

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**TRABALHO de FORMATURA**

**DESENVOLVIMENTO TEÓRICO**  
**DE UM CAPP ESPECIALIZADO**  
em  
**TORNEAMENTO EXTERNO**

**Eduardo Masuda**  
**Alexandre Vency Yang**

**São Paulo**  
**1996**

**Aos meus pais , Oscar e Clotilde pela dedicação e incentivo em todos os  
momentos**

**Eduardo**

## **AGRADECIMENTOS**

**Ao professor Professor Edson Gomes, pela orientação e contribuição para a confecção desse trabalho**

**Ao colega Alexandre por sua pequena contribuição**

**À Silvia, pela ajuda dedicação na pesquisa de artigos**

**Ao Renato, pela ajuda na busca de materiais**

**Por fim àqueles que contribuiram de alguma forma para realização desse trabalho**

## **RESUMO**

**Esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento teórico de um CAPP especializado em torneamento externo**

# ÍNDICE

## **CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO**

	<b>pag</b>
I) INTRODUÇÃO.....	01
1 ) O QUE É CAPP ?.....	01
2 ) TIPOS DE CAPP's.....	02
II) ANÁLISE DE NECESSIDADE.....	03
III) SOLUÇÕES POSSÍVEIS.....	04
1 ) CAPP UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	04
A ) METODOLOGIA.....	04
B ) ARQUITETURA.....	10
2 ) CAPP DE TEMPO REAL.....	13
A ) METODOLOGIA.....	13
B ) ARQUITETURA.....	17
IV) ESTUDO DE VIABILIDADE.....	21
V) ESCOLHA DA SOLUÇÃO.....	23

## **CAPÍTULO II - USINAGEM - ASPECTOS TECNOLÓGICOS E ECONÔMICOS**

I) INTRODUÇÃO.....	24
II) VIDA DE FERRAMENTA E CURVAS DE DESGASTE.....	25
III) FORÇA E POTÊNCIA DE CORTE.....	27
IV) EQUIVALÊNCIA DAS OPERAÇÕES DE USINAGEM.....	32
V) CICLOS E TEMPOS DE USINAGEM.....	34
VI) MÁXIMA PRODUÇÃO.....	36
VII) CUSTOS DE PRODUÇÃO.....	38
VIII) MÍNIMO CUSTO.....	40

## **CAPÍTULO III - SELEÇÃO DE FERRAMENTAS**

I) INTRODUÇÃO.....	42
II) INSERTOS.....	42
III) PORTA FERRAMENTAS.....	46
IV) PROCESSO DE SELEÇÃO.....	48

## **CAPÍTULO IV - FLUXOGRAMA GERAL DO PROGRAMA**

I) FUNÇÕES DO PROGRAMA.....	55
II) FLUXOGRAMA.....	56
III) ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O SOFTWARE.....	56

## **CAPÍTULO V - CONSIDERAÇÕES SOBRE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO**

I) INTRODUÇÃO.....	66
II) MÉTODOS DE GRADIENTE.....	68
A ) MÉTODO DE GRADIENTE GENERALIZADO REDUZIDO.....	68
B ) TÉCNICA DE MINIMIZAÇÃO NÃO RESTRITA.....	71
III) MÉTODOS DE BUSCA DIRETA.....	73
A ) MÉTODO DA TOLERÂNCIA FLEXÍVEL.....	73
IV) COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS.....	74
A ) ANÁLISE QUALITATIVA.....	75
B ) ANÁLISE QUANTITATIVA.....	76

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS.....	78
BIBLIOGRAFIA.....	79

## **APÊNDICE**

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo a familiarização com o CAPP - Computer Aided Process Planning - bem como sua aplicação em um caso real.

### 1 ) O que é CAPP

A principal característica do CAD ( Computer Aided Design ) é a habilidade de analisar rapidamente e acuradamente as configurações de design. Entretanto, os sistemas de CAD utilizados atualmente limitam essas análises em razão à considerações tecnológicas tais como peso, área superficial, momentos de inércia, tensões, deflexões e outras. Apesar do CAD permitir o designer considerar relativamente um grande número de configurações e materiais, as consequências econômicas das iterações intermediárias não são especificadas. Apenas quando o design final estiver completo a análise econômica é feita. Se o designer não for influenciado, ao menos em parte, por consequências econômicas durante os estágios iterativos de design, então é possível que a alternativa de menor custo seja negligenciado.

Daí então surge a necessidade do CAPP. A grosso modo, pode-se dizer que o CAPP é um programa que, iterativamente com o processo de design de uma forma ou peça, determina implicações econômicas e técnicas de cada decisão de design tomado durante o processo até o design final da peça.

Determina, assim, a melhor sequência de operações, máquinas e ferramentas. Dessa forma, o designer, auxiliado pelo CAPP, pode durante o processo analisar paulatinamente todas implicações e tomar as decisões mais corretas.

## **2) TIPOS de CAPP's**

Na última década, um considerável amontoado de pesquisa têm sido feito para se criar vários tipos de sistemas automáticos de planejamento de processo.

Atualmente, podemos dividir e classificar os CAPP's em relação 3 tipos de tecnologia:

- SISTEMAS EXPERTS e INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL
- SISTEMAS com ESQUEMA de CÓDIGOS DE GRUPOS de TECNOLOGIA  
( *Group technology coding scheme* )
- SISTEMA de TEMPO REAL

### **A) SISTEMAS EXPERTS e INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Com o desenvolvimento de técnicas de software como “expert systems” e inteligência artificial, novos sistemas genéricos de planejamento de processos vêm surgindo. Nessa linha, têm-se programas como GARI, TOM, PROPLAN, HI-MAPP, SIPS, Turbo-CAPP, DYNACAPP e ROBEX.

**B) SISTEMAS com ESQUEMA de CÓDIGOS DE GRUPOS de TECNOLOGIA ( *Group technology coding scheme* )**

Programas como MULTICAPP, MICAPP, METCAPP, CAPP-FILE e IntelliCAPP utilizam uma variante de approach de planejamento de processos na qual um esquema de código de grupos de tecnologia é utilizado para organizar planos de processos pré-copilados. Contudo detalhes da estrutura de sistemas comerciais não tem sido publicados em literatura aberta. Portanto, esses tipos de programas não serão abordados nesse trabalho.

**C) SISTEMA de TEMPO REAL**

Novos sistemas como o RTCAPP (Real Time Computer Aided Process Planning) são capazes de gerar planos de processos a cada passo do processo de design ao mesmo tempo.

**II ) ANÁLISE de NECESSIDADE**

O atual ambiente de manufatura é extremamente competitivo, caracterizado por um aumento na diversidade de produtos, grande redução do ciclo de vida dos produtos, mudanças de padrões de custo, e grande dificuldade de estimar os custos e benefícios de novas tecnologias. Uma nova estratégia e ferramenta é necessária para lidar com esse ambiente, a qual facilite a flexibilidade, reduza o tempo do ciclo de um design, reduza o tempo de mercado

para novos produtos e reduza a ordem de tempo do ciclo do consumidor para produtos existentes. Essa ferramenta é o CAPP.

### **III) SOLUÇÕES POSSÍVEIS**

À seguir serão apresentadas exemplos duas classes para efeito de estudo da solução do problema.

Serão analisados um sistema utilizando INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL baseado no projeto do ROBEX e um sistema de TEMPO REAL baseado no RTCAPP.

#### **III.1) SOLUÇÃO 1: COMPUTER AIDED PROCESS PLANNING UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

##### **III.1.A) METODOLOGIA**

###### **III.1.A.1) ENGENHARIA PARALELA**

###### **III.1.A.1.1) Uma nova estratégia de design e manufatura**

O ciclo de vida de um produto pode ser dividido em 3 fases: a fase de design, a fase de manufatura e a fase de fim de vida, representado na fig1. Tradicionalmente, os ciclos de design e manufatura são separados e ocorrem sequencialmente com planejamento de processo como atividade interligar essas 2 principais fases do ciclo de vida fig2. Desta forma, a fase de design serviria para provar o design do produto e estabelecer os métodos de produção, antes

do produto ir para a produção. A subsequente fase de manufatura era caracterizada por muitos anos de alta demanda estável, durante a qual era esperado recobrir os custos ocorridos na fase de design do produto e desenvolvimento de processos. O planejamento de processo era uma etapa relativamente simples, envolvendo a translação de requerimentos de produto e design para uma série de instruções de manufatura que poderiam ser interpretados e levados para a planta.

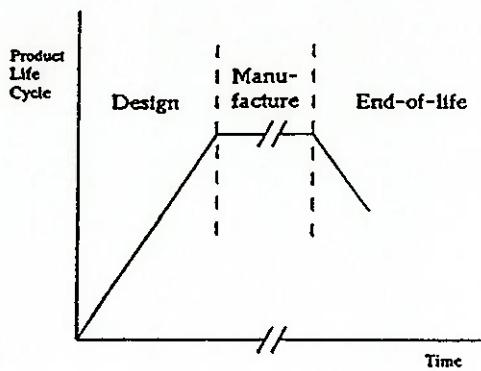


fig 1 - Fases de um ciclo de vida de um produto [1]

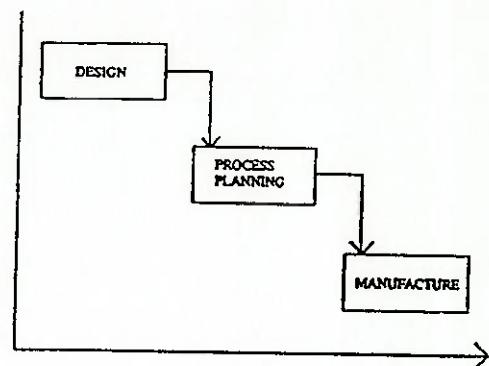


fig 2 - Engenharia sequencial[1]

No atual ambiente de manufatura, entretanto, a expectativa de um alta demanda estável não é realista. Produtos estão sendo continuamente redesenados e a vida útil do produto no mercado está constantemente sobre novos e melhorados tipos de design. Ademais, as firmas estão continuamente se esforçando para reduzir o lead time que oferecem aos clientes. Devido a esta compressão no ciclo de vida do produto, firma de manufatura não podem mais arcar com investimentos em equipamentos dedicados e facilidades, uma vez

que o design pode mudar antes do equipamento! Assim, sistemas flexíveis de produção são necessários para lidar não somente com os atuais designs assim como seus futuros designs. Acima de tudo, ferramentas são requeridas para permitir essas reduções de custo e de escala de tempo.

Guiados pela necessidade de reduzir o ciclo de tempo, um novo conceito está emergindo para design e manufatura, não sequencialmente, como nos moldes tradicionais, mas em paralelo, como mostra a fig3. Esta abordagem é também conhecida como engenharia simultânea. Neste caso, a função do planejamento de processo é expandida e ocorre quase simultaneamente com design de produto e processo, o efeito disto é “empurrar” a fase de manufatura para perto do design e reduzir o lead time total para o mercado.

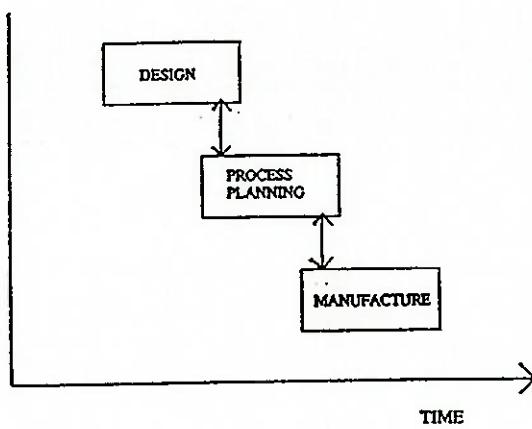


fig 3 - Engenharia paralela [1]

### III.1.A.1.2) Planejamento de Processo em ambiente de engenharia paralela

O sucesso da implementação da filosofia da engenharia paralela depende da disponibilidade de ferramentas integradas para implemnetar técnicas usadas por engenheiros de design e manufatura. O CAD ( Computer-aided-design) e o CAM ( Computer-aided-manufacturing) estão crescendo em sofisticção e facilidade de uso. Entretanto, a integração CAD/CAM é ainda tema de pesquisa. Os maiores esforços de pequisa nesta área é o desenvolvimento de sistemas CAPP (Computer-aided-process-planning) que automatizam o processo de comunicação entre o designers de produto e os engenheiros de manufatura. Entretanto, esses sistemas tendem à concentrar na automação de tradicionais funções de planejamento de processo, isto é, a geração de planos de processos para manufatura. Assim , no nosso entedimento, o foco é muito estreito para abilitar uma efetiva integração de CAD/CAM. Está crescendo a necessidade de o design para técnicas de manufatura e montagem no domínio dos siatemis CAPP. Essas técnicas que são usadas em Analises de PRODUTO/PROCESSO, uma atividade que permite a função de manufatura em influenciar o design de processo e assegura que os designers são avisados dos efeitos de diversos tipos de design em relação a facilidade de manufatura. Desta forma, uma ferramenta CAPP pode ser representado como tendo 2 funções separadas: ANALISE de PRODUTO/PROCESSO e PLANEJAMENTO de PROCESSO, propriamente dito, como mostra fig4. Um processo de 2 estágios resulta em qual

análise de produto/processo extrai dados do CAD, aplica design para manufatura e design para montagem de guias dados de design e alimenta os dados de análise de FEED BACK para o sistema de CAD, sobretudo se um redesenho pode ocorrer. O planejamento de processo então recebe peças que serão passados para análise de produto/processo e gera instruções de manufatura para sua manufatura, para ser mandado para o sistema de CAD. O fluxo de dado é representado pela fig5. Esta concepção de 2 estágios de ligação entre design e manufatura com fluxo de 2 mãos de informação é baseado em O'Grady *et al* (1998). Eles também propõe uma arquitetura na qual o design de produto é primeiramente analisado em sua eficiência sob ponto de vista funcional e de manufatura, antes de passar para o sistema de planejamento de processo.

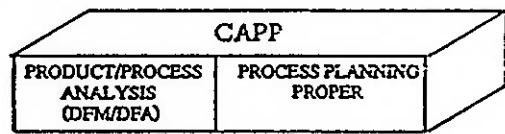


fig 4 - Estrutura de um CAPP [1]

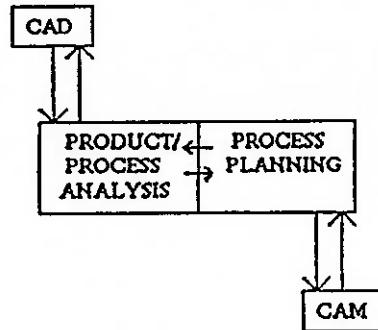


fig 5 - Fluxo de dados entre CAD e CAM[ 1]

### **III.1.A.2) TÉCNICA DE DESIGN PARA A MANUFATURA**

Design para manufatura ( DFM- Design for manufacture ) envolve essencialmente a consideração de como o design de produto pode facilitar ou dificultar sua montagem, manuseio, clasificação, empacotamento e testagem; sendo design para facilidade de montagem ( DFA - Design for ease assembly ) a chave. A importância disso se deve ao fato de que 70% dos custos de manufatura de um produto podem ser determinados por decisões de design e 20% por decisões de produção.

