

SÉRGIO LUIS RABELO DE ALMEIDA

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA SELEÇÃO DE
FERRAMENTAS E OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE CORTE
EM OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO EXTERNO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

São Paulo
1995

SÉRGIO LUIS RABELO DE ALMEIDA

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA SELEÇÃO DE
FERRAMENTAS E OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE CORTE
EM OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO EXTERNO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Marco Stipkovic Filho

São Paulo
1995

Almeida, Sérgio Luis Rabelo de

Desenvolvimento de software para seleção de ferramentas e otimização de parâmetros de corte em operações de torneamento externo. São Paulo, 1995

146p.

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1. Planejamento de Processo 2. Tecnologia de Usinagem - Torneamento I.
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica
II.t**

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010031

Aos meus pais, Hugo e Aires pelo grande incentivo e participação nos momentos decisivos.

À Márcia, pelo convívio, afeto e paciência

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho, pela objetividade, profissionalismo e contribuição técnica dispensada ao longo do trabalho.

Ao meu irmão Paulo pelo inestimável apoio na programação.

Aos Profs. Drs. Osmar Durand Pavani e Fernando A. C. Nery pelas sugestões e incentivos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram na concretização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de um software capaz de selecionar porta-ferramentas e insertos de metal duro para operações de torneamento externo, utilizando critérios de fabricantes de ferramentas como também determinar os parâmetros ótimos de usinagem (velocidade, avanços e profundidades de corte). Os critérios pra otimização foram baseados em formulações de mínimo custo ou máxima produção, respeitando as restrições do processo.

SUMMARY

This work presents a software development which is capable of selecting tool holders and carbide insert for external turning operations, using basic criteria of tools manufacturers as well as determining the optimum machining parameters. The optimization criteria were based on formulation of minimum cost or maximum production rate, respecting the process limitation.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Importância do Estudo dos Processos de Usinagem.....	1
1.2. Importância do Planejamento do Processo na Usinagem.....	5
1.3. Importância dos Sistemas Computacionais em Usinagem.....	8
1.3.1. Sistemas de Planejamento de Processo.....	10
1.3.2. Otimização de Parâmetros de Usinagem.....	15
1.4. Objetivos do Trabalho.....	17
1.5. Justificativa do Trabalho.....	18
CAPÍTULO 2.....	22
ASPECTOS TECNOLÓGICOS E ECONÔMICOS DE USINAGEM.....	22
2.1. Generalidades.....	22
2.2. Desgaste e Vida de Ferramenta.....	23
2.3. Curvas de Desgaste e Vida de Ferramenta.....	26
2.4. Força e Potência de Corte.....	30
2.4.1. Potências de Usinagem.....	30
2.4.2. Forças de Corte.....	32
2.5. Equivalência das Operações de Usinagem.....	34
2.6. Velocidades de Mínimo Custo e Máxima Produção.....	37
2.7. Ciclos e Tempos de Usinagem.....	37
2.8. Equacionamento das Condições de Máxima Produção.....	39
2.9. Custos de Produção.....	42
2.10. Equacionamento das Condições de Mínimo Custo.....	44
CAPÍTULO 3.....	46
CONSIDERAÇÕES SOBRE A SELEÇÃO DE PORTA FERRAMENTAS E INSERTOS DE CARBONETO.....	46
3.1. Introdução.....	46
3.2. Normas ISO Aplicáveis a Insertos de Metal Duro e Porta- Ferramentas.....	48
3.2.1. Insertos.....	48
3.2.2. Porta-Ferramentas.....	50
3.3. Procedimentos de Seleção segundo Fabricantes.....	53
3.3.1. Seleção do Porta-Ferramentas.....	53
3.3.2. Seleção do Inseto.....	55
CAPÍTULO 4.....	60
MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO APLICÁVEIS AO PROBLEMA.....	60
4.1. Introdução.....	60
4.2. Problemas de Programação Não Linear. A Busca da Solução Ótima.....	61
4.3. Caracterização de um Problema Linear.....	62
4.4. Caracterização de um Problema Não Linear.....	62

4.5. Definições e Terminologias	63
4.5.1. Soluções Ótimas	63
4.5.2. Convexidade e Concavidade	64
4.5.3. Exequibilidade da Solução	64
4.5.4. Gradiente	65
4.6. Classificação das Técnicas de Programação Não Linear	65
4.7. Métodos de Minimização Não Linear com Restrições	66
4.7.1. Métodos por Aproximação Linear	66
4.7.2. Métodos por Funções Penalizadoras	70
4.7.3. Método da Tolerância Flexível	71
4.8. Comparação entre os Métodos para Minimização das Condições	73
Econômicas de Corte.....	73
4.8.1. Análise Qualitativa.....	73
4.8.2. Análise Quantitativa.....	74
4.9. Observações e Conclusões	76
CAPÍTULO 5.....	77
ANÁLISE E PROJETO DO SISTEMA.....	77
5.1. Delimitação do Projeto.....	77
5.2. Projeto Lógico.....	78
5.2.1. Diagrama de Fluxo de Dados	78
5.2.2. Desenvolvimento dos Algoritmos Básicos	79
5.2.3. Projeto das Telas de Entrada e Saída.....	87
5.2.4. Projeto dos Arquivos.....	94
5.3. Projeto Físico	95
5.3.1. Codificação dos Algoritmos.....	95
CAPÍTULO 6.....	97
TESTES E RESULTADOS.....	97
6.1. Exemplo de Aplicação do Programa para uma Operação de Torneamento Cilíndrico em Desbaste.....	97
6.1.1. Seleção do Porta-Ferramentas.....	98
6.1.2. Otimização dos Parâmetros de Corte	100
6.1.3. Verificação dos Valores Calculados.....	103
6.1.4. Seleção do Inserto	105
CAPÍTULO 7.....	107
CONCLUSÕES	107
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	109
BIBLIOGRAFIA	110
ÍNDICE DE TABELAS, FIGURAS E GRÁFICOS	115
SIMBOLOGIA	118
ANEXOS	120

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Importância do Estudo dos Processos de Usinagem

Os processos de usinagem podem ser definidos como sendo a ciência da remoção de cavaco [10] considerando cavaco todo material arrancando da peça através de uma ferramenta.

Ainda hoje grande parte dos processos de usinagem ainda são desempenhados manualmente por operadores os quais confiam na intuição e habilidade desenvolvidas com treino e prática. No entanto, o advento das máquinas controladas por computador resultou na transferência da responsabilidade do sucesso da operação do operador para o programador da peça e em primeira instância para o processista [10].

Apesar destas melhorias a natureza básica da usinagem permanece a mesma: utilizar uma combinação de máquinas e ferramentas para transformar matéria-prima em alguma forma e dimensão especificada de maneira econômica e prática, mantendo os requisitos de qualidade e confiabilidade para sua aplicação.

As indústrias gastam bilhões de dólares ao ano para desempenhar operações de remoção de material (normalmente de metais) devido ao grande número de peças que requerem usinagem em alguma etapa de sua produção, estendendo-se desde trabalhos grosseiros, como limpeza de forjados e fundidos até trabalhos de ultra-precisão, com

tolerâncias na casa de micra. Trata-se, sem dúvida, do mais importante dos processos básicos de manufatura [12].

Os processos básicos de formação de cavaco são: torneamento, aplainamento, fresamento, furação, serramento, brochamento e usinagem abrasiva (retificação). Sua aplicação depende fundamentalmente do tipo de superfície a ser trabalhada, e conseqüentemente define o equipamento a ser utilizado, conforme pode ser observado na tabela 1.

Operação	Máquinas mais utilizadas	Máquinas menos utilizadas	Máquinas raramente utilizadas
Torneamento	torno	mandriladoras	fresadoras
Aplainamento	plainas		
Fresamento	fresadoras e centros de usinagem		torno com acessórios
Furação	furadeiras e fresadoras	tornos	
Serramento	Serradoras alternativas ou de fita	oxicorte ou plasma	
Brochamento	brochadeiras		
Retificação	retificadoras planas e cilíndricas		torno com acessórios

Tabela 1 - Aplicação dos processos de usinagem em relação aos equipamentos
(adaptado da referência [12])

O processo de torneamento pode ser definido como sendo o processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes [19]. Neste caso, a peça gira em torno de um eixo principal de rotação da máquina, e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo trajetória coplanar com o referido eixo. O processo de torneamento por sua vez pode ser subdividido nas modalidades de torneamento externo ou interno, conforme a superfície a ser usinada. Dentro destas modalidades destacam-se:

- Torneamento externo

a) Torneamento cilíndrico, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina (figura 1);

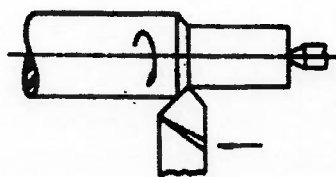


Figura 1 - Torneamento cilíndrico externo [19]

b) Torneamento de faceamento, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, visando obter uma superfície plana (figura 2);

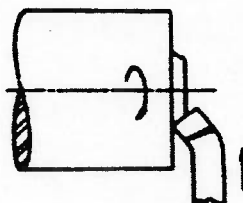


Figura 2 - Torneamento de faceamento [19]

- c) Torneamento cônico, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória inclinada ao eixo principal de rotação da máquina (figura 3);

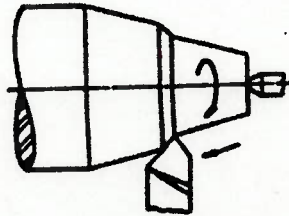


Figura 3 - Torneamento cônico externo [19]

- d) Torneamento curvilíneo, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea (figura 4);

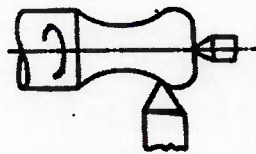


Figura 4 - Torneamento curvilíneo [19]

- e) Sangramento, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, visando obter um entalhe circular (figura 5);

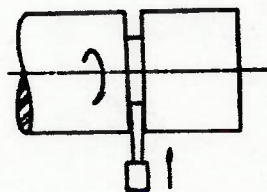


Figura 5 - Sangramento [19]

- Torneamento interno

a) Torneamento cilíndrico (figura 6);



Figura 6 - Torneamento cilíndrico interno [19]

b) Torneamento cônico (figura 7)

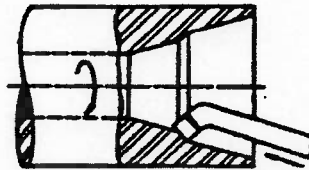


Figura 7 - Torneamento cônico interno [19]

1.2. Importância do Planejamento do Processo na Usinagem

A abertura de mercado a produtos importados vem impondo um novo enfoque ao setor industrial brasileiro. Produzir mais com qualidade, a baixo custo e em curto espaço de tempo são metas perseguidas por grande parte das indústrias como forma de estabelecer vantagens competitivas.

O caminho a ser percorrido necessariamente passa pela aplicação das recentes tecnologias de Projeto, Planejamento e Fabricação Auxiliados por Computador (CAD/CAPP/CAM) além das abordagens integradas de desenvolvimento de produtos, escopo principal da chamada engenharia simultânea.

Observa-se também que os processos de usinagem são responsáveis por uma parcela representativa dos processos de fabricação existentes na indústria, e conseqüentemente influem nos custos e qualidade das peças produzidas. Hoje grande parte das empresas desconhecem a importância de determinar corretamente as condições de usinagem e a escolha da ferramenta mais adequada para determinada operação. Notadamente na produção seriada, tais fatores podem acarretar aumento consideráveis nos custos de produção.

Em muitos casos, tem se constatado que a tarefa acima fica a cargo de operadores não qualificados o que resulta em condições de trabalho abaixo das indicadas ou emprego de ferramentas inadequadas. Na realidade, pouca ou nenhuma importância se dá a etapa de planejamento de processo.

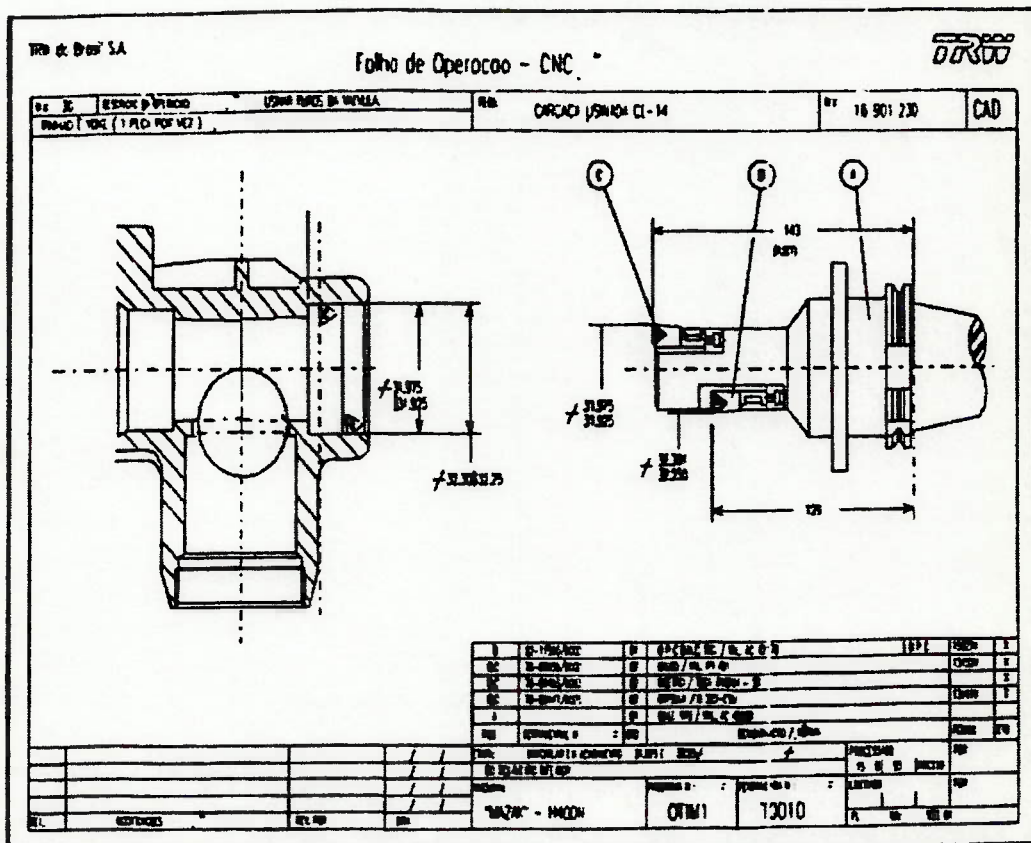
O propósito básico do planejamento de processo é selecionar e definir em detalhes, os processos a serem executados em uma peça, de acordo com as especificações de projeto. Assim, o planejamento de processo pode ser definido como o ato de preparar instruções de operações detalhadas para transformar um desenho de engenharia em produto final [8]. Desta forma, este pode ser subdividido nas seguintes etapas:

- Determinação do método, dispositivo de fixação e equipamento, levando-se em conta as padronizações existentes;
- Determinação da seqüência de operações, ou seja, definir quais modalidades de processo (torneamento, fresamento, furação etc.) e a respectiva operação (faceamento, torneamento cilíndrico, etc.);
- Seleção das ferramentas aplicáveis;

- Seleção das condições de usinagem, incluindo velocidade de corte, avanço, profundidades etc.

Obviamente o conjunto definido pelas decisões tomadas em cada uma das etapas anteriores deve estar baseado em critérios que otimizem medidas de custo ou tempo de fabricação.

O resultado do planejamento do processo é um plano de processo (vide figura 8), também conhecido como roteiro ou folha de operação. Com este em mãos sabe-se detalhadamente como fabricar determinado componente.



Mas não só o setor de produção necessita das informações contidas nas folhas de processo. Por exemplo, o Planejamento e Controle da Produção precisa da seqüência de operações e seus tempos associados para definir o nível de utilização dos equipamentos e assim levantar a capacidade da empresa em atender a um pedido de cliente. A nível de contabilidade de custos, o plano de processos dá subsídios para uma estimativa dos custos de fabricação de um componente ainda na fase de projeto, permitindo uma comparação entre soluções tecnicamente viáveis. Mesmos estudos dos fluxos de peças fabricadas, resultando em layouts otimizados, podem ser efetuados a partir das folhas de processo [35].

1.3. Importância dos Sistemas Computacionais em Usinagem

Os sistemas computacionais hoje tornaram-se ferramentas indispensáveis para aplicação de técnicas modernas de produtividade tanto nas atividades de projeto como fabricação. A figura 9 ilustra o ciclo de desenvolvimento de um produto qualquer e o relacionamento das suas etapas com as tecnologias CAD/CAM. Observe que a tendência é cada vez mais haver uma integração entre sistemas CAD e sistemas CAM, de modo que o projeto seja automatizado desde a sua concepção até a colocação no mercado.

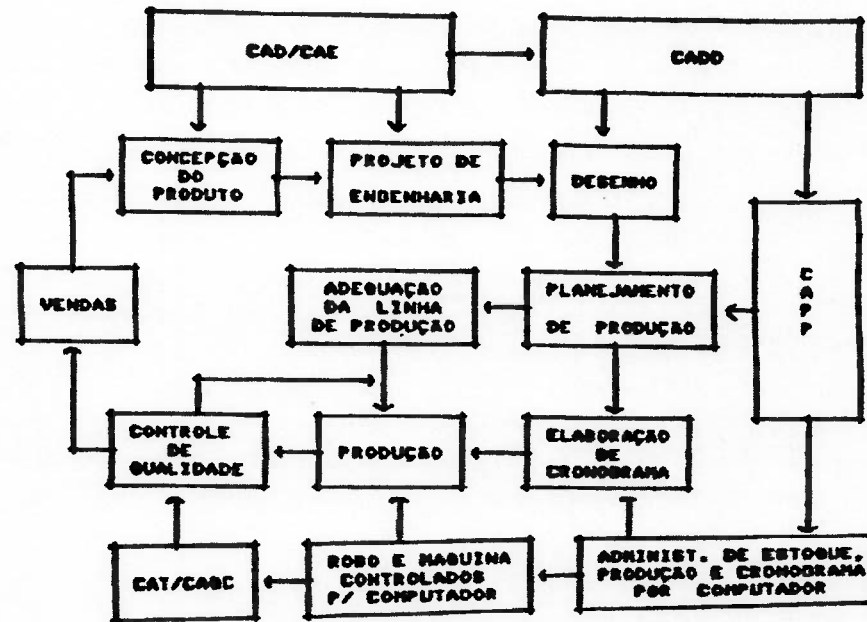


Figura 9 - Ciclo de desenvolvimento de um produto e as tecnologias CA's (adaptado da referência [24])

Como consequência da aplicação dos recursos computacionais surgiu a chamada engenharia concorrente ou simultânea que vem se tornando uma tendência bastante comum entre as organizações com o propósito de aumento de produtividade. A base para tal acontecimento reside na expressiva economia de recursos que podem ser obtidas se todas as fases do desenvolvimento de um produto, incluindo o projeto básico, projeto executivo, planejamento, fabricação e montagem; são vislumbrados de forma integrada e interativa. Isto implica que muitas atividades, antes vistas de forma isolada, devam ocorrer ou serem analisadas simultaneamente. O objetivo final é obter um ciclo cada vez mais rápido, obtendo-se produto melhor a um custo mais baixo.

1.3.1. Sistemas de Planejamento de Processo

A aplicação do computador nas atividades de planejamento de processo - CAPP (do inglês, "Computer Aided Process Planning") trouxe uma série de vantagens na realização destas tarefas:

- O sistema CAPP permite criar uma base de informações tecnológicas sobre diferentes processos, garantindo rapidez e confiabilidade na recuperação e armazenamento das mesmas;
- O tempo de planejamento cai significativamente com a utilização de sistemas CAPP. A figura 10 mostra os resultados de um estudo sobre as parcelas de tempo gastas com cada uma das atividades de planejamento. Observe que 63% do tempo de planejamento é gasto com a redação do plano propriamente dito e 21% com cálculos diversos. Ambas percentagens em conjunto (84%) demonstram a potencialidade do uso de sistemas CAPP [35].

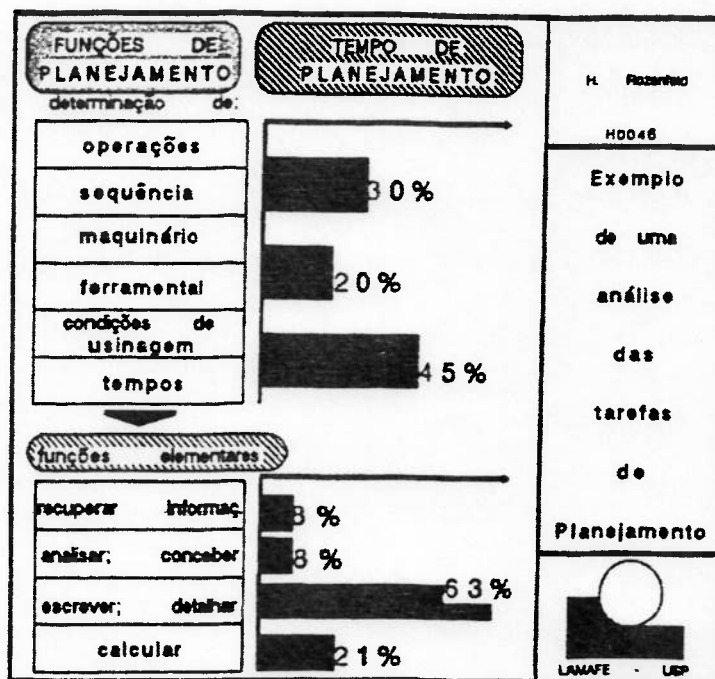


Figura 10 - Tempos de planejamento [35]

Existem três filosofias nas quais se estruturam os sistemas de planejamento de processo: variante, generativo e automático.

a) Forma Variante

O planejamento de processos variante se baseia numa estrutura anterior que faça um agrupamento de peças semelhantes (ou com processo semelhante) e na elaboração de planos para estes grupos. Aos grupos de peças, ditos de famílias, associam-se planos de fabricação, chamados planos padrão. Quando um plano padrão é recuperado para editar um planejamento de uma peça, são necessárias algumas alterações para fazê-lo de uso específico. De forma geral o planejamento de processos variante apresenta dois estágios: um estágio preparatório e outro de produção. Durante o estágio de preparação, as peças existentes são classificadas, codificadas e finalmente agrupadas em famílias; utilizando um dos inúmeros métodos já conhecidos. Uma vez montada a matriz família, o passo seguinte é elaborar o plano padrão para os elementos desta família. Este é, então, armazenado em um banco de dados sob o código desta família. O estágio de produção ocorre quando o sistema está operando e uma nova peça será processada. A primeira fase é analisá-la e codificá-la. Este código será utilizado por uma rotina de pesquisa que tentará enquadrá-lo num dos códigos de famílias já existentes. O plano padrão então será resgatado para que os ajustes e adaptações possam ser feitas para a nova peça.

b) Forma Generativa

A forma generativa de planejamento de processos pode ser definida como a geração do plano de trabalho a partir de informações de projeto contidas numa base de dados, sem intervenção do operador. Uma vez recebido o modelo do projeto, o sistema é capaz de selecionar as operações e a seqüência de trabalhos para fabricar a peça. O processo generativo deve captar o conhecimento de manufatura e codificá-lo em forma

de "software". Através de decisões lógicas, o processo generativo tenta imitar o raciocínio de um processista. Funções como seleção de máquinas ferramenta, ferramentas, parâmetros de corte, etc. também devem ser feitos automaticamente.

c) Forma Automática

A terceira abordagem é chamada de planejamento de processo automático. Neste caso, denota o planejamento do processo capaz de gerar um plano completo diretamente a partir de um modelo em CAD, não sendo necessária a decisão humana. Os sistemas de planejamento automáticos possuem duas características especiais: A primeira é uma interface CAD completamente automatizada a segunda é um sistema planejador completo e inteligente.

Citaremos a seguir exemplos de alguns sistemas CAPP desenvolvidos por empresas privadas e universidades. A ênfase será dada aos aspectos funcionais de cada implementação, mencionando suas potencialidades.

a) Sistema CAPPE ("Computer Aided Process Planning Environment")

O sistema CAPPE, desenvolvido pela empresa fundada no parque tecnológico de São Carlos, é um ambiente sob o qual funcionam diversos módulos independentes que executam funções específicas na área de planejamento de processo, tais como escolha de operações, ferramentas, equipamentos e cálculos de condições de usinagem e tempos de fabricação.

O controle de chamada de cada módulo é feito por um "shell", que supervisiona o seu acionamento e garante a flexibilidade da solução. O sistema permite também

agregar novos módulos ao ambiente os quais se comunicam através de uma base de dados relacional única. A figura 11 ilustra a arquitetura básica do sistema CAPPE.

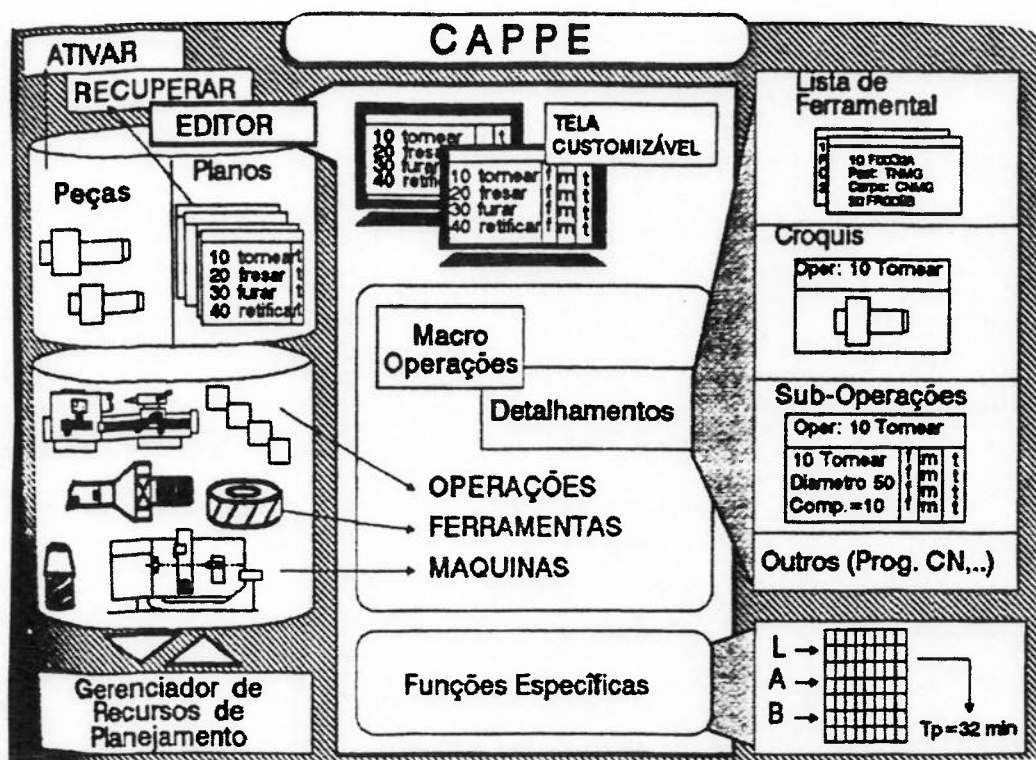


Figura 11 - Estrutura básica do sistema CAPPE [35]

O sistema foi elaborado de forma aberta. Assim, outros programas comerciais podem ser agregados ao ambiente. Um dos pontos do programa são as funções de detalhamento das operações. Este detalhamento pode conter uma lista de sub-operações, um programa de comando numérico, um croquis, folhas de especificação de procedimentos e inspeção, uma lista de ferramentas e outros. Para criação de croquis, optou-se pela utilização de um programa CAD comercial (AutoCAD), mantendo-se assim uma padronização com os arquivos gerados pela área de projeto.

b) COROPLAN

O COROPLAN é um programa CAPP desenvolvido pela empresa sueca SANDVIK Coromant, líder do mercado de ferramentas de metal duro. O programa pode ser aplicado em operações de usinagem, especificamente àquelas desempenhadas em tornos e centros de usinagem. O programa pode ser instalado em diferentes tipos de equipamentos tais como IBM PC AT, PS/2 ou em sistemas multi usuário DEC-VAX.

O sistema é basicamente composto por um módulo de processamento e dois bancos de dados, um da própria SANDVIK e outro do usuário. O primeiro é atualizado regularmente pela SANDVIK e o outro permite que o usuário cadastre suas próprias ferramentas ou dados de usinagem. Toda entrada de dados é feita pelo teclado e a saída pode ser impressa ou mostrada na tela.

A seqüência abaixo mostra as funções básicas desempenhadas pelo software:

- Achar especificações de materiais, dentre as mais de 1500 especificações existentes no banco de dados;
- Selecionar máquina e coletar suas informações;
- Decidir a modalidade de processo de usinagem, entre os menus de furação, torneamento e fresamento;
- Selecionar o tipo de aplicação;
- Selecionar o porta-ferramenta;
- Selecionar o inserto;
- Calcular os parâmetros de corte, isto é, são calculados profundidade de corte e número de passes, considerando a máquina ferramenta, restrições do inserto, velocidades e avanços e vida de ferramentas nas condições mínimas e máximas das tabelas tecnológicas;
- Calcular tempos e custos de fabricação;

- Documentar resultados;
- Armazenar informações para uso futuro.

As primeiras quatro atividades necessitam de entradas ou escolhas por parte do usuário. As demais recebem suporte completo do programa.

1.3.2. Otimização de Parâmetros de Usinagem

Pesquisas na área de otimização de parâmetros de corte, como já foi abordado, remontam o início do século (1907) com Taylor. Seu discípulo Gilbert foi o primeiro a estudar a economia envolvida nos processos de usinagem, estabelecendo as equações para vida de ferramentas em condições de máxima produção e mínimo custo para operações de torneamento em simples passada, conhecidos o avanço e a profundidade de corte. Gilbert também foi responsável pelos diagramas que representam custo ou tempo de fabricação em função da velocidade de corte, onde se observa claramente o surgimento de uma área denominada de intervalo de máxima eficiência (vide figura 12).

