

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SEMI-GENERATIVO PARA
PLANEJAMENTO DE PROCESSO AUXILIADO POR COMPUTADOR PARA
AMBIENTE DE USINAGEM**

por

JOÃO BATISTA SÁ DE FARIAS

Dissertação para obtenção do Título
de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, março de 2008.

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SEMI-GENERATIVO PARA
PLANEJAMENTO DE PROCESSO AUXILIADO POR COMPUTADOR PARA
AMBIENTE DE USINAGEM**

por

João Batista Sá de Farias
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Flávio José Lorini

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzaferro – PROMEC – UFRGS

Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco – PROMEC – UFRGS

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez – DEMEC – UFRGS

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 28 de março de 2008.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho, seja direta ou indiretamente, desta forma agradeço:

A minha família, especialmente a minha esposa Rosângela.

Ao professor Flávio José Lorini, Dr. Eng., orientador deste trabalho.

Ao graduando em engenharia mecânica Paulo André Rieck, pela ajuda.

A Mastertraining pelo apoio na programação.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema para automatizar o planejamento de processo na fabricação de peças por usinagem, adotando uma metodologia semi-generativa, ou híbrida, que se utiliza de informações de arquivos gráficos padrão *STEP*. O sistema interpreta o arquivo *STEP* (protocolo de aplicação AP203) de um sistema CAD qualquer e identifica as geometrias existentes no arquivo. Um algoritmo desenvolvido inicialmente para geometrias cilíndricas, possível de ser implementado para outras geometrias, como furos e rasgos de chavetas. Com as informações provenientes do algoritmo de interpretação do *STEP*, o sistema interage com um banco de dados para planejar as etapas de usinagem do produto. O banco de dados contém informações relativas a máquinas, ferramentas, operações e materiais. Rotinas associadas ao banco de dados permitem a definição e seleção de parâmetros de usinagem e máquina otimizadas a cada etapa do processo, adequadas ao projeto do componente. O sistema é considerado semi-generativo, na medida em que permite ao processista acrescentar novas etapas de processo caso o produto tenha outras *features* manufaturáveis, que não tenham sido obtidas de forma automática. O resultado do sistema permite a geração do plano de processo otimizado para determinado componente em função das informações disponibilizadas no banco de dados de manufatura.

Palavras chaves: Planejamento de Processo, CAPP, processo de usinagem, padrão *STEP*.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A HYBRID COMPUTER AIDED PROCESS PLANNING SYSTEM FOR A MACHINING ENVIROMENT

This work presents the development of a system for process planning automation manufacturing parts by machining. A hybrid methodology was adopted using information from standard STEP graphical files. The system interprets the design of geometries file STEP (ISO application protocol AP203) in a system CAD with an algorithm developed initially for cylindrical geometries, being possible to be implemented for other geometries, as holes and slots. As the information proceeding from the interpretation algorithm of the STEP, the system interacts with the planning the stages of product machining. The data base contains relative information from the machines, tools, operations and materials. Routines associated with the data base allow the definition and election of parameters to optimized process machining and machine to each stage of the process, adjusted to the component project. The process planning system is based in three modules: the algorithm for interpretation STEP files, the data base with the manufacture information and the system graphical interface. The system is considered hybrid, in a sense that allows the user to add new stages to the process in the case that the product has others features manufactured that have not been recognized of automatic form. The result of the system allows the generation of an optimized process plan for determined component in relation to the information available in the manufacture data base.

Keywords: Process Planning, CAPP, machining process, standard *STEP*.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo do Trabalho	1
2. PLANEJAMENTO DE PROCESSO	2
2.1 Planejamento Variante	5
2.2 Planejamento Generativo Interativo	5
2.3 Planejamento Generativo Automático	6
2.4 Planejamento Híbrido	7
2.5 Ferramentas utilizadas nos sistemas CAPP	8
2.6 Vantagens dos sistemas CAPP	9
3. SISTEMAS CAD E PADRÕES DE ARQUIVOS	11
3.1 Normas <i>STEP</i> ISSO 10303	14
3.2 Estrutura da norma.....	16
3.2.1 Métodos de Descrição.....	17
3.2.2 Método de Implementação.....	18
3.2.3 Recurso para a Integração da Informação.....	19
3.2.4 Protocolo de Aplicação	19
3.2.4.1 Protocolo de Aplicação AP203.....	20
3.2.4.2 Protocolo de Aplicação AP224.....	21
3.2.4.3 Protocolo de Aplicação AP240.....	22
4. TRABALHO DESENVOLVIDO	24
4.1 Introdução	24
4.2 Recursos utilizados	24
4.3 Metodologia de Desenvolvimento do Sistema.....	25
4.4 Módulo de processamento do arquivo <i>STEP</i>	27
4.4.1 Projeto do algoritmo	28
4.4.2 Determinação de protocolo	28
4.4.3 Vetorização das informações.....	29
4.4.4 Processamento	29
4.4.5 Reprocessamento	31
4.5 Projeto do banco de dados	31

4.6 Módulo Aplicativo – Interface do Sistema	35
4.6.1 Operação de Usinagem - Torneamento.....	38
4.6.2 Operação de Usinagem - Furação.....	43
4.6.3 Operação de Usinagem - Fresamento	44
4.7 Plano de Processo	46
5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS.....	48
5.1 Conclusões	48
5.2 Recomendações	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
ANEXOS.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS

AAM	<i>Application Activity Model</i>
AP	<i>Application Protocol</i>
a_p	profundidade de usinagem [mm]
APT	<i>Automatically Programmed Tools</i>
ARM	<i>Application Reference Model</i>
ASME	<i>American Society Mechanical Engineers</i>
AWF	<i>Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung</i>
B-REP	<i>Boundary Representation</i>
b	Largura de corte [mm]
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CAPP	<i>Computer Aided Process Planning</i>
CAX	<i>Computer Aided x</i> – qualquer sistema auxiliado por computador
CEP	Controle Estatístico do Processo
CN	Controle Numérico
CSG	<i>Constructive Solid Geometry</i>
EDM	<i>Electronic Document Management</i>
f	avanço [mm/rot]
FR	Fresadora
FU	Furadeira
f_z	avanço por dente [mm]
GT	<i>Group Technology</i>
h	Espessura de corte [mm]
HTML	<i>Hypertext Markup Language</i>
IA	Inteligência artificial
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
ISC	<i>International Industry STEP Center</i>
ISO	<i>International Organization of Standardization</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NC	<i>Numeric Control</i>

PDF	<i>Portable Document Format</i>
PDM	<i>Product Data Management</i>
R_{\max}	Rugosidade máxima [μm]
$r\epsilon$	raio do inserto [mm]
SDAI	<i>Standard Data Access Interface</i>
SET	<i>Standard d'exchange et de Transfer</i>
STEP	<i>Standard for the Exchange of product model data</i>
TR	Torno
UNIMEP	Universidade Metodista de Piracicaba
VDA-FS	<i>Verband der Deustchen Automobilindustrie - Flächenschnittstelle</i>
V_f	Velocidade de avanço [mm/min]
XML	<i>Extensible Markup Language</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 O planejamento do processo como elemento de ligação entre o projeto e manufatura.	2
Figura 2.2 Tempo de planejamento do processo na forma convencional	3
Figura 2.3 Configuração de uma árvore de decisão	8
Figura 3.1 Evolução das propostas de padrões de arquivos neutros	12
Figura 3.2 Extração de <i>features</i> de um produto qualquer.....	13
Figura 3.3 Estrutura da ISO TC184/SC4.....	16
Figura 3.4 Principais níveis da estrutura da <i>STEP</i>	17
Figura 3.5 Representação de furos em um sistema CAD e na linguagem EXPRESS	18
Figura 3.6 Protocolo de aplicação AP203 da norma ISO 10303	20
Figura 3.7 Protocolo AP224 da Norma ISO 10303	22
Figura 3.8 Aplicação do protocolo AP240 da Norma ISO 10303	23
Figura 4.1 Fluxograma geral do sistema desenvolvido	26
Figura 4.2 Peça exemplo, utilizada para ilustrar o sistema de planejamento	26
Figura 4.3 Funcionamento do módulo de processamento <i>STEP</i>	28
Figura 4.4 Esquema do comando <i>DOCUMENT_RELATIONSHIP</i>	30
Figura 4.5 Tabelas e campos do banco de dados	32
Figura 4.6 Interface do cadastro de máquinas no banco de dados	33
Figura 4.7 Interface do cadastro de ferramentas no banco de dados.....	34
Figura 4.8 Interface para o cadastro de operações	34
Figura 4.9 Interface de cadastro de materiais	35
Figura 4.10 Fluxograma do carregamento do arquivo <i>STEP</i>	36
Figura 4.11 Caixa de diálogo para preenchimento do <i>header</i> do arquivo <i>STEP</i>	36
Figura 4.12 Resultado do processamento do arquivo <i>STEP</i> para a peça exemplo	37
Figura 4.13 Fluxograma para definir a matéria-prima	37
Figura 4.14 Interface para definir a forma e dimensões de matéria-prima.....	38
Figura 4.15 Fluxograma para determinar uma operação de faceamento.....	39
Figura 4.16 Interface para inserir uma ferramenta no planejamento	40
Figura 4.17 Interface para planejar a seqüência das operações	41
Figura 4.18 Fluxograma para planejar as operações das geometrias detectadas no arquivo <i>STEP</i>	41
Figura 4.19 Interface mostrando que existe uma geometria no arquivo <i>STEP</i>	42
Figura 4.20 Interface para a seleção de uma operação.....	42

Figura 4.21 Interface do planejamento com as operações das duas geometrias do arquivo <i>STEP43</i>	
Figura 4.22 Fluxograma para planejar uma operação de furação	43
Figura 4.23 Interface da operação de furação	44
Figura 4.24 Fluxograma para planejar as etapas da operação de fresamento.....	45
Figura 4.25 Interface com a operação de fresamento inserida no planejamento	46
Figura 4.26 Plano de processo para a peça exemplo.....	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	9
Tabela 2	15

1 INTRODUÇÃO

O planejamento do processo é uma das atividades mais importantes dentro da área de manufatura de uma indústria. Visto ser esta atividade o elo de ligação entre o projeto de um determinado produto e sua fabricação (manufatura). As ferramentas com auxílio computacional disponíveis para o desenvolvimento de um produto são aquelas de projeto assistido por computador (CAD – *Computer Aided Design*) para o projeto do produto, que atualmente estão com um desenvolvimento satisfatório; as ferramentas de fabricação assistida (CAM – *Computer Aided Manufacturing*) para a manufatura que também nos dias de hoje satisfazem uma vasta gama de processos de usinagem. Entre essas duas tecnologias impõem-se o **planejamento do processo**, que também pode ser automatizado com as ferramentas e sistemas de auxílio computacional, os sistemas CAPP (*Computer Aided Process Planning*). Apesar das primeiras ferramentas deste tipo datarem da década de 70, ainda são restritas as pesquisas para produzir aplicações que atendam os meios produtivos atuais. Muitas pesquisas têm sido realizadas nesta área, mas os resultados na maioria das vezes se restringem em aplicações específicas ou sistemas bastante limitados.

A integração de sistemas CAPP com o CAD e posteriormente com o CAM é essencial para que as empresas busquem agilidade em seus projetos e processos de fabricação e com isto tenham um diferencial competitivo no mercado.

1.1 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é desenvolvimento de uma aplicação para planejamento de processos que integre o projeto do produto com a manufatura, isto é, uma aplicação que possa reconhecer algumas características geométricas e tecnológicas de uma peça desenvolvida em um sistema CAD e posteriormente definir informações sobre o processo de fabricação, ferramentas e parâmetros de corte para ser associadas a um sistema CAM na geração do programa de fabricação, especificamente para a execução em máquinas comandadas numericamente (CN). Considerando-se uma maior versatilidade do aplicativo, o sistema deve permitir flexibilidade operacional para elaboração, de modo interativo, um plano de processo complementar ou independente da interpretação automática dos arquivos de projeto.

2 PLANEJAMENTO DO PROCESSO

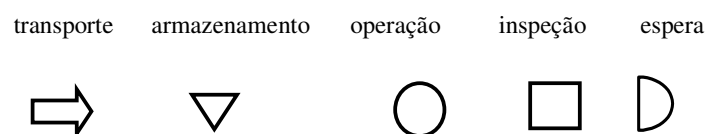
O planejamento de processos aparece como elemento de ligação entre as atividades de projeto e manufatura (Figura 2.1). Devido à presença de pequenos lotes, a necessidade de um tempo reduzido entre as etapas de projeto e fabricação e à grande quantidade de informações manipuladas, um grande interesse tem sido despertado pela automatização do planejamento de processos. Vários trabalhos são apresentados na literatura no sentido de promover a integração entre CAD e CAM, no entanto uma solução definitiva ainda não foi apresentada e muito desenvolvimento ainda deve ser realizado.



Figura 2.1 – O planejamento do processo como elo entre o projeto e manufatura.

O planejamento do processo pode ser dividido em duas etapas principais: o plano macro e o plano detalhado. No plano macro, segundo Rozenfeld, apresenta a *rota* que o material descreve dentro da fábrica e contem também os processos a serem utilizados. O plano macro é utilizado para planejar e controlar a produção. No plano detalhado a especificação das operações, como por exemplo: lista de ferramentas, instruções de qualidade, folhas de CEP, programas CN, etc.

No plano macro normalmente se utiliza um documento “carta analítica de processo” ou Gráfico do Fluxo do processo. Este documento utiliza uma simbologia normalizada pela ASME e possui cinco símbolos principais com os respectivos significados:



O plano de processo detalhado, segundo Solomons [1993 apud Melo,2003], deve conter as seguinte informações:

- a) a interpretação do modelo da peça;
- b) a seleção de máquinas ferramentas;
- c) seleção dos métodos de usinagem;
- d) a seleção das ferramentas de corte;
- e) cálculo dos caminhos das ferramentas;
- f) cálculo das condições de corte;
- g) a geração de programas CN;
- h) planejamento da capacidade produtiva;
- i) setups das máquinas;
- j) determinação da seqüência de usinagem;
- k) projetos dos dispositivos de fixação.

O planejamento do processo pode ser realizado, basicamente, de duas maneiras distintas: o **planejamento convencional** ou através do **auxílio de ferramentas computacionais**. O planejamento convencional é baseado na experiência e conhecimento do “processista”. Essa modalidade de planejamento apresenta uma baixa produtividade, segundo Melo [2003], considerando-se que o processista dispende um tempo considerável na redação do plano, quando a tarefa mais importante deve ser a correta especificação dos parâmetros. O gráfico da figura 2.2 indica uma média dos tempos envolvidos no planejamento convencional.

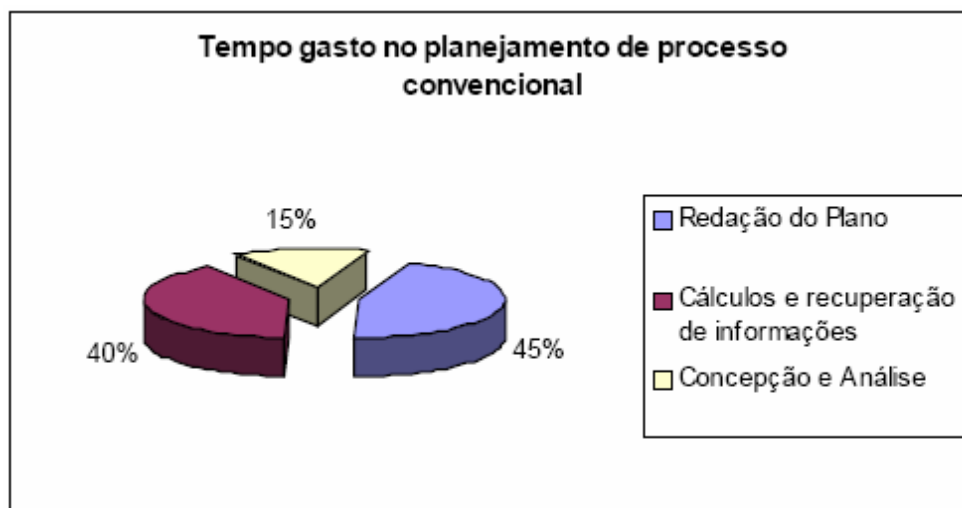


Figura 2.2 – Tempo de planejamento do processo na forma convencional.