Assim sendo, as diretrizes podem ser classificadas em regras de design relativas a:

1. Consideração das condições organizacionais e ambientais que podem afetar a montagem.
2. Simplificação e estandardização do design de produto.
3. Consideração de processos de montagem e como o design do produto pode afetar sua execução.

#### **III.1.A.2.1) Condições organizacionais e ambientais**

- Provisão de informação: os designers podem ser informados de dados que permitam avaliar as consequências de seus designs na montagem assim como sua perspectiva técnica.
- Design e desenvolvimento integrados: com relação ao conceito de engenharia paralela.
- Trabalho de pré-montagem
- Sequenciamento flexível

### III.1.A.2.2) Simplificação e estandardização do design

- Minimizar o número de peças no produto
- Minimizar a variedade de peças e produtos

### III.1.A.2.3) Facilidade de processos de montagem e sua execução

- Design para facilitar a inserção
- Design para facilitar a junção
- Design para facilitar o manuseio
- Design para facilitar o labelling
- Design para facilitar a testagem

## III.1.B) ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema aqui proposto foi baseado e adaptado do sistema proposto por J.Browne *et al* para PLANEJAMENTO DE PROCESSO DE MONTAGEM EM 2 ESTÁGIOS PARA SISTEMAS DE MONTAGEM FLEXÍVEIS BASEADOS EM ROBÔS. Nesse sistema é utilizado o que se chama de INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.

Como foi proposto na metodologia, o sistema será dividido em 2 estágios representado na figura a seguir:

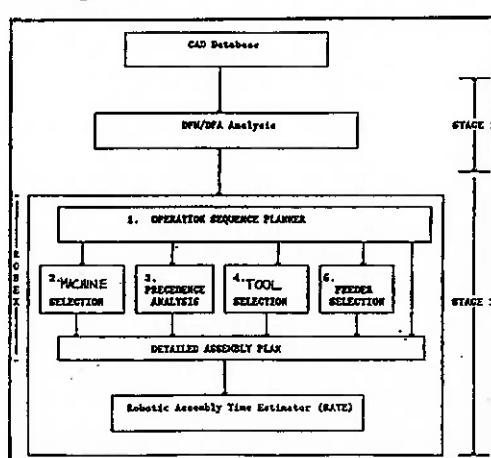


fig 6 - Arquitetura de um CAPP de IA [1]

### **III.1.B.1) Estágio2- Planejamento de Processo propriamente**

Nessa sub-sessão será descrito resumidamente o estágio mais avançado do sistema. Seu principal módulo é o PLANEJADOR DE SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO. Com a adição dos módulos 2,3,4 e 5 , o sistema de planejamento é capaz de gerar a possível sequência de operações requeridas para a concepção do produto. Assim sendo, teremos os seguintes módulos:

- **PLANEJADOR DE SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO**

A idéia é utilizar um conjunto de operações standart . Dessa forma o processo é entendido quantitativamente. O conjunto de operações standart depende da industria e da variedade dos produtos a serem produzidos.

- **MÓDULO de ANÁLISE DE PRECEDÊNCIA**

O objetivo é especificar qualquer pré-condição e pós-condição para cada operação especificado no módulo anterior.

- **MÓDULO de SELEÇÃO DE MÁQUINA**

A meta é ajudar o usuário na geração da lista das máquinas mais adequadas para cada operação.

- **MÓDULO de SELEÇÃO DE FERRAMENTA**

O objetivo é fornecer descrição detalhada das ferramentas.

- **MÓDULO de SELEÇÃO DE ALIMENTADOR**

A meta é a escolha mais adequada levando-se em conta as características de design e geometria da peça.

Como já foi dito, todos os módulos foram propostos ser escritos em linguagem OPS5. Essa linguagem é utilizado para aplicações de SISTEMAS EXPERT e PSICOLOGIA COGNITIVA, usando paradigma das leis de produção. A linguagem é baseado em regras e cada regra consiste em 2 partes: (a) uma série de condições e (b) uma série de ações. Um interpretador seleciona a regra para executar, através de tentativa de ligar as condições da regra com o dado corrente na memória de trabalho. Se a ligação é bem sucedida, então o conjunto de ações correspondentes são carregados. A base de dados relacional é escrita em Vax Rdb. A interface entre o usuário, a base de regras e a base de dados é proposto ser escrita em Vax Pascal.

### **III.1.B.2) Estágio 1 - Análise de Produto e Processo**

Swift,K. (1987) afirmou que 'uma porção significante dos problemas da montagem automatizada está evidentemente na engenharia de desenho de um componente'. Assim sendo, um design efetivo para manufatura/design para um sistema de montagem deve estar disponível para análise do produto enquanto se está ainda na fase de design.

Assim sendo, neste estágio, regras e procedimentos de DFM/DFA serão utilizados na análise de dados e, baseados nessa análise, recomendações serão feitas.

### **III.2) SOLUÇÃO 2: COMPUTER AIDED PLANNING SYSTEM de TEMPO REAL**

#### **III.2.A) METODOLOGIA**

##### **III.2.A.1)PLANEJAMENTO INCREMENTAL**

Algumas informações sobre a semântica da geometria e topologia da peça é necessária para uma ligação efetiva entre o design e o planejamento do processo de manufatura. Uma forma que é definida informalmente como uma forma geométrica unitária e usado comumente por razões de design ou atividades de manufatura, é o ingrediente chave para descrição da peça.

Em um planejamento incremental, quando uma nova forma é adicionada em uma peça já existente durante o processo de design, um plano intermediário de processo é gerado para um ajuste acumulado de forma. Isso ocorre somente através de uma modificação no plano do processo corrente, ou através de uma simples adição de um sub-plano imaginado para a nova forma. O plano intermediário aumenta incrementalmente a cada adição de formas até que o processo de design estiver terminado. Essa concepção contribui não somente para a redução no tempo de geração do planejamento, mas também para a seleção da forma mais econômica durante o processo de design.

Há algumas observações interessantes no comportamento dos designers humanos e os planejadores de processo que contribuem grandemente para a eficiência do mecanismo do Planejamento Incremental:

- Os designers humanos tendem a criar primeiramente as bordas do objeto. Outras formas - tais como orifícios, patamares, slots, etc - são adicionados partindo-se de superfícies exteriores para depois mover-se para as partes internas e adicionado outras formas usinando-se novas superfícies como referências.
- Na atual manufatura, as superfícies externas de um objeto são usinadas primeiramente para as operações de faceamento para criação de superfícies de referência e de descanso. Depois, seguem-se as operações para obtenção das formas exteriores para depois efetuar-se operações internas.

Dado esse fenômeno, fica evidente que uma correlação entre a sequência de adição de formas de um designers com a atual sequência do processo de manufatura. Como resultado, pode-se gerar planos de processo muito mais rapidamente que os processos de planejamento convencionais.

Contudo, dado a geração de um plano de processo intermediário, uma das duas possibilidades pode ocorrer:

- Uma mudança no design não afeta o plano de processo. Nesse caso, o plano de processo do nova forma pode ser ligado ao final do plano de processo acumulativo corrente. Essa simples geração e adição de plano pode ser feito em tempo real.
- Uma mudança no design afeta o plano de processo corrente. Nesse caso, é necessária o uso de “backtracking” e re-sequenciamento, mudando a natureza de um dos processos recomendados nos primeiros

estágios do design. Porém na maioria dos casos, essa imposição pode rearranjar e modificar somente uma pequena porção do plano de processo existente. e dessa forma, isso é possível de ser feito em tempo real.

### **III.2.A.2) PLANEJAMENTO HIERÁRQUICO**

O processo de planejamento pode ser encarado como sendo uma atividade de decisão que é ligado à intruções de manufatura para conversão do design da peça em um produto acabado. O input de variáveis de planejamento de processo inclue as especificações de design e um grande volume de de conhecimentos de manufatura e capacidade de fábrica. O output final da atividade de planejamento de processo inclue descrição detalhada de processos selecionados, máquinas , ferramentas de corte, sequências de processo e, em alguns casos, o custo estimando.

Os processos convencionais de planejamento de processos torna quase impossível a produção ouputs detalhados para formas individuais adicionado pelo designer.

Experientes planejadores humanos de processos propõem um esqueleto de plano depois de um cuidadoso estudo das especificações da peça. Nos primeiros estágios, o plano inclui a divisão de grandes etapas em agrupamentos ordenados de pequenas etapas como o selecionamento de processo mais apropriados para cada forma ou sequências de formas. Nos últimos estágios,

máquinas apropriadas com ferramentas de corte e acabamento específicos são selecionados com o objetivo de minimizar o número de máquinas e ferramentas diferentes.

Dessa forma, um sistema hierárquico é descrito a seguir:

- nível 1: A maior parte do problema do planejamento de processo reside na seleção de formas e sequenciamento de um material inicial em uma peça acabada desejada. Um grande número de alternativas é possível. Assim sendo, uma busca heurística pode ser projetada para a seleção da equência mais adequado. Um a lista de máquinas candidatas para cada forma é criado usando base relacionada como refinamento procedimento de processo. Para cada máquina candidata, ferramentas de corte adequadas são selecionadas considerando material, tolerâncias e rugosidade superficial.
- nível 2 : Nesse nível , é selecionadas as máquinas e ferramentas mais adequadas. A melhor sequencia de máquinas do nível 1 também é selecionada através do uso de um algoritmo de programação dinâmica.

### III.2.A.3) OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE MANUFATURA

A tarefa de seleção e sequenciamento de máquinas no estágio de microplanejamento ( isto é, baixo nível hierárquico ) é a tarefa que mais influí na redução de custo.

Para otimização na performance dessa tarefa, os seguintes pontos serão levados em conta:

- As mais recomendáveis condições de corte para determinados processos são selecionados considerando as velocidades de alimetanção, corte, e a potência do motor. As condições de usinagem para a maioria dos processos estão estocados em uma database de usabilidade baseado no *Machining Data Handbook*.
- O provável conjunto de processos capaz de executar algumas formas em cada máquina individualmente é identificado.

O tempo de setup da máquina e custo de ferramental são determinados utilizando dados práticos.

### **III.2.B) ARQUITETURA DO SISTEMA**

Baseado nas idéias anteriores, segue-se uma estrutura composto de 6 módulos: INTERFACE DO USUÁRIO, RELAÇÃO PRÉ-CONDICIONAL PARCIAL, PLANEJAMENTO DE MACROPROCESSAMENTO, PLANEJAMENTO DE MICROPROCESSAMENTO, MANUTENÇÃO DO PLANO E BASE DE CONHECIMENTO DE MANUFATURA.

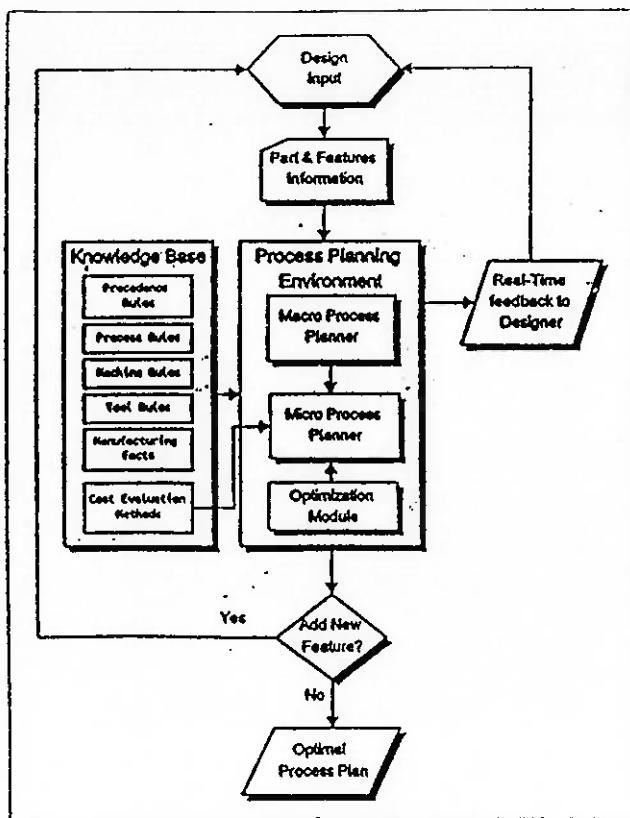


fig 7 - Arquitetura de um CAPP de TEMPO REAL [3]

- **MÓDULO de INTERFACE DO USUÁRIO**

Esse módulo é responsável pela comunicação entre o usuário e o CAPP. Nesse módulo as informações do design da peça é transformado em uma descrição formalizada.

- **MÓDULO de RELAÇÃO PRÉ-CONDICIONAL PARCIAL**

A qualidade de um plano de processo depende do conhecimento do planejador de processos ( humano ou software ) e a disponibilidade das capacidades de manufatura da fábrica. Seja como for as possibilidades de combinações são enormes. Dessa forma, para limitar o campo de procura, com certos limitantes pode ser definidos antes de aplicar o algoritmo de procura. Assim sendo, esse

módulo tem essa função considerando fatores geométricas, tecnológicas e econômicos.

- Fator Econômico: esse fator é examinado como redução do custo e tempo de usinabilidade.

- Fator Geométrico: esse fator está relacionado com tolerâncias geométricas e dimensional.

- Fator Tecnológico: devido as limitações tecnológicas e a indisponibilidade de certos recursos, os limites de tolerância são definidos pelo designer.

- **MÓDULO de PLANEJAMENTO DE MACROPROCESSO**

Esse módulo tem como funções:

- Determinação do conjunto mais adequado de combinação de parâmetros de manufatura;

- Determinação da sequência de operações.

- **MÓDULO de PLANEJAMENTO DE MICROPROCESSO**

Nesse módulo os parâmetros de usinabilidade são determinados e o processo e a sequência de máquinas são otimizados.

- **MÓDULO de MANUTENÇÃO DO PLANO**

Nesse módulo, um algoritmo é desenvolvido para efetivamente a função de PLANEJAMENTO INCREMENTAL descrito no item de METODOLOGIA anterior.

- **MÓDULO de BASE DE CONHECIMENTO DE MANUFATURA**

A representação do conhecimento de manufatura envolve o design de diversas classes de estruturas de dados para estocar informações de manufatura, assim como, o desenvolvimento de um procedimento que permite a manipulação da estrutura de dados para se obter uma solução viável.

#### **IV ) ESTUDO DE VIABILIDADE**

Nessa seção, a viabilidade das duas soluções será feita analisando-se os seguintes aspectos :

- **VIABILIDADE da TEORIA**
- **VIABILIDADE de IMPLANTAÇÃO**

#### **VIABILIDADE da TEORIA**

Do ponto de vista teórico ambas soluções possuem bases sólidas.

No CAPP baseado em inteligência artificial, temas como ENGENHARIA PARALELA, DFM / DFA são totalmente plausíveis e aplicáveis. A única ressalva fica por conta da INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL. Muitos estudos vêm sendo feitos desde o início da era da informática nos finais dos anos 60. Contudo, não se foi obtido nenhum resultado abrangente em termos de INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) de fato. O que se foi obtido são pequenas aplicações feitas condições operacionais particulares, tal como nesse exemplo. Ou seja, nessa aplicação a utilização de IA. Todavia, não está descartada uma verdadeira aplicação com desenvolvimentos futuros.

