

ROBERTO REIS FERREIRA DA SILVA

THIAGO SILVA DE MARTINO

9,0
9,0 2003

[Handwritten signature]

Nota final
9,1 (máximo)

PLANEJAMENTO DE PROCESSOS

AUXILIADO POR COMPUTADOR

[Handwritten signature]
22/01/04

**Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção de
título de graduado em
Engenharia Mecatrônica**

São Paulo

2003

ROBERTO REIS FERREIRA DA SILVA

THIAGO SILVA DE MARTINO

PLANEJAMENTO DE PROCESSOS

AUXILIADO POR COMPUTADOR

**Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção de
título de graduado em
Engenharia Mecatrônica**

Engenharia Mecatrônica

Orientador:

Prof. Dr. Edson Gomes

São Paulo

2003



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	PLANEJAMENTO DE PROCESSOS TRADICIONAL.....	2
2.1	Deficiências do planejamento de processos tradicional.....	3
3	TIPOS DE SISTEMAS CAPP.....	4
3.1	Abordagem Variante	4
3.1.1	Sistemas Especialistas	5
3.2	Abordagem Generativa.....	6
4	METODOLOGIA EMPREGADA	7
5	MODELO E TABELAS DE PARÂMETRO.....	10
5.1	Modelo de Custo.....	10
5.2	Tabela de Rugosidade para os processos básicos.....	12
5.3	Tabela de Tolerância geométrica dos processos básicos:	13
5.4	Modelo de equivalência:	13
5.5	Modelo de Avanço e Profundidade de Corte:	14
5.6	Modelo de seleção do inserto	16
5.7	Modelo de outros parâmetros de corte.....	17
5.8	Modelo das Máquinas e ferramentas disponíveis:.....	20
6	ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO.....	21
7	CONCLUSÃO	26
7.1	Aspectos gerais e tendências.....	26
7.2	Modelagem Baseada em Features	27
8	BIBLIOGRAFIA	29

ROBERTO REIS FERREIRA DA SILVA
THIAGO SILVA DE MARTINO

9,0
9,0 2003
9,0
Nota final
9,1 (corrigida)
22/01/04

PLANEJAMENTO DE PROCESSOS
AUXILIADO POR COMPUTADOR

Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção de
título de graduado em
Engenharia Mecatrônica

São Paulo
2003

ROBERTO REIS FERREIRA DA SILVA

THIAGO SILVA DE MARTINO

PLANEJAMENTO DE PROCESSOS

AUXILIADO POR COMPUTADOR

**Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção de
título de graduado em
Engenharia Mecatrônica**

Engenharia Mecatrônica

Orientador:

Prof. Dr. Edson Gomes

São Paulo

2003



SUMÁRIO

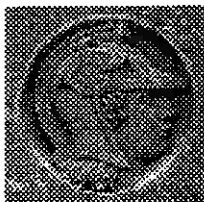
1	INTRODUÇÃO	1
2	PLANEJAMENTO DE PROCESSOS TRADICIONAL.....	2
2.1	Deficiências do planejamento de processos tradicional.....	3
3	TIPOS DE SISTEMAS CAPP.....	4
3.1	Abordagem Variante	4
3.1.1	Sistemas Especialistas	5
3.2	Abordagem Generativa.....	6
4	METODOLOGIA EMPREGADA	7
5	MODELO E TABELAS DE PARÂMETRO.....	10
5.1	Modelo de Custo.....	10
5.2	Tabela de Rugosidade para os processos básicos.....	12
5.3	Tabela de Tolerância geométrica dos processos básicos:	13
5.4	Modelo de equivalência:	13
5.5	Modelo de Avanço e Profundidade de Corte:	14
5.6	Modelo de seleção do inserto	16
5.7	Modelo de outros parâmetros de corte.....	17
5.8	Modelo das Máquinas e ferramentas disponíveis:.....	20
6	ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO	21
7	CONCLUSÃO	26
7.1	Aspectos gerais e tendências	26
7.2	Modelagem Baseada em Features	27
8	BIBLIOGRAFIA	29

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma proposta de implementação de planejamento de processos de fabricação auxiliado por computador, apresentando suas bases teóricas e técnicas e que foram base para um algoritmo implementado no software Microsoft Excel. A preocupação do texto está centrada em procedimentos, métodos e o uso de dados tabelados que foram adquiridos por processistas ao longo do tempo, visando otimizar o trabalho intelectual do mesmo e deixando o trabalho repetitivo e computacional a cargo do computador. Além do cumprimento desse objetivo, o algoritmo pode ser utilizado como base para o desenvolvimento e otimização de parâmetros de usinagem para novos materiais e ferramentas.

ABSTRACT

This report proposes the implementation of a computer aided process planning. It contains the theoretical and technical knowledge that were necessary to devise an algorithm in the Microsoft Excel Software. The concern of this text is focused on proceedings, methods and the use of catalogued data gathered by processists over the time, aiming at optimizing the intellectual work of the process planner and leaving to the computer the repetitive and computational task. Besides the fulfillment of this objective, the algorithm can be used as the basis to the development and optimization of machining parameters to new materials and tools.



1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho, apresentaremos o conceito de implementação de Planejamento de Processos Auxiliados por Computador (CAPP) à criação de planos de processo de determinadas peças. E ainda vamos introduzir as tabelas e dados que posteriormente podem integrar um software de obtenção de plano de processo.

Primeiramente devemos lembrar que o objetivo de qualquer processo de manufatura é transformar uma idéia num produto que possa ser vendido. Neste contexto, o planejamento de processo é um elo importante no ciclo de manufatura.

As funções do planejamento de processo são selecionar e definir os processos a serem executados em uma peça de maneira econômica, de acordo com as especificações do projeto. A obtenção de parâmetros otimizados permite que esse processo seja economicamente viável.

O documento resultante do planejamento do processo, conhecido como Plano de Processo, é a base para se realizar o planejamento da produção, e serve como referência para esta.

Apesar da importância do planejamento de processos no ciclo de manufatura, é ainda predominante um intenso trabalho do planejador, dependendo fortemente de sua experiência, habilidade e intuição. A dependência de experiência prática geralmente impossibilita uma minuciosa análise e otimização do processo de planejamento e quase sempre resulta em custos de produção maiores que o necessário, atrasos, erros e processos não padronizados. O planejador ainda precisa recorrer a dados de manufatura provenientes de handbooks, o que consome boa parte de seu tempo. Tais handbooks são ainda feitos com dados experimentais e nem sempre estão atualizados de acordo com novas tecnologias e ferramentas disponíveis. O desejo de aumentar a qualidade e reduzir o tempo e custo de implantação, ou aumentar a produtividade, levou a um amplo interesse em processos de planejamento auxiliados por computador (CAPP – Computer-Aided Process Planning).