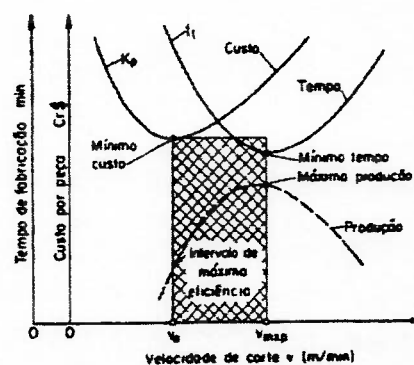


Figura 12 - Intervalo de máxima eficiência [19]

Desde então diversas abordagens para o problema vem sendo aplicadas, sendo a mais difundida aquela que busca primeiramente associar modelos matemáticos ao processo de corte, identificando suas variáveis e objetivos, e posteriormente, resolvê-los

utilizando alguma das inúmeras técnicas ou algoritmos existentes. Citaremos a seguir alguns desenvolvimentos na área ocorridos nos últimos anos:

Segundo Chua et alii [9], Armarego e Brown estudaram o processo de torneamento em multi-passe sem restrições e mostraram que uma operação em simples-passe seria mais barata quando comparada com operações em duas passadas. Emer et alii utilizaram programação geométrica para determinar as operações de torneamento em simples e duplo passo, com restrições. Boothroyd e Rusek utilizaram como critério a taxa de lucro. Philipson e Ravindran empregaram diferentes funções objetivo como também modelos matemáticos com duplo critério. Haiti, Rao e Hitomi consideraram três funções objetivo: custo de fabricação, taxa de produção e taxa de lucro. Ghiassi et alii utilizou uma técnica de programação linear de múltiplos objetivos. Tubucanon e Mukyangkoon apresentaram a programação interativa de objetivos.

Já White et alii [41] adicionou o custo da qualidade à função objetivo, modificando modelos existentes para determinar explicitamente como o acabamento superficial de uma peça afeta o custo de fabricação da mesma.

Koulamas [29] apresentou um modelo analítico para determinação simultânea das condições ótimas de usinagem e a política ótima de substituição de ferramentas em problemas de processos de usinagem com restrições utilizando a programação geométrica.

Sotirov et alii [38] discutiu um modelo de otimização com critérios múltiplos de otimização que considera três variáveis: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte com respeito a dois critérios, mínimo custo tecnológico e máxima taxa de produção para o processo de usinagem. Neste caso, o modelo não linear é convertido em linear por substituição logarítmica e resolvido por programação linear.

Já Eskicioglu [17] analisou o problema quando resolvido por três métodos de programação não linear distintos, isto é, o método do Gradiente Generalizado Reduzido, o método das Tolerâncias Flexíveis e, o método de Minimização Sequencial Não Restrita. Estes serão detalhadamente analisados no capítulo 4.

Diniz, Cupini e Vilela [13] apresentam uma metodologia prática para otimização da velocidade de corte em condições práticas, que pode ser aplicada em células de fabricação que aplicam princípios de Tecnologia de Grupo. Como conclusões básicas, estes autores questionam a determinação do intervalo da máxima eficiência como condição necessária para otimização da velocidade de corte, sendo a determinação da velocidade de máxima produção suficiente para tanto. Operações onde o custo de ferramenta é elevado podem, no entanto, ser exceção a regra.

Batocchio e Cupini [4] desenvolveram um sistema especialista de banco de dados que determina a velocidade de máxima produção com base nos coeficiente x e K de Taylor, calculados pelo número médio de peças produzidas por vida. A partir da velocidade de máxima produção pode-se inferir o valor da velocidade ótima de produção.

1.4. Objetivos do Trabalho

O presente trabalho têm por objetivo desenvolver um sistema computacional capaz de:

- Selecionar porta-ferramentas e insertos de metal duro para operações de torneamento externo.

- Determinar os parâmetros ótimos de usinagem (velocidade, avanços e profundidades 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.

O sistema contará para tanto com um conjunto de bancos de dados relacionais contendo informações sobre máquina, materiais de trabalho, ferramentas, dados de usinagem e constantes empíricas. Também disporá de um módulo de otimização baseado em critérios de custo e tempo de fabricação.

1.5. Justificativa do Trabalho

F. W. Taylor, já no início do século, percebeu que a escolha de parâmetros de usinagem era um fator importante num enfoque sistemático da avaliação dos padrões para diferentes tipos de trabalho. Ele executou uma série de ensaios de usinagem na procura de relações entre as grandezas determinantes no processo. Desenvolveu a famosa equação que leva o seu nome, relacionando vida de ferramenta com velocidade de corte, que ainda está em uso.

A preocupação demonstrada por Taylor não era sem fundamento. Uma série de pesquisas foram levadas a diante apartir principalmente da década de 40 onde se incorporaram novos conceitos na mecânica do corte dos metais e hoje, existem programas em diversos países com orçamentos elevados para investigar os fenômenos envolvidos na usinagem em geral. Um exemplo é o programa sueco que destina 3 milhões de dólares por ano em recursos a esta pesquisa [10].

Ainda não foram feitos estudos apurados que permitam uma avaliação do nível médio de dados de usinagem em comparação com dados ótimos. Estima-se, no entanto, que o nível médio é inferior aos níveis ótimos, ou seja, nas condições de custo mínimo de usinagem [10].

A tabela 2 mostra os resultados comparativos entre dados de usinagem ótimos de três ensaios de fresamento de faceamento. Estes ensaios foram executados em condições normais de produção, usando três combinações diferentes de avanço e velocidade de corte, e utilizando-se pastilhas de metal duro para usinagem de aço.

Característica	ACTMILL 1	ACTMILL 2	ACTMILL 3	OPTMILL1	OPTMILL
Número de passadas	5	5	5	5	3
Velocidade de corte (pé/min)	922	347	213	726	726
. Avanço por dente(pol/dente)	0,007	0,007	0,007	0,007	0,003
. Vida da ferramenta (min)	9,3	62	180	111	111
. Tempo por passada (min)	0,99	2,6	4,3	2,7	2,7
. Tempo por peça (min)	4,96	13,2	21,5	13,5	8,1
. Custo por série (US\$)					
. Ferramental	18.575,00	7.387,00	4.133,00	4.214,00	2.588,00
. Troca de ferramentas	3.456,00	1.374,00	769,00	784,00	470,00
.Corte	3.213,00	8.521,00	13.911,00	8.731,00	5.237,00
.Custo Total (US\$)	25.245,00	17.282,00	18.813,00	13.730,00	8.236,00

Tabela 2 - Comparação de tempo e custo de fresamento de faceamento para diversas condições de corte [10]

Observe que variando a velocidade de corte e o avanço, o operador tem infinitas combinações possíveis para obter vidas de ferramenta entre 0 e 180 minutos, e conseqüentemente, tempos de fabricação entre 5 e 25 minutos. Mas qual a combinação de valores que forneceria o menor custo de usinagem ou a maior produtividade ? A

menos que nos fosse permitido executar exaustivos ensaios em fábrica, seria um pergunta difícil de responder. Utilizou-se programa COMP da Colding International Corporation para executar uma previsão dos valores ótimos.

Na tabela 2, as três primeiras colunas representam as condições reais de ensaio e as duas últimas condições propostas pelo software de otimização COMP da Colding.

Os resultados mostram que os custos obtidos nas condições reais (ACTMILL 1 a 3) são significativamente superiores aos valores encontrados via programa (OPTMILL e OPTMILL 1), mesmo que o tempo de usinagem por peça seja bem menor como é o caso do ensaio ACTMILL 1. Isto ocorre pois os custos de ferramental se elevam substancialmente devido a curta vida de ferramenta imposta pelas condições testadas.

A razão desta discrepância entre valores reais e ótimos reside basicamente no pobre conhecimento dos fundamentos de usinagem e no fato de a escolha de ferramentas e dos dados de usinagem é um assunto complicado. Argumentos de que o custo de ferramental é insignificante ou que as variações de usinabilidade podem destruir as ferramentas não encontram respaldo na realidade industrial. Assim, a melhor maneira de tirar vantagem da ampla base de conhecimentos existentes é utilizar programas especializados em usinagem.

Dados recentes [10] mostram que a economia de recursos poderia assumir valores significativos caso a indústria melhorasse o nível dos dados de usinagem usados dentro da fábrica ou no planejamento de processo. A indústria americana, por exemplo, consome ferramentas de corte para metais a uma taxa de U\$ 1,5 bilhões por ano para investimentos em máquinas da ordem de U\$ 3 bilhões. Este conjunto de máquinas e ferramentas produzem peças durante 6 bilhões de horas máquina a um custo aproximado de U\$ 200 bilhões. O uso de condições ótimas de usinagem e escolha de

ferramentas reduziria este custo em 10 bilhões. Já o efeito de um sistema acurado de planejamento de processo sobre a eficiência de programação representaria uma economia bem maior, na casa de 60 bilhões.

Um sistema computacional, capaz de determinar as melhores ferramentas aplicáveis a uma determinada operação e em seguida, otimizar, com rapidez e confiabilidade os parâmetros de usinagem a partir de informações processuais, seria de extrema utilidade dentro deste contexto.

A área de planejamento de processo, apesar de ser um dos elos chaves para se garantir a integração entre as áreas de projeto e fabricação propriamente ditas, teve o mesmo nível de novos desenvolvimentos ocorridos nas áreas afins. Isto causou um descompasso dentro da estrutura industrial, a qual pretende-se endereçar em parte com esse projeto específico.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS TECNOLÓGICOS E ECONÔMICOS DE USINAGEM

2.1. Generalidades

Durante o planejamento de um processo de usinagem é natural procurarmos estabelecer parâmetros que conduzam a obtenção de produtos mais baratos e de melhor qualidade. Tais objetivos, traduzidos em forma de funções, constituem no ponto de partida para a otimização.

Tais funções agregam um conjunto de formulações, em grande parte empíricas, que procuram explicar os fenômenos ocorridos durante a usinagem e tentam prever seus efeitos no processo produtivo.

É, portanto, relevante citar os fundamentos teóricos sobre processos de torneamento que embasaram a elaboração do programa a saber:

- Desgaste e Vida de Ferramenta;
- Equivalência das Operações de Usinagem;
- Força e Potência de Corte;
- Velocidades de Mínimo Custo e Máxima Produção;
- Ciclos e Tempos de Usinagem;
- Equacionamento das Condições de Máxima Produção;
- Custos de Fabricação;
- Equacionamento das Condições de Mínimo Custo.

2.2. Desgaste e Vida de Ferramenta

Um maior entendimento sobre os mecanismos de desgaste de ferramentas bem como fatores que influenciam em sua duração são cruciais dentro do processo produtivo, como forma de obter redução de custos e aumento de produtividade. Tal dependência ocorre pois, com o uso, as ferramentas se danificam e perdem sua capacidade de corte. Torna-se, então, necessária uma reposição.

Dependendo do material da ferramenta, da peça de trabalho e das condições de usinagem, estas danificações são diferentes. Também os limites considerados aceitáveis para tal dano à ferramenta dependem do nível de exigência atribuído a operação, ou seja, se acabamento ou desbaste.

Quando prevalece o desgaste propriamente dito, e este ocorre de forma gradual e contínua, torna-se mais fácil o estabelecimento de formulações para definir a intensidade do dano. Pode-se, portanto, estabelecer os níveis de desgaste para o qual a rugosidade superficial de uma peça esteja comprometida ou as tolerâncias dimensionais não podem ser mantidas de forma sistemática.

Em ferramentas frágeis, com ângulo de cunha pequeno, e principalmente no corte interrompido, a vida pode ser diminuída pelo aparecimento de trincas e quebras. Há também o caso de ferramentas tenazes que sofrem deformação plástica permanente devido a ação de forças de corte elevadas. Nestes casos, a determinação das grandezas relativas à danificação da ferramenta é mais complexa.

Podemos, então associar à perda da capacidade de corte da ferramenta, dois tipos distintos de danificações: os *desgastes* e as *avarias*. Como desgastes entende-se aqueles

processos associados pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta e entre esta e a peça.

Existem vários fatores que interferem neste mecanismo a saber:

- Aderência ou microsoldagem (caldeamento), onde partículas de cavaco se soldam sobre a superfície de saída e ao desgarrarem provocam o o desgaste principalmente na superfície de folga.
- Abrasão mecânica, resultado da presença de partículas duras na interface cavaco-ferramenta, causando o desgaste da superfície de saída por ação termo-mecânica.
- Difusão intermetálica, onde há a difusão no estado sólido entre o material da ferramenta e a peça nas condições de temperatura mais elevada.
- Oxidação (queima), onde há o aparecimento de carepas sobre a superfície da ferramenta devido a reação com oxigênio

A figura 13 ilustra os diversos tipos de avarias e desgaste que podem ocorrer em uma ferramenta. A figura 14 mostra os parâmetros básicos de desgaste conforme a Norma ISO - 3685.

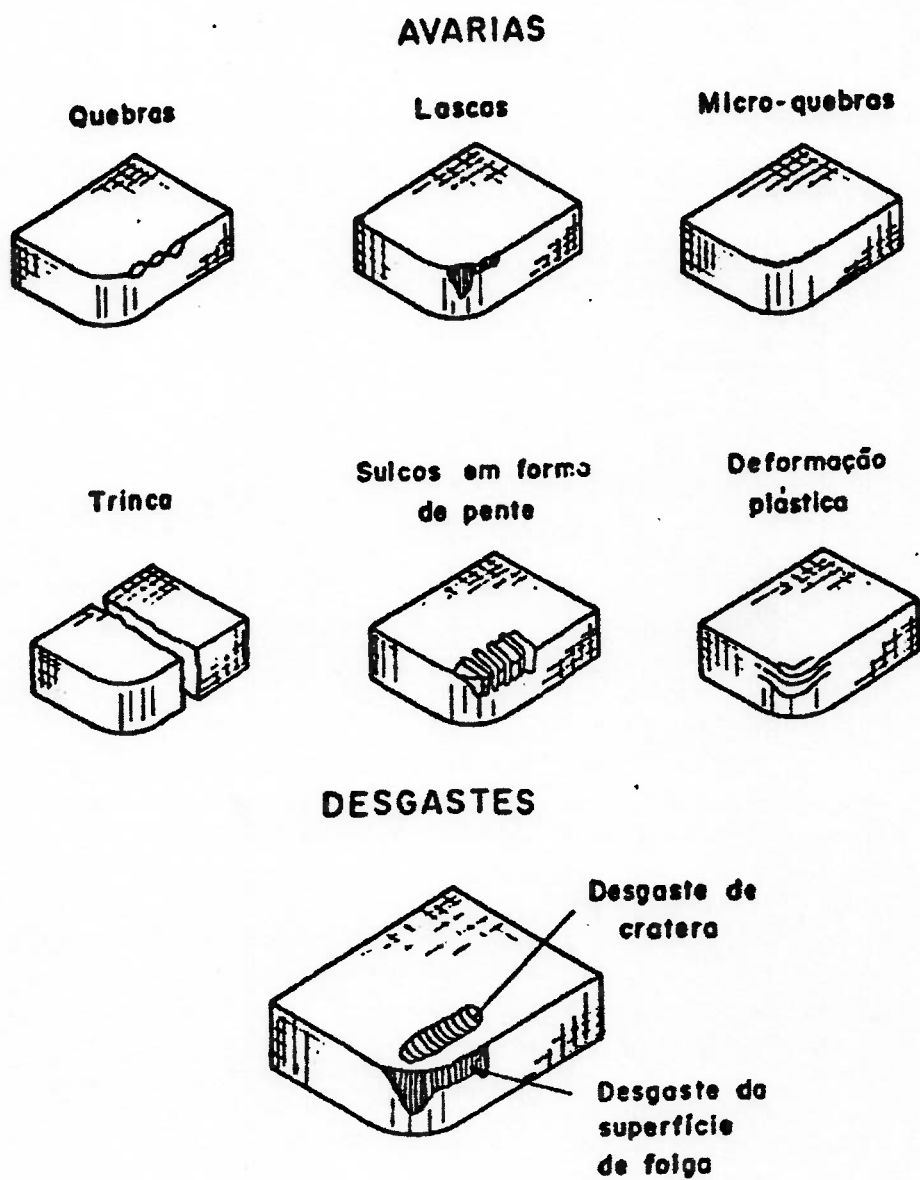


Figura 13 - Tipos de avarias e desgastes em ferramentas [20]

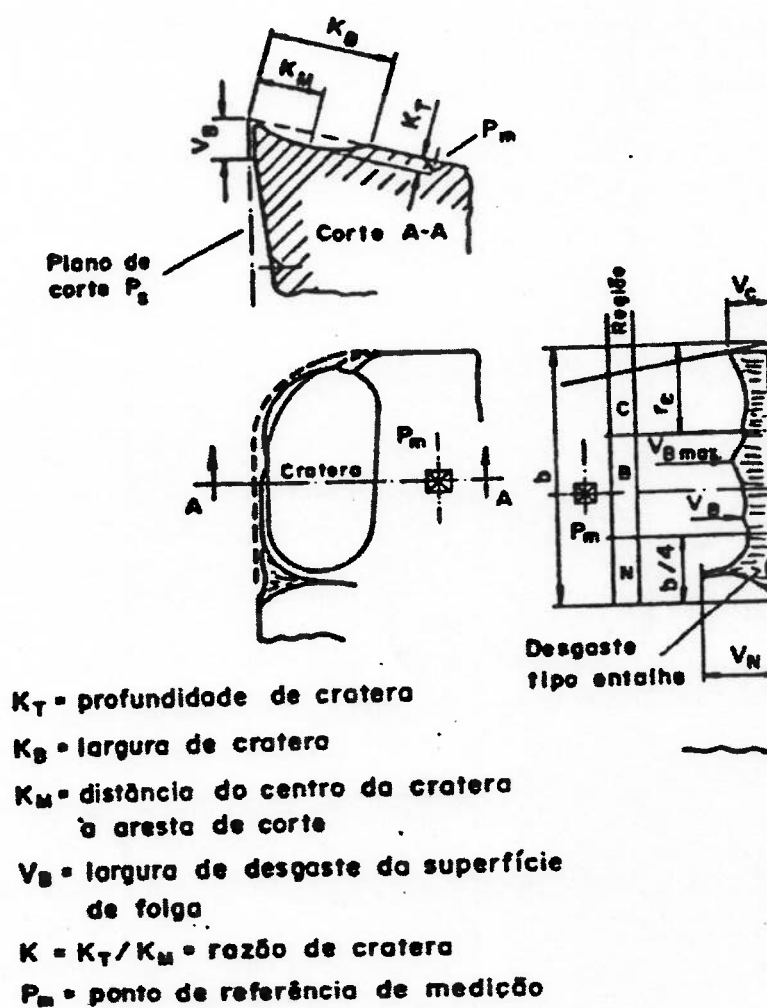


Figura 14 - Parâmetros básicos de desgaste segundo norma ISO 3685 [20]

2.3. Curvas de Desgaste e Vida de Ferramenta

As curvas convencionais de desgaste da ferramenta são obtidas em ensaios de usinagem, medindo-se para diferentes tempos de corte, o desgaste da superfície de corte V_B e o desgaste da superfície de saída K_T . São válidas para um par ferramenta-peça e condições de corte bem definidas, tais como, geometria da ferramenta, velocidade de

corde, avanço, profundidade de corte, fluido de corte, rigidez do conjunto etc. A figura 15 mostra o aspecto geral destas curvas, bem como as contribuições dos diversos mecanismos de desgaste.

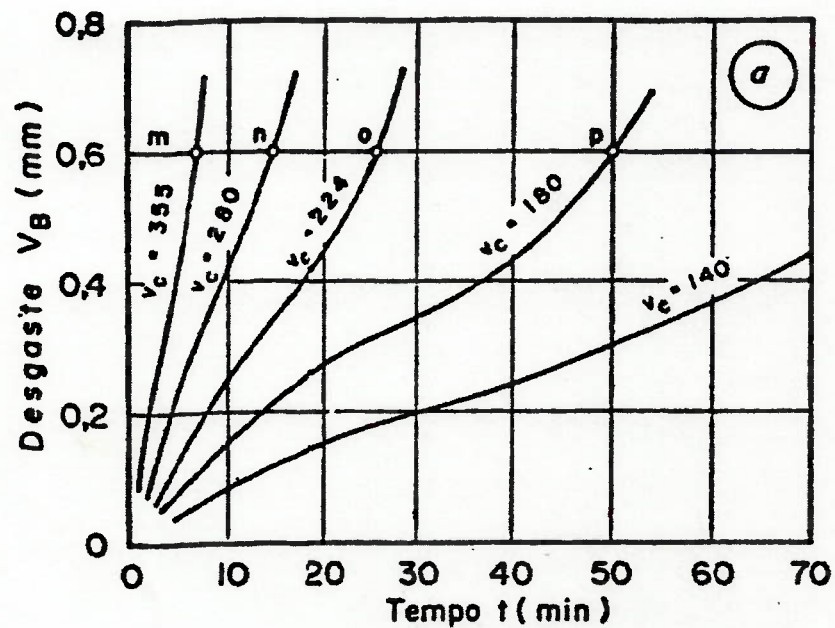


Figura 15 - Curvas característica de desgaste [20]

Entende-se por Vida de Ferramenta (T) ao o tempo decorrido até que a aresta de corte da ferramenta atinja um determinado valor pré-estabelecido de desgaste, que compromete sua continuidade em uso [20] ou ainda o intervalo de tempo entre duas afiações consecutivas, quando esta é recomendada [39].

Conforme foi dito anteriormente, para determinação da vida da ferramenta, com base nas exigências de operação (acabamento ou desbaste), 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 -T, nas condições de usinagem pré-fixadas, para o par ferramenta-peça. A representação gráfica desta função em coordenadas

logarítmicas se aproxima de uma reta, conforme ilustrado no figura 16. Taylor foi o primeiro a deduzir a equação por volta de 1910, que tem o seguinte forma:

$$T = \frac{K}{V_c^x} \quad (1)$$

onde:

V_c = velocidade de corte, em m/min;

K e x = constantes experimentais dependentes dos materiais envolvidos

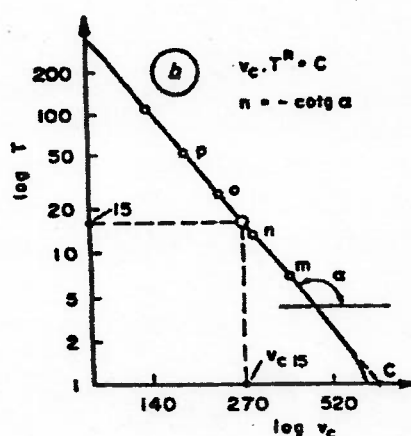


Figura 16 - Curva típica de vida de ferramenta [20]

Introduzindo-se na equação de Taylor a influência do avanço (a), e da profundidade de corte (p), e admitindo-se que o desgaste varia exponencialmente com o tempo de usinagem, chegamos a equação expandida de Taylor ou de Gilbert:

$$T = \frac{K}{V_c^x a^{x_1} p^{x_2}} \quad (2)$$

onde:

V_c = velocidade de corte, em m/min;

a = avanço de corte, em mm/volta;

p = profundidade de corte, em mm;

K e x_i = constantes experimentais dependentes dos materiais envolvidos.

A equação de Taylor fornece então valores de vida T para a ferramenta para diferentes condições de usinagem. Para $T = 15$ minutos, podemos associar uma velocidade de corte V_{c15} , a qual pode ser encontrada nas tabelas de fabricantes de ferramenta.

Ainda que regidos por equações empíricas razoavelmente simples, os valores da velocidade de corte também dependem de uma série de fatores de difícil controle. Pesquisas mostraram que, materiais designados como iguais por diversas normas técnicas (ABNT, SAE, DIN, etc.) e submetidos aos mesmos tratamento térmicos, usinados nas mesmas máquinas ferramentas podem gerar diferentes comportamentos quanto ao desgaste de ferramentas de metal duro, quando provenientes de lotes ou siderúrgicas distintos.

A rigidez do conjunto máquina-ferramenta-peça, a idade e estado de conservação da máquina é outro fator de difícil determinação. Mesmo o tipo de porta-ferramenta e sua fixação na máquina já se constatou, interferem no processo de desgaste. O formato da pastilha, sua geometria e do quebra cavaco, também exercem influência significativa no processo. Conseqüentemente, a vida da ferramenta pode sofrer variações significativas, até da ordem de 1:8, dependendo do fator em questão [20].

Esta dificuldade, porém, não inviabiliza a utilização da formula de Taylor como uma aproximação do fenômeno de desgaste uma vez que é possível determinar as constantes x e K para um par ferramenta peça para as condições reais de trabalho dentro de uma indústria.

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 equação (3):

$$x = \frac{\log(Z_i / Z_{i+1})}{\log(V_{c(i+1)} / V_{ci})} + 1 \quad (3)$$

$$K = Z_i \cdot V_{ci}^x \cdot t_{ci} \quad (4)$$

onde:

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

V_{ci} = Velocidade de corte na condição i , em m/min;

t_{ci} = tempo de corte na condição i , em min.

Desta forma, basta-se contar o número de peças produzidas até que o critério de desgaste seja atingido com duas velocidades de corte distintas e cronometrar o tempo de corte médio [13].

2.4. Força e Potência de Corte

2.4.1. Potências de Usinagem

As potências necessárias para a usinagem resultam do produto das componentes de força de usinagem pelas respectivas componentes de velocidade de corte. Assim:

- Potência de corte (N_c): Trata-se do produto da força de corte (F_c) pela velocidade de corte (V_c). Analiticamente:

$$N_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60.75} \quad (CV) \quad (5)$$

onde F_c é dada em Kgf e V em m/min.

- Potência de avanço (N_a): Trata-se do produto da força de avanço (F_a) pela velocidade de avanço (V_a). Analiticamente:

$$N_a = \frac{F_a \cdot V_a}{1000 \cdot 60 \cdot 75} \text{ (CV)} \quad (6)$$

onde F_a é dada em Kgf e V_a em mm/min.

- Potência efetiva de corte (N_e): Trata-se da soma das duas componentes anteriores, ou seja:

$$N_e = N_c + N_a \quad (7)$$

Para operações de torneamento considerando $F_c \cong 4.5F_a$, obtemos que $N_a \ll N_c$, o que nos leva a concluir que $N_e \cong N_c$. Por esta razão a força de corte F_c , constituinte da maior parcela da potência de usinagem, é chamada força principal de corte.

- Potência fornecida pelo motor (N_m)

A potência fornecida pelo motor (N_m) pode ser obtida estipulando-se um rendimento para a máquina operatriz (η) devido a eventuais perdas nas transmissões.

Assim:

$$N_m = \frac{N_e}{\eta} \quad (8)$$

2.4.2. Forças de Corte

A força de corte pode ser expressa pela relação:

$$F_c = K_s \cdot S \quad (9)$$

onde:

S = Área da seção de corte, em mm^2 ;

K_s = Pressão específica de corte, ou seja, força de corte por unidade de área de seção de corte (Kgf/mm^2).

Já a seção de corte pode ser obtida multiplicando-se o avanço pela profundidade de corte ou a altura (h) pela espessura do cavaco (b), em mm, conforme figura 18.

Analiticamente:

$$S = a \cdot p = b \cdot h \quad (10)$$

O grande esforço em termos de pesquisa nas últimas décadas nesta área se concentrou na determinação dos fatores que influenciam sobre a pressão específica de corte e portanto estabelecer formulações que estimem o seu valor (e conseqüentemente a força principal de corte) dadas algumas condições de operação, material trabalhado e ferramenta.

A análise de resultados experimentais que levantaram a influência de fatores como a velocidade de corte, seção de corte, material, afiação da ferramenta etc; levaram muitos pesquisadores a propor fórmulas analíticas interrelacionando a pressão específica de corte com as grandezas dependentes. Dentre estes destaca-se Kienzle, que, em 1951, propôs uma formulação simples e suficientemente precisa para os cálculos de força de usinagem.

Na sua fórmula K_s aparece como função da espessura de corte h e não como função do avanço a , como era comum:

$$K_s = \frac{K_{s1}}{h^z} \quad (11)$$

$$z = \text{tg}(\alpha) \quad (12)$$

onde:

K_{s1} = constante específica do metal para uma seção de corte de 1 mm de espessura para 1 mm de largura;

z = coeficiente angular da reta definida pela inclinação α .

Na expressão de Kienzle, verifica-se através de ensaios que para um ângulo de posicionamento compreendido entre 30 e 75 graus e para uma relação p/a superior a 4, a pressão específica de corte permanece praticamente constante, independente do ângulo de posição. O valor de K_s das seções de corte de igual espessura h , representadas na figura 17, é praticamente o mesmo.

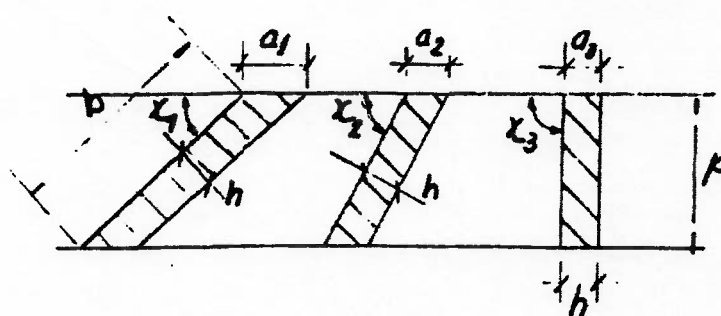


Figura 17 - Representação de diversos ângulos de posição [39]

A força principal de corte, então, pode ser obtida da fórmula:

$$F_c = k_s \cdot h \cdot b = k_{s1} \cdot h^{1-z} \cdot b \quad (13)$$

Relacionando-se com os valores de avanço e profundidade de corte, dados pelas expressões (14) e (15), temos uma nova expressão para a força principal de corte em função dos mesmos (16):

$$h = a \cdot \text{sen} \chi \quad (14)$$

$$b = \frac{p}{\text{sen} \chi} \quad (15)$$

$$F_c = k_{s1} \cdot h^{1-z} \cdot b = k_{s1} \cdot (a \text{ sen } \chi)^{1-z} \cdot (p / \text{sen } \chi) \quad (16)$$

onde:

χ = ângulo de posicionamento da ferramenta.