Quanto ao CAPP de TEMPO REAL , temas como PLANEJAMENTO INCREMENTAL, PLANEJAMENTO HIERÁRQUICO, BACKTRACKING e BUSCA EURÍSTICA são altamente consistente e aplicáveis, sendo que muitos deles já são aplicados em outros tipos de software.

## VIABILIDADE de IMPLANTAÇÃO

Do ponto de vista de implantação temos que ambas soluções são possíveis em termos de recursos mundiais.

Contudo, nesse trabalho em particular será muito difícil a implementação do CAPP baseado em INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL uma vez que na faculdade não há disponível, para alunos da graduação, disciplinas e software ( compiladores ) relacionados à IA.

Por outro lado, o CAPP de TEMPO REAL pode ser desenvolvido em linguagens estruturadas como PASCAL ou C em qualquer plataforma PC.

## V ) ESCOLHA da SOLUÇÃO

Segue-se uma tabela com dados quantitativos e qualitativos para o auxílio da escolha da melhor solução

	CAPP baseado IA	CAPP em TEMPO REAL	COMENTÁRIOS
CONSISTÊNCIA DA TEORIA	5	5	
APLICABILID. DA TEORIA	3	5	IA não totalmente desenvolvida
FACILIDADE DE IMPLEMENT. SOFTWARE	1	5	IA necessita de copilador especial não encontrado facilmente
FACILIDADE DE IMPLEMENT. HARDWARE	5	5	QUALQUER PC
TOTAL	14	20	

tabela 1 - Matriz de solução [autores]

Portanto a escolha recai sobre o CAPP de TEMPO REAL

## **CAPÍTULO II**

### **USINAGEM - ASPECTOS TECNOLÓGICOS E ECONÔMICOS**

#### **I) INTRODUÇÃO**

Ao se planejar um processo de usinagem, é necessário o estabelecimento de parâmetros que levem a obtenção de produtos mais baratos e de melhor qualidade. Dessa forma, fica patente a necessidade de uma otimização de planejamento.

Essa otimização pode ser obtida através da combinação de várias formulações obtidas na literatura técnica sobre processos de torneamento que serão apresentadas através dos seguintes tópicos:

#### **1. ASPECTOS TÉCNICOS:**

- VIDA e DESGASTE DE UMA FERRAMENTA
- POTÊNCIA e FORÇAS DE CORTE

#### **2. ASPECTOS ECONÔMICOS:**

- VELOCIDADES de MÍNIMO CUSTO e MÁXIMA PRODUÇÃO
- CUSTOS de FABRICAÇÃO
- EQUACIONAMENTO das CONDIÇÕES de MÍNIMO CUSTO
- CICLOS e TEMPOS de USINAGEM
- EQUACIONAMENTO das CONDIÇÕES MÁXIMAS de PRODUÇÃO

## II) VIDA DE FERRAMENTA E CURVAS DE DESGASTE

Vida de Ferramenta (T) pode ser definido de 2 formas:

- tempo decorrido até que a aresta de corte da ferramenta atinja um determinados valor pré-estabelecido de desgaste
- intervalo de tempo entre 2 afiações consecutivas

Para a determinação da vida da ferramenta, devemos definir os valores limites de desgaste e quebra. Com os valores de velocidade de corte ( $V_c$ ) e vida (T), podemos construir uma curva de vida  $V_c \times T$ , em condições pré-determinadas para o par de ferramentas. Tal curva é ilustrada a seguir em escalas logarítmicas na figura 9.

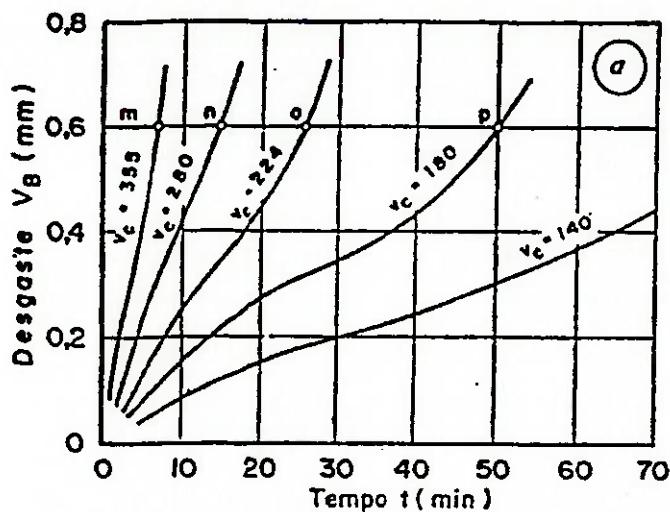


fig 8 - Curvas características de desgaste [8]

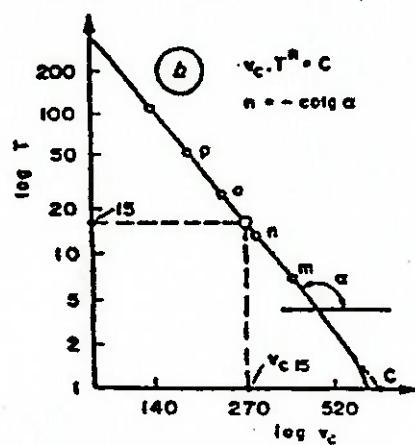


fig 9 - Curvas típicas de vida de ferramenta [8]

TAYLOR foi o primeiro estudioso a formular uma equação que traduzisse tal curva em 1910. Tal equação é representada a seguir:

$$T = \frac{K}{V_c^x}$$
 onde:  $V_c$  é a velocidade de corte, em m/min

K e x são constantes experimentais dependentes dos materiais envolvidos

Contudo, se considerarmos a influência do avanço (a) , da profundidade de corte (p) e admitindo que o desgaste varia exponencialmente com o tempo de usinagem, temos a equação expandida de TAYLOR ou de GILBERT

$$T = \frac{K}{V_c^x a^{x_1} p^{x_2}}$$
 onde:  $V_c$  é a velocidade de corte, em m/min

K e  $x_i$  são constantes experimentais dependentes dos materiais envolvidos

a é profundidade de corte , em mm/volta

p é a profundidade de corte, em mm

Para o caso de velocidade de corte e avanços constantes, com a ferramenta trabalhando em um único estágio, pode-se calcular os expoentes da equação de TAYLOR pela seguinte equação:

$$x = \frac{\log(Z_i / Z_{i+1})}{\log(V_{c(i+1)} / V_{ci})} + 1$$

$$K = Z_i \cdot V_{ci}^x \cdot t_{ci}$$

onde:

$Z_i$  é o número médio de peças usinadas com a ferramenta até o fim da vida, na condição  $i$

$V_{ci}$  é a velocidade de corte na condição  $i$

$t_{ci}$  é o tempo de corte na condição  $i$ , em min

### III ) FORÇA E POTÊNCIA DE CORTE

#### A) FORÇA DE CORTE

A força de corte pode ser expressa por:

$$F_c = K_s \cdot S \quad \text{onde :} \quad S \text{ é área da secção de corte, em mm}^2$$

$K_s$  é a pressão específica de corte,  $\text{Kgf/mm}^2$

Por sua vez a seção de corte pode ser expressa da seguinte forma:

$$S = a \cdot p = b \cdot h$$

onde: a é o avanço

p é a profundidade de corte

b é espessura do cavaco

h é altura do cavaco

A análise de resultados experimentais que mediram a influência de fatores tais como a velocidade de corte, afiação de ferramenta , seção de corte entre outros, fez com que muitos pesquisadores propusessem fórmulas analíticas relacionado a pressão específica de corte com grandezas dependentes. Nesse contexto destaca-se Kienzle que em 1951 propôs a seguinte formulação:

$$K_s = \frac{K_{sl}}{h^2}$$

$$z = tg(\alpha)$$

onde :

$K_{sl}$  é a constante específica do metal

para uma seção de corte de 1mm de espessura por 1mm de largura

z é coeficiente angular da deta definida pela inclinação a

Nota-se que  $K_s$  aparece em função da espessura de corte e não em função do avanço como é usual.

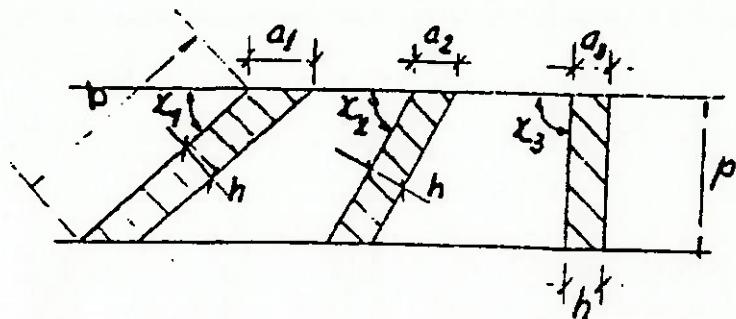


fig 10 - Representação de diversos ângulos de posição [7]

Verifica-se também, mediante ensaios, que para um ângulo compreendido entre 30 e 75 graus e para  $p/a > 4$ , a pressão específica de corte permanece praticamente constante. Dessa forma, o valor de  $K_s$  das seções de corte de mesma espessura  $h$ , representadas na figura abaixo é praticamente o mesmo.

Assim, a força principal de corte pode ser obtida pela fórmula:

$$F_c = K_s \cdot h \cdot b = K_{sl} \cdot h^{1-z} \cdot b$$

Considerando o avanço e a profundidade de corte tem-se uma nova formulação para a força de corte:

$$h = a \cdot \operatorname{sen}(\chi)$$

$$b = \frac{p}{\operatorname{sen}(\chi)}$$

$$F_c = K_{sl} \cdot (a \cdot \operatorname{sen}(\chi))^{1-z} \cdot (p / \operatorname{sen}(\chi))$$

onde:  $\chi$  é o ângulo de posicionamento da ferramenta

#### B) POTÊNCIAS DE USINAGEM

Potência de corte ( $N_c$ ):

$$N_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60.75} (CV)$$

onde:  $F_c$  é dado em Kgf

$V_c$  é dado em m/min

Potência de avanço ( $N_a$ ):

$$N_a = \frac{F_a \cdot V_a}{1000 \cdot 60.75} (CV)$$

onde:  $F_a$  é dado em Kgf

$V_a$  é dado em mm/min

Potência efetiva de corte ( $N_e$ ):

$$N_e = N_c + N_a(CV)$$

Para operações de torneamento considerando  $F_c \sim 4.5F_a$ , temos que  $N_a \ll N_c$ . Dessa forma,  $N_e$  é praticamente igual a  $N_c$ . É por essa razão que  $F_c$ , que constitui a maior parcela da potência de usinagem, é denominada Força Principal de Corte.

Potência fornecida pelo motor ( $N_m$ ):

$$N_m = \frac{N_c}{\eta}(CV)$$

onde:  $\eta$  é o rendimento devido as eventuais perdas

durante o processo de transmissão.

#### IV ) EQUIVALÊNCIA DAS OPERAÇÕES DE USINAGEM

A formulação proposta anteriormente basea-se em operação simples de torneamento cilíndrico, em que o diâmetro é constante em todo o perfil. Dessa forma, torna-se necessário o estudo de equivalência de processo de torneamento, de forma tal que se adapte tal formulação para as demais operações de torneamento.

Para tanto, define-se como velocidade de corte equivalente de usinagem com velocidade de corte variável, “a velocidade de corte constante que origina no mesmo tempo de usinagem, igual nível de desgaste da ferramenta, nas mesmas condições de avanço, profundidade de corte, geometria efetiva da ferramenta, fluido de corte e par ferramenta-peça considerado” [8]. Assim sendo temos a seguinte fórmula, que é aplicável dentro do campo de validade da fórmula simplificada de TAYLOR :

$$e = \sqrt{x} \cdot \frac{1}{t_c} \cdot \int_0^{t_c} V_c^x \cdot dt$$

Ferraresi demonstrou a validade dessa fórmula para um caso geral, supondo as curvas de vida paralelas, para diversos valores de desgaste.

Assim, a partir do conceito de velocidade de corte equivalente, definimos uma relação com  $d_e$ , diâmetro equivalente :

$$\alpha_e = \frac{\pi \cdot d_e \cdot n_r}{1000}$$

onde:  $V_{ce}$  é velocidade equivalente de corte, em m/min

$d_e$  é o diâmetro equivalente na operação, em mm

$n_r$  é a rotação do fuso, em rpm

Para cada caso, Ferraresi, propõe

- Torneamento Cilíndrico

$$d_e = d \text{ (mm)}$$

- Torneamento de Faceamento

$$d_e = \left\{ d_1^x \cdot \left[ \frac{1 - \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{x+1}}{(x+1) \left( 1 - \frac{d_2}{d_1} \right)} \right] \right\}^{\frac{1}{x}}$$

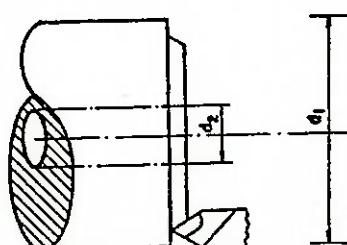


fig 11 - Diâmetro equivalente para operações de torneamento de faceamento.. [6]

- Toneamento Cônico

$$d_e = \left\{ d_2 \cdot \frac{\left[ 1 - \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{x+1} \right]}{(x+1) \left( 1 - \frac{d_2}{d_1} \right)} \right\}$$

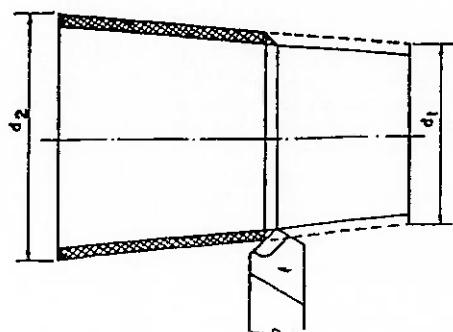


fig 12 - Diâmetro equivalente para operações de torneamento cônico [6]

## V) CICLO E TEMPO DE USINAGEM

Segundo Sergio Rabello [8] para uma peça pertencente a um lote de  $Z$  peças têm-se a seguinte expressão para o tempo total de usinagem :

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{n_t}{Z} \cdot (t_{tf} + t_{af})$$

onde:

- $t_t$  é o tempo total de usinagem, em min ;
- $t_c$  é o tempo de corte propriamente dito, em min ;
- $t_s$  são os tempos secundários de usinagem ( colocação, fixação, retirada e inspeção da peça ), em min ;
- $t_a$  é o tempo de aproximação e afastamento da ferramenta, em min ;
- $t_p$  é o tempo de setup da máquina, em min ;
- $t_{tf}$  é o tempo de troca de ferramenta, em min ;
- $t_{af}$  é o tempo de afiação da ferramenta, em min ;
- $n_t$  é o número de trocas de ferramenta para o lote de  $Z$  peças.