2 PLANEJAMENTO DE PROCESSOS TRADICIONAL

A abordagem tradicional em processos de planejamento discutida anteriormente é baseada no estudo das especificações de desenho e manufatura da peça pelo planejador, identificando peças e características similares, lembrando processos anteriores. Na tomada de decisões e na produção de desenhos, o planejador de processos utiliza dados padrões e literatura auxiliar como padrões de tolerância, códigos de materiais e diferentes padrões de rugosidade, superfície, maquinário e capacidades. Um grande trabalho preparatório deve ser feito antes que as decisões finais sobre o plano de fabricação sejam tomadas.

Uma análise das atividades do planejador de processos foi feita e seu tempo de trabalho segue a seguinte distribuição:

- 15% - Tomada de decisões técnicas
- 40% - Análise e cálculos de dados em tabelas
- 45% - Preparação de textos e documentos

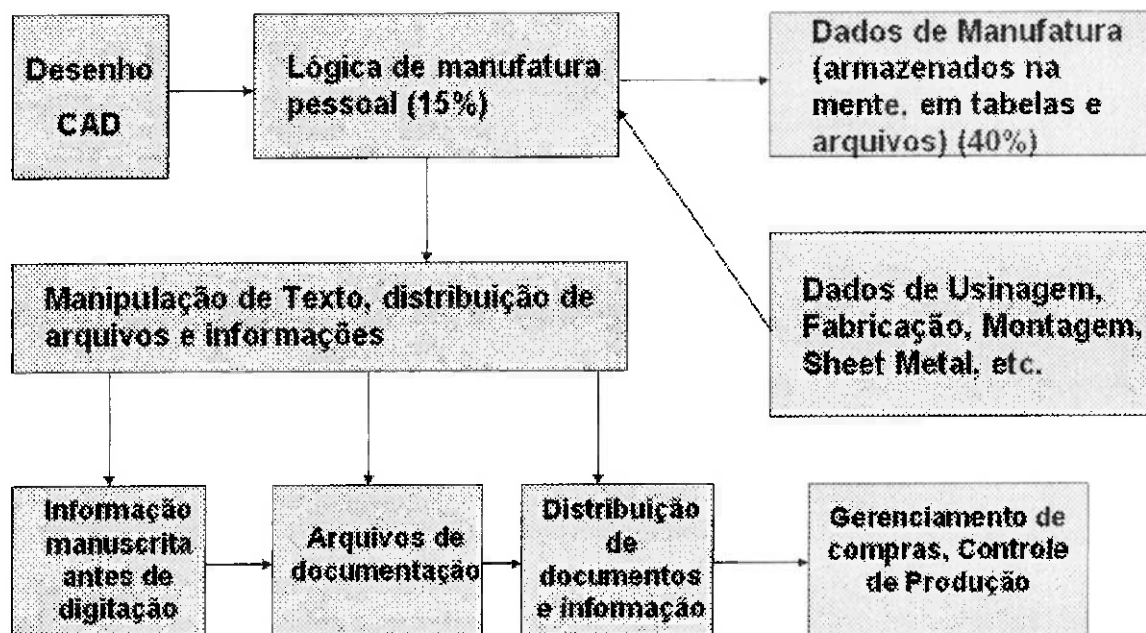


Fig. 1 – Atividades do Planejador de Processos (HALEVI, 1995)

2.1 Deficiências do planejamento de processos tradicional

As principais desvantagens do processo de planejamento tradicional são:

- A lógica de manufatura é individual – está na mente do planejador
- É um processo trabalhoso guiado pela intuição
- Resultados são geralmente incompletos e inconsistentes
- Tempos de pré-produção são extensos
- Informação do processo é desatualizada



3 TIPOS DE SISTEMAS CAPP

De acordo com a evolução do nível de automação, existem diferentes tipos de CAPP, como apresentados a seguir:

3.1 Abordagem Variante

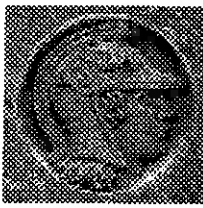
A abordagem tradicional se baseia em examinar o desenho de uma peça, identificar similaridades com peças já produzidas no passado, examinar os processos anteriores, identificando as similaridades e adequando à peça atual.

A abordagem variante se assemelha à abordagem tradicional, entretanto a busca de processos anteriores se dá de maneira computacional, através de bancos de dados armazenados anteriormente.

A abordagem variante é derivada da Tecnologia de Grupo, onde peças são classificadas e codificadas em famílias. As famílias de peças são definidas por uma quantidade suficiente de atributos semelhantes entre si, que prescrevem um método de manufatura comum. Para cada família de peças, um planejamento de processos padrão, que inclui todas as possíveis operações, é armazenado no sistema (BD). Esse planejamento padrão é recuperado e editado para a nova peça.

Em comparação com planejamento de processos realizados manualmente, essa abordagem é altamente vantajosa nos seguintes aspectos:

- Uso de dados de fabricação e experiência da companhia
- Libera o planejador das atividades rotineiras
- Aplica-se a todos os tipos de manufatura
- É capaz de atualização e mudanças em função de novas tecnologias
- Incorpora padrões da companhia



- Planejamento completo incluindo montagem, pintura, armazenamento, marketing, etc.

3.1.1 Sistemas Especialistas

Um sistema especialista é um programa de computador especializado que exibe um mesmo nível de habilidade em resolução de problemas como um especialista em um domínio limitado de problemas. Ele engloba conhecimento e capacidades que o permitem adquirir conclusões com qualidade comparáveis àquelas adquiridas por um especialista.

A principal diferença entre um sistema especialista e um sistema de computação convencional é que na maioria dos sistemas especialistas, o modelo de solução de problemas é uma entidade separada, enquanto nos convencionais aparecendo implicitamente como parte do código do programa. Esse conhecimento é manipulado em separado por uma estratégia de controle. Tal arquitetura de sistemas fornece um modo conveniente de construir ferramentas de resolução de problemas para diversos domínios.