2.5. Equivalência das Operações de Usinagem

Para o equacionamento das condições econômicas de usinagem, como se verá mais adiante, torna-se necessário o conhecimento das características geométricas da peça em processo de torneamento. Algumas delas, como por exemplo o diâmetro, podem variar a medida que a ferramenta executa seu movimento. A formulação proposta, no entanto, estipula que o diâmetro deva ser constante em todo o perfil uma vez que fora deduzido para o caso simples de torneamento cilíndrico. Torna-se, portanto, fundamental o estudo das equivalências nos processos de torneamento, como forma de estabelecer valores aplicáveis as demais operações no escopo desta tese.

Define-se velocidade de corte equivalente numa operação de usinagem com velocidade de corte variável, aquela 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. Analiticamente é dada pela expressão (17):

$$V_e = \sqrt[3]{\frac{I}{t_c} \int_0^{t_c} V_c^x dt} \quad (17)$$

a qual é aplicável dentro do campo de validade da fórmula simplificada de Taylor. Tal expressão foi verificada experimentalmente por Kazinczy e determinada analiticamente por Armarego e Brown. Estes dois pesquisadores consideravam para sua dedução analítica, que as curvas de desgaste da ferramenta, em função do tempo de usinagem, se assemelhavam a segmentos de retas. Posteriormente Ferraresi demonstrou estas fórmulas para um caso geral, admitindo-se as curvas de vida paralelas, para diferentes valores de desgaste.

Partindo do conceito de velocidade de corte equivalente, podemos associar a esta o diâmetro equivalente d_e pela equação:

$$V_{ce} = \frac{\pi \cdot d_e \cdot n_r}{1000} \quad (18)$$

onde:

n_r = rotação do fuso, em rpm;

d_e = diâmetro equivalente na operação, em mm;

V_{ce} = velocidade de corte equivalente, em m/min

De acordo com as formulação realizadas por Ferraresi, as expressões dos diâmetros-equivalentes para as diferentes operações de corte são:

- Torneamento cilíndrico:

$$d_e = d \quad (\text{mm}) \quad (19)$$

- Torneamento de faceamento (vide figura 18):

$$d_e = \left\{ d_1^x \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{x+1}}{(x+1)\left(1 - \frac{d_2}{d_1}\right)} \right] \right\}^{1/x} \quad (\text{mm}) \quad (20)$$

- Torneamento cônico (vide figura 19):

$$d_e = d_2 \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{x+1}}{(x+1)\left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)} \right]^{1/x} \quad (\text{mm}) \quad (21)$$

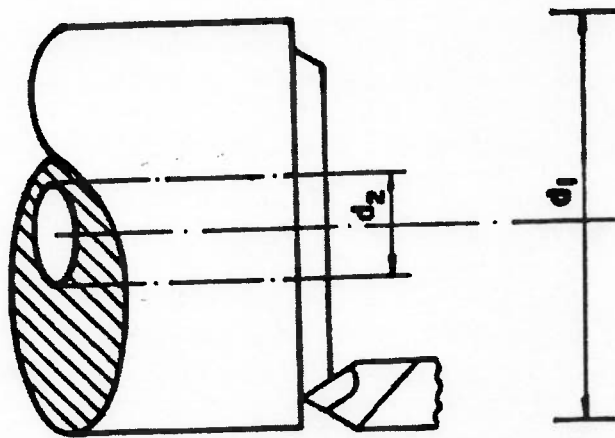


Figura 18 - Diâmetro equivalente para operações de torneamento de faceamento [33]

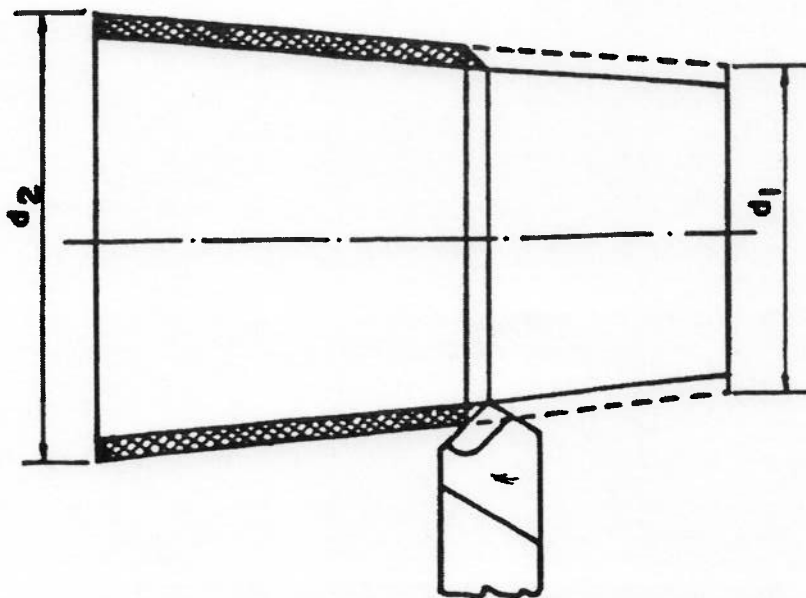


Figura 19 - Diâmetro equivalente para operações de torneamento cônico [33]

2.6. Velocidades de Mínimo Custo e Máxima Produção

Os critérios econômicos mais comuns para operações de usinagem são os de mínimo custo, máxima produção ou máximo lucro por componente; sendo a escolha dependente da postura estratégica adotada pela empresa face ao mercado. Assim, podemos definir:

- Velocidade de Mínimo Custo ou Velocidade Econômica de Corte. Define-se como aquela que conduz ao mínimo custo de fabricação. Leva em consideração, portanto, todos os custos que incidem direta ou indiretamente no custo de fabricação. Deve decorrer, portanto, da minimização dos custos de fabricação [39].
- Velocidade de Máxima Produção. Define-se como aquela que promove a maior retirada de cavaco, num determinado tempo de usinagem. Esta despreza praticamente todas as influências indiretas, considerando apenas o tempo de troca da ferramenta. Deve ser obtida, portanto, da minimização do tempo de fabricação [39].

2.7. Ciclos e Tempos de Usinagem

O ciclo de usinagem de uma peça, pertencente a um lote de Z peças é constituído das seguintes fases:

- 2.7.1. Colocação e fixação da peça em bruto ou semi-acabada;
- 2.7.2. Aproximação ou posicionamento da ferramenta para início do processo;
- 2.7.3. Corte propriamente dito;
- 2.7.4. Afastamento da ferramenta;
- 2.7.5. Retirada e inspeção da peça.

Adicionalmente, existem outras fases que, indiretamente, contribuem no ciclo de usinagem:

2.7.6. Preparação da máquina para execução das Z peças;

2.7.7. Remoção da ferramenta para substituição ou reafiação;

2.7.8. Afição da ferramenta;

2.7.9. Recolocação e ajustagem da ferramenta.

A cada uma das fases citadas, podem ser associados tempos de usinagem. Assim, o tempo total de confecção de uma peça será:

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{n_t}{Z} (t_{ff} + t_{af}) \quad (22)$$

onde:

t_t = tempo total de usinagem por peça, em min;

t_c = tempo de corte propriamente dito, em min;

t_s = tempos secundários de usinagem (fases 2.7.1. e 2.7.5.), em min;

t_a = tempo de aproximação e afastamento da ferramenta, em min;

t_p = tempo de preparação da máquina, em min;

t_{ff} = tempo de troca de ferramenta, em min;

t_{af} = tempo de afiação de ferramenta, em min;

n_t = número de trocas de ferramenta para o lote de Z peças.

Admitindo-se que o preparo da máquina seja feito com ferramentas afiadas, temos:

$$Z = (n_t + 1). Z_t = (n_t + 1). \frac{T}{t_c} \quad (23)$$

onde Z_t = número de peças usinadas numa vida T.

Já t_{af} pode ser nulo visto que o operador terá provavelmente em mãos uma ferramenta nova ou uma 2º ou 3º ferramenta de reserva. Então, a expressão (22) ficará:

$$t_i = t_c + [t_s + t_a + \frac{t_p}{Z}] + (\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z})[t_f] \quad (24)$$

Observamos três parcelas distintas na equação (4):

$$t_i = t_c + t_1 + t_2 \quad (25)$$

onde:

t_c = tempo de corte propriamente dito, em min;

t_1 = tempos improdutivos, correspondente a colocação, fixação, retirada da peça, preparação da máquina e posicionamento da ferramenta, em min;

t_2 = tempo de troca de ferramenta, em min.

2.8. Equacionamento das Condições de Máxima Produção

Tomemos como exemplo uma operação de torneamento cilíndrico, mostrada na figura 20. O percurso de corte l , em mm, correspondente ao tempo t_c (em min) será:

$$t_c = \frac{l}{V_a} = \frac{l}{n_r \cdot a} = \frac{l \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot V_c} \quad (26)$$

onde:

d = diâmetro da peça, em mm;

a = avanço de corte, em mm/min;

V_c = velocidade de corte, em m/min;

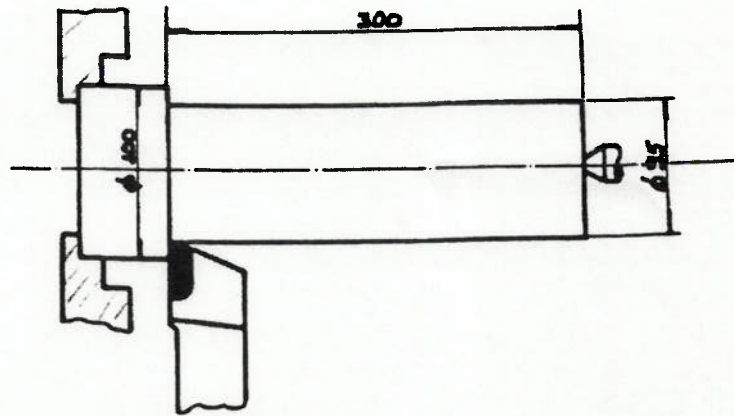


Figura 20. Exemplo de torneamento cilíndrico [39]

Substituindo (26) em (24) e aplicando-se a equação de Taylor, temos:

$$t_t = \frac{\ln d_e}{1000 a V_c} + [t_s + t_a + t_p / Z] + \left[\frac{\ln d_e V_c^{x-1}}{1000 a K} - \frac{1}{Z} \right] \cdot t_f \quad (27)$$

As restrições do processo são devido a especificação de ferramenta, material do blank, componente final e dinâmica da máquina ferramenta e podem ser verificadas para dois casos distintos:

Caso a operação seja de desbaste, os parâmetros de corte estarão sujeitos às seguintes restrições:

Avanço de corte: $0 < a \leq a_{max}$, avanço máximo é o máximo valor admissível para a ferramenta (dado do fabricante), em mm/rotação

(28)

Raio de ponta: $0.2 < r_e \leq 2.4$, em mm

(29)

(29)

Velocidade de corte: $0 < V_c \leq V_{cmax}$, onde a velocidade máxima é o máximo valor admissível para a ferramenta (dado do fabricante), em m/min

(30)

Vida de Ferramenta: $T_{min} \leq T = \frac{K}{V_c^x} \leq T_{max}$, em min

(31)

Maior profundidade de corte admissível: $\frac{p \cdot (a \cdot \text{sen}(\chi))^{1-z} \cdot K_s \cdot V_c}{\text{sen}(\chi) \cdot 60.75} = N_m \cdot \eta$ onde:

N_m = potência disponível na máquina (CV). (32)

Caso a operação seja de acabamento, os parâmetros de corte estarão sujeitos às seguintes restrições:

Avanço de corte: $0 < a \leq \sqrt{\frac{R_t \cdot 8r_e}{1000}}$, onde R_t é o valor de rugosidade em μm r_e é o valor do raio de ponta do inserto em mm

(33)

Velocidade de corte: $0 < V_c \leq V_{cmax}$, onde a velocidade máxima é o máximo valor admissível para a ferramenta (dado do fabricante)

(34)

Raio de ponta: $0.2 < r_e \leq 1.6$

(35)

Vida de Ferramenta: $T_{min} \leq T = \frac{K}{V_c^x} \leq T_{max}$

(36)

Maior profundidade de corte admissível: $p_{max} = \text{sobremetal da operação}$

(37)

2.9. Custos de Produção

Para que possamos equacionar as condições de mínimo custo é necessário primeiramente determinar os custos de produção. Assim definem-se os seguintes custos por peça (\$):

K_p = custo total de produção;

K_m = custo de matéria-prima;

K_{mi} = custo indireto de matéria-prima;

K_u = custo de usinagem;

K_{us} = custo de mão de obra;

K_{ui} = custo indireto de usinagem;

K_{uf} = custo de ferramental (depreciação, troca, afiação);

K_{um} = custo de máquina (depreciação, espaço, energia consumida);

K_{cq} = custo do controle de qualidade;

k_{if} = custo indireto de fabricação;

K_v = custo variacional anterior ou posterior.

Assim:

$$K_p = (K_m + K_{mi}) + (K_{us} + K_{um} + K_{uf}) + (K_{cq} + K_{if} + K_v) \quad (38)$$

Das parcelas da equação (38), apenas três dependem diretamente do tempo de usinagem já calculado, sendo as demais em primeira aproximação consideradas constantes.

- Custo de Mão de Obra (K_{us}):

$$K_{us} = t_t \cdot \frac{S_h}{60} \quad (39)$$

onde:

t_t é dado em minutos e S_h corresponde ao salário mais encargos por hora(\$);

- Custo de Máquina (K_{um}):

$$K_{um} = t_t \cdot \frac{S_m}{60} \quad (40)$$

onde:

t_t é dado em minutos e S_m corresponde ao custo total da máquina por hora (\$);

- Custo de Ferramenta (K_{uf}):

Admitindo-se ferramentas com pastilhas intercambiáveis de metal duro, temos:

$$K_{uf} = \left(\frac{1}{n_{pf}} \cdot V_{si} + \frac{K_{ins}}{n_{ins}} \right) \cdot \frac{1}{Z_t} \quad (41)$$

onde:

n_{pf} = vida média do porta-ferramentas, em quantidades de arestas de corte, até seu possível descarte;

V_{si} = custo de aquisição do porta-ferramenta (\$);

K_{ins} = custo de aquisição do inserto (\$);

n_{ins} = número de arestas de corte da pastilha intercambiável.

2.10. Equacionamento das Condições de Mínimo Custo

No item anterior calculamos os três custos que dependem diretamente do custo de usinagem, assumindo os demais constantes. Omitindo-se tais parcelas, temos:

$$K_p = \dots + K_{us} + K_{um} + K_{yf} + \dots \quad (42)$$

$$K_p = \dots + t_f \cdot \frac{S_h}{60} + t_f \cdot \frac{S_m}{60} + \frac{1}{Z_f} \cdot K_{yf} + \dots \quad (43)$$

$$K_p = \dots + \frac{t_f}{60} [S_h + S_m] + \frac{1}{Z_f} K_{yf} + \dots \quad (44)$$

Substituindo-se o tempo total de usinagem dado por (24) equação anterior, temos, simplificadamente:

$$K_p = \dots + \frac{t_f}{60} [S_h + S_m] + \frac{t_c}{60} [S_h + S_m] + \frac{t_c}{T} [K_{yf} + t_{yf}/60 \cdot (S_h + S_m)] + \dots \quad (45)$$

ou ainda:

$$K_p = C_1 + \frac{t_c}{60} C_2 + \frac{t_c}{T} C_3 \quad (46)$$

onde:

C_1 = constante de custo que independe dos parâmetros de corte (\$);

C_2 = soma das despesas totais de mão de obra e salário-máquina (\$/hora);

C_3 = constante de custo relativo à ferramenta (\$).

Substituindo-se novamente o tempo de corte (t_c) e a vida da ferramenta, temos:

$$K_p = C_1 + \frac{l\pi d_e}{60000 a V_c} C_2 + \frac{l\pi d_e V_c^{x-1}}{1000 a K} C_3 \quad (47)$$

As restrições do processo são idênticos ao visto anteriormente, excetuando-se o limite superior do raio de ponta que foi reduzido para 1.6 mm em operações de desbaste.

CAPÍTULO 3

CONSIDERAÇÕES SOBRE A SELEÇÃO DE PORTA FERRAMENTAS E INSERTOS DE CARBONETO

3.1. Introdução

O problema de seleção de ferramentas em geral, incluindo aquelas de metal duro, para uma determinada aplicação de usinagem está ligada ao tipo de material que vai ser usinado e o tipo de cavaco originário desta operação. Os cavacos, por sua vez, podem ser agrupados em três tipos diferentes: cavacos contínuos ou longos, cavacos de cisalhamento e cavacos curtos ou de ruptura. Os cavacos contínuos, devido ao fato de se formarem em velocidades de corte maiores (com temperatura de corte maior) e terem um contato longo com a superfície de saída da ferramenta, originam um maior desgaste nesta superfície, formando uma cratera. Esta é mais pronunciada que nos casos onde o cavaco é de ruptura. Além da tipologia, os cavacos possuem formas específicas, conforme pode ser observado na figura 21. São eles:

- a) cavacos em fita;
- b) cavaco helicoidal;
- c) cavaco espiral;
- d) cavaco em lascas.

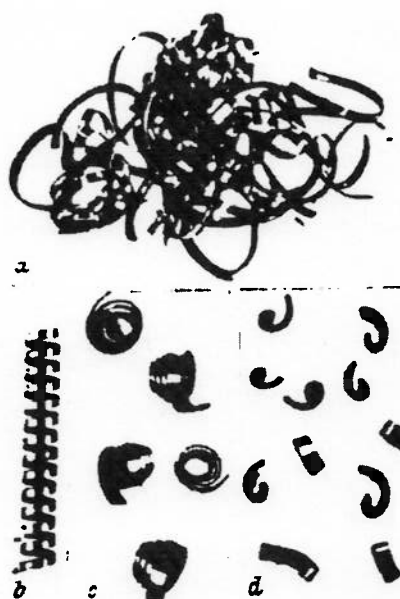


Figura 21 - Formas mais comuns de cavaco [19]

Assim, se a usinagem de metais apresentar cavacos curtos, as composições mais simples de metal duro, contendo carboneto de tungstênio e cobalto como aglomerante são eficazes. Já na usinagem de metais que apresentam cavacos longos é imprescindível utilizar-se classes de insertos que possuam também carbonetos de titânio ou tântalo.

Outros fatores, além do cavaco, contribuem na seleção do metal duro para a operação de usinagem, como:

- Tipo de operação ou área de trabalho - A experiência mostra que operações com grandes avanços e cortes interrompidos criam tensões elevadas e necessitam do emprego de classes mais tenazes, ou seja, com maior teor de cobalto;
- Velocidade de corte - A temperatura atuante na aresta de corte à medida que aumenta exige classes de maior resistência ao calor, portanto com menor teor de cobalto;
- Condições da máquina-ferramenta - Quanto mais rígidas e potentes as máquinas, menores são os riscos de se aplicar metal duro devido a sua fragilidade inerente.
- Porta-ferramenta - No caso de porta-ferramentas, é importante o material do qual é feito, seu dimensionamento e o sistema de fixação do inserto.

3.2. Normas ISO Aplicáveis a Insetos de Metal Duro e Porta-Ferramentas

3.2.1. Insetos

A ISO (International Organization For Standardization), entidade internacional de normatização, que agrupa diversos países, recomendou a agrupamento do metal duro em três grandes grupos:

Grupo P - compreendendo os tipos ou classes empregados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos longos e ductéis;

Grupo M - compreendendo os tipos ou classes empregados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos tanto longos quanto curtos;

Grupo K - compreendendo os tipos ou classes empregados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos ou de ruptura e materiais não metálicos.

Além do agrupamento, segue-se um índice numérico que estabelece o posicionamento do inserto quanto a características de dureza, resistência ao desgaste e tenacidade. A figura 22 mostra uma representação esquemática desta subdivisão. Em suma, a resistência ao desgaste e dureza tende a aumentar de K para P, e internamente a cada classe, quando a numeração é decrescente. A tenacidade, por outro lado, tem comportamento inverso.

DESIGNAÇÃO ISO	DUREZA E RESIST. AO DESGASTE	TENAÇIDADE
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	↑	↓

Figura 22 - Representação esquemática das classes de ferramentas normalizadas [19]

A ISO estabeleceu a norma n. 1832 de 1985 que rege a codificação de insertos intercambiáveis, permitindo sua completa identificação. A figura 23 mostra a estrutura do sistema. O código identificação é formado por 10 campos, sendo os sete primeiros os mais comumente utilizados. A descrição de cada um destes campos pode ser observada abaixo:

- 1 : Indica a forma do inserto e o ângulo inscrito entre arestas;
- 2 : Indica o ângulo de folga da pastilha;
- 3 : Indica a faixa de tolerância dimensional na espessura e no diâmetro inscrito da pastilha;
- 4 : Indica o tipo de inserto ou a geometria de quebra-cavaco;
- 5 : Indica o comprimento da aresta principal de corte em mm;
- 6 : Indica a espessura do inserto em mm;
- 7 : Indica o raio de ponta do inserto em mm;

- 8 : Indica a condição da aresta de corte, ou seja, o ângulo de saída, se é reto ou negativo;
- 9 : Indica a direção de avanço do porta-ferramenta;
- 10 : Indica a opção do fabricante, que pode ser constituído de mais dois algarismos.

3.2.2. Porta-Ferramentas

A ISO também estabeleceu a norma n. 5608 de 1980 que rege a codificação de porta-ferramentas destinados ao torneamento externo, permitindo assim sua completa identificação. A figura 24 mostra a estrutura do sistema. O código identificação é formado por 11 (onze) campos, sendo os 9 (nove) primeiros os mais comumente utilizados. A descrição de cada um destes campos pode ser observada abaixo:

- 1 : Indica o tamanho da porta-ferramenta de bloco ("block tool"), sendo omitido caso seja um porta-ferramenta normal;
- 2 : Indica o sistema de fixação do inserto no porta-ferramenta. Esta fixação pode ser pelo topo (C), por furo (P), por rosca (S) ou por topo e furo conjugados (M);
- 3 : Indica a forma do inserto e o ângulo inscrito entre arestas;
- 4 : Indica o formato do porta-ferramentas;
- 5 : Indica o ângulo de folga da pastilha;
- 6 : Indica o sentido da ferramenta, ou seja avanço a direita, esquerda ou bilateral;
- 7 : Indica a altura do porta-ferramentas em mm
- 8 : Indica a espessura do porta-ferramentas em mm;
- 9 : Indica o comprimento do porta-ferramentas, representado por uma letra (entre "A" e "X") a qual está associado um comprimento tabelado em mm. Também pode indicar a unidade de corte para o sistema "Block Tool", em mm;
- 10 : Indica o comprimento da aresta de corte em mm;

11: Indica a opção do fabricante, que pode ser constituído de mais três algarismos, separado do restante do código por um hífen. Pode ser utilizado para especificar um desenho especial de porta-ferramentas.

C	N	M	G	12	04	12			-QM
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Extraído da norma ISO 1832 - 1985

<p>1 - Forma do inserto e ângulo inclinado</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="padding: 5px;">C </td> <td style="padding: 5px;">D </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">K </td> <td style="padding: 5px;">R </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">S </td> <td style="padding: 5px;">T </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">V </td> <td style="padding: 5px;">W </td> </tr> </table>	C 	D 	K 	R 	S 	T 	V 	W 	<p>2 - Ângulo de fuga na aresta de corte principal</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="padding: 5px;">B </td> <td style="padding: 5px;">C </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">E </td> <td style="padding: 5px;">N </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">P </td> <td></td> </tr> </table> <p>O Descrição específica</p>	B 	C 	E 	N 	P 		<p>3 - Tolerâncias +- um s e d</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <th colspan="2">d</th> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 5px;">±0,13</td> <td style="padding: 2px 5px;">±0,025 +0,05 - ±0,15¹⁾ ±0,08 - ±0,25¹⁾</td> </tr> </table> <p style="font-size: x-small;">Varia de acordo com o tamanho. Veja abaixo</p> <div style="text-align: center;"> </div> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Círculo inscrito d_{nom}</th> <th colspan="2">Classe de tolerância</th> </tr> <tr> <th>M</th> <th>U</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3,97</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6,35</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12,7</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>15,875</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>16,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>18,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>20,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>25,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>31,75</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>32,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>40,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>50,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>63,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>80,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>100,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>125,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>160,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>200,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>250,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>315,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>400,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>500,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>630,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>800,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1000,0</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	d		±0,13	±0,025 +0,05 - ±0,15 ¹⁾ ±0,08 - ±0,25 ¹⁾	Círculo inscrito d _{nom}	Classe de tolerância		M	U	3,97			5,0			6,35			8,0			10,0			12,7			15,875			16,0			18,0			20,0			25,0			31,75			32,0			40,0			50,0			63,0			80,0			100,0			125,0			160,0			200,0			250,0			315,0			400,0			500,0			630,0			800,0			1000,0																																																																																																																																						
C 	D 																																																																																																																																																																																																																																																
K 	R 																																																																																																																																																																																																																																																
S 	T 																																																																																																																																																																																																																																																
V 	W 																																																																																																																																																																																																																																																
B 	C 																																																																																																																																																																																																																																																
E 	N 																																																																																																																																																																																																																																																
P 																																																																																																																																																																																																																																																	
d																																																																																																																																																																																																																																																	
±0,13	±0,025 +0,05 - ±0,15 ¹⁾ ±0,08 - ±0,25 ¹⁾																																																																																																																																																																																																																																																
Círculo inscrito d _{nom}	Classe de tolerância																																																																																																																																																																																																																																																
	M	U																																																																																																																																																																																																																																															
3,97																																																																																																																																																																																																																																																	
5,0																																																																																																																																																																																																																																																	
6,35																																																																																																																																																																																																																																																	
8,0																																																																																																																																																																																																																																																	
10,0																																																																																																																																																																																																																																																	
12,7																																																																																																																																																																																																																																																	
15,875																																																																																																																																																																																																																																																	
16,0																																																																																																																																																																																																																																																	
18,0																																																																																																																																																																																																																																																	
20,0																																																																																																																																																																																																																																																	
25,0																																																																																																																																																																																																																																																	
31,75																																																																																																																																																																																																																																																	
32,0																																																																																																																																																																																																																																																	
40,0																																																																																																																																																																																																																																																	
50,0																																																																																																																																																																																																																																																	
63,0																																																																																																																																																																																																																																																	
80,0																																																																																																																																																																																																																																																	
100,0																																																																																																																																																																																																																																																	
125,0																																																																																																																																																																																																																																																	
160,0																																																																																																																																																																																																																																																	
200,0																																																																																																																																																																																																																																																	
250,0																																																																																																																																																																																																																																																	
315,0																																																																																																																																																																																																																																																	
400,0																																																																																																																																																																																																																																																	
500,0																																																																																																																																																																																																																																																	
630,0																																																																																																																																																																																																																																																	
800,0																																																																																																																																																																																																																																																	
1000,0																																																																																																																																																																																																																																																	
<p>4 - Tipo de inserto</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="padding: 5px;">A </td> <td style="padding: 5px;">M </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">G </td> <td style="padding: 5px;">R </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">N </td> <td style="padding: 5px;">W </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">T </td> <td></td> </tr> </table> <p>X Desenho especial</p>	A 	M 	G 	R 	N 	W 	T 		<p>5 - Tamanho do inserto - comp. da a. de corte, l mm</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">d mm</th> <th>C</th> <th>D</th> <th>R</th> <th>S</th> <th>T</th> <th>V</th> <th>W</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3,97</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>6,35</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>8,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>10,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>12,7</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>15,875</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>16,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>18,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>20,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>25,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>31,75</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>32,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>40,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>63,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>80,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>125,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>160,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>200,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>250,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>315,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>400,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>500,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>630,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>800,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1000,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p style="font-size: x-small;">Para insertos tipo K somente a aresta e comprimento da aresta de corte teórica é indicada</p>	d mm	C	D	R	S	T	V	W	3,97								5,0								6,35								8,0								10,0								12,7								15,875								16,0								18,0								20,0								25,0								31,75								32,0								40,0								50,0								63,0								80,0								100,0								125,0								160,0								200,0								250,0								315,0								400,0								500,0								630,0								800,0								1000,0							
A 	M 																																																																																																																																																																																																																																																
G 	R 																																																																																																																																																																																																																																																
N 	W 																																																																																																																																																																																																																																																
T 																																																																																																																																																																																																																																																	
d mm	C	D	R	S	T	V	W																																																																																																																																																																																																																																										
	3,97																																																																																																																																																																																																																																																
5,0																																																																																																																																																																																																																																																	
6,35																																																																																																																																																																																																																																																	
8,0																																																																																																																																																																																																																																																	
10,0																																																																																																																																																																																																																																																	
12,7																																																																																																																																																																																																																																																	
15,875																																																																																																																																																																																																																																																	
16,0																																																																																																																																																																																																																																																	
18,0																																																																																																																																																																																																																																																	
20,0																																																																																																																																																																																																																																																	
25,0																																																																																																																																																																																																																																																	
31,75																																																																																																																																																																																																																																																	
32,0																																																																																																																																																																																																																																																	
40,0																																																																																																																																																																																																																																																	
50,0																																																																																																																																																																																																																																																	
63,0																																																																																																																																																																																																																																																	
80,0																																																																																																																																																																																																																																																	
100,0																																																																																																																																																																																																																																																	
125,0																																																																																																																																																																																																																																																	
160,0																																																																																																																																																																																																																																																	
200,0																																																																																																																																																																																																																																																	
250,0																																																																																																																																																																																																																																																	
315,0																																																																																																																																																																																																																																																	
400,0																																																																																																																																																																																																																																																	
500,0																																																																																																																																																																																																																																																	
630,0																																																																																																																																																																																																																																																	
800,0																																																																																																																																																																																																																																																	
1000,0																																																																																																																																																																																																																																																	
<p>6 - Espessura do inserto - mm</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="padding: 5px;">01</td> <td style="padding: 5px;">s = 1,59</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">T1</td> <td style="padding: 5px;">s = 1,98</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">02</td> <td style="padding: 5px;">s = 2,38</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">03</td> <td style="padding: 5px;">s = 3,18</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">T3</td> <td style="padding: 5px;">s = 3,97</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">04</td> <td style="padding: 5px;">s = 4,76</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">05</td> <td style="padding: 5px;">s = 5,56</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">06</td> <td style="padding: 5px;">s = 6,35</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">07</td> <td style="padding: 5px;">s = 7,94</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">08</td> <td style="padding: 5px;">s = 9,52</td> </tr> </table>	01	s = 1,59	T1	s = 1,98	02	s = 2,38	03	s = 3,18	T3	s = 3,97	04	s = 4,76	05	s = 5,56	06	s = 6,35	07	s = 7,94	08	s = 9,52	<p>7 - Raio de ponta mm</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="padding: 5px;">00</td> <td style="padding: 5px;">r_c = 0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">02</td> <td style="padding: 5px;">r_c = 0,2</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">04</td> <td style="padding: 5px;">r_c = 0,4</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">06</td> <td style="padding: 5px;">r_c = 0,6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">12</td> <td style="padding: 5px;">r_c = 1,2</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">16</td> <td style="padding: 5px;">r_c = 1,6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">24</td> <td style="padding: 5px;">r_c = 2,4</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">32</td> <td style="padding: 5px;">r_c = 3,2</td> </tr> </table> <p style="font-size: x-small;">Inserto redondo: 00 se d é convertido de um valor em polegadas 01 se d é um valor métrico</p>	00	r _c = 0	02	r _c = 0,2	04	r _c = 0,4	06	r _c = 0,6	12	r _c = 1,2	16	r _c = 1,6	24	r _c = 2,4	32	r _c = 3,2	<p>8 - Condição da aresta de corte</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="padding: 5px;">F </td> <td style="padding: 5px;">Aresta de corte reta</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">T </td> <td style="padding: 5px;">Aresta de corte negativa</td> </tr> </table>	F 	Aresta de corte reta	T 	Aresta de corte negativa	<p>9 - Estilo da ferramenta Direção de avanço</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="padding: 5px;">R </td> <td style="padding: 5px;">avanço</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">L </td> <td style="padding: 5px;">avanço</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">N </td> <td style="padding: 5px;">avanço</td> </tr> </table>	R 	avanço	L 	avanço	N 	avanço																																																																																																																																																																																																
01	s = 1,59																																																																																																																																																																																																																																																
T1	s = 1,98																																																																																																																																																																																																																																																
02	s = 2,38																																																																																																																																																																																																																																																
03	s = 3,18																																																																																																																																																																																																																																																
T3	s = 3,97																																																																																																																																																																																																																																																
04	s = 4,76																																																																																																																																																																																																																																																
05	s = 5,56																																																																																																																																																																																																																																																
06	s = 6,35																																																																																																																																																																																																																																																
07	s = 7,94																																																																																																																																																																																																																																																
08	s = 9,52																																																																																																																																																																																																																																																
00	r _c = 0																																																																																																																																																																																																																																																
02	r _c = 0,2																																																																																																																																																																																																																																																
04	r _c = 0,4																																																																																																																																																																																																																																																
06	r _c = 0,6																																																																																																																																																																																																																																																
12	r _c = 1,2																																																																																																																																																																																																																																																
16	r _c = 1,6																																																																																																																																																																																																																																																
24	r _c = 2,4																																																																																																																																																																																																																																																
32	r _c = 3,2																																																																																																																																																																																																																																																
F 	Aresta de corte reta																																																																																																																																																																																																																																																
T 	Aresta de corte negativa																																																																																																																																																																																																																																																
R 	avanço																																																																																																																																																																																																																																																
L 	avanço																																																																																																																																																																																																																																																
N 	avanço																																																																																																																																																																																																																																																