Considerando que o preparo da máquina seja feito com ferramentas afiadas, temos :

$$Z = (n_t + 1) Z_t = (n_t + 1) \frac{T}{t_c}$$

onde:  $Z_t$  é o número de peças usinadas numa vida  $T$

É importante ressaltar que  $t_{af}$  pode ser nula se o operador tiver uma nova ferramenta ou uma 2<sup>a</sup> ou 3<sup>a</sup> de reserva. Dessa forma têm-se:

$$t_t = t_c + \left( t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right) + \left( \frac{t_c}{T} - \frac{1_t}{Z} \right) \cdot (t_{tf})$$

## VI ) MÁXIMA PRODUÇÃO

Para a operação de torneamento cilíndrico com percurso de corte l (mm) ,

têm-se:

$$t_c = \frac{l}{v_A} = \frac{l}{n_R} = \frac{l \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V_c}$$

onde:

- d é o diâmetro da peça, em mm ;
- a é o avanço de corte, em mm/min ;
- $V_c$  é a velocidade de corte, em m/min ;

Aplicando as duas equações anteriores na equação de TAYLOR, ter-se-á :

$$t_t = \frac{l \cdot \pi \cdot d_e}{1000 \cdot a \cdot V_c} + \left( t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right) + \left( \frac{l \cdot \pi \cdot d_e \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot a \cdot K} - \frac{1_t}{Z} \right) \cdot (t_{tf})$$

No caso da operação ser de desbaste, os parâmentros estarão sujeito às seguintes restrições :

- **Avanço de corte** :  $o < a < a_{\max}$  ;
- **Raio de ponta** :  $0,2 \leq r_r \leq 2,4$ , em mm ;
- **Velocidade de corte** :  $0 \leq V_c \leq V_{C\max}$
- **Vida da ferramenta** :  $T_{\min} \leq T = \frac{K}{V_c^x} \leq T_{\max}$ , em mm
- **Maior profundidade de corte admissível** :  $\frac{p, (a \cdot \operatorname{sen}(\gamma))^1 \cdot z \cdot K_s \cdot V_c}{\operatorname{sen}(\gamma) \cdot 60.75} = N_m \cdot \eta$

No caso da operação ser de acabamento, os parâmentros estarão sujeito às seguintes restrições :

- **Avanço de corte** :  $o < a < \sqrt{\frac{R_s \cdot 8 \cdot r_e}{1000}}$  ;
- **Raio de ponta** :  $0,2 \leq r_r \leq 1,6$ , em mm ;
- **Velocidade de corte** :  $0 \leq V_c \leq V_{C\max}$
- **Vida da ferramenta** :  $T_{\min} \leq T = \frac{K}{V_c^x} \leq T_{\max}$
- **Maior profundidade de corte admissível** :  $p_{\max} = \text{sobremetal da operação}$

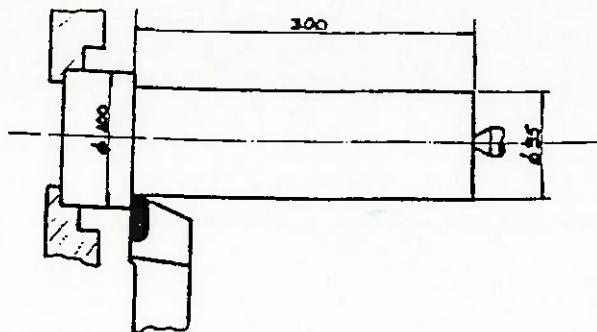


fig 13 - Exemplo de torneamento cilíndrico [6]

## VI) CUSTOS DE PRODUÇÃO

Segundo Rabelo [8] os custos por peça pode ser definidos da seguinte forma:

- $K_p$  é o custo de produção;
- $K_m$  é o custo de matéria-prima;
- $K_{mi}$  é o custo de indireto de matéria-prima;
- $K_u$  é o custo de usinagem;
- $K_{us}$  é o custo de mão de obra;
- $K_{ui}$  é o custo indireto de usinagem;
- $K_{uf}$  é o custo de ferramental (depreciação, troca, afiação);
- $K_{um}$  é o custo de máquina (depreciação, espaço, energia consumida);
- $K_{cq}$  é o custo de controle de qualidade;
- $K_{if}$  é o custo indireto de fabricação;
- $K_v$  é o custo variacional anterior ou posterior.

Dessa forma :

$$K_p = (K_m + K_{ni}) + (K_{us} + K_{um} + K_{uf}) + (K_{cq} + K_{ijf} + K_v)$$

Dessas parcelas, 3 delas dependem diretamente do tempo:

- $K_{us}$  - CUSTO de MÃO dE OBRA

$$K_{us} = t_t \cdot \frac{S_h}{60}$$

onde ;  $t_t$  é dado em min e  $S_h$  é o salário + encargos por hora

- $K_{um}$  - CUSTO de MÁQUINA

$$K_{um} = t_t \cdot \frac{S_m}{60}$$

onde ;  $t_t$  é dado em min e  $S_m$  é o salário + encargos por hora

- $K_{uf}$  - CUSTO de FERRAMENTA

$$K_{uf} = \left( \frac{1}{n_{pf}} \cdot V_{si} + \frac{K_{ins}}{n_{ins}} \right) \cdot \frac{1}{Z_t}$$

onde ;  $n_{pf}$  é a vida média do porta-ferramentas, em quantidade de arestas  
 $V_{si}$  é o custo de aquisição do porta-ferramenta;  
 $K_{ins}$  é o custo de aquisição de inserto;  
 $n_{ins}$  é u número de aretas de coerte da pastilha intercambiável.

## VII ) MÍNIMO CUSTO

Com relação ao item anterior, teremos:

$$K_p = \dots + K_{us} + K_{um} + K_{us} + \dots$$

$$K_p = \dots + \frac{t_t}{60} (S_h + S_m) + \frac{1}{Z_t} K_{yfs} + \dots$$

Utilizando a expressão de tempo total, ter-se-á

$$K_p = \dots + \frac{t_t}{60} (S_h + S_m) + \frac{t_c}{60} (S_h + S_m) + \frac{t_c}{T} \left( K_{yfs} + \frac{tf}{60} (S_h + S_m) \right) + \dots$$

ou seja:

$$K_p = \dots + C_1 + \frac{t_t}{60} C_2 + \frac{t_c}{T} C_3 + \dots$$

onde:  $C_1$  é constante de custo

independente dos parâmetros de corte

$C_2$  é a soma das despesas totais

$C_3$  é constante de custo relativo à ferramenta

Substituindo o tempo de corte  $t_c$  e a vida da ferramenta, ter-se-á:

$$K_p = \dots + C_1 + \frac{l \cdot \pi \cdot d_e}{6000 \cdot a \cdot V_c} C_2 + \frac{l \cdot \pi \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot a \cdot K} C_3 + \dots$$

## CA PÍTULO III

### SELEÇÃO DE FERRAMENTAS

#### I ) INTRODUÇÃO

A seleção de ferramentas está intimamente atrelada ao tipo de material que vai ser usinado assim como o tipo de cavaco que se espera de uma dada operação.

#### II ) INSERTOS

A ISO ( International Organization for Standardization), classifica o metal duro usado em insertos em três grandes categorias:

- Grupo P : Abraangendo classes ou tipos utilizados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos longos e dúcteis;
- Grupo M : Abraangendo classes ou tipos utilizados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos tanto longos quanto curtos;
- Grupo K : Abraangendo classes ou tipos utilizados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos ou de ruptura e matérias não metálicos.

A figura a seguir equematiza essa classificação. Nota-se que em termos de tenacidade, há um aumento dessa qualidade de P para K e internamente a cada classe em numeração crescente. O inverso ocorre com a resistência ao desgaste e dureza.

DESIGNAÇÃO ISO	DUREZA E RESIST. AO DESGASTE	TENACIDADE
P 01 P 10 P 20 P 25 P 30 P 40 P 50	↑	↓
M 10 M 20 M 30 M 40	↑	↓
K 01 K 05 K 10 K 20 K 30 K 40	↑	↓

FIG 14 - Representação das classes de ferramentas normalizadas [8]

Com a norma N° 1832 de 1985 da ISO, ficou estabelecido a seguinte codificação para insertos intercambiáveis:

- Código de Identificação de 10 campos ( 7 primeiros mais utilizados):
  - ⇒ Campo 1: forma do inserto eo ângulo inscrito entre arestas;
  - ⇒ Campo 2: ângulo de folga da pastilha;
  - ⇒ Campo 3: faixa de tolerância dimensional;
  - ⇒ Campo 4: tipo de inserto, em mm;
  - ⇒ Campo 5: comprimento da aresta principal de corte, em mm
  - ⇒ Campo 6: espessura do inserto, em mm;
  - ⇒ Campo 7: raio de ponta do inserto, em mm;
  - ⇒ Campo 8: condição de aresta de corte, indicando se angulo de saída é reto ou negativo;
  - ⇒ Campo 9: direção de avanço do porta ferramenta;
  - ⇒ Campo 10: opção do fabricante, que pode ser constituído de 2 ou mais algarismos.

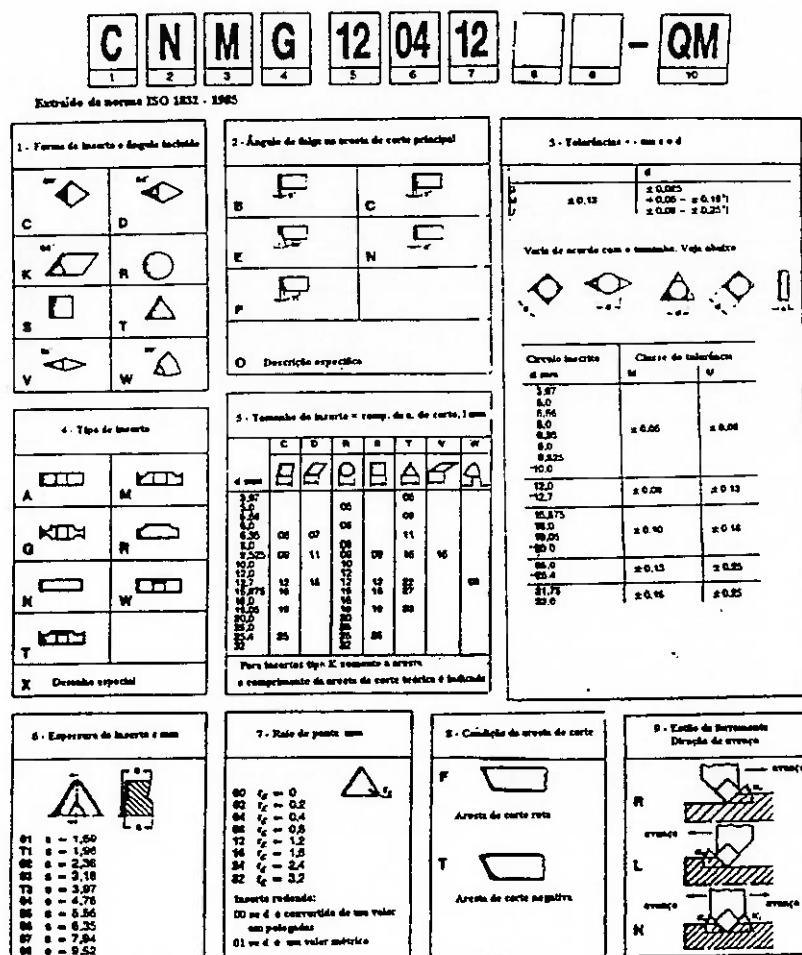


FIG. 15 - Estrutura da norma ISO para pastilhas intercambiáveis [5]

## II ) PORTA-FERRAMENTAS

Assim como os insertos, a ISO também estabeleceu uma normatização para os porta-ferramentas.

Com a norma N° 5608 de 1980 da ISO, ficou estabelecido a seguinte codificação para porta-ferramentas:

- Código de Identificação de 11 campos ( 9 primeiros mais utilizados):
  - ⇒ Campo 1: tamanho do porta-ferramenta de bloco ( BLOCK TOOL), sendo omitido se for um porta-ferramenta comum,
  - ⇒ Campo 2: sistema de fixação do inserto: por TOPO(C), FURO(P); ROSCA(S) ou TOPO e FURO(M);
  - ⇒ Campo 3: forma do inserto e o ângulo incrito entre elas;
  - ⇒ Campo 4: formato do porta-ferramentas;
  - ⇒ Campo 5: ângulo de folga da pastilha;
  - ⇒ Campo 6: sentido da ferramenta: avanço a direita, esquerda ou bilateral;
  - ⇒ Campo 7: altura do porta-ferramentas, em mm;
  - ⇒ Campo 8: espessura do porta-ferramentas, em mm;
  - ⇒ Campo 9: comprimento do porta-ferramentas, representado por letras ( entre A e X ) a qual está associado um comprimento em mm. Pode também indicar a

comprimento em mm. Pode também indicar a unidade de corte para o sistema BLOCK TOOL

⇒ Campo 10: comprimento da aresta de corte, em mm;

⇒ Campo 11: opção do fabricante, que pode ser formado por 3 algarismos, separado do restante por hífen.

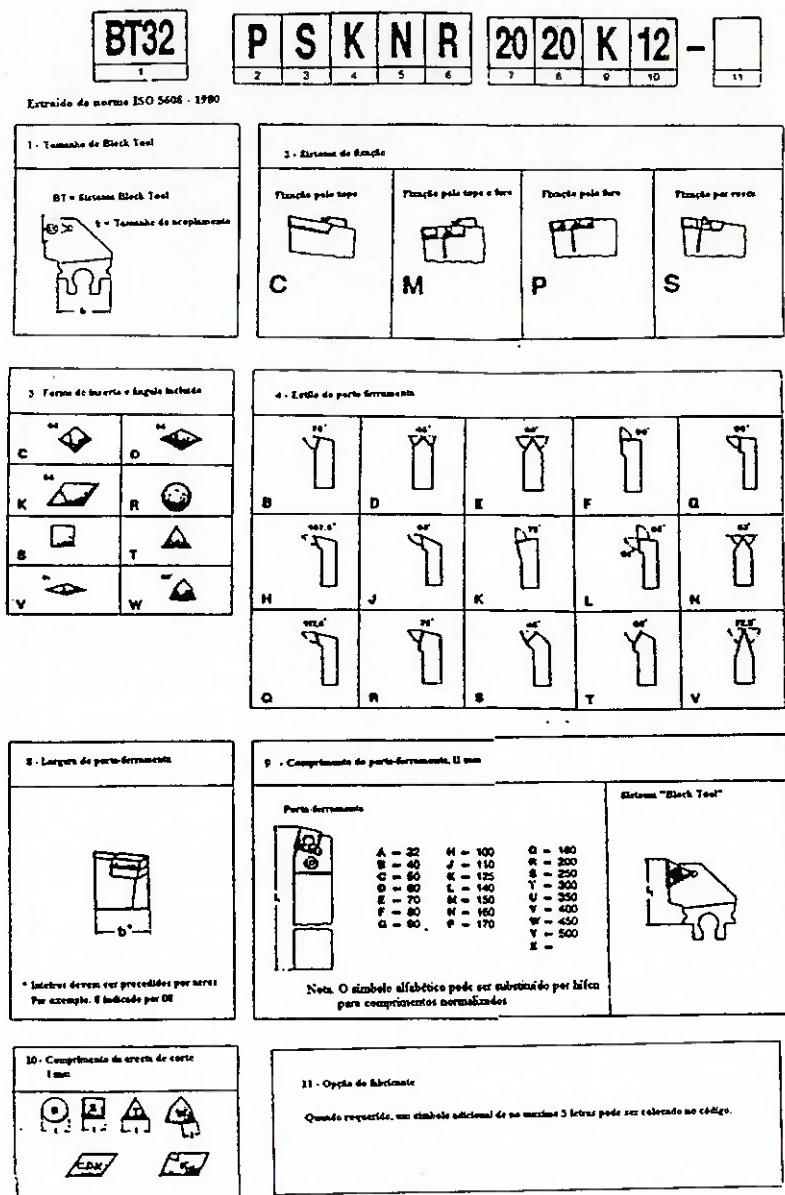


FIG 16- Estrutura da norma ISO para porta-ferramentas [5]

#### IV) PROCESSO DE SELEÇÃO

A metodologia a ser seguida, foi desenvolvida pela SANDVIK-COROMANT, unica das empresas mais tradicionais que em seus catálogos deixa um procedimento claro de seleção de ferramentas.

