filme de lubrificantes. Esta é a situação mais comum para a lubrificação na conformação mecânica.

Na lubrificação hidrodinâmica as duas superfícies se encontram totalmente separadas por um filme lubrificante. Esta situação existe em mancais, mas não é comum na conformação. Ela ocorre, por exemplo, na extrusão hidrostática e no estiramento de arames com lubrificação pressurizada.

A utilização de um filme lubrificante espesso tal como na extrusão de aço com vidro viscoso como lubrificante, pode ser considerada uma lubrificação quase hidrodinâmica. Os lubrificantes reduzem o atrito ao introduzirem uma interface que seja facilmente cisalhada.

Materiais orgânicos com cadeias moleculares longas são exemplos típicos de lubrificantes parciais. Estas moléculas polares prendem uma de suas extremidades à superfície do metal; como exemplos típicos podemos citar os ácidos graxos, tal como o ácido oléico, que forma um sabão metálico quando misturado com água ou óleo.

Os lubrificantes orgânicos possuem baixa estabilidade térmica, não podendo ser utilizados acima de 200 a 300°C (Escola Federal de Engenharia – ITAJUBA, sd).

Os aditivos de extrema pressão ("aditivos EP") reagem localmente quando o filme da lubrificação parcial é quebrado sob a ação de calor e pressão. Quando uma superfície nova é formada devido à quebra do filme de lubrificação parcial, os aditivos EP reagem

quimicamente para formar um composto com baixa resistência interfacial ao cisalhamento. Compostos halogênicos e enxofre coloidal são exemplos de aditivos EP.

Frequentemente aplicam-se revestimentos de conversão (óxidos, fosfatos ou cromatos) à peça para servirem como uma base para a retenção de lubrificante, sendo que alguns destes revestimentos já possuem propriedades lubrificantes.

Uma lubrificação quase hidrodinâmica pode ser obtida através de filmes lubrificante contínuos, que podem ser constituídos de sólidos dúcteis moles (tais como chumbo, cobre, teflon), polietileno ou sólidos com uma estrutura lamelar (tais como grafite, nitrato de boro e certos óxidos). Uma lubrificação com filmes contínuos pode também ser obtida com fluidos como vidro fundido ou com dispersão de grafite. Em condições de lubrificação completa por filme fluido a resistência interfacial ao cisalhamento é um produto da viscosidade do filme e da taxa de deformação cisalhante.

O acabamento superficial de um produto trabalhado depende das condições de atrito. No trabalho a frio as asperezas superficiais são aplanadas por uma ferramenta lisa e polida, produzindo uma superfície brilhosa ou polida. Uma ferramenta áspera nunca produzirá um acabamento superficial melhor que o seu próprio. Um acabamento sem brilho é produzido com lubrificação de filme espesso e ferramentas lisas. Quando a peça não é conformada em contato direto com as ferramentas, como em certas operações de conformação de chapas, o acabamento superficial é controlado pelas propriedades da peça; daí resultam defeitos tais como casca de laranja e restrições ao estiramento.

2.4.9 Defeitos

O Defeito é uma falha no componente típica de processo, mas não inevitável. Os produtos forjados também são vulneráveis a alguns defeitos típicos como:

- Vazios: causados pela falta de material para total preenchimento da matriz;
- Falta de redução: caracteriza-se pela penetração incompleta do metal na cavidade da ferramenta. Isso altera o formato da peça e acontece quando são usados golpes rápidos e leves do martelo;
- Trincas superficiais: causadas por trabalho excessivo na superfície da peça em temperatura baixa ou devido ao aquecimento da peça em fornos com atmosfera rica em enxofre;

- Trincas nas rebarbas: causadas pela presença de impurezas nos metais, devido à contração do material (tanto no forjamento quanto no tratamento térmico) ou porque as rebarbas são pequenas. Elas se iniciam nas rebarbas e podem penetrar na peça durante a operação de rebarbação;
- Trincas internas: originam-se no interior da peça, como consequência de tensões originadas por grandes deformações;
- Gotas frias: são descontinuidades originadas pela dobra de superfícies, sem a ocorrência de soldagem. Elas são causadas por fluxos anormais de material quente dentro das matrizes, incrustações de rebarbas, colocação inadequada do material na matriz;
- Incrustações de óxidos: causadas pela camada de óxidos que se formam durante o aquecimento. Essas incrustações normalmente se desprendem mas, ocasionalmente, podem ficar presas nas peças;
- Descarbonetação: caracteriza-se pela perda de carbono na superfície do aço, causada pelo aquecimento do metal. A profundidade do alcance depende da atmosfera do forno, do tipo do material e do tempo de permanência na temperatura de aquecimento;
- Queima: ocorre quando o aquecimento alcança a temperatura próxima a temperatura de fusão, provocando uma alteração permanente no material, devido a penetração intercrystalina de gases oxidantes, que dão origem a películas de óxidos entre os limites de grão.

2.5 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial.

2.5.1 Evolução histórica

Há sete milênios, ceramistas da Pérsia já produziam seus vasos com um tipo de barro que continha alumina. Trinta séculos mais tarde, egípcios e babilônios usaram outra substância contendo alumínio na fabricação de cosméticos e produtos medicinais. Comercialmente, o alumínio só começou a ser produzido há cerca de 150 anos.

O registro da primeira obtenção do que mais se aproxima do alumínio até então foi feito em 1809 por Humphrey Davy fundindo ferro na presença de alumina.

Em 1809, o francês P. Berthier descobre um minério avermelhado que contém 52% de óxido de alumínio perto da aldeia de Lês Baux, no sul da França. É a descoberta da bauxita, o minério mais comum de alumínio.

Em 1821 o dinamarquês Hans Christian Oersted consegue isolar o alumínio de outra maneira, a partir do cloreto de alumínio na forma como é conhecido hoje.

A primeira obtenção do alumínio por via química ocorre em 1854 por Henry Saint-Claire Deville. Em 1855 Deville mostra, na exposição de Paris, o primeiro lingote de um metal muito mais leve que o ferro. Torna-se público o processo de obtenção de alumínio por meio da redução eletrolítica da alumina dissolvida em banho fundido de criolita. Esse procedimento foi desenvolvido separadamente pelo norte-americano Charles Martin Hall e pelo francês Paul Louis Toussaint Héroult, que o descobriram e o patentearam quase simultaneamente. Esse processo ficou conhecido como Hall-Héroult e foi o que permitiu o estabelecimento da indústria global do alumínio. Este ainda é o principal processo de produção de alumínio (<http://www.abal.org.br/>).

2.5.2 Características

A indústria aeronáutica e aeroespacial, frente às mudanças ocorridas nos últimos tempos no transporte aéreo de massa e com o desenvolvimento de novos produtos, exige uma disponibilidade maior de novos materiais aos quais se tenha qualidade de informações suficientes para seu processamento (HEINZ, 2000).