Halevi e Weil [1995 apud Melo, 2003] aponta algumas das desvantagens do planejamento convencional:

- a) a lógica da produção está na memória do processista;
- b) os resultados são freqüentemente insatisfatórios;
- c) atrasos nas informações de processo;
- d) os tempos de ligação e pré-produção são prolongados.

A atividade de planejamento do processo para a fabricação deve apresentar algumas etapas essenciais na elaboração do plano, destacando-se:

- a) interpretação geométrica do desenho;
- b) seleção dos processos primários;
- c) planejamento do material;
- d) identificação do desenho da peça bruta;
- e) agrupamento dos processos em trabalhos;
- f) determinação dos parâmetros de corte;
- g) seleção das máquinas ferramentas;
- h) seleção das ferramentas;
- i) seleção da superfície de referência;
- j) definição da seqüência de usinagem;
- k) especificação do posicionamento e fixação da peça;
- l) interpretação das cartas de tolerâncias;
- m) preparação final do plano de processo.

As principais vantagens do planejamento do processo bem elaborado podem ser descritas como: aumento da produtividade, melhor aproveitamento da capacidade de trabalho para os equipamentos existentes, redução dos refugos e retrabalhos e redução do volume geral de trabalho na fábrica.

No planejamento convencional pode haver divergência entre uma rota planejada por um processista e o planejamento para o mesmo produto desenvolvido por outro processista, isto porque o planejamento convencional depende muito da experiência dos técnicos e engenheiros de processos.

Quando se utilizam sistemas computacionais para planejar o processo a produtividade do planejamento convencional é melhorada consideravelmente assim como eliminadas as divergências entre processistas. Os sistemas computacionais que auxiliam o planejamento de processos são conhecidos com CAPP (*Computer Aided Process Planning*). Estes sistemas permitem a geração automática de planos de processos, bem como trabalhar com uma base de conhecimento e gerar planos de modo padronizado. Os sistemas computacionais também diminuem o tempo de geração do plano e melhoram a qualidade da documentação. O planejamento do processo assistido por computador pode ser concebido e implementado através de quatro diferentes modos conhecidos como: variante, generativo interativo, generativo automático e híbrido ou semi-generativo.

2.1 – Planejamento Variante

A abordagem variante para o planejamento de processos é comparável à forma manual utilizada por um processista, onde o plano de processos para uma nova peça é obtido através de pequenas alterações executadas em um plano de processos já existente para uma peça similar. Para sistemas variantes, as peças são agrupadas em famílias, caracterizadas por similaridades no processo de fabricação. Para cada família de peças, um plano de processos padrão, que contém todas as possíveis operações, é tomado como base para geração dos planos específicos de todos componentes daquela família.

2.2 – Planejamento Generativo Interativo

Inicialmente correspondia a edição indireta do plano, onde as informações do planejamento eram geradas pelo processista e enviadas a um digitador, que alimentava o computador com os dados necessários. Normalmente era impresso um formulário que o processista conferia, ou seja, essa forma de trabalho continha ações repetitivas que não agregam valor e era sujeita a erros. Em algumas empresas, o processista substituiu o digitador, inserindo as informações diretamente no computador. Por eliminar a etapa intermediária, achava-se que o ciclo de obtenção de um ciclo seria menor. Tal pressuposto mostrou-se falso, pois o processista experiente normalmente não apresentava habilidade no computador. Com as pressões de produtividade, o processista tornou-se um digitador, não pensando nos processos e sim colocando dados no computador, deixando de realizar as funções para as quais é mais bem capacitado.

Ambas as atividades descritas não são consideradas CAPP interativo, e mantêm os problemas do planejamento convencional. No final da década de 90 o computador começou a ser utilizado como um guia na escolha de padrões pré-cadastrados, através de uma interface amigável. Desta maneira, o processista passa a interagir diretamente com o computador com um mínimo de digitação e dificuldade. Quando existir uma relação entre os padrões (por exemplo, a ferramenta "X" só pode ser utilizada na máquina "Y"), o processista não precisa navegar por muitas opções para escolher um padrão (no exemplo, a ferramenta). O sistema verifica o que já foi determinado e só apresenta para seleção aqueles padrões que se relacionam com os já escolhidos (por exemplo, uma lista das ferramentas que podem ser utilizadas na máquina "Y").

2.3 – Planejamento Generativo Automático

O princípio deste método de planejamento do processo é baseado no armazenamento de regras e dados de capacidade do processo de fabricação. Através destas informações, um plano de processo pode ser gerado sem a necessidade de uma pessoa experiente, pois os mecanismos de inferência, decisões, lógicas e algoritmos, interpretam os dados de projeto e tomam as decisões sobre o "como fazer". Este é o caso mais completo de planejamento automático.

A representação das peças deve estar armazenada de uma forma interpretável pelo sistema CAPP, para que este realize inferências automáticas nas tomadas de decisão. A melhor forma de representação para a inferência automática são as "*features*". As *features*, de maneira simplificada, podem ser consideradas como a descrição técnica e geométrica de regiões de um produto, normalmente provinda de um sistema CAD. Além da plataforma CAD, existem várias maneiras de dar entrada de dados nos sistemas generativos. Entre elas estão os códigos e a linguagem descritiva [Norman, 1989 Apud Melo, 2003].

Códigos: A codificação é mais comumente usada na forma variante, fundamentada na Tecnologia de Grupo (GT). Mesmo assim, algumas plataformas generativas, como APPAS e GENPLAN [Chang e Wysk, 1985], também usam a codificação como entrada de dados. Os códigos no sistema generativo são mais detalhados e algumas vezes aglutinam valores de parâmetros.

Linguagem Descritiva: são linguagens especialmente concebidas para descrever peças e podem fornecer informações bastante detalhadas para o sistema de planejamento de processo. Embora

as linguagens descritivas forneçam os elementos completos para a geração de um plano de trabalho. O problema principal é a dificuldade de assimilar o desenho original automaticamente.

Modelamento através do CAD: O projeto de uma peça em uma plataforma CAD gera um modelo que pode ser utilizado como entrada de dados para o sistema generativo automático. Esta forma elimina a intervenção humana para traduzir um desenho em código de linguagem. Um desenho modelado em um sistema CAD pode conter todos os dados necessários para uma completa análise de planejamento. Entretanto, ainda existe uma barreira que deve ser transposta – um algoritmo que identifique as superfícies que serão trabalhadas, na base de dados CAD.

O método generativo é complexo e difícil de ser implementado porque os processistas que detêm o conhecimento da produção e da engenharia mecânica geralmente não possuem o conhecimento prévio para produzir os algoritmos, e os que possuem este conhecimento não são capacitados o suficiente na área de engenharia. No sistema generativo ideal, várias alternativas de planos de peças deveriam ser apresentados para que se obtenha um plano otimizado. Segundo Groover [1984], eles tendem a cair de uma potencialidade verdadeiramente generativa, e são desenvolvidos para uma escala uma tanto limitada de processos de manufatura.

2. 4 – Planejamento Híbrido

Como cada método apresenta vantagens e desvantagens, a melhor solução a ser tomada pode ser a combinação destes conceitos em uma solução mista visando alcançar o melhor de cada um dos métodos. Os sistemas de planejamento híbrido, também são chamados de semi-generativos, permitem utilização das vantagens de cada método em partes distintas das funções de planejamento de processo. Para peças novas, que não possuam plano de processo semelhante, parte-se para planejamento através do generativo interativo, e em determinadas etapas pode-se requisitar que o sistema faça uma inferência automática (cálculo de tempos, cálculo de condições de usinagem, geração de NC para uma característica conhecida). Com isso pode-se aproveitar as principais vantagens dos sistemas generativos que segundo Chang [1985] são:

- a) podem gerar planos de processos rapidamente;
- b) facilitam interação entre os sistemas Generativo Interativo e Automático;
- c) novos componentes podem ser facilmente planejados desde que suas *features* se encontrem no banco de dados.

2.5 Ferramentas utilizadas nos sistemas CAPP

Para possibilitar certo grau de automatização na geração de um plano de processos, ferramentas de apoio a decisão devem ser implementadas nos sistemas. Estas ferramentas computacionais dotam os sistemas de certa capacidade de decisão baseando-se em estruturação do conhecimento em estruturas de árvores de decisões, em tabelas de decisões ou como regras de produção em sistemas especialistas.

Árvore de decisões: Este tipo de estrutura consiste em um gráfico com uma raiz da qual partem várias ramificações (Figura 2.3), como caminho natural para representar as informações de processo. Condições de comparação (SE) são agrupadas nos ramos da árvore e ações predeterminadas podem ser encontradas nas junções de cada ramo (nós). Quando um ramo é verdadeiro pode-se percorre-lo até o nó seguinte onde outra operação é atribuída ou executada. As ramificações em série representam uma lógica associativa *and* (e) e quando um ramo verdadeiro admite outro ramo verdadeiro, configura-se uma condição de alternativa *or* (ou). A facilidade de construir uma árvore permite compreender, visualizar e eliminar facilmente os erros, entretanto a expansão ou manutenção do programa pode se tornar bastante complexa. A Figura 2.3 ilustra um componente que possui furos e cavidades, para planejar um furo a árvore possui ramificações de decisão como: razão entre comprimento e diâmetro, precisão, tolerância e diâmetro. Para determinar um processo de fabricação do furo seguem-se os ramos e satisfazendo as condições descritas chega-se ao processo de manufatura do furo.

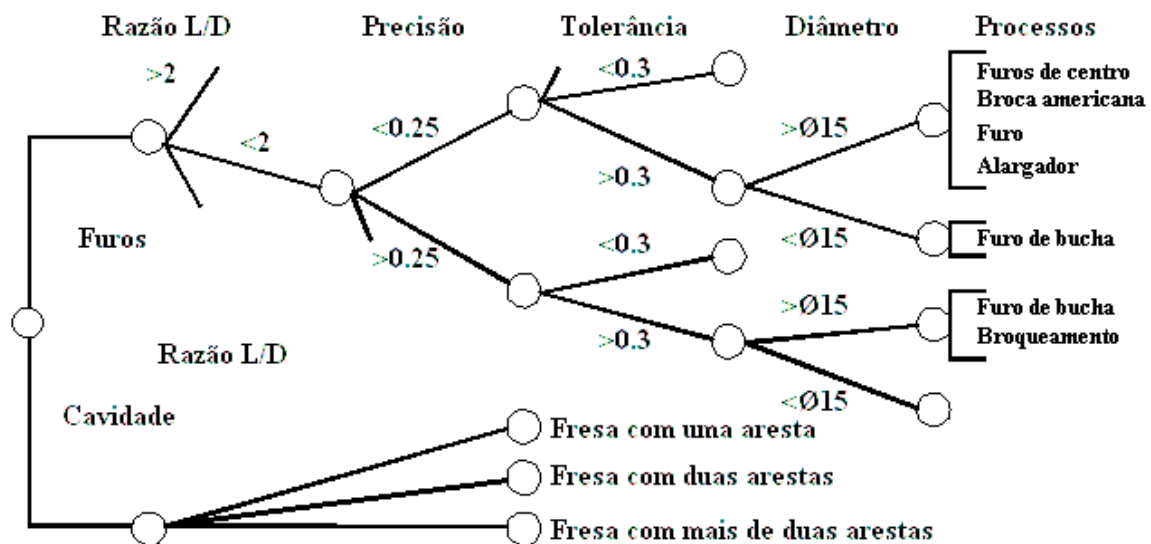


Figura 2.3 – Configuração de uma árvore de decisão.

Tabela de decisões: Uma tabela de decisão é composta de condições, dados e ações (Tabela 1), o princípio de todos os programas de computador. Deve ser estruturada no formato de tabela, sendo o mais completa possível para não haver dúvidas, e precisa na apresentação das regras sem ser redundante e de forma alguma pode conter *loops*.

Tabela 1 – Esquema de uma tabela de decisão.

L/D <2	V	V	V	F	F
>2	F	F	F	V	V
Precisão S/F <0,25	V	V	F	F	F
>0,25	F	F	V	V	V
Centro do furo	1	-	-	2	-
Entre furos	2	1	-	-	2

Sistemas Especialistas: São sistemas computacionais também chamados de **inteligência artificial (IA)**, com regras que contém a mesma habilidade de resolver problemas que um perito (processista) para um domínio estreito do problema. Uma combinação de situações que conduz a uma decisão com certo grau de otimização na solução do problema detectado.

2.6 Vantagens dos Sistemas CAPP

Segundo Groover [1984], tanto um sistema variante, como um sistema generativo oferecem um número de vantagens potenciais sobre a forma de planejamento de processo tradicional (manual) destacando-se, entre outros, os aspectos relacionados com:

a) Racionalização do Processo: A preparação automatizada das distribuições das operações provavelmente torna-se mais consistente, lógica e otimizada que sua contraparte manual. O plano de processo é consistente e padronizado por que o mesmo programa está sendo usado para definição de todos os planos. Evita-se drasticamente a tendência de diferentes folhas de processo mesmo quando elaborado por diferentes processistas. O plano tende ser mais lógico e otimizado por que a empresa tem supostamente incorporado à experiência e julgamento de seus melhores profissionais de produção dentro da plataforma CAPP.

- b) Aumento na produtividade dos planejadores da produção:** Com o sistema de planejamento de processo assistido por computador, há uma forte redução da burocracia, onde poucos erros são cometidos, e os processistas têm um imediato acesso ao banco de dados do processo. Estes benefícios se traduzem em uma alta produtividade dos planejadores, deixando-os com mais tempo para questões importantes que agregam valor à empresa.
- c) Redução do tempo de retorno:** Trabalhando com estes sistemas, o processista é capaz de preparar a folha de processo para uma nova peça em menos tempo comparado com a preparação manual.
- d) Melhoramento da legibilidade:** O documento preparado no computador é mais organizado e sua leitura e compreensão são facilitadas em relação aos escritos manualmente. Estes métodos empregam textos padrões, facilitando a interpretação do plano de processo nos setores produtivos.
- e) Incorporação de outros aplicativos:** Juntamente com o sistema de planejamento de processo pode-se operar outros pacotes de programas que auxiliem na automatização de outras funções de apoio à produção que também consomem tempo da manufatura, como exemplo um sistema de dados de usinabilidade, de cálculo de tempos de usinagem.

3 SISTEMAS CAD E PADRÕES DE ARQUIVOS

Os sistemas CAD correspondem a aplicativos que facilitam a definição, de modo automatizado, da geometria básica no desenvolvimento de um determinado produto. Estes sistemas começaram a ser desenvolvidos na década de 50 no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) através do projeto APT (*Automatically Programmed Tools*). Nos anos 60 surgiram grandes avanços na tecnologia CAD e no final desta década praticamente toda a indústria automobilística e aeroespacial americana utilizava softwares destes sistemas. A década de 80 caracterizou-se pela introdução de modelamento 3D. No modelamento 3D incorporam diferentes técnicas, dentre as quais pode-se destacar: modelagem aramada (*wireframe*), modelagem de superfícies e modelagem de sólidos.

Como o CAD é o início do processo do desenvolvimento do produto necessita-se cada vez mais de trocar as informações geradas em um sistema com outros sistemas auxiliados computacionalmente (CAx) ou até mesmo entre sistemas CAD's de diferentes desenvolvedores. Esta exigência é cada vez mais importante atualmente, como no desenvolvimento colaborativo de produtos que exigem o envolvimento de várias empresas para o seu desenvolvimento. Muitas companhias encontram dificuldade em utilizar o mesmo sistema CAD dentro da própria organização, tornando-se mais difícil através do desenvolvimento junto a uma cadeia de fornecedores.

Para viabilizar a troca de informações (dados) entre sistemas CAD's ou outros sistemas CAx, pode-se lançar mão de três principais abordagens:

- 1) Utilização de um único sistema – nesta situação garante 100% de compatibilidade. A grande desvantagem seria o alto custo.
- 2) Conversores diretos – um tradutor converte os dados de um sistema CAD “A” para um sistema de CAD “B”. Para poucos sistemas envolvidos seria vantajoso, mas à medida que aumenta o número de sistema torna-se inviável devido ao alto custo.
- 3) Arquivos neutros - as informações gráficas de um sistema são traduzidas do formato interno e particular deste sistema para um formato neutro padrão, aberto e conhecido de todos outros sistemas. Esta opção permite maior estabilidade e flexibilidade para uma instalação, além de que, um formato neutro pode conter todos os dados necessários para suportar o

desenvolvimento do produto. Dentre os vários arquivos neutros que surgiram ao longo das últimas décadas destacam-se o *IGES*, *VDA-FS*, *SET* e ultimamente o *STEP*. Na figura 3.1 ilustra-se a cronologia do desenvolvimento destes padrões de troca. [Henriques, 2004].