10 - Opção de fabricante: O código ISO consiste de 9 símbolos incluídos 8 e 9 os quais são usados somente quando requisitados. Além disso, o fabricante pode adicionar mais dois símbolos.

Figura 23 - Estrutura da norma ISO para pastilhas intercambiáveis (adaptado da referência [7])

BT32
1

P S K N R
2 3 4 5 6

20 20 K 12
7 8 9 10

-
11

Extraído da norma ISO 5608 - 1980

1 - Tamanho do Block Tool

ET = Sistema Block Tool
b = Tamanho do acoplamento

2 - Sistema de fixação

Fixação pelo topo C	Fixação pelo topo e furo M	Fixação pelo furo P	Fixação por rosca S
-----------------------------------	--	-----------------------------------	-----------------------------------

3 - Forma do inserto e ângulo incluído

C	D
K	R
B	T
V	W

4 - Estilo do porta-ferramenta

B	D	E	F	G
H	J	K	L	N
O	R	S	T	V

8 - Largura do porta-ferramenta

* Inteiros devem ser precedidos por zeros
Por exemplo: 8 indicado por 08

9 - Comprimento do porta-ferramenta, 11 mm

Porta-ferramenta		Sistema "Block Tool"																															
	<table border="0"> <tr><td>A - 32</td><td>H - 100</td><td>Q - 180</td></tr> <tr><td>B - 40</td><td>J - 110</td><td>R - 200</td></tr> <tr><td>C - 50</td><td>K - 125</td><td>S - 250</td></tr> <tr><td>D - 60</td><td>L - 140</td><td>T - 300</td></tr> <tr><td>E - 70</td><td>M - 150</td><td>U - 350</td></tr> <tr><td>F - 80</td><td>N - 160</td><td>V - 400</td></tr> <tr><td>G - 90</td><td>P - 170</td><td>W - 450</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>X - 500</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>Y - 500</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>Z -</td></tr> </table>	A - 32	H - 100	Q - 180	B - 40	J - 110	R - 200	C - 50	K - 125	S - 250	D - 60	L - 140	T - 300	E - 70	M - 150	U - 350	F - 80	N - 160	V - 400	G - 90	P - 170	W - 450			X - 500			Y - 500			Z -		
A - 32	H - 100	Q - 180																															
B - 40	J - 110	R - 200																															
C - 50	K - 125	S - 250																															
D - 60	L - 140	T - 300																															
E - 70	M - 150	U - 350																															
F - 80	N - 160	V - 400																															
G - 90	P - 170	W - 450																															
		X - 500																															
		Y - 500																															
		Z -																															

Nota: O símbolo alfabético pode ser substituído por hífen para comprimentos normalizados

10 - Comprimento da aresta de corte 1 mm

11 - Opção de fabricante

Quando requerido, um símbolo adicional de no máximo 3 letras pode ser colocado no código.

Figura 24 - Estrutura da norma ISO para porta-ferramentas (adaptado da referência [7])

3.3. Procedimentos de Seleção segundo Fabricantes.

Dentre os diversos fabricantes de pastilhas e porta-ferramentas de metal duro, apenas a SANDVIK - Coromant inclui em seus catálogos um procedimento claro para seleção de ferramentas. Descreveremos a seguir a metodologia sugerida, a qual orientou a formulação do algoritmo computacional de seleção do sistema proposto.

3.3.1. Seleção do Porta-Ferramentas

A seleção dos porta-ferramentas para torneamento geral externo baseia-se principalmente na escolha do sistema de fixação do inserto. A tabela 3 mostra os diversos tipos de sistemas de fixação e sua adequabilidade quando são utilizados critérios como tipo de operação, fluxo de cavaco, tempo de troca de inserto etc. Observe que os porta-ferramentas que possuem grau 5 são os mais adequados considerando-se um critério específico. Obviamente, a escolha do porta-ferramentas está também ligada aos deslocamentos de avanço que são possíveis executar, como pode-se observar na figura 25 e aos ângulos máximos permissíveis em operações que exigem deslocamentos em mergulho (figura 26).










Operações e outros fatores	Fixação por furo	Tipo de inserto
Externo		
desbaste	5	
acabamento	4	
Interno		
desbaste	5	
acabamento	4	
Fluxo de cavaco	5	
Tempo de indexação	5	
Acessabilidade	2	

Tabela 3 - Adequabilidade dos sistemas de fixação com relação à características da operação (adaptado da referência [7])

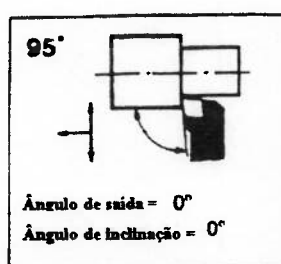


Figura 25 - Exemplo de deslocamentos possíveis para um porta-ferramenta (adaptado da referência [7])

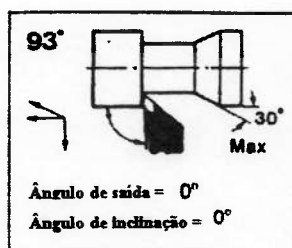


Figura 26 - Exemplo de porta-ferramenta com restrição para deslocamento em megalho (adaptado da referência [7])

Observe que, selecionado o porta-ferramenta, a forma do inserto e ângulo de folga já estão definidos também para o inserto, uma vez que ambos os campos repetem-se tanto na codificação do porta-ferramentas (campos 3 e 5) como no inserto (campos 1 e 2).

3.3.2. Seleção do Inserto

A primeira etapa é determinar a geometria de quebra-cavaco mais adequada para o inserto tendo em vista sua utilização. Isto pode ser feito através da tabela 4 de recomendações para geometria onde, entrando-se a característica básica do material, a área da trabalho (conforme os valores de profundidade de corte e avanço da tabela 5) e o tipo de porta-ferramentas e obtemos, como saída, o grau de adequabilidade de cada geometria. Podem também ser ponderados fatores como corte intermitente, tendência a vibrações e potência disponível limitada. Novamente as geometrias com grau 5 (cinco) são as mais adequadas e com 1 (um) as menos adequadas.

Em segundo lugar seleciona-se o tamanho da aresta de corte do inserto. Esta pode ser determinada através dos seguintes passos:

- Determinar a maior profundidade de corte admissível (p_{max});
- Calcular o comprimento efetivo da aresta de corte (L_i), em mm, considerando-se o ângulo de posicionamento do porta-ferramentas (K_f) e o ângulo do perfil quando em operações com mergulho (β), através da seguinte expressão (vide figura 27):

$$L_i = \frac{P_{max}}{\text{sen}(K_f \pm \beta)} \quad (48)$$

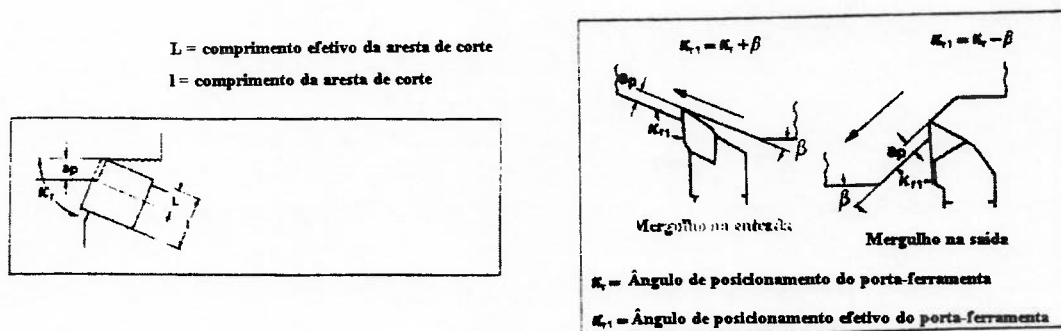


Figura 27 - Cálculo do comprimento efetivo da aresta de corte (adaptado da referência

[7])

- Calcular o comprimento total do inserto (l_i), em mm, através da tabela 6, onde se recomendam os máximos comprimentos efetivos de corte para as várias designações de inserto. Assim:

$$L_i = C.l_i \quad (49)$$

onde C é uma constante sempre menor que 1.

A terceira etapa seria definir o raio de ponta do inserto (r_e). O manual do fabricante sugere que a determinação do raio de ponta esteja vinculada ao avanço de corte (a) e conseqüentemente ao tipo de operação, isto é, se desbaste ou acabamento. Para operações de desbaste, é interessante escolher o maior valor de raio de ponta possível para obter uma aresta de corte robusta a menos que haja alguma tendência a vibração, onde a escolha de um raio de ponta menor seria mais adequada. O manual sugere como regra prática a seguinte relação:

$$a = \frac{1}{2} r_e \quad (50)$$

Para operações de acabamento, o fator relevante é determinar as condições que respeitem as limitações de acabamento superficial. A formulação para cálculo da rugosidade superficial teórica ou profundidade do perfil (R_t) envolve a raio de ponta e o avanço, sendo dada por (vide figura 28)[7]:

$$R_t = \frac{a^2}{8r_e} . 1000 (\mu m) \quad (51)$$

Não existe uma relação matemática que relacione a rugosidade R_t com a rugosidade R_a , sendo necessário, portanto, uma tabela de conversão numérica (tabela 7).

O quarto e último passo é determinar qual a classe básica do inserto a ser utilizado. Esta classe pode ser obtida a partir da tabela de dados tecnológicos (tabela 8), onde para cada material com uma dureza específica, estão associados limites máximos e mínimos permissíveis para o avanço e velocidade de corte, dentro de uma classe. Definido o avanço pelo item anterior, podemos facilmente determinar os valores da classe e da velocidade de corte.

Observe que tais tabelas são elaboradas para uma vida de ferramenta pré-determinada (no caso 15 minutos).

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
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 - Recomendações para geometria de insertos segundo fabricante (adaptado da referência [7])

	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 (adaptado da referência [7])

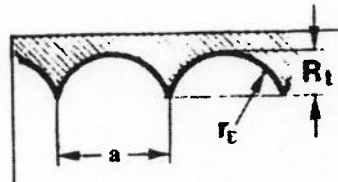


Figura 28 - Relação entre avanço a e rugosidade R, (adaptado da referência [7])

TCXX-AL TCMW TCMT-LR TNGN TNMA TNMG TNMG-15 TNMG-23 TNMG-OM TNMG-MR TNMA-OR TNMA	TNMA-41 TNMA-71 TNLN TPGN TPRR TPUN		TOGR TCMT-LF TCMT-LM TNMG-61 TNMG-MF	TNMG-OF TNMG-FL TPRR-21 TPRR-53		DCGX-AL DCMW DCMT-LR DNMA	DNMG-16 DNMG-63 DNMG-OM DNMG-MR DNMA-71 DNMA-OR		DCMT-LF DCMT-LM	DNMG-61 DNMG-FL DNMG-MF DNMG-OF	
SCMW SCMT-LR SNGN SNMA SNMG SNMG-15 SNMG-23 SNMG-MR SNMG-OM SNMA	SNMA-31 SNMA-41 SNMA-71 SNMA-OR SNLN SPGN SPGR SPMA SPUN		SCMT-LF SCMT-LM SNMG-MF SNMG-61	SNMG-OF SPMA-63		CCGX-AL CCMW CCMT-LR CNMA CNMG CNMG-15	CNMG-23 CNMG-MR CNMG-OM CNMG CNMG-62 CNMG-71 CNMA-OR		CCMT-LF CCMT-LM CNMG-MF CNMG-61	CNMG-OF CNMG-FL	
RCMT RCMX RCMT RCGX	RCMX-E RRMG RRMH		VBMT-LR VCGX-AL VYMG VYMG-MF VYMG-16 VYMG-OM	VBMT-LM VBMT-LF		KNMX-71 KNMX-73 KNMX-11	KNMX-12 KNMX-13 KNMX-13		WYMG-MF WYMG-MR WYMG-OM		

Tabela 6 - Constantes para determinação do comprimento total do inserto (adaptado da referência [7])

R_a μm	$R_a = \text{CLA} = \text{AA}$		RMS		Grau de rugosidade	Símbolo triângulo		
	μm	μin	μm	μin				
1,8	0,20	11,8	0,33	13,1	N6	▽		
1,8	0,36	13,8	0,39	15,3				
2,0	0,40	15,7	0,44	17,4				
2,2	0,44	17,5	0,49	19,4				
2,4	0,49	19,2	0,54	21,3				
2,5	0,53	20,8	0,56	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	0,79	30,9				
4,0	0,80	31,4	0,89	34,8			N7	▽
4,5	0,90	35,2	1,0	39,1				
5,0	0,99	39,3	1,1	43,1				
6,0	1,2	47,2	1,3	52,4				
7,0	1,4	55,1	1,5	61,2				
8,0	1,6	63,0	1,8	70,0				
9,0	1,8	71	2,0	78,8				
10,0	2,0	79	2,2	87,7				
15,0	3,2	126	3,10	140	N8	▽		
20,0	4,4	173	4,9	192				
25,0	5,8	230	6,4	254				
27,0	6,3	247	7,0	274				
30,0	7,4	292	8,2	324				
35,0	8,8	346	9,8	384				
40,0	10,7	422	11,9	466				
45,0	12,5	485	13,9	536			N10	▽
50,0	14,0	552	15,5	613				

Tabela 7 - Tabela de conversão entre rugosidades R_a e R_q (adaptado da referência [7])

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 inoxidável revenido	180							215	175	150

Tabela 8 - Tabela de dados tecnológicos (adaptado da referência [7])

CAPÍTULO 4

MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO APLICÁVEIS AO PROBLEMA

4.1. Introdução

Praticamente todo problema de engenharia, seja na fase de projeto ou fabricação pode ser visto como um processo multifase que requer constantes decisões por parte do grupo de projetistas. Tais decisões são normalmente baseadas tanto no conhecimento teórico como nas experiências adquiridas, e objetivam determinar a combinação de variáveis do projeto ou processo que melhor satisfazem as metas estabelecidas. Em outras palavras, em um estágio avançado de projeto, o problema normalmente recai num processo iterativo de obtenção de um conjunto de condições necessárias para atingir o melhor resultado dentro de uma determinada situação, concretizando assim o ato de otimizar.

A crescente disponibilização de recursos de informática ("hardware" e "software") tem estimulado a aplicação de métodos de otimização modernos estruturados em técnicas de programação matemática em diversas áreas do conhecimento.

Uma das áreas em que a otimização vem atingindo grande penetração corresponde aos processos de fabricação, especificamente na usinagem. Neste caso, o objetivo básico é determinar quais as condições de corte, representadas normalmente pelo avanço, rotações e profundidades de corte; que minimizem o tempo total de produção por componente ou, em outra abordagem, o custo total de produção por peça.

Tais funções objetivo (custo e tempo), como se viu no capítulo anterior, são não-lineares nos parâmetros de corte e são sujeitas a uma série de restrições de ordem prática tais como forças e potências máximas, acabamento superficial, limites de variação dos próprios parâmetros etc. É, pois, fundamental o estudo de métodos de programação não linear com restrições que auxiliem na obtenção das condições referentes ao mínimo das funções já citadas.

No escopo da busca de soluções ótimas via programação não linear, existem basicamente duas filosofias ou abordagens: Métodos de Gradiente e Métodos de Busca Direta [26]. Tomamos três técnicas: Método do Gradiente Generalizado Reduzido (GRG) e Técnica Seqüencial Não Restrita (SUMT) pertencentes a primeira abordagem e o Método da Tolerância Flexível, representando a segunda; para comparação quanto a eficácia e eficiência de solução do problema proposto.

4.2. Problemas de Programação Não Linear. A Busca da Solução Ótima

Os métodos de programação não linear possuem basicamente duas filosofias ou abordagens: métodos de gradiente, ou seja, aqueles que calculam a derivada da função objetivo e métodos de busca direta, que não calculam esta derivada.

Tomamos três métodos que podem, em primeira instância, ser aplicados na solução do problema de minimização das funções tempo e custo de fabricação. São eles, o Método do Gradiente Generalizado Reduzido (GRG) e Técnica Seqüencial Não Restrita (SUMT), ambos pertencentes a primeira abordagem e o Método da Tolerância Flexível, representando a segunda.

É interessante apresentar alguns conceitos básicos à priori.

4.3. Caracterização de um Problema Linear

Um problema de programação linear existe quando a função objetivo e suas restrições são funções lineares. Uma função y é dita linear quando:

$$y = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (52)$$

onde:

c_i são constantes e x_i são as variáveis do problema;

Assim, um problema de programação não linear pode ser estabelecido da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } & y = \sum_{i=1}^n c_i x_i \\ \text{Sujeita à: } & \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i - b_j \geq 0 \quad j=1, \dots, m \\ & x_i \geq 0 \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (53)$$

onde a 's, b 's e c 's são constantes e x_i são variáveis.

4.4. Caracterização de um Problema Não Linear

Um problema de programação não linear pode ser visto como um problema para se obter o extremo de uma função objetivo sujeita a restrições de igualdade ou desigualdade, as quais podem ser lineares ou não lineares. O problema de programação não linear pode ser formalmente estabelecido da seguinte forma:

$$\begin{array}{l}
 \text{Minimizar: } f(x) \text{ , } x \in E^n \\
 \text{Sujeita à: } \begin{array}{l} h_j(x) = 0 \quad j=1, \dots, m \\ g_j(x) \geq 0 \quad j=m+1, \dots, p \end{array}
 \end{array} \quad (53)$$

Como na programação linear as variáveis x_i podem ser parâmetros de projeto, processo, ajustes de controladores ou leituras de instrumentos; enquanto as funções objetivo podem representar custo, peso, receita, lucro etc. Já as restrições podem representar requisitos técnicos, condições de operação, fatores de segurança etc.

4.5. Definições e Terminologias

4.5.1. Soluções Ótimas

Um vetor $x^* = [x_1^*, \dots, x_n^*]$ que satisfaz as expressões contidas no item (53), é chamado de ponto ótimo e o correspondente valor de $f(x)$ e dito valor ótimo da função objetivo $f(x)$ quando $f(x^*) \leq f(x)$ para qualquer x dentro do domínio especificado. O par de valores x^* e $f(x^*)$ constituem a solução ótima. Uma solução ótima global representa o menor valor de $f(x)$ em todo o domínio E^n enquanto uma solução ótima local representa o menor valor de $f(x)$ numa vizinhança de algum vetor x .

Os algoritmos a serem analisados na seqüência só garantem a convergência para mínimos locais, principalmente pois estes dependem das propriedades da função objetivo e das restrições impostas.

Admitindo-se que o avanço e a profundidade de corte sejam previamente definidos, as funções objetivo descritas em (27) e (47), capítulo 2, são dependentes

unicamente da velocidade de corte. Esta função é bem comportada, com um extremo único não sendo portanto, uma grande desvantagem prover soluções locais para tal problema.

4.5.2. Convexidade e Concavidade

Os conceitos de convexidade ou concavidade são úteis na determinação das condições em que um mínimo local pode ser considerado um mínimo global. A função $f(x)$ é dita convexa num determinado domínio de R se qualquer dos vetores x_1 e x_2 em R :

$$f[\theta x_1 + (1-\theta)x_2] \leq \theta f(x_1) + (1-\theta)f(x_2) \quad (54)$$

Invertendo-se a desigualdade acima, temos uma função dita côncava.

Em R^n , um conjunto de pontos é definido como conjunto convexo se para qualquer par $[x_1, x_2]$, uma linha reta unindo os dois pontos está contida no conjunto.

4.5.3. Exequibilidade da Solução

Qualquer vetor x que satisfaça tanto as restrições de igualdade com de desigualdade é chamado de ponto viável ou exequível. O conjunto de pontos que satisfazem tais condições constituem o chamado domínio viável. Em relação apenas as restrições de desigualdade, um ponto pode ser classificado em um ponto interior (e viável, satisfaz $g_j(x) > 0$), ponto de fronteira (também viável e $g_j(x) = 0$) e ponto exterior (não viável, pois $g_j(x) < 0$).

4.5.4. Gradiente

Se uma função objetivo é contínua e diferenciável, o gradiente de $f(x)$ existe e pode ser definido o vetor coluna formado pelas primeiras derivadas parciais de $f(x)$ em relação as variáveis do processo:

$$\nabla f(x^k) = \left[\frac{\delta f(x^k)}{\delta x_1}, \dots, \frac{\delta f(x^k)}{\delta x_n} \right]^T \quad (55)$$

O gradiente de funções escalares indicam a maior taxa de aumento da função $f(x)$, sendo ortogonal ao seu contorno, passando por x^k . Devemos, pois, prosseguir na busca do mínimo na direção contrária a designada pelo gradiente de $f(x)$. $s = -\frac{\nabla f(x^k)}{|\nabla f(x^k)|}$

indica a direção unitária de otimização.

4.6. Classificação das Técnicas de Programação Não Linear

A classificação de técnicas de programação não linear pode ser feita tendo como base diversos critérios:

- 4.6.1. Componentes da Formulação do Problema;
- 4.6.2. Característica da Técnica de Solução;
- 4.6.3. Tipo de Linguagem de Programação Utilizada etc.

A classificação considerada mais básica diz respeito a característica da técnica de solução, uma vez que versam sobre a metodologia utilizada na busca da solução ótima. Neste critério, as técnicas podem ser subdivididas em métodos que utilizam derivadas e

métodos que não utilizam derivadas (ditos métodos de busca direta ou de pesquisa). No primeiro tipo, a direção de otimização é dada avaliando-se as derivadas da função objetivo; já nas técnicas de busca tal direção é determinada somente por avaliações sucessivas da função objetivo.

4.7. Métodos de Minimização Não Linear com Restrições

A seguir mostraremos uma descrição básica dos métodos de programação não linear, aplicáveis, em primeira análise ao problema de otimização de parâmetros de usinagem em operações de torneamento.

4.7.1. Métodos por Aproximação Linear

4.7.1.1. Método do Gradiente Generalizado Reduzido

O Método do Gradiente Reduzido foi originalmente dado por Wolfe (1962) para um função objetivo não linear com restrições lineares. A generalização do método para acomodar não linearidades foi obtido primeiramente com Abadie [22].

O problema não linear com restrições pode ser estabelecido a seguinte forma:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar: } f(x); \quad x = [x_1, \dots, x_n] \quad , \quad x \in R^n \\ &\text{Sujeito à: } \quad h_m(x) = 0, \quad m = 1, 2, \dots, M \\ &\quad \quad \quad A \leq x \leq B \end{aligned} \tag{56}$$

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 através da seguinte transformação:

$$\begin{aligned} h_k(x) &= g_k(x) - S_k = 0 \\ 0 \leq S_k &\leq \infty, \quad k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (57)$$

onde as variáveis S_k são variáveis não negativas de ajuste, que serão incluídas no conjunto original de variáveis.

Dividindo-se o conjunto original de variáveis em duas classes, conhecidas como variáveis de estado (y) e variáveis de decisão (z), temos:

$$\begin{aligned} x &= [z, y]^t \\ \text{onde } z &= [z_1, \dots, z_Q]^t \\ y &= [y_1, \dots, y_M]^t, \quad Q = N - M \end{aligned} \quad (58)$$

Esta divisão permite que o problema original seja substituído, através da técnica de eliminação, manipulando-se as "L" restrições de igualdade:

$$\text{Minimizar: } f(x); \quad x = [x_1, \dots, x_n], \quad x \in R^n$$

$$\text{Sujeito à: } h_l(x) = 0, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (59)$$

Reformulando cada restrição em (59) para definir explicitamente uma variável de projeto:

$$h_l(x) = x_l, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (60)$$

Substituindo-se na função objetivo original, temos:

$$f(h_1, h_2, \dots, h_L, x_{L+1}, \dots, x_N) \quad (61)$$

que se constitui numa nova função objetivo sem restrições nas N-L variáveis de decisão, sendo as demais as variáveis de estado. Note que nós podemos procurar o mínimo desta nova função, ajustando as variáveis de estado para manter a viabilidade.

Supondo:

$$\nabla f(z^0) = \left[\frac{\delta f(x)}{\delta z_1}, \dots, \frac{\delta f(x)}{\delta z_Q} \right]' \quad (62)$$

$$\nabla f(y^M) = \left[\frac{\delta f(x)}{\delta y_1}, \dots, \frac{\delta f(x)}{\delta x_M} \right]' \quad (63)$$

$$\frac{\delta h}{\delta z} = \begin{bmatrix} \frac{\delta h_1}{\delta z_1} & \dots & \frac{\delta h_1}{\delta z_Q} \\ \frac{\delta h_M}{\delta z_1} & \dots & \frac{\delta h_M}{\delta z_Q} \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$\frac{\delta h}{\delta z} = \begin{bmatrix} \frac{\delta h_1}{\delta z_1} & \dots & \frac{\delta h_1}{\delta z_Q} \\ \frac{\delta h_M}{\delta z_1} & \dots & \frac{\delta h_M}{\delta z_Q} \end{bmatrix} \quad (65)$$

Derivando-se as expressões de $f(x)$ e $h(x)$, temos:

$$\begin{aligned} df &= \nabla f(z^0).dz + \nabla f(y^M).dy \\ dh &= \frac{\delta h}{\delta z} dz + \frac{\delta h}{\delta y} dy = 0 \end{aligned} \quad (66)$$

Isolando-se dy em (39), e substituindo na anterior, temos:

$$\frac{df}{dz} = \nabla f(z^0) - \nabla f(y^M) \cdot \frac{\delta h^{-1}}{\delta y} \frac{\delta h}{\delta z} \quad (67)$$

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 exeqüibilidade da busca.

O fluxograma a seguir mostra o algoritmo do Método do Gradiente Reduzido.

