

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MODELO PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS EM PROJETOS  
DE PRODUTOS INDUSTRIAIS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Ricardo Martins Cury



0.208.976-6

UFSC-BU

Florianópolis, abril de 1993

MODELO PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS EM PROJETOS  
DE PRODUTOS INDUSTRIAIS

Ricardo Martins Cury

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO  
DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
ENGENHARIA DO PRODUTO  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



Prof. Nelson Back, Ph. D.

Orientador



Prof. Neri dos Santos, Dr. Ing.

Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA



Prof. Nelson Back, Ph. D.

Presidente



Prof. Osmar Possamai, Dr.



Prof. Volnei Andersson, Dr. Eng. Mec.

À minha esposa, Kelen  
Ao meu amigo, Nilson, in memoriam

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Nelson Back pela orientação e dedicação na execução deste trabalho.

Aos Professores Volnei Andersson e Carlos A. G. de Lima pela valiosa colaboração.

Aos meus pais, pelo socorro nos momentos de dificuldades financeiras.

A minha esposa Kelen pelo apoio naqueles momentos em que as dificuldades pareciam maiores do que realmente eram.

## SUMÁRIO

Resumo

Abstract

## 1 INTRODUÇÃO

1.1 A evolução da seleção de materiais	01
1.2 A relevância do trabalho	03
1.3 Objetivos	03
1.4 Estrutura do trabalho	04

## 2 FUNDAMENTOS PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS

2.1 Importância da seleção adequada	05
2.2 Bases para uma seleção adequada	07
2.2.1 Desempenho sob condições de serviço	07
2.2.2 Processo produtivo	09
2.2.3 Custo do material	13
2.2.4 Previsão do comportamento do material em serviço	15
2.2.5 Fontes de informações sobre materiais	17
2.3 Processo de seleção de materiais	17
2.3.1 Custo versus índice de desempenho	19
2.3.2 Índice de desempenho do material	22
2.3.3 Análise do valor	24
2.3.4 Análise de falhas	25
2.3.5 Análise de custo-benefício	28
2.3.6 Diagramas de propriedades de materiais	29
2.4 A seleção de materiais com auxílio do computador	33
2.4.1 Os sistemas computacionais usados	34
2.4.2 Análise de implementação computacional dos métodos de seleção	36

## 3 ATRIBUTOS PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS

3.1 Introdução	39
3.2 Classificação dos atributos	40
3.3 Atributos relacionados a solicitações mecânicas	41
3.3.1 Resistência a solicitações estáticas	41

3.3.2 Tenacidade	46
3.3.3 Fadiga	48
3.3.4 Fluência	52
3.3.5 Aspectos de projeto relacionados a solicitações mecânicas	54
3.4 Atributos relacionados a solicitações químicas e do meio-ambiente	55
3.4.1 Tipos de corrosão	55
3.4.2 Seleção de materiais em ambientes corrosivos	57
3.5 Atributos relacionados ao desgaste	59
3.5.1 Tipos de desgaste	59
3.5.2 Aspectos de projeto relacionados ao desgaste	60
3.6 Atributos relacionados à estética	62
3.7 Atributos relacionados à solicitações físicas	64
3.8 Atributos relacionados ao processo produtivo	66
3.8.1 Atributos do material a ser processado	66
3.8.2 Aspectos de projeto relacionados ao processo produtivo	68
3.9. Considerações finais sobre os atributos para seleção	70
4 MODELO PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS	
4.1 Modelo proposto	73
4.2 Descrição do modelo	74
4.2.1 Levantamento das condições de serviço	74
4.2.2 Divisão do componente em partes	75
4.2.3 Elaboração da lista de requisitos	76
4.2.4 Transformação dos requisitos em atributos	77
4.2.5 Estabelecimento de limites dos atributos	78
4.2.6 Determinação dos materiais candidatos	81
4.2.7 Determinação dos índices de desempenho	81
4.2.8 Verificação de compatibilidades	82
4.2.9 Associação dos materiais candidatos aos processos produtivos	83
4.2.10 Determinação dos custos	84
4.2.11 Hierarquização das associações	85
4.2.12 Adoção da associação melhor classificada	85
4.2.13 Elaboração de um registro da seleção efetuada	86
4.3 Fluxograma do modelo	86

5 VALIDAÇÃO DO MODELO	
5.1 A validação através de um exemplo de projeto	88
5.2 As etapas do modelo proposto aplicadas ao exemplo de projeto	88
5.3 Considerações sobre a aplicação do modelo proposto ao exemplo	101
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	
6.1 Conclusões	102
6.2 Recomendações	104
ANEXO	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

## RESUMO

Atualmente os projetistas de produtos industriais têm a sua disposição cerca de 100000 ligas metálicas e um número semelhante de materiais não metálicos. Esse elevado número de materiais disponíveis deve ainda ser combinado ao elevado número de processos de manufatura com que os produtos podem ser produzidos. Portanto, quando um projetista seleciona um material para um determinado produto, ele depara-se com um grande universo de possibilidades.

Considerando-se o princípio de que a seleção de materiais é a escolha do material que tem o melhor desempenho, ao menor custo, dentro do que está ao alcance do projetista, só uma abordagem sistemática pode gerar uma seleção ótima do material.

Dentro de tal contexto, neste trabalho, propõe-se um modelo de seleção de materiais em projetos de produtos industriais e mostra-se a sua validação através da aplicação em um produto em desenvolvimento.

O modelo proposto consiste basicamente em 13 etapas, que são executadas sequencialmente de maneira a balizar o procedimento de seleção de materiais, permitindo ao projetista o preenchimento de seus próprios requisitos de projeto. Através de seu uso, na solução de um problema exemplificativo, foi possível validá-lo e concluiu-se especialmente que a introdução do conceito de atributo é de fundamental importância na manutenção da flexibilidade do modelo, proporcionando uma abordagem que contempla o universo de possibilidades onde está inserida a seleção de materiais.

## ABSTRACT

Nowaday the industrial product designers have available about 100,000 metallic alloys as well as a similar amount of non-metallic ones. Such a high amount of available materials is still to be combined with an elevated amount of manufacture processes according to which the products are to be made. Then, when a designer selects a determined material, he faces a great universe of possibilities.

Considering that the choice of materials consists in selecting those having both, the best performance and minor cost, only a systematic procedure can give an optimum selection.

In such a context, in this work one proposes a materials selection model in the design of industrial products and also show its validity by applying it to a working product.

The model that is presented here comprises 13 steps, which are performed sequentially in order to define a procedure of materials selection, allowing the designer to fulfil his own project requirements. By applying it in the solution of a sample problem, it was possible to prove its validity as well as to particularly conclude that the introduction of attribute concept is of fundamental importance to the maintenance of the model flexibility, resulting in a procedure that contemplates the universe of possibilities in which the materials selection is included.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 A evolução da seleção de materiais

A partir do advento da Revolução Industrial, que de uma certa forma foi baseada num significativo incremento nos métodos para a modificação nos materiais básicos como, algodão, madeira e ferro e mais tarde o aço, uma marca de contraste no crescimento econômico tem sido um aumento no consumo de materiais.

A importância agregada aos materiais, na sociedade humana, pode ser apreciada mesmo em épocas anteriores à Revolução Industrial, sendo muitas dessas épocas nomeadas por materiais, intensivamente explorados em sua expansão como: a Idade da Pedra, Idade do Bronze e Idade do Aço [1].

Ao mesmo tempo em que os materiais utilizados pelo homem evoluíram, aumentou-se também o grau de complexidade na utilização desses materiais. Como a atividade de projetar produtos envolve, desde seu estágio inicial ou concepção, até os testes realizados no protótipo, um grande número de tomadas de decisão, em relação aos materiais empregados, é de se esperar que a complexidade dessas tomadas de decisão também cresça.

Pode-se, como ponto de partida, entender a seleção de materiais como a escolha do material que tem o melhor desempenho ao menor custo, dentro do que está ao alcance do projetista, ou seja, o processo produtivo disponível. Estes três parâmetros globais, a que está ligada a seleção de materiais utilizados em produtos industriais, exigem que o projetista adote uma abordagem sistemática, dado que o universo de possibilidades, onde esta tomada de decisão está inserida, envolve milhares de ligas metálicas, bem como outros milhares de materiais de engenharia não metálicos.

Esta necessidade, de uma abordagem sistemática, fez

com que alguns pesquisadores desenvolvessem metodologias de seleção de materiais que serão oportunamente apresentadas nesta dissertação. Estas metodologias baseiam-se em várias técnicas como por exemplo:

- \* Custo versus índice de desempenho;
- \* Índice de importância de propriedades;
- \* Análise do valor;
- \* Análise do custo benefício;
- \* Diagramas de propriedades de materiais.

O conhecimento e utilização dessas abordagens sistemáticas e suas técnicas limitou-se a um reduzido número de especialistas capazes de selecionar com proficiência materiais candidatos a um produto ou parte dele.

A medida que a engenharia de materiais evolue, novos materiais e novas aplicações para esses materiais surgem, sem que muitos projetistas possam acompanhá-las.

As primeiras tentativas, para a solução deste problema, geraram a construção de bancos de dados de materiais. Esses bancos de dados armazenam, normalmente, dados sobre propriedades mecânicas, propriedades elétricas e demais características de diversos materiais.

Apesar dos bancos de dados agilizarem a procura por materiais candidatos a uma dada aplicação, seu acesso ainda é restrito para projetistas do hemisfério sul. Além disso, esses bancos de dados não possuem um gerenciador "inteligente", deixando as decisões, mesmo a nível mais elementar, para o projetista, o que implica num alto custo de utilização.

Um "sistema inteligente", para a seleção de materiais, forneceria ao usuário um rápido acesso à relação de materiais candidatos e dispensaria, de certa forma, a necessidade do usuário conhecer abordagens sistemáticas, devido a existência de um motor de inferência, capaz de guardar no

programa os procedimentos usados pelos especialistas.

Um " sistema inteligente " ou sistema especialista, pode ser definido como um programa muito especializado, de alta qualidade, com conhecimento específico sobre alguma área problema. Na realidade, os sistemas especialistas se diferenciam de programas convencionais por muitos aspectos, sendo o mais significativo o fato de que estes programas manipulam conhecimento, e não apenas dados determinísticos.

## 1.2 A relevância do trabalho

Este trabalho tem sua importância baseada na compreensão de como deve ocorrer a seleção dos materiais que constituirão produtos industriais.

A compreensão deste processo pretende gerar uma formalização dos aspectos que envolvem a escolha dos materiais, de tal maneira que, em futuros trabalhos, sejam desenvolvidos sistemas computacionais que executem com rapidez e perfeição esta tarefa.

Sua relevância também fica caracterizada como fonte de consulta para projetistas que desejarem desenvolver produtos com eficiência do ponto de vista dos materiais utilizados.

## 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral o entendimento do processo de projeto, considerando o enfoque central na seleção de materiais.

Seus objetivos específicos são: gerar uma metodologia de seleção de materiais que contemple o atual estágio de desenvolvimento da atividade de projeto de produtos; fornecer subsídios para sua implementação em um sistema computacional; levantar, selecionar e organizar informações

relevantes à seleção dos materiais utilizados em produtos industriais.

#### 1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho não pretende esgotar o estudo da seleção de materiais no projeto de produtos industriais, pois este é um campo de conhecimento extremamente vasto. Por este motivo, optou-se por apresentar a filosofia básica da seleção de materiais e propor um modelo de seleção que contemple o atual estágio do conhecimento relativo ao projeto de produtos industriais.

Para tanto, o capítulo 2 procura apresentar uma sucinta revisão bibliográfica, mostrando os aspectos em que se fundamenta a seleção de materiais.

No capítulo 3, são apresentados alguns atributos da seleção de materiais, que são mais comumente usados na determinação dos materiais que formam os produtos industriais.

O modelo proposto, considerando-se a necessidade de uma abordagem sistemática, compõe o capítulo 4. Este modelo é aplicado para a seleção do material de um seguidor, num mecanismo came-seguidor, que faz parte de um produto em desenvolvimento nos Departamentos de Engenharia de Produção e Sistemas e Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Santa Catarina, e seus resultados constituem o capítulo 5.

A conclusão do trabalho, bem como a conclusão da aplicação do modelo e as sugestões de aperfeiçoamento, são mostradas no capítulo 6.

## 2 FUNDAMENTOS PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS

### 2.1 Importância da seleção adequada

Segundo DIETER [2], a seleção do material adequado é uma das etapas mais importantes no processo de projeto. Isto porque ela pode não só determinar um melhor ou pior desempenho do produto ou parte, como ainda seu próprio funcionamento.

Uma escolha inapropriada do material pode trazer consequências graves ao produto. Podem ocorrer falhas no componente, pelo não atendimento às especificações reais do projeto, bem como mudanças em propriedades nos materiais, ocasionadas por processos produtivos não adequados ao material e à aplicação. Com certeza, também ocorrerão custos desnecessários associados ao projeto.

Podem ser vários os fatores que levam um projetista a uma escolha inadequada dos materiais de que é feito seu produto.

O primeiro desses fatores é o universo de possibilidades onde está inserida esta tomada de decisão. São dezenas de milhares de materiais, que devem ser combinados a processos produtivos, que também não são poucos, considerando-se ainda os custos associados a cada combinação material-processo.

Este universo obriga os projetistas a utilizarem bancos de dados ou manuais de materiais. Quando um projetista utiliza bancos de dados de materiais, ele consegue na maioria dos casos executar uma seleção razoável, mas essa utilização ainda é extremamente restrita nos países menos desenvolvidos. Nesses países o projetista utiliza normalmente manuais, limitando sua escolha a fatores como:

\* Disposição para a procura de materiais candidatos, que pode tornar-se extremamente tediosa e desgastante conforme o caso;

- \* Tempo destinado a esta atividade, que muitas vezes é reduzido devido aos prazos determinados para o projeto;
- \* Capacidade de comparação entre materiais candidatos, que podem ser muitos, principalmente, quando se considera a comparação material-processo;
- \* Limitações dos próprios manuais, que com avanços muito rápidos da engenharia de materiais não podem estar sempre atualizados.

Outro problema relevante, que pode levar a uma escolha inadequada do material, deve-se aos mecanismos de falhas a que estão sujeitas as partes do produto. Em situações reais, raramente uma parte ou componente está sujeito a apenas um mecanismo de falha. O que ocorre é uma combinação de solicitações que levam a uma correspondente combinação de mecanismos de falhas.

É importante lembrar também que muitos atributos dos materiais não podem ser expressos quantitativamente, como é o caso da soldabilidade, geralmente classificada qualitativamente.

Visto que as eras da Pedra, Bronze e Aço puderam ser medidas em milênios, o surgimento de novos materiais na era atual causa mudanças em períodos menores que uma década [1]. Isto obriga os projetistas a não utilizarem mais um expediente extremamente comum em épocas passadas, qual seja, a escolha de materiais baseada, unicamente, em experiências anteriores. Não se quer com isso eliminar a experiência de projetistas que já selecionaram materiais para seus produtos. Apenas espera-se que a seleção de materiais seja flexível o suficiente para acompanhar mudanças tão rápidas no uso de materiais.

As necessidades para uma seleção adequada de materiais, assim como as possibilidades de incorrer-se em uma seleção inadequada, com consequências que podem ser graves, determinam a importância da seleção de materiais sob vários pontos de vista: 1<sup>o</sup>) do projetista, que deve sempre buscar um

projeto ótimo; 2º) do empresário, que deve atender a um mercado de maneira satisfatória; 3º) do cliente, que quer confiabilidade e a satisfação de sua necessidade, imbutidas no produto. Portanto, uma abordagem sistemática, eficiente e eficaz é a melhor maneira de se atuar no problema da seleção de materiais.

## 2.2 Bases para uma seleção adequada

Percebeu-se que as obras citadas neste trabalho apontam para uma concordância no agrupamento das bases para a seleção, que são aspectos de desempenho, processo produtivo e custo. Estes três aspectos passam agora a ser discutidos com maior profundidade.

### 2.2.1 Desempenho sob condições de serviço

O desempenho, sob condições de serviço, pode ser expresso por medidas das propriedades dos materiais. Estas são decorrentes da estrutura e dos componentes que formam os materiais.

SHACKELFORD [6] afirma que " Para a ciência dos materiais, a natureza dessas propriedades é um fim em si própria. Elas servem como base para o nosso entendimento do estado sólido. Para a engenharia dos materiais, as propriedades assumem um novo sentido. Elas são os parâmetros de projeto, básicos para o selecionamento de um dado material em uma dada aplicação ". Assim, sua compreensão é o primeiro passo no entendimento da seleção de materiais.

Para reconhecer-se a abrangência deste trabalho, é citado um agrupamento de materiais segundo a classificação de VAN VLACK [7]:

\* Metais;

\* Cerâmicos;

\* Polímeros;

\* Compósitos.

É importante salientar que existem conflitos entre vários pesquisadores com relação à classificação e características das propriedades dos materiais. Isto ocorre porque a necessidade, ou a aplicação para o qual um certo material é desenvolvido, pode determinar em que propriedade uma dada característica se enquadra.

Na tentativa de solucionar esse problema, adotar-se-á, neste trabalho, uma classificação que considera os parâmetros: estrutura, tipo de solicitação e efeito da solicitação ao nível da estrutura. Esta classificação não se encontra explícita em nenhuma obra pesquisada, mas pode ser adotada conforme consulta a especialista da área [23].

Segundo este especialista, o comportamento do material, sob as mais diversas influências, é regido pelo comportamento dos átomos que o constituem e suas interrelações. O comportamento, ou seja, a resposta varia com a solicitação à qual o material está sujeito. Estas afirmações coincidem com a lista de características de desempenho apresentadas por DIETER [2].

ACHBACH [8], apresenta a seleção de materiais como um compromisso entre o custo do item acabado e o risco de se incorrer em uma falha prematura. Normalmente o custo da matéria-prima é pequeno em comparação com o preço físico acabado. Mas a escolha da matéria-prima afeta variáveis de processamento, requisitos de resistência e vida satisfatória, que possuem custos elevados se comparados com o custo da matéria-prima.

Pode-se definir dois principais parâmetros na determinação do desempenho [8]:

a) Falha: " Falha pode implicar em fratura, deformação excessiva, desgaste irregular, ou corrosão adversa em uma parte. A parte mais suscetível à falha estabelece a integridade do produto. Existem outros tipos de falha que dizem respeito à natureza de um produto. Estes incluem rápida obsolescência, estilo ultrapassado, subdimensionamento ou superdimensionamento"

b) Qualidade: " A verdadeira medida da qualidade do produto é o desempenho sob as reais condições do serviço, não sob condições artificiais. Determinações diretas da qualidade geralmente destroem a estrutura do produto, mas estabelecem o nível de sua integridade. Uniformidade da qualidade é uma base de avaliação do consumidor. Uniformidade sustentada é preferível à perfeição intermitente ".

Qualidade em componentes não é unicamente uma função da composição dos seus materiais. É também um compromisso entre projeto, materiais, processos produtivos e custos. Usinabilidade, conformabilidade e soldabilidade, por exemplo, são características que podem afetar a qualidade de uma parte obscurecendo completamente a seleção de materiais, baseada na composição ou no preço somente [8].

No capítulo 3 serão apresentados detalhes importantes das propriedades dos materiais que determinam o desempenho da peça que o material constitui.

### 2.2.2 Processo produtivo

DIETER [2] apresenta uma interessante definição: " produzir o projeto é uma crítica ligação na cadeia de eventos, que começa com a idéia criativa e termina com um produto de sucesso no mercado ", denotando uma noção de encadeamento.

Essa noção de encadeamento, que se inicia desde o projeto conceitual e expande-se até a fabricação, consiste em executar de forma lógica, ao tempo certo, as operações necessárias para a confecção do produto. O processo produtivo se

relaciona com o projeto e os materiais conforme a figura 2-1.

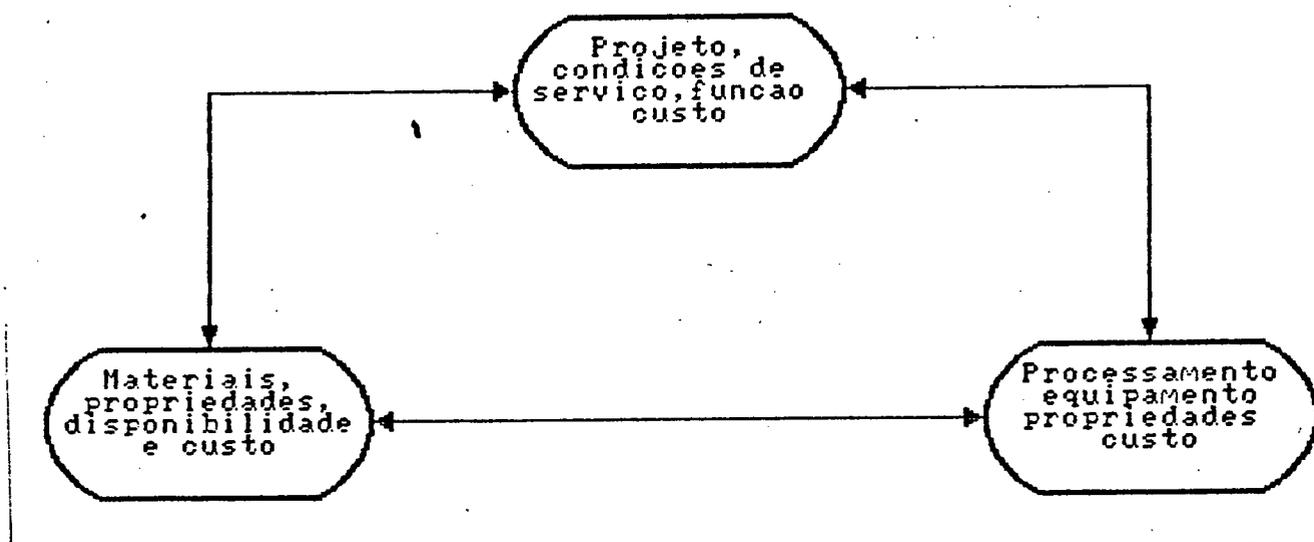


figura 2-1. Relação do processo produtivo com o projeto e os materiais.