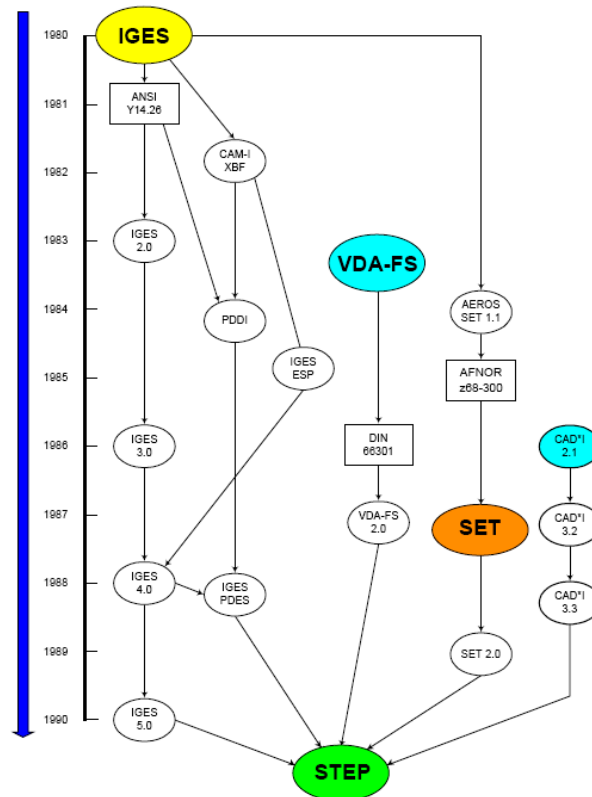


Figura 3.1 – Evolução das propostas de padrões de arquivos neutros.

Em sistemas CAD que modelam o produto através de *features*, entendidas como características geométricas pode-se utilizar conversores na identificação destas características geométricas do modelamento e posteriormente permitir sua utilização em outras aplicações, como por exemplo, o planejamento do processo. Por exemplo, quando “modela-se” um furo em um componente, necessita-se de algumas informações geométricas para o mesmo: como o diâmetro e a profundidade. Estas informações geométricas podem ser utilizadas para planejar a fabricação deste furo. Para a aplicação de planejamento necessita “reconhecer” estas características geométricas que a partir deste momento passam a ser **tecnológicas**.

O reconhecimento das características geométricas é a principal ferramenta para a integração mais direta do projeto do produto com sua manufatura. Essa integração tem sido pesquisada extensivamente nas últimas décadas. Segundo Han [1999] apesar do longo tempo de pesquisas em reconhecimento de *features*, o resultado destas pesquisas não tem sido transferido para a indústria.

O princípio é que um sistema de planejamento obtenha os dados do sistema CAD e gere uma seqüência de instruções para a manufatura do produto. O sistema de planejamento (CAPP) deve extrair ***features* manufaturáveis** do projeto do componente. Entende-se por *features* manufaturáveis aquelas características geométricas extraídas do sistema CAD e que possam ser fabricadas com os recursos disponíveis, como as máquinas e ferramentas. Isto é barreira entre o reconhecimento destas características geométricas e o planejamento do processo segundo Han [1999]. Na figura 3.2 ilustra-se esta dificuldade de reconhecimento de *features*.

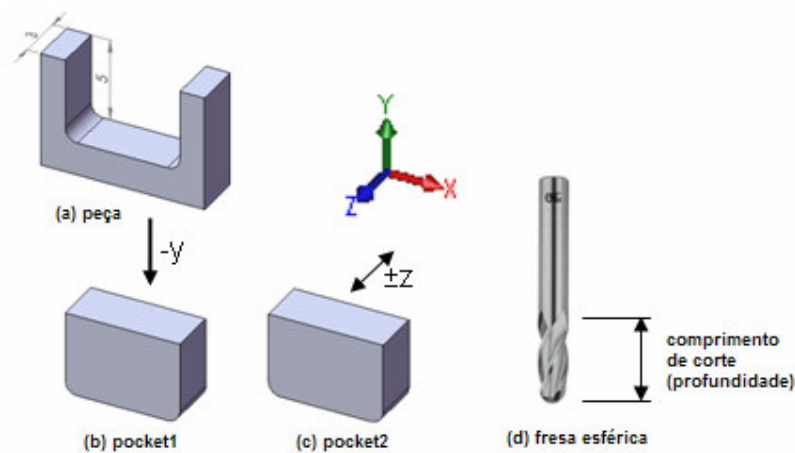


Figura 3.2 – Extração de *features* de um produto qualquer.

A peça representada na Figura em (a) pode ser decomposta em duas cavidades (*pockets*) segundo a direção da ferramenta de corte, em (b) tem-se o volume da cavidade (*pocket₁*) segundo o eixo $-y$, em (c) tem-se o mesmo volume da cavidade (*pocket₂*) segundo a direção $\pm Z$, estas direções representam o movimento de avanço da ferramenta. Se esta cavidade tem as dimensões de 3 x 5 unidades com mostrado em (a) e a ferramenta disponível possui o comprimento de corte de 4 unidades, então a cavidade “*pocket₂*” é manufaturável com esta ferramenta enquanto que a cavidade representada em (b) não é.

Neste exemplo ilustrado na Figura 3.2 [Han, 1999] indica-se o quanto é árdua a tarefa de reconhecer as características de um produto, não só reconhecer, mas assegurar que estas características possam ser fabricadas com os recursos disponíveis. Ainda mais que há vários tipos de *features* a serem consideradas: furos, rasgos, rebaixos, cavidades, ressaltos, etc. Isto em peças prismáticas mais as *features* de peças de revolução.

Na década de 80 reconheceu-se que a proliferação de normas existentes para troca de dados poderia impor futuras barreiras para uma troca de dados eficiente. As interfaces existentes na época como *IGES*, *SET*, *VDA-FS*, dentre outras não ofereciam suporte completo para a troca de dados do produto, ou seja, se limitavam apenas a troca das informações geométricas e desenho 2D. Outras informações, como especificação de tolerância, propriedades do material, lista de materiais ou mesmo informações de planejamento não eram transmitidas. Além das limitações citadas, essas normas ainda apresentam os seguintes problemas [Henriques, 2004]:

- a) os formatos neutros são limitados a dados de geometria e desenho;
- b) as especificações destas normas refletem o estado da arte das décadas de 70 a 80;
- c) os processadores foram desenvolvidos por vendedores e por usuários sem coordenação.

Em vista de todas as dificuldades com os diversos formatos de arquivos neutros impunha-se a necessidade de um formato que contemplasse todo o ciclo de vida de um produto, neste contexto concebeu-se o formato *STEP* de arquivo neutro nos sistemas CAD.

3.1 Normas STEP ISO 10303

O título oficial da norma ISO 10303 é Sistema de automação e integração industrial – Representação de dados de produto e trocas. A ISO 10303 é conhecida com *STEP* (*Standard for the Exchange of Product model data*), isto é, padrão de troca de dados do modelo do produto. É um padrão internacional para representação da interpretação computacional e troca de dados de produtos industriais. O objetivo é prover um mecanismo capaz de descrever os dados do produto através do ciclo de vida deste produto, independente de qualquer sistema particular.

Tipicamente o *STEP* pode ser usado para trocar dados entre CAD, CAM, CAE, PDM/EDM e outros sistemas CAx. *STEP* é aplicado a dados de produtos de projetos elétricos e mecânicos, análises e manufatura, com informações adicionais específicas para várias indústrias como automotiva, aeroespacial, construção civil, navios, óleo e gás, plantas de processo e outras.

A adoção de um formato de troca neutra e internacional se propõe a contribuir na redução nos custos empregados na troca de informações do produto, melhor qualidade dos dados trocados, permitindo o compartilhamento dos dados entre softwares e organizações envolvidas ao longo do ciclo de vida do produto. As normas *STEP* foram construídas em uma linguagem estruturada que descreve formalmente a estrutura do produto, tornando assim um modelo confiável.

Para garantia e a qualidade da associatividade entre os modelos gerados por um sistema CAD e outros sistemas como, por exemplo, sistemas CAD e CAPP é necessário que se utilizem formatos de interface com o maior número de recursos geométricos possíveis. Dentre os arquivos de troca de informações o formato *STEP* assegura uma melhor qualidade e precisão do modelo convertido, comparativo a outros padrões. A Tabela 2 ilustra os elementos contidos nos padrões. [Helleno, 2005].

Tabela 2 – Elementos reconhecidos em diferentes padrões.

Tipo de Elemento	VDAFS	IGES	STEP
Ponto	X	X	X
Vetor	X		X
Reta	U	X	X
Arco de Círculo	X	X	X
Curva de secção cônica		X	X
Curva Polinomial	X	U	X
Curva B-Spline		U	X
Curva Nurbs		X	X
Plano	U	X	X
Cilindro		X	X
Cone		X	X
Esfera		X	X
Elipsoide		X	X
Superfície anelar		X	X
Superfície Polinomial	X	E	X
Superfície B-Spline		U	X
Superfície Nurbs		X	X
Curva em superfície polinomial	X	U	X
Superfície de Regulagem	E	X	X
Superfície polinomial limitada	X	U	X
Sólidos		E	X

(X=contém; E=limitado; U=contido como sub-elemento)

A norma *STEP* vem sendo desenvolvida pelo comitê internacional ISO TC 184/SC4 (Dados Industriais) para abranger todos os dados de engenharia, não somente elementos gráficos como é feito pela *IGES*. Com 28 nações participando ou observando, *STEP* é um esforço mundial para desenvolver um mecanismo para a troca e compartilhamento de dados de engenharia. As normas *STEP* permitem que os dados técnicos industriais sejam disponibilizados em um formato neutro, isto representa uma série de vantagens como a, facilidade na troca de dados entre os diversos sistemas CAD e possibilitar o compartilhamento das informações entre

as empresas e respectivos setores. A estrutura responsável pelo padrão *STEP* é ilustrado na Figura 3.3.

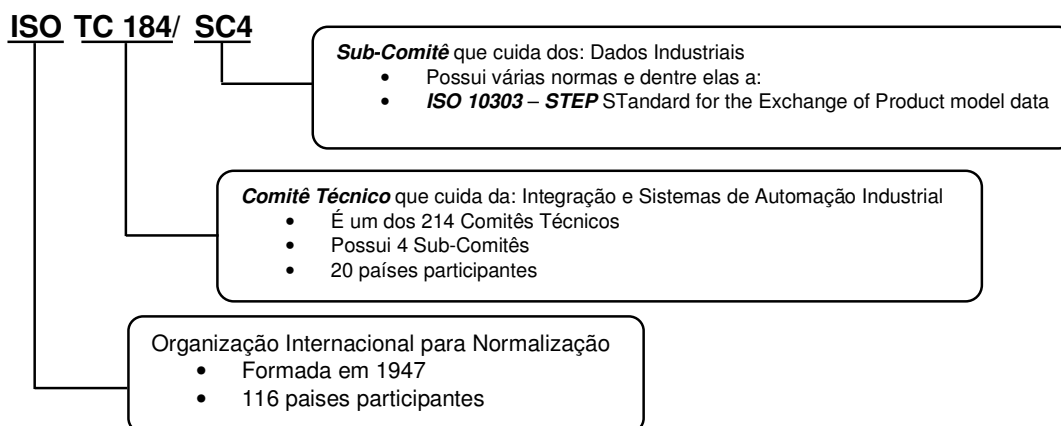


Figura 3.3 – Estrutura da ISO TC184/SC4.

3.2 Estrutura da norma

A norma *STEP* é descrita na ISO 10303 e não só define o modelo de dados do produto com também os método, arquitetura de implementação, procedimentos de testes, modelos de informação de pesquisa, e protocolos de aplicação. As partes do *STEP* podem ser divididas em Métodos de Descrição, Modelos de Informação, Protocolos de Aplicação, Métodos de Implementação e Ferramentas de Conformidade.

Segundo Henriques [2004] a norma *STEP* é descrita por um grande número de documentos da ISO. Os documentos são organizados em séries. Cada série representa uma seção funcional da norma. Por exemplo: Métodos de Descrição, Métodos de Implementação, Metodologia de Teste de Conformidade e Estrutura de Trabalho, etc.

Os métodos e princípios utilizados para o desenvolvimento das normas *STEP* está ilustrado na Figura 3.4, a qual está dividida em cinco principais categorias:

- Métodos de Descrição.
- Métodos de Implementação.
- Metodologia de Teste de Conformidade.
- Recursos para a Integração da Informação.
- Protocolos de Aplicação.

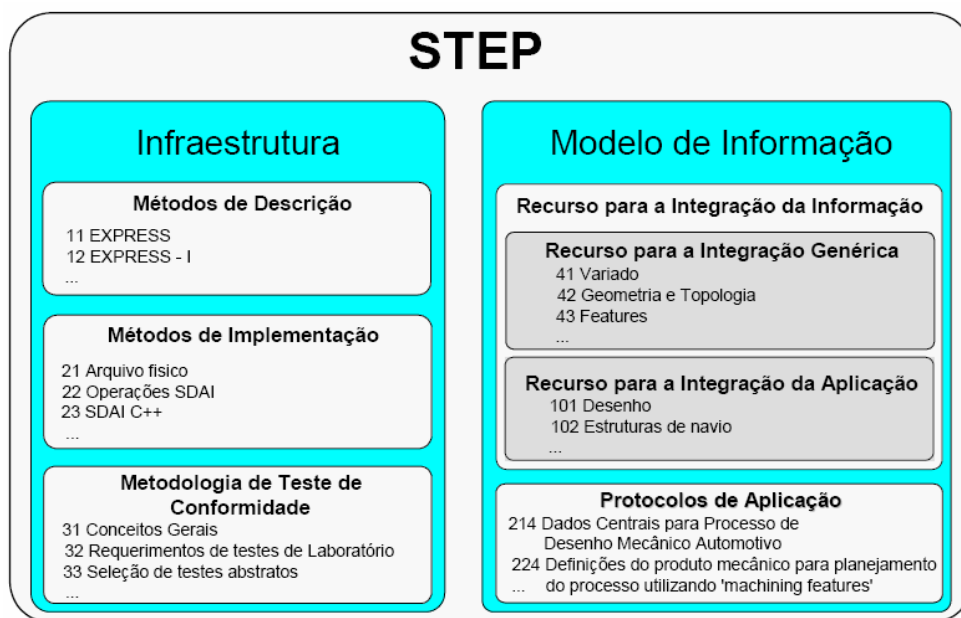


Figura 3.4 – Principais níveis da estrutura da *STEP*.

3.2.1 Métodos de Descrição

A linguagem *EXPRESS* é o Método de Descrição da *STEP*, sendo normalizada como ISO 10303-11. *EXPRESS* é a linguagem de programação do *STEP*, semelhante ao PASCAL. Em um ESQUEMA *EXPRESS*, vários tipos de dados podem ser definidos juntos com suas restrições estruturais e regras algorítmicas. A vantagem do *EXPRESS* é a possibilidade de validar, formalmente, uma população de tipos de dados. Nesta validação verificam-se todas as restrições e regras. O modelo de dados *EXPRESS* pode ser um documento texto ou um gráfico. O documento texto, no formato ASCII, é aplicado geralmente para a validação ou como *input* de uma ferramenta SDAI (ISO 10303-22). Enquanto a representação gráfica, nomeada *EXPRESS-G*, é utilizada como ilustração ao operador, omitindo alguns detalhes.

A Figura 3.5 ilustra como uma entidade geométrica é definida em *STEP* por meio da linguagem *EXPRESS*.