Uma das chaves para o sucesso de um sistema especialista é a aquisição do conhecimento que se torna sua parte principal. Não importa quão boa a metodologia de representação do conhecimento é, ou quão brilhante o design do sistema é, se a base do conhecimento é defeituosa é impossível ter um sistema especialista eficiente.

Problemas na aplicação de sistemas especialistas:

- Redundância de dados: regras conflitantes podem colocar o sistema em "looping"
- Aquisição do conhecimento: o conhecimento se baseia na experiência de algum processista então o sistema se torna especialista daquele processista



3.2 Abordagem Generativa

No sistema generativo, o programa possui conhecimento de usinagem e visão geométrica da peça. Os planos de processos são gerados por meio de algoritmos tecnológicos, decisões lógicas, fórmulas e dados geométricos para executar decisões de processos únicos para a conversão de uma peça desde sua matéria prima até seu estado final.

O "know-how" de manufatura e as capacidades dos equipamentos são armazenados num sistema computacional. Quando do uso do sistema, o planejamento de uma peça específica é feito sem o envolvimento do processista e sem recorrer a planejamentos de processos anteriores. No caso de mudanças na planta de manufatura ou máquinas sobrecarregadas, o sistema generativo vai automaticamente gerar um planejamento alternativo. A maior vantagem da abordagem generativa é que é completamente automática e não depende de uma experiência específica do processista. É um sistema dinâmico que pode ser empregado em sistemas CIM.

A entrada, descrevendo especificações da peça, que é mandatória para sistemas generativos pode vir de uma entrada de texto onde o usuário responde certas questões, ou como uma entrada gráfica de um sistema CAD. A abordagem generativa é complexa e de difícil desenvolvimento, requer um conhecimento profundo de processos de manufatura e engenharia mecânica.



4 METODOLOGIA EMPREGADA

A metodologia utilizada para atingir o objetivo do trabalho CAPP é dividir o processo de manufatura em várias atividades, num arranjo serial. Geralmente, cada atividade é responsável por um estágio diferente do processo todo, cada estágio representando uma disciplina e um treinamento únicos. Nesta parte do trabalho apresentamos as etapas resumidamente.

Segundo HALEVI (1995), O planejamento de processo pode então ser definido por uma seqüência de atividades, são elas:

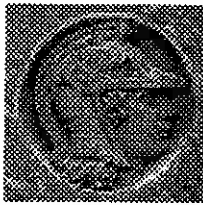
1. Interpretação das especificações contidas nos desenhos de projetos de uma peça, principalmente dimensões e tolerâncias, tolerâncias geométricas, rugosidade superficial, tipo de material, tamanho da peça bruta, número de peças no lote, etc.

2. Seleção dos processos e ferramentas que são candidatos potenciais para produzir a peça e os seus feitos, respeitando-se juntamente todas as restrições impostas nas especificações.

A seleção de ferramentas necessárias para uma tarefa específica envolve muitos parâmetros, tais como a forma e o material do inserto (a parte cortante propriamente dita), o tipo de suporte do inserto, o método de fixação do inserto, etc.

3. Determinação das tolerâncias de produção e das dimensões de colocação que asseguram a execução apropriada das tolerâncias de projeto, escolhendo-se as dimensões de produção por critérios de comodidade e capacidade dos sistemas de manufatura.

4. Seleção das superfícies de trabalho inicial e as superfícies de referencia para assegurar uma execução precisa das operações de produção, simultaneamente com a seleção dos dispositivos de fixação e a verificação da estabilidade da peça sendo trabalhada neles.



5. Sequenciamento das operações em função das prioridades impostas por restrições tecnológicas e de precisão. Segue abaixo um exemplo de matriz de anterioridades, extraído de [HALEVI].

Execute these operations

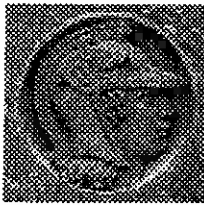
	1a	1b	2a	2b	3	4a	4b	5	6aR	6aF	6bR	6bF	7	8	9	10				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1a						X														1	1	1	1	1	1	1						
1b							X													1	1	1	1	1	1	1						
2a	X				X	X														3	2	2	2	2	2	1	2					
2b		X			X	X		X												3	2	2	2	2	2	1	2					
3																				3												
4a								X					X	X	X	X				5	5	4	3	1	4							
4b						X	X													2	2	1	1	1	1	4						
5					X															1	5											
6aR				X	X			X												3	2	1	1	1	1	1	1		6aR			
6aF				X				X					X							3	2	1	1	1	1	1	1	1		6aF		
6bR									X											1	1	1	1	1	1	1	1	1		6bR		
6bF										X										1	1	1	1	1	1	1	1	1		6bF		
7				X				X												2	1	7										
8				X				X						X						3	2	1	8									
9													X		X					2	2	2	2	9								
10														X						1	1	1	10									
																				3	5	7	8	9	4a	4b	1b	2b	6aR	6aF	6bR	6bF

Before executing these operations

6. Agrupamento das operações elementares a serem realizadas numa mesma máquina de modo a reduzir o tempo de operação, respeitando-se no processo os requerimentos de precisão.

7. Seleção das máquinas para executar as operações tecnológicas, levando-se em conta o número de peças a ser produzido. Aqui, devemos ter em mente que operações que requerem uma potência de corte menor do que a capacidade de uma máquina podem ser executadas por aquela máquina sem aumentar o tempo de usinagem (mas também sem poder reduzi-lo). Operações que requerem uma potência maior do que a capacidade de uma máquina, na maioria das vezes, também pode ser executada por aquela máquina, mas em condições ineficientes, o que aumenta o tempo de usinagem. Com relação à precisão, não pode haver compromissos: uma máquina sem precisão não pode produzir uma peça com tolerâncias estreitas, não importa quanto tempo seja gasto na tentativa.

8. Seleção dos métodos e instrumentos de inspeção para garantir a conformidade da peça final com relação aos requerimentos funcional e de qualidade.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecatrônica
Planejamento de Processos Auxiliado por Computador -
CAPP

9. Determinação das condições de processo para cada operação elementar, possibilitando o cálculo dos tempos e custos de trabalho para realizar a avaliação econômica do trabalho.

10. Preparo das folhas de processo num arquivo de plano de processo que será transferido ao departamento de manufatura para execução.

Evidentemente, o montante de trabalho que deve ser realizado antes que as decisões finais sobre um plano de manufatura possam ser tomadas é enorme.