Para entendimento do que compõe a manufatura, pode-se dividi-la em cinco áreas de atuação:

1 - Engenharia de processos: é o desenvolvimento passo a passo da sequência de produção lógica, devido à divisão do todo do produto em componentes e submontagens;

2 - Engenharia de ferramentas: projeto de ferramentas, guias, padrões, calibres, fixações para produzir a parte;

3 - Padrões: são valores de tempos padrão associados à manufatura, ferramentas padronizadas e materiais padronizados;

4 - Engenharia de plantas: desenvolve as facilidades de planta (Carranjo físico) necessárias para realizar o processo de manufatura;

5 - Administração e controle: é o planejamento, esquemas e supervisão da produção, para assegurar que materiais, ferramentas, máquinas e pessoas estejam disponíveis ao tempo

certo e na quantidade certa para produzir a parte.

Como o foco desse trabalho é a seleção dos materiais que serão manufaturados e que constituirão o produto, o interesse recai sobre a área de engenharia de processos.

Pode-se classificar o grande número de processos usados na manufatura dentro das oito seguintes categorias:

1 - Processos de solidificação: Metais fundidos, polímeros termoplásticos, cerâmicas ( e vidros ) e alguns compósitos são moldados e solidificados em uma determinada forma.

2 - Processos de deformação: Um material é plasticamente deformado a quente ou a frio para melhorar suas propriedades e mudar sua forma. Processos desse tipo são forjamento, laminação, extrusão e trefilação. Estampagem é uma categoria especial em que a deformação ocorre num estado de tensão bidimensional.

3 - Processo de remoção de material ou corte: Material é removido de uma peça em trabalho com uma ferramenta de corte por uma variedade de métodos como torneamento, rebarbamento, polimento, retífica, fresamento, lapidação, etc.

4 - Processamento de polímeros: As propriedades especiais de polímeros têm trazido desenvolvimento para os processos como moldagem por injeção e termoformagem. Apesar do processamento de polímeros muitas vezes poder enquadrar-se em outras categorias, decidiu-se mantê-los numa categoria especial como na classificação de DIETER [2].

5 - Processamento de particulados: Consiste na consolidação de partículas de metais, cerâmicas ou polímeros pela prensagem e sinterização, compactação a quente ou deformação plástica. Também inclui o processamento de materiais compósitos.

6 - Processamento por união: Incluem-se todas as categorias de soldagem, brazagem, união por difusão, rebitagem, parafusamento

e união por adesivos.

7 - Tratamento térmico e superficial: Esta categoria inclui o aumento de propriedades mecânicas por processos de tratamento térmico, bem como, o aumento de propriedades superficiais por meio de difusão como carbonetação e nitretação, além de muitas outras. A categoria inclui também as operações de preparação das superfícies dos materiais a serem tratados.

8 - Processos de montagem: Este é usualmente o passo final em manufatura. Um número de partes são trazidas juntas e combinadas em uma submontagem ou montagem final.

Este grande número de processos disponíveis indica que a escolha do melhor processo de manufatura não é uma tarefa fácil. Outro fator complicador é o fato que um produto normalmente pode ser feito de várias maneiras diferentes, isto é, através de vários processos de manufatura.

O procedimento de escolha adotado, geralmente, é baseado na determinação e comparação dos custos de cada processo disponível ao projetista.

Este procedimento de avaliação deveria considerar, além dos custos de processamento, o fator de utilização do material ( ou índice de aproveitamento ) e as influências do processo de manufatura sobre as propriedades do material.

As propriedades do material de um componente derivam principalmente da natureza básica do material, mas onde materiais metálicos estão relacionados, propriedades podem geralmente ser grandemente modificadas durante sucessivos estágios do processo de manufatura. Isto não acontece com materiais naturais como madeira e rocha, mas a abordagem de modificar estruturas pelo processamento pode ser aplicada para produtos onde o ingrediente básico é madeira ou mineral. Esta abordagem também está crescendo para cerâmicas vidros e polímeros [3].

A habilidade de um material poder controlar as propriedades de uma parte durante a manufatura, frequentemente, permite melhorar aplicações, principalmente, com respeito a magnitude e direcionalidade das propriedades mecânicas.

### 2.2.3 Custo do material

Conforme CHARLES & CRANE [3], o processo de seleção de possíveis materiais candidatos para uma dada aplicação será, em suas etapas iniciais, realizado considerando-se as características de desempenho, ou seja, em termos de suas propriedades, mas a decisão final sempre recairá sobre aspectos de custos, que na maioria dos casos sempre será o aspecto dominante.

Isto ocorre porque todo produto que uma empresa fabrica visa a um determinado mercado. Este mercado, normalmente, possui seus competidores lutando para se manterem e muitas vezes almejando uma fatia maior desse mercado. PORTER [4], apresenta três estratégias competitivas bem sucedidas para enfrentar-se outras empresas, são elas:

a) Liderança no custo total: Consiste em atingir liderança no custo total em uma indústria por meio de um conjunto de políticas que levem a esse objetivo. Portanto, custo baixo em relação aos concorrentes, mantendo qualidade, assistência e demais atributos formam essa estratégia.

b) Diferenciação: Diferenciar o produto é o espírito dessa estratégia. Seu sentido é tornar o consumidor leal a marca, com conseqüente menor sensibilidade ao preço.

c) Enfoque: Enfocar um determinado grupo comprador, um segmento da linha de produtos, atingindo esse objetivo através da satisfação de seu alvo particular, ou custos mais baixos ou ambos.

Portanto, nota-se que, para as estratégias

competitivas a) e c), o custo de um produto, o qual também é determinado pelo custo do seu material, é fator fundamental para o bem estar da empresa em um mercado competitivo. Embora, a estratégia b) não trate diretamente da questão custo, existem limites de preços a que os consumidores ainda são fiéis a marca, e um aumento indiscriminado de custos poderia levar a uma diminuição da margem de lucro, ou perda da lealdade à marca.

As estratégias competitivas de PORTER [4] também vêm ao encontro da afirmação de CHARLES & CRANE [3]: " Aumento em custos por um material ou componente superior tem que ser compensado por um substancial aumento em performance ". Logo, o nível de desempenho e custo deve depender do tipo de aplicação envolvida, que por sua vez depende da estratégia competitiva adotada.

Existem ainda os casos extremos, onde o desempenho determinado pela aplicação leva à procura de materiais cujos custos não podem ser considerados na seleção. Este é o caso de alguns equipamentos militares e aeroespaciais, onde o fator confiabilidade é extremamente importante.

Assim, existe uma interação entre desempenho e custo que fornece um espectro dessa questão, resultando em dois tipos básicos de produtos:

- a) Produtos orientados pelo desempenho: aplicações que demandam a execução máxima de desempenho;
- b) Produtos orientados pelo custo: aplicações onde considerações de custo devem ser predominantes.

De uma maneira geral, o custo de um material depende de:

- \* Escassez determinada pela concentração do elemento químico no minério ou pelo custo da matéria-prima;
- \* Custo e quantidade de energia requerida para processar o material;

\* Suprimento básico e demanda para o material.

Não se pode esquecer que, quanto mais trabalho é investido no processamento de um material, mais seu custo aumenta. Desta maneira, aumentos em propriedades, além daquelas com que o material básico é produzido, ocasionam mudanças na estrutura trazidas por mudanças na composição, e passos adicionais no processamento. Além disso, o grau de pureza de um material é um forte componente de custo, pois exige um controle muito maior que outros materiais, onde mais impurezas são admissíveis [2].

Custos extras em materiais podem ter outras origens, além destas já levantadas, nas seguintes situações:

- requisitos metalúrgicos especiais;
- dimensões especiais;
- processamentos especiais;
- quantidades muito pequenas;
- embalagem.

SHARP [5] considera pouco comum o uso de materiais básicos em aplicações de engenharia. Em muitos casos, o aumento de propriedades mecânicas é baseado na utilização de ligas, não se podendo atribuir o custo da liga simplesmente ao preço dos materiais que a constituem, porque geralmente elas contêm impurezas que, como visto, anteriormente também devem ter uma quantidade controlada.

#### 2.2.4 Previsão do comportamento do material em serviço

Conforme ACHBACH [8], as reais condições de serviço dificilmente podem ser efetivadas. Aproximações destas condições são os testes simulados de serviço, nos quais um componente ou preferencialmente todo o produto está sujeito a tensão, temperatura, desgaste, corrosão e outras influências aproximadas das condições reais.

Quantitativamente uma simulação de serviço determina

alguns fatos ou fatores isoladamente pertinentes sob as condições mais simples que são possíveis em serviço. Portanto, ACHBACH [8] afirma que "...poucos dados de testes convencionais de resistência são diretamente aplicáveis ao projeto ...". Partindo-se do princípio que projetar é a criação de formas para desempenhar certas funções em certos ambientes, nota-se que as condições a que os produtos estão sujeitos dependem diretamente do ambiente. Este ambiente usualmente representa condições envolvendo um grande número de variáveis.

Pode-se portanto garantir, com certa confiança, que o total conhecimento do comportamento do material é a soma de experiências obtidas em ambientes específicos, sob condições específicas e precisamente controladas. Isto indica que o valor de propriedades testadas não está na transferência direta dos dados para o projeto, mas sim na avaliação comparativa dos dados, sob as mesmas influências externas.

Os valores limites das propriedades dos materiais têm grande importância para os projetistas. Embora importantes, estes valores de resistência a determinadas solicitações, isoladamente, não podem garantir um desempenho satisfatório. Apenas o conhecimento da escala de dispersão dos valores e um profundo conhecimento do comportamento do material sob muitas combinações de carregamentos, formas e ambientes podem garantir o desempenho esperado.

Segundo ACHBACH [8], " a seleção de materiais, baseada em tabulações de manuais, com médias de propriedades determinadas sobre pequeníssimas amostras, que desconsideram efeitos de tamanho e diferenças direcionais, que não contam nada sobre dificuldades de processamento e que realizam várias vezes não mais que uma ou duas medidas de várias propriedades demandadas por um serviço particular, não é uma seleção em engenharia ".

Portanto, a partir desta afirmação, conclui-se também que uma seleção em engenharia deve considerar as

habilidades do material para o processamento e a dispersão de valores, tanto quanto os valores médios da propriedade em questão.

### 2.2.5 Fontes de informações sobre materiais

As principais fontes de informações sobre materiais consistem de manuais, considerando-se projetistas no Brasil. No anexo 1 é apresentada uma bibliografia complementar que contém importantes dados sobre materiais.

Existem, segundo DIETER [2], alguns fatores principais para se ter em mente quando são usados dados sobre propriedades de materiais obtidos de manuais e de outras fontes da literatura. Usualmente um simples valor é dado a uma propriedade e deve ser assumido que aquele valor é apenas típico. Podem existir dispersões ou variabilidade de dados, sendo que estes fatos devem ser indicados através de uma faixa de valores ou da dispersão.

Nas aplicações críticas, onde a confiabilidade é de grande importância, é necessário conhecer a distribuição de frequência do valor da propriedade do material e da solicitação em serviço. A figura 2-2, mostra que quando estas duas distribuições se sobrepõem, seria estatisticamente previsível um certo número de falhas [2]. Conhecendo-se o valor limite da propriedade, através de sua distribuição, e o valor limite da solicitação, pode-se minimizar a probabilidade de incorrer-se numa falha, afastando-se os valores das duas médias nas duas curvas.

### 2.3 Processo de seleção de materiais

Parece existir uma concordância entre os diversos autores, Dieter, Charles, Achbach e outros, que o problema de seleção de materiais envolve uma das duas diferentes situações: seleção de materiais para um novo produto ou novo projeto e reavaliação de um produto ou projeto com objetivos de reduzir

custos, aumentar confiabilidade, aumentar desempenho, etc.

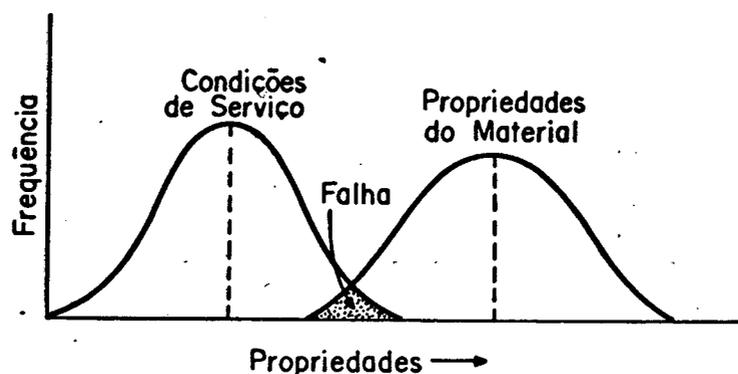


figura 2-2. Sobreposição da distribuição de propriedades de materiais e condições de serviço [2].

" Geralmente não é possível aproveitar o completo potencial de um novo material, a não ser que o produto seja reprojetoado para explorar ambas, as propriedades e as características de manufatura do material " [2].

Dentro desta ótica, a simples substituição de um material por outro sem mudança do projeto não pode chegar a proporcionar uma ótima utilização de um material. Isto se deve ao fato de que a atividade de projeto possui uma cadeia de decisões, metodologicamente estruturada, na qual a alteração de uma decisão tomada, pode implicar em mudanças em decisões assumidas durante todo o processo de projeto.

Pode-se dizer que existe um processo de seleção de materiais que se assemelha ao processo de solução de problemas, amplamente usado em todas as áreas da engenharia. Este processo pode ser definido como:

a) Análise dos requisitos do material: Determinar as condições de serviço e ambiente que o produto deveria resistir. Transformá-las em propriedades críticas do material.

b) Triagem de materiais candidatos: Comparar as propriedades necessárias com uma grande base de dados de propriedades de materiais para selecionar uns poucos materiais que poderiam prover as propriedades necessárias para a aplicação.

c) Seleção de materiais candidatos: Analisar os materiais candidatos em termos de comparações de desempenho de produtos, custo, fabricabilidade e disponibilidade para selecionar o melhor material para a aplicação.

d) Desenvolvimento de dados de projeto: Determinar experimentalmente as propriedades chaves do material selecionado, para obter estatisticamente medidas confiáveis do desempenho do material, sob as condições específicas para serem encontradas em serviço.

DIETER [2] apresenta 5 métodos para atender ao passo c) do processo de seleção: custo versus índice de desempenho, índice de desempenho do material, análise do valor, análise de falhas e análise de custo benefício. A estes métodos pode-se acrescentar os diagramas de propriedades de materiais de ASHBY [10].

### 2.3.1 Custo versus índice de desempenho

Segundo DIETER [2], o custo versus índice de desempenho pode ser usado como fator único na seleção, nos casos em que as condições geométricas e condições de carregamento sejam simples.

O custo do ciclo de vida total é o mais apropriado a considerar. Ele consiste do custo inicial do material, mais o custo de manufatura e instalação, mais os custos de operação e manutenção.

A partir do fato de que o custo do material está diretamente relacionado à quantidade de material empregado, a determinação de uma relação de custo versus propriedade torna-se uma questão de determinação da equivalência estrutural de diferentes materiais. Problemas típicos consistem na determinação do peso relativo para cada material para resistências equivalentes.

Considere-se o exemplo do desenvolvimento de um índice de custo-desempenho, no simples caso da solicitação de uma barra sob tensão uniaxial:

$$\text{Tensão de trabalho} = \frac{\sigma_{\text{esc}}}{\text{fator de segurança}} = \frac{\text{força axial}}{\text{área da seção}} = \frac{F}{S} \quad (2-1)$$

Se a área da seção transversal e a tensão limite de escoamento do material de duas barras A e B são denotadas por  $S_A$ ,  $\sigma_A$  e  $S_B$ ,  $\sigma_B$ , respectivamente, a condição de equivalência de carregamento em ambas as barras é dada por

$$S_A \sigma_A = S_B \sigma_B = \frac{\pi D_A^2 \sigma_A}{4} = \frac{\pi D_B^2 \sigma_B}{4} \quad (2-2)$$

$$\frac{D_B}{D_A} = \frac{(\sigma_A)^{1/2}}{(\sigma_B)^{1/2}} \quad (2-3)$$

onde  $D_A$  e  $D_B$  são os respectivos diâmetros das barras.

Desde que o peso das barras é dado por

$$P = \rho V = \rho S L = \frac{\rho \pi D^2 L}{4} \quad (2-4)$$

então

$$\frac{P_B}{P_A} = \frac{\sigma_A \rho_B}{\sigma_B \rho_A} \quad (2-5)$$

Se o material A custa  $m_A$  Cr\$/kg e o material B custa  $m_B$  Cr\$/kg então o custo de cada barra para suportar a carga  $F$  é:

$$C_A = P_A m_A \quad \text{e} \quad C_B = P_B m_B \quad (2-6)$$

$$\text{portanto} \quad \frac{C_B}{C_A} = \frac{\sigma_A \rho_B m_B}{\sigma_B \rho_A m_A} \quad (2-7)$$

Logo o custo por unidade de resistência em Cr\$/Nm é dado por

$$C = \rho m / \sigma \quad (2-8)$$

Observa-se que, na determinação do custo por propriedade, poderiam ser usadas, além da tensão limite de escoamento, outras propriedades como limite de resistência à tração, limite de resistência à fadiga, resistência a fluência, rigidez, etc.

Considerando-se uma viga em balanço de comprimento  $L$  sujeita a uma carga  $F$  de flexão. A deflexão  $\delta$  da viga é dada por:

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (2-9)$$

A condição de rigidez equivalente em duas vigas de materiais A e B é dada como:

$$EAIA = EBIB \quad (2-10)$$

onde:  $E$  = módulo de elasticidade;

$I$  = momento de inércia.

Para uma viga de seção retangular, o momento de inércia é:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2-11)$$

onde  $b$  é a largura e  $h$  a altura da viga. Para vigas de comprimento e largura iguais, a relação entre as alturas das duas vigas é dada por:

$$h_B = \frac{h_A(EA)^{1/3}}{(EB)^{1/3}} \quad (2-12)$$

e a relação de custo seria dada por

$$\frac{C_B}{C_A} = \frac{(EA)^{1/3}}{(EB)^{1/3}} \frac{\rho_B m_B}{\rho_A m_A} \quad (2-13)$$

De onde se obtém o custo por unidade de rigidez como:

$$C = \rho m / E^{1/3} \quad (2-14)$$

Alguns exemplos de custo por unidade de propriedade são apresentados na tabela 2-1.

Tabela 2-1. Fórmulas para custo por unidade de propriedade

Seção transversal e condições de carregamento	Custo por unid. de resistência	Custo por unid. de rigidez
Barra cilíndrica em tração ou compressão	$\frac{\rho m}{\sigma}$	$\frac{\rho m}{E}$
Barra cilíndrica em flexão	$\frac{\rho m}{\sigma^{2/3}}$	$\frac{\rho m}{E^{1/3}}$
Barra cilíndrica em torção	$\frac{\rho m}{\sigma^{2/3}}$	$\frac{\rho m}{G^{1/3}}$
Barra cilíndrica em flambagem	—	$\frac{\rho m}{E^{1/3}}$

onde:  $\sigma$  = tensão limite de escoamento [ $N/m^2$ ];  
 $E$  = módulo de Young [ $N/m^2$ ];  
 $G$  = módulo de cisalhamento [ $N/m^2$ ];  
 $\rho$  = massa específica [ $kg/m^3$ ];  
 $m$  = custo do material [Cr\$/kg].

### 2.3.2 Índice de desempenho do material

Este método é bastante usado quando é necessário que o material satisfaça vários requisitos de desempenho. Na realidade ele é uma maneira de avaliar vários desempenhos em propriedades específicas sobre uma base comum.

O método consiste das seguintes etapas:

1 - Determinação dos valores escalonados de cada propriedade, devido a grande diferença entre os valores que as quantificam. Este escalonamento visa estabelecer, para todas as propriedades sob análise, valores situados numa escala de 0 a 100.

As propriedades, que devem possuir valores maximizados, são escalonadas tomando-se o maior valor sob consideração como equivalente ao valor 100 da nova escala, conforme equação (2-15). São exemplos típicos, módulo de elasticidade, limite de resistência à ruptura, limite de escoamento entre outras.

$$\beta = \frac{\text{valor numérico da propriedade}}{\text{maior valor sob consideração}} \times 100 \quad (2-15)$$

onde  $\beta$  = valor escalonado da propriedade

Em propriedades onde é desejável obter valores baixos, como densidade, custo, resistência elétrica, por exemplo, o escalonamento é feito de tal maneira que o menor valor sob consideração seja estabelecido como referência. A equação (2-16) mostra matematicamente este escalonamento.

$$\beta = \frac{\text{menor valor sob consideração}}{\text{valor numérico da propriedade}} \times 100 \quad (2-16)$$

Para propriedades que não são expressas numericamente, deve ser realizada uma avaliação subjetiva na qual sejam atribuídos também valores de 0 a 100.