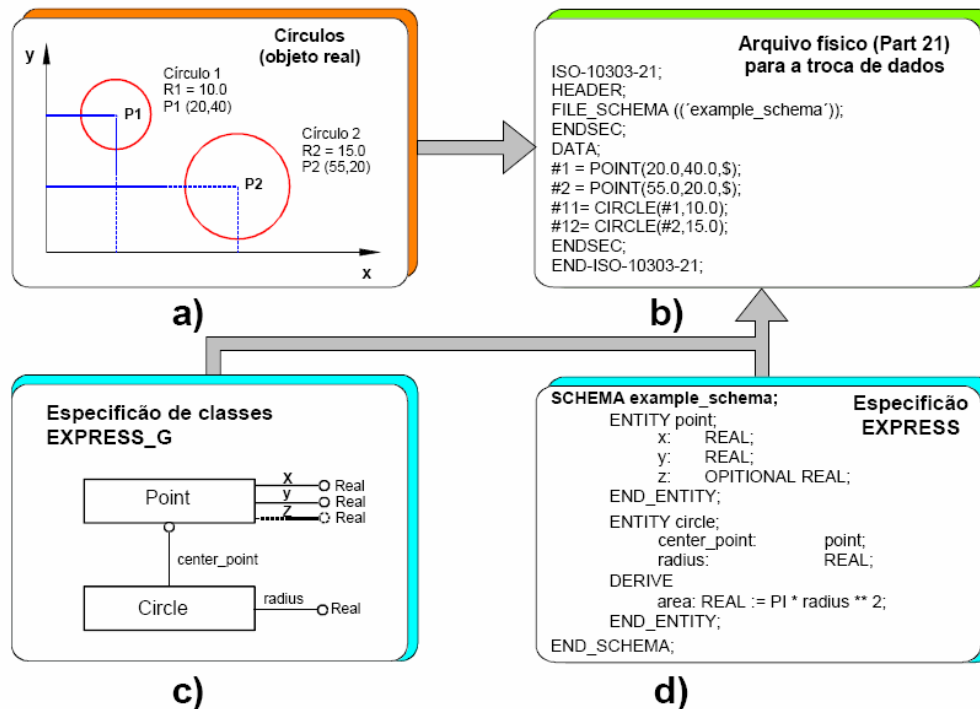


Figura 3.5 – Representação de furos em um sistema CAD e na linguagem *EXPRESS*.

Em (a) tem-se a representação de dois círculos em um sistema CAD; em (d) está ilustrado a descrição do círculo na linguagem *EXPRESS*; (c) mostra a mesma descrição, porém, em uma representação gráfica da linguagem *EXPRESS*. Em (b) está representado o arquivo físico, ele é o meio que a *STEP* providencia para transferir os dados definidos em *EXPRESS* entre diferentes bancos de dados e sistemas CAD, possibilitando, com isso, a troca de dados do produto por meio de um arquivo seqüencial.

3.2.2 Método de Implementação

A série 20 das normas *STEP* define os métodos de implementação que são utilizados para transferir os dados de uma aplicação em *EXPRESS* para outros aplicativos, usado na troca de dados entre diferentes sistemas CAD. Existem vários métodos de implementação para transferir um modelo especificado em *EXPRESS* para uma forma de implementação especial. O primeiro método de implementação da norma é o arquivo físico (*physical file*), constantemente referenciado como Parte 21 (Figura 3.5 b). A Interface de Acesso de Dados Normalizada SDAI (*Standard Data Access Interface*) é outro método de implementação que os desenvolvedores de softwares utilizam para manipular os dados definidos em *EXPRESS*. As linguagens de

programação especificadas para o desenvolvimento de aplicações são: C, C++, Fortran, IDL, Java, XML.

3.2.3 Recurso para a Integração da Informação

Os recursos para integração contêm os modelos de dados genéricos da norma são o bloco construtor da *STEP*. A integração dos Protocolos de Aplicação (AP) é auxiliada por esses recursos, facilitando a operação interna, uma vez que, cada entidade que pertence a este grupo é compartilhada entre os protocolos de aplicação que necessitam dela. Esse grupo é dividido em quatro sub-grupos sendo que os principais são: os de recursos para integração genérica e recursos para integração da aplicação.

Recursos para integração genérica: Possui as informações do modelo que descreve os dados do produto que não depende de uma aplicação específica. É a parte central da *STEP*, pois é o responsável pela definição da geometria e topologia, apresentação visual, tolerância, material, configuração da estrutura de dados, dentre outras entidades genéricas que são necessariamente usadas pelos Protocolos de Aplicação.

Recursos para integração da aplicação: Está compreendido na série 100, Figura 3.5, especifica extensões para os arquivos genéricos. Desta forma, a entidade nele definida possui um pouco mais de contexto que as definidas no grupo de integração genérica. Por exemplo, a ISO 10303-101 (Desenho), especifica os elementos geométricos definidos na ISO 10303-42 (Representação geométrica e topológica) no contexto de desenhos técnicos.

3.2.4 Protocolo de Aplicação

A norma *STEP* é flexível no que tange a customização e expansão de acordo com as necessidades de uma determinada aplicação específica. O que dá esta característica a *STEP* é o fato de estar organizada em Protocolos de Aplicação, de acordo com Henrique [2004] - grupo de entidades únicas escolhidas para um produto, processo ou indústria específica. Há AP's destinados as mais variados tipos de indústria: automobilística, aeroespacial, naval, etc.

A série 200 da *STEP* corresponde aos Protocolos de Aplicação, que descrevem os dados utilizados para representar o produto, como também os dados usados no modelo. Um Protocolo de Aplicação é um documento formal que descreve uma parte do ciclo de vida de um

produto. Esse documento é chamado de Modelo de Atividades da Aplicação (*Application Activity Model AAM*); as informações das partes do produto que são necessárias para essa atividade chamam-se, Modelo de Referência da Aplicação (*Application Reference Model ARM*). Um modelo de informação que descreve tudo no ARM utiliza uma biblioteca de definições pré-existentes. Esse modelo de informação é escrito na linguagem *EXPRESS*.

Alguns Protocolos de Aplicação da norma *STEP* importantes para o Planejamento do Processo, são o AP 203 (Configuração controlada pelo design), o AP 224 (Definição de Produtos mecânicos para planejamento do processo) e o AP 240 (Planejamento do Processo para peças usinadas).

3.2.4.1 Protocolo de Aplicação AP203

O protocolo 203 da norma *STEP* é um protocolo dito *standard*, utilizado para troca de dados geométricos, estrutura do produto, dados de gerenciamento de configuração. Na edição 2(2004) foi adicionado tolerâncias, histórico de construção, *layers* e cores para trocas em 3D com ISO 10303. Na Figura 3.6 ilustra-se as características deste protocolo.

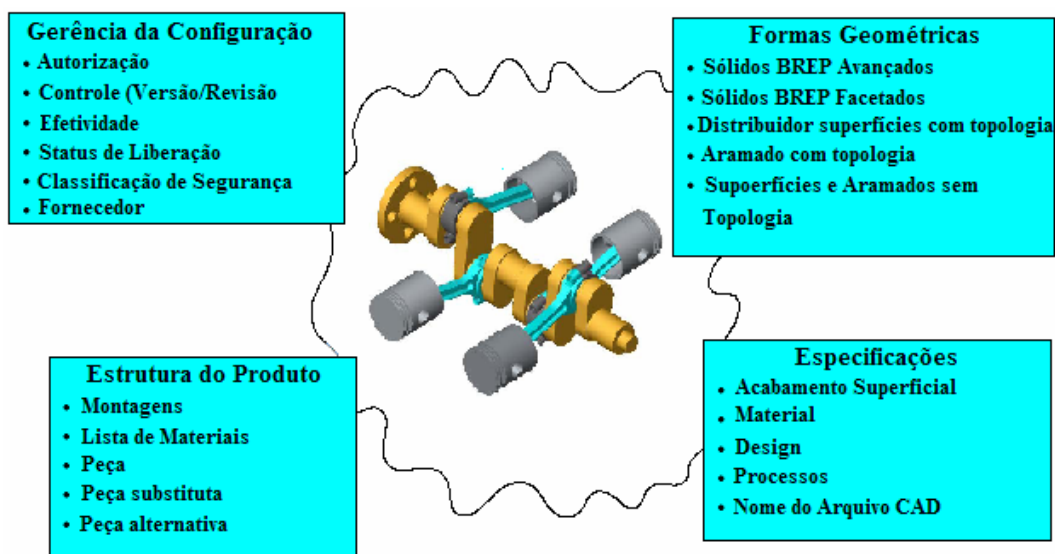


Figura 3.6 – Protocolo de aplicação AP203 da norma ISO 10303.

Algumas características do protocolo na primeira edição (1994):

- a) produtos que são peças mecânicas e montagens;

- b) dados de definição do produto e dados de controle de configuração pertencentes à fase de design do desenvolvimento de um produto;
- c) cinco tipos de representação de formas de peças que incluem: aramado e superfície sem topologia; geometria aramada com topologia; superfícies manifold com topologia; representação de regiões facetadas e representações de regiões.
- d) identificação da indústria, empresa ou outras especificações para o design, processo, acabamento de superfície, e materiais nas quais são especificados pelo projetista como aplicável para o design do produto;
- e) dados que são necessários para a rota de aprovação do *design*.

Na edição 2 do protocolo AP203 ele foi modularizado. Foram acrescentadas as seguintes características:

- a) cores e *layers*;
- b) propriedades de validação;
- c) histórico de construção;
- d) dimensões e tolerâncias;
- e) representação de uma instância de uma peça em uma montagem através de seu uso em uma submontagem;
- f) seis tipos de representação de formas geométricas: representação avançada de regiões; representação de regiões facetadas; superfícies *manifold* com topologia;
- g) *wireframe* com topologia; geometria construtiva de sólidos (CSG) em três dimensões e superfícies geometricamente *bounded* e *wireframe*;
- h) anotação de textos e notas aplicados a representação da forma geométrica.

3.2.4.2 Protocolo de Aplicação AP224

O protocolo de aplicação AP224 pode ser considerado como um grande conjunto de *features* para manufatura que podem ser utilizadas para troca de informações necessárias para criar peças usinadas. A norma ISO 14649 usa o AP 224 como base para definição de *features*. Durante o desenvolvimento da ISO 14649 algumas *features* foram redefinidas resultando na necessidade de mapear AP224 para ISO 14649 quando do uso em rotinas de importação e exportação de dados. A primeira edição do protocolo é de 1999, a edição 2 em 2001 e em 2006 ocorreu a edição 3. A Figura 3.7 ilustra as características deste protocolo. Algumas características deste protocolo na primeira edição:

- a) peças mecânicas simples manufaturáveis por processos de usinagem;
- b) produtos que são manufaturáveis por processos de torneamento e fresamento;
- c) data de aprovação da autorização de manufatura da peça;
- d) data da requisição administrativa para identificar requerimentos de *status* de materiais e equipamentos necessários para a fabricação da peça;
- e) identificação do *status* da peça na ordem de trabalho.

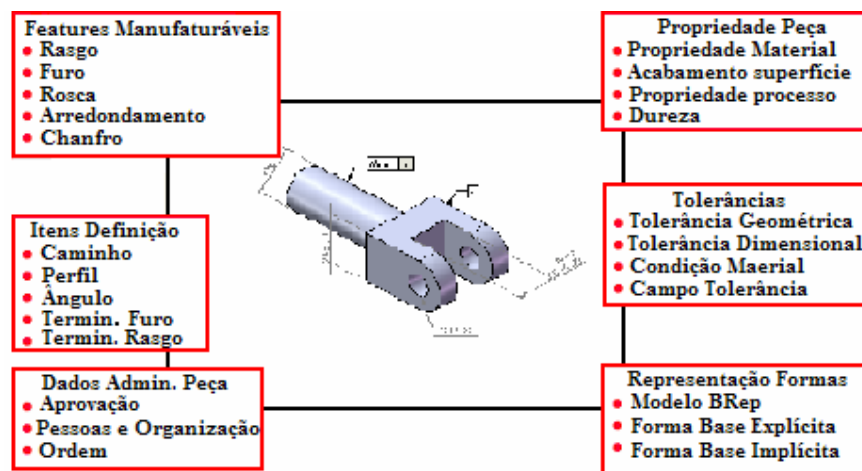


Figura 3.7 – Protocolo AP224 da Norma ISO 10303.

3.2.4.3 Protocolo de Aplicação AP240

Este protocolo especifica informações requeridas para a troca, arquivo e compartilhamento de informações de plano de processo em comando numérico e definição de dados associados ao produto. A Figura 3.8 ilustra as propriedades deste protocolo. Algumas características:

- a) informações a partir de atividades de planejamento que possui planos de processos NC (*Numerical Control*) para peças usinadas;
- b) instruções de trabalho para tarefas requeridas para manufaturar a peça, usando controle numérico, na qual incluem: referencia dos recursos requeridos para realizar o trabalho, a seqüência das instruções do trabalho, relações do trabalho e a geometria da peça, referencias a padrões e especificações declaradas no plano de processo, informações requeridas para a programação NC de processos especificados no plano de processo (incluem definição do produto, dados administrativos, máquina, ferramentas e material necessário);
- c) informações necessárias para a inspeção do produto;

d) informações da área produtiva especificada no plano de processo (rotas da peça, *setup* da máquina e instruções de fixação).

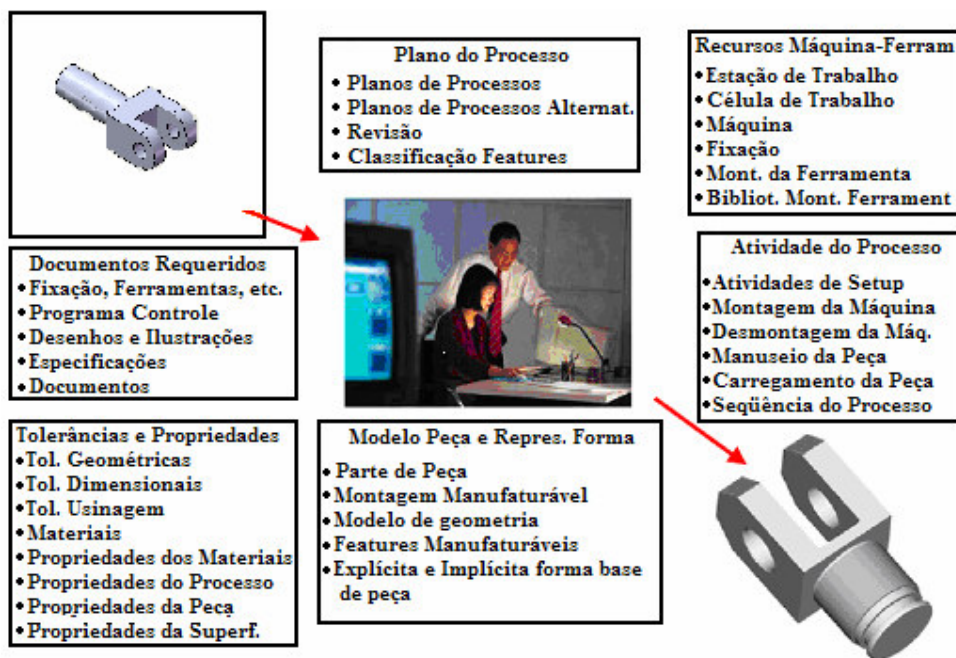


Figura 3.8 – Aplicação do protocolo AP 240 da Norma ISO 10303.

4 TRABALHO DESENVOLVIDO

4.1 Introdução

O trabalho desenvolvido permite a geração de plano de processo para peças usinadas. Pela concepção do sistema este pode permitir a geração de um plano de processo de modo semi-automático, partindo do processamento de um arquivo de desenho de projeto ou apenas de modo interativo, com o processista utilizando diretamente as interfaces implementadas associadas a interpretação pessoal do projeto. O sistema recebe como informações de entrada os dados geométricos do produto modelado em um sistema CAD de arquivos, no formato da norma ISO 10303, denominada *STEP*. O protocolo de aplicação utilizado é o AP203, este reconhecido pela maioria dos softwares de CAD comerciais.

No modo semi-automático, baseado nas informações geométricas contidas no arquivo neutro da norma *STEP* o sistema identifica as *features* manufaturáveis através de um algoritmo interno do sistema. Este algoritmo reconhece geometrias cilíndricas do produto bem como suas dimensões. O sistema trabalha com um banco de dados contendo informações necessárias para a fabricação do produto, tais como: máquinas, ferramentas e operações que podem ser realizadas nestas máquinas com as ferramentas disponíveis. Com as informações geométricas do produto, recursos disponíveis o sistema elabora o plano de processo para a fabricação do produto com a seleção das máquinas, escolha das ferramentas e ordem de execução das mesmas. Como dados de saída do sistema obtém-se o micro planejamento do produto na forma de um relatório com informações suficientes para o setor produtivo da empresa tenha condições de executar a manufatura.