Diante deste cenário, o alumínio toma importância devido a sua fácil usinabilidade e suas características físicas e mecânicas.

O alumínio possui alta resistência a corrosão e seu comportamento a baixas temperaturas é significativamente melhor que os metais ferrosos.

O alumínio e suas ligas têm grande importância devido a sua baixa densidade, elevada relação resistência/peso, endurecibilidade de muitas ligas, aparência, fabricabilidade, possibilidade de tratamento superficial e propriedades físicas e mecânicas (WEINGAERTNER, 1994).

Este tipo de material, com alta relação resistência/peso, é de grande importância para a indústria, em especial a aeronáutica, que busca redução de peso a todo o momento.

O alumínio, quando polido, tem aspecto de prata, com grande reflexibilidade, dissolve bem o hidrogênio, mas reage com o oxigênio formando Al_2O_3 (alumina) em sua superfície. Esse óxido peculiar, contínuo, transparente, inerte e aderente, preserva (passiva) o alumínio de certos meios agressivos.

O alumínio puro tem baixa resistência mecânica, ou seja, na condição pura (99,99%), sua resistência à tração é cerca de 6 kgf/mm².

Quando comercialmente puro (99,9%) a resistência do alumínio é de 9,1 kgf/mm². Assim, pode-se concluir que as impurezas contribuem para aumentar sua resistência em quase 50% (FREIRE, 1983).

Para algumas ligas de alumínio esta resistência à tração pode ser superior à do aço, como é o caso da liga de alumínio ASTM 7075, quando comparada ao aço ABNT 1020.

Elementos químicos como cobre, magnésio, silício, zinco e manganês, sucatas selecionadas e refinadores de grãos são adicionados ao alumínio, permitindo a obtenção de ligas quando submetidos à fusão em fornos especiais. Os produtos dessas ligas podem ser provenientes de fundidos ou transformações mecânicas, como trefilação, extrusão, forjamento, laminação, usinagem e outros (FREIRE, 1983).

2.5.3 Classificação das ligas de alumínio

A classificação das ligas de alumínio é baseada no sistema proposto pela Aluminum Association, Inc. (AA). Este sistema, denominado de “The Aluminum Association Alloy and Temper Designation System”, também é adotado pela ABNT como referência no Brasil, através da norma NBR 6834. A classificação proposta pela AA é subdividida nos grupos das ligas fundidas e das ligas trabalháveis.

As ligas trabalháveis são aquelas na qual a forma final do produto é obtida pela transformação de um semimanufaturado ou pela transformação mecânica a frio ou a quente do metal líquido solidificado.

A classificação das ligas trabalháveis emprega um sistema de quatro dígitos $YX_1X_2X_3$. O primeiro dígito “Y” representa o elemento de liga principal e o grupo da liga; o segundo dígito “ X_1 ” representa as variações em relação aos limites de impurezas ou modificações na liga. O terceiro e o quarto dígito, “ X_2 ” e “ X_3 ”, indicam as diferentes liga do grupo ou o teor de pureza para o alumínio.

Quadro 4 – Principais grupos de ligas trabalháveis

Série das ligas	Descrição
Ligas da série 3XXX	Uma das mais utilizadas. Sua conformabilidade e a resistência à corrosão são similares às do alumínio comercialmente puro (ligas da série 1XXX), com propriedades mecânicas um pouco maiores, particularmente quando deformadas a frio.
Ligas da série 5XXX	São as mais resistentes. Estão disponíveis em vários formatos, como lâminas, chapas, perfis, tubos, arames, etc. Elas também possuem elevada resistência à corrosão e são facilmente produzidas e soldadas.
Ligas tratadas termicamente de média resistência	Contêm magnésio e silício (ligas da série 6XXX) e possuem elevada resistência à corrosão, mas perdem um pouco da sua capacidade de serem trabalhadas (o que, em seções estruturais retas, muito difundidas em aplicações estruturais, é irrelevante).
Ligas tratadas termicamente de elevada resistência	Têm no cobre (série 2XXX) ou zinco (série 7XXX) os principais elementos de liga. São tão resistentes quanto o aço estrutural, mas necessitam de proteção superficial. Estas ligas são utilizadas quando o fator resistência/peso for o principal, como na aviação.

Fonte: (Adaptado de <http://www.abal.org.br>)

As ligas trabalháveis ainda apresentam uma subdivisão quanto ao mecanismo de resistência da liga, ou seja, elas subdividem-se em ligas tratáveis termicamente ou em ligas não tratáveis termicamente.

As ligas tratáveis termicamente caracterizam-se pela variação da resistência mecânica ser controlada através de tratamento térmico e, em soldagem, podendo ter suas propriedades regeneradas por tratamento térmico posterior.

Para as ligas não tratáveis termicamente o mecanismo de variação de resistência mecânica é baseado no endurecimento por solução sólida ou dispersão e melhorada através de endurecimento por deformação a frio (encruamento). O estado que o material adquire após ação de trabalho a frio, a quente e/ou por tratamento térmico, é denominado de “condição metalúrgica” ou “têmpera”. A nomenclatura utilizada na identificação da “têmpera” emprega letras, que representam o tipo de têmpera, e números, quando requerido, que indicam as operações principais que o produto deve sofrer. A especificação básica da têmpera, válida para ligas fundidas e trabalháveis, é descrita pela seguinte designação LN_1N_2 . Onde L representa o tipo de tempera e N_1 e N_2 representam as operações que o produto deve sofrer.

Os quadros abaixo apresentam as subdivisões possíveis.

Quadro 5 – Principais grupos de ligas trabalháveis

Dígito	Estado do Material
F	Material sem garantia quanto às suas propriedades mecânicas, não havendo controle das condições do processo de fabricação
O	Material recozido, com máxima capacidade de conformabilidade
W	Material solubilizado
H	Material que não apresenta solubilidade e, portanto, suas propriedades mecânicas são obtidas por deformação mecânica. Acompanha um ou mais dígitos
T	Material que apresenta solubilidade e, portanto, tratável termicamente podendo ou não ter encruamento adicional. Acompanha um ou mais dígitos

Fonte: (BRESCIANI, 1992).

Quadro 6 – Subdivisão da têmpera H

Subdivisão da têmpera H: Endurecimento por deformação		
Dígito N ₁	Dígito N ₂	Dígito N ₃
H1 – Endurecimento por deformação apenas	HN ₁ 2 – 25% endurecida	Quando utilizado indica variação na tempera obtida com dois dígitos.
H2 – Endurecimento por deformação e parcialmente recozido	HN ₁ 4 – 50% endurecida	
H3 – Endurecimento por deformação e estabilizado	HN ₁ 8 – Totalmente endurecida (75% de redução/deformação)	
	HN ₁ 9 – Extra endurecida	

Fonte: (BRESCIANI, 1992).