2 - Determinação do fator de peso de cada propriedade  $w_i$ , através do método da abordagem digital lógica. Esta etapa é executada através da comparação de todas as propriedades requeridas para o material, tomadas duas a duas, onde é atribuído o valor 1 para a propriedade mais importante e o valor 0 para a menos importante. Somando-se todos os valores obtidos para cada propriedade e dividindo-se pelo número de comparações

efetuadas, obtém-se o valor do fator peso. Matematicamente tem-se:

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (2-17)$$

onde:

$N$  = número de comparações a serem efetuadas

$n$  = número de propriedades sob comparação

$$w_i = \frac{m_i}{N} \quad (2-18)$$

com  $m_i$  igual a soma aritmética dos valores obtidos nas comparações.

3 - Determinação do índice de desempenho do material  $\gamma$

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \beta_i w_i \quad (2-19)$$

onde:

$\beta_i$  = valor escalonado de cada propriedade  $i$

4 - Adoção do material com maior valor obtido para  $\gamma$ .

É importante ressaltar que o custo neste método é considerado como uma propriedade do material, sofrendo o mesmo tratamento comparativo com as demais propriedades.

### 2.3.3 Análise do valor

Do ponto de vista de DIETER [2], a análise do valor ou engenharia do valor, é "... um sistema organizado de técnicas para identificação de custos desnecessários sem comprometimento da qualidade e confiabilidade do projeto ". Portanto, sua metodologia aplica-se admiravelmente ao problema da seleção de materiais.

O passo chave na análise do valor é a avaliação da

função do projeto ou sistema. Na análise do valor, uma função pode ser definida por duas palavras: um verbo e um substantivo.

As funções de uma parte, componente ou produto, devem ser divididas em função básica ou principal e funções secundárias. A função básica define as características de desempenho que devem ser atendidas. As funções secundárias de desempenho são aquelas que devem ser complementares a função básica. Por exemplo, a função básica de uma cobertura de tinta em uma máquina-operatriz é proteger a superfície do ambiente e sua função secundária é promover aparência.

A análise do valor pode ser aplicada aos diversos setores da empresa, contudo, nota-se comumente que os custos de fabricação podem ser reduzidos de 15 a 25% sem redução na qualidade do produto [24].

A metodologia da análise do valor pode ser melhor entendida a partir de seu plano de trabalho apresentado na tabela 2-2.

#### 2.3.4 Análise de falhas

Segundo DIETER [ 2 ], as falhas são causadas por erros de projeto em uma ou mais das seguintes categorias:

- a) Deficiência em projeto;
- b) Deficiência na seleção de materiais;
- c) Imperfeições no material devido a manufatura;
- d) Sobrecarga e outros abusos em serviço;
- e) Inadequada manutenção e reparo;
- f) Fatores de ambiente.

No que diz respeito à categoria b), pode-se dizer que consiste em inadequada comparação entre condições de serviço e critérios de seleção, dados inadequados de materiais ou uma extrema ênfase dada a custos e insuficiente qualidade.

Tabela 2-2. Plano de trabalho da Análise do valor

Etapas	Finalidade	Passos
1. Fase de preparação	Medidas preparatórias	1.1 Escolher componente 1.2 Listar requisitos 1.3 Determinar função principal e funções secundárias do componente
2. Fase de informação	Determinar possíveis materiais candidatos	2.1 Obter informações sobre propriedades, processos produtivos e custos de uma lista de materiais candidatos
3. Fase de análise	Analisar balanceamento de propriedades	3.1 Montar pares material-processo 3.2 Hierarquizar pares material-processo 3.3 Analisar por comparação 3.4 Verificar a necessidade de alterações no projeto
4. Fase de criatividade	Manusear as alternativas	4.1 Formular idéias de alterações eventualmente necessárias no projeto 4.2 Selecionar estas idéias
5. Fase de julgamento	Analisar as alternativas	5.1 Formular e desenvolver as alternativas 5.2 Especificar técnica e economicamente 5.3 Escolher a alternativa
6. Fase de planejamento	Apresentar e implantar a solução proposta	6.1 Apresentar a proposta 6.2 Planejar e acompanhar a implantação

Fonte: Adaptação de POSSAMAI [41] p 64.

Componentes de engenharia normalmente falham em serviço com excessiva deformação elástica, excessiva deformação plástica, fratura ou perda da geometria requerida através de corrosão ou desgaste.

As técnicas de análise de falhas são normalmente constituídas por inspeções de campo, no componente ou produto que falhou, histórico de falhas, exames macroscópicos, ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos.

Cada um destes constituintes possui procedimentos específicos e peculiares a cada modo de falha investigado.

A importância do estudo da análise de falhas, para a seleção de materiais em projetos de produtos industriais, reside em duas situações: confecção de uma base histórica de dados sobre componentes de um produto e, substituição de materiais em um projeto baseado em melhoria da qualidade e/ou confiabilidade.

Pode-se portanto concluir que a análise de falhas tem sua melhor aplicação em reprojatos e na construção de uma base de conhecimento para um sistema especialista que selecione materiais para um projeto novo.

Sua utilização, como método de seleção para novos projetos, é limitada devido ao fato de ser baseada em testes e inspeções em falhas já ocorridas, aplicando-se principalmente a projetos caracterizados como projetos por evolução.

Todavia, o método de análise de falhas, quando combinado com um tratamento estatístico da confiabilidade, pode fornecer uma boa técnica para a seleção de materiais.

Segundo ZOTKIN [11], " aplicar confiabilidade a um artigo é entendido como uma propriedade complexa que é caracterizada por operação livre-de-quebra, longevidade, preservabilidade e reparabilidade ". A operação livre de quebra pode ser definida como a probabilidade que um possível efeito

que possa causar quebra, ou falha, em serviço não exceda a capacidade do artigo para conter a quebra, que é denominada capacidade de referência.

Pode-se dizer portanto que:

$$P = F ( R > Q ) = F [ ( R - Q ) = Z > 0 ] \quad (2-20)$$

onde: P = probabilidade  
 R = capacidade de referência  
 Q = carregamento ( solicitação ) em operação  
 Z > 0 = condição de utilidade

A partir da equação ( 2-20 ), para uma dada probabilidade e uma capacidade de referência determinada, pode-se estabelecer qual o carregamento máximo em operação que garante esta probabilidade de uma operação livre de quebra.

### 2.3.5 Análise de custo-benefício

O método da análise de custo benefício tem grandes aplicações em todas as áreas da engenharia, mais precisamente, em todas as decisões que envolvem recursos econômicos. A razão custo benefício relaciona o investimento de capital necessário para produzir o benefício desejado.

$$\frac{\text{relação custo benefício}}{\text{custo}} = \frac{\text{valor presente ou custo anual de todos os benefícios}}{\text{valor presente ou custo anual de todos os custos}}$$

( 2-21 )

Percebe-se que quando a relação custo benefício ( rcb ) é menor que 1 os benefícios não cobrem os custos de capital. Já, resultando uma relação maior que 1 todos os custos estão cobertos pelos benefícios conseguidos.

Segundo DIETER [ 2 ], em problemas de escolha de alternativas, os benefícios marginais ou incrementais e os custos associados com mudanças, além de um nível base ou projeto de referência, deveriam ser usados. O método consiste dos seguintes passos:

- 1 - Listam-se as alternativas ordenadamente com a situação de menor custo tomada como referência inicial;
- 2 - Compara-se a referência inicial com a próxima maior alternativa de custo através do cálculo do benefício incremental e do custo incremental,  $\Delta B$  e  $\Delta C$ , respectivamente;
- 3 - Se  $\Delta B/\Delta C < 1$  então a alternativa 2 é rejeitada, porque a primeira alternativa é superior;
- 4 - Compara-se a alternativa 1 com a próxima, alternativa 3;
- 5 - Se  $\Delta B/\Delta C > 1$  então a alternativa 1 é rejeitada e a alternativa 3 torna-se a melhor solução corrente;
- 6 - Segue-se este método até que todas as alternativas sejam comparadas com a melhor solução corrente.

Um aspecto importante a ser ressaltado é que este método pode funcionar muito bem como complemento dos métodos de custo versus índice de desempenho, índice de desempenho do material e análise do valor. Isto se deve ao fato, de que esta relação proporciona uma abordagem diferenciada ao fator custo nos métodos anteriormente citados.

### 2.3.6 Diagramas de propriedades de materiais

Os diagramas de propriedades de materiais de ASHBY [ 10 ] partem da classificação dos materiais sólidos em 6 grandes classes: metais, polímeros, elastômeros, cerâmicos, vidros e compósitos. Estas grandes classes de materiais relacionam-se como mostrado na figura 2-3.

O objetivo dos diagramas é relacionar as propriedades das seis classes de materiais. Isto é feito através de um diagrama em escala logarítmica com propriedades plotadas em seus eixos. Os limites para os eixos são escolhidos de maneira a abrangerem todas as classes de materiais.

Dados referentes a uma dada classe de materiais são agrupados dentro de um envelope propriedade, figura 2-4.

A seleção de materiais utilizando estes diagramas

parte de relações conhecidas e específicas para determinadas solicitações gerando linhas guia para a seleção de materiais.

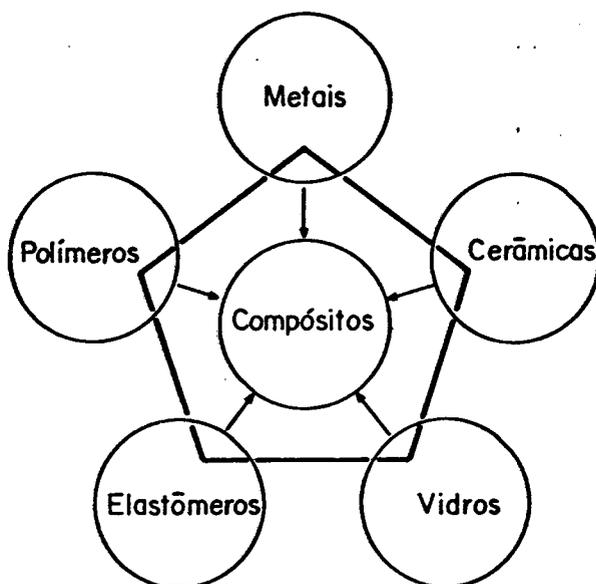
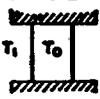


figura 2-3. Classes de materiais segundo ASHBY [10]

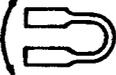
Identificado o tipo de solicitação, o projetista pesquisa na tabela 2.3, onde estão sumarizadas as relações que determinam as linhas guias para a seleção dos materiais e o diagrama onde estas linhas guias podem ser utilizadas. Os diagramas possuem escalas logarítmicas em seus eixos, o que faz com que as linhas guias sejam sempre retas. O material é obtido através da intersecção da reta com o envelope que contém a propriedade relativa à solicitação.

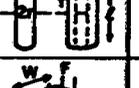
Tabela 2-3. Localização das propriedades nos diagramas

PROJETO TÉRMICO		DIAGRAMAS	
<b>FLUXO TÉRMICO</b> 	MÍNIMO FLUXO DE CALOR	MIN. $\lambda$	8
	MÍNIMA TEMPERATURA FINAL	MIN. $\lambda/C_{op}$	8
<b>TENSÃO E CHOQUE TÉRMICO</b> 	MÍNIMA TENSÃO TÉRMICA	MIN. $E \alpha$	9
	MAXI CHOQUE TÉRMICO	MAX. $\sigma_y/E\alpha$	10

PROJETO ELÁSTICO

DIAGRAMAS

	MOLA DE MIN. VOLUME	MAX. $\sigma_y^2/E$	4
	MOLA DE MIN. PESO	MAX. $\sigma_y^2/\rho E$	1.4
	ARTICULAÇÃO SEM CARREGAMENTO AXIAL	MAX. $\sigma_y/E$	4
	ARTICULAÇÃO COM CARREGAMENTO AXIAL	MAX. $\sigma_y^2/E$	4
	PONTO OU LINHA DE CONTATO COM MÍNIMA PERDA POR ATRITO	MAX. $\sigma_y^3/E^2 \cdot E$	4

TIPO DE CARREGAMENTO	MINIMIZAR PESO PARA DADA	RESISTÊNCIA		
		RIGIDEZ	DÚCTIL	FRÁGIL
BARRA EM TRACÃO F, $\ell$ ESPECIFICADO r LIVRE 		$E/P$	$\sigma_y/P$	$K_{IC}/P$
BARRA EM TORÇÃO T, $\ell$ ESPECIFICADO r LIVRE 		$G/P$	$\sigma_y/P$	$K_{IC}/P$
TUBO EM TORÇÃO T, $\ell$ , r ESPECIFICADO t LIVRE 		$G/P$	$\sigma_y/P$	$K_{IC}/P$
FLEXÃO F, $\ell$ ESPECIFICADO r OU t LIVRE 		$E^{1/2}/P$	$\sigma_y^{2/3}/P$	$K_{IC}^{2/3}/P$
FLANBAGEM F, $\ell$ ESPECIFICADO r OU t LIVRE 		$E^{1/2}/P$	-	-
FLEXÃO DE UMA PLACA F, $\ell$ , W ESPECIFICADO t LIVRE 		$E^{1/3}/P$	$\sigma_y^{1/2}/P$	$K_{IC}^{1/2}/P$
FLANBAGEM DE UMA PLACA F, $\ell$ , W ESPECIFICADO t LIVRE 		$E^{1/3}/P$	-	-
CILINDRO COM PRESSÃO INTERNA p, r ESPECIFICADO t LIVRE 		$E/P$	$\sigma_y/P$	$K_{IC}/P$
CILINDRO EM ROTAÇÃO W, r ESPECIFICADO t LIVRE 		$E/P$	$\sigma_y/P$	$K_{IC}/P$
ESFERA COM PRESSÃO INTERNA p, r ESPECIFICADO t LIVRE 		$E/(1-\nu)/P$	$\sigma_y/P$	$K_{IC}/P$

DIAGRAMAS 1.203

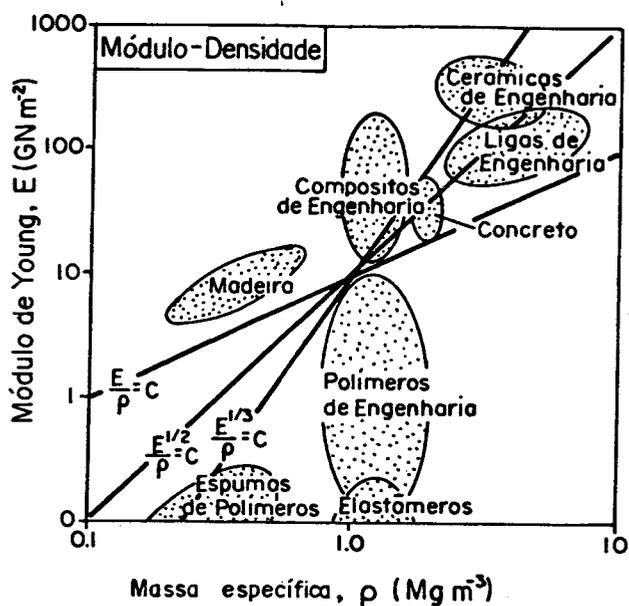


Figura 2-4. Exemplo de envelope de propriedades de materiais

Tomando-se como exemplo, o projeto de uma mola, que deve possuir mínimo volume, a seleção do material deste componente poderia ser realizada através desta técnica da seguinte maneira:

- 1 - Localiza-se a relação determinada pelo requisito: mola de mínimo volume, na tabela 2-3;
- 2 - A relação escolhida indica o diagrama que deve ser usado, que neste caso é o diagrama 4, obtido na tabela 2-3;
- 3 - Tendo-se a relação e o diagrama, basta encontrar a reta correspondente e suas intersecções com as propriedades dos materiais, estabelecidas por cada um dos envelopes, conforme figura 2-5;
- 4 - A partir da figura 2-5, o projetista poderia optar pelos materiais destacados neste Diagrama.

Em ASHBY [10] são apresentados 10 diagramas que utilizam as relações mostradas na tabela 2-3.

Pode-se dizer que os diagramas de propriedades de materiais são bastante úteis na forma de apresentação de dados de propriedades de materiais, mas sua utilização direta na

seleção ainda é extremamente restrita a situações bastante específicas e com baixo número de requisitos do produto, devido a dificuldade com a geração de um número de combinações muito grande.

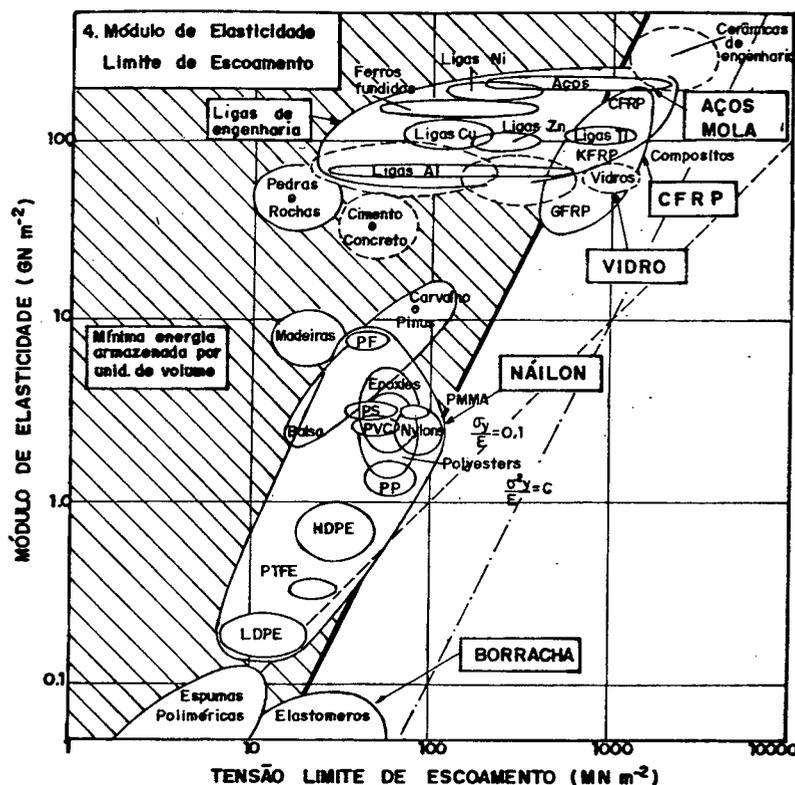


Figura 2-5. Exemplo de Diagrama de Propriedades de materiais

Percebe-se também que futuramente este método poderá ter grande utilização desde que um maior número de relações de desempenho estejam disponíveis aos projetistas, bem como um maior número de diagramas com as possíveis combinações nas propriedades.

#### 2.4 A seleção de materiais com o auxílio do computador

Os sistemas computacionais destinados à solução do problema da seleção de materiais tiveram sua evolução atrelada ao próprio desenvolvimento da ciência da computação. Pode-se perceber isto através do exame aos sistemas computacionais usados e de uma rápida análise de implementação dos métodos apresentados no item 2.3.

#### 2.4.1 Os sistemas computacionais usados

Distinguem-se, atualmente, três classes de sistemas empregados.

A primeira classe pode ser chamada de programas tradicionais cujo exemplo poderia ser o software SM ( Seleção de Materiais de Construção Mecânica ) de KUHN-ARROYO [ 13 ]. " SM pesquisa um banco de dados e apresenta uma lista de materiais baseada no critério adotado para a seleção de materiais, que pode ser por campo de aplicação ou por características mecânicas e de fabricação ".

Normalmente este tipo de software baseia-se na atribuição de qualificadores a cada uma das propriedades com o objetivo de reduzir-se o tempo de busca.

Identifica-se nesta classe de software, programas com quatro módulos básicos:

- 1 - módulo de interface com o usuário;
- 2 - módulo de processamento;
- 3 - módulo de dados;
- 4 - módulo de apresentação ou de saída.

O aspecto mais relevante no SM encontra-se no módulo de dados onde, o armazenamento dos dados é feito através de um banco de dados estruturado sequencialmente em que cada linha do arquivo de dados, contém as informações relativas a um material específico, organizadas em campos [ 13 ].

Conclui-se que este tipo de programa é um sistema para organização, manipulação e gerenciamento dos dados recaindo a decisão para o projetista. Isto o caracteriza como um sistema de apoio a decisão, que possui como saída uma extensa lista de materiais candidatos.

A segunda classe denominada sistemas especialistas

ou sistemas baseados em conhecimento compreende uma área de estudos pertencente a Inteligência Artificial.

O mais típico exemplo é um sistema para a seleção de materiais que se baseia no algoritmo AIM ( mecanismo de inferência alternativa ) [12]. Este software possui as características elementares de um sistema especialista, ou seja, uma base de conhecimento e um " programa " que controla a aplicação da base de conhecimento, isto é, o motor de inferência. Através do índice de desempenho do material, seção 2.3.2, o sistema executa a seleção de materiais com algumas vantagens.

Uma das vantagens que este tipo de software possui sobre os chamados programas tradicionais, é que os atributos, ou seja, as propriedades dos materiais podem ser determinadas pelo próprio usuário e não estão totalmente pré-estabelecidas no programa.

Outras vantagens são:

- \* programas mais compactos;
- \* facilidade para atualização da base de conhecimento;
- \* tempo de busca otimizado pelo motor de inferência;
- \* possível utilização de linguagem natural.

A terceira classe de softwares utiliza a chamada técnica de programação orientada a objeto. Nesta classe de programas os primeiros protótipos de sistemas para a seleção de materiais ainda encontram-se em desenvolvimento, conforme HOPGOOD [12].