##### A ) SELEÇÃO DE PORTA FERRAMENTAS

A escolha dos porta-ferramentas para torneamento externo basea-se na seleção do sistema de fixação do inserto. A tabela abaixo mostra os diferente tipo de fixação e suas adequabilidade quando são usados critérios tais como fluxo de cavaco, tipo de operação, etc. Tam'bem deve-se considerar os deslocamentos de avanço que são possíveis de executar e oas ângulos máximos permissíveis em operações que exigem operções de mergulho.

Operações e outros fatores	Fixação por furo	Tipo de inserto
Externo desbaste acabamento	5 4	▲○
Interno desbaste acabamento	5 4	○○
Fluxo de cavaco	5	□○
Tempo de indexação	5	△○
Acessibilidade	2	◇○

tabela 2 - Adequabilidade dos sistemas de fixação em relação á operação [5]

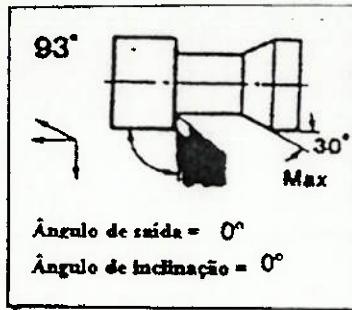
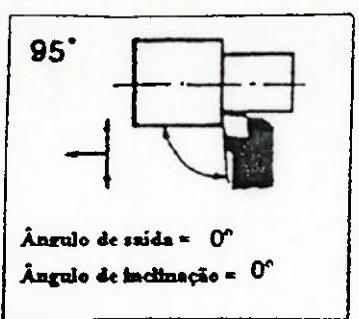


fig 17 e 18- Exemplos de deslocamentos possíveis num porta-ferramentas e Exemplo de porta-ferramenta com restrição para deslocamento em mergulho [5]

## B ) SELEÇÃO DO INSERTO

A seleção do inserto pode ser dividida em 4 etapas:

- Determinação do quebra-cavaco;
- Escolha do tamanho da aresta de corte;
- Determinação do raio de ponta do inserto;
- Determinação da classe do inserto

A determinação do quebra-cavaco pode ser feita através da tabela abaixo.

Para tanto é necessário imputar a característica do material, a área de trabalho (conforme tabela subsequente) e o tipo de porta-ferramentas. Como output teremos o grau de adequabilidade de cada geometria.

A escolha do tamanho da aresta segue o seguinte procedimento:

1. determinação da maior profundidade de corte admissível (  $p_{\max}$  )
2. determinação do comprimento efetivo da aresta de corte através da fórmula a seguir, levando em consideração o ângulo de posicionamento do porta-ferramentas e o ângulo do perfil quando se trata de operações de mergulho:

$$L_i = \frac{p_{\max}}{\sin(K_t \pm \beta)}$$

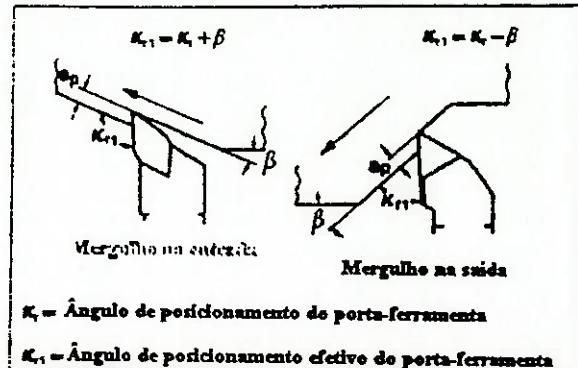
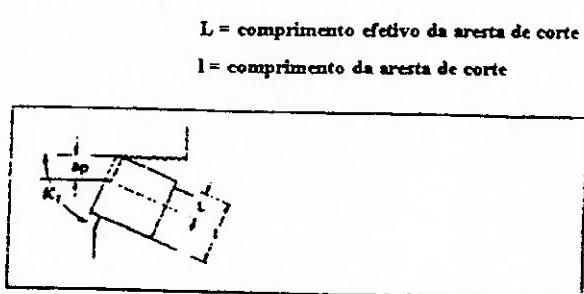


fig 19- Cálculo do comprimento efetivo da aresta de corte [5]

3. cálculo do comprimento total do inserto, através da tabela a seguir onde é recomendado os máximos comprimentos efetivos de corte para os vários tipos de insertos.

A definição do raio de ponta do inserto ( $r_e$ ). Segundo o fabricante, a determinação do raio de ponta está ligada ao avanço de corte (a) e portanto, se a operação é de desbaste ou acabamento.

A definição do raio de ponta do inserto ( $r_e$ ). Segundo o fabricante, a determinação do raio de ponta está ligada ao avanço de corte (a) e portanto, se a operação é de desbaste ou acabamento.

1. Para as operações de desbaste temos a seguinte formulação:

$$a = \frac{1}{2} r_e$$

É importante que o valor do raio de ponta seja o maior possível pois dessa forma teremos uma aresta de corte mais robusta. Esse raciocínio somente não é válido quando há tendência de vibração, onde o raio de ponta deve ser o menor possível.

2. Para as operações de acabamento, temos a seguinte formulação:

$$R_t = \frac{a^2}{8 \cdot r_e} \cdot 1000 (\mu m)$$

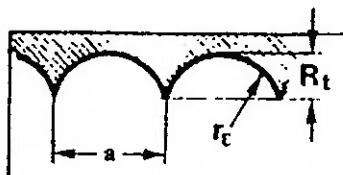


fig 20 - Relação entre avanço a e a rugosidade  $R_t$  [5]

$R_t$ $\mu m$	$R_{a\alpha} = CLA = AA$ $\mu m$	$R_{MS}$ $\mu m$	$\mu ln$	Grau de rugosidade	Símbolo triângulo
1,8	0,20	11,8	0,22	13,1	
1,8	0,20	13,8	0,26	15,3	
2,0	0,40	15,7	0,44	17,4	HB
2,2	0,44	17,5	0,46	19,4	
2,4	0,49	19,2	0,54	21,3	
2,6	0,53	20,9	0,58	23,1	
2,8	0,58	22,7	0,64	25,2	
3,0	0,63	24,6	0,70	27,3	
3,5	0,71	27,8	0,78	30,9	
4,0	0,80	31,4	0,89	34,8	HB
4,5	0,80	35,2	1,0	38,1	
5,0	0,99	38,8	1,1	43,1	
6,0	1,2	47,3	1,3	52,4	
7,0	1,4	56,1	1,5	61,2	
8,0	1,6	65,0	1,8	70,0	HT
9,0	1,8	71	2,0	78,8	
10,0	2,0	79	2,2	87,7	
14,0	2,2	128	3,10	140	HB
20,0	4,4	173	4,9	182	
25,0	5,8	224	6,4	204	
27,0	6,3	247	7,0	224	HB
30,0	7,4	282	8,2	254	
35,0	8,8	346	9,8	304	
40,0	10,7	422	11,9	404	
45,0	12,5	495	13,9	526	HT
50,0	-	562	15,5	613	

tabela 3 - Tabela de conversão de  $R_t$  para  $R_a$

Por fim a determinação da classe do inserto a ser utilizada pode ser obtida através da tabela abaixo de daods tecnológicos, onde para cada material com dureza específica, estão associados limites máximos e mínimos permissíveis para o avanço e a velocidade de corte, dentor de uma classe. Dessa forma através do avanço do item anterior pode-se determinar os valores cida velocidade de corte e da classe.

Tipo de inserto	Área de trabalho	Descrição do material					Material de cavaco longo					Material de cavaco curto				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
TMAXP																
-QF		5	4	3	-	-	-	2	1	-	-					
-FL		3	2	2	-	-	-	-	-	-	-					
-MF		3	5	3	-	-	-	2	1	-	-					
-QM		-	2	5	3	-	-	2	2	-	-					
-MR		-	1	4	4	-	-	4	5	5	4					
-QR		-	1	4	5	5	-	1	1	2	2					
-23		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
-31		-	-	1	4	5	-	1	1	1	1					
-41		-	-		3	3	-	1	1	1	1					

tabela 4 - tabela Recomendações para geometria de insertos segundo fabricante [5]

	Acabamento fino	Acabamento	Desbaste leve	Desbaste	Desbaste pesado
$a_{\min}$ (mm/rev)	0.05	0.1	0.2	0.4	> 1.0
$a_{\max}$ (mm/rev)	0.15	0.3	0.5	1.0	
$p_{\min}$ (mm)	0.25	0.5	2.0	4.0	6.0
$p_{\max}$ (mm)	2.0	2.0	4.0	10.0	20.0

tabela 5 - Área de trabalho [5]

tabela 6 -Constantes para determinação do comprimento total do inserto [5]

ISO	MATERIAL	DUREZA	CLASSES BÁSICAS								
			CT515			CT 525			GC215		
a (mm/rev)											
			0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.3	0.2	0.4	0.6
Vc (m/min)											
P	Aço carbono C = 0.15%	125	640	530	430	490	410	290			
	Aço carbono C = 0.35%	150	580	490	390	450	380	260			
	Aço carbono C = 0.60%	200	510	420	340	390	330	230			
	Aço liga revenido	180	445	370	300	315	265	180			
M	Aço inoxídável revenido	180							215	175	150

tabela 7- Tabela de dados tecnológicos [8]

## CAPÍTULO IV

### FLUXOGRAMA GERAL DO PROJETO.

#### I) FUNÇÕES DO PROGRAMA

- Selecionar porta-ferramentas e insertos de metal duro para operações de torneamento externo;
- determinar os parâmetros ótimos de usinagem (velocidade, avanço, profundidade de corte) para operações de torneamento de uma peça, utilizando critérios de mínimo custo ou máxima produção tendo como restrições limites de acabamento superficial, potência, força de corte e variações dos próprios parâmetros;
- calcular custos e tempos de fabricação para operações de torneamento externo;
- cadastrar e manipular informações contidas nos bancos de dados de usuário ou seja, insertos, porta-ferramentas, máquinas, operadores e tempos de fabricação.

## II ) FLUXOGRAMA

Os fluxogramas abaixo estão estruturados da seguinte forma :

1. Fluxograma principal : onde será mostrado o fluxo geral de dados pelos módulos existentes;
2. Fluxograma dos módulos : onde teremos todos os fluxogramas relativos aos módulos existentes. Vale lembrar que , numa implementação futura de um CAPP baseado do nosso sistema, deve-se aproveitar todos os parâmetros descritos no fluxograma para a confecção das telas, uma vez que o fluxo de dados já fora definido.

## III) ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O SOFTWARE

Quanto à linguagem a ser utilizada , sugerimos o uso de linguagens que sejam orientados por objetos, ou seja, linguagens em que os diversos eventos sejam guiados pelas ações do operador na forma de acionar botões-objetos, responder às questões, e que aceite a forma de programação estruturada, além de também ser aberta ,ou seja, permitir a inclusão de outras funções. Temos como exemplos ,algumas das linguagens que atendem à tais requisitos , as linguagens Visual Basic , Visual C++ e o Delphi , todos eles linguagens orientados por objetos e bastante amigáveis de serem programadas.

Quanto à estrutura de arquivos , sugerimos que sejam dimensionados de forma a armazenarem todas as informações necessárias aos diversos módulos. Uma forma que poderia ser seguida é a criação de 13 arquivos :

- insertos;
- porta-ferramentas;
- máquinas e torretas de fixação de ferramentas;
- operadores;
- tempos de fabricação;
- planos de processos;
- conversão de rugosidade;
- dados tecnológicos ;
- escolha de tipos de porta-ferramenta e sistemas de fixação;
- determinação da area de trabalho;
- correção da velocidade de corte devido a dureza do material;
- correção da velocidade de corte devido a vida da ferramenta;
- escolha de tipo de quebra-cavaco.

Observe que os 6 primeiros são passíveis de manipulação pelo próprio sistema e os demais são auxiliares e deverão ser alterados através de um gerenciador de bancos de dados.

Quanto à base de dados ,uma boa solução seria a utilização de um banco de dados relacional, em que os vários arquivos sejam independentes mas “linkados “ com alguma condição. Desta forma , evita-se a utilização de matrizes

ou vetores que acabam por ocupar um gigantesco espaço no disco "winchester", além de também evitar desagradáveis demoras nos módulos de cálculo e pesquisa dos dados já que o tamanho do banco de dados estará substancialmente reduzido.

Quanto a estrutura de dados , para os campos de cada arquivo , sugerimos um tipo de campo e o seu respectivo tamanho, de forma que atendam a maioria das necessidades dos problemas . Se houver casos excepcionais em que os campos não comportem , poderá o operador acessar diretamente o banco de dados via arquivos e fazer o registro. Acreditamos que a base de dados em anexo deverá atender à maioria dos casos ou uma margem de 99% dos casos.