O enfoque moderno do planejamento de processo auxiliado por computador é uma tentativa de transferir uma parte do trabalho manual do planejador do processo através do uso de banco informatizado de dados e algoritmos computadorizados para a seleção de seqüências e condições de operações de manufatura. No entanto, é sempre bom lembrar, o ideal de um sistema de planejamento de processo completamente automatizado ainda está longe de ser concretizado, exceto para aplicações especiais em condições específicas e bem definidas.



5 MODELO E TABELAS DE PARÂMETROS

Nesta seção, apresentaremos as tabelas que serão implementadas e ainda alguns equacionamentos relevantes.

5.1 Modelo de Custo

O custo para a fabricação de uma determinada peça pode ser expresso por:

$$C = Q \times C_d \times T_d + C_l \times T_p + C_s \times T_s \quad (1)$$

Onde:

C: Custo Total (R\$)

Q: Número de peças no Lote

C_d : Custo da mão de obra direta (R\$/hora)

T_d : Tempo de manufatura direta (horas)

C_l : custo da mão de obra indireta (R\$ / hora)

T_p : Tempo de trabalho indireto (horas)

C_s : Custo de mão de obra de suporte (R\$ / hora)

T_s : Tempo de trabalho de suporte (horas)

A otimização da velocidade de corte pode ser obtida por procedimentos matemáticos padrões, e é apresentada na figura a seguir:

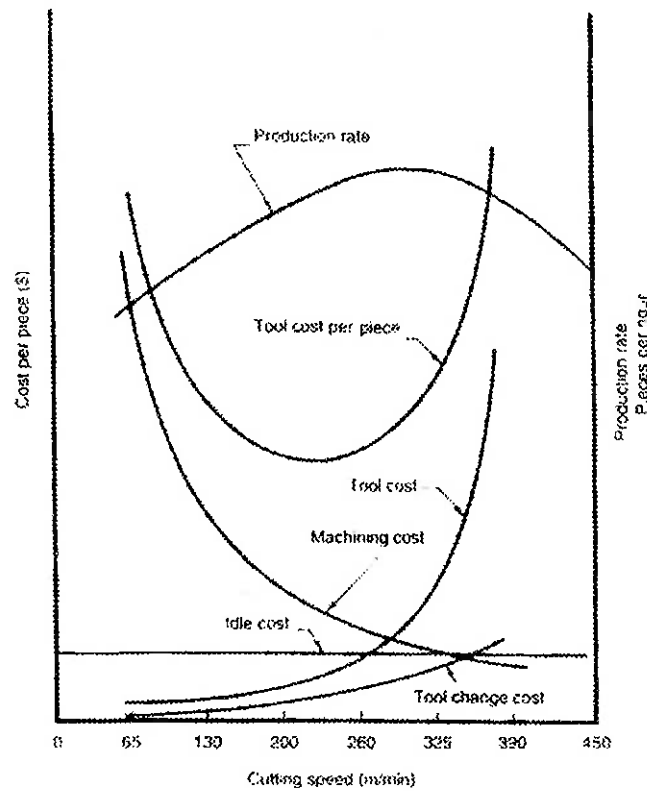
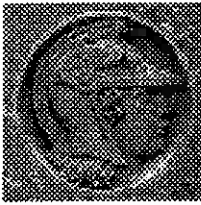


Fig. 2 – Parâmetros em função da velocidade de corte

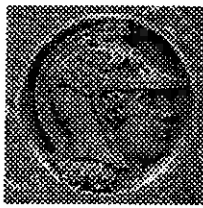
É importante notar que o critério de utilização se dá por mínimo custo ou máxima produção e, portanto se aplica a otimização da vida da ferramenta e não à velocidade de corte. Para propósitos práticos, a vida da ferramenta deve ser selecionada para instruir o operador a mudar as ferramentas após um determinado número de peças ter sido usinado. O número de peças a ser usinado por ferramenta deve ser escolhido de forma conservadora, para garantir que a operação não falhe.



5.2 Tabela de Rugosidade para os processos básicos

Processo	Rugosidade Mínima (μm)	Rugosidade Máxima (μm)	Tipo de Máquina
Formas Circulares Simétricas			
Torneamento	0,8	25,0	Torno
Retífica	0,1	1,6	Retífica
Brunimento	0,1	0,8	Afiadeira
Polimento	0,1	0,5	Polidor
Lapidação	0,1	0,5	Lapidador
Formas Prismáticas			
Fresamento	0,8	25,0	Fresa
Retífica	0,1	1,6	Retífica
Brunimento	0,1	0,8	Afiadeira
Polimento	0,1	0,5	Polidor
Lapidação	0,1	0,5	Lapidador
Furos, Roscas			
Furação	1,6	25,0	Torno, Fresa
Escareamento	0,8	6,3	Torno, Fresa
Alargamento	0,8	10,0	Torno
Fresamento Periférico	0,8	15,0	Fresa
Retífica	0,1	1,6	Retífica
"Burnishing"	0,2	0,4	Burnishing
Mandrilamento	0,8	6,3	Mandril
Fresamento	0,8	25,0	Fresa

Tab. 1 – Faixa de rugosidade para os processos básicos



5.3 Tabela de Tolerância geométrica dos processos básicos:

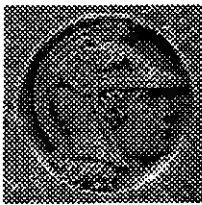
Processo	Tolerância (mm)			
	Paralelismo	Perpendicularidade	Concentricidade	Angularidade
Torneamento	0,01 - 0,02	0,02	0,005 - 0,01	0,01
Fresamento	0,01 - 0,02	0,02	-----	0,01
Furação	0,2	0,1	0,1	0,1
Alargamento	0,005	0,01	0,01	0,01
Retífica	0,001	0,001	0,002	0,002
Brunimento	0,0005	0,001	0,002	0,002
Superacabamento	0,0005	0,001	0,005	0,002

Tab. 2 - Capacidade de Tolerância Geométrica dos processos básicos

5.4 Modelo de equivalência:

Para se considerar a tolerância dimensional, existe uma relação empírica entre a tolerância dimensional e a rugosidade superficial, de modo que uma tolerância dimensional mínima requer uma rugosidade superficial mínima.

As tolerâncias geométricas devem ser consideradas como os critérios a serem verificados no que diz respeito à capacidade do processo. Para satisfazer as tolerâncias geométricas, porém, deve-se levar em conta muitos outros fatores como a fixação, seleção da ferramenta e da máquina, etc.