4.2 Recursos utilizados

Para o desenvolvimento deste trabalho os recursos utilizados foram:

- a) Computador Dell Optiplex GX620.
- b) Software *Firebird* versão 1.5 – para o projeto do banco de dados.
- c) Software *IBExpert* versão 2005.06.07 – interface de desenvolvimento do banco de dados.
- d) Linguagem *Delphi* versão 6.0 – para o desenvolvimento da interface da aplicação.

- e) *Solidedge v 19* e *ProEngineer Wildfire 2.0* (software's CAD, exportam no formato *STEP*).
- f) JVM (*Java Virtual Machine*, máquina virtual Java).
- g) JDK (*Java Development Kit*, pacote de desenvolvimento Java).
- h) *Netbeans IDE 5.5* (ambiente de desenvolvimento integrado).
- i) Sistemas operacionais *Windows XP* e *Linux Debian Etch 4.0* (desenvolvimento e testes).
- j) Microsoft Word elaboração da documentação.

4.3 Metodologia de Desenvolvimento do Sistema.

O sistema de planejamento de processo está estruturado em três módulos: o algoritmo de interpretação do arquivo *STEP*, o banco de dados com as informações de manufatura e a interface gráfica do sistema. O projeto conceitual para desenvolvimento deste trabalho compreende na escolha de ferramentas de trabalho, que são as linguagens de programação e no desenvolvimento de modelos de peças tridimensionais para testes e validação dos algoritmos. Na implementação deste trabalho é necessário a compreensão da estrutura do arquivo físico do padrão *STEP*, para extrair as informações da geometria do componente. Na etapa final desenvolve-se a programação dos algoritmos, criação do banco de dados e criação e programação da interface gráfica.

Na Figura 4.1 ilustra-se o diagrama geral do sistema de planejamento de processos semigenerativo implementado. Em um sistema CAD comercial gera-se o projeto do produto. Este produto é armazenado em um arquivo *STEP*. No sistema de planejamento este arquivo é carregado e o interpretador *STEP* identifica as geometrias existentes. O planejamento das etapas de manufatura é feito de acordo com as geometrias encontradas e de maneira interativa, permitindo também planejar outras geometrias que o interpretador não identifica. O banco de dados alimenta o sistema com informações de manufatura, como propriedades de materiais, características geométricas e parâmetros de corte de ferramentas e características de equipamentos. Rotinas de cálculo para os processos de usinagem são executadas para auxiliar o processista em atividades que não agregam valor. Como resultado é gerado o plano de processo do produto em forma de relatório.

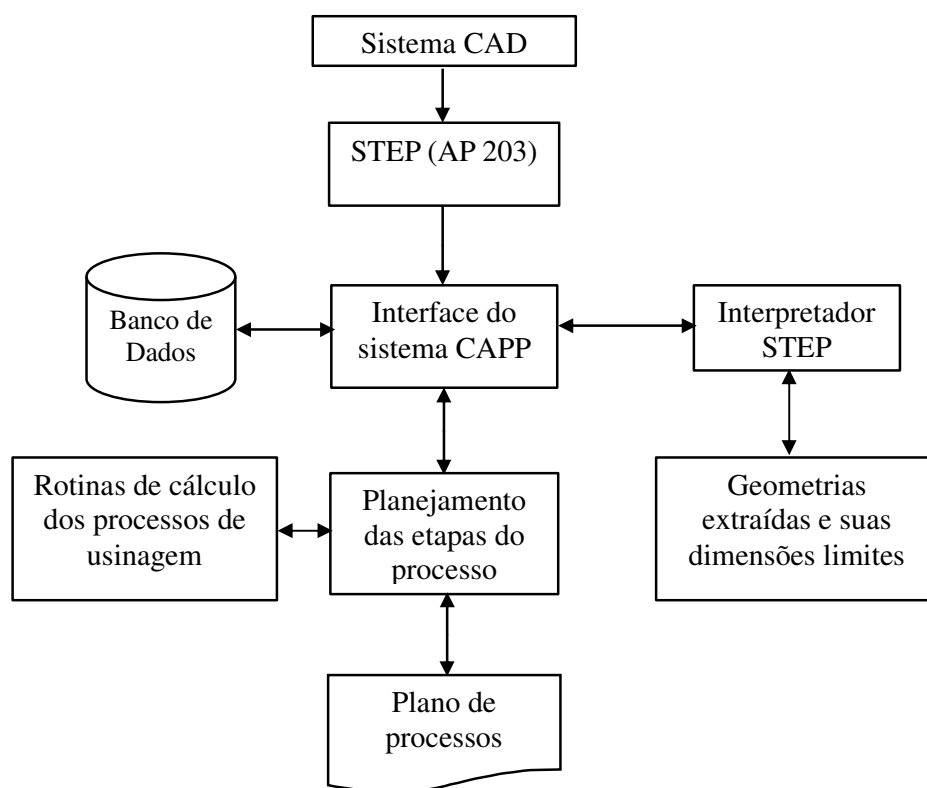


Figura 4.1 – Fluxograma geral do sistema desenvolvido.

Para ilustração do sistema de planejamento desenvolvido neste trabalho passa-se a utilizar uma peça exemplo identificada na Figura 4.2. O sistema se restringe, no estágio de desenvolvimento alcançado, a planejar de modo semi-automático peças rotacionais com furo simples e rasgo de chaveta.

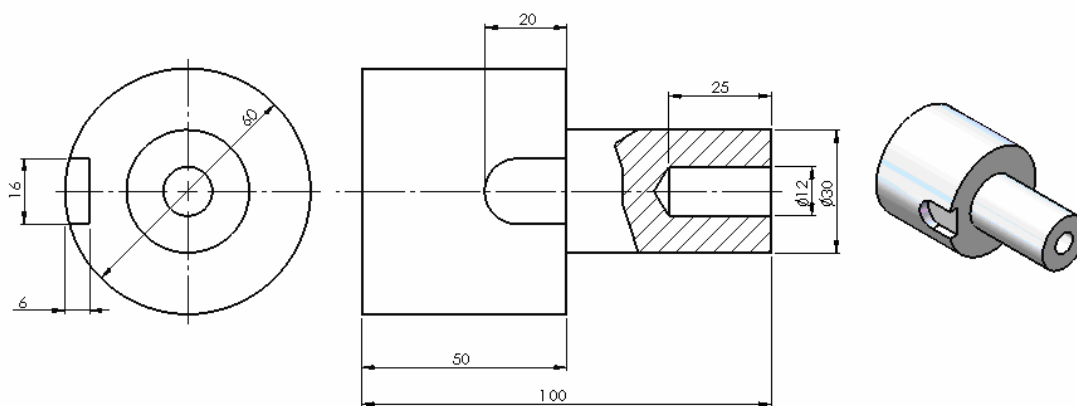


Figura 4.2 - Peça exemplo, utilizada para ilustrar o sistema de planejamento.

4.4 Módulo de processamento do arquivo *STEP*

Apesar de arquivos *STEP* serem um conjunto de padrões desenvolvidos pela ISO, há pequenas diferenças entre os arquivos exportados através de diferentes sistemas CAD. Entre os exemplos analisados para desenvolvimento deste trabalho, encontram-se pequenas diferenças na sintaxe nos mesmos comandos.

De maneira geral, os arquivos exportados através do *SolidEdge* contém mais informações do que os oriundos do *ProEngineer*. Estas informações estão desvinculadas às formas geométricas das peças, são, a princípio, dados complementares sobre precisões de montagem, dados técnicos da peça, sistema de coordenadas e unidades de medida. Entretanto, a lógica para determinação de características geométricas é muito semelhante, porém não igual.

Como exemplo, pode-se tomar o caso em que o *Pro/E (ProEngineer)* define dois cilindros similares para determinar a geometria de um simples tarugo, enquanto o *SolidEdge* define apenas um cilindro inteiro. O resultado final interpretado por este algoritmo CAPP é o mesmo para arquivos oriundos de quaisquer destes CADs, pois através do módulo de reprocessamento, um dos cilindros descritos através do arquivo *STEP* proveniente do *Pro/E* é descartado. Estas informações poderão ser melhor analisadas conforme houverem melhorias funcionais no algoritmo. Por hora, o algoritmo considera no caso de dois cilindros sobrepostos o de diâmetro maior.

Outra diferença entre os dois softwares que serviram de base para os testes é a maneira de declarar as variáveis ou vetores. O *Pro/E* declara as variáveis através da notação científica, enquanto o *SolidEdge* pode usar tanto notação científica quanto números de ponto flutuante com 15 dígitos significativos. O *SolidEdge* também insere caracteres de espaço em variáveis, enquanto o *Pro/E* não os utiliza em suas instruções. O algoritmo, porém, é capaz de entender as duas variações de arquivos. Para isto as linhas de comando são pré-processadas de maneira a padronizar a sintaxe. Pontos flutuantes são transformados de *strings* para variáveis do tipo *double*, e depois revertidas para *strings* novamente, garantindo a padronização dos dados armazenados na memória.

Na Figura 4.3, ilustra-se o diagrama macro de funcionamento do módulo de processamento de arquivos *STEP*. O algoritmo recebe a entrada de arquivos *STEP*, extrai os

dados do arquivo através da análise sintática, armazena os dados na memória do computador, processa as informações extraídas em busca da obtenção de dados geométricos, reprocessa os dados para a correta exibição dos mesmos no arquivo de saída, e escreve a saída de dados.

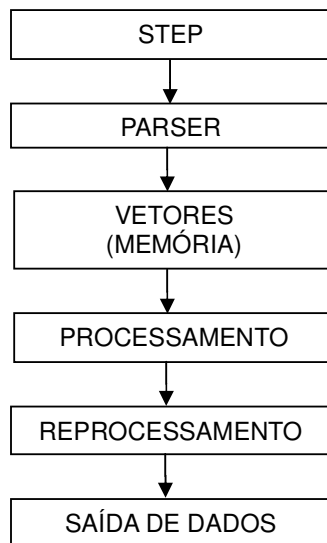


Figura 4.3 – Funcionamento do módulo de processamento *STEP*.

4.4.1 Projeto do algoritmo

O projeto dos algoritmos é parte fundamental na implementação quando este tem propriedades de um compilador. Estudo detalhado dos aspectos construtivos de arquivos *STEP* faz-se necessário para o bom aproveitamento do tempo de desenvolvimento. Todas as classes de algoritmos foram inicialmente determinadas através de representação visual, desta maneira a abordagem de programação se torna objetiva e eficiente. O processamento da linguagem *STEP* por este algoritmo de CAPP ocorre em três etapas. A primeira delas extrai as informações textuais e as armazenam em vetores na memória do computador, a segunda etapa processa estas informações extraídas (“PARSER”, “VETORES” e “PROCESSAMENTO” respectivamente na Figura 4.3) e finalmente a última grava as informações obtidas em um arquivo texto.

4.4.2 Determinação de protocolo

Para a integração de dados entre os diferentes módulos do sistema desenvolvido foram estabelecidos protocolos comuns para que as informações de saída de um determinado módulo possam ser interpretadas por outro módulo do sistema sem ambigüidade. Os protocolos foram estabelecidos de comum acordo entre os desenvolvedores dos diferentes módulos.

4.4.3 Vetorização das informações

Na verificação da estrutura da linguagem, constata-se a necessidade de duas etapas para a interpretação do arquivo *STEP*. Cada instrução, ou linha de comando, pode ser considerada como um vetor e essa instrução pode utilizar de outros vetores presentes, não necessariamente em ordem seqüencial no arquivo. A primeira etapa da implementação do algoritmo, portanto, tem a função de armazenar e organizar todas as informações do arquivo em vetores na memória do computador, com a obtenção dos dados através de segmentação das instruções de comando do arquivo *STEP*. Para extrair os dados de vetores foram utilizadas classes de expressões regulares, com a função de reconhecer os diferentes comandos e desenvolvidos e utilizados *parsers*, que são algoritmos computacionais para análise sintática e léxica. Para cada comando foram definidos diferentes *tokens*, que são estruturas padrões que definem as sintaxes de cada operação.

4.4.4 Processamento

Após a vetorização dos dados dá-se o processamento dos mesmos. Cada vetor de um arquivo *STEP* pode ou deve referenciar nenhum, um ou mais outros vetores. Na Figura 4.4, representa-se esquema de funcionamento de um comando-exemplo em linguagem *STEP*.

O modelo de representação de informações geométricas de arquivos *STEP* baseia-se em conceitos de ambos os formatos de troca de dados (*B-REP* e *CSG*). A descrição de formas geométricas é feita com a declaração de todos os vértices, eixos, plano, arestas, ao mesmo tempo em que usa a estrutura de árvores e variáveis booleanas para adicionar ou remover superfícies ou faces. A interpretação da geometria, portanto, exige a declaração de uma grande quantidade de diferentes variáveis, inclusive para geometrias com baixa complexidade. Entre os modelos concebidos para testes do algoritmo interpretador de *STEP* constata-se que um cilindro com 100 milímetros de comprimento e de diâmetro 40 mm exige a interpretação de 162 comandos e uma geometria que descreve dois cilindros de diâmetros diferentes é apresentada com 307 comandos.

Este interpretador de linguagem *STEP* protocolo 21 trabalha, no estágio alcançado, com superfícies cilíndricas (operações básicas de torneamento), porém, a base lógica para expandir outras funcionalidades está implementada. Todos os comandos funcionais dos arquivos

STEP utilizados para testes de desenvolvimento são suportados e extraídos através das análises sintáticas. Para incluir novas funcionalidades no algoritmo basta incrementar a lógica analítica.

A Figura 4.4 mostra a sintaxe e lógica de um comando *STEP*, especificamente o comando *document_relationship*, como descrito originalmente em Ungerer [2001] utilizado para determinar a relação entre diferentes arquivos de entrada de dados.

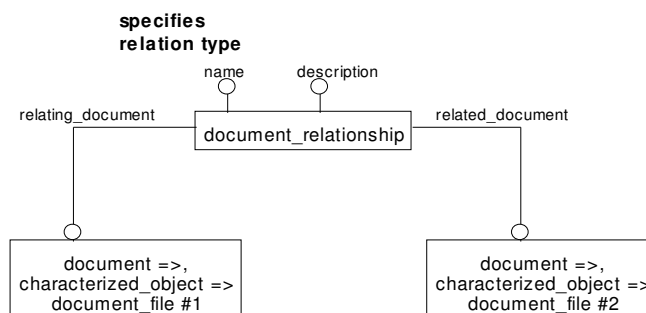


Figura 4.4 – Esquema do comando *DOCUMENT_RELATIONSHIP*.

Um exemplo de conjunto de instruções para o comando esquematizado acima poderia ser o seguinte:

```
#90 = DOCUMENT_FILE('file_1', "", "#110", "$");
#130 = DOCUMENT_FILE('file_2', "", "#110", "$");
#150=DOCUMENT_RELATIONSHIP('sequence','defines a sequence relation',#90, #130);
```

Neste exemplo verifica-se a seguinte estrutura: numeração para o vetor de comandos desta linha (#150), atribuição (=), comando (*DOCUMENT_RELATIONSHIP*), nome ('*sequence*'), descrição ('*defines a sequence relation*'), documento qual se está relacionando o comando (#90) e documento ao qual está relacionado o comando (#130). Este trecho de algoritmo não tem muito sentido analisado individualmente, porém, este código serve para exemplificar a relação entre vetores que definem a linguagem *STEP*. Com a interpretação adequada das informações é possível para o algoritmo entender a forma geométrica da peça e descrevê-la para o módulo de geração da tabela de processos.

4.4.5 Reprocessamento

Como última etapa, dá-se o reprocessamento das informações com o objetivo de gerar as saídas e informações geométricas a serem aplicadas no cálculo de parâmetros de processos. Trata-se da etapa de síntese de um algoritmo compilador, em que as informações obtidas são reordenadas a fim de gerar a saída de dados em outra linguagem diferente da de entrada. Esta etapa desenvolve ainda tarefas adicionais necessárias devido a particularidades da linguagem *STEP* e características herdadas da formatação *B-REP*. As mesmas informações podem ser declaradas mais de uma vez de maneira diferente. Por isso, é necessário interpretar cada um dos dados e armazená-los em outra matriz na memória do computador e por último analisar se os dados não foram declarados em duplicidade para garantir a inexistência de dados sobrepostos da tabela de processos com o cálculo de parâmetros de processos em excesso.