A seguir , os fluxogramas que comporão o nosso sistema:

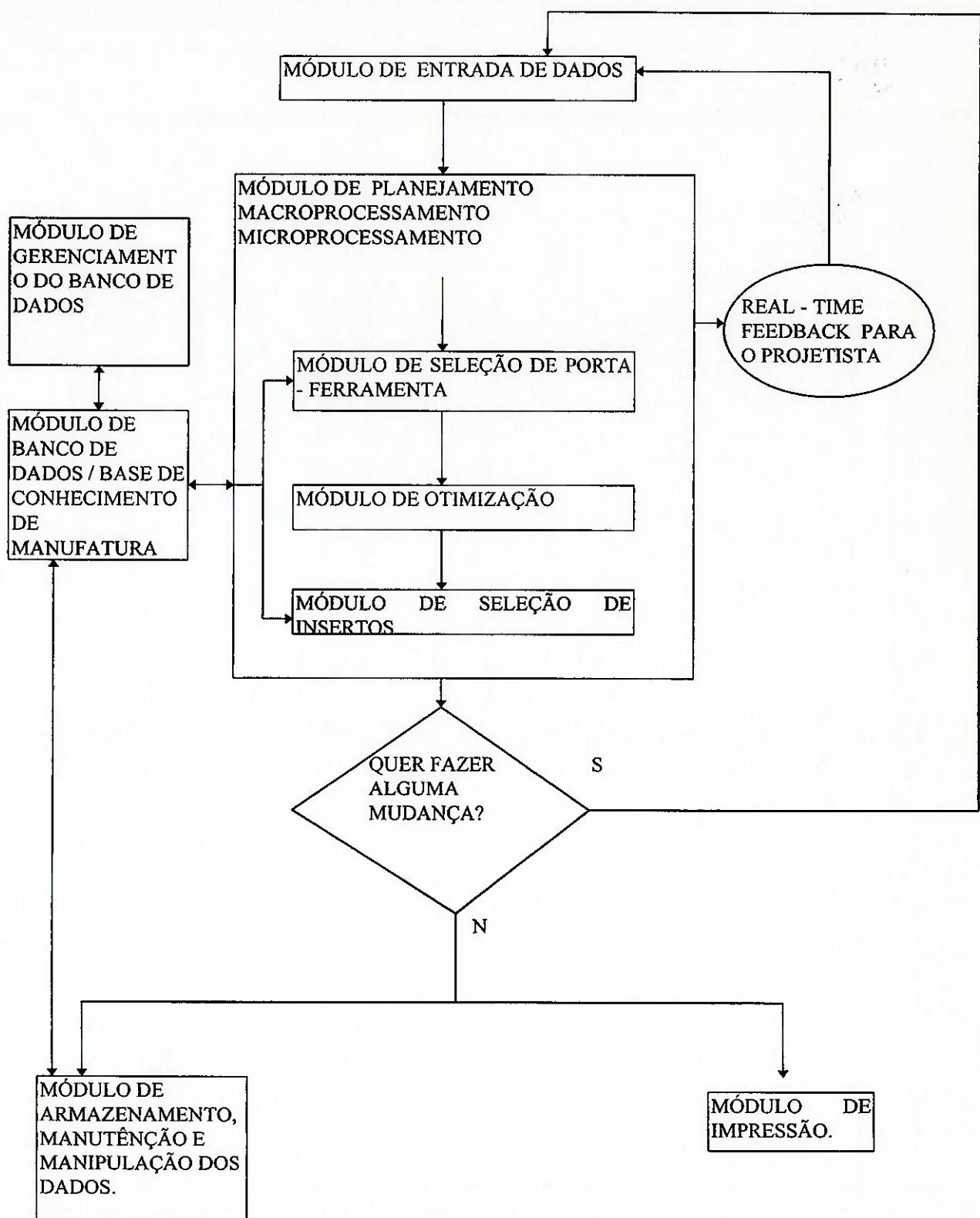


fig 21 -Fluxograma geral do projeto [autores]

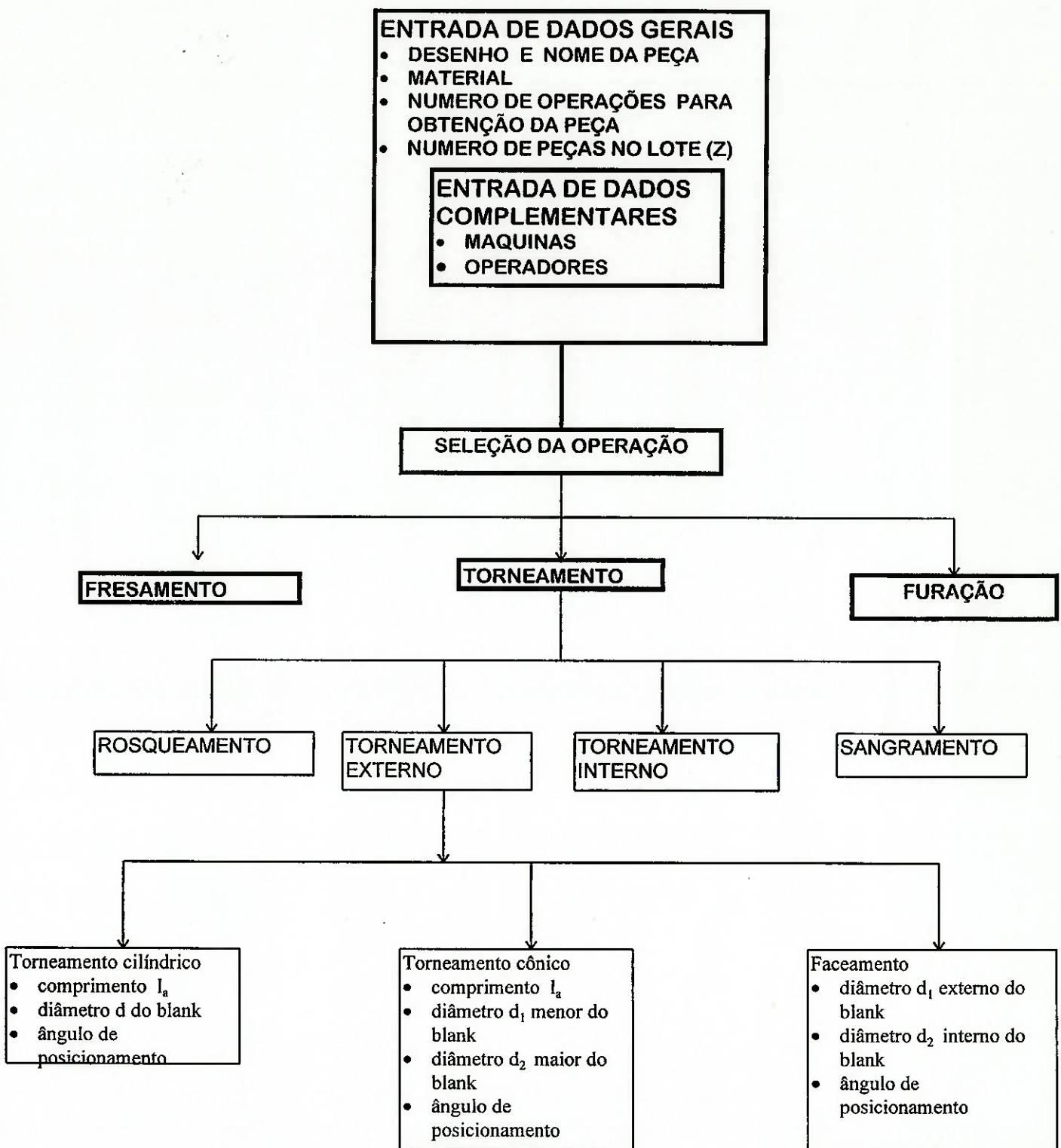


fig 21 - Fluxograma do módulo de entrada de dados [ autores ]

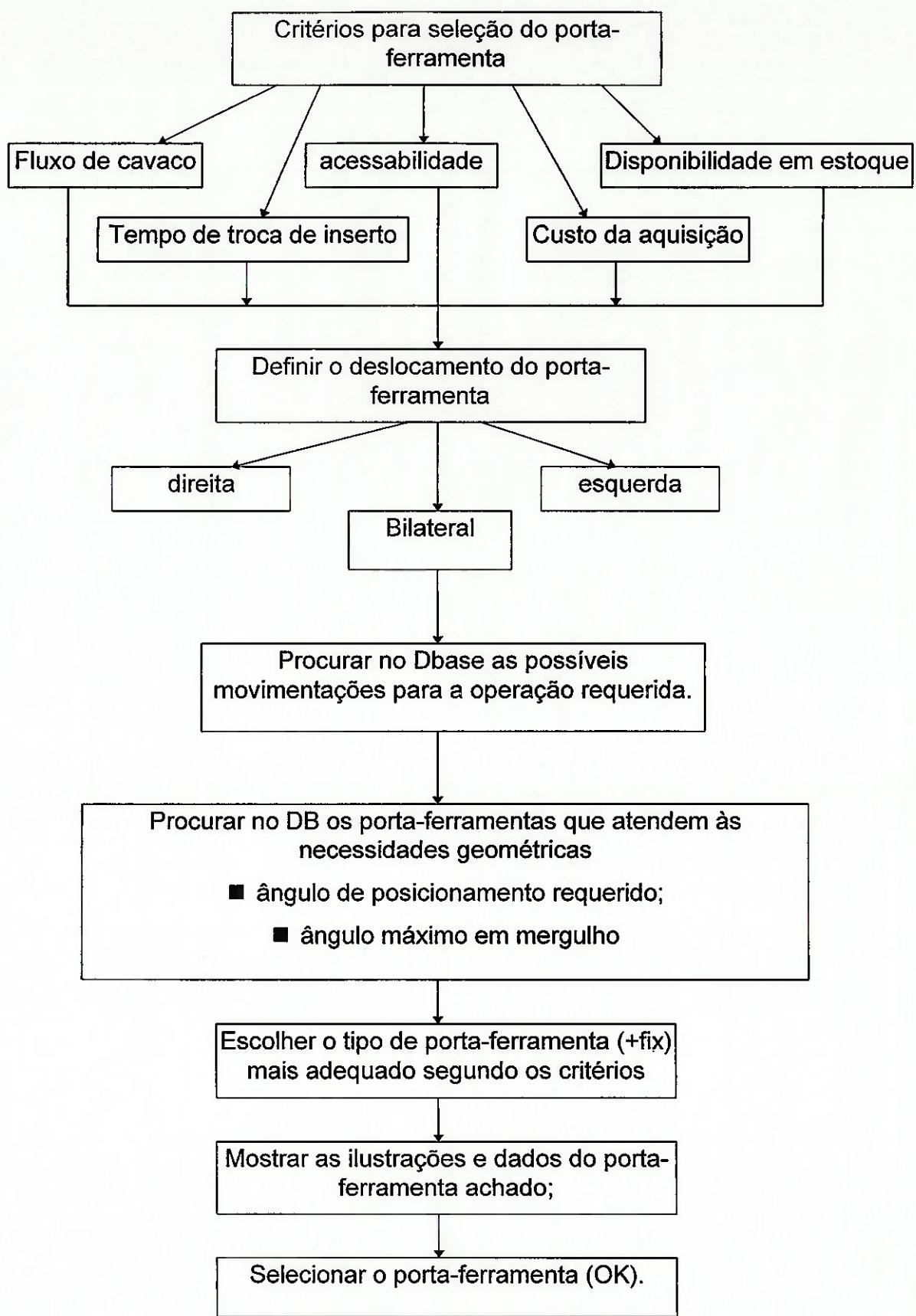


fig 23 - Fluxograma do módulo de seleção de porta-ferramentas [ autores ]

## Módulo de otimização dos parâmetros de corte:

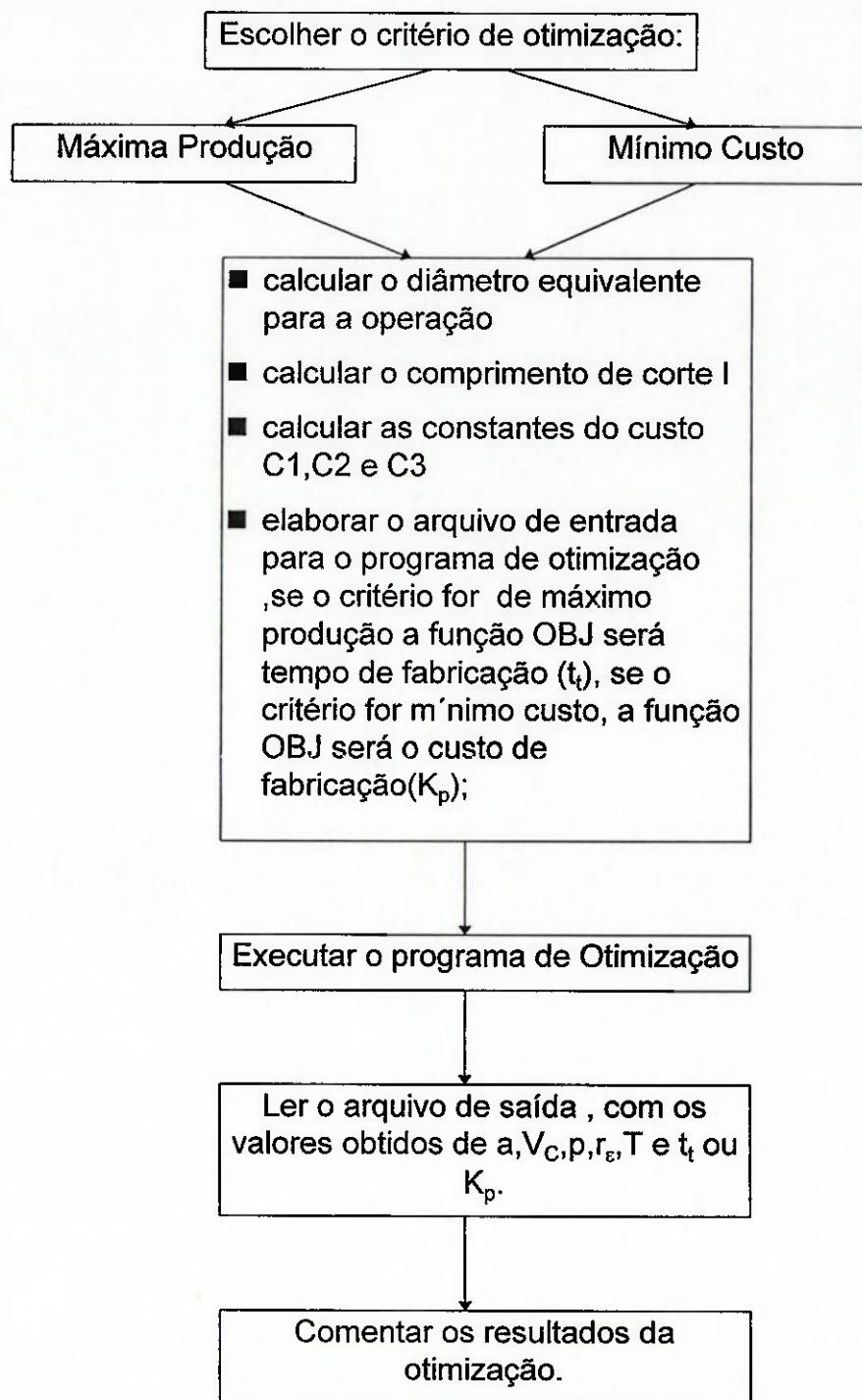


fig 24 - Fluxograma do módulo de otimização de parâmetros de corte [autores ]