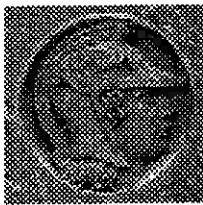
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecatrônica
Planejamento de Processos Auxiliado por Computador -
CAPP

Tolerância (mm)	Rugosidade Superficial (μm)
<0,05	>0,2
0,010	0,32
0,015	0,45
0,020	0,80
0,030	1,00
0,040	1,32
0,050	1,60
0,060	1,80
0,080	2,12
0,100	2,50
0,150	3,75
0,200	5,00
0,250	6,25
0,350	9,12
0,600	12,50
1,000	25,00

Tab. 3 - Conversão entre Tolerância dimensional e Rugosidade Superficial

5.5 Modelo de Avanço e Profundidade de Corte:

Sendo A_{Smax} a máxima profundidade de corte de acordo com as especificações da peça, podemos usar as tabelas abaixo para encontrar os outros parâmetros de corte, quais sejam: avanço, máxima profundidade de corte e rugosidade superficial obtida.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecatrônica
Planejamento de Processos Auxiliado por Computador -
CAPP

As _{máx}							
Ra (μm)	f _{máx} (mm/ver)	BHN = 100	200	250	300	350	400
0,8	0,80	0,64	0,37	0,31	0,26	0,24	0,22
1,0	0,10	0,80	0,46	0,39	0,33	0,30	0,27
2,0	0,20	1,61	0,92	0,77	0,67	0,59	0,53
3,0	0,30	2,41	1,38	1,16	1,00	0,89	0,80
4,0	0,36	3,22	1,85	1,54	1,34	1,18	1,06
5,0	0,40	4,02	2,31	1,93	1,67	1,48	1,33
6,0	0,44	4,82	2,77	2,32	2,00	1,77	1,59
7,0	0,48	5,63	3,23	2,70	2,34	2,07	1,86
8,0	0,51	6,43	3,69	3,09	2,67	2,36	2,12
9,0	0,54	7,23	4,15	3,48	3,00	2,66	2,39
10,0	0,57	8,04	4,62	3,86	3,34	2,90	2,65
11,0	0,60	8,84	5,08	4,25	3,67	3,20	2,92
12,0	0,62	9,65	5,54	4,63	4,01	3,50	3,18
13,0	0,65	10,45	6,00	5,02	4,34	3,80	3,45

Tab. 4 - Avanço e Profundidade de Corte como função da Rugosidade Superficial para operações de torneamento

Rug (μm)						
Avanço (mm/ver)	D=20	D=30	D=35	D=35	D=50	D=50
	Z=2	Z=2	Z=3	Z=4	Z=4	Z=6
0,1	--	--	--	--	--	--
0,2	0,6	0,8	0,5	--	--	--
0,3	1,2	1,9	1,0	0,6	0,8	--
0,4	2,2	3,4	1,8	1,0	1,4	0,6
0,5	3,5	5,2	2,7	1,5	2,2	1,0
0,6	5,0	7,5	3,9	2,2	3,2	1,4
0,7	6,8	10,2	5,3	3,0	4,3	1,9
0,8	8,9	13,3	6,9	4,0	5,6	2,5
0,9	11,2	16,8	8,8	5,0	7,0	3,2
1,0	14,0	20,0	10,8	6,0	8,7	3,9

Tab. 5 – Rugosidade Superficial como função do avanço.



Feed (mm/rev)	Depth of Cut (mm)													
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	9	10	11
Mínimo	0,1	0,13	0,15	0,2	0,28	0,43	0,6	0,61	0,74	0,86	1,24	1,37	1,8	2
0,1	0,1	0,13	0,15	0,2										
0,2	0,15	0,17	0,19	0,23	0,28									
0,3	0,17	0,2	0,25	0,3	0,39	0,43		0,61	0,74	0,86				
0,4		0,28	0,3	0,38	0,46	0,54	0,6	0,76	0,92	1,06	1,24	1,37		
0,5		0,32	0,36	0,45	0,54	0,63	0,71	0,9	1,08	1,26	1,46	1,61	1,8	2
0,6			0,41	0,52	0,62	0,73	0,82	1,03	1,24	1,45	1,65	1,85	2,06	2,27
0,7			0,46	0,58	0,7	0,82	0,92	1,16	1,39	1,62	1,85	2,08	2,31	2,55
0,8			0,51	0,64	0,77	0,9	1,01	1,28	1,54	1,79	2,05	2,3	2,56	2,82
0,9				0,81	0,97	1,13	1,3	1,62	1,98	2,27	2,59	2,92	3,24	3,56
1				1	1,2	1,4	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4	4,4

Tab. 6 – Profundidade de Corte em função do avanço

5.6 Modelo de seleção do inserto

Os requerimentos para o projeto do inserto são:

- Dureza maior que a do material sendo trabalhado
- Redução do desgaste do inserto
- Habilidade de reter a dureza na temperatura elevada de corte
- Resistência e tenacidade para poder resistir a carregamentos cíclicos
- Inércia química ao material da peça e ao fluido de corte

As tabelas abaixo apresentam algumas propriedades padronizadas de classes de insertos:



Designação		Resistência à Ruptura (tr)	Resistência à Ruptura (tr)	Dureza Rockwell A
ISO	ASA	(psi)	N/mm ²	HR
P05	C8	220000	1450	92.58
P10	C7-C8	260000	1800	92.50
P20	C7-C8	280000	2000	92.50
P25	C6	340000	2400	91.70
P40	C5	370000	2600	90.90
K01	C4	280000	1950	93.00
K10	C4	330000	2250	92.50

Tab. 7 - Designações e propriedades padronizadas de classes de insertos

Profundidade de Corte (mm)	Raio de Ponta (mm)
0,5 ou menor	0,2 a 0,4
0,5 a 1,0	0,5 a 0,8
1,0 a 3,0	0,8 a 1,0
3,0 a 10,0	1,0 a 1,5
10,0 a 20,0	1,2 a 2,0
20,0 a 30,0	2,0 a 3,0

Tab. 8 - Recomendações para Raios de ponta como uma função da profundidade de corte

5.7 Modelo de outros parâmetros de corte

É evidente que um dos bancos de dados mais importantes a ser implementado é o banco envolvendo os parâmetros de corte. Para tanto usaremos a equação de Taylor, que relaciona a velocidade de corte e o tempo de usinagem:



$$V.T^n = \text{cte} \quad (2)$$

Onde:

V: Velocidade de Corte

T: Tempo de mínimo custo, ou de máxima produção, ou ainda o tempo de usinagem ou vida da ferramenta.

n: Expoente experimental dado em função do material a ser usinado e da ferramenta utilizada.