Quadro 7 – Subdivisão da têmpera T

Subdivisão da têmpera T: Tratáveis termicamente		
N_1 indica a sequência específica de tratamento	N_2	Dígitos adicionais (N_3 e N_4)
T1 – Envelhecida naturalmente após resfriamento de uma elevada temperatura, oriunda do processo de fabricação	Indica variação no tratamento básico que irá alterar significativamente as características da liga. Ex.: T42 ou T62	Quando utilizados indicarão alívio de tensão. Ex.: TN_151 ou TN_1N_251 – alívio de tensão por estiramento; TN_152 ou TN_1N_252 – Alívio de tensão por compressão.
T2 – Trabalhada à frio após resfriamento e envelhecida naturalmente		
T3 – Solubilizada, trabalhada a frio e envelhecida naturalmente		
T4 – Solubilizada e envelhecida naturalmente		
T5 – Artificialmente envelhecida após resfriamento de uma elevada temperatura		
T6 – Solubilizada e envelhecida artificialmente		
T7 – Solubilizada e estabilizada (superenvelhecimento)		
T8 – Solubilizada, trabalhada a frio e envelhecida artificialmente		
T9 – Solubilizada, envelhecida artificialmente e trabalhada a frio		
T10 – Trabalhada a frio após resfriamento de uma elevada temperatura e envelhecida artificialmente		

Fonte: (BRESCIANI, 1992).

O cobre contribui para o aumento da elasticidade e da resistência à tração, e o silício melhora o processo de fundição, aumentando a resistência à abrasão. Ligas de Al-Si-Cu com mais de 4% de cobre, ou aquelas contendo magnésio, podem ser tratadas, termicamente (WEINGAERTNER, 1994).

A adição de cromo, níquel, vanádio, prata, boro, chumbo, bismuto, zircônio e lítio conferem à liga de alumínio mais resistência à corrosão sob tensão, controle de recristalização e usinabilidade. Entretanto, outros elementos como o ferro, titânio, sódio, estrôncio e antimônio são considerados impurezas e devem ser controlados. O elemento químico adicionado à liga é que determina o tipo e a aplicação da mesma (WEINGAERTNER, 1994).

As ligas das série 7000 são constituídas de ligas tratadas termicamente, feitas por laminação ou por extrusão. A liga de alumínio 7050 pode ser dividida em duas famílias dependendo da porcentagem de cobre como terceiro elemento ligante: a liga de ALZnMgCu e a AlZnMg. Essas ligas, desenvolvidas pela Alcoa a partir de 1970, são geralmente usadas em aplicações estruturais e também em estruturas soldadas, pois possuem resistência nas zonas afetadas termicamente (MAZZOLANI, 1995).

A liga 7050-T74 foi desenvolvida para preencher a necessidade de um material que desenvolvesse alta resistência na direção da espessura, boa resistência à esfoliação por corrosão e trinca por corrosão sob tensão e boa tenacidade à fratura e características de fadiga.

As placas e os forjados da liga 7050-T74 são os novos produtos padrões de materiais de seção espessa na (CARVALHO, 1999).

Para o grupo das ligas fundidas, a designação básica utilizada também utiliza quatro dígitos de identificação. A diferença está na presença de um ponto (indicação que o produto está sob a forma de peça ou lingote) separando o terceiro e o quarto dígito. Este último dígito, após o ponto, indicará a forma do produto. O primeiro dígito identifica o grupo da liga. Os dois dígitos seguintes caracterizam a liga ou a pureza do alumínio ou somente as diferentes ligas de um grupo. O quadro abaixo apresenta um resumo da classificação das ligas fundidas.

Quadro 8 – Classificação das ligas de alumínio fundidas segundo a AA.

Designação da AA (YX ₁ X ₂ X ₃)	Liga	Dígito X ₃	Variações da liga (A,B ou C)
1XX.X	Al puro (min. 99%)	0 – Peça Fundida	Modificações das ligas originais
2XX.X	Al-Cu	1 ou 2 – Lingote	
3XX.X	Al-Si + Cu e/ou Mg		
4XX.X	Al-Si		
5XX.X	Al-Mg		
6XX.X	Série não utilizada		
7XX.X	Al-Zn		
8XX.X	Al-Sn		
9XX.X	Al + outros elementos		

Fonte: (AA, 2000)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para se atingir os objetivos de economia de matéria-prima e redução de ciclo na fabricação de peças e a manutenção ou melhoria de propriedades mecânicas do material fabricado, deve-se conhecer o processo de fabricação atual para saber as suas condições e o material utilizado no início da usinagem. Também é importante o conhecimento do volume e peso, tanto da matéria prima quanto do produto acabado.

Com isso, será possível fazer uma análise comparativa dos resultados alcançados e justificar uma possível mudança de processo de fabricação.

3.1 PEÇAS UTILIZADAS PARA AVALIAÇÃO

Para este estudo, as peças foram divididas em 2 famílias:

- Geometria simples: peças planas ou de pouca curvatura com ou sem janelas ou ilhas de alívio de peso;
- Geometria complexa: peças com uma ou mais curvaturas caracterizadas por geometrias de difícil acesso.