Nesta etapa é calculado o volume de controle do sólido, todas as funções (ou vetores) são reanalisados em busca de pontos extremos em cada eixo cartesiano. A diferença entre estes dois pontos determina os extremos do volume de controle, parâmetros estes que são de grande importância para a escolha de uma máquina que suporte esta geometria dimensional.

4.5 Projeto do banco de dados

O banco de dados do sistema contém os recursos disponíveis para a manufatura. O usuário do sistema pode incluir, alterar e excluir recursos conforme a necessidade. O banco de dados possui cadastro de máquinas, ferramentas, operações e materiais e outras informações necessárias ao funcionamento da interface, como por exemplo, variáveis de configuração do sistema.

Na Figura 4.5, são mostrados as tabelas do banco de dados e seus campos, bem como os relacionamentos entre os campos de determinadas tabelas. A tabela Máquina se relaciona com as tabelas Ferramentas e Operações, pois uma determinada ferramenta pode ser utilizada em diversas máquinas e outras apenas em um determinado equipamento. Da mesma forma ocorre com as operações, que determinadas são comuns em diferentes máquinas-ferramentas e outras são exclusivas.

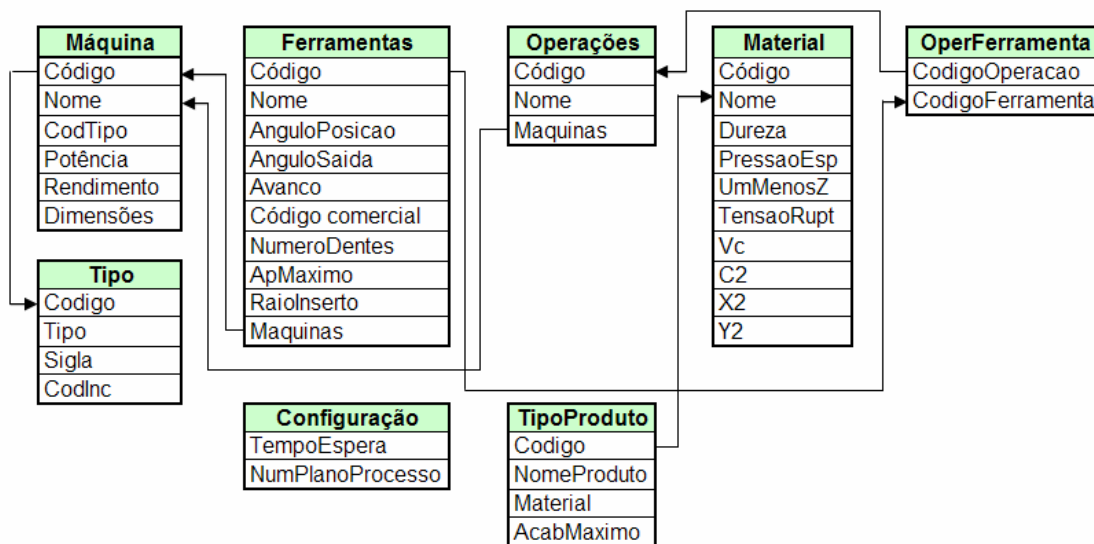


Figura 4.5 – Tabelas e campos do banco de dados.

Na tabela de máquinas, estas são classificadas por tipo (torno, fresadora ou furadeira). Cada máquina recebe um código de identificação no sistema de acordo com o tipo de equipamento, por exemplo: um torno receberá o código TRxxx, onde “xxx” é um incremento seqüencial para identificar cada máquina, se a máquina for uma fresadora o código começará com FR e uma furadeira com FU. Outras características importantes são: a potência do motor principal, as dimensões máximas usináveis e rendimento mecânico.

A potência determina se uma determinada máquina possui capacidade de fabricar um determinado produto de acordo com a ferramenta selecionada, o material da peça e as condições de corte. As dimensões usináveis correspondem aos máximos que a mesa do equipamento pode deslocar. O rendimento mecânico se faz necessário, pois o sistema determinará a potência teórica da usinagem e de acordo com o equipamento selecionado o valor que importa é a potência efetiva. A Figura 4.6 ilustra a interface para o cadastro de máquinas no banco de dados.

Código	Nome	Cód. Tipo	Dimensão X	Dimensão Y	Dimensão Z	Potência (cv)	Rendimento
FR1	Discovery 400	2	410	310	410	7,5	0,85
FR2	Discovery 560	2	560	406	508	15	0,9
FR3	Discovery 760	2	762	406	508	15	0,85
TR1	Centur 30D	1	200	0	500	10	0,85
TR10	Multiplic 40	1	305	0	1000	20	0,85
TR2	Centur 30D	1	200	0	1000	10	0,85
TR3	Centur 30G	1	42	0	120	10	0,85
TR4	Centur 50	1	700	0	2000	30	0,9
TR5	Centur 50	1	700	0	3000	30	0,9
TR6	Centur 50	1	700	0	4000	30	0,9

Figura 4.6 – Interface do cadastro de máquinas no banco de dados.

As ferramentas no banco de dados são cadastradas para que o sistema de acordo com a geometria da peça permita selecionar a ferramenta adequada para determinada operação. As informações relevantes na ferramenta são:

- a) geometria (principais ângulos e raio do inserto);
- b) profundidade de corte máximo (ap);
- c) avanço;
- d) no caso de ferramentas rotativas o parâmetro f_z (avanço por dente) e número de dentes;
- e) código comercial;
- f) máquina onde a ferramenta pode ser utilizada.

A tabela se relaciona com aquela de máquinas para que uma determinada ferramenta não seja selecionada para uma máquina onde não possa ser utilizada. A Figura 4.7 ilustra a interface do módulo para o cadastro de ferramentas.

Código	Nome	Âng. posição	Âng. saída	Diâmetro	Avanço	Ap máximo	Raio inserto	Número dentes	Furadeira	Fresadora	Torno	go come
2	Sandvik 1	90			0,15	2	0,80	0	NAO	NAO	SIM	CNMG 1
3	Sandvik 2	80			0,15	3	0,80	0	NAO	NAO	SIM	CNMG 1
4	Sandvik 3	75			0,2	1,5	1,20	0	NAO	NAO	SIM	SNMG 1
5	Sandvik 4	75			0,55	9	0,80	0	NAO	NAO	SIM	SNMM

Figura 4.7 – Interface do cadastro de ferramentas no banco de dados.

As operações são relacionadas com as possíveis ferramentas para executar os processos. Uma determinada operação pode ser realizada por várias ferramentas. Para obter este relacionamento há a tabela *Operferramenta*. Algumas operações são comuns em mais de uma máquina, então há o relacionamento entre uma determinada operação e a máquina na qual ela pode ser realizada. A Figura 4.8 mostra a interface do sistema para o cadastro de operações.

Código	Nome	Furadeira	Fresadora	Torno
1	Furar	SIM	SIM	SIM
2	Cilindrar desbaste	NAO	NAO	SIM
3	Cilindrar acabamento	NAO	NAO	SIM
4	Sangramento radial	NAO	NAO	SIM

Figura 4.8 – Interface para o cadastro de operações.

Para que se planejem as etapas do processo de fabricação é fundamental que se considere o material do produto, no banco de dados do sistema isto é feito na tabela de materiais associados ao cálculo dos parâmetros de usinagem, conforme Figura 4.9.

Código	Nome	Veloc. de corte	Dureza	Pressão específica	1 - z	Tensão de ruptura
1	Aço 1020	100	125	2100	0,74	
2	Aço 1030/1035	90	150	1990	0,74	
3	Aço 1040/1045	80	150	2110	0,83	
4	Aço 1045	110	150	2220	0,86	

Figura 4.9 – Interface de cadastro de materiais.

O projeto do banco de dados completa-se com tabelas de apoio que são necessárias para permitir o relacionamento entre tabelas do banco de dados (tabelas *OperFerramenta* e *Tipo*) e tabelas de configuração de variáveis utilizadas na interface principal do sistema (tabela *Configuração*).

4.6 Módulo Aplicativo – Interface do Sistema

A interface do sistema permite ao usuário de interagir com o banco de dados, sendo possível as ações de inserir, alterar e excluir dados do banco. Outra função da interface é “executar” o módulo de processamento do arquivo *STEP*. A interface principal do sistema é responsável pela integração de todas as informações, como permitir a execução do algoritmo de processamento do arquivo *STEP*, o acesso ao banco de dados e gerar o plano de processo. A primeira etapa do planejamento do processo corresponde ao fluxograma da Figura 4.10.

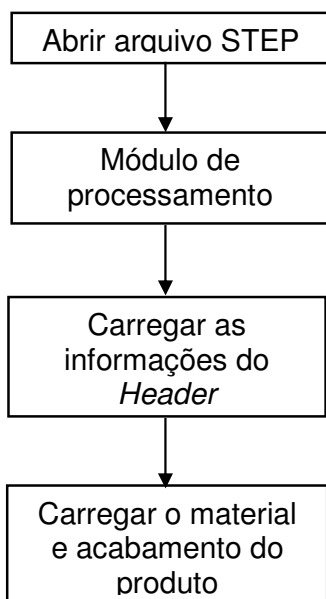


Figura 4.10 – Fluxograma do carregamento do arquivo *STEP*.

Ao abrir o arquivo gráfico do projeto do produto é executado a rotina de processamento *STEP* para verificar a existência de geometrias. Ao término da rotina é preenchida a tela de informações do cabeçalho do arquivo *STEP* na Figura 4.11.

A caixa de diálogo, intitulada 'Novo Planejamento de Processo', contém um campo de texto para o caminho do arquivo ('D:\Sistema\Exemplos\Pr001.stp') e um botão 'Abrir'. Abaixo, há uma aba 'Detalhes' com sub-abas 'Produto', 'Matéria Prima' e 'Plano de Processo'. O formulário possui os seguintes campos:

Descrição	Nível	Data/Hora do Processamento	Abrir
	2:1	9/2/2008 15:53	
Organização	Nome do Arquivo		
	0003-EXTRUDE		
Hora	Sistema de origem		
2007-11-11T	PRO/ENGINEER BY PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION, 2004110		
Autor	Autorização		
Rolf Rieck			
Esquema	Versão do pós-processador		
CONFIG_CONTROL_DESIGN	PRO/ENGINEER BY PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATIO		

Figura 4.11 – Caixa de diálogo para preenchimento do *header* do arquivo *STEP*.

Na Figura 4.12 é ilustrado a interface onde o resultado da rotina de processamento é carregado na interface do sistema para a peça exemplo.

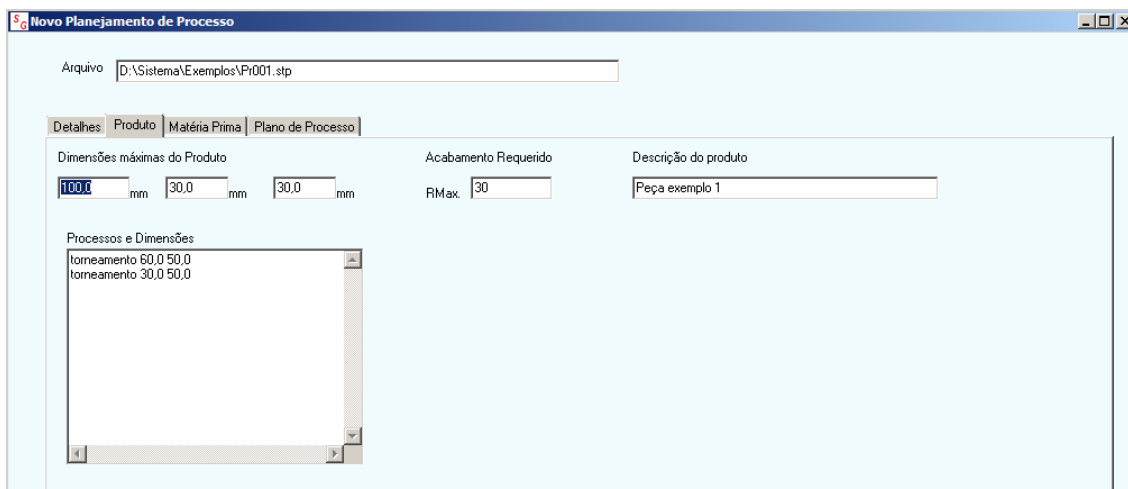


Figura 4.12 – Resultado do processamento do arquivo *STEP* para a peça exemplo.

A rotina retorna as dimensões máximas do produto para a peça exemplo, no caso de 100mm de comprimento e o valor 30mm é referente ao raio máximo do produto. As geometrias resultantes são dois cilindros de $\text{Ø}60 \times 50\text{mm}$ e $\text{Ø}30 \times 50\text{mm}$. A rugosidade máxima e descrição do produto é de acordo com a tabela “*TipoProduto*” do banco de dados.

A próxima etapa do planejamento é a especificação da forma e dimensões da matéria-prima, esta fase é definida pelo processista de maneira interativa. A Figura 4.13 mostra o fluxograma desta fase.

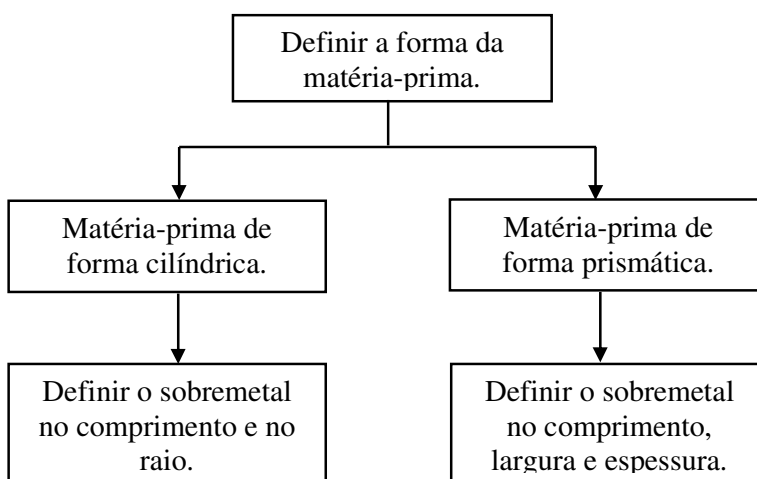


Figura 4.13 – Fluxograma para definir a matéria-prima.

O sistema permite definir duas formas de matéria-prima: cilindro ou bloco prismático. As dimensões da matéria-prima são definidas não com dimensões absolutas, mas o sobremetal necessário ao respectivo produto. Para uma matéria-prima do tipo cilindro é definido o sobremetal no início e no fim, isto é, no comprimento do cilindro, bem como o sobremetal no raio. Na interface ilustrada na Figura 4.14, está definido 1mm de sobremetal em cada direção, logo a matéria-prima possui as dimensões de 62mm de diâmetro por 102mm de comprimento, para a peça exemplo do sistema. Se a forma da matéria-prima for um bloco prismático, o processista informa o sobremetal em três direções (X, Y e Z) e em cada direção dois sentidos (InícioX e FimX, para a direção X).

Figura 4.14 – Interface para definir a forma e dimensões da matéria-prima.

4.6.1 Operações de Usinagem – Torneamento.

A próxima fase do planejamento é definir a seqüência operacional e os cálculos dos parâmetros de usinagem. Parte do planejamento das operações é realizada de acordo com a rotina de processamento do arquivo *STEP*. As demais operações são definidas pelo processista. Na peça exemplo tem-se dois cilindros, um furo e um rasgo de chave. A Figura 4.15 ilustra o fluxograma das ações para verificar a necessidade de uma operação de faceamento.

Caso a matéria-prima seja maior que o produto, as dimensões do produto são extraídas pela rotina de processamento do arquivo *STEP*, é solicitado ao processista à inserção de uma operação de faceamento. A ferramenta para esta operação é escolhida dentre as ferramentas cadastradas no banco de dados para a operação, conforme Figura 4.16. Caso não exista uma

ferramenta para a operação o processista tem a possibilidade de cadastrar uma antes de prosseguir com o planejamento. O diâmetro de referência é determinado pelo processista. Após a inserção do diâmetro é calculado a rotação em rotações por minuto da operação, de acordo com a equação 2 do anexo 1.