Pode ser definir a chamada velocidade de corte V_{60} que é referente a uma vida de ferramenta de 60 minutos. Aplicando a equação de Taylor chegamos facilmente a:

$$V.T^n = V_{60}.60^n \quad (3)$$

Os valores de n podem ser obtidos da seguinte tabela:

Material a ser usinado	Ferramenta	
	Metal Duro	Aço Rápido
Ferro Fundido	0,25	0,25
Bronze, Latão	--	0,25
Cobre	--	0,13
Aço Carbono	0,2-0,3	0,15
Alumínio e ligas	0,4	0,14

Tab. 9 - Valor do Expoente experimental "n"

Por outro lado, tendo a velocidade de corte para uma determinada vida da ferramenta e o expoente experimental n, podemos obter a velocidade de corte para outras vidas da ferramenta, conforme a seguinte tabela:



Vida da Ferramenta (min)	Valores de 'N'						
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
60	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
120	0,93	0,90	0,87	0,84	0,81	0,79	0,76
240	0,87	0,81	0,76	0,71	0,66	0,62	0,58
480	0,78	0,76	0,66	0,60	0,54	0,48	0,43

Tab. 10 – Fator de Multiplicação

Existe uma fórmula experimental que nos permite calcular a velocidade de corte para vida de ferramenta de 60 minutos:

$$V_{60} = C_a / a^x \cdot p^y \quad (4)$$

Onde C_a pode ser obtido em função do material e da dureza:

Dureza Brinell	Aço		Ferro Fundido	
	Metal Duro	Aço Rápido	Metal Duro	Aço Rápido
100	120-160	35-45	18,3	3,6
150	70-95	20-28	12,2	2,9
200	50-67	14-20	7,7-9,6	1,8
250	37-50	11-15	4,6-5,4	--
300	29-39	8,5-12	5	--

Tab. 11 – Valores de C_a



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecatrônica
Planejamento de Processos Auxiliado por Computador -
CAPP

5.8 Modelo das Máquinas e ferramentas disponíveis:

Série	Descrição	Potência (W)	Máx Rot. (rpm)	Precisão(mm)	Custo(R\$/h)
F1	Fresa Vertical	4000	3000	0,100	50
F2	Fresa Vertical	2000	4000	0,010	100
F3	Fresa Horizontal	2000	40000	0,050	100
F4	Fresa Horizontal	3000	2500	0,005	150
M1	Furadeira	1500	6000	0,050	20
	Vertical				
M2	Furadeira Vertical	2500	6000	0,010	50
I1	Torno	5000	3500	0,010	60
I2	Torno	4000	5000	0,020	50
I3	Torno	3000	2000	0,050	40
R1	Retifica	2000	4000	0,005	50
R2	Retifica	2000	5000	0,002	70

Tab. 12 – Modelos de Máquinas



6 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

O propósito do algoritmo é encontrar as operações ótimas de usinagem, que são encontradas pela minimização do número de passes e encontrando condições de corte tão altas quanto possível, dando preferência à velocidade de avanço de acordo com estratégias de otimização bem conhecidas.

Aplicaremos o algoritmo, implementado em Excel, à peça mostrada abaixo, de acordo com seu material, dimensões, tolerâncias, e rugosidade superficial.

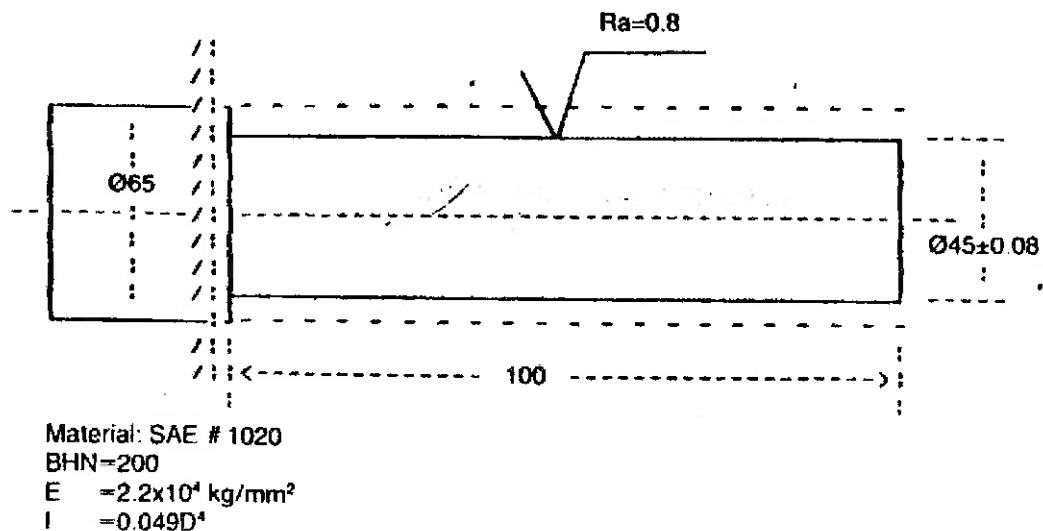
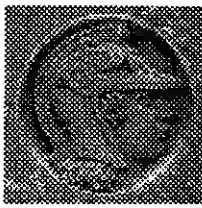


Fig. 3 – Peça a ser utilizada como exemplo na aplicação do algoritmo

Os limites de profundidade de corte utilizados são:

- $A_{um\acute{a}x}$ - máxima profundidade de corte permitida
- $A_{cm\acute{a}x}$ - máxima profundidade de corte de um segmento quando utilizada mínima velocidade de avanço.
- $A_{am\acute{m}n}$ - mínima profundidade de corte permitida
- $A_{cm\acute{m}n}$ - mínima profundidade de corte de um segmento quando utilizada máxima velocidade de avanço.
- $A_{sm\acute{a}x}$ - máxima profundidade de corte que produz a rugosidade superficial especificada.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecatrônica
Planejamento de Processos Auxiliado por Computador -
CAPP

- A_{smin} - mínima profundidade de corte que deve ser usada para remover imperfeições do passo anterior ou do material bruto.
- W_G - Dimensão de qualquer corte intermediário ou do material bruto.
- W - Dimensão requerida da peça acabada.