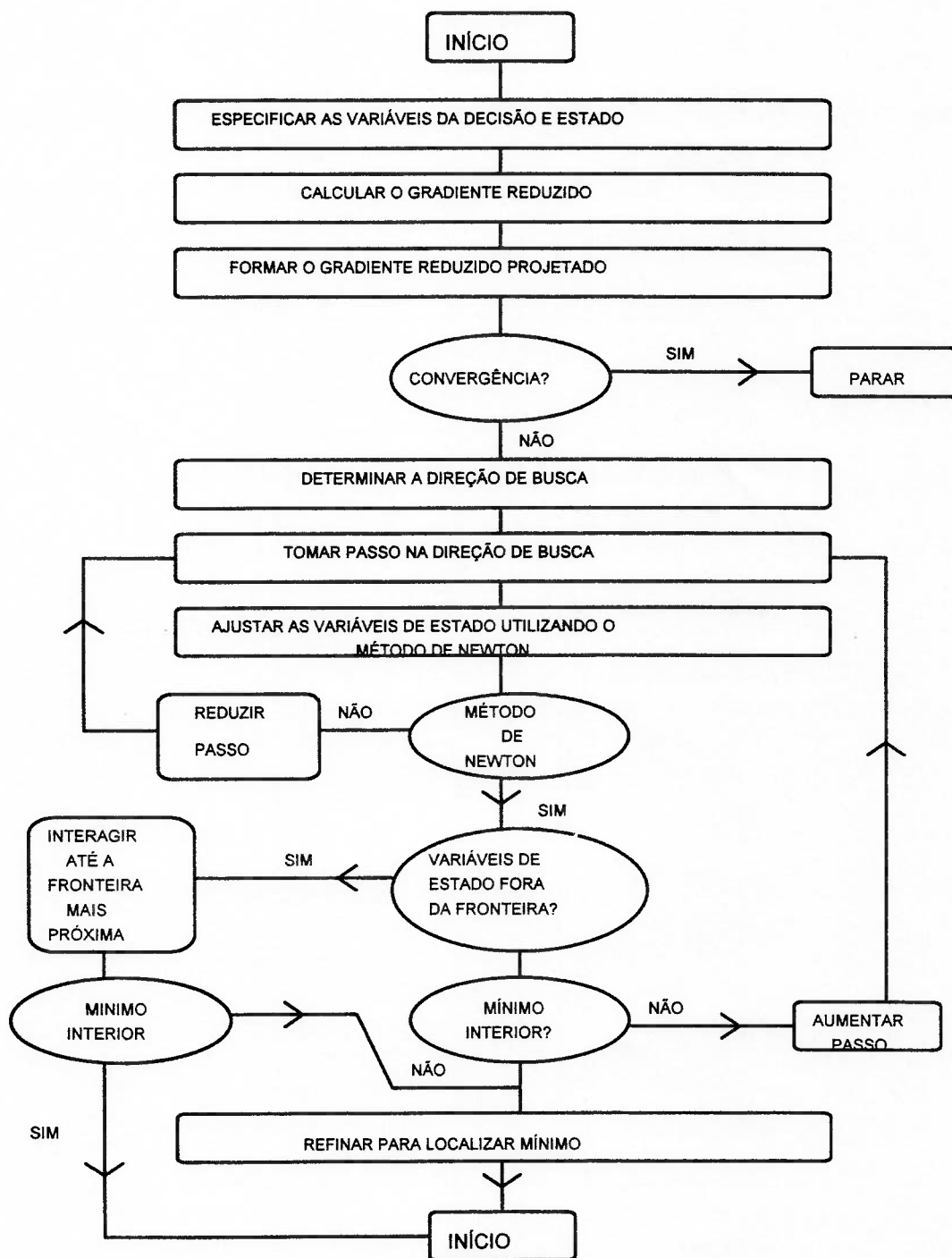


Figura 29 - Fluxograma simplificado do método GRG (adaptado da referência [22])

4.7.2. Métodos por Funções Penalizadoras

4.7.2.1. Técnica de Minimização Seqüencial 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 com aquelas expressas nas equação (53) onde as restrições de igualdade devem ser lineares se a convergência quiser ser garantida.

A idéia básica do SUMT é resolver repetitivamente uma seqüência 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, conforme se segue:

$$P(x^k, r^k) = f(x) + \frac{1}{r^k} \sum_{i=1}^m h_i^2(x^k) - r^k \sum_{i=m+1}^p \ln g_i(x^k) \quad (68)$$

A minimização da função (68) é iniciada em um ponto interior (ou de fronteira), $x^{(0)}$; na seqüência $r^{(0)}$ é computado e $x^{(1)}$ é determinado pela minimização de $P(x, r^{(0)})$. Calcula-se novamente $r^{(1)}$ e continua-se a iteração.

O fluxograma a seguir mostra o algoritmo do Método SUMT.

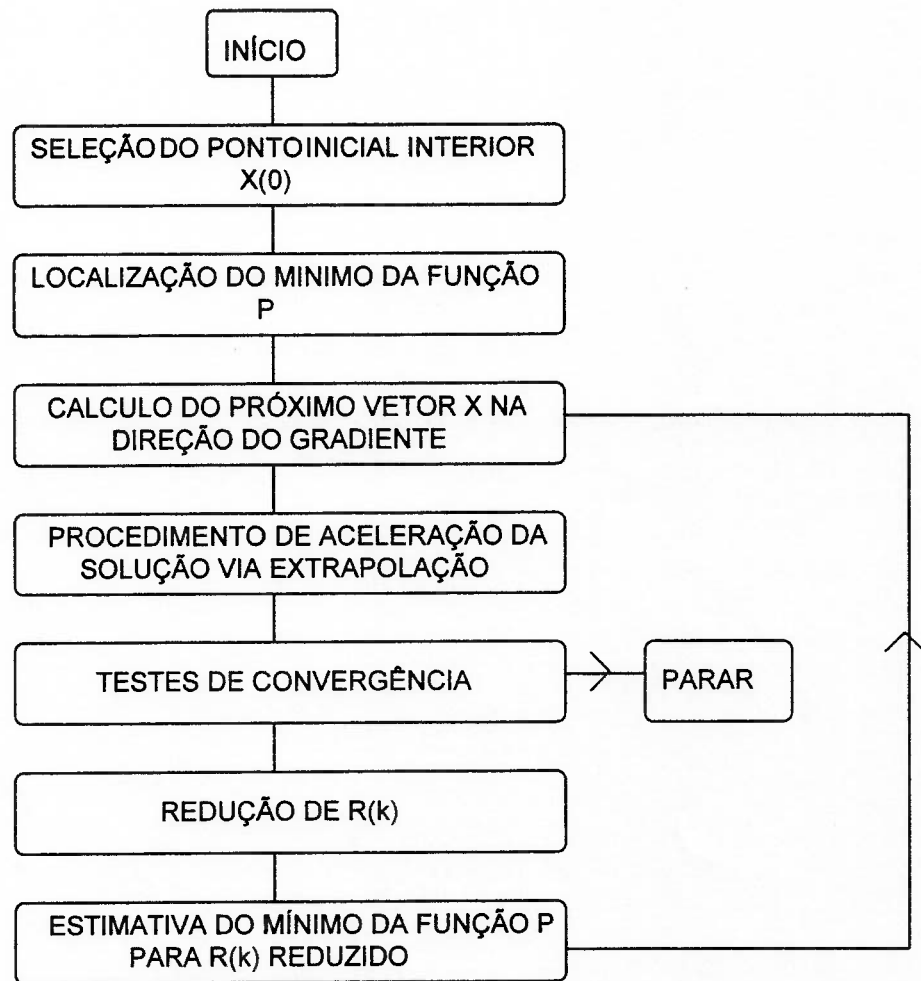


Figura 30 - Fluxograma simplificado do método SUMT (adaptado da referência [26])

4.7.3. 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 [26].

Como resultado desta estratégia, o problema da equação (53) pode ser substituído por um problema mais simples, porém tendo a mesma solução:

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

Sujeita à: $\phi^{(k)} - T(x) \geq 0$ (69)

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 [26]. 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 de gravidade dos vértices restantes, achando-se valores melhorados de $f(x)$. Esta substituição sucessiva de pontos continua até a obtenção do mínimo. A figura 31 mostra uma representação esquemática do busca, para duas variáveis independentes.

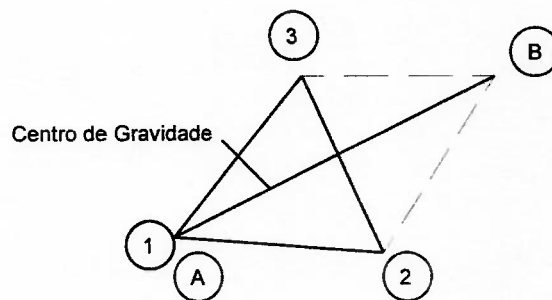


Figura 31 - Representação esquemática do poliedro flexível (adaptado da referência [26])

4.8. Comparação entre os Métodos para Minimização das Condições Econômicas de Corte

Qual método é o melhor para solução de um problema de programação não linear? Na realidade, trata-se de uma pergunta difícil de responder visto existirem diversos critérios para ponderação.

Especificamente, foram estipulados os seguintes 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 preparação de dados;
- Simplicidade no uso.

4.8.1. Análise Qualitativa

A tabela 9 efetua uma comparação entre as características principais dos métodos de programação não linear já discutidos.

Técnica Geral	Aproximação Linear	Funções Penalizadoras	Tolerância Flexível
Método	GRG	SUMT	
Função Objetivo	Linear e Não Linear	Linear e Não Linear	Linear e Não Linear
Acomoda Restrições de Igualdade	Linear e Não Linear	Linear	Linear e Não Linear
Acomoda Restrições de Desigualdade	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

Tabela 9 - Características principais dos métodos discutidos (adaptado da referência [26])

Observe que os três métodos podem ser aplicados na obtenção dos mínimos para as condições de máxima produção (mínimo tempo de produção) ou mínimo custo, descritos por (27) e (47), respectivamente.

4.8.2. Análise Quantitativa

Himmelblau [26] agregou estudos feitos por Colville sobre a eficiência de alguns códigos de programação não linear. Para tanto este subdividiu os problemas em classes, conforme tabela 10.

Restrições de Igualdade			
Restrições de Desigualdade	Não Linear	Linear	Nenhuma
Não Linear	A1	B1	C1
Linear	A2	B2	D
Nenhuma	A3*	C2	E

Tabela 10 - Classificação dos problemas de otimização (adaptado da referência [26])

Os problemas cuja formulação estão descritos no capítulo anterior pertencem a classe A3, ou seja, possuem restrições de igualdade não lineares.

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 [26].

Também Eskicioglu [17], ao comparar os três métodos para uma operação de fresamento frontal cuja função objetivo é semelhante àquelas obtidas para torneamento. Ele obteve os resultados mostrados na tabela 11.

Programas	Mínimo		Máxima	
	Tempo de Execução (s)	Custo Tamanho do Arquivo de Saída (Bytes)	Tempo de Execução (s)	Produção Tamanho do 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

Tabela 11 - Resultados comparativos obtidos para diferentes métodos de minimização

(adaptado da referência [17])

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 rodaram um microcomputador IBM - PC 286 com coprocessador matemático [17].

4.9. Observações e Conclusões

- Os três métodos podem ser aplicados na obtenção dos mínimos para as condições de máxima produção (mínimo tempo de produção) ou mínimo custo, descritos por (27) e (47), respectivamente;
- Segundo dados de Himmelblau [26], os métodos GRG e SUMT convergem mais rapidamente para a solução em problemas classe A3 que o método da Tolerância Flexível. Para aplicações cuja rapidez da resposta seja imperativa, tais métodos são mais recomendáveis;
- Já para Eskicioglu [17], 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. Também citou que para alguns pontos de início, tanto o SUMT com o FLEXIPLEX falharam na convergência e terminaram em um ponto distinto da solução ótima;
- Existem disponíveis no departamento dois programas que implementam o método GRG para uso imediato:
 - OPT3.2, codificado em FORTRAN, e desenvolvido pelo Centro de Produtividade em Projeto da Universidade de Missouri (1989);
 - GAMS, com compilador próprio, e desenvolvido pela Universidade do Texas (1988).

CAPÍTULO 5

ANÁLISE E PROJETO DO SISTEMA

5.1. Delimitação do Projeto

O projeto do sistema proposto foi desenvolvido à princípio para operações de torneamento externo, incluindo faceamento, torneamento cilíndrico, cônico e de perfil (composto); porém permite agregar outros módulos no futuro.

Este possui as seguintes funções básicas:

- Selecionar porta-ferramentas e insertos de metal duro para operações de torneamento externo;
- Determinar os parâmetros ótimos de usinagem (velocidade, avanços e profundidades 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.

5.2. Projeto Lógico

5.2.1. Diagrama de Fluxo de Dados

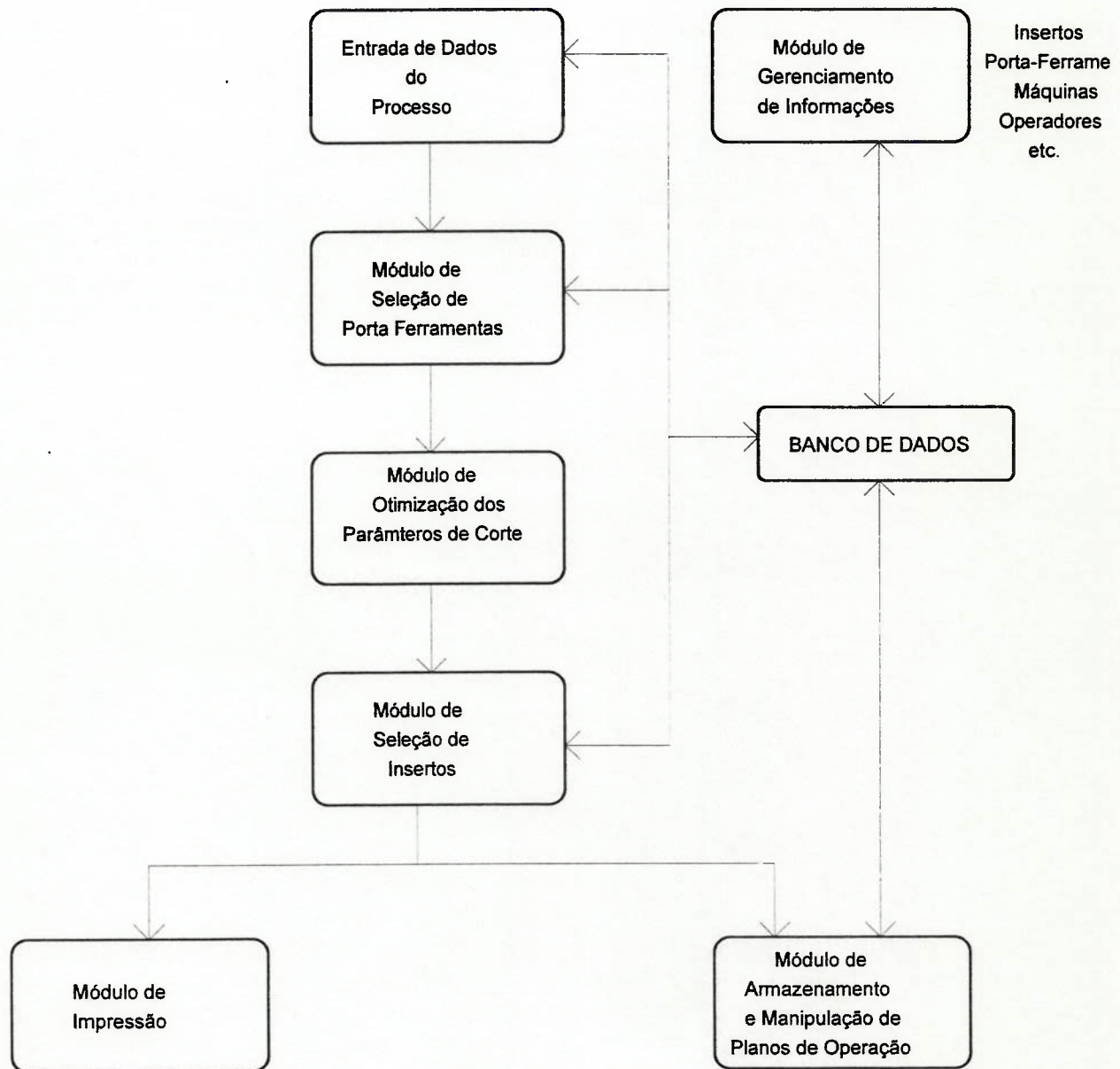


Figura 32 - Diagrama de fluxo de dados do programa

5.2.2. Desenvolvimento dos Algoritmos Básicos

O algoritmo descrito a seguir implementa as formulações de economia nos processos de torneamento, seleção de ferramentas de metal duro e otimização de parâmetros, descritos nos capítulos 2, 3 e 4, respectivamente. Mostra também as tarefas realizadas pelo programa (representadas pelo símbolo =>) e as escolhas feitas pelo usuário (representadas pelo símbolo •).

MÓDULO DE ENTRADA DE DADOS DO PROCESSO

- Entrada de Dados Globais:
 - . Denominação da peça;
 - . Número do desenho;
 - . Peso;
 - . Material;
 - . Característica do Material;
 - . Dureza;
 - . Número de Operações Necessárias para a peça (NO);
 - . Número Total de Peças no Lote (Z).

- Entrada de Dados Complementares:
 - . Operador;
 - . Máquina.

=> Os campos que estão sublinhados serão disponibilizados em forma de lista, obtida diretamente dos respectivos cadastros.

- Selecionar o processo de usinagem, dentre aqueles disponíveis, através de ilustrações:
 - . Torneamento (único implementado);
 - . Fresamento;
 - . Furação.

- Selecionar a modalidade do processo, através de ilustrações:
 - . Torneamento geral externo (escopo do programa);
 - . Torneamento geral interno;
 - . Sangramento, abertura de canais e perfilamento;
 - . Rosqueamento.

- Selecionar a modalidade de operação desejada, através de figuras:
 - . Torneamento cilíndrico;
 - . Faceamento;
 - . Torneamento cônico;
 - . Torneamento composto.

- Inserir dados geométricos necessários:
 - . Se for torneamento cilíndrico, inserir: l_a , comprimento medido na horizontal; d , diâmetro do blank; K_r , ângulo de posicionamento necessário.
 - . Se for faceamento, inserir: d_1 , diâmetro externo do blank; d_2 , diâmetro interno do blank; K_r , ângulo de posicionamento necessário.
 - . Se for torneamento cônico, inserir: d_1 , diâmetro menor; d_2 , diâmetro maior; K_r , ângulo de posicionamento necessário; e l_a , comprimento medido na horizontal.
 - . Se for, torneamento composto ou de perfil, inserir: n_{arestas} , número de vértices a definir; d_j , diâmetros nos vértices; l_{a_k} , comprimentos entre vértices consecutivos medidos na horizontal (vide tabela 12).

	di	lak
vértice 1		
vértice 2		
.		
.		
vértice n		

Tabela 12 - Dados geométricos para operações de torneamento composto

- Definir o tipo de operação (acabamento ou desbaste). Se for acabamento, inserir o valor de da rugosidade R_a .

MÓDULO DE SELEÇÃO DO PORTA-FERRAMENTAS

- Escolher critérios para seleção do porta-ferramenta (tabela 13):
 - . Fluxo de Cavaco;
 - . Tempo de Troca de Inserto;
 - . Acessabilidade;
 - . Custo de Aquisição;
 - . Disponibilidade em Estoque.

Critérios	Prioridade		
	Alta (10)	Média (5)	Baixa (1)

Tabela 13 - Critérios para escolha do porta-ferramentas

- Definir o deslocamentos do porta-ferramenta.
 - . À direita;
 - . À esquerda;

. Bilateral.

⇒ Procurar no banco de dados de porta-ferramentas as possíveis movimentações para a operação requerida.

⇒ Procurar no banco de dados de porta-ferramentas, aqueles que atendem as necessidades geométricas do processo:

- . Em termos de ângulo de posicionamento requerido pela operação (em operações de faceamento e torneamento cilíndrico);
- . Em termos do ângulo máximo em mergulho (aplicável em operações de torneamento cônico e composto).

⇒ Escolher o tipo de porta-ferramenta (e respectivo sistema de fixação) mais adequado, segundo os critérios acima definidos

⇒ Mostrar as ilustrações e dados dos porta-ferramentas com seus sistemas de fixação e as geometrias de inserto com as três maiores médias ponderadas.

- Selecionar o porta-ferramenta mais adequado.

MÓDULO DE OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE

- Escolher o critério de otimização: Máxima Produção ou Mínimo Custo e os valores máximos e mínimos para a vida da ferramenta.

⇒ Se a operação for acabamento, pesquisar em tabela o valor equivalente em R_f a partir da rugosidade superficial R_a .

⇒ Calcular o diâmetro equivalente para a operação em questão, utilizando as formulações vistas no capítulo 2.

⇒ Calcular o comprimento de corte l :

- Torneamento cilíndrico: $l = la$;

(70)

- Faceamento: $l = \left(\frac{d_1 - d_2}{2}\right)$;

(71)

- Torneamento cônico: $l = \sqrt{\left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^2 + la^2}$;

(72)

- Torneamento Composto: $l = \sum_{\substack{i=1 \\ k=1 \\ j=i+1}}^{n-1} \sqrt{\left(\frac{d_j - d_i}{2}\right)^2 + la_k^2}$

(73)

⇒ Calcular as constantes de custo C1, C2 e C3:

$$C_2 = S_h + S_m$$

$$C_{ii} = C_2 \frac{(t_s + t_a)}{60}$$

$$C_{ip} = C_2 \frac{t_p}{Z \cdot 60}$$

$$C_3 = C_{if} + \frac{t_{if}}{60} C_2$$

$$C_{if} = \left(\frac{V_{pf}}{n_{pf}} + \frac{V_{inserto}}{n_{arestas}} \right)$$

$$C_1 = C_{ii} + C_{ip}$$

(74)

⇒ Elaborar o arquivo de entrada para o programa de otimização conforme modelos dispostos em anexo, obtendo os valores necessários nos bancos de dados e tabelas.

. Se o critério for de Máxima Produção, a função objetivo será o tempo de fabricação (t_f), item (27):

. Se o critério for de Mínimo Custo, a função objetivo será o custo de fabricação (K_p):

. As restrições vistas no capítulo 2 também devem ser seguidas

⇒ Executar o programa de otimização e monitorar o processo.

⇒ Ler o arquivo de saída do programa, obtendo os valores de a, V_c, p, r_e, T e t_f ou K_p , conforme critério escolhido. Também mostrar os resultados do "solver" - Solver Status, Model Status, NORM RG/NORM PI.

⇒ Comentar os resultados da otimização com base nos valores do sumário [28].

MÓDULO DE SELEÇÃO DO INSERTO

- Definir critérios para a seleção da geometria de quebra-cavaco (tabela 14):
 - . Corte intermitente;
 - . Tendência a vibrações;
 - . Potência limitada;
 - . Disponibilidade;
 - . Custo.

Critérios		Prioridade	
	Alta (10)	Média (5)	Baixa (1)

Tabela 14 - Critérios para escolha do inserto

- ⇒ Buscar o valor da classe básica tendo-se os valores de V_c e a , que juntamente com o material usinado, definem a classes mais adequada. Caso não conste no banco de dados, pesquisar simplesmente por V_c
- ⇒ Migrar informações já obtidas da seleção do porta-ferramenta, ou seja, os campos:
- . 1- forma do inserto;
 - . 2- ângulo de folga;
 - . 9- direção de avanço;
 - . tipo de porta-ferramentas (conforme fabricante).
- ⇒ Ajustar raio de ponta para o valor mais próximo existente no banco de dados.
- ⇒ Pesquisar na tabela a opção 10 - especificação do fabricante, entrando com o material, área de trabalho (definida por a e p) e o tipo de porta-ferramenta. Obter a geometria as três geometrias de maior índice.
- ⇒ Determinar o comprimento da aresta (l_i), com base na constante disposta na tabela de insertos e o comprimento da aresta específica de corte (L_i).
- ⇒ Verificar aqueles insertos, com a geometria especificada, que atendem ao comprimento calculado. Tomar aqueles com comprimento maior mais próximo.
- ⇒ Pesquisar no banco de dados os insertos que se adaptam as características acima e com as três melhores ponderações.
- ⇒ Mostrar a designação dos insertos encontrado.
- Selecionar o inserto mais adequado

MÓDULO DE ARMAZENAMENTO E MANIPULAÇÃO DE PLANOS DE PROCESSO

A tela da saída deste módulo contém:

- . Cabeçalho com identificação da peça e suas características;
- . Identificação da máquina e suas características;
- . Dados geométricos do processo;
- . Parâmetros de corte (a, V_c, p);
- . Especificações dos insertos, conforme norma ISO;
- . Especificações dos porta-ferramentas, conforme norma ISO;
- . Custo estimado de fabricação para aquela etapa;
- . Tempo estimado de fabricação para aquela etapa;
- . Resultados do solver de otimização.

⇒ Gravar dados em arquivo para posterior impressão ou consulta.

⇒ Retornar ao passo inicial

MÓDULO DE IMPRESSÃO

- Relatórios dos cadastros existentes (materiais, insertos, porta-ferramentas, máquinas, operadores etc.).
- Relatórios dos planos de processo para uma determinada peça.

MÓDULO DE GERENCIAMENTO DE INFORMAÇÕES

- Deve permitir inclusão, exclusão e alteração de registros no bancos de dados do cadastro.

5.2.3. Projeto das Telas de Entrada e Saída

As telas de entrada e saída foram elaboradas de modo a facilitar a interação com o usuário. Utilizaram-se recursos de ilustrações para melhor identificar o componente ou facilitar a entrada de dados. No total foram elaboradas 16 telas, conforme mostrado a seguir:

1. Tela Principal



2. Módulo de Entrada de Dados

2.1. Entrada de Dados Principal

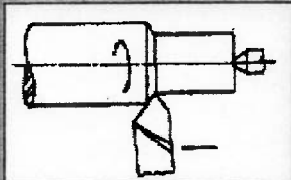
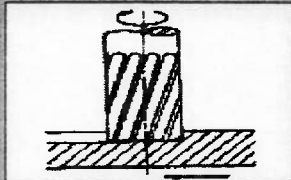
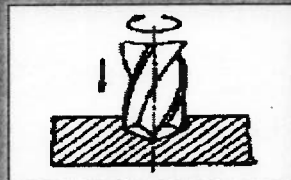
Entrada de Dados

Nome da peça	Peca 1
Nº do desenho	1234
Peso (Kg)	1
Material	AÇO CARBONO
Característica do Material	C=0,15%
Dureza	380
Tamanho do Lote	2000
Quantidade de operações	1

OK Cancelar

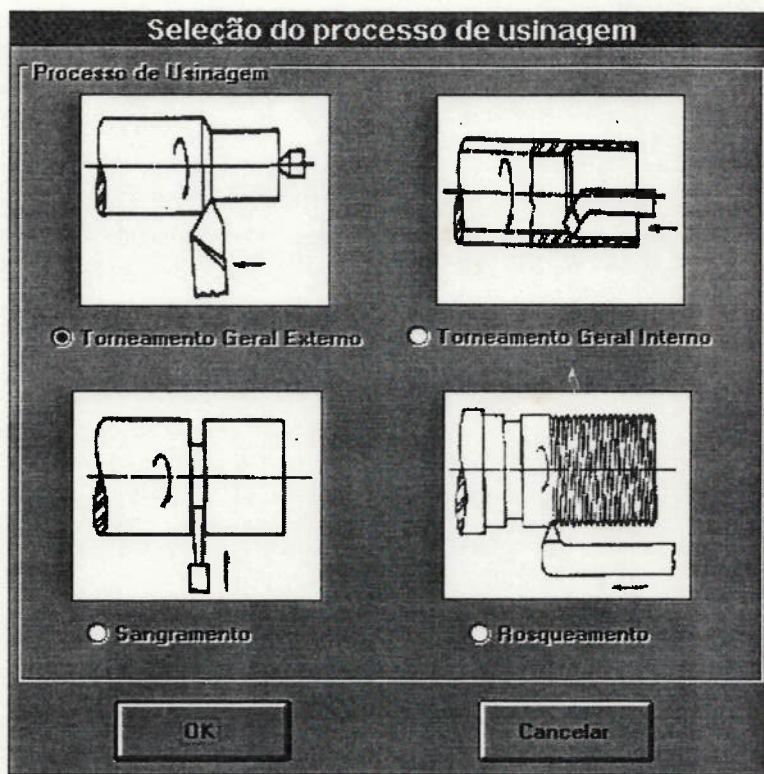
2.2. Seleção do Processo de Usinagem 1

Seleção do processo de usinagem

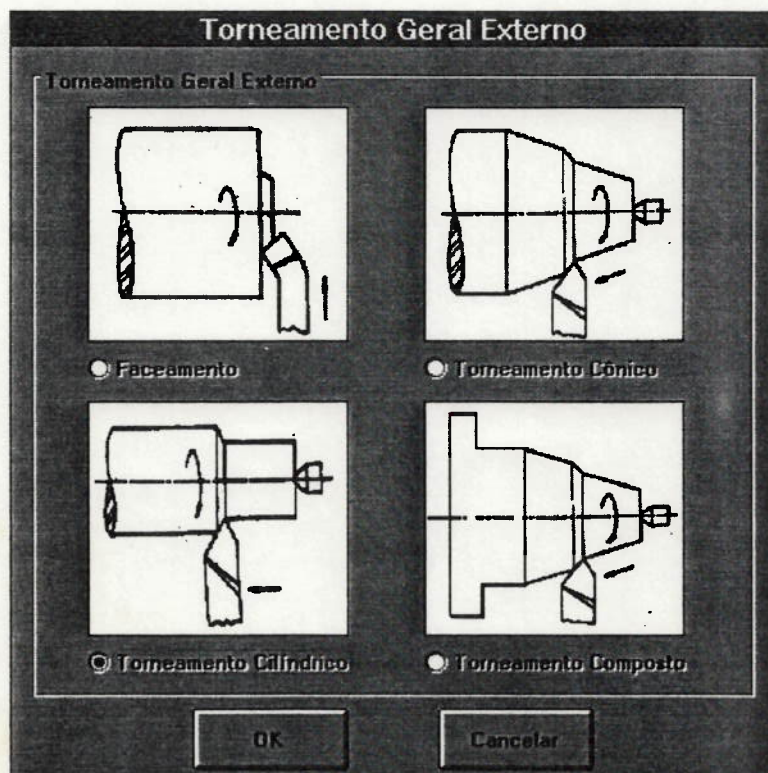
	
<input checked="" type="radio"/> Torneamento	<input type="radio"/> Fresamento
	Máquina TORNO TRAUB TND360-TX
<input type="radio"/> Furação	Operador JOSÉ DA SILVA

OK Cancelar

2.3. Seleção do Processo de Usinagem 2



2.4. Seleção do Tipo de Torneamento Geral Externo



2.5. Dados Geométricos

Dados Geométricos

Peça: Peça teste Nº desenho: 1

Descrição da operação
Cilindrar até 300 mm

Dados Geométricos

	Comprimento (mm)	300
	Diâmetro do Blank (mm)	30
	Diâmetro 1 (mm)	
	Diâmetro 2 (mm)	
	Ângulo de posicionamento (graus)	
	Rugosidade superficial (Ra)	

Tipo de Operação

Acabamento

Desbaste

OK Cancelar

3. Módulo de Seleção de Porta-Ferramentas

3.1. Critérios para Seleção do Porta-Ferramenta

Seleção do Porta Ferramentas e Geometria do inserto

<i>Critérios</i>	<i>Prioridade</i>			
	<i>Alta</i>	<i>Média</i>	<i>Baixa</i>	
Fluxo de Cavaco	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tempo de troca de Inserto	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Acessabilidade	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Custo de Aquisição	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Disponibilidade	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

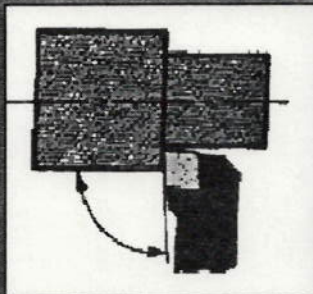
Deslocamentos

OK Cancelar

3.2. Escolha do Porta-Ferramenta

Opções de Porta-Ferramenta

Informações



Designação: PCLNR 2020K12
 Forma do inserto: C
 Custo de aquisição: 100.00
 Disponível: Sim
 Vida Média: 500

Escolha dos Porta Ferramentas

← [] → 1/4

Tipos de Porta Ferramentas

Tipo de Porta-Ferramenta: TMAXP
 Sistema de Fixação: P
 Média Ponderada: 114

Tipo de Porta-Ferramenta: TMAXP
 Sistema de Fixação: M
 Média Ponderada: 104

Não encontrado

OK

Cancelar

4. Módulo de Otimização de Parâmetros de Corte

4.1. Critérios para Otimização

Otimização dos parâmetros de Usinagem

Entrada de dados

Vida máxima de ferramenta
60

Vida mínima de ferramenta
20

Critérios

Mínimo Custo

Máxima Produção

OK

Cancelar

4.2. Resultados da Otimização

Resultados da Otimização

Variáveis:

Avanço = .8 mm/rot
Profundidade = 4.135 mm
Velocidade de Corte = 120.908 m/min
Vida de Ferramenta = 20 min
Tempo de Fabricação = 3.325 min

Considerações:

O programa de otimização terminou normalmente.
Um mínimo local foi encontrado.
O Programa não encontrou dificuldade na obtenção da solução.