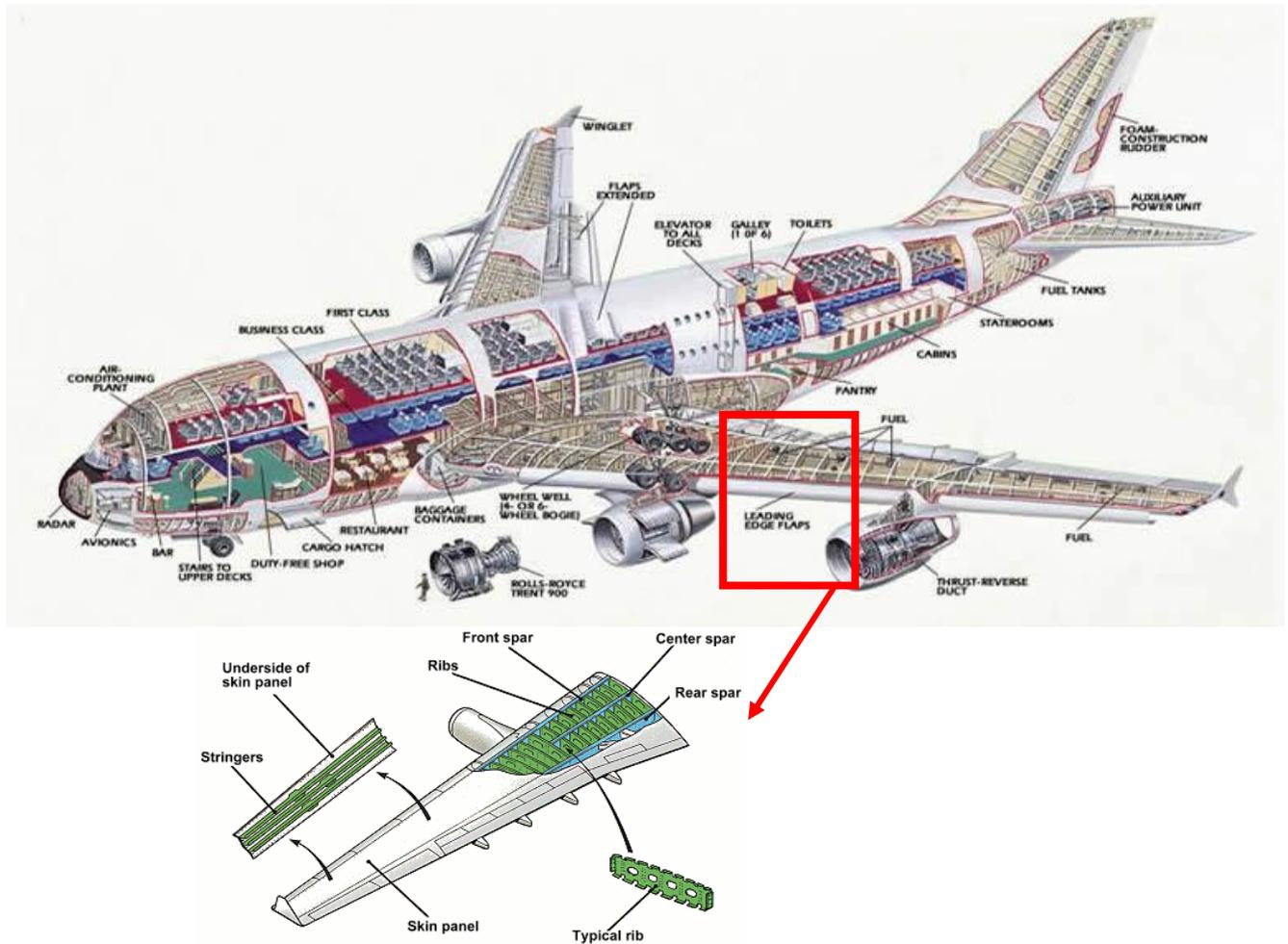
A família de peças de geometria simples representa próximo de 85% das peças usinadas que compõem o universo de metálicos instalados em uma aeronave, enquanto a família de peças de geometria complexa representa uma gama bem menor de peças, no entanto tem uma taxa de cavaco que ultrapassa 90% da matéria-prima bruta.

Para este trabalho foram selecionadas duas peças de geometria simples e uma peça de geometria complexa.

A primeira peça de geometria simples selecionada é feita de alumínio ASTM 7050-T74 nas medidas 1500mm x 450mm x 170mm, com massa de 14 kg quando acabada.

Esta peça vai ser chamada deste momento em diante de *Rib*.

Figura 31 - Localização da *rib* em uma aeronave

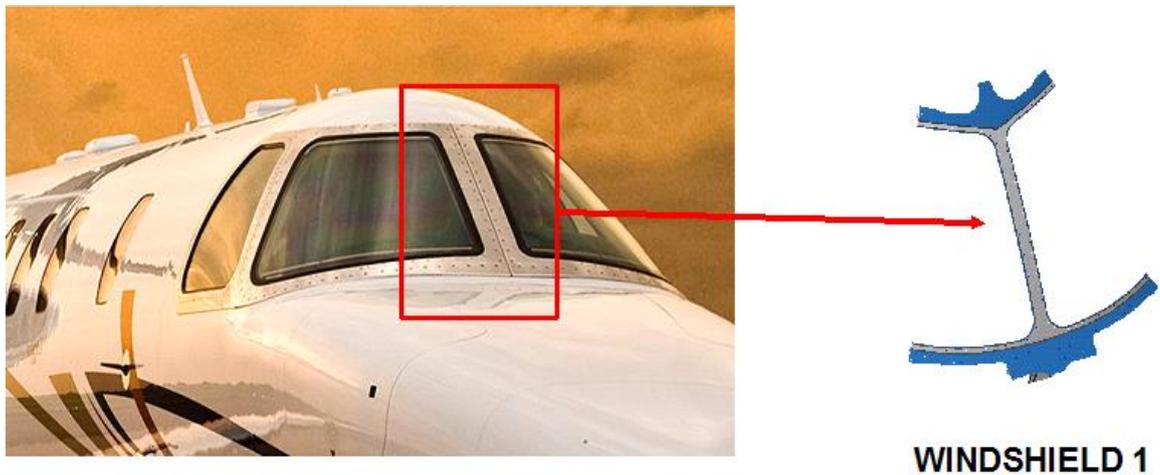


Fonte: (www.nomenclaturo.com – acessado em 03/09/2014).

A segunda peça de geometria simples selecionada é feita de alumínio ASTM 7050-T74 nas medidas 1500mm x 1000mm x 200mm, com massa de 7 kg quando acabada.

Esta peça será chamada deste momento em diante de *Windshield 1*.

Figura 32 - Licalização do *Windshield 1* em uma aeronave

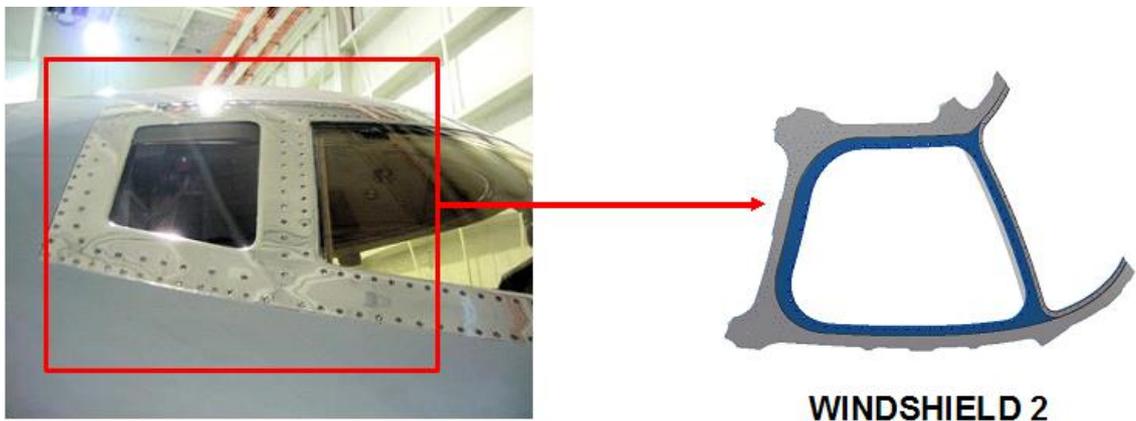


Fonte: (forum.contatoradar.com.br – acessado em 03/09/2014).