Nas duas classes anteriores os programas trabalham manipulando variáveis discretas ou contínuas sujeitas a qualificadores, pesos e índices de desempenho. No caso desta técnica o programa trabalha enviando mensagens entre objetos que podem ser as classes materiais, seus subgrupos ou até mesmo um material específico.

Segundo HOPGOOD [12], os benefícios desta abordagem podem consistir por exemplo, na seleção de materiais com base em especificações de materiais e produtos simultaneamente.

Percebe-se que a utilização da técnica de programação orientada a objeto aumenta a quantidade e complexidade de dados a serem manipulados pelo programa propiciando um melhor desempenho na busca pela solução ótima na seleção de materiais.

#### 2.4.2 Análise da implementação computacional dos métodos de seleção

O método de custo versus índice de desempenho confronta o parâmetro custo com um único parâmetro de desempenho de cada vez. Isto o direciona para a utilização em elementos de máquina isolados ou projetos de geometria e carregamento, muito simples e previamente definidos.

Do ponto de vista do sistema de seleção, o método do custo versus índice de desempenho, deveria existir como opção de abordagem, pois a partir de um simples julgamento do projetista, pode-se conseguir um ganho significativo em termos de processamento. Seria ainda interessante que esta opção fosse realizada pelo próprio sistema o que exigiria sua implementação em um sistema especialista.

No método de índice de desempenho do material existe uma abordagem sistemática claramente definida, a abordagem digital lógica, além de uma boa capacidade de avaliar vários desempenhos em propriedades específicas, sobre uma base comum. Isto o faz parte imprescindível de um sistema tradicional ou sistema especialista. Utilizado em sistemas especialistas, pode proporcionar, grande interação com o usuário e flexibilidade.

Sua utilização em um software, desenvolvido através da técnica de programação orientada a objeto, exigiria uma adaptação do método, principalmente no que diz respeito a

abordagem digital lógica.

O método da análise do valor fornece ao projetista uma boa maneira para avaliar um problema grande e complexo dividindo-o em partes menores e menos complexas. Esta divisão é baseada na comparação entre o custo para a execução de uma dada função e o valor desta função.

Como contribuição para um sistema de seleção de materiais a análise do valor pode, através de sua metodologia, estabelecer claramente as funções de um componente, facilitando a atividade de compatibilização entre vários materiais num mesmo componente.

Sua implementação fica facilitada em um sistema especialista devido a estrutura de seu plano de trabalho que exige que sejam tomadas várias decisões em sua execução.

A análise de falhas constitui-se num método em que sua melhor aplicação reside em reprojatos e na construção de uma base de conhecimento para um sistema especialista voltado para projetos novos. Sua utilização como método único de seleção é bastante limitada devido ao fato de ser baseada em testes e inspeções em falhas já ocorridas.

Se uma base de conhecimento possuir informações de falhas já ocorridas em componentes e materiais similares o tempo de busca para certas soluções pode ser bastante reduzido, mas é preciso determinar até que ponto é compensador um incremento desta ordem na base de conhecimento.

O método da análise de custo-benefício poderia ter grande aplicabilidade na ordenação de possíveis soluções, e como mencionado em item anterior deste capítulo, poderia ser implementada, por qualquer uma das classes de softwares, isto é, em programas tradicionais, sistemas especialistas e através da técnica de programação orientada a objetos.

Os diagramas de propriedades de materiais devido as suas características relacionais possuem melhor implementação através da técnica de programação orientada a objetos.

Um sistema computacional para a seleção de materiais através destes diagramas poderia manipular grandes quantidades de informações com velocidade muito alta, além de maior precisão e confiabilidade na seleção. Contudo sua aplicação seria muito restrita devido ao pequeno número de diagramas já desenvolvidos.

### 3 ATRIBUTOS PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS

#### 3.1 Introdução

Os atributos para a seleção de materiais relacionam-se às características, que estão sendo consideradas na efetiva execução de uma seleção.

Segundo SHALAER [49], um atributo é a abstração de uma única característica possuída pela entidade. Neste caso a entidade é uma parte ou componente do sistema em projeto. Portanto o objetivo é obter um conjunto de atributos que sejam:

- completos: este conjunto de atributos deve abranger todas as informações pertinentes ao objeto ( material ) que está sendo definido;
- totalmente fatorados: o conjunto de atributos deve apresentar as características do objeto ( material ), através de elementos que não permitam mais nenhuma simplificação;
- mutuamente independentes: os atributos devem assumir seus valores independentemente uns dos outros.

Com vistas a estes aspectos e utilizando-se conceitos de análise do valor, adotar-se-á o conceito de função principal e funções secundárias [14] na escolha dos atributos. Este conceito pode ser melhor entendido através da figura 3-1.

Portanto pode-se definir os atributos para a seleção de materiais como, características do material que permitem a execução da função pelo componente, respeitando o processo produtivo a ele vinculado, a concepção proposta e os requisitos de projeto.

Isto indica que um atributo deverá ser uma característica do material, que contribua para a execução da função principal pelo componente, e ainda, relacione-se ao processo produtivo e/ou à concepção proposta e/ou aos requisitos de projeto.

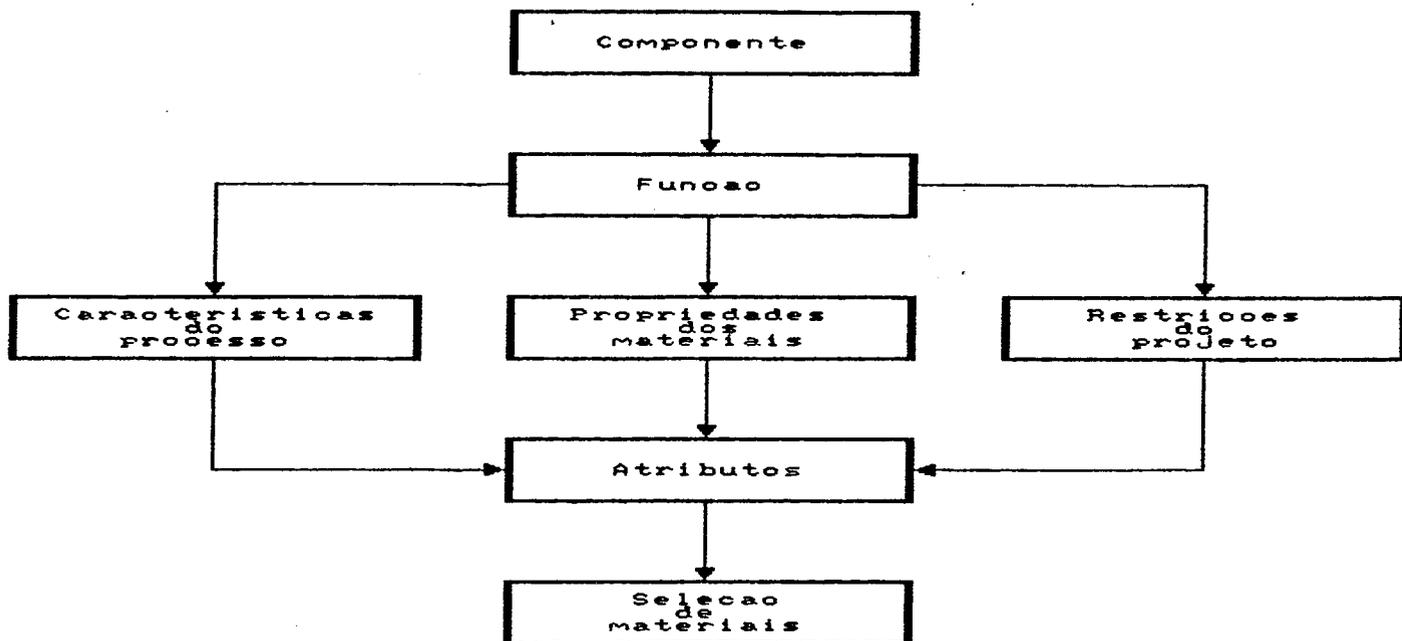


Figura 3-1. Conceito de função na determinação dos atributos

Espera-se, a partir do exposto anteriormente, que os atributos possam distinguir os materiais a serem utilizados em uma concepção proposta. Sua utilização deve ocorrer desde os primeiros estágios da seleção de materiais, isto é, no estágio onde é gerada a primeira lista de materiais candidatos.

### 3.2 Classificação dos atributos

Os atributos podem ser classificados utilizando-se como critério as solicitações a que uma parte ou componente estão sujeitas em um produto.

CHARLES & CRANE [3] apresentam uma classificação à qual podem ser acrescentadas algumas classes como atributos relacionados à estética e relacionados a solicitações físicas. Este acréscimo de novas classes visa aumentar o espectro de atributos típicos e gera a seguinte classificação:

- 1 - Atributos relacionados a solicitações mecânicas;

- 2 - Atributos relacionados a solicitações químicas e do meio-ambiente;
- 3 - Atributos relacionados ao desgaste;
- 4 - Atributos relacionados à estética;
- 5 - Atributos relacionados a solicitações físicas;
- 6 - Atributos relacionados ao processo produtivo.

Os atributos que compõem cada uma destas seis classes são apresentados a seguir, bem como sua utilização no desenvolvimento da solução que representa o projeto de um produto industrial.

### 3.3 Atributos relacionados à solicitações mecânicas

Considerar-se-ão os atributos comumente utilizados pelos projetistas e que são apresentados por CHARLES & CRANE [3].

Estes atributos são: resistência a solicitações estáticas, tenacidade, fadiga e fluência. Os atributos relacionados ao desgaste também poderiam ser enquadrados neste item, mas devido a características específicas, relacionadas ao projeto de componentes sujeitos ao desgaste, eles serão examinados separadamente. Além dos aspectos de projeto, segundo FILHO [24], o desgaste de componentes possui natureza mecânica e térmica, diferentemente dos atributos citados anteriormente.

#### 3.3.1 Resistência a solicitações estáticas

Pode ser definida como " habilidade para resistir a uma carga estática por um período limitado de tempo, à temperatura ambiente " [3]. A resistência estática é uma característica extensiva do material, ou seja, a resistência de um componente pode ser aumentada simplesmente fazendo-o maior. Esta característica não ocorre com atributos como tenacidade, por exemplo.

Apesar de ser uma característica extensiva do material, existem três razões para a procura de materiais com maior resistência:

- a) diminuição de volume;
- b) diminuição de peso e
- c) diminuição de custos.

A melhor maneira de utilizar-se este atributo na atividade de projeto é através do relacionamento da resistência estática ao ensaio de tração e, para alguns materiais, ao ensaio de compressão, como é o caso do concreto e de boa parte dos materiais frágeis.

O atributo de resistência à solicitação estática é utilizado na seleção de materiais, geralmente, acompanhado de um parâmetro a ser maximizado ou minimizado. Portanto, o projetista não deve utilizar diretamente o valor encontrado no manual para uma determinada propriedade. É necessário considerá-lo como uma relação entre a propriedade que forma o atributo e o parâmetro que determina a viabilidade de uma solução maximizada ou minimizada.

Através do ensaio de tração pode-se relacionar várias propriedades que são consideradas a seguir conforme SOUZA [15] e FILHO [24], e que compõe o atributo de resistência à solicitação estática:

a) Tensão limite de resistência:

Corresponde a relação entre a carga máxima, suportada pelo corpo de prova ensaiado, e a área nominal da seção transversal deste.

Essa propriedade é comumente utilizada como índice de resistência mecânica do material, pois reflete a sua capacidade de suportar cargas. Contudo, sua utilização sofre limitações de três ordens: primeira, ela se refere a um valor

limite acima do qual já se iniciou a instabilidade plástica que conduz à fratura; segunda, é necessário utilizar um fator de segurança, para determinar a tensão de projeto, cujo valor é discutível face a confiabilidade desejada; terceira, nem sempre é possível estabelecer uma correlação entre este parâmetro e outras propriedades mecânicas exigidas para um determinado projeto.

Dependendo do grau de fragilidade do material, o limite de resistência à ruptura é um parâmetro válido para projetos, pois nesse caso, o escoamento é muito difícil de ser determinado e a diminuição da área pode ser desprezada em função da pequena zona plástica que estes materiais apresentam. Sendo assim, o projeto de elementos constituídos por estes materiais, obedece a dois critérios: Teoria da Máxima Tensão Normal ou a Teoria da Máxima Deformação Linear.

Na escolha de materiais candidatos deve-se considerar como critério, para uma barra de seção circular por exemplo, a relação  $\sigma/\rho$ , onde  $\sigma$  é a tensão limite de resistência à tração e  $\rho$  é a massa específica do material. Obviamente a redução de peso e volume no componente são obtidas do maior valor possível para esta relação [3] e [10].

b) Tensão limite de escoamento:

Constitui-se numa propriedade fundamental tanto para o projeto do produto, como para o projeto do processo produtivo.

É a capacidade do material resistir à deformação plástica e é determinada pela relação entre a força que inicia a deformação permanente e a área da seção reta.

No projeto do produto, indica explicitamente qual é a tensão máxima acima da qual inicia-se a deformação plástica, numa solicitação do estado simples de tração e, no estado complexo de tensão, constitui a constante dos critérios de

resistência.

No projeto do processo produtivo, fornece o valor limite inferior para se iniciar o processo de conformação plástica, quer como valor diretamente correspondente à tensão limite na sollicitação de tração, quer como constante constituinte dos critérios de escoamento necessários aos estados complexos de tensão existentes em processos produtivos.

O conhecimento da tensão limite de escoamento  $\sigma_e$ , permite projetar e dimensionar os componentes e as estruturas, aplicando as equações desenvolvidas no estudo da mecânica dos materiais. Pode-se adotar o Critério de Resistência de Tresca e a Teoria da Máxima Energia de Distorção [26]. Já na seleção de materiais candidatos, sua importância reside na relação entre  $\sigma_e$  e  $\rho$  onde as melhores relações resistência/peso e resistência/volume são diretamente proporcionais a  $\sigma_e/\rho$ , para barras submetidas a tração ou compressão.

### c) Ductilidade:

Essa propriedade é medida através da deformação plástica, no que se refere ao seu comprimento (alongamento) e a sua seção transversal (estricção).

Devido a facilidade de determinação, o alongamento é frequentemente tomado como parâmetro de medida da ductilidade, dando uma indicação do comportamento do material quanto ao tipo de fratura que pode estar sujeito: fratura dúctil ou fratura frágil.

Entretanto, a análise do comportamento do material na fratura é complexa e não pode se basear unicamente num parâmetro. Além desta indicação quanto à resistência, o alongamento permite, também, estimar aproximadamente o comportamento do material em processos de conformação.

d) Módulo de elasticidade:

O módulo de elasticidade é uma medida da rigidez do material. Quanto maior o módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma carga e mais rígido será o material.

Em decorrência de um determinado nível de sollicitação, muitas vezes é necessário determinar também o nível da deformação elástica atingido, nesse caso o conhecimento do módulo de elasticidade é fundamental.

Nos projetos onde a deformação elástica deve permanecer baixa, deve-se escolher um material que tenha este valor suficientemente alto para suportar grandes tensões com deformações reduzidas.

Nas relações entre tensões e deformações estabelecidas pela teoria da elasticidade, identifica-se o módulo de elasticidade  $E$  para tensões normais e deformações lineares, e o módulo de elasticidade transversal  $G$  para tensões tangenciais ou de cisalhamento e as deformações tangenciais. Os dois módulos relacionam-se através do coeficiente de Poisson  $\nu$ , pela equação ( 3-1 ):

$$E = 2G(1 + \nu) \quad ( 3-1 )$$

O coeficiente de Poisson num material homogêneo, isotrópico e sollicitado uniaxialmente à tração ou compressão é dado por:

$$\nu = - \frac{\epsilon'}{\epsilon} \quad ( 3-2 )$$

onde:

$\epsilon'$  = deformação transversal e

$\epsilon$  = deformação longitudinal

Ele caracteriza portanto a rigidez do material na direção perpendicular a uma carga de tração aplicada

longitudinalmente a peça.

Convém destacar que o módulo de elasticidade praticamente não se altera com as modificações de composição e microestrutura que possam ser aplicadas aos aços. Entretanto o módulo de elasticidade não é uma propriedade específica do material. Ele depende das condições ambientais de onde o material se encontra, como por exemplo temperatura, pressão, etc.

e) Resiliência:

Dá-se o nome de resiliência à propriedade de um material absorver energia quando deformado elasticamente e liberá-la quando descarregado.

Mede-se esta energia através do módulo de resiliência, que é a energia de deformação necessária para tensionar o material de uma tensão 0 até a tensão limite de escoamento. Ou seja:

$$U_R = \frac{\sigma_e^2}{2E} \quad ( 3-3 )$$

onde:

$U_R$  = módulo de resiliência;  
 $\sigma_e$  = tensão de escoamento e  
 $E$  = módulo de elasticidade.

Esta propriedade é, particularmente, importante para o projeto de elementos elásticos tais como molas, pois corresponde à energia máxima de deformação elástica.

### 3.3.2 Tenacidade

A tenacidade é a capacidade de um material absorver energia pela deformação plástica num ensaio mecânico conduzido até a fratura. É determinada pelo trabalho absorvido durante a

propagação de uma trinca através de um componente de um sistema mecânico. Dá-se o nome de módulo de tenacidade, a quantidade de energia absorvida por unidade de volume que o material pode resistir sem causar sua ruptura.

A fratura pode ser classificada em termos da velocidade com a qual ela se propaga, conforme a tabela 3-1.

A fratura ocorre pelo avanço de uma trinca e, do ponto de vista do carregamento estático a baixas temperaturas, os mecanismos de fratura podem ser classificados conforme a tabela 3-2:

Tabela 3-1 Classificação de fraturas

	Frágil	Dúctil
Tensão	A fratura ocorre a um nível de tensão abaixo daquele requerido para produzir escoamento através de toda a seção transversal	A fratura ocorre a um nível de tensão que corresponde àquele requerido para produzir escoamento através de toda a seção transversal
Energia	A fratura neste caso é um processo de baixa energia	A fratura neste caso é um processo de alta energia
Velocidade	A fratura é rápida	A fratura é lenta

Tabela 3-2 Fratura a baixa temperatura com carregamento estático

Micromecanismo	Natureza da fratura	
	Frágil	Dúctil
Clivagem	comum em aços	rara
Coalescência dos microvazios	possível em materiais de alta resistência	comum

A determinação da tenacidade, também, ocorre comumente num ensaio de choque, conduzido para diversos níveis de temperatura, num corpo de prova entalhado. Nesse caso determina-se a tenacidade à fratura dinâmica ou ao comportamento frágil.

Os ensaios de choque Charpy e o ensaio de rasgamento em queda livre de um peso ( DWTT ), permitem estabelecer a temperatura de transição frágil-dúctil, que pode ser definida como a temperatura onde existe 50% de fratura dúctil e 50% de fratura frágil. Então, um critério de seleção de material seria a comparação da temperatura de trabalho com a temperatura de transição frágil-dúctil [24],[3].

A seleção de materiais de alta tenacidade, na maioria das vezes, é feita em função da resistência ao choque em baixas temperaturas considerando-se a temperatura de transição e portanto determinando a mais baixa temperatura de trabalho.

Devem ainda, ser observados como parâmetros de seleção, os critérios de projeto que consideram a utilização de tamanhos críticos para defeitos ou trincas iniciais, e são baseados no estudo da mecânica da fratura [27].

### 3.3.3 Fadiga

As falhas de componentes em serviço, na maioria das

vezes, decorrem da fadiga provocada pelas solicitações cíclicas. A fratura por fadiga apresenta características frágeis e é influenciada por diversos fatores como: pontos de concentração de tensões, temperatura, presença de meios corrosivos, tensões residuais e outros que dependem das condições de projeto e de fabricação da peça e do meio-ambiente.

Portanto, os resultados dos ensaios de fadiga realizados em corpo de prova, constituem apenas uma indicação do comportamento em serviço do material desse corpo de prova.

Os parâmetros fundamentais determinados nos critérios de análise de fadiga, com apoio no estudo das tensões cíclicas solicitantes, são os limites de fadiga, ou a resistência à fadiga para um dado número de ciclos.

Segundo FILHO [24], são utilizados dois métodos para a análise de fadiga ou a resistência à fadiga, que consideram as tensões atuantes ( média, mínima e máxima ) e a relação de tensões para um dado corpo de prova. O primeiro consiste na utilização de " diagramas de fadiga para vida infinita " ( ver [28] ) e, é valido desde que se considere que a solicitação se mantenha dentro do regime elástico do material, desprezando as deformações plásticas locais, portanto de pequena utilização. O segundo considera as deformações plásticas.

Os critérios de análise de fadiga com considerações de deformações plásticas, inicialmente estudados para baixo número de ciclos, são aplicados também para as considerações de vida longa. A formulação é a seguinte: .

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = c ( 2N )^d \quad ( 3-4 )$$

onde:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \text{amplitude da tensão};$$

$2N$  = número de inversões de tensão para a ruptura;

c = coeficiente de resistência à fadiga e

d = expoente de resistência à fadiga.

Como a deformação total ( $\Delta\epsilon$ ) é a soma da deformação elástica ( $\Delta\epsilon_e$ ) com a plástica ( $\Delta\epsilon_p$ ), obtém-se:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \quad (3-5)$$

Dividindo-se a equação (3-4) pelo módulo de elasticidade E e considerando-se a deformação elástica obtém-se:

$$\frac{\Delta\epsilon_e}{2} = \frac{c(\sigma N)^d}{E} \quad (3-6)$$

onde:

E = módulo de elasticidade;

$\frac{\Delta\epsilon}{2}$  = amplitude da deformação total;

$\frac{\Delta\epsilon_e}{2}$  = amplitude de deformação elástica e

$\frac{\Delta\epsilon_p}{2}$  = amplitude de deformação plástica.