OK

5. Módulo de Seleção de Insertos

5.1. Critérios para Seleção de Insertos

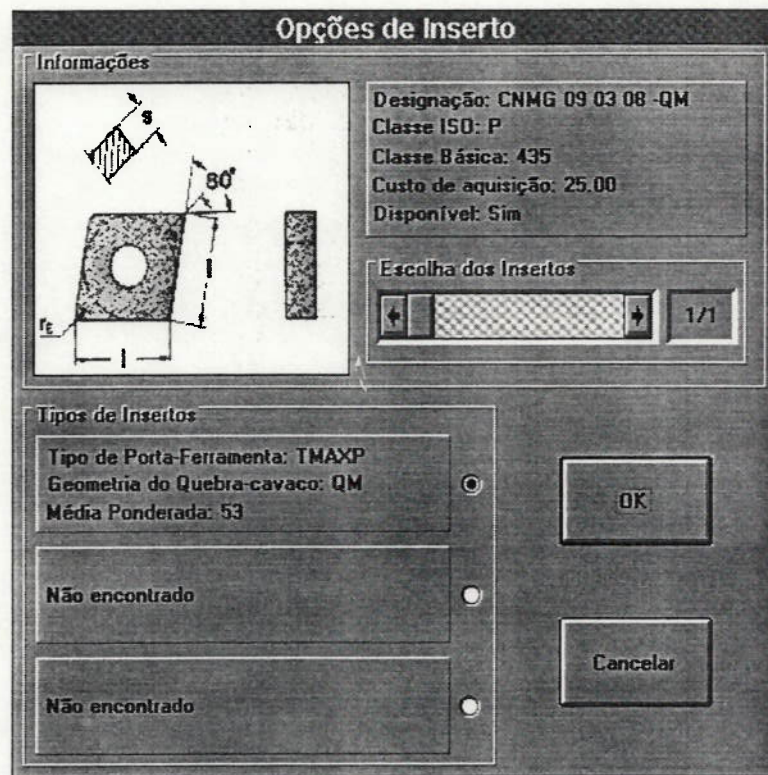
Seleção do inserto

<i>Critérios</i>	<i>Prioridade</i>			
	<i>Alta</i>	<i>Média</i>	<i>Baixa</i>	
Tendência a Vibrações	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Polência Limitada	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Custo de Aquisição	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Disponibilidade	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

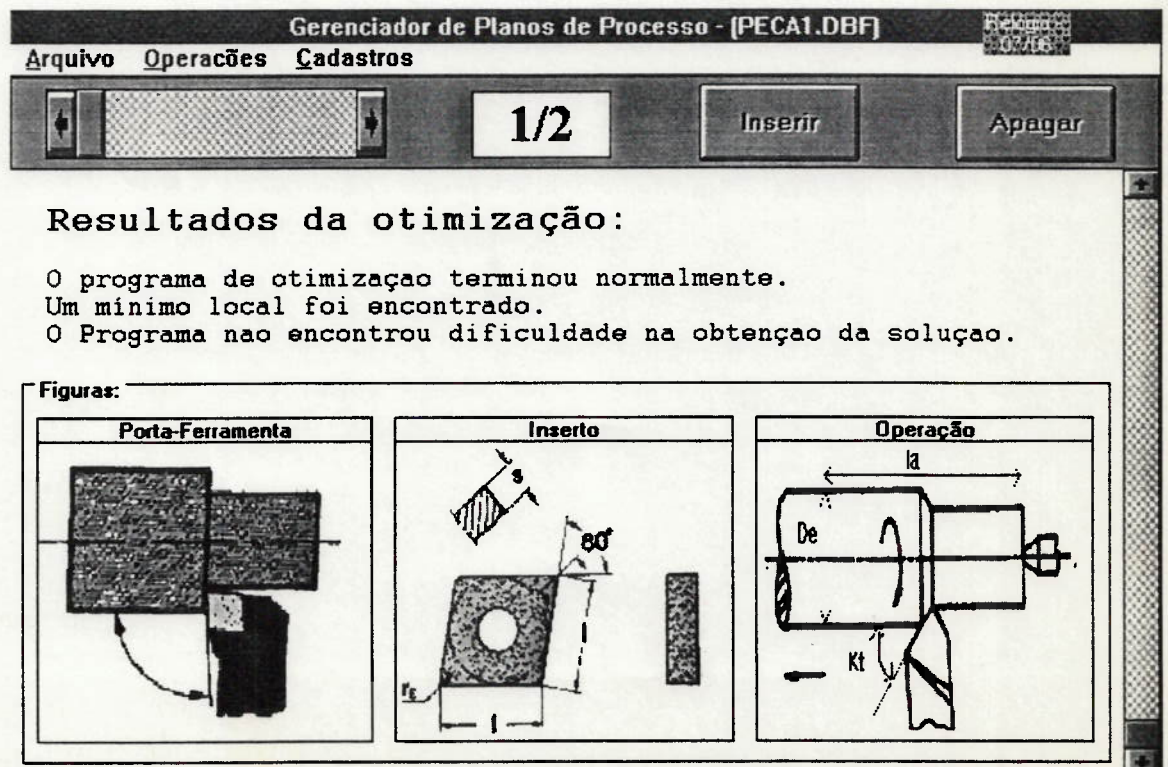
Corte Intermitente

OK **Cancelar**

5.2. Escolha do Inserto



6. Módulo de Armazenamento e Manipulação de Planos de Processo



7. Módulo de Gerenciamento de Informações

Gerenciador de Banco de Dados

Arquivo Bancos de Dados

Registro **1** Apagar Alterar Novo

Insertos

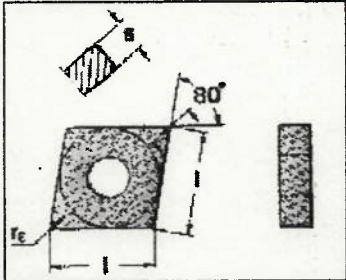
Designação do Inseto CNMG 09 03 04 -QM	Angulo de Folga da Aresta Principal N	Raio de Ponta (mm) 0.40
Forma do Inseto C	Classe de Tolerância em x e d M	Angulo da Saída
	Tipo de Inseto G	Direções de Avanço
Nome da Figura C:\projeto\insertos\CNMG1.BM	Comprimento da Aresta de Corte (mm) 9	Opção do Fabricante QM
Tipo de Porta-Ferramenta	Largura do Inseto (mm) 3	Número de Arestas de Corte 4
	Classe do inserto 415	Custo de Aquisição (\$) 50.00
	Constante da Aresta de Corte	

Tabela de Insertos

5.2.4. Projeto dos Arquivos

Os arquivos foram dimensionados de forma a armazenarem todas as informações necessárias aos diversos módulos. No total foram criados 14 (quatorze) arquivos, conforme descrito a seguir:

1. Insertos;
2. Porta-Ferramentas;
3. Máquinas e Torretas de Fixação de Ferramentas;
4. Operadores;
5. Tempos de Fabricação;
6. Planos de Processo;
7. Conversão de rugosidade;
8. Dados Tecnológicos 1;

9. Dados Tecnológicos 2;
10. Escolha de Tipos de Porta-ferramenta e Sistemas de Fixação;
11. Determinação da Área de Trabalho;
12. Correção da Velocidade de Corte Devido a Dureza do Material;
13. Correção da Velocidade de Corte Devido a Vida da Ferramenta;
14. Escolha do Tipo de Quebra-Cavaco.

Destes arquivos, os 6 (seis) primeiros são passíveis de manipulação pelo próprio sistema e os demais são auxiliares cuja alteração se pode fazer através de um gerenciador de bancos de dados compatível com formato Dbase IV. Em anexo, consta a listagem da estrutura destes bancos de dados.

5.3. Projeto Físico

5.3.1. Codificação dos Algoritmos

Os algoritmos foram codificados utilizando-se o ambiente para programação em Windows, chamado Visual Basic. Esta linguagem, desenvolvida pela Microsoft, possui as seguintes características:

- Trata-se de uma linguagem de programação de uso genérico e estruturada. Sendo orientada a eventos, o Visual Basic reconhece as ações do usuário sobre o aplicativo (cliques de mouse, teclas pressionadas), chamando, automaticamente, o procedimento apropriado para tratar aquele evento.
- As interfaces com o usuário podem ser criadas em pouco tempo, sem que seja escrita uma única linha de programa. As telas de apresentação da aplicação são preparadas seleccionando-se os objetos da caixa de ferramentas e colocando-os no

formato. Associa-se a cada entidade assim gerada, um conjunto de propriedades que regem sua aparência.

- A linguagem suporta modernas estruturas de controle ("for - next", "while", "if then else")
- A linguagem também conta com recursos de compilação incremental que detecta erros de sintaxe em tempo de desenvolvimento, ferramentas de depuração e janelas que permitem testes de variáveis em tempo de execução.
- A linguagem é totalmente aberta, permitindo a inclusão de outras funções.

Além do Visual Basic, utilizou-se programa próprio para o desenvolvimento de aplicações com banco de dados chamado Q+E. Este permite que sejam implementadas funções de manipulação de bancos de dados, tais como geração de arquivos; apagar, alterar ou incluir registros em banco de dados.

CAPÍTULO 6

TESTES E RESULTADOS

6.1. Exemplo de Aplicação do Programa para uma Operação de Torneamento Cilíndrico em Desbaste

O exemplo a seguir foi retirado da referência [39], pág 90 a 101.

São dadas informações sobre o processo:

Dados Gerais	
Peça material	Fornecida faceada e centrada nos topos, aço ABNT8640, $\phi=100$ mm, laminado e HB = 190
Operação	Com a peça presa na placa universal e em ponto giratório, desbastar para $d_1 = 95$ mm, em um único passe, no comprimento $l_a = 300$ mm
Máquina	Torno paralelo universal Gama de rotações disponíveis: 25 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100 - 125 - 160 - 200 - 250 - 315 - 400 - 500 - 630 - 800 - 1000 - 1250 - 1600 rpm
Ferramenta	Formato ISO - 6, com pastilha de metal duro soldada, classe P20 - geometria $K_t = 90^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\gamma = 6^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $r = 1$ mm
Condições de usinagem	$a = 0.40$ mm/volta e $p = 2.5$ mm, sem refrigerante de corte

Tabela 15 - Dados tecnológicos para o exemplo de aplicação

e a curva de vida da ferramenta, onde se pode obter as constantes de Taylor:

$$K = 8.8 \cdot 10^6$$

$$x = 2.71$$

e alguns dados econômicos:

Dados Econômicos	Valor
Máquina e mão de obra	
Salário do operário = salário máquina, inclusive sobretaxas, $C_2 = S_h + S_m$, US\$/hora	8.5
Ferramenta	
Custo da ferramenta por vida, K_{ff} , US\$/aresta	1.4
Dados auxiliares	
Tempo de troca de ferramenta, t_{ft} , minutos	3.6
Tempo de aproximação e afastamento, t_a , min/peça	0.21
Tempos secundários, t_s , min/peça	0.36
Tempo de preparação, t_p , min/peça	25
Número total de peças no lote, Z	800

Tabela 16 - Dados econômicos para o exemplo de aplicação

6.1.1. Seleção do Porta-Ferramentas

Utilizando-se prioridades médias em todos os critérios de seleção, em operação de desgaste, deslocamento à direita e sem especificação do ângulo de posicionamento, o sistema escolheu os seguintes porta-ferramentas:

Número	Tipo	Sistema de fixação	Designação	Média ponderada
1	TMAXP	M	MTJNR 2020K	109
2	TMAXP	P	PCLNR 2020K	105
3	TMAXP	P	PRGNR 2020K	105
4	TMAXP	P	PRGCR 2020K	105
5	TMAXP	P	PSBNR 2020K	105

Tabela 17 - Resultados da seleção do porta-ferramenta

Dentre as opções existentes no banco de dados, mostradas abaixo:

Número	Tipo	Sistema de fixação	Designação
1	TMAXP	M	MTJNR 2020K
2	TMAXP	P	PCLNR 1616H
3	TMAXP	P	PCLNR 2020K
4	TMAXP	P	PCLNR 2525M
5	TMAXP	P	PCBNR 2525M
6	TMAXP	P	PCLNL 1616H
7	TMAXP	P	PCBNL 2525M
8	TMAXP	P	PDJNR 1616H
9	TMAXP	P	PRGNR 2020K
10	TMAXP	P	PRGCR 2020K
11	TMAXP	P	PSSNR 1616H
12	TMAXP	P	PSBNR 2020K

Tabela 18 - Conteúdo do banco de dados de porta-ferramentas

Observe que o sistema escolheu apenas aqueles porta-ferramentas que se prestam a operação de torneamento cilíndrico, com o deslocamento desejado. O sistema rejeitou aqueles porta-ferramentas que, embora aplicáveis a condição da operação, não possuíam as dimensões corretas da torreta porta-ferramenta da máquina em questão, admitidas no caso iguais a 25 mm, 25 mm e "K" (respectivamente, largura, espessura e comprimento). Vale citar que o comprimento denotado pela letra "K" é equivalente a 125 mm.

Escolhemos o porta-ferramentas PCLNR 2020K, que embora tenha tido média ponderada inferior, possui aplicações mais abrangentes.

6.1.2. Otimização dos Parâmetros de Corte

Utilizando-se das formulações propostas por Gilbert que determinam as vidas de ferramentas nas condições de máxima produção e mínimo custo e posteriormente da equação de Taylor, o autor chega as seguinte solução:

Elemento calculado	Condição de Máxima Produção	Condição de Mínimo Custo
Vida, min	6.2	23
Velocidade de corte, em m/min	186	115
Rotação da peça, em rpm	590	365
Tempo de corte, em min/peça	1.27	2.05
Tempo de troca de ferramenta, em min/peça	0.72	0.33
Tempos não produtivos, em min/peça	0.60	0.60
Tempo total de confecção da peça, em min/peça	2.59	2.98
Custo de corte, em US\$/peça	0.18	0.29
Custo de troca de ferramenta, em US\$/peça	0.38	0.18
Custo não produtivos, em US\$/peça	0.09	0.09
Custo total de confecção da peça, em US\$/peça	0.65	0.56

Tabela 19 - Resultados das condições de usinagem para mínimo custo e máxima produção (adaptado da referência [39])

Submetemos os mesmos dados contidos nas tabelas 15 e 16 para o programa e este forneceu os seguintes resultados:

Elemento calculado	Condição de Máxima Produção	Condição de Mínimo Custo
Vida, min	6.2	23
Velocidade de corte, em m/min	187	115
Rotação da peça, em rpm	625	384
Tempo de corte, em min/peça	0.48	0.78
Tempo de troca de ferramenta, em min/peça	0.28	0.12
Tempos não produtivos, em min/peça	0.60	0.60
Tempo total de confecção da peça, em min/peça	1.36	1.50
Custo de corte, em US\$/peça	0.09	0.11
Custo de troca de ferramenta, em US\$/peça	0.15	0.06
Custo não produtivos, em US\$/peça	0.09	0.09
Custo total de confecção da peça, em US\$/peça	0.31	0.26

Tabela 20 - Resultados das condições de usinagem para mínimo custo e máxima produção (calculado pelo programa)

Nesta solução, a vida da ferramenta fora limitada entre 5 e 60 minutos.

As demais condições de usinagem determinadas pelo programa estão dispostas a seguir:

Elemento calculado	Condição de Máxima Produção	Condição de Mínimo Custo
Profundidade de corte (mm)	2.43	3.97
Avanço de corte (mm/rot)	1.0	1.0

Tabela 21 - Profundidades e avanços para mínimo custo e máxima produção (calculado pelo programa)

Neste caso específico o sistema proporcionou uma melhora significativa nos tempos (e conseqüentemente custos) de fabricação neste exemplo. Algumas observações se fazem necessárias:

1. O sistema detectou ser possível utilizar um limite máximo de avanço superior aquele definido no exemplo (de 0.4 mm/rotação para 1.0 mm/rotação), com base nas informações contidas na tabela de dados tecnológicos 1. Desta forma, estabeleceu-se um valor de avanço igual ao limite máximo pelo módulo de otimização.
2. Os valores máximos e mínimos da vida da ferramenta devem ser limitados para que sejam válidos os dados contidos na tabela de dados tecnológicos 1, com as devidas correções.
3. Vale salientar que a potência do eixo árvore da máquina foi escolhida como sendo de 25 CV e a eficiência do processo estimada em 85%.

6.1.3. Verificação dos Valores Calculados

Para obtermos um parâmetro de comparação com os valores calculados pelo módulo de otimização, utilizamos um programa matemático (MATLAB) para avaliar o comportamento das funções de custo e tempo de fabricação em função das variáveis V_c e a . Os programa desenvolvido pode ser consultado em anexo.

Nas condições de máxima produção (função tempo de fabricação), temos o seguinte gráfico:

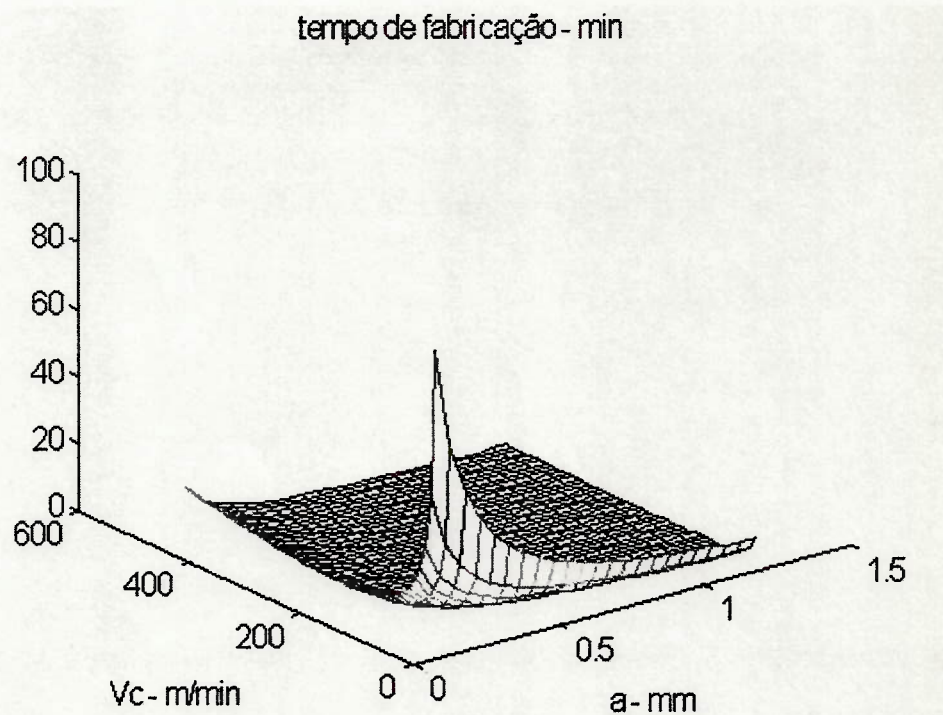


Gráfico 1 - Tempo de fabricação

Neste caso, obtivemos o valor mínimo da função em aproximadamente $a = 1.0$ mm/rotação e $V_c = 190$ m/min, respeitando-se os limites de avanço e velocidade de corte para o exemplo.

Nas condições de mínimo custo (função custo de fabricação), temos o seguinte gráfico:

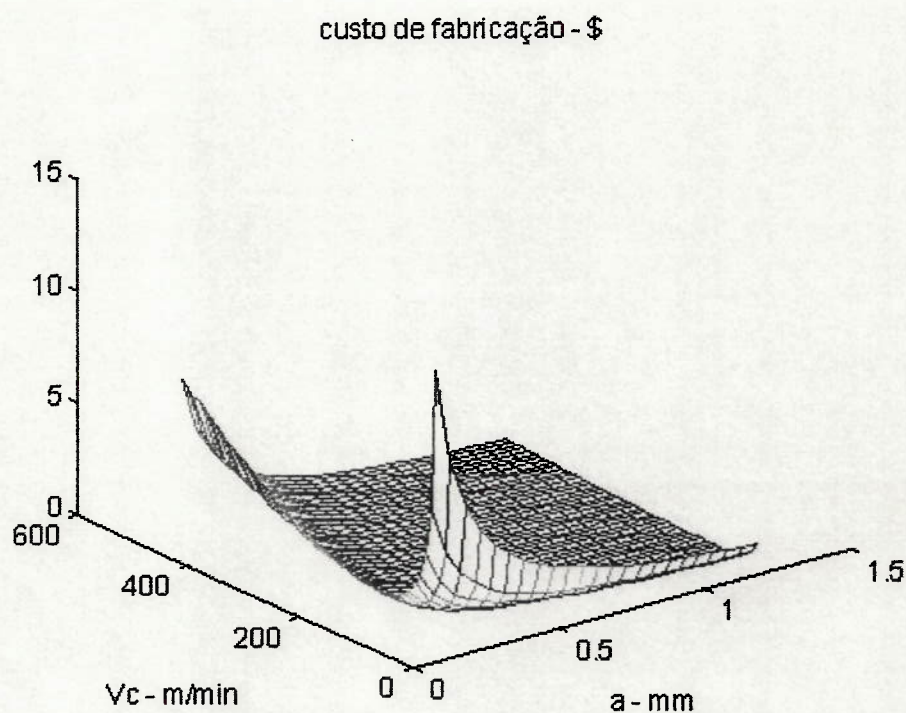


Gráfico 2 - Custo de fabricação

Neste caso, obtivemos o valor mínimo da função analisando a tabela de pontos gerada pelo gráfico em aproximadamente $a = 1.0$ mm/rotação e $V_c = 120$ m/min, respeitando-se os limites de avanço e velocidade de corte para o exemplo. Ambos os valores, portanto, confirmam os resultados obtidos pela otimização.

6.1.4. Seleção do Inserto

Com base na velocidade de corte e avanço determinados na otimização e entrando prioridades médias em todos os critérios de seleção, o sistema escolheu os seguintes insertos:

Número	Tipo	Classe Básica	Designação	Média ponderada
1	TMAXP	P	CNMG 09 03 08-QM	43
2	TMAXP	P	CNMG 16 06 04-15	29

Tabela 22 - Resultados da seleção do inserto

Dentre as opções existentes no banco de dados, mostradas na tabela 23:

Número	Tipo	Classe Básica	Designação
1	TMAXP	435	CNMG 09 03 08-QM
2	TMAXP	415	CNMG 09 03 04-QM
3	TMAXP	215	CNMG 09 03 04-MF
4	TMAXP	425	CNMG 12 04 04-QF
5	TMAXP	415	CNMG 16 06 04-MF
6	TMAXP	H13A	CNMG 16 06 08-QM
7	TMAXP	435	CNMG 16 06 04-15
8	TMAXP	425	CNMG 19 06 04-15
12	TMAXP	435	CNMG 09 03 08-QM
13	TMAXP	415	CNMG 16 06 16-MR
9	TMAXP	215	CNMM 12 04 08-QR
10	TMAXP	3015	CNMM 16 04 08-QR
11	TMAXP	215	CNMM 19 04 08-QR
14	TMAXP	415	DNMG 11 04 04-QF
15	TMAXP	415	DNMG 11 04 04-MF
16	TMAXP	415	DNMG 15 04 04-MF
17	TMAXP	425	DNMG 15 06 12-FL
18	TMAXP	415	SNMG 09 03 04-MF
19	TMAXP	215	SNMG 12 04 08-QR

Tabela 23 - Conteúdo do banco de dados de insertos

Observe que o sistema escolheu apenas aqueles insertos que adaptam-se ao porta-ferramentas já escolhido mantendo os valores iguais quanto a forma do inserto, ângulo de folga campos 1 e 2 respectivamente.

Outras observações se fazem necessárias:

1. O sistema também avaliou quais geometrias de quebra-cavaco são mais adequadas às condições da operação, como base nos critérios estabelecidos pelo usuário e tabelas fornecidas pelo fabricante.
2. A classe do inserto foi escolhida apartir da velocidade de corte e avanço determinados na etapa de otimização.
3. O comprimento do inserto foi determinado com base na profundidade de corte calculada conforme formulação descrita no capítulo anterior.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

1. Embora ainda restrito a uma modalidade de operação (torneamento), o sistema computacional desenvolvido introduziu melhorias significativas na atividade de planejamento de processo de lotes quanto comparado ao método manual.
2. A seleção da classe do inserto, e conseqüentemente, seu grau de resistência ao desgaste ou tenacidade, é dependente das condições de corte calculadas, garantindo assim ferramentas mais adequadas as metas propostas na operação.
3. A seleção do porta-ferramentas mostrou-se dependente de dados qualitativos fornecidos pelo fabricante e os critérios definidos pelo usuário. A rigor, apenas seu deslocamento e características geométricas puderam ser bem definidas.
4. A utilização de tabelas tecnológicas contendo a relação entre a vida da ferramenta e a velocidade de corte para diversos materiais, bem como as constantes específicas de corte (K , x , K_s e z) é de vital importância para determinação das condições otimizadas de corte. O programa, portanto, presupõe a existência de um banco de dados de usinagem confiável.
5. O método de otimização utilizado mostrou-se adequado, convergindo para uma série de condições iniciais e intervalos de parâmetros tentados.

6. O modelo matemático utilizado no algoritmo computacional baseia-se na análise dos ciclos normais de usinagem, associando-os a tempos e custos de fabricação. Tal modelo está bem dimensionado para produções em lote, onde o número total de peças produzidas é maior que o número de peças por vida de ferramenta.

7. Pode-se observar que nas condições testadas, o critério da máxima produção teria sido suficiente para determinação das condições ótimas de usinagem, o que está em sintonia com as conclusões obtidas por [13].

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Estender a aplicação do sistema primeiramente para os demais tipos de torneamento (sangramento, perfilamento e rosqueamento), e numa segunda etapa, para os processos de fresamento e furação.
2. Ampliar a base de dados tecnológicos incluindo dados experimentais colhidos junto a outros órgãos de pesquisa e indústrias.
3. Verificar a influência de outras formulações de vida de ferramenta (como por exemplo, a equação estendida da vida) nos resultados obtidos.
4. Aplicar métodos de determinação de custos de usinagem mais consistentes com a atual tendência de eliminação dos grandes lotes de produção devido a alta diversificação de produtos. Um exemplo poderia ser o sistema ABC ("Activity Based Cost").
5. Estudar a aplicação da tecnologia de grupo na determinação dos custos de usinagem de componentes mecânicos de um segmento específico.
6. Estudar a aplicabilidade de outras funções objetivas na determinação de condições otimizadas de processo, como por exemplo aproximações lineares.
7. Desenvolver mecanismos de integração do sistema desenvolvido com sistemas CAD/CAM disponíveis no mercado.