A peça de geometria complexa selecionada é feita de alumínio ASTM 7050-T74 nas medidas 2000mm x 1000mm x 350mm, com massa de 8 kg quando acabada.

Esta peça será chamada deste momento em diante de *Windshield 2*.

Figura 33 - Licalização do *Windshield 2* em uma aeronave



3.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO PARA PEÇAS USINADAS

A usinagem de um bloco de alumínio nas medidas do envelope do produto é o processo usual de fabricação. Há, portanto, uma grande perda de material que ocorre pela produção de cavaco, além do elevado número de hora-máquina despendido para se chegar à dimensão final do produto acabado.

O processo se inicia com o corte da placa de alumínio nas dimensões do envelope do produto, a peça é então enviada para uma fresadora para faceamento do bloco. Em seguida, a peça é levada para a operação de desbaste, onde ocorre o maior consumo de tempo em todo o processo de fabricação do produto. Feito o desbaste, a peça é levada à área de ajustagem, onde os pontos de fixação são serrados e lixados e a peça sofre um acabamento nestas regiões. Em seguida é efetuada uma inspeção tridimensional no produto para garantia das medidas e controle do empenamento ao longo do processo. A peça recebendo conformidade é enviada para a operação de fresamento de acabamento e, em seguida para uma nova inspeção tridimensional. Então é feita uma limpeza na peça para a inspeção de líquido penetrante. Se nada for detectado a peça é enviada para a operação de *shot peening* para alívio das tensões acumuladas durante o processo de usinagem; em seguida a peça é encaminhada para uma operação de desempenho pós-*shot peening* e por último a limpeza final da peça para que possa ser analisada pela engenharia da qualidade.

3.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO PARA PEÇAS FORJADAS

A compra da matéria prima forjada, numa geometria mais próxima do produto final, altera significativamente o processo de fabricação. O número de etapas é reduzido e a quantidade de horas utilizadas para a manufatura da peça sofre uma expressiva redução, como será apresentado a seguir.

Com a substituição do bloco de alumínio pela matéria-prima forjada, o processo de fabricação sofre algumas mudanças. A começar pela etapa de corte do bloco de matéria-prima.

Como a matéria-prima já é comprada nas dimensões e formas geométricas mais próximas do produto, as etapas de corte e faceamento da placa de alumínio não são mais necessárias, gerando um ganho médio de 4 horas no ciclo de fabricação.

A primeira etapa no processo passa então a ser o desbaste. Agora com uma redução considerável na geração de cavaco e, conseqüentemente, nas horas de usinagem.

Em seguida a peça vai para a ajustagem para eliminação dos pontos de fixação, lixamento e acabamento geral dessas regiões. A próxima etapa é a inspeção tridimensional no produto para garantia das medidas e controle do empenamento ao longo do processo. Então é feita uma inspeção por líquido penetrante para garantir a qualidade estrutural da peça.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados todos os dados envolvendo a fabricação através da matéria-prima em bloco e a matéria prima em pré-forma forjada.

4.1 DADOS DA FABRICAÇÃO MATÉRIA-PRIMA EM BLOCO

Todo o processo de fabricação tendo como matéria-prima um bloco de alumínio, conforme descrito no item 2.2, pode levar mais de 46 horas, dependendo do produto a ser fabricado, conforme tabelas abaixo:

Tabela 1 – Tempo de fabricação da *Rib*.

Operações	Horas Execução	Horas Set-up
Corte da placa de Alumínio	1	0,1
Faceamento	2	0,1
Fresamento - desbaste	30	2
Ajustagem	1	0,1
Inspeção tridimensional	1	0,1
Fresamento - acabamento	3	1
Inspeção tridimensional	1	0,1
Inspeção - liq. Penetrante	2	0,1
Shot Peening	1	0,1
Desempeno pós shot peening	1	0,1
Limpeza pós shot peening	1	0,2
Soma	44	4

Tempo Total
48 horas

Tabela 2 – Tempo de fabricação da Windshield 1

Operações	Horas Execução	Horas Set-up
Corte da placa de Alumínio	1	0,1
Faceamento	4	0,1
Fresamento - desbaste	25	2
Ajustagem	1	0,1
Inspeção tridimensional	1	0,1
Fresamento - acabamento	3	1
Inspeção tridimensional	1	0,1
Inspeção - liq. Penetrante	2	0,1
Shot Peening	1	0,1
Desempeno pós shot peening	1	0,1
Limpeza pós shot peening	1	0,2
Soma	41	4

Tempo Total
45 horas

Tabela 3 – Tempo de fabricação da Windshield 2

Operações	Horas Execução	Horas Set-up
Corte da placa de Alumínio	1	0,1
Faceamento	4	0,1
Fresamento - desbaste	25	2
Ajustagem	1	0,1
Inspeção tridimensional	1	0,1
Fresamento - acabamento	5	1
Inspeção tridimensional	1	0,1
Inspeção - liq. Penetrante	2	0,1
Shot Peening	1	0,1
Desempeno pós shot peening	1	0,1
Limpeza pós shot peening	1	0,2
Soma	43	4

Tempo Total
47 horas

4.1.1 Custo hora-homem e hora-máquina

As máquinas utilizadas para a fabricação das três peças do estudo são uma fresadora 5 eixos, uma fresadora 3 eixos e uma máquina de *Shot Peening*. Os custos dos equipamentos

utilizados para a medição tridimensional não serão contabilizados, pois não há alteração nesta operação com a mudando do processo.

A taxa hora de uma fresadora 3 eixos é de US\$ 100,00;

A taxa hora de uma fresadora 5 eixos é de US\$ 150,00;

A taxa hora de uma máquina de *shot peening* é de US\$ 65,00;

A taxa utilizada para cálculo do custo da mão de obra é US\$ 52,00.

Em todo o processo de fabricação a fresadora 5 eixos é utilizada em apenas uma operação para cada peça, na operação de acabamento. A fresadora 3 eixos é utilizada em duas operações para cada peça: no faceamento e no desbaste. O *Shot peening* é realizado em apenas uma operação para cada uma das peças, na operação de *Shot Peening*.

Com base nos valores de hora-máquina para cada um dos equipamentos e os tempos de cada operação, o custo envolvido na fabricação das três peças no que tange a máquina e mão de obra fica conforme tabela abaixo:

Tabela 4 – Custo de máquina e mão de obra

Produto	Custo máquina	Custo MO	Custo total
<i>Rib</i>	US\$ 4.081,50	US\$ 457,60	US\$ 4.539,10
<i>Windshield 1</i>	US\$ 3.871,50	US\$ 457,60	US\$ 4.239,10
<i>Windshield 2</i>	US\$ 4.081,50	US\$ 457,60	US\$ 4.539,10

4.1.2 Consumo de matéria-prima

Na fabricação de uma aeronave, o peso é sempre o maior desafio. Quanto menor, melhor o desempenho do produto, tornando-o mais econômico (em termos de consumo de combustível) e, conseqüentemente, mais atraente às companhias aéreas, que busca margens operacionais constantemente.