Adotando-se o mesmo procedimento para a deformação plástica, chega-se a equação ( 3-7 ).

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = a ( 2N )^b \quad ( 3-7 )$$

onde:

a = coeficiente de ductilidade na fadiga e

b = expoente de ductilidade na fadiga.

Somando-se ambas as amplitudes de deformação, equações ( 3-6 ) e ( 3-7 ) encontra-se a amplitude de deformação total na forma da equação ( 3-8 ).

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{c( 2N )^d}{E} + a( 2N )^b \quad ( 3-8 )$$

As condições particulares são:

para  $N < 10^3$

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \gg \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} \quad e \quad \frac{\Delta \varepsilon}{2} = a( 2N )^b \quad ( 3-9 )$$

para  $N > 10^4$

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \ll \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} \quad e \quad \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{c( 2N )^d}{E} \quad ( 3-10 )$$

Portanto, para as condições de fadiga de baixo número de ciclos predomina o critério de amplitude de deformação plástica, e para um número grande de ciclos o critério de amplitude de tensão pode ser usado.

A partir do conhecimento dos parâmetros fundamentais é possível projetar componentes de sistemas mecânicos realizando estimativas de seus desempenhos em operação. Além destes parâmetros fundamentais deve-se, ainda, considerar as condições de dano acumulado, entalhes e furos concentradores de tensão e nível da tensão média.

Apesar da fadiga dos materiais poliméricos ser superficialmente similar à fadiga dos metais, ela é influenciada

por fatores sem importância nos metais, como: peso molecular, grau de cruzamento das cadeias, cristalinidade, efeitos de transição e efeitos térmicos.

A importância dos efeitos térmicos indica, que a fadiga em polímeros é muito sensível à frequência do ciclo de carregamento. Se as condições não são isotérmicas, o efeito de aquecimento da histerese, gerado em cada ciclo de tensão, causa uma diminuição no módulo de elasticidade levando a uma falha prematura [3].

Um dos mais importantes fatores que influenciam a resistência à fadiga dos plásticos é o grau de cristalinidade. Os polímeros cristalinos como náilon, por exemplo, possuem maior resistência à fadiga que materiais com alto grau de cruzamento das cadeias, isto é, materiais amorfos como o poliestireno [18].

Conforme HERTZBERG [19], a resistência à fadiga a um dado nível de tensão é dramaticamente aumentada pelo aumento do peso molecular ou pela adição de uma fração de alto peso molecular à matriz.

### 3.3.4 Fluência

A fluência é definida como uma deformação plástica que ocorre num corpo quando submetido a uma carga constante, aplicada a um determinado nível de temperatura, durante um prolongado período de tempo. Essa propriedade é fundamental para o projeto de componentes de máquinas e estruturas que devem operar à temperaturas elevadas. O tempo necessário para que ocorra uma determinada deformação plástica do componente em serviço, sob tensão constante, é um índice importante para o projeto.

O ensaio de fluência, realizado em corpos de prova, deve ser de menor duração do que o previsto para o funcionamento em serviço, caso contrário o ensaio seria muito demorado e caro.

Portanto, existe a incerteza, que deve ser considerada no projeto, decorrente da extrapolação de comportamentos em serviço, para tempos longos, com base em ensaios de curta duração ( ver [24] ).

A seleção de materiais para trabalhar em altas temperaturas deve atender a dois critérios básicos iniciais.

Solicitações em curtos períodos de tempo, onde as propriedades de resistência, ductilidade, obtidas em ensaios de tração convencionais, sofrem alterações com a elevação da temperatura, surgindo em geral uma redução da resistência e aumento da ductilidade, mas podendo estar presentes fenômenos microestruturais que elevam substancialmente a fragilidade.

Solicitação em longos períodos de tempo, onde as propriedades de fluência são importantes, devendo-se determinar as tensões para as velocidades mínimas de fluência e as tensões para a ruptura na fluência.

Todo mecanismo de fluência é baseado no movimento de discordâncias. Devido ao fato de existir uma temperatura, a partir da qual o movimento de discordâncias fica facilitado pelos contornos de grão - chamada temperatura equicoesiva - a seleção do material sujeito a fluência, poderia ser baseada na energia necessária para que os mecanismos de fluência fossem ativados, energia essa que é função da temperatura equicoesiva [7].

SOUZA [15] considera que o projeto de uma peça sujeita a fluência deve ser baseado na velocidade mínima de fluência, durante o estágio do ensaio onde a deformação é linear. Determina-se então, a tensão necessária para produzir uma velocidade de fluência de  $\epsilon\%$  por hora ou por 1000 ou 10000 horas, numa dada temperatura. O valor de  $\epsilon$  geralmente é de 0,0001% a 1%. Essa tensão determinada, é chamada de resistência à fluência. Este passa a ser então o principal parâmetro de

comparação entre os materiais candidatos.

A necessidade de resistir à fluência e à corrosão e oxidação simultaneamente, tem limitado o desenvolvimento de ligas metálicas, resultando no desenvolvimento de materiais compósitos, que são normalmente provenientes de laminações ou compactações de pós metálicos com não metálicos, para a utilização até 2700°C [15].

### 3.3.5 Aspectos de projeto relacionados a solicitações mecânicas

Do ponto de vista da concepção de um componente, cujo material deve atender aos atributos relatados no item 3.3, alguns aspectos de projeto também podem ser relevantes na seleção de materiais.

Nos projetos onde o atributo de resistência à solicitação estática é predominante, a distribuição de tensões pela peça, sua forma e a distribuição da massa do material podem influir bastante na seleção, permitindo muitas vezes a utilização de materiais com menos características especiais e portanto com custos inferiores [37].

O atributo tenacidade possui dois aspectos de projeto que são fundamentais para a seleção do material de um componente. O primeiro se refere a forma dos eventuais entalhes existentes. Eles devem gerar a menor concentração de tensões possível, para que a maior quantidade de energia possa ser absorvida sem comprometimento do componente. O segundo aspecto está relacionado a textura do material e, no caso de materiais metálicos, ao posicionamento do componente em relação a direção do trabalho de conformação deste material. Os componentes com geometria paralela à direção de laminação apresentam maior tenacidade [24] e [28].

A seleção de materiais, que considera o atributo de fadiga, pode ser melhorada se forem considerados principalmente

aspectos de projeto relativos à concentração de tensões e acabamento, ou tratamento superficial do componente. Estes aspectos visam eliminar pelo menos uma das causas da fadiga, que são: sollicitação cíclica, tensão de tração e deformação plástica. Segundo FILHO [24], se não existir um desses fatores a fadiga não ocorre. Portanto, é fundamental para a obtenção de uma boa resistência à fadiga, um cuidadoso exame das influências dos diversos processos produtivos disponíveis ao projetista, de tal modo a atingir-se preferencialmente tensões superficiais de compressão.

Na seleção de materiais sob fluência, os principais fatores em questão são a temperatura e o tempo de aplicação desta temperatura. Isto leva o projetista a desenvolver componentes que permitam a maior troca térmica possível, para que a temperatura do componente permaneça baixa. Outros aspectos importantes são o isolamento de fontes de calor e a redução ao mínimo da geração de calor.

### 3.4 Atributos relacionados a sollicitações químicas e do meio-ambiente

Podem ser consideradas sollicitações químicas e do meio-ambiente, todos os processos de corrosão, oxidação e degradações a que os materiais possam ser submetidos.

#### 3.4.1 Tipos de corrosão

Segundo SILENCE [21], KIRCHNER [22] e TELLES [25], classificam-se os processos de corrosão da seguinte maneira:

##### a) Corrosão uniforme ou generalizada:

É uma forma de corrosão que se manifesta aproximadamente por igual em toda superfície em contato com o meio corrosivo. A perda de material é aproximadamente constante. É causada por irregularidades microscópicas em contato com o

meio eletrolítico.

b) Corrosão alveolar ou " pitting ":

Consiste na formação de pequenas cavidades localizadas, que podem chegar a perfurar toda a espessura da peça, com pouca perda de material. Geralmente sua causa provém de defeitos encontrados em camadas apassivadoras, isto é, camadas de óxidos que protegem o material, da corrosão uniforme.

c) Corrosão sob tensão:

Manifesta-se pelo aparecimento de trincas perpendiculares à direção das tensões de tração. As trincas surgem pela combinação de um meio corrosivo com tensões de tração, que podem ser bem menores que aquelas necessárias para causar dano sem o meio corrosivo.

d) Corrosão seletiva:

Neste tipo de corrosão apenas um elemento de uma liga metálica é corroído. O resultado é uma estrutura esponjosa, praticamente, sem nenhuma resistência mecânica. Não ocorrem modificações nas dimensões externas da peça.

e) Corrosão galvânica:

Ocorre quando dois metais ou duas ligas metálicas diferentes estão em contato em um meio eletrolítico. Isto significa que quando o meio ambiente for um bom condutor, não se deve colocar em contato metais com grande diferença de potencial.

f) Corrosão sob contato:

É um tipo de corrosão localizada, que acontece quando pequenas quantidades de um fluido corrosivo, ficam

retidas ou estagnadas em depressões, cavidades ou espaços confinados, especialmente quando forem capilares.

g) Corrosão intergranular:

Trincas microscópicas são formadas ao longo do contorno dos grãos da estrutura cristalina do metal. Quando as trincas atingem uma certa profundidade, podem destacar pedaços do metal pela ação de esforços mecânicos muito baixos.

h) Corrosão-erosão:

É o resultado de movimento entre o meio corrosivo e a superfície do material. O ataque, usualmente, resulta em ranhuras, ondas ou outros modelos direcionais.

i) Corrosão biológica:

Ocorre devido a ação de microrganismos. O resultado do ataque é uma corrosão localizada, geralmente do tipo alveolar.

### 3.4.2 Seleção de materiais em ambientes corrosivos

A seleção de materiais que servem em ambientes corrosivos requer a consideração de fatores diversos, além da resistência a corrosão do material, conforme CHARLES & CRANE [3] é necessário considerar-se:

- resistência à fadiga;
- temperatura em serviço;
- características de fabricação;
- aparência do produto;
- umidade do ambiente;
- composição do ambiente;
- acesso da atmosfera;
- presença de componentes biológicos;
- condições de fluxo do eletrólito;

- estado de tensões da peça e
- custo do material ou camada protetora.

Segundo KIRCHNER [22], a seleção de materiais que atuam sob condições corrosivas deveria iniciar-se com a avaliação de alguns aspectos significativos: função requerida do componente; condições corrosivas de serviço; restrições físicas, econômicas e legais juntamente com as consequências de falha.

Os aspectos de função do componente referem-se aos atributos já apresentados neste capítulo.

No que diz respeito às condições corrosivas, o primeiro passo é identificar as reações que ocorrem no ambiente em serviço. Atenção especial deve ser dada à presença de contaminantes, porque estes podem alterar concentrações e causar corrosões perigosas como corrosão sob tensão ou corrosão alveolar.

Se o componente ou produto está associado com reações químicas é importante determinar a natureza do processo químico, que pode ser oxidação, redução ou um processo neutro. Iniciando com estes tipos básicos de ambientes o próximo passo é considerar aspectos específicos como concentração, pH, pressão ou vácuo, temperatura, presença ou não de catalizadores e as condições de velocidade da reação.

A classificação do tipo de ambiente, isola o tipo de material que é satisfatório para a aplicação e prediz o nível de resistência à corrosão requerida [22].

O próximo passo é rever hierarquicamente a resistência à corrosão e determinar a classe do material que será objeto de trabalho. A habilidade do material resistir à várias formas de corrosão é então revisada e pesada para que seja proporcionada uma resistência que preencha durante a vida útil do produto, os requisitos inicialmente determinados.

Além da adoção de materiais com maior resistência à corrosão, cuidados de projeto podem ser adotados para que o componente tenha uma maior eficiência do ponto de vista da corrosão. Alguns destes cuidados são resumidamente apresentados a seguir, conforme TELLES [25]:

- a) Evitar pontos de concentração de tensões;
- b) Evitar velocidade excessiva de fluidos ou pontos de turbilhonamento, bem como a estagnação dos fluidos;
- c) Evitar cavidades onde pequenas quantidades de líquidos possam ficar retidas ou regiões de drenagem impossível ou imperfeita;
- d) Evitar soldas entre metais diferentes ou com eletrodos de metal diferente;
- e) Proporcionar bom acabamento interno a peças que contenham agentes agressivos.

As considerações finais são análises das várias alternativas, para identificar a solução mais econômica.

### 3.5 Atributos relacionados ao desgaste

#### 3.5.1 Tipos de desgaste

Existem três principais tipos de desgaste: adesivo abrasivo e corrosivo.

O desgaste adesivo ocorre quando duas superfícies são friccionadas juntas, sem a presença de um agente abrasivo. O desgaste abrasivo é caracterizado pelo movimento relativo de pelo menos um elemento abrasivo com a superfície do componente. Já o desgaste corrosivo está associado a um ataque químico sobre o material ( ver item 3.4 ) [28].

Resistência ao desgaste é proporcionada pelo balanceamento de muitas propriedades separadamente e, que podem ser diferentes para cada máquina ou superfície de desgaste.

Conforme BACK [37], nos desgastes adesivo e

abrasivo, o volume desgastado é aproximadamente proporcional à distância de deslizamento e à pressão de contato e inversamente proporcional à dureza das superfícies.

A dureza da superfície, que pode ser considerada como um parâmetro do material, é controlada de diversas formas, como: tratamentos térmicos de têmpera, cementação, nitretação e recobrimentos superficiais como a cromagem dura.

Equações derivadas de princípios fundamentais ainda não são disponíveis. Algumas equações empíricas são disponíveis para muitas condições especiais [30]. Pode-se assumir, da forma de equações empíricas de outros campos, que uma equação geral da taxa de desgaste seria da forma:

$$\gamma = K \frac{A^a B^b C^c D^d \dots}{E^e F^f G^g H^h \dots} \quad ( 3-11 )$$

onde:

- $\gamma$  = taxa de desgaste;
- A, B, etc = parâmetros operacionais;
- a, b, etc = expoentes irregulares e
- K = constante de compatibilização de unidades.

Os parâmetros que podem ser incluídos na equação ( 3-11 ) são de três tipos e estão listados na tabela 3-3.

### 3.5.2 Aspectos de projeto relacionados ao desgaste

Segundo BACK [37], a escolha de materiais de um par deslizante deve atender alguns aspectos relevantes:

- a) Boas condições de amaciamento;
- b) Pequeno coeficiente de atrito e pequena variação entre os coeficientes de atrito estático e dinâmico;
- c) Máxima suavidade de movimento;
- d) Boa rigidez de contato;
- e) Boa capacidade de acamamento de partículas abrasíveis.

Tabela 3-3. Parâmetros frequentemente usados em equações de desgaste

---

Parâmetros operacionais
1. Topografia da superfície
2. Geometria de contato
3. Carga aplicada
4. Velocidade de deslizamento/rolamento
5. Coeficiente de atrito
6. Outros

---

Parâmetros do material
1. Dureza
2. Ductilidade
3. Tenacidade
4. Resistência
5. Módulo de elasticidade
6. Morfologia do material
7. Tipo e espessura do filme superficial
8. Propriedades térmicas
9. Outros

---

Parâmetros ambientais
1. Tipo e quantidade de lubrificante
2. Tipo e quantidade de resíduos
3. Rigidez da estrutura de suporte
4. Temperatura ambiente
5. Frequência de deslizamento/rolamento
6. Limpeza, alinhamento e ajustagem
7. Semelhanças e diferenças do material do par
8. Outros

---

O atrito é uma fonte de perda de energia, além de ser também a maior fonte de aquecimento em superfícies friccionadas e componentes de máquinas. O atrito pode causar eletrificação nas fibras de polímeros e é uma fonte de ruído, que é um fator limitante no projeto de uniões móveis.

O desgaste pode alterar a geometria dos componentes e, conseqüentemente, afetar a precisão destes. Em casos extremos, pode diminuir a capacidade de suportar carga na seção dos componentes.

Materiais baseados em polímeros, laminados, carbono-grafite e compósitos metal-cerâmicos encontram grandes aplicações para componentes de máquinas, mecanismos e instrumentos que operam com atrito e sem lubrificação.

### 3.6 Atributos relacionados à estética

Os atributos de estética, no projeto mecânico de produtos industriais, quase sempre são considerados como atributos desejáveis. Embora estes atributos sejam não obrigatórios, eles podem possuir relativa importância na seleção de materiais.

Segundo LÖBACH [42], a estética pode ser definida como a ciência das aparências perceptíveis pelos sentidos. Ela pode ser dividida em estética do objeto, percepção estética e estética do valor. Considerando-se os materiais utilizados em produtos industriais, o interesse permanece fixado à estética do objeto.

Na estética de produtos industriais se descrevem sinais e características dos produtos. Seu conceito central é o de figura com o que esta é denotada como conceito superior da aparência total de um produto industrial. A figura de um produto industrial é a soma dos elementos configuracionais e das relações recíprocas que se estabelecem na constituição da

figura.

A configuração de um produto industrial está influenciada pelo tipo de estrutura configuracional, que exerce sobre o usuário do produto um efeito sobre a sua expressão clara. Este efeito promove no usuário do produto uma postura que pode exteriorizar-se em aceitação, rejeição ou neutralidade frente ao produto.

Portanto, as características estéticas do aspecto de um produto industrial estão determinadas pelos elementos configuracionais, que podem ser descritos como portadores da informação estética do produto.

Os elementos configuracionais do ponto de vista da seleção de materiais, podem ser considerados como os atributos de seleção relacionados a estética do produto e, os principais são descritos a seguir.

#### a) Forma

O elemento mais essencial de uma figura é a forma. Dela podem distinguir-se dois tipos, forma espacial e forma plana. Sua importância como atributo de seleção de materiais reside em dois aspectos. O primeiro relaciona-se diretamente à geometria com que o material básico, ou seja, antes do processo produtivo é obtido. O segundo aspecto diz respeito à geometria que pode ser obtida na fabricação do produto e conseqüentemente tem relação direta com os atributos do processo produtivo [43].

#### b) Superfície

A natureza da superfície dos produtos tem uma grande influência sobre sua eficácia visual e na maioria das vezes depende da escolha do material [42]. As superfícies de materiais diversos e suas combinações produzem no usuário do produto importantes associações de idéias, como limpeza, calor, frio,

frescor, etc. Mediante os mais diversos materiais, as características de sua superfície ( brilhante, opaca, polida, rugosa ) e sua forma, possibilitam alcançar os correspondentes efeitos no produto.

A superfície perfeita, sem falhas, sugere uma perfeição no tocante as características de uso no produto, que nem sempre é real. Tal perfeccionismo nas superfícies provoca, as vezes, no usuário um marcada conduta de cuidados, que muito acertadamente pode denominar-se fetichismo das superfícies.

### c) Cor

Um elemento essencial da figura é a cor. A cor é especialmente apta para agradar a psique do usuário do produto. Podem-se usar cores vivas, intensas para destacar produtos em meio a outros ou destacá-los do ambiente de uso. Em outros casos, as cores intensas podem atuar como estimulantes da atenção ou como simbolo de um possível perigo. O outro princípio de seu emprego refere-se às cores neutras, passivas. Os produtos industriais de cores neutras caracterizam-se por passarem despercebidos no ambiente. As cores são também muito propícias para a criação de contrastes. Deste modo podem criar-se estruturas visuais distintas em diversas partes do produto, mediante o emprego de cores diferentes.

Como considerações finais sobre os atributos relacionados a estética, pode-se dizer que existe uma profunda relação entre estes atributos e o processo produtivo a que o produto se submete. Obviamente, sua maior importância se estabelece na determinação do processo produtivo que pode fornecer o necessário atributo estético e, em segundo lugar na determinação direta do material.

### 3.7 Atributos relacionados a solicitações físicas

Esta classe de atributos inclui o maior número de

atributos de seleção dos materiais. Muitos destes atributos serão apenas citados e para alguns um breve comentário será feito. Esta escolha não se deve a sua importância, que é específica e relativa a cada produto que o projetista desenvolve.

Pode-se citar a seguinte lista de atributos relacionados a solicitações físicas, conforme DIETER [2] e BACK [37]:

- peso específico;
- ponto de fusão;
- pressão de vapor;
- viscosidade;
- permeabilidade;
- refletividade;
- transparência;
- estabilidade dimensional;
- condutividade elétrica;
- constante dielétrica;
- condutividade térmica;
- calor específico;
- coeficiente de expansão térmica;
- absorvidade térmica;
- emissividade térmica;
- resistência ao fogo;
- etc.

Um breve comentário é feito para os atributos mais frequentemente utilizados pelos projetistas, conforme BRADY [9].

A viscosidade tem fundamental importância no processamento de materiais poliméricos e cerâmicos e também nos projetos onde são utilizados materiais em forma de líquidos.

O peso específico do material, que é função de sua microestrutura, possui grande importância principalmente nos projetos onde o peso é um fator crítico. Ela também é importante

no que se refere aos aspectos econômicos, pois muitos materiais de engenharia são comercializados em unidades de peso.