BIBLIOGRAFIA

1. "CAD/CAM industry report 1992" - Machine Design - Maio 1992 - pág. 88 - 93.
2. Apostila do curso de Automação Industrial / CAD-CAM - Sindimaq/Abimaq - IPT.
3. ARAMANDA, G. "CAM Software gets expert advice" - Machine Design - Junho, 1991 - pág. 42 - 45.
4. BATOCCHIO, M.C., CUPINI, N., "Desenvolvimento de um Sistema Especialista de Usinagem" - Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia - Universidade de Campinas, 1993.
5. BAZARAA, M. e SHETTY, C. M., "Nonlinear Programming. Theory and Algorithms" - Georgia Institute of Technology, John Wiley and Sons, 1979.
6. BEVERIDGE, G. e SCHECHTER, R., "Optimization. Theory and Practice" - University of Colorado, McGraw - Hill, 1970.
7. Catálogo de ferramentas e insertos para torneamento, SANDVIK Coromant, produtos para trabalho com metais.
8. CHANG, T. C., "Expert Process Planning for Manufacturing", Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
9. CHUA, H., LOH, Y., WONG, M., "Optimization of Cutting Conditions for Multipass Turning Operations Using Sequential Quadratic Programming" - Singapore University, Journal of Materials Processing Technology, n. 28, 1991, pág 253 - 262.

10. COLDING, B., "A Boa Escolha de Parâmetros de Usinagem Leva a Muitos Ganhos", Revista Máquinas e Metais, Fevereiro, 1992, pág 86 - 94.
11. DAVIS, W., "Análise e Projeto de Sistemas", Livros Técnicos Científicos, 1987.
12. DEGARMO, E. P.; BLACK, J. T., KOHSER, R. A., "Materials and Processing in Manufacturing", sixth edition, Macmillan Publishing Company, 1984.
13. DINIZ, E., CUPINI, N., VILELA, R., "Otimização de Condições de Usinagem em Células de Fabricação", Anais do 1º Simpósio Brasileiro sobre Tecnologia de Usinagem, 1989.
14. DOYLE, E. L., KEYSER, C. A., LEACH, J. L., "Manufacturing Processes and Materials for Engineers", Prentice Hall, 1985.
15. DUQUE SANTA, W., "Estudo da Modelagem Matemática para Otimização das Condições de Usinagem" - Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica- Universidade de Campinas, 1989.
16. DVORAK, P. "Designers get smart about manufacturing" - Machine Design - Agosto, 1992 - pág. 101 -106.
17. ESKICIOGLU, A.M. e H., "Optimization of Machining Conditions with Nonlinear Programming", Department of Computer and Mechanical Engineering, ASME, 1992, pág 95 a 100.
18. FERRARESI, D., "Características de Usinagem de Metais para Operação de Torneamento - Força e Velocidade de Corte para Diferentes Metais", ABNT - P1, Novembro, 1986.
19. FERRARESI, D., "Fundamentos da Usinagem dos Metais" - São Paulo, Edgar Blücher, 1977.

20. FERRARESI, D., "Otimização das Condições de Usinagem em uma Empresa de Produção Seriada", Anais do 1º Simpósio Brasileiro sobre Tecnologia de Usinagem, 1989.
21. FRITZSCHE, H., "Programação Não Linear. Análise e Métodos" - Universidade de São Paulo, Edgard Blücher, 1978.
22. GABRIELE, G. e RAGSDALL, K., "The Generalized Reduced Gradient Method: A Reliable Tool for Optimal Design" - Purdue University, Journal of Engineering for Industry, Maio, 1977, pág 394 - 400.
23. GOURET, J. Y., MAIMI, L. "COPO. Cutting Operations Parameters Optimization", High Tech - the Way into the Nineties, Amsterdam, 1986, pág 215 a 222.
24. GROOVER, M.P. "CAD/CAM - Computer Aided Design and Manufacturing" - Prentice Hall - New Jersey - 1984.
25. Guia do Usuário - VISUALBASIC, versão 3.0., Microsoft Co., 1993.
26. HIMMELBLAU, D., "Applied Nonlinear Programming" - University of Texas, McGraw - Hill, 1972.
27. HOLZNER, S., "Visual Basic", Editora Campus, 1992.
28. KENDRIK, D.; BROOKE, A.; MEERAUS, A., "GAMS - A user's guide", Scientific Press, 1988.
29. KOULAMAS, C., "Simultaneous Determination of Optimal Machining Conditions and Tool Replacement Policies in Constrained Machining Economics Problems by Geometric Programming" - Florida International University, International Journal of Production Research, n. 29, pág 2407 - 2421.

30. LYE, S. W., YEO, S. H., "Development of an Integrated CAD/CAPP/CAM System for Turning Operations", Journal of Materials Processing Technology, 29, 1992, pág 103 a 117.
31. MARI, D., GONSETH, D. R., "A New Look at Carbide Tool Life", Lausanne, Switzerland, revista Wear, 165, 1993, pág. 9 a 17.
32. NISHIZAWA, H., SAKAKIBARA, J., "Parâmetros para Selecionar os Parâmetros de Corte", Anais do 1º Simpósio Brasileiro sobre Tecnologia de Usinagem, 1989.
33. NOVASKI, O., "Custos de Usinagem" - Centro de Tecnologia de Campinas, 1990.
34. RABELO, S., BERNARDO, V., "Relatório de Planejamento de Processo e Programação de Centro de Usinagem", TRW, 1993.
35. ROZENFELD, H., "Planejamento de Processo por Computador - Uma Tecnologia Acessível a Indústria Brasileira", Notas das Palestras, Seminário Usinagem e Automação Para a Competitividade e Qualidade, Agosto, 1993.
36. RYMER DA SILVA CARVALHO, R., "Características de Usinagem sob o Ponto de Vista Econômico" - Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade de Campinas, 1991.
37. Secretaria da Tecnologia Industrial - Ministério da Indústria e Comércio, "Determinação das Características de Usinagem dos Materiais e Ferramentas de Procedência Nacional, na Operação de Torneamento" - 1976.
38. SOTIROV, G., VITANOV, V., "Multi-criteria Optimization of Cutting Processes" - Sofia Technical University, Journal of Materials Processing Technology, n. 31, 1992, pág 307 - 313.
39. STIPKOVIC, M., "Usinagem" - MAUÁ - EPUSP - FEFAAP, 1990.

40. VALLIERE, D. "Expert Systems that really work" - CIME - Agosto, 1988 - pág.14 - 16.
41. WHITE, B., HOUSHYAR, A., "Quality and Optimum Parameter Selection in Metal Cutting", Computers in Industry, 20, 1992, pág 87 a 98.
42. YOUNG, J. F., SHANE, R., "Material and Processes", third edition, part B:, Marcel Dekker, INC., 1985.

ÍNDICE DE TABELAS, FIGURAS E GRÁFICOS

Figura 1 - Torneamento cilíndrico externo	3
Figura 2 - Torneamento de faceamento	3
Figura 3 - Torneamento cônico externo.....	4
Figura 4 - Torneamento curvilíneo	4
Figura 5 - Sangramento.....	4
Figura 6 - Torneamento cilíndrico interno.....	5
Figura 7 - Torneamento cônico interno	5
Figura 8 - Exemplo de um folha de operações.....	7
Figura 9 - Ciclo de desenvolvimento de um produto e as tecnologias CA's.....	9
.....	9
Figura 10 - Tempos de planejamento.....	10
Figura 11 - Estrutura básica do sistema CAPPE.....	13
Figura 12 - Intervalo de máxima eficiência	15
Figura 13 - Tipos de avarias e desgastes em ferramentas.....	25
Figura 14 - Parâmetros básicos de desgaste segundo norma ISO	26
Figura 15 - Curvas característica de desgaste	27
Figura 16 - Curva típica de vida de ferramenta	28
Figura 17 - Representação de diversos ângulos de posição.....	33
Figura 18 - Diâmetro equivalente para operações de torneamento de faceamento....	36
Figura 19 - Diâmetro equivalente para operações de torneamento cônico	36
Figura 20 - Exemplo de torneamento cilíndrico.	40
Figura 21 - Formas mais comuns de cavaco.....	47
Figura 22 - Representação esquemática das classes de ferramentas normalizadas....	49
Figura 23 - Estrutura da norma ISO para pastilhas intercambiáveis.....	51
Figura 24 - Estrutura da norma ISO para porta-ferramentas.....	52
Figura 25 - Exemplo de deslocamentos possíveis para um porta-ferramenta.....	54

Figura 26 - Exemplo de porta-ferramenta com restrição para deslocamento em megalho	54
Figura 27 - Cálculo do comprimento efetivo da aresta de corte	55
Figura 28 - Relação entre avanço a e rugosidade R_t	58
Figura 29 - Fluxograma simplificado do método GRG	69
Figura 30 - Fluxograma simplificado do método SUMT	71
Figura 31 - Representação esquemática do poliedro flexível.	72
Figura 32 - Diagrama de fluxo de dados do programa.	78
Tabela 1 - Aplicação dos processos de usinagem em relação aos equipamentos	2
Tabela 2 - Comparação de tempo e custo de fresamento de faceamento para diversas condições de corte	19
Tabela 3 - Adequabilidade dos sistemas de fixação com relação à características da operação.....	53
Tabela 4 - Recomendações para geometria de insertos segundo fabricante	57
Tabela 5 - Área de trabalho.....	58
Tabela 6 - Constantes para determinação do comprimento total do inserto	58
Tabela 7 - Tabela de conversão entre rugosidades R_t e R_a	59
Tabela 8 - Tabela de dados tecnológicos	59
Tabela 9 - Características principais dos métodos discutidos.....	74
Tabela 10 - Classificação dos problemas de otimização.....	74
Tabela 11 - Resultados comparativos obtidos para diferentes métodos de minimização	75
Tabela 12 - Dados geométricos para operações de torneamento composto.....	81
Tabela 13 - Critérios para escolha do porta-ferramentas	81
Tabela 14 - Critérios para escolha do inserto.....	84
Tabela 15 - Dados tecnológicos para o exemplo de aplicação.....	97
Tabela 16 - Dados econômicos para o exemplo de aplicação.....	98
Tabela 17 - Resultados da seleção do porta-ferramenta.....	98

Tabela 18 - Conteúdo do banco de dados de porta-ferramentas	99
Tabela 19 - Resultados das condições de usinagem para mínimo custo e máxima produção.....	100
Tabela 20 - Resultados das condições de usinagem para mínimo custo e máxima produção (calculado pelo programa).....	101
Tabela 21 - Profundidades e avanços para mínimo custo e máxima produção (calculado pelo programa).....	102
Tabela 22 - Resultados da seleção do inserto	105
Tabela 23 - Conteúdo do banco de dados de insertos.....	105
Gráfico 1 - Tempo de fabricação	103
Gráfico 2 - Custo de fabricação	104

SIMBOLOGIA

- χ = ângulo de posicionamento da ferramenta;
 r_ϵ = raio de ponta;
 R_t = rugosidade superficial teórica ou profundidade do perfil;
 R_a = rugosidade superficial;
 β = ângulo do perfil quando em operações com megulho;
 η = rendimento para a máquina operatriz;
 a = avanço de corte;
 a_{\max} = avanço máximo é o máximo valor admissível para a ferramenta (dado do fabricante);
 b = largura do cavaco;
 C_1 = constante de custo que independe dos parâmetros de corte;
 C_2 = soma das despesas totais de mão de obra e salário-máquina;
 C_3 = constante de custo relativo à ferramenta;
 C_{ti} = custos devido aos tempos de aproximação e afastamento;
 C_{tp} = custo devido a preparação de máquina;
 d = diâmetro da peça;
 d_1 = diâmetro externo do blank;
 d_2 = diâmetro interno do blank;
 d_e = diâmetro equivalente na operação;
 F_a = força de avanço;
 F_c = força de corte;
 h = altura do cavaco;
 $K = K_T/K_M$ = razão de cratera;
 K e x = constantes experimentais dependentes dos materiais envolvidos;
 K_B = largura de cratera;
 K_{cq} = custo do controle de qualidade;
 K_{if} = custo indireto de fabricação;
 K_{ins} = custo de aquisição do inserto;
 K_m = custo de matéria-prima;
 K_M = distância do centro da cratera à aresta de corte;
 K_{mi} = custo indireto de matéria-prima;
 K_p = custo total de produção;
 K_s = Pressão específica de corte;
 K_{s1} = constante específica do metal para uma seção de corte de 1 mm^2 ;
 K_t = ângulo de posicionamento do porta-ferramentas;
 K_T = profundidade de cratera;
 K_u = custo de usinagem;
 K_{uf} = custo de ferramental (depreciação, troca, afiação);
 K_{ui} = custo indireto de usinagem;
 K_{um} = custo de máquina (depreciação, espaço, energia consumida);
 K_{us} = custo de mão de obra;
 K_v = custo variacional anterior ou posterior;
 l = comprimento de corte;

- l_a = comprimentos medidos na horizontal;
 l_i = o comprimento total do inserto;
 L_i = comprimento efetivo da aresta de corte;
 N_a = potência de avanço;
 N_c = potência de corte;
 N_e = potência efetiva de corte;
 n_{ins} = número de arestas de corte da pastilha intercambiável;
 N_m = potência fornecida pelo motor;
 n_{pf} = vida média do porta-ferramentas, em quantidades de arestas de corte, até seu possível descarte;
 n_r = rotação do fuso;
 n_t = número de trocas de ferramenta para o lote de peças;
 p = profundidade de corte;
 P_m = ponto de referência de medição;
 p_{max} = sobremetal na operação;
 S = área da seção de corte;
 S_h = salário mais encargos por hora;
 S_m = custo total da máquina por hora;
 T = vida de Ferramenta;
 t_1 = tempos improdutivos, correspondente a colocação, fixação, retirada da peça, preparação da máquina e posicionamento da ferramenta;
 t_2 = tempo referente a troca de ferramenta;
 t_a = tempo de aproximação e afastamento da ferramenta;
 t_{af} = tempo de afiação de ferramenta;
 t_c = tempo de corte propriamente dito;
 t_{ci} = tempo de corte na condição i ;
 T_{max} = limite de vida de ferramenta máximo;
 T_{min} = limite de vida de ferramenta mínimo;
 t_p = tempo de preparação da máquina;
 t_s = tempos secundários de usinagem;
 t_t = tempo total de usinagem por peça;
 t_{tr} = tempo de troca de ferramenta;
 V_a = velocidade de avanço;
 V_B = largura de desgaste da superfície de folga;
 V_c = velocidade de corte;
 V_{c15} = velocidade de corte para $T = 15$ minutos;
 V_{ce} = velocidade de corte equivalente;
 V_{ci} = velocidade de corte na condição i ;
 V_{cmax} = velocidade máxima é o máximo valor admissível para a ferramenta (dado do fabricante);
 V_{si} = custo de aquisição do porta-ferramenta;
 x^* = ponto ótimo;
 z = coeficiente angular da reta $K_s \times h$;
 Z = tamanho do lote;
 Z_i = número médio de peças usinadas com a ferramenta até o fim da vida, na condição i ;
 Z_t = número de peças usinadas numa vida T .

ANEXOS

- **Estrutura dos Bancos de Dados**

1. TABELA DE ESCOLHA DE PORTA-FERRAMENTAS E SISTEMAS DE FIXAÇÃO

Nome do Campo	Tipo do campo	Tamanho do campo
Tipo do Porta-Ferramentas	Alfanumérico	6
Tipo de Fixação	Alfanumérico	10
Interno Acabamento	Numérico	1
Interno Desbaste	Numérico	1
Externo Acabamento	Numérico	1
Externo Desbaste	Numérico	1
Fluxo de Cavaco	Numérico	1
Tempo de Troca de Inserto	Numérico	1
Acessabilidade	Numérico	1
Custo de Aquisição	Numérico	1
Disponibilidade	Numérico	1

2. TABELA DE MÁQUINAS/TORRETAS

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Porte da máquina	Alfanumérico	10
Processo de Usinagem	Alfanumérico	15
Nome da Máquina	Alfanumérico	30
Potência de Acionamento do Eixo Árvore	Numérico	8
Potência de Acionamento dos Carros de Avanço	Numérico	8
Eficiência Estimada	Numérico	4
Custo Máquina (Sm)	Numérico	15
Limite Máximo de Rotação	Numérico	8
Limite Máximo de Avanço	Numérico	8
Comprimento Admissível de Porta Ferramenta	Alfanumérico	5
Espessura Admissível de Porta Ferramenta	Numérico	5
Largura Admissível de Porta Ferramenta	Numérico	5

3. TABELA DE OPERADORES

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Nome do Operador	Alfanumérico	30
Salários + Encargos (Sh)	Numérico	15
Número Funcional	Numérico	10

4. TABELA DE TEMPOS DE FABRICAÇÃO

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Nome da Máquina	Alfanumérico	30
Porte da Máquina	Alfanumérico	20
Modalidade de operação	Alfanumérico	20
Nome da Peça	Alfanumérico	10
Tempo de afastamento e aproximação (ta)		5.2
Tempo de Preparação (tp)	Numérico	5.2
Tempo de Troca de Ferramenta (ttf)	Numérico	5.2
Tempo de Colocação e Retirada de Peças (ts)	Numérico	5.2

5. TABELA DE PORTA-FERRAMENTAS

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Designação	Alfanumérico	30
Estilo do porta-ferramentas	Alfanumérico	3
Sistema de Fixação do Inserto	Alfanumérico	3
Forma do Inserto	Alfanumérico	3
Ângulo de Folga da Aresta Principal	Numérico	3
Altura do Porta-Ferramenta	Numérico	5
Espessura do Porta-Ferramenta	Numérico	5
Comprimento do Porta-Ferramenta	Alfanumérico	3
Comprimento da Aresta de Corte	Numérico	3
Opção do Fabricante	Alfanumérico	3
Vida Média do Porta-Ferramentas	Numérico	5
Máximo Ângulo de Posicionamento Negativo	Numérico	3
Ângulo de saída	Numérico	3
Ângulo de Inclinação	Numérico	3
Custo de Aquisição	Numérico	8.2
Ângulo de Posicionamento (kt)	Numérico	3
Tipo de porta-ferramenta	Alfanumérico	10
Direção de avanço	Alfanumérico	3
Disponibilidade em estoque	lógico	
Deslocamentos possíveis	lógico	
Figura do porta-ferramenta	Alfanumérico	40

A cada porta-ferramentas estará associado uma ilustração no banco de dados.

6. TABELA DOS INSERTOS

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Tipo de Porta-Ferramentas	Alfanumérico	10
Classe do Inserto	Alfanumérico	10
Classe ISO	Alfanumérico	10
Designação do Inserto	Alfanumérico	30
Forma do Inserto	Alfanumérico	3
Ângulo de Saída da Aresta Principal	Alfanumérico	3
Ângulo de Folga da Aresta Principal	Alfanumérico	3
Classe de Tolerância em s e d	Alfanumérico	3
Tipo de Inserto	Alfanumérico	3
Comprimento da Aresta de Corte	Numérico	3
Largura do Inserto	Numérico	3
Raio de Ponta	Numérico	3.2
Ângulo de Saída	Numérico	3
Direções de Avanço	Alfanumérico	2
Opção do Fabricante	Alfanumérico	10
Número de Arestas de Corte	Numérico	1
Custo de Aquisição	Numérico	8.2
Constante da Aresta de Corte	Numérico	8.3
Figura do inserto	Alfanumérico	40
Disponibilidade no estoque	lógico	

A cada inserto estará associado uma ilustração no banco de dados.

7. TABELA DE RUGOSIDADES R_t e R_a

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Rugosidade R_t	Numérico	5.2
Rugosidade R_a	Numérico	5.2
Rugosidade RMS	Numérico	5.2
Qualidade de Trabalho	Numérico	3

8. TABELA DE DADOS TECNOLÓGICOS 1

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Material	Alfanumérico	30
Classe Básica	Alfanumérico	10
Estado do material	Alfanumérico	10
Dureza	Numérico	5.2
Avanço Máximo	Numérico	5.2
Avanço Mínimo	Numérico	5.2
Velocidades de Corte Máxima	Numérico	5.2
Velocidades de Corte Mínima	Numérico	5.2

9. TABELA DE DADOS TECNOLÓGICOS 2

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Material	Alfaumérico	30
Classe ISO	Alfaumérico	10
Estado do material	Alfaumérico	10
Dureza	Numérico	10.2
Descrição do material	Alfanumérico	30
Custo/Kg	Numérico	15.2
Constante z de Kienzle	Numérico	10.2
Constante Específica de Corte (Ks)	Numérico	10.2
Constante x de Taylor	Numérico	10.2
Constante K de Taylor	Numérico	15.2

10. TABELA PARA SELEÇÃO DA GEOMETRIA DE QUEBRA CAVACO DO INSERTO

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Descrição do material	Alfanumérico	30
Tipo de Porta-Ferramentas	Alfanumérico	10
Característica do Inserto	Alfanumérico	10
Área de Trabalho	Alfanumérico	1
Grau	Numérico	1
Grau p/ Corte Intermitente	Numérico	1
Grau p/ Tendência a Vibração	Numérico	1
Grau p/ Potência Limitada	Numérico	1
Grau p/ Custo	Numérico	1
Grau p/ Disponibilidade	Numérico	1

11. TABELA PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Área de Trabalho	Alfanumérico	1
Limite Superior Avanço	Numérico	5.2
Limite Inferior Avanço	Numérico	5.2
Limite Superior Profundidade	Numérico	5.2
Limites Inferior Profundidade	Numérico	5.2

12. TABELA PARA CORREÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE V_c DEVIDO A DUREZA.

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Material	Alfanumérico	40
Diferença de Dureza (DD)	Numérico	3
Fator de Correção	Numérico	3.2

13. TABELA PARA CORREÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE V_c DEVIDO A VIDA.

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Diferença de Vida (DD)	Numérico	3
Fator de Correção	Numérico	3.2

14. PLANOS DE PROCESSO

Nome do Campo	Tipo do Campo	Tamanho do Campo
Nome da peça	Alfanumérico	25
Número da peça	Alfanumérico	15
Material	Alfanumérico	15
Dureza	Alfanumérico	5
Máquina	Alfanumérico	30
Tamanho do lote	Alfanumérico	10
Descrição do material	Alfanumérico	80
Porta-ferramenta	Alfanumérico	15
Inserto	Alfanumérico	20
Tipo do porta-ferramenta	Alfanumérico	10
Classe ISO	Alfanumérico	10
Classe básica	Alfanumérico	10
Comprimento de corte	Alfanumérico	10
Diâmetro	Alfanumérico	10
Rugosidade	Alfanumérico	10
Velocidade de corte	Alfanumérico	10
Avanço de corte	Alfanumérico	10
Profundidade de corte	Alfanumérico	10
Rotação média	Alfanumérico	10
Ângulo de posicionamento	Alfanumérico	10
Potência disponível	Alfanumérico	10
Potência requerida	Alfanumérico	10
Tempo de corte	Alfanumérico	10
Tempo secundários	Alfanumérico	10
Tempo de troca de ferramenta	Alfanumérico	10
vTempo total por peça	Alfanumérico	10
Tempo total por lote	Alfanumérico	10
Custo de corte	Alfanumérico	10
Custo secundários	Alfanumérico	10
Custo de troca de ferramenta	Alfanumérico	10
Custo total por peça	Alfanumérico	10
Custo total por lote	Alfanumérico	10
Considerações da otimização	Alfanumérico	80
Critério da otinização	Alfanumérico	30
Tipo de operação	Alfanumérico	30
Figura de porta-ferramenta	Alfanumérico	60
Figura do inserto	Alfanumérico	60
Figura da operração	Alfanumérico	60
Estado	Alfanumérico	10
Operador	Alfanumérico	20
Peso	Alfanumérico	10

. Listagem dos Arquivos de Otimização - Resultados

.. Arquivo para critério de mínimo custo em desbaste

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:17:17 PAGE 1
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM

```

4
5 *ESTE PROGRAMA DEVE CALCULAR OS PARAMETROS DE CORTE OTIMOS PARA UMA
6 *OPERACAO DE TORNEAMENTO UTILIZANDO CRITERIOS DE MINIMO CUSTO
7 *EM OPERACOES DE DESBASTE.
8
9
10 SCALARS
11   VCIMAX VELOCIDADE DE CORTE MAXIMA FERRAMENTA I /640/
12   AIMAX AVANCO MAXIMO FERRAMENTA I /0.5/
13   POTJMAX POTENCIA NOMINAL NO EIXO ARVORE MAQUINA J /15/
14   LA COMPRIMENTO DE CORTE PARA OPERACAO I /300/
15   DE DIAMETRO EQUIVALENTE PARA OPERACAO I /95/
16   Z NUMERO TOTAL DE PECAS /800/
17   K CONSTANTE DE TAYLOR /8.8E6/
18   X CONSTANTE DE TAYLOR /2.71/
19   TIMAX VIDA MAXIMA DA FERRAMENTA I /50/
20   TIMIN VIDA MINIMA DA FERRAMENTA I /30/
21   PI /3.14159/
22   NETA EFICIENCIA DA MAQUINA /0.8/
23   ZI CONSTANTE DE KIENZLE /0.18/
24   KT ANGULO DE POSICIONAMENTO /1.57/
25   KS COEFICIENTE DE RESISTENCIA AO CORTE /216/
26   C1 CUSTOS INDEPENDENTES DOS PARAMETROS /5/
27   C2 CUSTOS DE SALARIO HOMEM MAQUINA /30/
28   C3 CUSTOS DE FERRAMENTAL /10/;
29
30 VARIABLES
31   VCI
32   AI
33   CF
34   PCI
35   T
36   RPI;
37
38
39 VCI.LO=10; VCI.UP=VCIMAX;
40 AI.LO=0.05; AI.UP= AIMAX;
41 T.LO=TIMIN; T.UP=TIMAX;
42 RPI.LO=0.2; RPI.UP=2.4;
43
44 EQUATIONS
45   CUSTO EQUACAO CUSTO TOTAL DE FABRICACAO
46   POT EQUACAO DE POTENCIA
47   VIDA EQUACAO DE VIDA
48   RAIOP EQUACAO DE RAI0;
49

```

```

50 CUSTO .. CF =E= ((LA*PI*DE)/(60000*AI*VCI))*C2+ (C1
51 + ((LA*PI*DE*EXP((X-1)*LOG(VCI)))/(1000*K*AI))*C3;
52
53
54 POT .. POTJMAX*NETA=E= ((PCI*EXP((1- ZI)*LOG(AI*SIN(KT)))
      *KS)/SIN(KT)*(VCI))/(75*60);
55
56 VIDA .. T =E= K/(EXP(X*LOG(VCI)));
57

```

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:17:17 PAGE 2
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM

```

58 RAIOP .. RPI =E= 2*AI;
59
60 MODEL CUSTOD /ALL/;
61
62 SOLVE CUSTOD USING NLP MINIMIZING CF;
63
64 DISPLAY VCIL,AI,PCI,L,T,L,RPI,L;
65
66

```

COMPILATION TIME = 0.015 MINUTES

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:17:17 PAGE 3
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 EQUATION LISTING SOLVE CUSTOD USING NLP FROM LINE 62

---- CUSTO =E= EQUACAO CUSTO TOTAL DE FABRICACAO

CUSTO.. (8.9357)*VCI + (1792.7935)*AI + CF =E= 5 ; (LHS = -89.6397 ***)

---- POT =E= EQUACAO DE POTENCIA

POT.. (0)*VCI + (0)*AI - (0.0412)*PCI =E= -12 ; (LHS = 0 ***)

---- VIDA =E= EQUACAO DE VIDA

VIDA.. (4649.9894)*VCI + T =E= 0 ; (LHS = -17128.6325 ***)

---- RAIOP =E= EQUACAO DE RAIOP

RAIOP.. - 2*AI + RPI =E= 0 ; (LHS = 0.1 ***)

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:17:17 PAGE 4

OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 COLUMN LISTING SOLVE CUSTOD USING NLP FROM LINE 62

---- VCI

VCI
 (.LO, .L, .UP = 10, 10, 640)
 (8.9357) CUSTO
 (0) POT
 (4649.9894) VIDA

---- AI

AI
 (.LO, .L, .UP = 0.05, 0.05, 0.5)
 (1792.7935) CUSTO
 (0) POT
 -2 RAIOP

---- CF

CF
 (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
 1 CUSTO

---- PCI

PCI
 (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
 (-0.0412) POT

---- T

T
 (.LO, .L, .UP = 30, 30, 50)
 1 VIDA

---- RPI

RPI
 (.LO, .L, .UP = 0.2, 0.2, 2.4)
 1 RAIOP

MODEL STATISTICS SOLVE CUSTOD USING NLP FROM LINE 62

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS 4 SINGLE EQUATIONS 4
 BLOCKS OF VARIABLES 6 SINGLE VARIABLES 6
 NON ZERO ELEMENTS 10 NON LINEAR N-Z 6
 DERIVATIVE POOL 7 CONSTANT POOL 13
 CODE LENGTH 204

GENERATION TIME = 0.010 MINUTES

EXECUTION TIME = 0.027 MINUTES

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:17:26 PAGE 6
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 SOLUTION REPORT SOLVE CUSTOD USING NLP FROM LINE 62

SOLVE SUMMARY

MODEL CUSTOD OBJECTIVE CF
 TYPE NLP DIRECTION MINIMIZE
 SOLVER MINOS5 FROM LINE 62

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
 **** MODEL STATUS 2 LOCALLY OPTIMAL
 **** OBJECTIVE VALUE 6.4305

RESOURCE USAGE, LIMIT 0.080 1000.000
 ITERATION COUNT, LIMIT 60 1000
 EVALUATION ERRORS 0 0

MINOS 5.2 (Mar 1988)
 =====

B. A. Murtagh, University of New South Wales
 and
 P. E. Gill, W. Murray, M. A. Saunders and M. H. Wright
 Systems Optimization Laboratory, Stanford University.