Isso faz com que os produtos sejam projetados para que não haja excesso de material em lugar algum, criando por diversas vezes, ilhas de usinagem ao longo da peça.

Para uma matéria prima comprada em bloco, o custo do desperdício é muito grande, pois além da grande perda de matéria prima por meio da geração de cavaco, há o custo das horas de usinagem e de consumíveis de processo como ferramentas de corte e óleo lubrificante.

Para se chegar ao produto acabado *RIB*, é preciso um bloco de massa de 368 kg. Dado que o produto acabado possui 14 kg, a perda de material é de 354 kg. Em outras palavras,

96,2% de toda a matéria prima comprada para a fabricação deste produto será descartado como cavaco.

A compra do material é feita com base no peso. Logo, quanto mais pesado for a matéria prima, maior será o custo final do produto.

O preço de mercado de 1kg da liga de alumínio ASTM 7050-T74 está em US\$ 15,00.

Com base nesses dados, para a fabricação da peça RIB, o custo de aquisição da matéria prima será de US\$ 5.520,00. O desperdício somente em cavaco é de US\$ 5.310,00 (desconsiderando a receita obtida com a venda do cavaco, que será adicionado mais adiante).

A matéria prima para a fabricação da peça *Windshield 1* possui massa de 780 kg; para um produto acabado de 7 kg. O desperdício de matéria prima para a fabricação desta peça é ainda mais expressivo, chegando a 99,1%.

O custo de aquisição da matéria prima é de US\$ 11.700,00. A perda financeira devido a geração de cavaco para a fabricação do *Windshield 1* chega a US\$ 11.595,00 (desconsiderando a receita obtida com a venda do cavaco, que será adicionado mais adiante).

Para a peça *Windshield 2* o cenário é ainda mais desanimador. A matéria prima necessária para a fabricação deste produto tem 2000mm x 1000mm x 350mm, com uma massa de 1598 kg. O produto acabado tem massa de 8 kg. A transformação do bloco em cavaco para esta peça é de 99,5%.

O custo para a compra da matéria prima é de US\$ 23.970,00. O desperdício de matéria prima em cavaco é de US\$ 23.850,00 (desconsiderando a receita obtida com a venda do cavaco, que será adicionado mais adiante).

Certamente os custos deste desperdício não são absorvidos pelos fabricantes, eles são repassados aos compradores das aeronaves, que pagam por algo que não agrega valor nenhum ao produto comprado.

4.1.3 Reaproveitamento da matéria-prima

Como o desperdício de matéria prima é evidentemente grande, uma forma de reduzir o custo da peça é através da venda do metal na forma de cavaco. O preço do cavaco no mercado fica por volta de US\$ 1,50 o quilograma do metal.

Nestas condições, os custos de matéria prima envolvidos na fabricação das três peças passa a ser apresentado conforme tabela abaixo:

Tabela 5 – Custo da matéria-prima

Produto	Custo MP bruta	Venda cavaco	Custo final MP
<i>Rib</i>	US\$ 5.520,00	US\$ 531,00	US\$ 4.989,00
<i>Windshiel 1</i>	US\$ 11.700,00	US\$ 1.159,50	US\$ 10.540,50
<i>Windshiel 2</i>	US\$ 23.970,00	US\$ 2.385,00	US\$ 21.585,00

4.1.4 Custo de fabricação

O custo final de uma peça inclui seu custo de compra (matéria-prima) mais o custo de realização de todas as operações adicionais necessárias. Antes de operações de montagens. Por exemplo, é necessário usinar a peça, como vimos; este custo é considerável. Quando se trata de peças simples tanto o fundido quanto o forjado, requerem a mesma quantidade de usinagem, mas quando as peças são mais complexas os forjados tendem a requerer menos usinagem que os fundidos.

Com base nos dados apresentados até o momento, é possível concluir o custo de fabricação de cada uma das três peças estudadas quando utilizado o processo de usinagem como foco do processo.

A tabela abaixo apresenta todos os custos envolvidos o processo.

Tabela 6 – Custo total de fabricação

	<i>Rib</i>	<i>Windshield 1</i>	<i>Windshield 2</i>
<i>Custo máquina</i>	US\$ 4.539,10	US\$ 4.239,10	US\$ 4.539,10
<i>Custo mão de obra</i>	US\$ 457,60	US\$ 457,60	US\$ 457,60
<i>Custo matéria-prima</i>	US\$ 4.989,00	US\$ 10.540,50	US\$ 21.585,00
<i>custo produto</i>	US\$ 9.985,70	US\$ 15.237,20	US\$ 26.581,70

4.2 DADOS DA FABRICAÇÃO MATÉRIA-PRIMA FORJADA

A compra da matéria prima forjada, numa geometria mais próxima do produto final, altera significativamente o processo de fabricação. O número de etapas, muitas vezes é reduzido e a quantidade de horas utilizadas para a manufatura da peça sofre uma expressiva redução, como será apresentado a seguir.

Com a substituição do bloco de alumínio pela matéria-prima forjada, o processo de fabricação sofre algumas mudanças. A começar pela etapa de corte do bloco de matéria-prima.

Como a matéria-prima já é comprada nas dimensões e formas geométricas mais próximas do produto, as etapas de corte e faceamento da placa de alumínio não são mais necessárias, gerando um ganho médio de 4 horas no ciclo de fabricação.

A primeira etapa no processo passa então a ser o desbaste. Agora com uma redução considerável na geração de cavaco e, conseqüentemente, nas horas de usinagem.

Em seguida a peça vai para a ajustagem para eliminação dos pontos de fixação, lixamento e acabamento geral dessas regiões. A próxima etapa é a inspeção tridimensional no produto para garantia das medidas e controle do empenamento ao longo do processo. Então é feita uma inspeção por líquido penetrante para garantir a qualidade estrutural da peça.