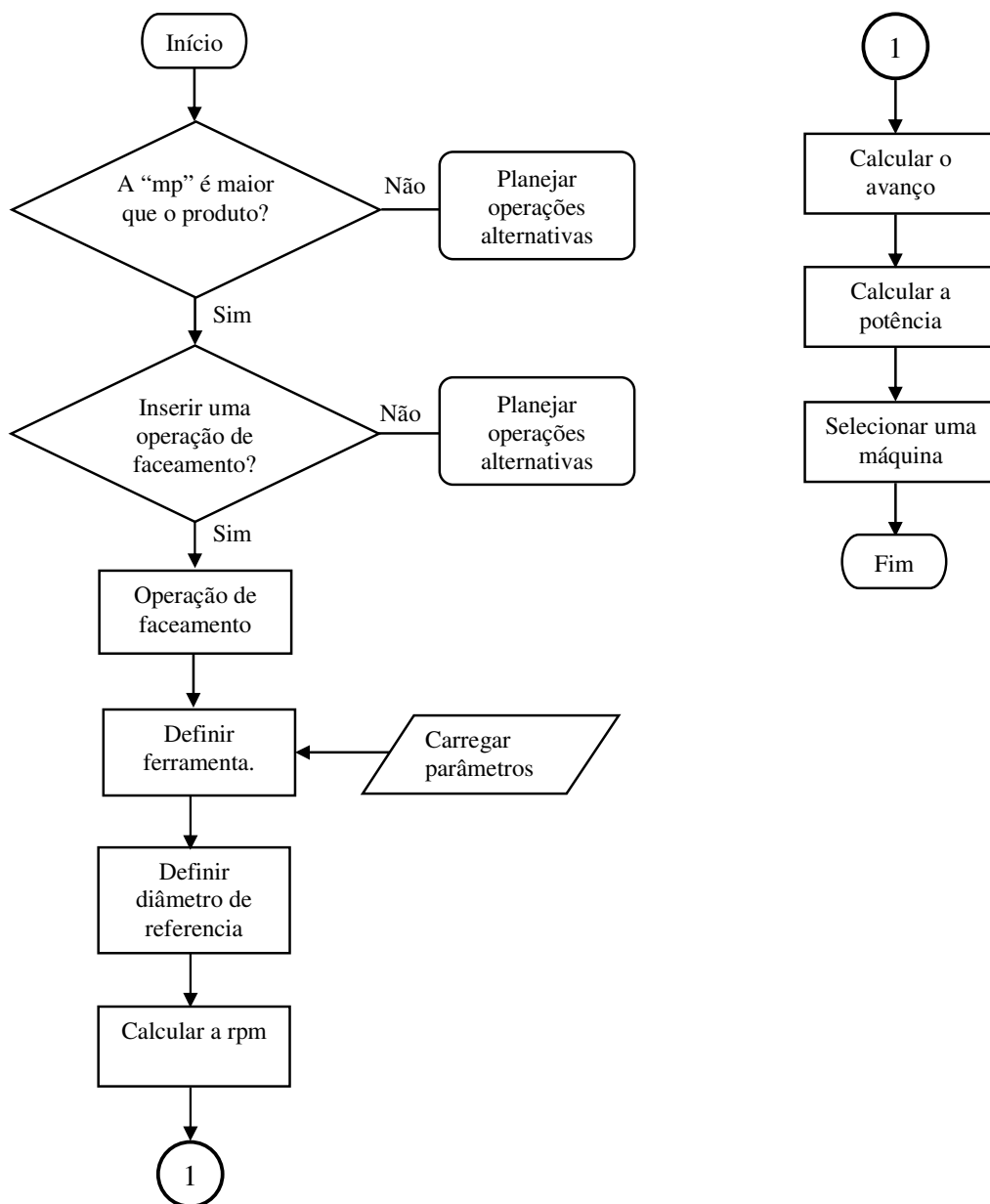


Figura 4.15 – Fluxograma para determinar uma operação de faceamento.

O valor do avanço é carregado do banco de dados, mas nas operações de torneamento este avanço pode ser calculado de acordo com a rugosidade máxima do produto e o

raio de ponta da ferramenta. A equação para o cálculo do avanço implementada de acordo com a equação 3 do anexo 1.

Na Figura 4.16 ilustra-se a interface para que o processista escolha uma ferramenta de acordo com a operação selecionada. As ferramentas são filtradas do banco de dados de acordo com a operação planejada. Caso não haja ferramenta para a operação a interface permite a inserção de uma nova ferramenta.

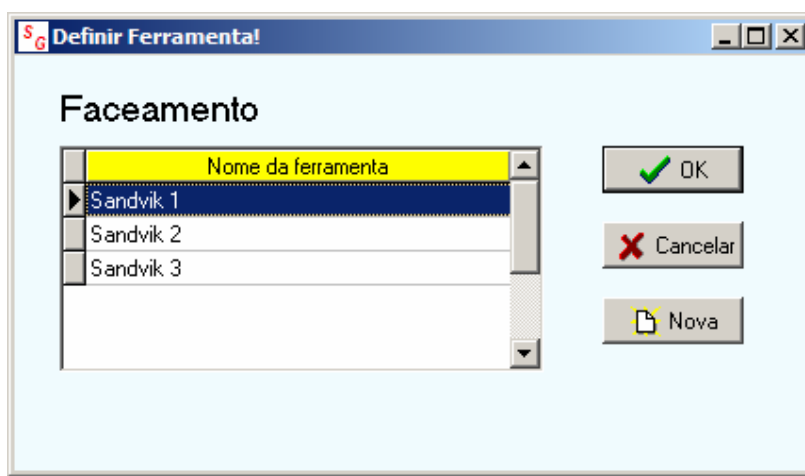


Figura 4.16 – Interface para inserir uma ferramenta no planejamento.

A profundidade de corte é carregada do banco de dados de acordo com a ferramenta selecionada para a operação, mas o processista pode alterá-la. A força de corte da usinagem é calculada de acordo com a equação de Kienzle, equação 9 do anexo 1.

A largura (b) e espessura (h) de corte são determinadas respectivamente pelas equações 5 e 6 do anexo 1.

A potência da usinagem, necessária para selecionar a máquina é determinada através do somatório das potências de corte e de avanço, e considerando-se que a potência de avanço é muito menor que a potência de corte, desta forma, neste trabalho a potência de avanço é desprezada. A potência da usinagem é considerada somente a potência de corte, e esta é calculada de acordo com a equação 10 do anexo 1.

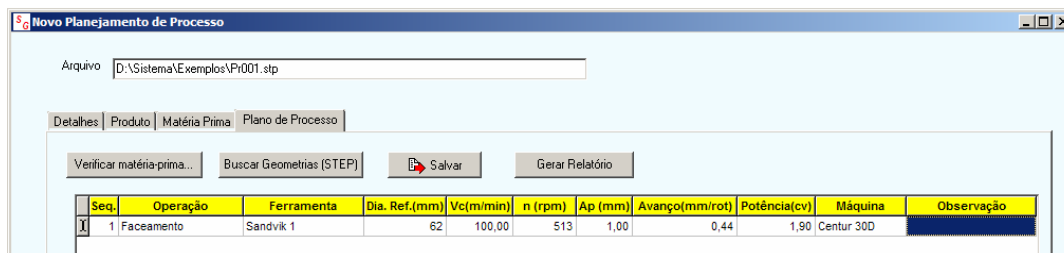


Figura 4.17 – Interface para planejar a seqüência das operações.

A Figura 4.17 ilustra a operação de faceamento inserida no planejamento. O próximo passo é buscar o resultado de rotina de processamento do arquivo STEP. O botão “Buscar Geometrias (STEP)” verifica o resultado da rotina. A Figura 4.18 mostra o fluxograma desta etapa.

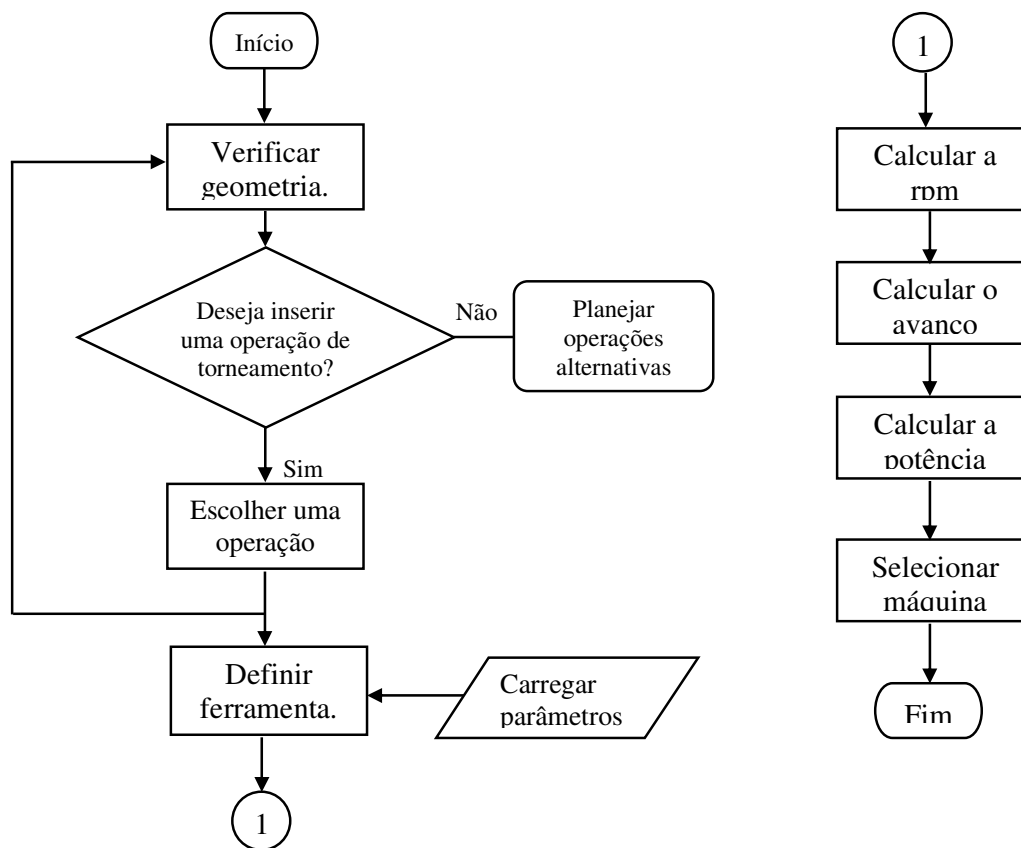


Figura 4.18 – Fluxograma para planejar as operações das geometrias detectadas no arquivo *STEP*.

Ao verificar as informações de saída do algoritmo de processamento do *STEP* o sistema informa ao processista, no caso, a existência de uma geometria cilíndrica e seu diâmetro,

como mostra a Figura 4.19. O usuário ao aceitar inserir uma operação, o sistema de planejamento de processos acessa o banco de dados de operações para que seja selecionada uma determinada operação.

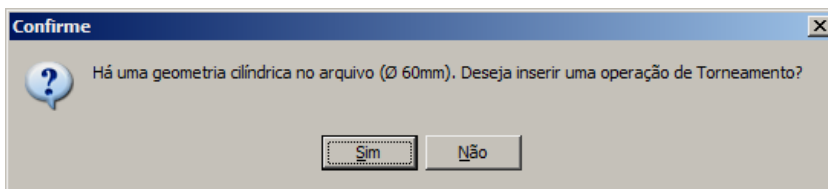


Figura 4.19 – Interface mostrando que existe uma geometria no arquivo *STEP*.

Aceitando-se inserir uma operação de torneamento, como mostra a figura 4.19, o sistema acessa o banco de dados para selecionar uma operação para esta geometria. A Figura 4.20 ilustra a interface para a seleção de uma operação para a manufatura do produto.

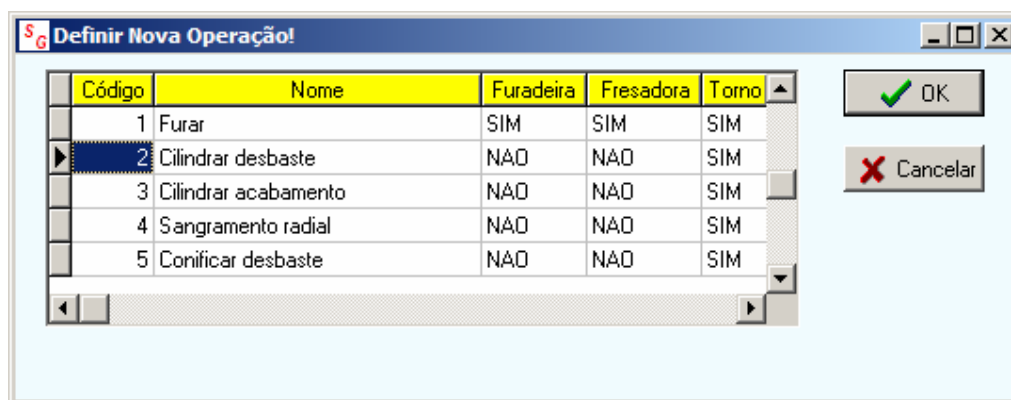


Figura 4.20 – Interface para a seleção de uma operação.

Ao término da rotina de busca de geometrias o processista interage com os outros parâmetros. O diâmetro de referência é carregado automaticamente. A frequência, o avanço e potência da usinagem são calculados da mesma forma que a etapa anterior. A Figura 4.21 ilustra as duas operações inseridas e os parâmetros de usinagem para a peça exemplo.

Seq.	Operação	Ferramenta	Dia. Ref.(mm)	Vc(m/min)	n (rpm)	Ap (mm)	Avanço(mm/rot)	Potência(cv)	Máquina	Observação
1	Faceamento	Sandvik 1	62	100,00	513	1,00	0,44	1,90	Centur 30D	
2	Cilindrar desbaste	Sandvik 2	60	100,00	531	2,00	0,44	3,82	Centur 30D	
3	Cilindrar desbaste	Sandvik 2	30	100,00	1.061	2,00	0,44	3,82	Centur 30D	

Figura 4.21 – Interface do planejamento com as operações das duas geometrias do arquivo *STEP*.

4.6.2 Operação de Usinagem – Furação.

Tomando-se a peça exemplo para ilustrar a operação de furação, constata-se que esta possui um furo de diâmetro $\varnothing 12$ por 25mm de profundidade. Para este tipo de operação o sistema de planejamento desenvolvido neste trabalho funciona como um sistema CAPP generativo interativo. O usuário deve inserir a operação e a ferramenta através do banco de dados. Os parâmetros de usinagem são automaticamente carregados, mas o usuário pode alterá-los. Os cálculos dos parâmetros necessários para a seleção do equipamento são realizados por rotinas internas do programa. As funções de cálculo são para furação em cheio. A Figura 4.22 mostra o fluxograma para planejar a operação de furação.

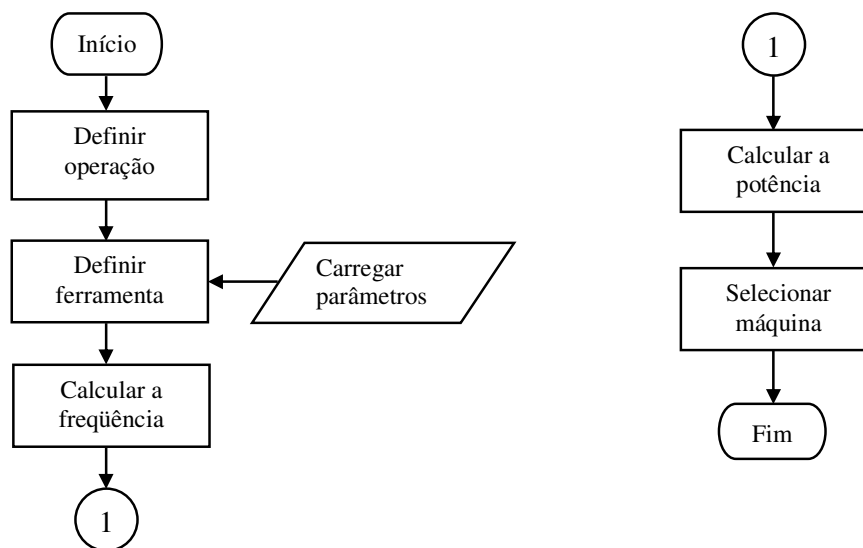


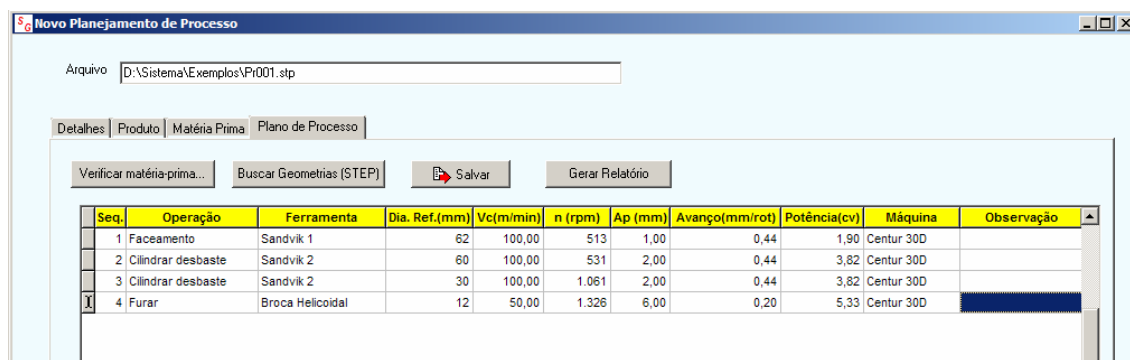
Figura 4.22 – Fluxograma pra planejar uma operação de furação.