WORK SPACE NEEDED (ESTIMATE) -- 491 WORDS.
 WORK SPACE AVAILABLE -- 8100 WORDS.

EXIT -- OPTIMAL SOLUTION FOUND
 MAJOR ITNS, LIMIT 32 50
 FUNOBJ, FUNCON CALLS 180 183
 SUPERBASICS 1
 INTERPRETER USAGE .02
 NORM RG / NORM PI 6.274E-08

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

----	EQU CUSTO	5.000	5.000	5.000	-1.000
----	EQU POT	-12.000	-12.000	-12.000	EPS
----	EQU VIDA	.	.	.	EPS
----	EQU RAIOP	.	.	.	EPS

CUSTO	EQUACAO CUSTO TOTAL DE FABRICACAO
POT	EQUACAO DE POTENCIA
VIDA	EQUACAO DE VIDA
RAIOP	EQUACAO DE RAIOP

LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
-------	-------	-------	----------

----	VAR VCI	10.000	99.193	640.000	.
----	VAR AI	0.050	0.500	0.500	-2.861
----	VAR CF	-INF	6.431	+INF	.
----	VAR PCI	-INF	4.449	+INF	.
----	VAR T	30.000	34.200	50.000	EPS
----	VAR RPI	0.200	1.000	2.400	.

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:17:26 PAGE 7
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 SOLUTION REPORT SOLVE CUSTOD USING NLP FROM LINE 62

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
 0 INFEASIBLE
 0 UNBOUNDED
 0 ERRORS

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:17:26 PAGE 8
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 EXECUTING

----	64 VARIABLE VCIL	=	99.193
	VARIABLE AIL	=	0.500
	VARIABLE PCIL	=	4.449
	VARIABLE T.L	=	34.200
	VARIABLE RPI.L	=	1.000

**** FILE SUMMARY

INPUT D:\SERGIO\GAMS\CUSTODB1.GMS
 OUTPUT D:\SERGIO\GAMS\CUSTODB1.LST

EXECUTION TIME = 0.022 MINUTES

.. Arquivo para critério de mínimo custo em acabamento

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:30:38 PAGE 1
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM

4
5 *ESTE PROGRAMA DEVE CALCULAR OS PARAMETROS DE CORTE OTIMOS PARA UMA
6 *OPERACAO DE TORNEAMENTO UTILIZANDO CRITERIOS DE MINIMO CUSTO
7 *EM OPERACOES DE ACABAMENTO.
8
9
10 SCALARS
11 VCIMAX VELOCIDADE DE CORTE MAXIMA FERRAMENTA I /640/
12 AIMAX AVANCO MAXIMO FERRAMENTA I /0.5/
13 POTJMAX POTENCIA NOMINAL NO EIXO ARVORE MAQUINA J /15/
14 LA COMPRIMENTO DE CORTE PARA OPERACAO I /300/
15 DE DIAMETRO EQUIVALENTE PARA OPERACAO I /95/
16 Z NUMERO TOTAL DE PECAS /800/
17 K CONSTANTE DE TAYLOR /8.8E6/
18 X CONSTANTE DE TAYLOR /2.71/
19 TIMAX VIDA MAXIMA DA FERRAMENTA I /50/
20 TIMIN VIDA MINIMA DA FERRAMENTA I /30/
21 PI /3.14159/
22 NETA EFICIENCIA DA MAQUINA /0.8/
23 ZI CONSTANTE DE KIENZLE /0.18/
24 KT ANGULO DE POSICIONAMENTO /1.57/
25 KS COEFICIENTE DE RESISTENCIA AO CORTE /216/
26 PMAX SOBREMETAL DA OPERACAO /0.1/
27 RT RUGOSIDADE SUPERFICIAL /6/
28 C1 CUSTOS INDEPENDENTES DOS PARAMETROS /5/
29 C2 CUSTOS DE SALARIO HOMEM MAQUINA /30/
30 C3 CUSTOS DE FERRAMENTAL /10/;
31
32 VARIABLES
33 VCI
34 AI
35 CF
36 PCI
37 T
38 RPI;
39
40
41 VCI.LO=10; VCI.UP=VCIMAX;
42 AI.LO=0.05; AI.UP= AIMAX;
43 T.LO=TIMIN; T.UP=TIMAX;
44 RPI.LO=0.2; RPI.UP=1.6;
45
46 EQUATIONS
47 CUSTO EQUACAO CUSTO TOTAL DE FABRICACAO
48 PROF EQUACAO DE PROFUNDIDADE DE CORTE
49 VIDA EQUACAO DE VIDA
50 RAIOP EQUACAO DE RAIOP;
51
52 CUSTO .. CF =E= ((LA*PI*DE)/(60000*AI*VCI))*C2+ (C1)
53 + ((LA*PI*DE*EXP((X-1)*LOG(VCI)))/(1000*K*AI))*C3;
54
55 PROF .. PCI =E= PMAX;
56
57 VIDA .. T =E= K/(EXP(X*LOG(VCI)));
58

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:30:38 PAGE 2
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM

```

59     RAIOP ..  AI =L= SQRT((RT*8*RPI)/1000);
60
61     MODEL CUSTOA /ALL/;
62
63     SOLVE CUSTOA USING NLP MINIMIZING CF;
64
65     DISPLAY VCI.L,AI.L,PCI.L,T.L,RPI.L;
66
67

```

COMPILATION TIME = 0.015 MINUTES

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:30:38 PAGE 3
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 EQUATION LISTING SOLVE CUSTOA USING NLP FROM LINE 63

---- CUSTO =E= EQUACAO CUSTO TOTAL DE FABRICACAO

CUSTO.. (8.9357)*VCI + (1792.7935)*AI + CF =E= 5 ; (LHS = -89.6397 ***)

---- PROF =E= EQUACAO DE PROFUNDIDADE DE CORTE

PROF.. PCI =E= 0.1 ; (LHS = 0 ***)

---- VIDA =E= EQUACAO DE VIDA

VIDA.. (4649.9894)*VCI + T =E= 0 ; (LHS = -17128.6325 ***)

---- RAIOP =L= EQUACAO DE RAI0

RAIOP.. AI - (0.2449)*RPI =L= 0 ; (LHS = -0.048)

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:30:38 PAGE 4
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 COLUMN LISTING SOLVE CUSTOA USING NLP FROM LINE 63

---- VCI

VCI
 (.LO, .L, .UP = 10, 10, 640)
 (8.9357) CUSTO
 (4649.9894) VIDA

---- AI

AI
 (.LO, .L, .UP = 0.05, 0.05, 0.5)
 (1792.7935) CUSTO
 1 RAIOP

---- CF

CF
 (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
 1 CUSTO

---- PCI

PCI
 (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
 1 PROF

---- T

T
 (.LO, .L, .UP = 30, 30, 50)
 1 VIDA

---- RPI

RPI
 (.LO, .L, .UP = 0.2, 0.2, 1.6)
 (-0.2449) RAIOP

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:30:38 PAGE 5
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 MODEL STATISTICS SOLVE CUSTOA USING NLP FROM LINE 63

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS 4 SINGLE EQUATIONS 4
 BLOCKS OF VARIABLES 6 SINGLE VARIABLES 6
 NON ZERO ELEMENTS 8 NON LINEAR N-Z 4
 DERIVATIVE POOL 7 CONSTANT POOL 11
 CODE LENGTH 145

GENERATION TIME = 0.009 MINUTES

EXECUTION TIME = 0.027 MINUTES

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:30:44 PAGE 6
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 SOLUTION REPORT SOLVE CUSTOA USING NLP FROM LINE 63

SOLVE SUMMARY

MODEL CUSTOA OBJECTIVE CF
 TYPE NLP DIRECTION MINIMIZE
 SOLVER MINOS5 FROM LINE 63

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
 **** MODEL STATUS 2 LOCALLY OPTIMAL
 **** OBJECTIVE VALUE 7.5809

RESOURCE USAGE, LIMIT 0.034 1000.000
 ITERATION COUNT, LIMIT 17 1000
 EVALUATION ERRORS 0 0

MINOS 5.2 (Mar 1988)
 =====

B. A. Murtagh, University of New South Wales
 and
 P. E. Gill, W. Murray, M. A. Saunders and M. H. Wright
 Systems Optimization Laboratory, Stanford University.

WORK SPACE NEEDED (ESTIMATE) -- 453 WORDS.
 WORK SPACE AVAILABLE -- 8100 WORDS.

EXIT -- OPTIMAL SOLUTION FOUND
 MAJOR ITNS, LIMIT 20 50
 FUNOBJ, FUNCON CALLS 67 67
 SUPERBASICS 1
 INTERPRETER USAGE .01
 NORM RG / NORM PI 1.615E-10

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- EQU CUSTO 5.000 5.000 5.000 -1.000
 ---- EQU PROF 0.100 0.100 0.100 EPS
 ---- EQU VIDA . . . EPS
 ---- EQU RAIOP -INF . . -9.313

CUSTO EQUACAO CUSTO TOTAL DE FABRICACAO
 PROF EQUACAO DE PROFUNDIDADE DE CORTE
 VIDA EQUACAO DE VIDA
 RAIOP EQUACAO DE RAI0

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

--- VAR VCI	10.000	99.192	640.000	.
--- VAR AI	0.050	0.277	0.500	.
--- VAR CF	-INF	7.581	+INF	.
--- VAR PCI	-INF	0.100	+INF	.
--- VAR T	30.000	34.200	50.000	EPS
--- VAR RPI	0.200	1.600	1.600	-0.807

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:30:44 PAGE 7
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 SOLUTION REPORT SOLVE CUSTOA USING NLP FROM LINE 63

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
 0 INFEASIBLE
 0 UNBOUNDED
 0 ERRORS

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 19:30:44 PAGE 8
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 EXECUTING

--- 65 VARIABLE VCIL	=	99.192
VARIABLE AIL	=	0.277
VARIABLE PCIL	=	0.100
VARIABLE T.L	=	34.200
VARIABLE RPI.L	=	1.600

**** FILE SUMMARY

INPUT D:\SERGIO\GAMS\CUSTOAC1.GMS
 OUTPUT D:\SERGIO\GAMS\CUSTOAC1.LST

EXECUTION TIME = 0.026 MINUTES

.. Arquivo para critério de máxima produção em desbaste

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:24:44 PAGE 1
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM

4
 5 *ESTE PROGRAMA DEVE CALCULAR OS PARAMETROS DE CORTE OTIMOS PARA UMA
 6 *OPERACAO DE TORNEAMENTO UTILIZANDO CRITERIOS DE MAXIMA PRODUCAO
 7 *EM OPERACOES DE DESBASTE.

8
 9

10 SCALARS

11 VCIMAX VELOCIDADE DE CORTE MAXIMA FERRAMENTA I /640/
 12 AIMAX AVANCO MAXIMO FERRAMENTA I /0.5/
 13 POTJMAX POTENCIA NOMINAL NO EIXO ARVORE MAQUINA J /15/
 14 LA COMPRIMENTO DE CORTE PARA OPERACAO I /300/
 15 DE DIAMETRO EQUIVALENTE PARA OPERACAO I /95/
 16 TS TEMPOS SECUNDARIOS /0.36/
 17 TA TEMPOS DE APROXIMACAO E AFASTAMENTO /0.21/
 18 TP TEMPO DE PREPARACAO DE MAQUINA /25/
 19 TTF TEMPO DE TROCA DE FERRAMENTA /3.6/
 20 Z NUMERO TOTAL DE PECAS /800/
 21 K CONSTANTE DE TAYLOR /8.8E6/
 22 X CONSTANTE DE TAYLOR /2.71/
 23 TIMAX VIDA MAXIMA DA FERRAMENTA I /50/
 24 TIMIN VIDA MINIMA DA FERRAMENTA I /30/
 25 PI /3.14159/
 26 NETA EFICIENCIA DA MAQUINA /0.8/
 27 ZI CONSTANTE DE KIENZLE /0.18/
 28 KT ANGULO DE POSICIONAMENTO /1.57/
 29 KS COEFICIENTE DE RESISTENCIA AO CORTE /216/;

30

31 VARIABLES

32 VCI
 33 AI
 34 TT
 35 PCI
 36 T
 37 RPI;

38

39

40 VCI.LO=10; VCI.UP=VCIMAX;
 41 AI.LO=0.05; AI.UP= AIMAX;
 42 T.LO=TIMIN; T.UP=TIMAX;
 43 RPI.LO=0.2; RPI.UP=2.4;

44

45 EQUATIONS

46 TEMPO EQUACAO TEMPO TOTAL DE FABRICACAO
 47 POT EQUACAO DE POTENCIA
 48 VIDA EQUACAO DE VIDA
 49 RAIOP EQUACAO DE RAIOP;

50

51 TEMPO .. TT =E= (LA*PI*DE)/(1000*AI*VCI) + (TS + TA + TP/Z)
 52 + ((LA*PI*DE*EXP((X-1)*LOG(VCI)))/(1000*K*AI) -(1/Z))
 *TTF;

53

54

55 POT .. POTJMAX*NETA=E= ((PCI*EXP((1- ZI)*LOG(AI*SIN(KT))))
 KS)/SIN(KT)(VCI))/(75*60);

56

OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM

```

57      VIDA ..  T =E= K/(EXP(X*LOG(VCI)));
58
59      RAIOP ..  RPI =E= 2*AI;
60
61      MODEL PRODUCAOD /ALL/;
62
63      SOLVE PRODUCAOD USING NLP MINIMIZING TT;
64
65      DISPLAY VCI.L,AI.L,PCI.L,T.L,RPI.L;
66
67

```

COMPILATION TIME = 0.015 MINUTES

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:24:44 PAGE 3
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 EQUATION LISTING SOLVE PRODUCAOD USING NLP FROM LINE 63

---- TEMPO =E= EQUACAO TEMPO TOTAL DE FABRICACAO

TEMPO.. (17.9006)*VCI + (3582.164)*AI + TT =E= 0.5967 ; (LHS = -179.1082 ***)

---- POT =E= EQUACAO DE POTENCIA

POT.. (0)*VCI + (0)*AI - (0.0412)*PCI =E= -12 ; (LHS = 0 ***)

---- VIDA =E= EQUACAO DE VIDA

VIDA.. (4649.9894)*VCI + T =E= 0 ; (LHS = -17128.6325 ***)

---- RAIOP =E= EQUACAO DE RAIOP

RAIOP.. - 2*AI + RPI =E= 0 ; (LHS = 0.1 ***)

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:24:44 PAGE 4
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 COLUMN LISTING SOLVE PRODUCAOD USING NLP FROM LINE 63

---- VCI

VCI
 (.LO, .L, .UP = 10, 10, 640)

(17.9006) TEMPO
 (0) POT
 (4649.9894) VIDA

---- AI

AI
 (.LO, .L, .UP = 0.05, 0.05, 0.5)
 (3582.164) TEMPO
 (0) POT
 -2 RAIOP

---- TT

TT
 (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
 1 TEMPO

---- PCI

PCI
 (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
 (-0.0412) POT

---- T

T
 (.LO, .L, .UP = 30, 30, 50)
 1 VIDA

---- RPI

RPI
 (.LO, .L, .UP = 0.2, 0.2, 2.4)
 1 RAIOP

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:24:44 PAGE 5
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 MODEL STATISTICS SOLVE PRODUCAOD USING NLP FROM LINE 63

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS 4 SINGLE EQUATIONS 4
 BLOCKS OF VARIABLES 6 SINGLE VARIABLES 6

NON ZERO ELEMENTS 10 NON LINEAR N-Z 6
 DERIVATIVE POOL 7 CONSTANT POOL 12
 CODE LENGTH 197

GENERATION TIME = 0.011 MINUTES

EXECUTION TIME = 0.026 MINUTES

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:24:54 PAGE 6
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 SOLUTION REPORT SOLVE PRODUCAOD USING NLP FROM LINE 63

SOLVE SUMMARY

MODEL PRODUCAOD OBJECTIVE TT
 TYPE NLP DIRECTION MINIMIZE
 SOLVER MINOS5 FROM LINE 63

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
 **** MODEL STATUS 2 LOCALLY OPTIMAL
 **** OBJECTIVE VALUE 2.5232

RESOURCE USAGE, LIMIT 0.099 1000.000
 ITERATION COUNT, LIMIT 94 1000
 EVALUATION ERRORS 0 0

MINOS 5.2 (Mar 1988)
 =====

B. A. Murtagh, University of New South Wales
 and
 P. E. Gill, W. Murray, M. A. Saunders and M. H. Wright
 Systems Optimization Laboratory, Stanford University.

WORK SPACE NEEDED (ESTIMATE) -- 486 WORDS.
 WORK SPACE AVAILABLE -- 8100 WORDS.

EXIT -- OPTIMAL SOLUTION FOUND
 MAJOR ITNS, LIMIT 32 50
 FUNOBJ, FUNCON CALLS 250 253
 SUPERBASICS 0
 INTERPRETER USAGE .03
 NORM RG / NORM PI 0.000E+00

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

--- EQU TEMPO 0.597 0.597 0.597 -1.000
 --- EQU POT -12.000 -12.000 -12.000 EPS
 --- EQU VIDA . . . -0.017
 --- EQU RAIOP . . . EPS

TEMPO EQUACAO TEMPO TOTAL DE FABRICACAO
 POT EQUACAO DE POTENCIA
 VIDA EQUACAO DE VIDA

RAIOP EQUACAO DE RAI0

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR VCI	10.000	104.106	640.000	.
---- VAR AI	0.050	0.500	0.500	-3.853
---- VAR TT	-INF	2.523	+INF	.
---- VAR PCI	-INF	4.239	+INF	.
---- VAR T	30.000	30.000	50.000	0.017
---- VAR RPI	0.200	1.000	2.400	.

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:24:54 PAGE 7
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 SOLUTION REPORT SOLVE PRODUCAOD USING NLP FROM LINE 63

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
 0 INFEASIBLE
 0 UNBOUNDED
 0 ERRORS

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:24:54 PAGE 8
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 EXECUTING

---- 65 VARIABLE VCIL = 104.106
 VARIABLE AIL = 0.500
 VARIABLE PCIL = 4.239
 VARIABLE T.L = 30.000
 VARIABLE RPI.L = 1.000

**** FILE SUMMARY

INPUT D:\SERGIO\GAMS\TEMPODB2.GMS
 OUTPUT D:\SERGIO\GAMS\TEMPODB2.LST

EXECUTION TIME = 0.024 MINUTES

.. Arquivo para critério de máxima produção em acabamento

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:40:43 PAGE 1
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM

3

4 *ESTE PROGRAMA DEVE CALCULAR OS PARAMETROS DE CORTE OTIMOS PARA UMA
 5 *OPERACAO DE TORNEAMENTO UTILIZANDO CRITERIOS DE MAXIMA PRODUCAO
 6 *EM OPERACOES DE ACABAMENTO.

```

7
8
9 SCALARS
10
11 VCIMAX VELOCIDADE DE CORTE MAXIMA FERRAMENTA I /640/
12 AIMAX AVANCO MAXIMO FERRAMENTA I /0.5/
13 POTJMAX POTENCIA NOMINAL NO EIXO ARVORE MAQUINA J /15/
14 LA COMPRIMENTO DE CORTE PARA OPERACAO I /300/
15 DE DIAMETRO EQUIVALENTE PARA OPERACAO I /95/
16 TS TEMPOS SECUNDARIOS /0.36/
17 TA TEMPOS DE APROXIMACAO E AFASTAMENTO /0.21/
18 TP TEMPO DE PREPARACAO DE MAQUINA /25/
19 TTF TEMPO DE TROCA DE FERRAMENTA /3.6/
20 Z NUMERO TOTAL DE PECAS /800/
21 K CONSTANTE DE TAYLOR /8.8E6/
22 X CONSTANTE DE TAYLOR /2.71/
23 TIMAX VIDA MAXIMA DA FERRAMENTA I /50/
24 TIMIN VIDA MINIMA DA FERRAMENTA I /30/
25 PI /3.14159/
26 NETA EFICIENCIA DA MAQUINA /0.8/
27 ZI CONSTANTE DE KIENZLE /0.18/
28 KT ANGULO DE POSICIONAMENTO /1.57/
29 KS COEFICIENTE DE RESISTENCIA AO CORTE /216/
30 PMAX SOBREMETAL DA OPERACAO /0.1/
31 RT RUGOSIDADE SUPERFICIAL /6/;
32
33 VARIABLES
34
35 VCI
36 AI
37 TT
38 PCI
39 RPI
40 T;
41
42
43 VCI.LO=10; VCI.UP=VCIMAX;
44 AI.LO=0.05; AI.UP= AIMAX;
45 RPI.LO=0.2; RPI.UP=2.4;
46 T.LO=TIMIN; T.UP=TIMAX;
47
48
49 EQUATIONS
50 TEMPO EQUACAO TEMPO TOTAL DE FABRICACAO
51 PROF EQUACAO DE PROFUNDIDADE DE CORTE
52 VIDA EQUACAO DE VIDA
53 AVANCO EQUACAO DE AVANCO MAXIMO;
54
55 TEMPO .. TT =E= (LA*PI*DE)/(1000*AI*VCI) + (TS + TA + TP/Z)
56 +((LA*PI*DE*EXP((X-1)*LOG(VCI)))/(1000*K*AI) -(1/Z))*TTF;
57

```

```

58 PROF .. PCI =E= PMAX;
59
60 VIDA .. T =E= K/(EXP(X*LOG(VCI)));
61
62 AVANCO .. AI =L= SQRT(RT*8*RPI/1000);
63
64
65 MODEL PRODUCAOA /ALL/;
66
67
68 SOLVE PRODUCAOA USING NLP MINIMIZING TT;
69
70
71 DISPLAY VCI,L,ALL,PCIL,T,L,RPI,L;
72
73

```

COMPILATION TIME = 0.014 MINUTES

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:40:43 PAGE 3
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 EQUATION LISTING SOLVE PRODUCAOA USING NLP FROM LINE 68

---- TEMPO =E= EQUACAO TEMPO TOTAL DE FABRICACAO

TEMPO.. (17.9006)*VCI + (3582.164)*AI + TT =E= 0.5967 ; (LHS = -179.1082 ***)

---- PROF =E= EQUACAO DE PROFUNDIDADE DE CORTE

PROF.. PCI =E= 0.1 ; (LHS = 0 ***)

---- VIDA =E= EQUACAO DE VIDA

VIDA.. (4649.9894)*VCI + T =E= 0 ; (LHS = -17128.6325 ***)

---- AVANCO =L= EQUACAO DE AVANCO MAXIMO

AVANCO.. AI - (0.2449)*RPI =L= 0 ; (LHS = -0.048)

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:40:43 PAGE 4
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 COLUMN LISTING SOLVE PRODUCAOA USING NLP FROM LINE 68

---- VCI

VCI

(.LO, .L, .UP = 10, 10, 640)

(17.9006) TEMPO
(4649.9894) VIDA

---- AI

AI
(.LO, .L, .UP = 0.05, 0.05, 0.5)
(3582.164) TEMPO
1 AVANCO

---- TT

TT
(.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
1 TEMPO

---- PCI

PCI
(.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)
1 PROF

---- RPI

RPI
(.LO, .L, .UP = 0.2, 0.2, 2.4)
(-0.2449) AVANCO

---- T

T
(.LO, .L, .UP = 30, 30, 50)
1 VIDA

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:40:43 PAGE 5
OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
MODEL STATISTICS SOLVE PRODUCAOA USING NLP FROM LINE 68

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	4	SINGLE EQUATIONS	4
BLOCKS OF VARIABLES	6	SINGLE VARIABLES	6
NON ZERO ELEMENTS	8	NON LINEAR N-Z	4
DERIVATIVE POOL	7	CONSTANT POOL	10
CODE LENGTH	138		

GENERATION TIME = 0.010 MINUTES

EXECUTION TIME = 0.026 MINUTES

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:40:49 PAGE 6
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 SOLUTION REPORT SOLVE PRODUCAOA USING NLP FROM LINE 68

SOLVE SUMMARY

MODEL PRODUCAOA OBJECTIVE TT
 TYPE NLP DIRECTION MINIMIZE
 SOLVER MINOS5 FROM LINE 68

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
 **** MODEL STATUS 2 LOCALLY OPTIMAL
 **** OBJECTIVE VALUE 3.4347

RESOURCE USAGE, LIMIT 0.042 1000.000
 ITERATION COUNT, LIMIT 26 1000
 EVALUATION ERRORS 0 0

MINOS 5.2 (Mar 1988)
 =====

B. A. Murtagh, University of New South Wales
 and
 P. E. Gill, W. Murray, M. A. Saunders and M. H. Wright
 Systems Optimization Laboratory, Stanford University.

WORK SPACE NEEDED (ESTIMATE) -- 450 WORDS.
 WORK SPACE AVAILABLE -- 8100 WORDS.

EXIT -- OPTIMAL SOLUTION FOUND
 MAJOR ITNS, LIMIT 26 50
 FUNOBJ, FUNCON CALLS 96 96
 SUPERBASICS 0
 INTERPRETER USAGE .01
 NORM RG / NORM PI 0.000E+00

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- EQU TEMPO 0.597 0.597 0.597 -1.000
 ---- EQU PROF 0.100 0.100 0.100 EPS
 ---- EQU VIDA . . . -0.025
 ---- EQU AVANCO -INF . . -8.361

TEMPO EQUACAO TEMPO TOTAL DE FABRICACAO
 PROF EQUACAO DE PROFUNDIDADE DE CORTE
 VIDA EQUACAO DE VIDA
 AVANCO EQUACAO DE AVANCO MAXIMO

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

----	VAR VCI	10.000	104.106	640.000	.
----	VAR AI	0.050	0.339	0.500	.
----	VAR TT	-INF	3.435	+INF	.
----	VAR PCI	-INF	0.100	+INF	.
----	VAR RPI	0.200	2.400	2.400	-0.591
----	VAR T	30.000	30.000	50.000	0.025

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:40:49 PAGE 7
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 SOLUTION REPORT SOLVE PRODUCAOA USING NLP FROM LINE 68

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
 0 INFEASIBLE
 0 UNBOUNDED
 0 ERRORS

GAMS 2.05/S PC AT/XT 93/10/20 18:40:49 PAGE 8
 OTIMIZACAO DE PARAMETROS DE USINAGEM
 EXECUTING

----	71 VARIABLE VCIL	=	104.106
	VARIABLE AIL	=	0.339
	VARIABLE PCIL	=	0.100
	VARIABLE T.L	=	30.000
	VARIABLE RPIL	=	2.400

**** FILE SUMMARY

INPUT D:\SERGIO\GAMS\TEMPOAC1.GMS
 OUTPUT D:\SERGIO\GAMS\TEMPOAC1.LST

EXECUTION TIME = 0.018 MINUTES

{PÁGINA}

• **Programas para verificação**

Tempo de fabricação

% Gráfico e tabela de pontos para cálculo do tempo de fabricação

% inicializacao das constantes

K = 8.8e6;
 x = 2.71;
 de = 95;
 l = 300;
 ts = 0.36;

```

ta = 0.21;
tp = 25;
Z = 800;
ttf = 3.6;
pi = 3.1416;

% Definição da malha

[a, Vc]=meshgrid(1:0.05:1.2,10:10:460);

% Cálculo da função

tf = ((l*pi*de)/1000).*((a .* Vc).^(-1)) + (ts + ta + tp/Z) + (((l*pi*de)/(1000*K)) .* (Vc .^(x-1)) .* (a .^
(-1))) - (1/Z)) .* ttf;

view(-30,60);

% Visualização do gráfico

mesh(a,Vc,tf)
title('tempo de fabricação - min');
xlabel('a - mm');
ylabel('Vc - m/min');

% Armazenar pontos em arquivo

fid = fopen('tempo.txt','w');
fprintf(fid,' tf      a      Vc\n');

for i=1:23;
    for j=1:23
        y = [tf(i,j); a(i,j); Vc(i,j) ];

        fprintf(fid,'%6.2f %6.2f %6.2f\n', y);
    end
end

Custo de fabricação

% Gráfico e tabela de pontos para cálculo do custo de fabricação

% inicializacao das constantes

C2 = 8.5;
Ctf = 1.4;
K = 8.8e6;
x = 2.71;
de = 95;
l = 300;
ts = 0.36;
ta = 0.21;
tp = 25;
Z = 800;
ttf = 3.6;
pi = 3.1416;

```

```

% Definição da malha

[a, Vc]=meshgrid(1:0.05:1.2,10:10:460);

% Cálculo da função

C3 = Ctf + (ttf/60) * C2;

Cti = C2 * (ts + ta)/60;

Ctp = C2 * (tp/Z)/60;

C1 = Cti + Ctp;

Cf = C2 .* ((l*pi*de)/60000).*((a .* Vc).^(-1)) + C1 + (((l*pi*de)/(1000*K)) .* (Vc.^(x-1)) .* (a.^(-1)))) .* C3;

view(-30,60);

% Visualização do gráfico

mesh(a,Vc,Cf)
title('custo de fabricação - $');
xlabel('a - mm');
ylabel('Vc - m/min');

% Armazenar pontos em arquivo

fid = fopen('custo.txt','w');
fprintf(fid,' Cf      a      Vc\n');

for i=1:23;
    for j=1:23
        y = [Cf(i,j); a(i,j); Vc(i,j) ];

        fprintf(fid,'%6.2f %6.2f %6.2f\n', y);
    end
end
end

```