O restante do processo é basicamente o mesmo, conforme indicado nas tabelas abaixo:

Tabela 7 – Tempo de fabricação da Rib (MP forjada)

Operações	Horas Execução	Horas Set-up
Fresamento - desbaste	6	1
Inspeção tridimensional	1	0,1
Inspeção - liq. Penetrante	2	0,1
Fresamento - acabamento	3	1
Ajustagem	5	0,1
Inspeção tridimensional	1	0,1
Inspeção - liq. Penetrante	2	0,1
Shot Peening	1	0,1
Desempeno pós shot peening	1	0,1
Limpeza pós shot peening	1	0,2
Soma	23	2,9

Tempo Total
25,9 horas

Tabela 8 – Tempo de fabricação da Windshield 1 (MP forjada)

Operações	Horas Execução	Horas Set-up
Fresamento - desbaste	8	1
Inspeção tridimensional	1	0,1
Inspeção - liq. Penetrante	2	0,1
Fresamento - acabamento	3	1
Ajustagem	5	0,2
Inspeção tridimensional	1	0,1
Inspeção - liq. Penetrante	2	0,1
Shot Peening	1	0,1
Desempeno pós shot peening	1	0,1
Limpeza pós shot peening	1	0,2
Soma	25	3

Tempo Total
28 horas

Tabela 9 – Tempo de fabricação da Windshield 2 (MP forjada)

Operações	Horas Execução	Horas Set-up
Fresamento - desbaste	14	1
Inspeção tridimensional	1	0,1
Inspeção - liq. Penetrante	2	0,1
Fresamento - acabamento	3	1
Ajustagem	5	0,2
Inspeção tridimensional	1	0,1
Inspeção - liq. Penetrante	2	0,1
Shot Peening	1	0,1
Desempeno pós shot peening	1	0,1
Limpeza pós shot peening	1	0,2
Soma	31	3

Tempo Total
33 horas

4.2.1 Custo hora-homem e hora-máquina

As máquinas utilizadas para a fabricação das três peças utilizando matéria prima forjada não sofreram alteração; continuam sendo uma fresadora 5 eixos, uma fresadora 3 eixos e uma máquina de *Shot Peening*. Os custos dos equipamentos utilizados para a medição

tridimensional, como mencionado anteriormente, não foram contabilizados, pois não há alteração nesta operação com a mudança do processo.

Os custos de utilização das máquinas também não sofreram alteração, continuando em US\$ 100,00/hora, US\$ 150,00/hora e US\$ 65,00 para a fresadora 3 eixos, fresadora 5 eixos e *shot peening*, respectivamente. A taxa para cálculo do custo da mão de obra também continua o mesmo, US\$ 52,00/hora.

Utilizando a mesma sistemática adotada para o cálculo de custos de fabricação para matéria prima usinada, a tabela abaixo define o custo de máquina e mão de obra para a fabricação das peças com base na matéria prima forjada:

Tabela 10 – Custo de máquina e mão de obra

Produto	Custo máquina	Custo MO	Custo total
<i>Rib</i>	US\$ 1.371,50	US\$ 717,60	US\$ 2.089,10
<i>Windshield 1</i>	US\$ 1.571,50	US\$ 722,80	US\$ 2.294,30
<i>Windshield 2</i>	US\$ 2.171,50	US\$ 670,80	US\$ 2.842,30

4.2.2 Consumo de matéria-prima

Para a substituição da matéria-prima para forjado, o custo do desperdício é reduzido consideravelmente, pois a perda por geração de cavaco é reduzida, assim como a redução de consumíveis e hora-máquina.

A pré-forma forjada para a fabricação da *RIB* possui uma massa de 20 kg. Redução expressiva quando comparado aos 368 kg da matéria-prima para a mesma peça, porém em bloco. A geração de cavaco é de 6 kg, reduzindo a perda de matéria-prima para 30%.

Devido ao processo de forjamento para a obtenção da nova matéria-prima, o custo da matéria-prima sofre um aumento. Enquanto a compra do bloco para usinagem sai a um valor de US\$ 15,00/kg, o custo de aquisição da matéria prima ASTM 7050-T74 na pré-forma forjada aumenta para US\$ 190,00/kg.

Com essa alteração no custo da matéria-prima, para a fabricação da *RIB*, o custo de aquisição da matéria-prima será de US\$ 3800,00. O desperdício financeiro em cavaco fica em US\$ 1.140,00 (desconsiderando a receita obtida com a venda do cavaco, que será adicionado mais adiante).

A matéria-prima na pré-forma forjada para a fabricação da peça *Windshield 1* possui massa de 61 kg; para um produto acabado de 7 kg. O desperdício de matéria-prima na forma de cavaco para a fabricação desta peça é 11,4%.

O custo de aquisição da matéria-prima forjada passa para US\$ 11.590,00. A perda financeira devido a geração de cavaco para a fabricação do *Windshield 1* chega a US\$ 10.260,00 (desconsiderando a receita obtida com a venda do cavaco, que será adicionado mais adiante).

A matéria-prima necessária para a fabricação da peça *Windshield 2* tem uma massa de 89 kg. O produto acabado tem massa de 8 kg. A transformação de cavaco para esta peça é de 9%.

O custo para a compra da matéria prima é de US\$ 16.910,00. O desperdício de matéria prima em cavaco é de US\$ 15.390,00 (desconsiderando a receita obtida com a venda do cavaco, que será adicionado mais adiante).

4.2.3 Reaproveitamento da matéria-prima

A estratégia de vender o cavaco como forma de reduzir o montante investido na fabricação do produto será mantida.

O importante nesta etapa é que, independente do custo da matéria-prima forjada ser mais de 12 vezes maior que o custo do bloco para usinagem, o preço de venda do cavaco não sofre alteração, dado que o material continua sendo o mesmo. Desta forma, o preço do cavaco no mercado fica permanece US\$ 1,50/kg.

Assim os custos de matéria-prima com a utilização da pré-forma forjada fica conforme tabela abaixo:

Tabela 11 – Custo da matéria-prima

	Rib	Windshield 1	Windshield 2
<i>Custo máquina</i>	US\$ 1.371,50	US\$ 1.371,50	US\$ 2.171,50
<i>Custo mão de obra</i>	US\$ 717,60	US\$ 722,80	US\$ 670,80
<i>Custo matéria-prima</i>	US\$ 2.089,10	US\$ 2.294,30	US\$ 2.842,30
<i>custo produto</i>	US\$ 4.178,20	US\$ 4.388,60	US\$ 5.684,60

É notório que, neste novo cenário, o retorno com a venda de cavaco torna-se pouco atrativa dado que em todos os casos, o valor adquirido com a venda do cavaco não ultrapassa 6% do custo da matéria-prima.

4.2.4 Custo de fabricação

Utilizando a mesma metodologia do item 4.1.4 para o cálculo do custo final de fabricação, a tabela abaixo apresenta os custos envolvidos no processo de fabricação e o custo do produto final para cada uma das três peças estudadas.

Tabela 12 – Custo total de fabricação

	Rib	Windshield 1	Windshield 2
<i>Custo máquina</i>	US\$ 1.371,50	US\$ 1.371,50	US\$ 2.171,50
<i>Custo mão de obra</i>	US\$ 717,60	US\$ 722,80	US\$ 670,80
<i>Custo matéria-prima</i>	US\$ 2.089,10	US\$ 2.294,30	US\$ 2.842,30
<i>custo produto</i>	US\$ 4.178,20	US\$ 4.388,60	US\$ 5.684,60

A tabela abaixo apresenta a variação no custo de fabricação para cada um dos processos estudados

Tabela 13 – Variação no custo de fabricação

	MP bloco	MP forjada	Variação
<i>Rib</i>	US\$ 9.985,70	US\$ 4.178,20	139,0%
<i>Windshield 1</i>	US\$ 15.237,20	US\$ 4.388,60	247,2%
<i>Windshield 2</i>	US\$ 26.581,70	US\$ 5.684,60	367,6%

5 CONCLUSÕES

O estudo realizado neste trabalho propôs a troca da matéria-prima para a usinagem de algumas peças seguindo alguns critérios de complexidade e abrangência de aplicação.