Com relação a condutividade térmica de um material, pode-se afirmar que ela pode causar mudanças em praticamente todas as propriedades do material. Ela pode determinar se uma parte estará sujeita ou não a solicitações que envolvem calor como, fluência ou corrosão, por exemplo. Portanto sua importância fundamental está na determinação da temperatura de um componente nas condições de serviço e com isso seu comportamento face aos demais atributos.

No que se refere a condutividade elétrica, deve-se dar especial atenção aos materiais que são utilizados como isolantes elétricos e aqueles que entram em contato com partes energizadas.

### 3.8 Atributos relacionados ao processo produtivo

A seleção do material deve ser efetuada considerando também a seleção do processo de fabricação do componente. No projeto do processo é fundamental também a seleção do material com vistas a minimizar os custos de fabricação.

#### 3.8.1 Atributos do material a ser processado

A matéria-prima adquirida para a fabricação dos componentes deve apresentar características compatíveis com as exigências do produto e do processo. Isto significa, que no processo de seleção, devem ser montados pares material-processo cujos atributos a serem considerados são apresentados a seguir, conforme DIETER [2] e FILHO [24]:

##### a) Composição química:

Este talvez seja o principal atributo para a seleção tanto do material quanto do processo, pois deste ponto de vista,

a composição química determina, em grande parte, a realização dos requisitos de projeto. Indica os elementos químicos constituintes do material em faixas de composição.

b) Condição:

Indica o processo de semi-fabricação aplicado ao material como, laminação a frio ou a quente, extrusão, trefilação, fundição, forjamento, materiais em pó, granulados, particulados, etc. Estes, podem condicionar também o tipo de microestrutura do material.

c) Forma do material:

Os materiais semi-fabricados se apresentam comumente na forma de produtos planos ( placas, chapas grossas, chapas finas, tiras e folhas ), de produtos não planos ( perfis, barras, arames e tubos ) e também na forma de corpos de geometrias diversas como as peças forjadas, fundidas ou produzidas por metalurgia do pó.

Portanto, este atributo relaciona-se ao material que será trabalhado e também ao produto acabado. Logo, geometrias semelhantes, onde um mínimo de material deva ser removido ou transformado tendem a ser mais econômicas.

d) Tamanho:

Muitos dos processos de manufatura são específicos para determinadas dimensões do componente ou produto acabado. Por exemplo, seria muito difícil executar uma moldagem por injeção de uma peça com grandes dimensões como uma carroceria de automóvel.

e) Tolerâncias e precisão:

Outro aspecto importante a ser considerado são as tolerâncias dimensionais. Em geral, procura-se adotar e

selecionar tolerâncias padronizadas para reduzir o número de itens de matérias-primas a serem adquiridas e compradas. A precisão requerida no componente, também determina o processo produtivo para a fabricação deste.

f) Condições de tratamento térmico:

Os materiais de engenharia podem, em sua grande maioria, ser comprados sob diferentes condições de tratamento térmico. É possível obter-se os materiais já tratados termicamente ao invés de executar-se o tratamento de cada componente.

g) Acabamento superficial:

Cada processo de manufatura possui uma determinada capacidade para obter uma parte com certa superfície acabada.

A indicação do acabamento superficial, em termos de rugosidade e de aparência, e ainda, do tipo de proteção superficial aplicada é importante para muitas aplicações. O custo do acabamento superficial pode superar, em muitos casos, o custo do material base.

### 3.8.2 Aspectos de projeto relacionados ao processo produtivo

A capacidade dos materiais selecionados poderem se adaptar aos processos de fabricação é um fator básico de influência, no processo de seleção de materiais e de processos de fabricação. Essa capacidade corresponde aos aspectos de projeto relacionados ao processo produtivo dos materiais. Elas decorrem da interação das características de fabricação e as propriedades mecânicas dos materiais que são exigidas na fabricação. Portanto, para cada processo, define-se o comportamento do material no processamento [24].

É importante ressaltar que estes aspectos de projeto

são intimamente dependentes da concepção desenvolvida pelo projetista, para o componente a ser fabricado.

Assim sendo, pode-se indicar os seguintes aspectos de projeto:

a) Fundibilidade:

Capacidade do material poder penetrar completamente no molde e produzir uma peça sem defeitos e com as características mecânicas especificadas.

b) Conformabilidade plástica:

É também chamada de estampabilidade, para o caso de chapas metálicas destinadas a estampagem profunda e forjabilidade. Corresponde a capacidade do material ser deformado plasticamente, escoando pela matriz ou ferramenta de conformação e, produzir peças isentas de fissuras e com determinadas propriedades mecânicas.

c) Usinabilidade:

É uma das propriedades de fabricação mais importantes e corresponde a facilidade que o material apresenta para ser trabalhado por retirada de cavaco nos processos de usinagem, sem apresentar desgaste excessivo da ferramenta de corte.

d) Soldabilidade:

A qualidade de uma junta metálica soldada é dependente dessa propriedade que caracteriza a capacidade do material-base, isto é, do material das peças a serem soldadas, poder ser fundido na região da solda e produzir uma solda com as propriedades mecânicas compatíveis com o uso.

e) Capacidade de ser tratado termicamente:

É a capacidade de sofrer modificações microestruturais em função da aplicação de ciclos de tempo-temperatura que alteram as propriedades mecânicas. Em particular, convém destacar a capacidade de endurecimento ou temperabilidade dos materiais metálicos ferrosos que corresponde à profundidade de penetração do endurecimento na peça pelo tratamento térmico de têmpera.

f) Capacidade de poder receber acabamentos superficiais:

Relaciona-se ao recebimento de revestimentos orgânicos ou inorgânicos. Está associada não somente a necessidade de conferir aparência agradável à peça revestida, mas também, às exigências de elevar substancialmente a resistência à solicitações químicas e do ambiente.

### 3.9 Considerações finais sobre os atributos para seleção

Devido a grande abrangência que caracteriza a atividade de projeto, o projetista pode ser levado a utilizar um número muito maior de atributos, que os apresentados neste capítulo. Portanto não é objetivo deste trabalho encerrar a discussão sobre os atributos para seleção.

A importância deste capítulo reside na reflexão das características elementares de cada atributo, como também nos aspectos de projeto que podem melhorar a utilização de um dado material.

Convém acrescentar, que os atributos apresentados possuem maneiras específicas para serem quantificados. Estes atributos podem, portanto, serem expressos diretamente através do valor do próprio atributo ou indiretamente utilizando-se relação que o caracterize.

Esta quantificação não depende só do atributo para seleção, mas também da solução buscada no desenvolvimento do produto. Tome-se como exemplo a tensão limite de escoamento de um certo material. Ela pode ser usada diretamente como valor da tensão onde se inicia o escoamento ou como uma relação entre esta tensão e a massa específica do material, dependendo da aplicação do componente ou do produto.

Pode-se portanto dizer, que não existe uma regra rígida que determina a utilização do atributo e sim uma estrutura que deve ser preenchida através das características dos atributos de seleção.

#### 4 MODELO PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS EM PROJETOS

Segundo COPLEY [31], um procedimento racional para a seleção de materiais deve garantir que duas necessidades básicas sejam alcançadas. A primeira é identificar os materiais que contém os atributos essenciais ao nível requerido. A segunda é hierarquizar os materiais que compõem esta lista, considerando-se também atributos desejáveis, obtendo uma curta lista final de materiais candidatos capazes de atender as funções do componente.

Portanto, em uma seleção de materiais, geralmente, existe um número de atributos que são essenciais e mais um número de atributos que são desejáveis. Isto indica que a visão simplista, baseada na comparação de propriedades tabuladas para a escolha de um material, está sendo trocada por uma abordagem mais sofisticada [32].

Esta análise não deve proporcionar ao projetista uma rotina inflexível como uma árvore de decisão, mas fornecer completa liberdade para definir seus próprios requisitos. Ela deve, desse modo, garantir que o material seja selecionado de acordo com as especificações peculiares de cada projeto.

Neste capítulo, será apresentado um modelo para a seleção, que pretende balizar o procedimento, deixando aos cuidados do projetista o estabelecimento dos atributos que julgar necessários, mas orientada por aspectos de desempenho, processo produtivo e custo do material.

Conforme GERGELY [35], é uma pré-condição, da moderna e econômica elaboração de um projeto de produto industrial, que o processo de seleção do material e o método de fabricação sejam considerados simultaneamente para uma alta eficiência. O mais moderno projeto não pode satisfazer as expectativas se o material desejado não é viável, ou se ele não pode ser satisfatoriamente produzido e processado com o equipamento

disponível.

#### 4.1 Modelo proposto

O modelo de seleção proposto procura agrupar de forma sistemática os métodos de seleção apresentados no item 2.3, considerando os atributos relacionados no capítulo 3.

É importante destacar que o passo fundamental na seleção de materiais é a determinação das reais condições de serviço, e que seu ponto crítico é a busca dos dados, fontes de informação e manuseio dos dados, isto é, o momento da transferência da informação, da fonte para o projeto ou seleção.

Pode-se apresentar o modelo, como contendo as seguintes etapas:

- 1 - Levantamento das condições de serviço a que o componente está sujeito;
- 2 - Divisão do componente em partes considerando a função principal e funções secundárias de cada parte;
- 3 - Elaboração de uma lista de requisitos, específica para cada parte do componente;
- 4 - Transformação dos requisitos em atributos;
- 5 - Estabelecimento de limites dos atributos;
- 6 - Determinação de materiais candidatos dentro dos níveis estabelecidos para cada atributo;
- 7 - Determinação dos índices de desempenho dos materiais candidatos;
- 8 - Verificação de compatibilidade com materiais de componentes adjacentes;

- 9 - Associação dos materiais candidatos aos processos produtivos disponíveis;
- 10 - Determinação de custos de cada associação material - processo;
- 11 - Hierarquização de cada associação material-processo-custo;
- 12 - Adoção da associação melhor classificada;
- 13 - Elaboração de um registro da seleção efetuada.

#### 4.2 Descrição do modelo

Este item tem como objetivo, fornecer uma descrição de cada uma das etapas do modelo proposto, indicando a maneira como elas devem ser realizadas e também justificando sua necessidade no processo de seleção de materiais em projetos de produtos industriais.

##### 4.2.1 Levantamento das condições de serviço - etapa 1

Um produto é desenvolvido como uma solução para uma determinada necessidade do cliente [39]. Esta solução só poderá ser obtida, e ser uma solução satisfatória, a medida em que a formulação do problema defina exatamente o meio-ambiente, a demanda para o problema e suas fronteiras.

Portanto, as condições de serviço a que um componente está sujeito, devem fornecer ao projetista todos os elementos para o desenvolvimento de um projeto ótimo.

Nesta etapa, que é a primeira no processo de seleção, deverão ser obtidas todas as informações sobre o componente. Estas informações, de um modo geral, constituem-se de condições e restrições estabelecidas sobre as possibilidades

de desenvolvimento dos componentes. No projeto mecânico estas condições e restrições podem envolver as mais diversas informações como por exemplo: tipo e intensidade de carregamento; geometria necessária; peso; rigidez; umidade do meio-ambiente; presença ou não de luz, de calor; resistividade ou condutividade elétrica ou térmica; presença de agentes químicos e físicos agressivos; contato com as pessoas; aspectos de reciclagem e descarte do componente e outros.

Percebe-se que na determinação das condições de serviço de um componente, são utilizados os mesmos tipos de informações que geram a lista de requisitos para o produto do qual o componente faz parte.

As condições de serviço também têm fundamental importância na etapa em que os dados sobre os materiais são obtidos nas fontes de informações ( etapa 6 ), para que possam ser realizadas as devidas comparações entre as reais condições de serviço e os resultados dos testes sob condições específicas e controladas.

#### 4.2.2 Divisão do componente em partes - etapa 2

A partir das informações que compõem as condições de serviço, obtidas na etapa anterior, pode-se agora ter uma melhor compreensão das condições e restrições a que o componente está sujeito e com isto verificar-se a necessidade ou não de uma abordagem que o considere como um elemento formado de várias partes que devem ter seus materiais selecionados isoladamente.

Considerando-se que um mesmo componente pode estar sujeito a diferentes solicitações ao longo de sua geometria, podendo estas solicitações serem consideradas prioritárias em cada parte, é aconselhável que o mesmo seja considerado particionadamente.

Nos casos onde é possível tratá-lo como uma parte

única, tanto melhor. Mas quando isto não é possível devido a interferências entre as propriedades, quando sabidamente não podem ser balanceadas, a melhor opção pode ser a utilização de materiais diferentes em cada parte ou tratamentos superficiais diferentes ao longo da geometria do componente.

Uma abordagem que considere a divisão de um componente em partes pode ser extraída das técnicas de análise do valor, que determinam a existência de uma função básica ou principal e funções secundárias num componente (ver seção 2.3.4) [2], [14], [24].

Esta divisão do componente em partes, pode parecer redundante em muitos projetos, mas imagine-se um projeto de um pequeno forno de laboratório.

O componente em questão é a porta do forno. Sabendo-se que esta porta deve isolar termicamente o ambiente e permitir a abertura do forno, dependendo da temperatura de operação somente uma combinação de materiais que promovam as duas funções pode propiciar uma solução ótima de projeto para este componente. Portanto o componente porta poderia ser dividido por exemplo, da seguinte maneira: camadas de materiais isolantes térmicos cuja resistência mecânica não precisa ser muito grande e, um material externo à estas camadas que proveesse a porta de resistência mecânica permitindo a sua abertura.

Portanto existirão soluções onde a divisão do componente em partes será uma vantagem para o projetista e, outras situações onde esta divisão será desnecessária, cabendo ao projetista o julgamento. Não se pode esquecer a compatibilidade entre as partes adjacentes, que será apresentada na seção 4.2.8.

#### 4.2.3 Elaboração da lista de requisitos - etapa 3

Com as partes estando bem definidas e

fundamentalmente sua função principal determinada pode-se, nesta etapa, elaborar requisitos bastante específicos que facilitam a visualização da parte e do material a ser utilizado. Com a lista de requisitos, pretende-se reduzir a necessidade de complementações e correções no decorrer da seleção, bem como auxiliar em decisões a serem tomadas em etapas posteriores [40].

A lista de requisitos deve ser dividida em requisitos obrigatórios e desejáveis. Os requisitos obrigatórios são as condições e restrições a serem obedecidas sob quaisquer circunstâncias. Os requisitos desejáveis são aqueles que na medida do possível também devem ser considerados.

Os requisitos obrigatórios depois de transformados em atributos de seleção na próxima etapa, fornecem ao projetista condições para montar a lista de materiais candidatos ( seção 4.2.5 ).

Cabe destacar que verificações ao atendimento dos requisitos de cada parte, devem acompanhar todo processo de seleção.

Com relação aos requisitos desejáveis, deve-se considerá-los também nas etapas seguintes de tal forma que sua participação não elimine materiais candidatos, e sim possa ser útil nas hierarquizações que se fazem necessárias nas próximas etapas.

#### 4.2.4 Transformação dos requisitos em atributos - etapa 4

Esta etapa da seleção de materiais, juntamente com as próximas duas etapas ( seções 4.2.5 e 4.2.6 ), podem ser consideradas como os pontos críticos citados no item 4.1.

Isto ocorre porque os projetistas devem, nestas etapas, buscar informações que se originam de diversas áreas de conhecimento, envolvidas na integração do produto, como também

fatores humanos e áreas econômicas. Um completo conhecimento de um atributo raramente reside numa particular fonte de referência e, alguns dados podem não existir como um todo [34].

O processo de seleção de materiais, assim como o processo de projeto de produtos industriais, baseia-se no refino de condições e restrições, ou seja requisitos, durante seu desenvolvimento. Portanto requisitos, normalmente, genéricos e qualitativos, são transformados em valores limites ou níveis necessários de atributos de seleção nesta etapa.

#### 4.2.5 Estabelecimento de limites dos atributos - etapa 5

O estabelecimento dos níveis de cada atributo, sempre que possível, deve ser obtido quantitativamente.

Em determinados casos, os limites dos atributos podem ser estabelecidos diretamente em função das condições ambientais e de serviço. São exemplos frequentes os componentes que trabalham em altas temperaturas, onde a temperatura do ponto de fusão ou de degradação do material, necessita ser sempre superior a temperatura ambiente.

Os limites de cada atributo, que não podem ser determinados diretamente são obtidos de métodos de projeto, que se utilizam de técnicas de pesquisa operacional ou otimização em projetos, como as apresentadas por DIETER [2].

Um dos métodos mais comumente utilizados é o método de Johnson para o projeto ótimo de elementos de máquinas.

Segundo JOHNSON [36], uma equação de projeto que determina um parâmetro sob análise, possui a seguinte forma:

$$B = f \left[ \begin{array}{l} \text{parâmetros dos} \\ \text{requisitos} \\ \text{funcionais} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{l} \text{parâmetros dos} \\ \text{materiais} \\ \text{( atributos )} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{l} \text{parâmetros} \\ \text{geométricos} \end{array} \right] \quad (4-1)$$

onde B é o parâmetro a ser otimizado.

O método do projeto ótimo de Johnson é especialmente aplicado para problemas não lineares encontrados em projetos. Sua execução requer um estudo mais aprofundado que pode ser obtido na referência [36]. Outros métodos de otimização utilizados em projetos são apresentados também por BACK [37] e ORLOV [38].

As otimizações a serem realizadas na escolha de materiais podem variar muito, dependendo do componente que está sendo projetado, ou seja, existem combinações de propriedades que determinam o desempenho em projeto. Algumas destas combinações são apresentadas na tabela 2-3, seção 2.3.6 e devem ser utilizadas como indicadores na procura por materiais candidatos.

Critérios genéricos para vários atributos foram apresentados no capítulo 3. No entanto, o seguinte exemplo pode demonstrar satisfatoriamente o estabelecimento dos níveis para os atributos.

Considere-se uma viga de comprimento L, em balanço, com seção transversal retangular de base b e altura h, que deva suportar em sua extremidade uma carga F. Determinar o parâmetro que fornece o material de menor peso capaz de suportar a carga F, ou seja, a eficiência estrutural da viga.

A eficiência estrutural é definida como a relação carga/peso [3]. Então:

$$\frac{\text{Carga}}{\text{peso}} = \frac{F}{Lbh\rho} = \frac{Mf}{L^2bh\rho} \quad (4-2)$$

onde:

$\rho$  = massa específica do material da viga

$M_f = F.L =$  máximo momento fletor

A máxima tensão é:

$$\sigma = \frac{M_f}{Z} \quad (4-3)$$

onde  $Z =$  momento resistente  $= \frac{bh^2}{6}$

Pode-se então, substituir  $Z$  na equação (4-3).

$$M_f = \sigma Z = \sigma \frac{bh^2}{6} \quad (4-4)$$

Com o momento fletor em função de parâmetros geométricos e da máxima tensão a equação (4-2) adquire a forma da equação (4-5).

$$\frac{\text{Carga}}{\text{peso}} = \frac{M_f}{L^2 bh \rho} = \frac{1}{6} \times \frac{\sigma}{\rho} \times \frac{h}{L^2} \quad (4-5)$$

Isolando-se  $h$  na equação (4-4) e substituindo-se  $M_f$  pela definição de momento fletor, obtem-se:

$$h = \left[ \frac{6M_f}{b\sigma} \right]^{1/2} = \left[ \frac{6FL}{\sigma b} \right]^{1/2} \quad (4-6)$$

Separando-se os parâmetros na forma da equação (4-1), obtem-se:

$$\frac{\text{Carga}}{\text{peso}} = \left[ \frac{1}{6b} \right]^{1/2} \times \frac{\sigma^{1/2}}{\rho} \times \left[ \frac{F}{L^3} \right]^{1/2} \quad (4-7)$$

A partir da equação (4-7) o projetista poderia procurar pelos materiais de melhor relação  $\sigma^{1/2}/\rho$  para atingir o

objetivo da eficiência estrutural. O  $\sigma$  poderia ser o limite de resistência à ruptura, caso a viga pudesse sofrer alguma deformação plástica sem comprometimento de sua função, ou o limite de escoamento, caso a viga só pudesse deformar-se elasticamente.

Note-se que os demais parâmetros não são atributos do material e sim variáveis de projeto sob controle do projetista.

#### 4.2.6 Determinação dos materiais candidatos - etapa 6

Com os limites de atributos para os materiais candidatos estabelecidos na etapa anterior, pode-se agora partir para as fontes de informação sobre os materiais e suas propriedades.

A determinação dos materiais candidatos deve portanto satisfazer aos níveis estabelecidos para os atributos. Destaca-se que até este momento nenhuma combinação de atributos foi ainda realizada.

Nesta etapa, cada material selecionado como candidato, deve ser considerado com todos os atributos estabelecidos sendo o critério de escolha a relação que envolve a função principal da parte, determinada na etapa 2.

Cabe ressaltar, que durante a execução da etapa 6, apenas as informações relativas ao desempenho serão abordadas. No entanto, o levantamento das informações relativas aos demais parâmetros, processo produtivo e custo, pode poupar tempo de procura, principalmente quando estas informações forem obtidas de fornecedores ou bancos de dados de materiais.

#### 4.2.7 Determinação dos índices de desempenho - etapa 7

Pode-se dizer que até a etapa 6, inclusive, foram

realizadas as duas primeiras partes do processo de seleção apresentado no item 2.3, ou seja, a análise dos requisitos e a triagem dos materiais candidatos.

Projetistas devem ser capazes de procurar por materiais com a combinação de atributos necessária para a aplicação [33].