A_n - Quantidade de material a ser removido.

A sequência de passos do algoritmo está representada no fluxograma a seguir:

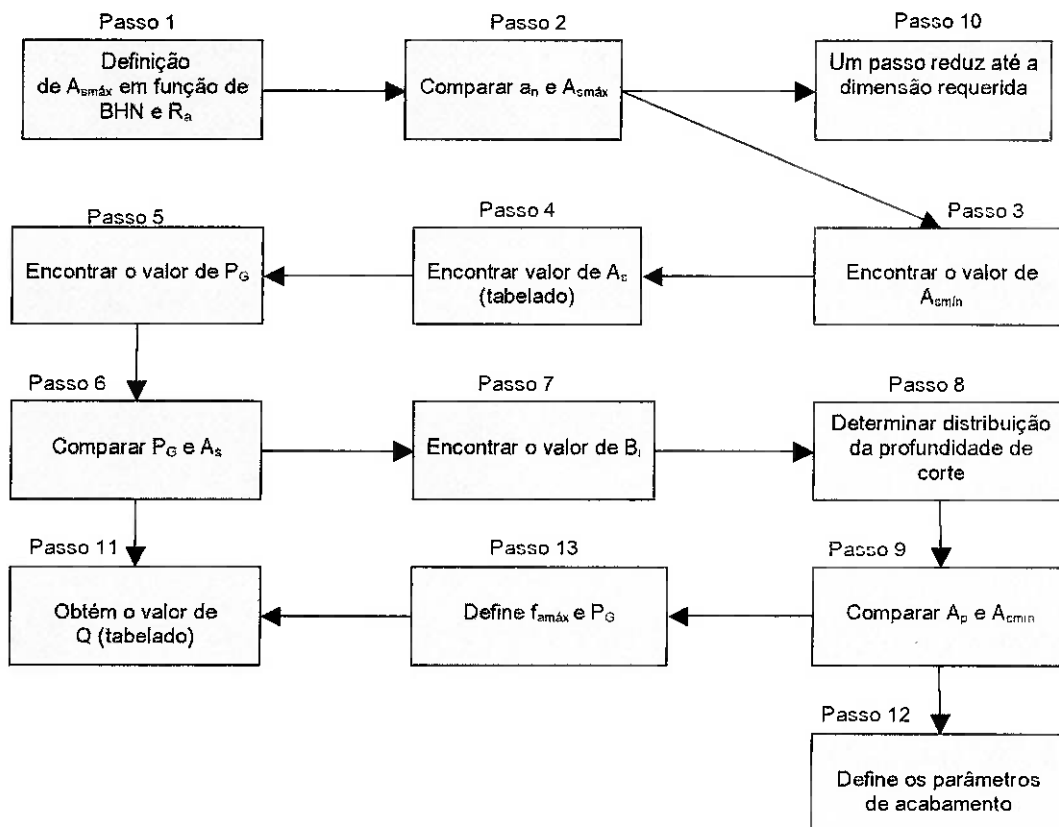


Fig. 4 – Fluxograma do algoritmo de otimização de profundidade de corte (HALEVI, 1995)



Descrição detalhada dos passos do algoritmo:

Passo 1:

A restrição imposta pela condição de acabamento superficial deve ser cumprida.

Buscar na tabela 4 o valor de $A_{smáx}$ como função da dureza do material (Brinell) e rugosidade superficial (R_a)

Passo 2:

Calcular $A_n = W_G - W$ e comparar com $A_{smáx}$

Se $A_n < A_{smáx}$ seguir para o Passo 10.

Caso contrario seguir para Passo 3

Passo 3:

Calcular o valor de $A_{smín} = A_{smáx} - A_{amín}$

Passo 4:

Buscar da tabela 6 o valor de A_s

Se $A_s > 1,33 \times A_{emín}$ então $A_s = 1,33 \times A_{emín}$

Passo 5:

Calcular $P_G = A_n - A_{smáx}$

Passo 6:

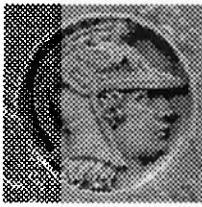
Comparar P_G e A_s

Se $P_G \leq A_s$, seguir para o Passo 11.

Se $P_G > A_s$, seguir para o Passo 7.

Passo 7:

Calcular B_i



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecatrônica
Planejamento de Processos Auxiliado por Computador -
CAPP

Neste caso pelo menos 3 passes de corte são requeridos. O número de cortes será determinado por $B_i = (A_n - A_s) / 1,33 \times A_{cmin}$ (Arredondar para o numero inteiro superior)

O número de passes de corte será $B_i + \text{semi acabamento} + \text{acabamento}$.

Passo 8:

Para determinar a distribuição da profundidade de corte, calcular $A_p = (A_n - A_s) / B_i$

Passo 9:

Se $A_p \leq A_{cmin}$, seguir para o Passo 12.

Se $A_p > A_{cmin}$, seguir para o Passo 13.

Passo 10:

$A = A_n$; f é pego da tabela 8.1.

Um passe pode reduzir a dimensão para a requerida.

Passo 11:

Neste caso 2 passos de corte podem produzir o segmento.

Selecione da tabela 6 a coluna com um valor de profundidade de corte P_{Gi} e uma máxima velocidade de avanço para obedecer ao valor de A_{smin} . Nomeie o novo valor de A_{smin} como Q .

Passe de acabamento $A_0 = A_{smin} + Q$. f é pego da tabela 4.

Passe de desbaste $A_1 = A_n - A_0$, f é pego da tabela 6.

Fim do algoritmo.

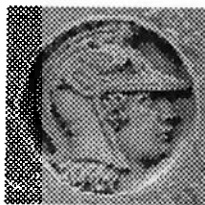
Passo 12:

Os $B_i - 1$ passes de desbaste terão profundidade de corte $A = A_{cmin}$, $f = f_{am\acute{a}x}$.

O último passe de desbaste terá $A_1 = A_n - 1,37$, $f = f_{am\acute{a}x}$.

Passe de semi acabamento terá $A = 1,0 \text{ mm}$, f é pego da tabela 6.

Passe de acabamento terá $A = 0,37$, f é pego da tabela 4.