## Módulo de seleção de inserto :

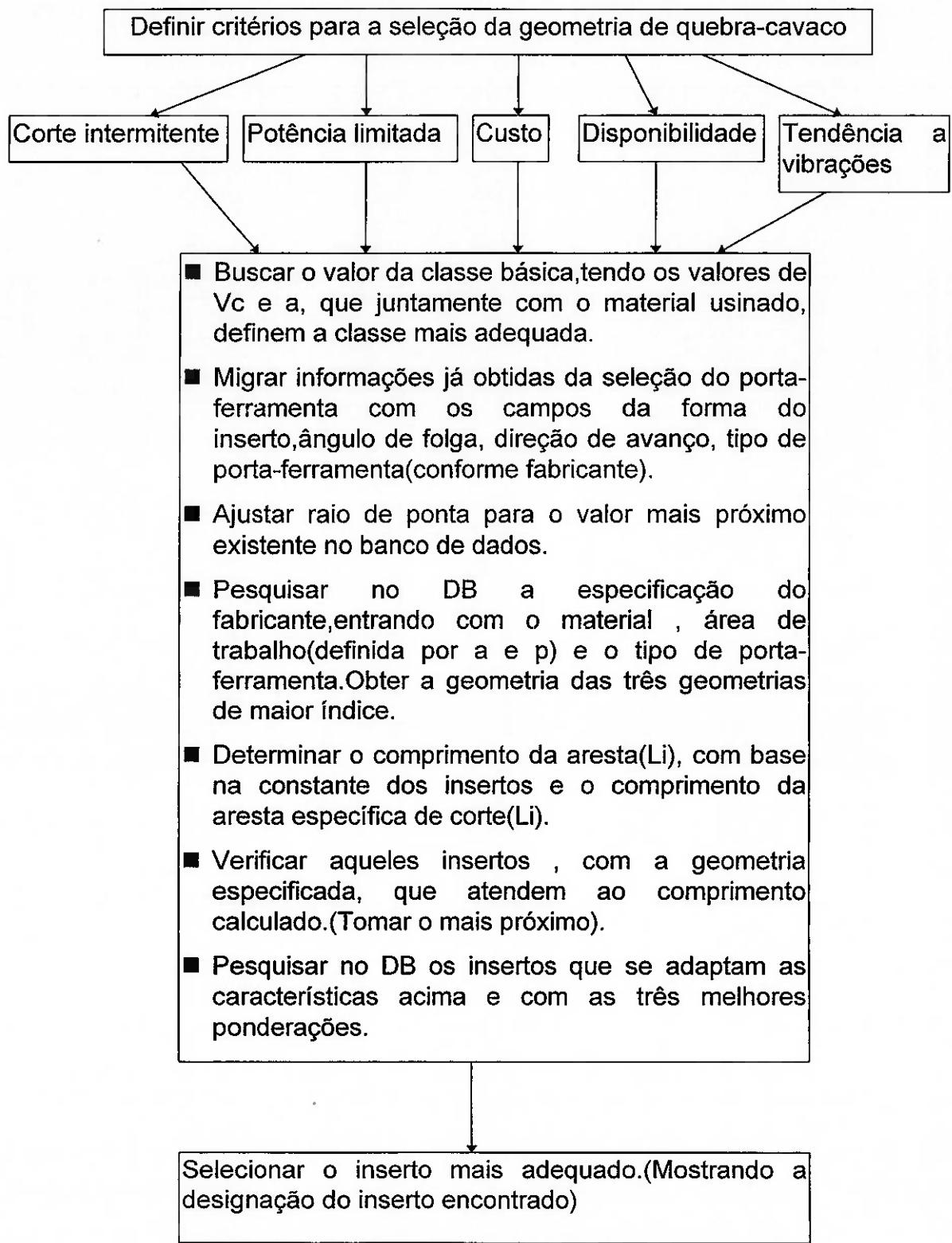


fig 25 - Fluxograma do módulo de seleção de insertos [ autores ]

## Módulo de armazenamento,manutenção e manipulação de planos de processo.

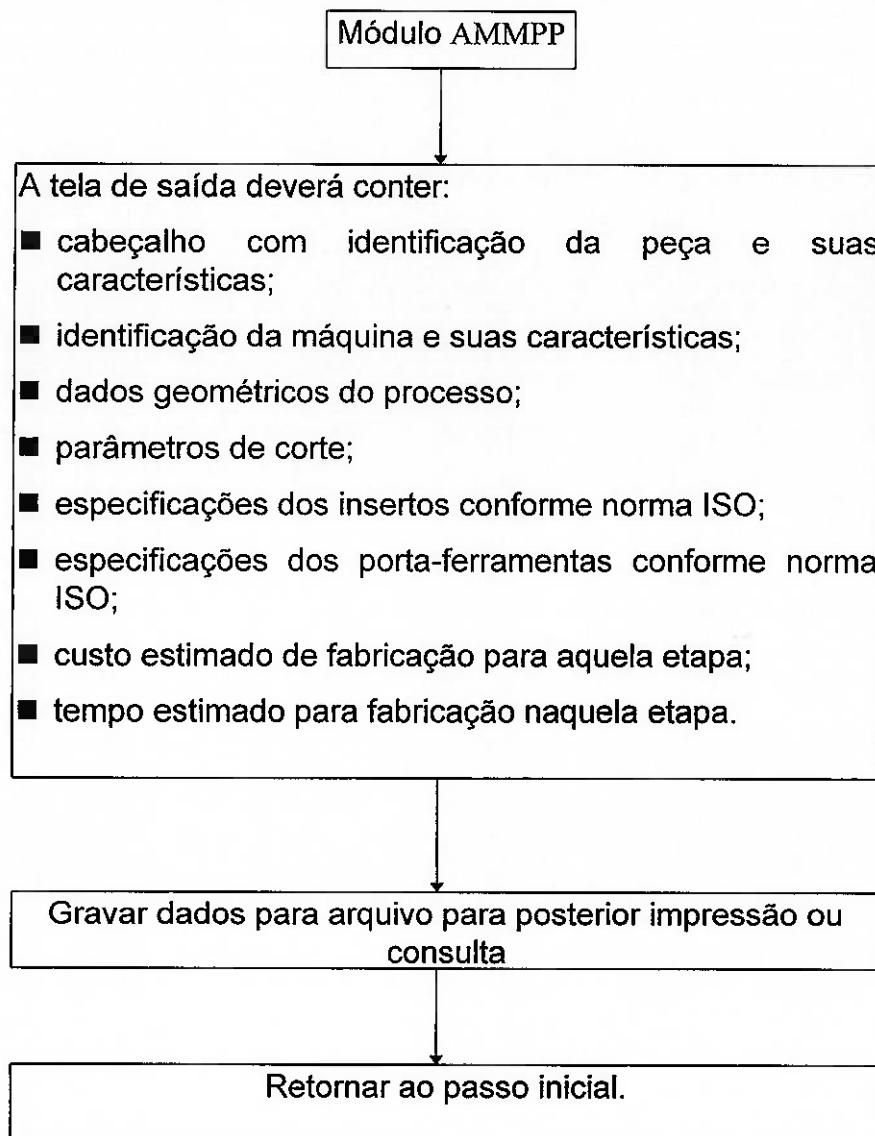
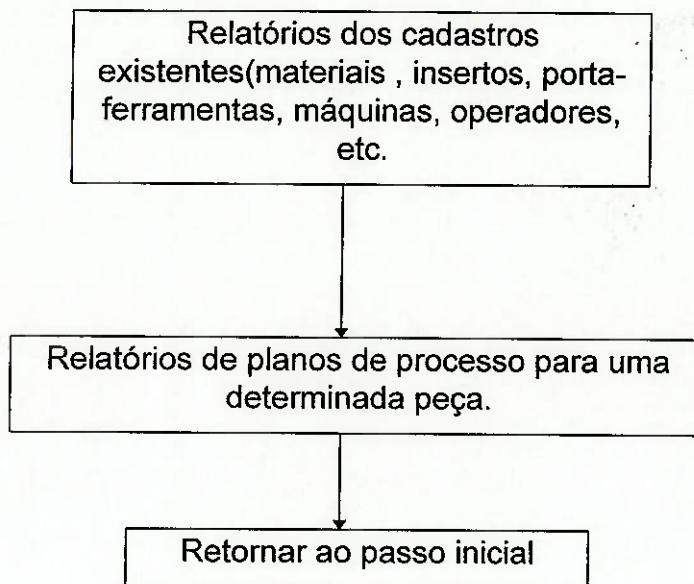


fig 26 - Fluxograma do módulo de armazenamento,manipulação e manutenção dos planos de processo [autores]

## **Módulo de impressão**



## **Módulo de gerenciamento de Banco de Dados:**

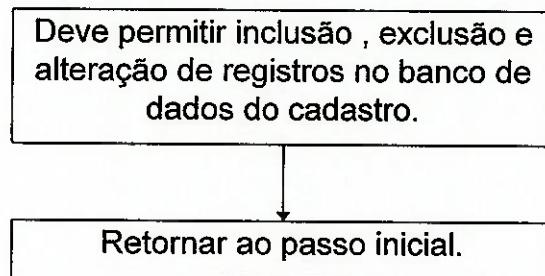


fig 27 - Fluxograma do módulo de impressão e gerenciamento de Banco de Dados [ autores ]

## CAPÍTULO V

### CONSIDERAÇÕES SOBRE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO.

#### I) INTRODUÇÃO

Otimização é um processo multifásico que requer constantes decisões por parte do grupo de projetistas. Praticamente todo problema de engenharia , já em um estágio avançado de projeto, recai num processo iterativo de obtenção de um conjunto de condições necessárias para atingir o melhor resultado dentro de uma determinada situação.

A crescente disponibilização de recursos de informática , tanto em termos de hardware como de software , tem estimulado a aplicação de métodos de programação matemática , as quais constituem-se um importante ferramental para otimizações. Se antigamente só podíamos fazer as decisões baseadas em conhecimentos teóricos e experiências práticas, agora podemos expressar todo o conhecimento em termos de funções matemáticas complexas , e utilizar os recursos de informática para realizar cálculos “pesados” e obter as possíveis soluções ótimas, otimizando totalmente os projetos.

Uma das áreas em que a otimização vem atingindo grande penetração corresponde aos processos de fabricação e especialmente os processos de usinagem. Para estes processos, a estruturação baseia-se na determinação de parâmetros ótimos de condições de corte(avanço, rotações e profundidades de corte) que minimizem o tempo total de produção por componente, que

consequentemente abaixa o custo total de produção e também ,em outra abordagem , maximiza a produção.

Mas estas funções custo e tempo ( denominadas de objetivos) , são não-lineares nos parâmetros de corte e são sujeitas a uma série de restrições de ordem prática tais com forças e potências máximas, acabamentos superficiais, limites de variação dos próprios parâmetros , etc. É desta forma que o estudo de métodos de programação não linear com restrições auxiliará na obtenção das soluções ótimas.

Para este estudo, temos referências de duas filosofias diferentes que, dependendo da situação uma poderá ser mais vantajosa que a outra. Intuitivamente , quando queremos achar máximos ou mínimos de uma função , nós procuramos calcular as derivadas desta função. E é exatamente em torno disto que as filosofias se diferem pois a filosofia “MÉTODOS DE GRADIENTE “ calculam estas derivadas enquanto que a filosofia “MÉTODOS DE BUSCA DIRETA “ não calculam estas derivadas, em vez disso, ela faz avaliações sucessivas da função objetivo.

Pode-se dividir os métodos da seguinte forma:

• MÉTODOS DE GRADIENTE:

- Métodos de Gradiente Generalizado Reduzido (GRG);
- Técnica Sequencial Não-Restrita (SUMT);

• MÉTODOS DE BUSCA DIRETA:

- Método da Tolerância Flexível.

A seguir mostraremos uma descrição básica dos métodos de programação não linear e também os fluxogramas de funcionamento. Porém, destacamos que a parte de rigor formal matemático não será descrita já que está fora do escopo deste trabalho (que é apenas qualitativo), além de ser muito complexo e estar além da nossa formação acadêmica.

## II) Métodos de Gradiente

### A ) Método do Gradiente Generalizado Reduzido

O Método do Gradiente Reduzido foi originalmente desenvolvido por WOLFE(1962) para uma função objetivo não linear com restrições lineares. A generalização do método para acomodar não linearidades foi obtido primeiramente com ABADIE.

Um problema não linear com restrições pode ser estabelecida da seguinte forma:

minimizar :  $f(x)$ ; onde  $x = [x_1, \dots, x_n]$ ,  $x \in R^n$

$$h_m(x) = 0, m=1, 2, \dots, M$$

sujeito à :

$$A \leq x \leq B$$

onde os vetores A e B representam os limites superior e inferior das variáveis de projeto. As restrições de desigualdade foram incluídas como restrições de igualdade, e também as variáveis originais foram divididas em variáveis de estado e variáveis de decisão e utilizando-se técnicas de eliminação , conseguimos constituir uma nova função objetivo sem restrições nas variáveis de decisão , sendo as demais as variáveis de estado.Poderemos procurar o mínimo desta nova função ajustando as variáveis de estado para manter a viabilidade ( que é o domínio viável ou exequível da função ). Desta forma nós reduzimos o gradiente e conseguimos uma aproximação linear para algo que era não linear , chegando na expressão:

$$\frac{df}{dz} = \nabla f(z^q) - \nabla f(y^m) \frac{Q^{-1}}{Q} \frac{Q}{Q}$$

que representa a aproximação linear para o gradiente reduzido.Este pode ser definido como a taxa de variação da função objetivo em relação as variáveis de decisão , com as variáveis de estado ajustadas para manter a exequibilidade da busca.A seguir temos um fluxograma simplificado do método GRG :

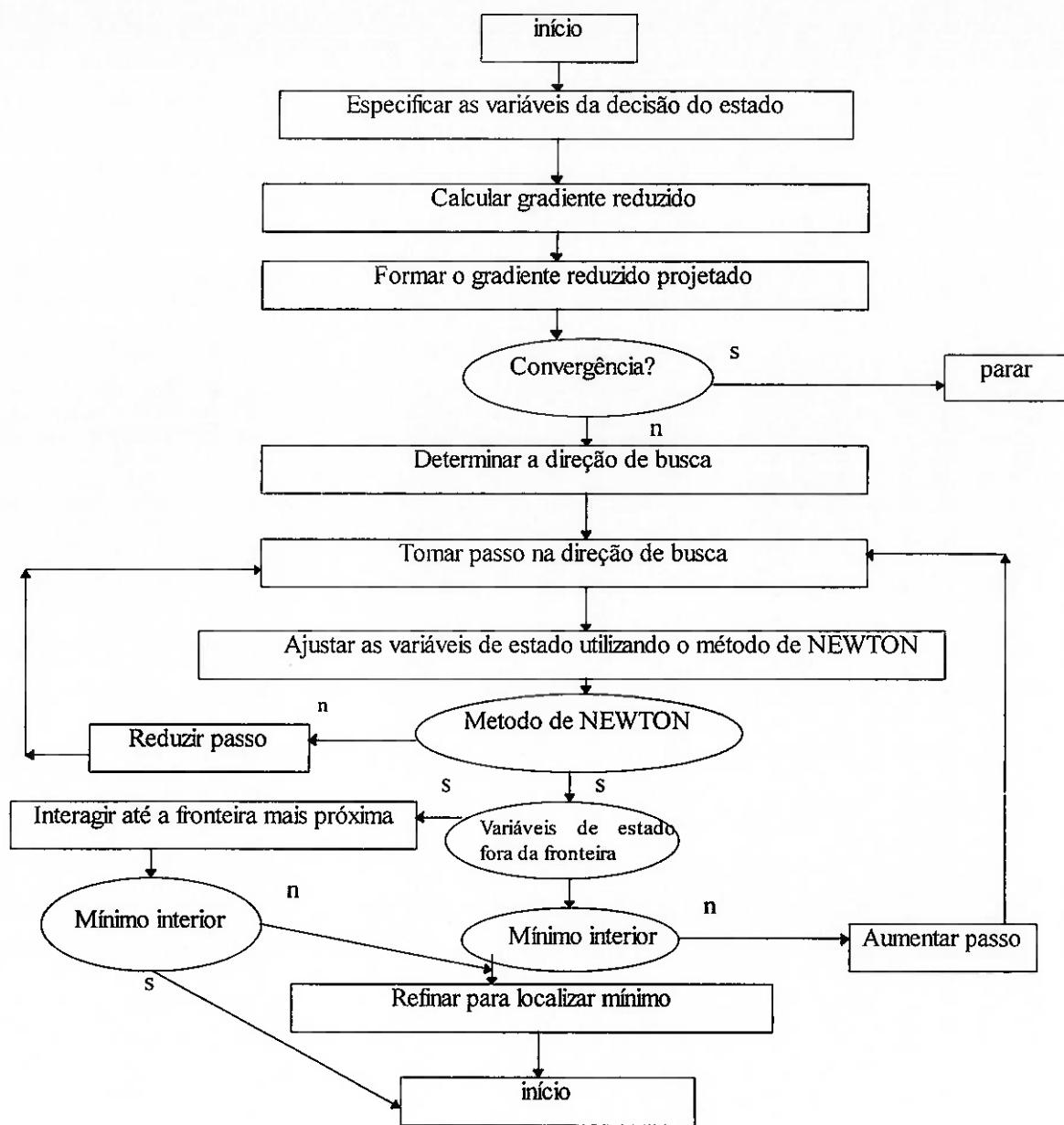


fig 28- Fluxograma simplificado do GRG [8]