Esta etapa tem como objetivo a comparação dos diversos materiais candidatos através dos atributos que determinam seu desempenho. A comparação deverá ser feita pelo método de índice de desempenho do material, apresentado por DIETER [2] e que compõe a seção 2.3.2. Este método, como mencionado anteriormente, permite que sejam comparados vários materiais sob uma base comum de comparação.

De modo a manter sob o parâmetro custo a decisão final sobre a escolha do material, este parâmetro não será considerado nesta etapa, nem tão pouco foi considerado como atributo de seleção no capítulo 3. O custo total do material, que envolve uma série de aspectos de custo relacionados na seção 2.2.3, será introduzido na seleção na etapa 10, permitindo também a associação dos custos relacionados aos processos produtivos.

Como resultado desta etapa espera-se obter uma lista de materiais candidatos ordenada conforme os índices de desempenho obtidos por cada material. A esta altura do processo, e a critério do projetista, alguns materiais de desempenho considerado insatisfatório podem ser eliminados da lista de candidatos, diminuindo o esforço para a realização das próximas etapas.

#### 4.2.8 Verificação de compatibilidades - etapa 8

A esta altura da execução deste modelo, o projetista possui um resultado parcial da seleção, que é composto por uma

lista de materiais candidatos.

Devido, inicialmente, a necessidade de normalização do produto, que deve possuir a menor diversidade possível de materiais e, posteriormente à própria compatibilidade física e química dos materiais, uma verificação de compatibilidade precisa ser realizada.

Dois exemplos de incompatibilidades podem justificar esta necessidade.

O primeiro exemplo poderia ser a utilização de um polímero junto a um material que emitisse ou refletisse radiação ultra-violeta. Isto poderia levar a uma rápida degradação do polímero. Portanto estes materiais seriam incompatíveis fisicamente.

Outro exemplo seria a utilização, em partes adjacentes, de dois materiais metálicos com grandes diferenças de potencial eletroquímico. Esta situação, com grande probabilidade, levaria à corrosão do metal de menor potencial eletroquímico.

Portanto, nesta etapa mais alguns materiais poderiam ser eliminados da lista de materiais candidatos que o projetista está analisando.

O resultado final desta etapa é um grupo de materiais onde os parâmetros de desempenho foram detalhadamente analisados.

#### 4.2.9 Associação dos materiais candidatos aos processos produtivos disponíveis - etapa 9

Para os materiais ordenados na etapa anterior é preciso que se considerem as características de fabricação do componente. Portanto, nesta etapa devem ser associados, a cada

material selecionado, os processos produtivos que podem fabricar a parte.

Inserida no processo de seleção de materiais, esta associação pode incorrer em diferentes aspectos quanto a disponibilidade do processo produtivo.

Os três aspectos principais são:

- a) o processo produtivo é disponível, portanto pode-se fabricar a peça na própria empresa;
- b) o processo produtivo não é disponível e pode-se contratar uma outra empresa que fabrique a parte;
- c) o processo produtivo não é disponível e pode-se investir em meios para incorporá-lo a empresa.

Portanto, considerações de ordem econômica e da política da empresa são necessárias caso se concretizem os aspectos b) e c). Como o enfoque deste trabalho é o processo de seleção de materiais, esta questão não será analisada em maiores detalhes.

Aos aspectos de disponibilidade apresentados deve-se acrescentar os atributos relacionados ao processo produtivo ( seção 3.8 ), que são aqueles que capacitam um dado processo a fabricar determinada peça com o material candidato.

Nesta etapa, mais um refinamento da lista de materiais candidatos é obtido, eliminando-se aqueles binômios material-processo que são inviáveis do ponto de vista dos aspectos de disponibilidade do processo produtivo.

#### 4.2.10 Determinação dos custos - etapa 10

Esta etapa tem como objetivo a determinação do custo de cada binômio material-processo, que compõem a lista.

O aspecto mais importante desta etapa é a

consideração, não só do custo básico do material, mas também do custo relativo ao seu processamento.

A determinação dos custos exige do projetista um bom relacionamento e uma fácil comunicação com os setores de fabricação e de compras da empresa. É necessário determinar as dificuldades de fabricação e de compra do material e considerá-las como custos.

O resultado desta etapa será denominado de lista de triplas material-processo-custo.

#### 4.2.11 Hierarquização das associações - etapa 11

As triplas material-processo-custo serão, neste momento, ordenadas para que seja conhecido o material a ser adotado.

Esta hierarquização ou ordenação, deverá considerar unicamente o parâmetro custo. Isto se deve ao fato de que os demais parâmetros, desempenho e processo produtivo, já terem sido considerados na exclusão de materiais insatisfatórios.

#### 4.2.12 Adoção da associação melhor classificada - etapa 12

A utilização deste modelo procura, em cada uma de suas etapas, manter um bom número de materiais candidatos, sob análise do projetista, para que não sejam excluídas soluções que possam ser satisfatórias. Esta abordagem visa, portanto, muito mais do que excluir, classificar e apontar a associação ou tripla material-processo-custo, que melhor pode contribuir na solução da seleção de materiais no projeto de produtos.

É importante ressaltar que o resultado da aplicação do modelo não é uma única indicação do material, mas sim uma lista de soluções viáveis que podem ser adotadas e seus respectivos custos.

#### 4.2.13 Elaboração de um registro da seleção efetuada - etapa 13

O registro das seleções efetuadas tem sua maior importância no ganho de tempo que pode ser obtido, em casos de aplicações e necessidades semelhantes em um produto. A implementação computacional deste modelo também poderia obter vantagens de registros de seleções efetuadas, determinando o método de abordagem ao problema.

Pelo monitoramento de quantas vezes os materiais são requeridos, com uma particular combinação de propriedades, a demanda por novos materiais pode ser acessada. O desenvolvimento de novos materiais pode ser melhor focado, para atender às necessidades da indústria [33].

#### 4.3 Fluxograma do modelo

Na figura 4-1 mostra-se o fluxograma do modelo proposto. Esta figura representa um resumo da descrição apresentada e evidencia algumas tomadas de decisão que compõe o modelo, bem como um retorno à etapa de determinação dos índices de desempenho, caso os materiais sejam incompatíveis.

A figura 4-1 também denota onde estão inseridas as fontes de informações na execução do modelo.

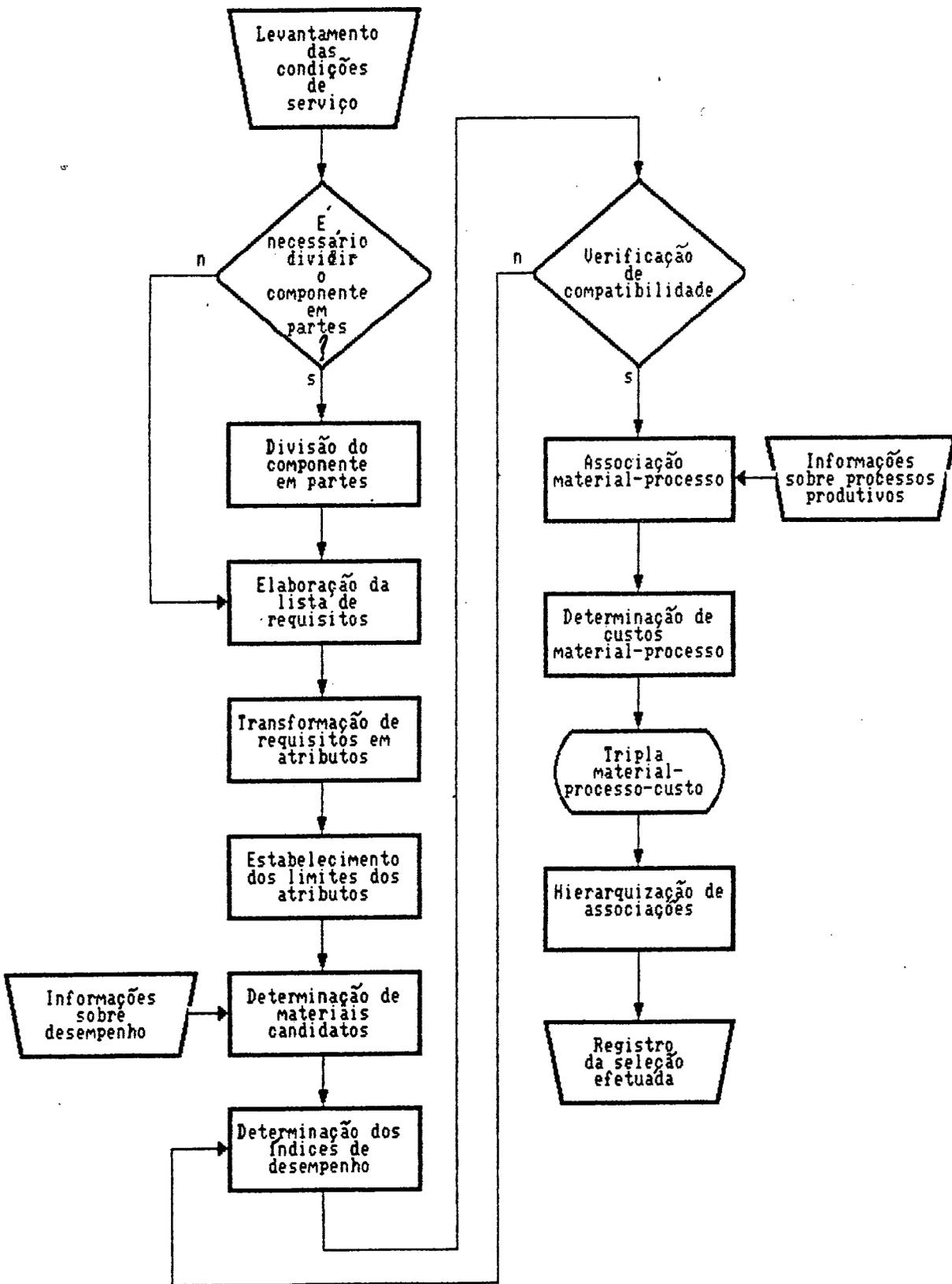


Figura 4-1. Fluxograma do modelo proposto

## 5. VALIDAÇÃO DO MODELO

### 5.1 A validação através de um exemplo de projeto

Neste capítulo pretende-se aplicar o modelo proposto a um produto em desenvolvimento nos Departamentos de Engenharia de Produção e Sistemas e Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, com o objetivo de mostrar sua validade como abordagem sistemática e verificar seu comportamento na determinação do material em um componente deste produto.

A validação será desenvolvida através da realização de um exemplo que consiste na determinação do material das lâminas de um sistema posicionador do dente de alho em um implemento agrícola, que é acoplado a trator, com a função de plantar alho.

O sistema é formado por um conjunto de lâminas, um apoio posterior e uma came que aplica tensão à lâmina. Este dispositivo deve possuir alguma elasticidade, segurar o dente de alho na posição correta e resistir ao desgaste provocado pelo deslizamento entre o par formado pela lâmina e a came, figura 5-1.

### 5.2. As etapas do modelo proposto aplicadas ao exemplo de projeto

#### Etapa 1 - Condições de serviço:

As condições de serviço a que as lâminas estão sujeitas são sumarizadas a seguir:

- carregamento cíclico;
- desgaste;
- possível presença de terra;
- exposição moderada ao meio-ambiente;
- resíduos de alho;

- possível presença de água proveniente de chuva;
- temperatura ambiente.

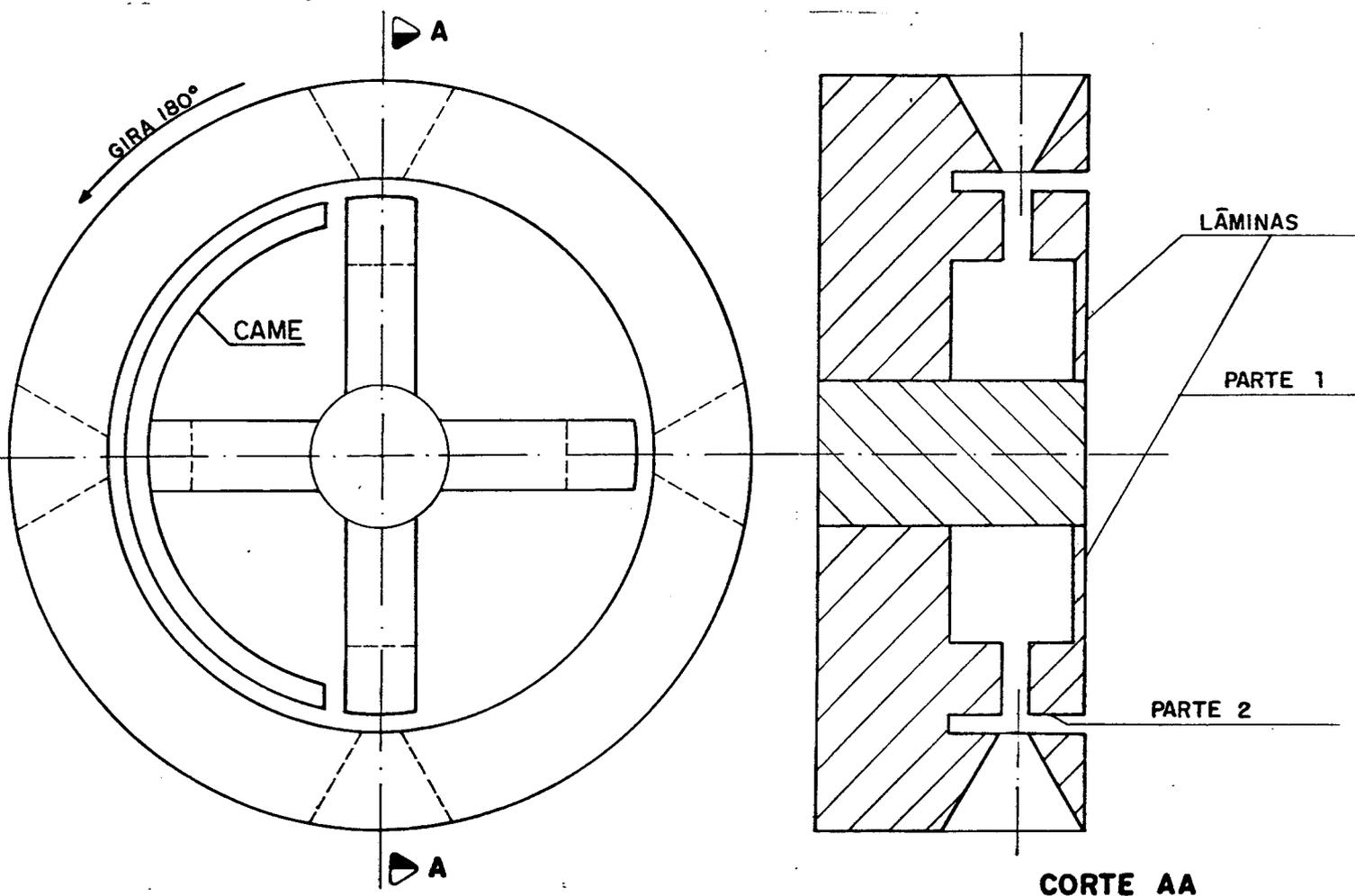


Figura 5-1. Desenho esquemático do sistema posicionador

Etapa 2 - Divisão do componente em partes:

Pode-se considerar que a lâmina do sistema posicionador do dente de alho possui como função principal fixar firmemente o dente, até que um conjunto maior de peças complete um movimento angular de aproximadamente  $180^{\circ}$ , posicionando o dente corretamente para o plantio. Portanto, utilizando-se um verbo e um substantivo para expressar a função principal obtem-se: fixar o dente de alho.

Para a efetivação desta função principal e utilizando as condições de serviço da etapa 1, optou-se por dividir o componente em duas partes.

A parte 1 pode ser entendida como o seguidor de um mecanismo came-seguidor. Ela é responsável pela força que será exercida sobre o dente de alho, estando sujeita ao carregamento cíclico, desgaste e exposição ao meio-ambiente.

A parte 2 consiste no elemento do seguidor que não entra em contato com a came, mas sim com o dente de alho. Esta parte é responsável pela imobilidade do dente de alho.

### Etapa 3 - Lista de requisitos:

Os requisitos apresentados nesta etapa são relativos a cada uma das partes e estão divididos em requisitos obrigatórios e desejáveis.

#### a) Requisitos da parte 1

##### - Obrigatórios:

- 1) Ser suficientemente flexível para exercer a força necessária sobre a parte 2;
- 2) Suportar um carregamento cíclico de pequena intensidade e baixa frequência, executado pelo deslizamento do seguidor em contato com a came;
- 3) Resistir ao desgaste provocado pelo movimento relativo do par seguidor-came, com possível presença de resíduos de terra;
- 4) Permitir a união com a parte 2;
- 5) Não contaminar o dente de alho;
- 6) Ser compatível com os demais componentes;
- 7) Possuir baixo custo.

##### - Desejáveis:

- 1) Baixo peso;
- 2) Não deformar plasticamente com sobrecargas para que não haja emperramento do sistema;

- 3) Resistir a exposição prolongada ao meio-ambiente;
- 4) Possuir um processo de fabricação o mais simples possível;
- 5) Não contaminar o meio-ambiente.

b) Requisitos da parte 2

- Obrigatórios:

- 1) Permitir a união com a parte 1;
- 2) Permitir aderência ao dente de alho;
- 3) Não contaminar o dente de alho;
- 4) Não danificar o dente de alho.

- Desejáveis:

- 1) Baixo peso;
- 2) Baixo custo;
- 3) Não deformar plasticamente com sobrecargas, permitindo a aderência ao dente de alho;
- 4) Possuir um processo de fabricação o mais simples possível;
- 5) Não contaminar o meio-ambiente;
- 6) Resistir a exposição prolongada ao meio ambiente.

Etapa 4 - Transformação dos requisitos em atributos:

O exame do conjunto de requisitos obrigatórios e desejáveis determinados pelas funções que as partes devem desempenhar e pelas condições de serviço, indica que esta é uma seleção que pode ser considerada em ambiente corrosivo. Portanto, conforme o exposto na seção 3.4.2, pode-se isolar a classe de materiais em função dos seguintes aspectos relativos a concepção adotada:

- A utilização de metais, fica prejudicada devido às condições corrosivas a que o componente está sujeito, conforme evidenciado pelas condições de serviço;
- Não é possível que o componente trabalhe com lubrificação, devido à contaminação do dente de alho;

- É preferível que a lâmina seja o componente a ser sacrificado em caso de falha, devido a facilidade de substituição quando comparada à came.

Cabe observar que o procedimento de isolar-se uma classe de materiais na execução da seleção não é um procedimento padrão do modelo proposto. Contudo, as peculiaridades relativas aos aspectos de corrosão combinadas ao carregamento cíclico a que o componente está sujeito justificam este procedimento.

Desta forma, adotar-se-á a classe dos polímeros para a execução desta seleção, gerando atributos para a seleção, que preenchem os requisitos do item 3.1 e são listados a seguir:

- a) Atributos da parte 1
  - 1) Peso molecular;
  - 2) Cristalinidade;
  - 3) Massa específica;
  - 4) Coeficiente de atrito;
  - 5) Limite de escoamento;
  - 6) Absorção de água.
  
- b) Atributos da parte 2
  - 1) Massa específica;
  - 2) Coeficiente de atrito;
  - 3) Absorção de água.

#### Etapa 5 - Estabelecimento dos limites dos atributos:

Neste exemplo, os atributos não terão limites numéricos estabelecidos devido a possibilidade do estabelecimento de comparações entre os materiais candidatos sem que sejam estabelecidos valores máximos ou mínimos. Assim, os níveis dos atributos podem ser estabelecidos qualitativamente da seguinte maneira:

- a) Atributos da parte 1:

- Maximizar peso molecular;
- Maximizar cristalinidade;
- Minimizar coeficiente de atrito;
- Maximizar limite de escoamento;
- Minimizar absorção de água;
- Minimizar massa específica.

b) Atributos da parte 2:

- Minimizar massa específica;
- Maximizar coeficiente de atrito;
- Minimizar absorção de água.

Etapa 6 - Determinação dos materiais candidatos:

Os materiais candidatos foram obtidos a partir de levantamento bibliográfico, referências [44], [45], [46] e [47], e são apresentados na tabela 5-1, juntamente com os valores de cada atributo relativos a cada um dos materiais candidatos.

Tabela 5-1. Materiais candidatos e valores dos atributos da parte 1

material candidato	peso molecular	cristalinidade	limite de escoamen.	absorção de água	densidade
01	200000	95	27,6	0,01	0,96
02	500000	70	29,4	0	0,90
03	100000	15	55,2	0,1	1,36
04	5000000	95	12,4	0	2,2
05	1000000	0	55,2	0,4	1,18
06	30000	75	31,1	0,9	1,42
07	30000	0	63,7	0	1,2
08	20000	100	82,8	0,4	1,14
09	20000	100	81,4	0,35	1,14
10	20000	100	82,8	0	1,14
unidades	[uma]	[%]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]

Legenda dos materiais candidatos:

- 01 - Polietileno de alta densidade
- 02 - Polipropileno
- 03 - Cloreto de polivinila
- 04 - Politetrafluoretileno
- 05 - Polimetacrilato de metila
- 06 - Polioximetileno
- 07 - Policarbonato
- 08 - Náilon 6
- 09 - Náilon 66
- 10 - Náilon 610

O conjunto dos atributos de seleção e as fontes de informação disponíveis ao projetista determinaram os materiais candidatos apresentados na tabela 5-1. Estabeleceu-se nesta etapa que a parte 1 do componente deveria ser de um polímero termoplástico devido, principalmente, a sua melhor resistência à fadiga combinada a solicitações de desgaste e exposição ao meio-ambiente. A parte 2 deve ser um elastômero garantindo melhor aderência ao dente de alho.