Passe 13:

Os $B_i - 1$ passes de desbaste terão profundidade de corte $A = P$, $f = f_{\text{amáx}} \times (A_{\text{cmin}}/A_p)^{0.75}$.

Calcular $P_G = A_n - B_i \times A_p - A_{\text{smáx}}$.

Seguir para o Passo 11.

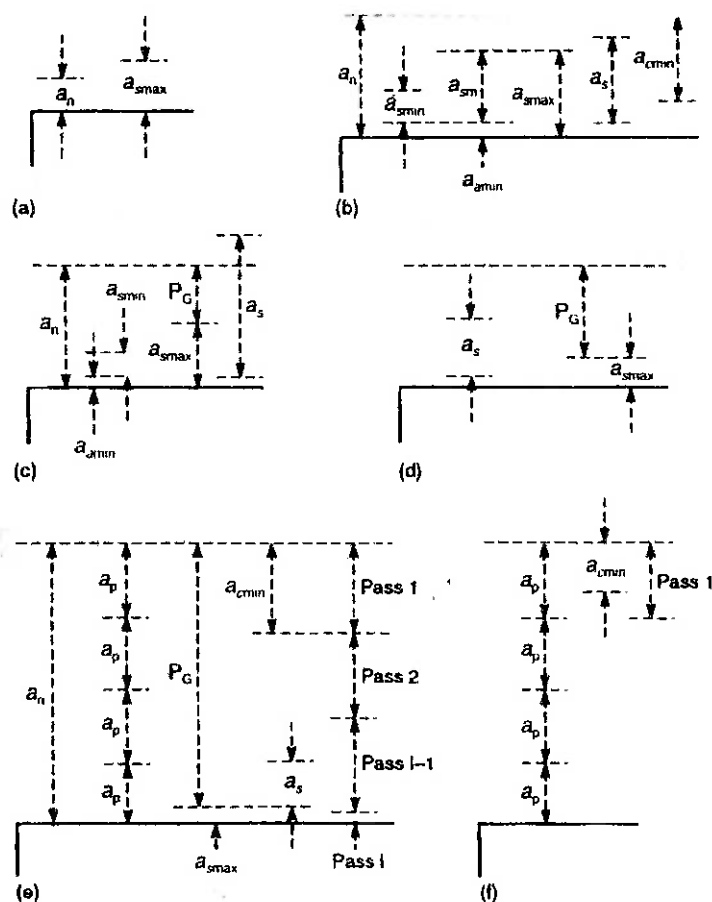
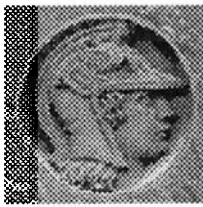


Fig. 5 – Caso de decisão de profundidade de corte.



7 CONCLUSÃO

Muito se estuda hoje a respeito dos benefícios que o computador pode trazer para nossas vidas. Considerando os processos de fabricação em geral e, em específico a parte de planejamento de processos de produção, temos entretanto não conseguido resultados satisfatórios capazes de abranger as inúmeras diferenças entre empresas ou mesmo de diferentes produtos de uma marca. O que o mercado atualmente apresenta são soluções customizadas a determinadas empresas e somente a produtos que não sejam demasiadamente complexos, e que tenham certa similaridade com outros produtos já estudados.

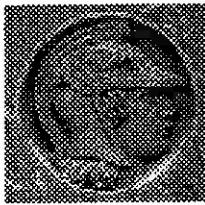
Difícilmente uma marca, um software ou padrão se estabelecerá nesse ramo de negócios. As soluções serão sempre diferentes umas das outras, procurando satisfazer seus objetivos perante o processo em vista. Alguns avanços têm sido feitos em relação aos sistemas CAD atuais, e são apresentados a seguir.

7.1 Aspectos gerais e tendências

O primeiro nível de qualquer sistema CAPP deve conter conhecimento declarativo sobre o problema particular sendo resolvido, e sobre a atual tecnologia na tentativa de se gerar o plano de processos. A natural e óbvia fonte de dados deve ser o sistema CAD na qual a peça foi desenhada. Infelizmente os sistemas CAD atuais não foram desenvolvidos para servir os sistemas CAPP, sendo assim inúteis como fonte de dados.

O CAPP necessitaria informações do CAD como:

- Material básico



- Forma e dimensão do “blank”
- Modelo geométrico
- Dimensões nominais
- Tolerâncias dimensionais, de posição e geométricas
- Rugosidade superficial, tratamento térmico
- Técnica de montagem
- Lote necessário

Por causa de diferentes marca de computadores, sistemas, banco de dados e comunicações, cada um com diferentes funções, a capacidade de se trocar e compartilhar informação é prejudicada. Formatos de dados são diferentes e por tanto arquivos, estrutura de dados, estrutura e conteúdo também o são.

Para a devida integração de diferentes sistemas o mercado tem investido em ferramentas de integração de novos padrões de tecnologia, como o formato IGES, que hoje já é suportado pela maioria dos sistemas CAD. Um novo conceito que vem surgindo para suprir tais necessidades é o ISO-STEP.

O PDES é outro padrão internacional para a troca de todos os dados necessários para uma completa descrição de um produto e seu processo de manufatura. PDES é uma extensão a sistemas CAD disponíveis onde os dados adicionais e recuperados são armazenados em arquivos especiais PDES, não interferindo com o sistema CAD.

7.2 Modelagem Baseada em Features

Uma feature é definida como:

- Elemento físico de uma peça que tem algum significado na engenharia
- Ter propriedades previsíveis
- Ser uma parte física da peça



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecatrônica
Planejamento de Processos Auxiliado por Computador -
CAPP

Os significados de engenharia da Feature podem envolver a função a qual a Feature serve, como ela pode ser produzida, que ações sua presença pode iniciar, etc.

O design baseado em Feature permite ao processista designar muito mais que geometria e topologia. Suas intenções e restrições podem ser expressas num diferente nível de abstração e serem usadas em aplicações subseqüentes.



8 BIBLIOGRAFIA

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Processos Mecânicos de Usinagem, NBR6175, São Paulo, 1980.

DINO FERRARESI – Características de Usinagem dos Metais para Operação de Torneamento, ABM, São Paulo, 1987

HALEVI, G., e WEILL. R. D. – Principles of Process Planning, Chapman & Hall, Londres, 1995.

PAIVA, CARLOS MAGNO C. S. – Princípios de Usinagem: Produção Mecânica, Nobel, São Paulo, 1986