## B ) Técnica de minimização Sequencial Não Restrita(SUMT)

O algoritmo de programação não linear SUMT ( Sequential Unconstrained Minimization Technique) desenvolvida no Research Analysis CORP., resolve problemas de programação não linear como aquelas expressas no item anterior , onde as restrições de igualdade devem ser lineares se a convergência quiser ser garantida. A idéia é resolver repetitivamente uma sequência de problemas não restritos cujas soluções no limite se aproximam do mínimo da função original. Para tanto, o SUMT utiliza uma função  $P(x)$  , dita função penalizadora, como segue:

$$\frac{df}{dz} = \nabla f(z^q) - \nabla f(y^m) \frac{\delta h^{-1}}{\delta y} \frac{\delta h}{\delta z}$$

A minimização desta função é iniciada em um ponto interior ( ou de fronteira) ,  $x^{(0)}$ ; na sequência  $r^{(0)}$  é computado e  $x^{(1)}$  é determinado pela minimização de  $P(x,r^{(0)})$ . Calcula-se novamente  $r^{(1)}$  e continua -se a iteração.A seguir é mostrado o fluxograma do algoritmo SUMT:

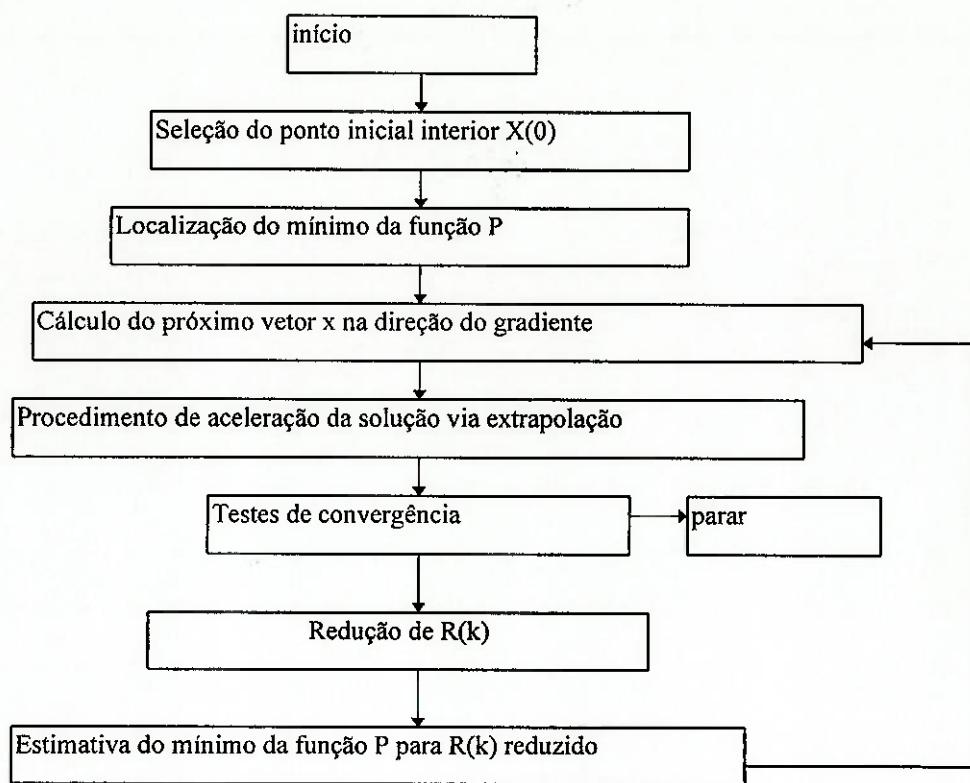


fig 29 - Fluxograma simplificado do SUMT [8]

### III ) Métodos de Busca Direta

#### A) Método da Tolerância Flexível

Nos métodos de programação não linear já vistos , uma parte considerável do tempo de processamento é gasta para satisfazer os requisitos rigorosos de viabilidade durante a busca. O algoritmo da tolerância Flexível , por outro lado, melhora o valor da função objetivo, utilizando informações de pontos viáveis ou quase viáveis.Como resultado desta estratégia , o problema da equação da caracterização não linear pode ser substituída por um problema mais simples, porém tendo a mesma solução:

minimizar :  $f(x)$ ; onde  $x=[x_1, \dots, x_n]$ ,  $x \in R^n$

sujeita a :  $\phi^{(k)} - T(x) \geq 0$

onde  $\phi^{(k)}$  é o valor do critério da tolerância flexível para exequibilidade no K-ésimo estágio da pesquisa e  $T(x)$  é uma função positiva de todas as restrições existentes no problema original.

O algoritmo utiliza a técnica de pesquisa direta chamada poliedro flexível desenvolvido por Nelder e Mead.Este método minimiza uma função de n variáveis independentes usando ( n+1 ) vértices de um poliedro flexível. O vértice (ponto) que conduza ao maior valor de  $f(x)$  é projetado através do centro da

gravidade dos vértices restantes , achando-se valores melhorados de  $f(x)$ . Esta substituição sucessiva de pontos continua até a obtenção do mínimo. A figura abaixo mostra uma representação esquemática da busca da obtenção do mínimo, para duas variáveis independentes :

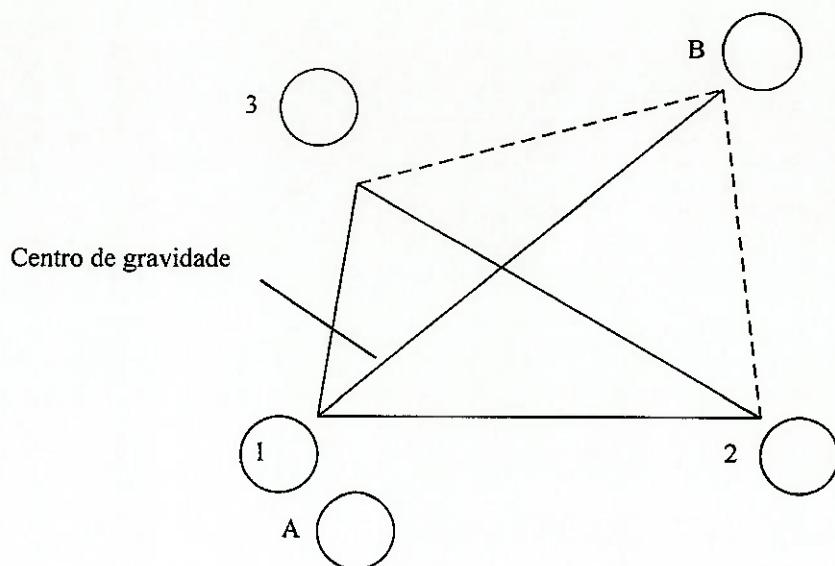


fig 30 - Representação esquemática do poliedro flexível [8]

#### IV) Comparação entre os métodos para minimização

Qual método será melhor para solução de um problema de programação não linear? Na realidade , esta resposta depende do tipo de ponderação . Estipulamos alguns critérios de avaliação em ordem de importância:

- Precisão na obtenção do vetor ótimo  $x^*$ ;
- Tempo de processamento necessário para a convergência ;
- Custo ;

- Disponibilidade;
- Tempo de preparo de dados;
- Simplicidade no uso.

Desta forma , vamos fazer algumas análises , tanto qualitativas quanto quantitativas para podermos fazer uma classificação.

#### A) Análise Qualitativa:

Método	GRG	SUMT	Tol. Flex.
Função Objetivo	Linear e Não linear	Linear e Não linear	Linear e Não linear
acomoda restrições de =	Linear e Não linear	Linear	Linear e Não linear
acomoda restrições de $\neq$	Linear e Não linear	Linear e Não linear	Linear e Não linear
ponto de início	viável	viável ou não	viável ou não
resolve problemas não convexos	sim	sim	sim
velocidade de convergência	média	rápida	lenta
soluções intermediárias	viável	interior	viável ou não

Observe que os três métodos podem ser aplicados na obtenção dos mínimos para as condições de máxima produção ou mínimo custo.

### **B) Análise Quantitativa**

Dados comprovam que os métodos de busca direta (MBD) tendem a ser os mais lentos, sendo os métodos de gradiente com passos largos (MGPL) e de segunda derivada (MSD) os mais rápidos.

Eskicioglu, ao comparar os três métodos para uma operação de fresamento frontal cuja função objetivo é semelhante àquelas obtidas no torneamento, obteve os resultados da tabela a seguir:

Programas	Mínimo	Custo	Máxima	Produção
	tempo de execução(s)	tamanho de arquivo de saída(Bytes)	tempo de execução(s)	tamanho de arquivo de saída(Bytes)
GRG2	3,7	14918	4,2	17972
SUMT	94,6	20071	116,5	18581
FLEXIPLEX	34,7	5040	45,7	6788

Como se pode observar , Eskicioglu acha que o GRG2 é definitivamente superior aos dois outros métodos do ponto de vista de tempo de processamento. Mostrou-se também mais eficiente e robusto uma vez que convergiu para a solução ótima para todos os pontos iniciais tentados. Citou também que para alguns pontos de início , tanto o SUMT como FLEXIPLEX falharam na convergência e terminaram em um ponto distinto da solução ótima.

Os programas de computador utilizados para aplicação do SUMT e do Método da Tolerância Flexível foram publicados na literatura (Kuester e Mize,1973,Himmelblau,1972). Para aplicação do Método do Gradiente Reduzido foi empregado o GRG2(Ladson e Waren,1989). Todos os programas foram escritos em FORTRAN e executados num IBM-PC 286 com co-processador matemático.

## **CONCLUSÕES E OBSERVAÇÕES**

Em primeiro lugar, deve-se esclarecer que esse trabalho tem um caráter basicamente de pesquisa e de familiarização com essa nova tecnologia. Contudo, isso não significa de forma alguma que tal software é somente um estudo de caso meramente acadêmico. Na realidade, como foi visto no capítulo de introdução, existem diversos CAPP's disponíveis no mercado. Em adição, a teoria desenvolvida nesse trabalho é possível de ser implementada.

Outro ponto a ser esclarecido é que dado a complexidade do tema, decidiu-se focar esse trabalho em uma modalidade de usinagem. Ainda assim, em termos de pesquisa, a complexidade da teoria foi grande.

### **Sugestões**

- Desenvolvimento e implementação efetivos desse software
- Desenvolvimento de interfaces com os sistemas CAD e CAM, além de um programa de gerenciamento de estoques;
- Estender a programa para as demais operações de usinagem
- Desenvolvimento dos demais tipos de CAPP's
- Comparação qualitativa entre os vários tipos de CAPP's

## Bibliografia

1. BROWNW,J. , TIERNEY,K. e WALSH,M., A two-stage assembly process planning tool for robot-based flexible assembly systems. *International Journal of Production Research*,1991, vol 29, No 2, pg 247-266.
2. O'GRADY,P. ,RAMERS,D. e BOWEN,J. , Artificial Intelligence constraint nets applied to design for economic manufacture and assembly. *Computer-Integrated Manufacturing Systems*, 1, pg 204-210.
3. PARK, J.Y., KHOSHNEVIS,B. , A real-Time Computer-Aided Process Planning System as a Support Tool for Economic Product Design. *Journal of Manufacturing Systems*, 1993, vol 13 , No 2, pg 181-193.
4. FOGG,B. ,VAN EK,G. , Design for Economic Manufacture of Sma;; Sheet Metal Parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,1991, vol 6, No2, pg 112-130.
5. Catálogo de ferramentas e insertos para torneamento, SANDVIK Coromant,
6. FERRARESI,D., "Fundamentos da usinagem dos metais"- São Paulo, Edgar Blucher,1977.
7. STIPKOVIC,M., "Usinagem ", - MAUÁ-EPUSP-FEFAAP,1990.
8. ALMEIDA, S. L. RABELO DE ,"Desenvolvimento de software para seleção de ferramentas e otimização de parâmetros de corte em operações de torneamento externo , - EPUSP,1995.

## Índice de Figuras , Tabelas e Gráficos:

A. Figuras:	pag
1. Fases de um ciclo de vida de um produto.....	05
2. Engenharia sequencial.....	05
3. Engenharia paralela.....	06
4. Estrutura de um CAPP.....	08
5. Fluxo de dados entre CAD e CAM.....	08
6. Arquitetura de um CAPP de IA.....	10
7. Arquitetura de um CAPP de TEMPO REAL.....	18
8. Curvas características de desbaste.....	25
9. Curvas típicas de vida de ferramenta.....	25
10. Representação de diversos ângulos de posição.....	29
11. Diâmetro equivalente para operações de torneamento de faceamento ...	33
12. Diâmetro equivalente para operações de torneamento cônicos.....	34
13. Exemplo de torneamento cilíndrico.....	38
14. Representação das classes de ferramentas normalizadas.....	43
15. Estrutura da norma ISO para pastilhas intercambiáveis.....	45
16. Estrutura da norma ISO para porta-ferramentas.....	47
17. Exemplos de deslocamentos possíveis num porta-ferramentas.....	49
18. Exemplo de porta-ferramenta com restrição para deslocamento em mergulho.....	49
19. Cálculo do comprimento efetivo da aresta de corte.....	50
20. Relação entre avanço $a$ e a rugosidade $R_t$ .....	51
21. Fluxograma geral do projeto.....	59
22. Fluxograma do módulo de entrada de dados.....	60
23. Fluxograma do módulo de seleção de porta-ferramentas.....	61
24. Fluxograma do módulo de otimização de parâmetros de corte.....	62
25. Fluxograma do módulo de seleção de insertos.....	63
26. Fluxograma do módulo de armazenamento, manipulação e manutenção dos planos de processo.....	64
27. Fluxograma do módulo de impressão e gerenciamento de Banco de Dados.....	65

28. Fluxograma simplificado do GRG.....	70
29. Fluxograma simplificado do método SUMT.....	72
30. Representação esquemática do poliedro flexível.....	73
<b>A. Tabelas</b>	
1. Matriz de solução.....	23
2. Adequabilidade dos sistemas de fixação em relação à operação.....	48
3. Tabela de conversão de $R_t$ para $R_a$ .....	52
4. Recomendações para geometria de insertos segundo fabricante.....	53
5. Área de trabalho.....	53
6. Constantes para determinação do comprimento total do inserto.....	53
7. Tabela de dados tecnológicos.....	54