Cabe ressaltar que o atributo coeficiente de atrito, que deve ser minimizado na seleção do material da parte 1 não será utilizado na determinação do material, visto que seu valor depende tanto da forma dos componentes quanto dos materiais do par sujeito ao desgaste.

Devido a dificuldade de obtenção de informações relativas aos materiais candidatos a parte 2, será adotado para esta parte o material Poliuretano, que possui baixa densidade, alto coeficiente de atrito e não sofre influência em suas propriedades pela absorção de água.

Etapa 7 - Determinação dos índices de desempenho:

Os valores escalonados de cada atributo são

apresentados na tabela 5-2.

A determinação do fator de peso de cada propriedade é realizado através do método da abordagem digital lógica, conforme a tabela 5-3. O número de comparações realizadas é dado pela equação 2-16:

$$N = \frac{5(5-1)}{2} = 10$$

O fator de peso de cada propriedade  $w_i$  é determinado conforme a equação 2-17:

$$w_1 = \frac{3}{10} = 0,3$$

$$w_2 = \frac{1}{10} = 0,1$$

$$w_3 = \frac{3}{10} = 0,3$$

$$w_4 = \frac{2}{10} = 0,2$$

$$w_5 = \frac{1}{10} = 0,1$$

Os índices de desempenho dos materiais candidatos são apresentados na tabela 5-4.

Tabela 5-2. Valores escalonados dos atributos

material candidato	peso molecular	cristalinidade	limite de escoamen.	absorção de água	densidade
01	04	95	33,3	100	93,8
02	10	70	35,5	100	100
03	02	15	66,7	10	66,2
04	100	95	15	100	40,9
05	20	0	66,7	2,5	76,3
06	0,6	75	38	1,1	63,4
07	0,6	0	76,9	100	75
08	0,4	100	98,3	2,9	78,9
09	0,4	100	100	2,5	78,9
10	0,4	100	100	100	78,9

## Legenda dos atributos:

- 1 - Peso molecular
- 2 - Cristalinidade
- 3 - Limite de escoamento
- 4 - Absorção de água
- 5 - Densidade

Tabela 5-3 Desenvolvimento da abordagem digital lógica

atributo	comparações										mi
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
01	1x2	1x3	1x4	1x5	2x3	2x4	2x5	3x4	3x5	4x5	03
02	0				1	1	1				03
03		1			0			0	0		01
04			0			0		1		1	02
05				0			0		1		01

Tabela 5-4. Índices de desempenho dos materiais candidatos

material candidato	peso molecular	cristali- nidade	limite de escoamen.	absorção de água	densidade	índice total
01	1,2	28,5	3,33	20	9,38	62,41
02	3	21	3,55	20	10	57,55
03	0,6	4,5	6,67	2	6,62	20,39
04	30	28,5	1,5	20	4,09	84,09
05	6	0	6,67	0,5	7,63	20,8
06	0,18	22,5	3,8	0,22	6,34	33,04
07	0,18	0	7,69	20	7,5	35,37
08	0,12	30	9,83	0,58	7,89	48,42
09	0,12	30	10	0,5	7,89	48,51
10	0,12	30	10	20	7,89	68,01

A partir da tabela 5-4 obtém-se os materiais classificados considerando-se unicamente o parâmetro desempenho. Estes materiais são apresentados em ordem decrescente na tabela

5-5.

A tabela 5-5 não apresenta os quatro últimos materiais, pois seu índice de desempenho foi considerado insatisfatório, sendo redundante o prosseguimento do processo de seleção para estes materiais. O critério utilizado para a sua eliminação foi um índice mínimo de desempenho igual a 40.

Tabela 5-5. Materiais classificados

Material candidato	Índice de desempenho
Politetrafluoretileno	84,09
Náilon 610	68,01
Polietileno de alta densidade	62,41
Polipropileno	57,55
Náilon 66	48,51
Náilon 6	48,42

Etapa 8 - Verificação de compatibilidades:

A verificação de compatibilidades entre as partes indica que tanto os materiais candidatos à parte 1 quanto o Poliuretano são compatíveis entre si e com os demais materiais que constituem o sistema.

A união entre as partes 1 e 2 do componente para o qual o material está sendo selecionado, pode ser feita através do uso de adesivos.

Deste modo, nenhum material candidato será excluído nesta etapa.

Etapa 9 - Associação material-processo:

Considerando-se os atributos relacionados ao

processo produtivo ( item 3.8 ) e conforme MARK [48], a parte 1 do componente pode ser produzida conforme a tabela 5-6.

Devido ao alto ponto de fusão e a alta viscosidade, o Politetrafluoretileno deveria ser sinterizado isostaticamente, o que estabelece uma série de dificuldades de processamento deste componente com este material.

Tabela 5.6. Processos produtivos selecionados

Material candidato	Processos produtivos
Politetrafluoretileno	Sinterização isostática
Náilon 610	Injeção ou Extrusão
Polietileno de alta densidade	Injeção ou Extrusão
Polipropileno	Injeção ou Extrusão
Náilon 66	Injeção ou Extrusão
Náilon 6	Injeção ou Extrusão

Os demais materiais candidatos, que podem ser processados por injeção ou extrusão, são de processamento sabidamente mais simples. As temperaturas para o processamento destes materiais variam de 150°C a 290°C, enquanto que para o Politetrafluoretileno a temperatura de sinterização encontra-se entre 370°C e 390°C.

Segundo levantamento realizado junto a fornecedores, o processamento do Politetrafluoretileno é cerca de três vezes mais caro que o preço do material por kg. Portanto, para cada kg de material processado, pode-se multiplicar seu custo de matéria-prima por três vezes, para obter-se o custo total.

No que se refere a disponibilidade do processo produtivo, o componente deverá ser produzido por outra empresa devido a pequena quantidade demandada, o que inviabiliza a incorporação do processo.

A Partir do exposto neste item pode-se estabelecer os seguintes binômios material-processo:

- 1 - Politetrafluoretileno - sinterização isostática;
- 2 - Náilon 610 - injetado;
- 3 - Náilon 610 - extrudado;
- 4 - Polietileno de alta densidade - injetado;
- 5 - Polietileno de alta densidade - extrudado;
- 6 - Polipropileno - injetado;
- 7 - Polipropileno - extrudado;
- 8 - Náilon 66 - injetado;
- 9 - Náilon 66 - extrudado;
- 10 - Náilon 6 - injetado;
- 11 - Náilon 6 - extrudado.

Etapas 10 e 11 - Determinação dos custos e triplas material-processo-custo:

Os custos relativos a cada material foram levantados junto a fornecedores no mês de março de 1993 e constam na tabela 5-7, que apresenta também a hierarquização dos custos totais.

Algumas observações são necessárias para o entendimento da hierarquização dos custos totais de cada tripla material-processo-custo.

A primeira observação se refere a dificuldade de determinação do custo exato de cada binômio material-processo. Como neste caso o componente será produzido por uma empresa contratada, certamente existirão preços diferentes para o mesmo binômio, produzido por empresas diferentes. Assim seria necessária uma pesquisa junto a possíveis fornecedores para se determinar o custo exato.

A segunda observação é que a hierarquização, ou seja, uma ordem crescente de custos pode ser obtida através de comparações entre as temperaturas e pressões relativas a cada binômio material-processo.

Tabela 5-7. Triplas hierarquizadas material-processo-custo

Custos totais hierarquizados	Material candidato	Processo produtivo	Custo do material [Cr\$/kg]
01	Polipropileno	extrusão	20961,50
02		injeção	21525,50
03	Polietileno de alta densidade	extrusão	30500,00
04		injeção	26552,00
05	Náilon 6	extrusão	102196,90
06		injeção	95699,16
07	Náilon 6,6	extrusão	125494,15
08		injeção	117516,00
09	Náilon 6,10	extrusão	350000,00
10		injeção	350000,00
11	Politetra-fluoretileno	sinterização isostática	850000,00

Pode ainda ser observado que o custo relativo a cada processamento também é função do equipamento utilizado, sendo o equipamento envolvido na sinterização isostática o mais caro, seguido pelo processo de injeção e com a extrusão sendo o de menor custo.

A partir destas observações pode-se hierarquizar os custos conforme a tabela 5-7.

#### Etapa 12 - Hierarquização das associações:

Neste exemplo, a solução poderia ser a adoção do material Polipropileno e o processo produtivo extrusão.

Caso o desempenho requerido pelo componente fosse mais relevante que o custo total de obtenção deste componente, o projetista poderia optar por outro material de melhor desempenho dentre os materiais candidatos apresentados, como o Polietileno de alta densidade, que possui um custo relativamente baixo e um desempenho melhor que o Polipropileno.

### Etapa 13 - Registro da seleção efetuada:

Deve-se manter um registro de todo este processo de seleção para a aplicação em situações semelhantes e para que os materiais aqui escolhidos tenham seus desempenhos teóricos confrontados com testes realizados no produto.

#### 5.3 Considerações sobre a aplicação do modelo proposto ao exemplo

A aplicação do modelo ao exemplo em questão permite que sejam tecidas algumas considerações.

O resultado obtido está de acordo com a sugestão de materiais para seguidores, apresentada por ROTHBART [50], que considera os termoplásticos uma excelente escolha para carregamentos moderados e impossibilidade de lubrificação.

A maior dificuldade encontrada na aplicação do modelo a este exemplo, refere-se a concordância na determinação dos atributos para a seleção. Este problema poderá ser solucionado através da implementação do modelo em um sistema computacional desenvolvido através da programação orientada a objeto, que se baseia na modelagem da informação através de atributos de cada objeto.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 Conclusões

Pode-se afirmar que, tanto o objetivo geral, quanto os objetivos específicos, deste trabalho, foram atingidos.

O entendimento do processo de projeto, com o enfoque central na seleção de materiais, fica caracterizado através das decisões que são assumidas tomando por base o processo de solução de problemas, amplamente utilizado na engenharia.

Obteve-se um modelo para a seleção de materiais, baseado no estado da arte da atividade de projeto de produtos, que pode ser usado como ponto de partida no desenvolvimento de um sistema computacional, para a tarefa de selecionar materiais para um produto.

O modelo propicia uma abordagem sistemática do problema, levantando, selecionando e organizando informações para que o projetista selecione com proficiência os materiais que compõem um determinado produto. Ele também justifica a importância da seleção de materiais, através da grande quantidade de informações que são utilizadas num exemplo relativamente simples.

A solução do exemplo, capítulo 5, comprova a importância do processo produtivo na seleção de materiais, pois o material de melhor desempenho apresentou a menor viabilidade do ponto de vista do processo produtivo.

É importante registrar que custos desnecessários ficam evidentes como, por exemplo, em situações onde os materiais possuem desempenho além do requerido, podendo-se eliminá-los do projeto.

Conseguiu-se também criar um abordagem que facilita

o acesso ao universo de materiais existentes, considerando-se um ou mais mecanismos de falhas a que os materiais estão sujeitos.

Pode-se também concluir que a garantia da qualidade do produto é elevada pela utilização de materiais com desempenhos superiores, sem que necessariamente incorra-se em custos maiores, aproximando o projeto do total atendimento às necessidades do cliente. Isto é obtido mantendo-se condições de serviço e requisitos, que são formalizados no modelo, como determinadores dos materiais candidatos.

Conclui-se que as bases para a seleção de materiais, ou seja, parâmetros de desempenho, processo produtivo e custo, são essenciais na determinação do melhor material, e a não consideração de um destes parâmetros desqualifica a solução.

Outra conclusão importante é que os métodos apresentados no capítulo 2 não contemplam todas as etapas do processo de solução de problemas. O modelo proposto preenche esta lacuna, abordando o problema desde sua análise, caracterizada pelo levantamento das condições de serviço, até o desenvolvimento dos dados de projeto, indicado pelo registro da seleção efetuada.

Este modelo permite também a avaliação comparativa dos materiais, através da introdução do conceito de atributo, dando liberdade ao projetista para definir requisitos aumentando a flexibilidade do modelo.

Com relação a etapa 6 da execução do modelo, concluiu-se que a eficiência na determinação dos materiais candidatos é diretamente proporcional ao tamanho e a qualidade das fontes de informações disponíveis.

Ainda considerando-se a aplicação do modelo, notou-se que na etapa 7, onde os índices de desempenho são determinados, o projetista pode, conforme a necessidade,

determinar os materiais, tanto para produtos orientados pelo desempenho quanto para produtos orientados pelo custo.

Destaca-se que este trabalho não esgota o estudo da seleção de materiais, mas fornece um modelo que futuramente deverá ser aprimorado para o desenvolvimento da Engenharia do Produto.

## 6.2 Recomendações

No sentido de obter-se o desenvolvimento almejado da Engenharia do Produto no Brasil, algumas recomendações podem ser feitas.

A primeira recomendação importante é o desenvolvimento de um modelo para a seleção de processos produtivos e também para a determinação de custos associados a cada processo.

Outro trabalho de grande importância é o levantamento e a formalização de todos os possíveis atributos de seleção de materiais. Isto reduzirá significativamente o tempo para a realização da seleção de materiais pois o projetista terá a sua disposição cada um dos atributos para cada requisito de projeto.

Recomenda-se a implementação do modelo, como parte de um sistema CAE. Esta implementação, pelas suas características e de acordo com o item 1.1 deste trabalho poderia ser realizada através de um sistema especialista.

É também recomendável que o modelo seja aplicado a outros problemas e que avaliações quantitativas de seus resultados sejam realizadas.

## ANEXO 1 - FONTES DE INFORMAÇÕES SOBRE MATERIAIS

A) " SAE Handbook ", Part 1 " Materials, Parts and Components " Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa, Published annually.

B) " Structural Alloys Handbook, vols I and II, Mechanical Properties Data Center, Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, 1979.

C) ROBB, C. - " Metals Databook " - The Institute of Metals, Great Britain, 1986.

D) MORRELL, R. - " Handbook of Properties of Technical and Engineering Ceramics, HMSO, London, Part 1 1985, Part 2 1987.

E) McLELLEN, G. W.; SHAND, E.B. -"Carbon and Graphite Handbook" - Interscience, 1968.

F) " Modern Plastics Encyclopedia " published yearly by Modern Plastics, McGraw-Hill Book Company, New York.

G) SCHWARTZ, M. M. - " Composite Materials Handbook " - McGraw - Hill Book Co. , 1984.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LARSON, E. D.; et alli - " Beyond the Era of Materials " - Scientific American june 1986 vol 254 n 6 p 24-31.
- [2] DIETER, G. E. - " Engineering Design. A Materials and Processing Approach. 2 ed. New York, McGraw-Hill, 1991, 721p.
- [3] CHARLES, J. A.; CRANE, F. A. A. - " Selection and Use of Engineering Materials " - 2 ed. Great Britain, Butterworth & Co., 1991, 336p.
- [4] PORTER, M. E. - " Estratégia Copetitiva " - Rio de Janeiro, Editora Campus, 1988, capítulo 2.
- [5] SHARP, H. J. - " Engineering Materials, Selection and Value Analysis " - London, Iliffe Books Limited, 1966, p 57 - 77.
- [6] SCHACKELFORD, J. F. - " Introduction to Materials Science for Engineers " - New York, Macmillan Publishing Co., 1985, 605p.
- [7] VAN VLACK, L. H. - " Princípios de Ciência dos Materiais " - São Paulo, Edgard Blücher, 1970, 472p.
- [8] ACHBACH, W. P.; et alli - " Metals Engineering Design. ASME Handbook " - 2 ed. New York, McGraw-Hill, 1965, 619p.
- [9] BRADY, G. S. ; CLAUSER H. R. - " Materials Handbook " - 11 ed. New York, McGraw-Hill, 1979, 1011p.
- [10] ASHBY, M. F. - "On The Engineering Properties of Materials" - Acta Metall v 37 n 5 May 1989, p 1273-1293.
- [11] ZOTKIN, V. E. - " Methods and Criterion for Evaluating the Effectiveness of Material Usage " - Plenum Publishing

- Corporation, 1986, p 534-539.
- [12] HOPGOOD, A. A. - " knowledge Based Systems for Materials Selection " - Powder Metallurgy v 33 n 2 1990 p 116,117.
- [13] KUHN-ARROYO, I. - " SM: Programa de Seleção de Materiais de Construção Mecânica " - X Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, dezembro, 1989. p 327-330.
- [14] CSILLAG, J. M. - " Análise do Valor " - São Paulo, Editra Atlas, 1985.
- [15] SOUZA, S. A. - " Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos " - São Paulo, 5 ed., Editora Edgard Blücher, 1982.
- [16] METALS HANDBOOK - " Properties and Selection " - 9 ed., American Society for Metals v 1, 1978.
- [17] VAN VLACK, L. H. - " Propriedades dos Materiais Cerâmicos " - São Paulo, Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, 1973.
- [18] HERTZBERG, R. W.; MANSON, J. A. - " Fatigue of Engineering Plastics " - Academic Press, 1980.
- [19] HERTZBERG, R. W.; MANSON, J. A. - Proc. Conf. "Fatigue 81" Society of Environmental Engineers, University of Warwick, 1981.
- [20] METALS HANDBOOK - " Materials Characterization " - 9 ed., American Society for Metals v 10, 1986.
- [21] SILENCE, W. L. et alli - " Using Tests and Service Histories to Select Metals and Alloys " - Chemical Engineering, April 29, 1985 p 79-82.
- [22] KIRCHNER, R. W. - " Alloys that Fight Corrosion " - Machine

- Design, December 6, 1984 p 95-99.
- [23] JULIANO, L. - " Notas de Aula de Ciência dos Materiais " - DMC/FURG Rio Grande RS, 1992.
- [24] FILHO, E. B. - " Seleção de Materiais Metálicos " - 3 ed Campinas, Editora da Unicamp, 1991. 326p.
- [25] TELLES, P. C. S. - " Materiais para Equipamentos de Processo " - 2 ed Rio de Janeiro. Interciência, 1979.
- [26] HIGDON, A. et alli - " Mecânica dos Materiais " - 3 ed Rio de Janeiro, Guanabara Dois S.A. 1981, 549p.
- [27] JONES, D. L. - " Pratics Aplicacion of Frature Mechanics " - Metals Progress, ASM Feb/Mar 1982.
- [28] METALS HANDBOOK - " Properties and Selection: Irons and Steels " - v 1 e 2 ASM, EUA, 1978.
- [29] KRAGELSKY, I. V. - " Friction Wear Lubrication. Tribology Handbook " - v 1 Mir Publishers, Moscow, 1981. p 157-198.
- [30] SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R. - " Standard Handbook of Machine Design " - McGraw-Hill, 1986.
- [31] COPLEY, M. - " Plastics - Making the Best Choice " - Engineering Materials & Design.
- [32] METALS HANDBOOK - " Properties and Selection " - 9 ed. , American Society for Metals v 3, 1980.
- [33] VVEDENSKY, J. M. - " Computer Aided Materials Selection " - Industrial Lubrication and Tribology, May/June 1985 p 100-103.
- [34] SAWYER, B. T.; PECHT, M. - " A Material Selection Program "

- Byte, July 1986 p 235-248.
- [35] GERGELY, M.; RETI, T. - " Application of a Computerized Information System for the Selection of Steels and Their Heat Treatment Technologies " - Journal Heat Treating v 5 n 2, 1988 p 125-140.
- [36] JOHNSON, R. C. - " Optimum Design of Mechanical Elements " - 2 ed. New York, Wiley-Interscience, 1980.
- [37] BACK, N. - "Metodologia de Projeto de Produtos Industriais" - Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1983, 389p.
- [38] ORLOV, P. - " Fundamentals of Machine Design " - Moscow, Mir Publishers, volume 1, 1976, 517p.
- [39] SELL, I. - " Notas de Aula de Planejamento do Produto " - EPS/UFSC, Florianópolis, 1990.
- [40] SELL, I. - " Avaliação de Alternativas de Produtos: Metodologia " - Trabalho apresentado à banca de concurso para professor titular. UFSC. Florianópolis, Junho 1992, 84p.
- [41] POSSAMAI, O. - " Projeto de Produto " - Associação Comercial e Industrial de Joinville ACIJ. Joinville, Agosto 1986, 109p.
- [42] LÖBACH, B. - " Diseño Industrial " - Editorial Gustavo Gili S. A., Barcelona, 1981 p 153-186.
- [43] TJAIVE E. - " A Short Course in Industrial Design " - Newnes-Butterworts, London, 1979, p 93-171.
- [44] MANO, E. B. - " Introdução a Polímeros " - 4 ed, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1990.

- [45] BLASS, A. - " Processamento de Polímeros " - 1 ed, Florianópolis, Editora da UFSC, 1985.
- [46] SAECHTLING, H.; ZEBROWSKI, W. - " Kunststoff Taschenbuch " - Editorial Reverté S. A. Barcelona, 1963.
- [47] PERRY, R. H. ; CHILTON, C. H. - " Manual del Ingeniero Químico " - 5 ed, McGraw - Hill, México 1983.
- [48] MARK, H. F. et alli - " Encyclopedia of Ploymer Science and Engineering " - v 6, 11, 13, 16. 2 ed, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1989.
- [49] SHALAER, S.; MELLOR, S. J. - " Análise de Sistemas Orientada Para Objetos " - McGraw-Hill Ltda, São Paulo, 1990, 178p.
- [50] ROTHBART, H. A. - " CAMS. Design, Dynamics and Accuracy " - John Wiley & Sons, Inc. New York, 1980. p 278.