Uma pré-forma forjada nas dimensões e geometria mais próximas do produto acabado foi proposta no lugar da usinagem partindo de um bloco de metal como matéria-prima.

Esta proposta apresentou viabilidade técnica dado que há fornecedores disponíveis para a obtenção da nova matéria-prima.

Sendo a proposta tecnicamente viável, aprofundou-se então no estudo econômico, buscando avaliar se o custo final do produto gera um retorno considerável a ponto de se buscar a mudança no processo.

Embora o valor do quilo do metal forjado tenha se apresentado muito acima do quilo do mesmo material em bloco, ao final do processo a troca da matéria-prima se tornou vantajosa, como se verifica nas tabelas 12 e 13.

Apesar de as peças *Windshield 1* e *Windshield 2* serem necessárias apenas uma ou duas vezes no avião, seu ganho é considerável. Devemos considerar também que este ganho é recorrente, ou seja, é um ganho que será apresentado em cada aeronave fabricada.

Para a peça *Rib* o ganho é menor, porém não menos expressivo, chegando a custar menos da metade do valor original com a substituição da matéria-prima. Outro ponto muito importante para esta peça é o fato de ela ser utilizada várias vezes em uma aeronave.

Cada semi-asa do Airbus A330-340 utiliza 39 peças, gerando uma demanda de 78 peças por avião (FAST, 2013).

É importante observar que, este estudo teve caráter preliminar e outras ferramentas de tomadas de decisão e modelos financeiros devem ser utilizados.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É evidente que este trabalho não encerra o tema. Ainda podemos avançar no desenvolvimento desta nova proposta em algumas frentes.

A seguir são apresentadas algumas sugestões para novas pesquisas:

- Estudar o aprimoramento da pré-forma visando redução ainda maior de peso, utilizando *die forging*, por exemplo;
- Estudar os efeitos da mudança de estratégia de forjamento no produto acabado (*Hand forging* vs *Die forging*);

- Estudar mudanças no processo para redução ou eliminação do empenamento.

REFERÊNCIAS

- CHIAVERINI, V., Tecnologia Mecânica, Volume II, 2a ed., Makron Books, 1986.
- FERRARESI, D., Fundamentos da usinagem dos metais, Volume I, 1969.
- FREIRE, J.M., Torno Mecânico, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1984.
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L., Tecnologia da usinagem dos materiais, 3a ed., Artiliber Editora, 2001.
- SANDVIK, Manual técnico de usinagem: torneamento, fresamento, furação, mandrilamento, sistemas de fixação, sd.
- SOUZA, A.J., Apostila Processos de fabricação por usinagem, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M.B., Teoria da usinagem dos materiais, 2009.
- CETLIN, P.R.; HELMAN, H., Fundamentos da Conformação, Artiliber Editora, 2005.
- SCHAEFFER, L., Forjamento: Introdução ao Processo, 2001.
- MARTINS, C.G., Aspectos Gerais da Conformação Mecânica e Forjamento, Escola Técnica Federal de Santa Catarina, 1993.
- DOYLE, L. E., Processos de fabricação e materiais para engenheiros, Edgard Blücher, 1978.
- BOEING NEWS RELEASE. Disponível em <http://www.boeing.com/news/releases/2014/q1/140129_nr.pdf>. Acessado em 05/06/2014.
- AIRBUS ANNUAL REPORT. Disponível em <<http://www.airbusgroup.com/int/en/investors-shareholders/Annual-reports-and-registration-documents.html>>. Acessado em 05/06/2014.
- BOMBARDIER NEWS RELEASE. Disponível em <<http://ir.bombardier.com/en>>. Acessado em 05/06/2014.
- EMBRAER NEWS RELEASE. Disponível em <<http://ri.embraer.com.br/>>. Acessado em 05/06/2014.
- SILVA, F.J., Aulas de Usinagem. Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.
- TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K., Metal Cutting, 4^a ed. Boston: Butterworth – Heinemann, 2000.
- MOORE, W.R., Foundations of Accuracy. TMSTC, 1989.
- AGOSTINHO, O.L., Processos de Fabricação e Planejamento de Processos, Universidade de Campinas, 2004.
- CEDUP, Apostila Centro de Educação Profissional, Joinville, 2012.
- UFPA, Apostila de usinagem – Curso de Engenharia, 2012.

- BRIDGEMAN, R., 1000 Inventions and Discoveries, The Smithsonian Institution, 2006.
- SINGER, C.; HOLMYARD, E.J.; HALL, A.R., A History of Technology, Vol I, 1967.
- Apostila Tecnologia Mecânica. Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- Apostila Processo de Forjamento, curso de Engenharia Mecânica MACKENZIE, sd.
- CONFORMAÇÃO DOS METAIS FUNDAMENTOS E APLICAÇÃO, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, 2009
- ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ, INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Apostila Tecnologia de Fabricação, sd.
- HEINZ , A., et al. Recent development in aluminum alloys for aerospace applications. Materials, 2000.
- WEINGAERTNER , W. L. et al. Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu. Máquinas e Metais, 1994.
- FREIRE, J. M. Materiais de construção mecânica: tecnologia mecânica., 1983.
- História do Alumínio. Disponível em <<http://www.abal.org.br/>>, acessado em 30/11/2014
- BRESCIANI FILHO , E. Seleção de metais não ferrosos. Campinas,SP: UNICAMP (série manuais), 1992.
- MAZZOLANI, F. M. Aluminum Alloy Structures, 1995.
- CARVALHO, A. L. M. Comportamento mecânico das ligas de alumínio 7010-T74 e 7050-T7451 de aplicação aeronáutica. Guaratinguetá - SP: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá : FEG - UNESP, 1999. Dissertação (mestrado).
- BRESCIANI FILHO, E. Conformação plástica dos metais, 1ª ed. Dig., EPUSP, 2011.
- WINGLETS AND SHARKLETS. Disponível em <<http://theflyingengineer.com/flightdeck/winglets-and-sharklets/>>. Acessado em 04/12/2014.
- FAST #52 – Airbus technical magazine, 2013.
- FILHO, Ettore B.[et al]. Conformação Plástica dos Metais. São Paulo: Unicamp, 5 ed. 1997. (<http://presstecnica.com.br> – acessado em 10/08/2014)