Ao selecionar uma ferramenta para a operação de furação os parâmetros como diâmetro de referência, profundidade de usinagem (a_p), velocidade de corte, avanço são inseridos com os valores do banco de dados, mas mantendo a filosofia do sistema, o processista pode alterá-los.

Para estimarem-se os esforços na furação calcula-se o momento torçor, devido a rotação da broca e a força de avanço, e ao esforço de compressão que a broca está submetida. O cálculo da frequência da usinagem é definido de acordo com a equação 2 no anexo 1, apenas trocando o diâmetro da peça na variável “D”, pelo diâmetro da broca. A potência necessária para realizar a operação segue uma rotina própria de cálculo, pois se trata de uma operação com características diferentes das anteriores. Para a força de corte na furação utiliza-se a equação de Kienzle alterada para o processo de furação em cheio. Como na furação $a_p = D/2$, a força de corte é determinada de acordo com a equação 20 do anexo 1.

O momento torçor é calculado segundo a equação 21 do anexo 1 e a potência de corte na furação de acordo com a equação 22. A equação 23 do anexo 1 determina a força de avanço. Tendo-se a força de avanço calculada, determina-se a potência de avanço de acordo com a equação 24 e a potência total da furação com a equação 25 do anexo 1.

A Figura 4.23 ilustra a interface com os resultados do planejamento da operação de furação em cheio para a peça exemplo.



The screenshot shows a software window titled 'Novo Planejamento de Processo'. At the top, there is a file path 'Arquivo: D:\Sistema\Exemplos\Pr001.stp'. Below this are tabs for 'Detalhes', 'Produto', 'Matéria Prima', and 'Plano de Processo'. There are buttons for 'Verificar matéria-prima...', 'Buscar Geometrias (STEP)', 'Salvar', and 'Gerar Relatório'. The main area contains a table with the following data:

Seq.	Operação	Ferramenta	Dia. Ref.(mm)	Vc(m/min)	n (rpm)	Ap (mm)	Avanço(mm/rot)	Potência(cv)	Máquina	Observação
1	Faceamento	Sandvik 1	62	100,00	513	1,00	0,44	1,90	Centur 30D	
2	Cilindrar desbaste	Sandvik 2	60	100,00	531	2,00	0,44	3,82	Centur 30D	
3	Cilindrar desbaste	Sandvik 2	30	100,00	1.061	2,00	0,44	3,82	Centur 30D	
4	Furar	Broca Helicoidal	12	50,00	1.326	6,00	0,20	5,33	Centur 30D	

Figura 4.23 – Interface da operação de furação.

4.6.3 Operação de Usinagem – Fresamento.

No estágio de desenvolvimento deste trabalho operação de fresamento está limitada a fresamento de rasgos de chavetas realizadas por fresas frontais ou de topo. Desta forma, esta usinagem caracteriza-se por ser um fresamento frontal em cheio. O planejamento da operação de fresamento de rasgo de chaveta é realizado na forma de um sistema generativo interativo, como na operação de furação onde o processista seleciona a operação no banco de dados e após a ferramenta apropriada à operação também do banco de dados. As propriedades da ferramenta e do material são armazenadas internamente. A Figura 4.24 mostra a seqüência de planejamento desta operação.

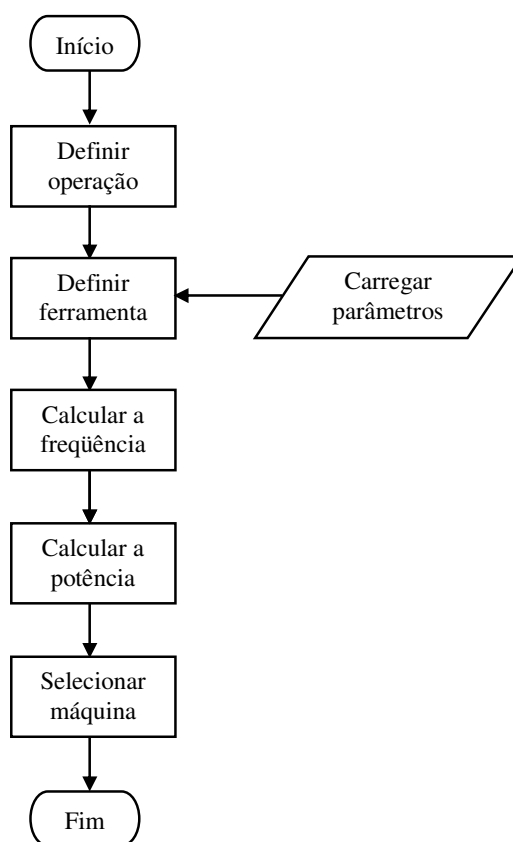


Figura 4.24 – Fluxograma para planejar as etapas da operação de fresamento.

No fresamento utiliza-se a velocidade de avanço “ V_f ” determinada pela equação 12 do anexo 1. Considerando-se que a espessura do cavaco não é constante, a pressão específica de corte também é variável. A equação 14 do anexo 1 determina a pressão específica média é

determinada a partir da equação 13 que calcula a espessura média do cavaco. A Figura 4.25 ilustra o planejamento das operações para a peça exemplo.

Seq.	Operação	Ferramenta	Dia. Ref.(mm)	Vc(m/min)	n (rpm)	Ap (mm)	Avanço(mm/rot)	Potência(cv)	Máquina	Observação
1	Faceamento	Sandvik 1	62	100,00	513	1,00	0,44	1,90	Centur 30D	
2	Cilindrar desbaste	Sandvik 2	60	100,00	531	2,00	0,44	3,82	Centur 30D	
3	Cilindrar desbaste	Sandvik 2	30	100,00	1.061	2,00	0,44	3,82	Centur 30D	
4	Furar	Broca Helicoidal	12	50,00	1.326	6,00	0,20	5,33	Centur 30D	
5	Virar Peça									
6	Faceamento	Sandvik 1	62	100,00	513	1,00	0,44	1,90	Centur 30D	
7	Fresamento frontal	Fresa topo	16	100,00	1.989	2,00	0,20	1,31	Discovery	

Figura 4.25 – Interface com a operação de fresamento inserida no planejamento.

4.7 Plano de Processo

No final do planejamento de um produto o sistema CAPP disponibiliza um documento com as informações necessárias para a manufatura da peça. No sistema desenvolvido neste trabalho ao final do planejamento da seqüência operacional o processista gera um relatório com as operações e dados relativos a mesma como: ferramenta, parâmetros de usinagem e máquina para execução de cada processo, conforme ilustrado na Figura 4.26.

O processista pode gravar este relatório em formatos que possibilitam a visualização do plano de processo em outros computadores sem a necessidade de ter o sistema instalado. As opções para armazenar o relatório são nos formatos PDF, HTML, TXT e como formato de uma planilha. O plano de processo no formato HTML permite que o plano esteja disponível em uma rede Intranet. Os dados constantes no plano de processo (Figura 4.25) podem ser armazenados no formato XML, para que o processista possa abrir o plano de processo e promover alterações que porventura venha a necessitar.

PLANO DE PROCESSO

Gpfai	Nome da Peça: PR001	Ordem de Processo: 119
	Dimensões: 62mm x 102mm	Processista: Joao
	Material: Aço 1020	Data: 9/3/2008

Seq.	Operação	Ferramenta	Dia. ref.(mm)	Vc(m/min)	n(rpm)	ap(mm)	Avanço(mm/rot)	Potência(cv)	Máquina	Observação
1	Faceamento	Sandvik 1	62	100,00	513	1,00	0,44	1,90	Centur 30D	
2	Cilindrar desba	Sandvik 2	60	100,00	531	2,00	0,44	3,82	Centur 30D	
3	Cilindrar desba	Sandvik 2	30	100,00	1.061	2,00	0,44	3,82	Centur 30D	
4	Furar	Broca Helicoidal	12	50,00	1.326	6,00	0,20	5,33	Centur 30D	
5	Virar Peça									
6	Faceamento	Sandvik 1	62	100,00	513	1,00	0,44	1,90	Centur 30D	
7	Fresamento fr	Fresa topo	16	100,00	1.989	2,00	0,20	1,31	Discovery	

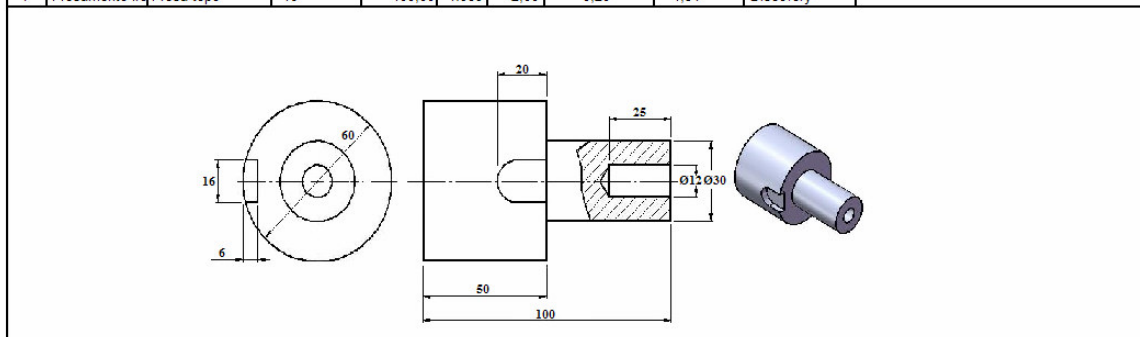


Figura 4.26 – Plano de processo para a peça exemplo.

O processista pode inserir o desenho do componente no plano de processo para ilustrar com melhor qualidade as informações contidas no relatório, conforme ilustra a Figura 4.26.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

5.1 Conclusões

O programa desenvolvido como um sistema CAPP híbrido, ou semi-generativo é composto por duas partes. A primeira é um sistema generativo automático, onde o sistema a partir de um arquivo CAD no formato *STEP* é interpretado por um algoritmo e extraído deste arquivo suas geometrias. O módulo de processamento *STEP* interpreta cilindros, podendo ser ampliado para outras geometrias, ou *features* manufaturáveis. O sistema é um CAPP generativo interativo para operações de torneamento, furação e fresamento de rasgos de chaveta.

O padrão *STEP* para troca de informações entre aplicações auxiliadas por computador se mostrou eficaz, apesar deste trabalho ter utilizado o protocolo de aplicação com um número de informações reduzidas, que é o protocolo AP203 da norma ISO, isto demonstra que o padrão é confiável e merece mais pesquisas e desenvolvimento de aplicações que intensificam a integração das fases de desenvolvimento de produtos.

O sistema proposto tem como objetivo auxiliar o profissional de planejamento de processos de maneira interativa e eximindo-o do trabalho penoso e repetitivo, desta forma liberar mais tempo para atividades que agregam valor ao produto. Apesar das limitações do sistema desenvolvido, até o estágio atual, acredita-se que os objetivos foram alcançados e que o campo de desenvolvimento ainda possa ser ampliado. Espera-se que com a utilização das ferramentas implementadas haja uma contribuição na redução do tempo de planejamento, um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e padronização dos documentos.

O sistema de planejamento de processos auxiliado por computador deve ser uma ferramenta que auxilie o processista e jamais o substitua. Deve maximizar o desempenho das ações dos profissionais, reduzindo custos em atividades rotineiras e repetitivas. Este sistema gera um documento de planejamento, mas permite ao processista a possibilidade de alterá-lo conforme as necessidades operacionais ou econômicas da empresa.

5.2 Recomendações

No intuito de melhorar e ampliar este sistema de planejamento percebe-se que há pontos que podem ser melhorados, tais como:

- a) ampliar a rotina de reconhecimento do arquivo *STEP* para outras geometrias manufaturáveis, como furos, rasgos, canais, etc.;
- b) utilizar outros protocolos de aplicação da norma ISO, como por exemplo, os protocolos AP224 e AP240;
- c) ampliar a parte generativa interativa do sistema para outros processos de usinagem;
- d) acrescentar no sistema um módulo que calcule o tempo de fabricação para o produto e para um lote de peças, de tal maneira que seja possível estimar os custos de fabricação;
- e) integrar o sistema de planejamento com sistemas de manufatura CAM.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, Willian P., 2002. **Programação Gráfica com Delphi 6**. São Paulo: Érica.
- ARAÚJO, Everton C. de. HOFFMANN, Alessandra B. G., 2006. **Delphi: implementação de algoritmos e técnicas para ambientes visuais**. Florianópolis: Visual Books.
- ANDERL, R., 1993. Externe CAD-Schnittstellen. In: *CAD- schnittstellen: Methoden und Wrkzeuge zur CA-integration*. Germany: HANSER.
- BAPTISTA, E. A., 2000. **Desenvolvimento de um Sistema Especialista para Otimização do Processo de Usinagem (Dissertação de Mestrado)**. Santa Bárbara do Oeste: Ed. UNIMEP.
- BEDWORTH, David D. HENDERSON, M. R. PHILIP, M. W., 1991. **Computer-Integrated Design and Manufacturing**. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- CANTU, Carlos H., 2005. **Firebird Essencial**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda.
- CHANG, T. C. Wysk A.R., 1985. **An Introduction to Automated Process Planning Systems**. New Jersey: Prentice Hall.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., 2006. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**. 5º Ed. São Paulo: Editora Artliber.
- FERRARESI, Dino. 1977. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. V. 1, São Paulo: Edgard Blucher.
- FURGERI, Sérgio. **Java 2: Ensino didático: Desenvolvendo e Implementando Aplicações**. São Paulo: Érica, 2002.
- GARCIA, Carlos A., 2005. **Universidade Delphi**. São Paulo: Digerati Books.
- GROOVER, Mikell P., ZIMMERS Jr., E. W., 1984. **CAD/CAM Computer Aided Design and Manufacturing**. New Jersey : Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- HALEVI, G. WEILL, R.D., 1995. **Principles of Process Planning: A logical approach**. Chapman & Hall.
- HAN, Jung-Hyun. HAN, Inho., 1999. **Manufacturable Feature Recognition and its Integration with Process Planning**. School of Electrical and Computer Engineering. Sung Kyun Kwan University.
- HELLENO, André Luis., 2005. **A importância do Recurso de Associatividade entre os sistemas CAD/CAM na geração do programa NC**. Universidade Medotista de Piracicaba.

HENRIQUES, Joselito R., 2004. **Contribuição para a otimização da troca de dados geométricos entre sistemas CAD utilizando processadores STEP AP214**. Dissertação de mestrado. Universidade Metodista de Piracicaba.

HOLLAND, M., 1998. Product data technology and STEP: comprehensive standards are prerequisites for the effective development of products and effective business process. In: *STEP tutorial*. [Darmstadt]: ProSTEP GmbH. p. 1-34.

ISO 10303. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/ISO_10303.html>. Acesso em: 20 de março de 2007.

International Industry STEP Centers (ISC). **Background**. Disponível em: <<http://isc.atcorp.org/background.html>> Acesso em: 15 maio 2007.

KEMMERER, S., 1999. *STEP: the grand experience*. Gaithersburg: NIST.

MANZANO, José A. N. G. MENDES, Sandro S. V., 2005. **Estudo dirigido de Delphi 2005**. São Paulo: Érica.

MELO, Sávio P., 2003. **Desenvolvimento e aplicação de um sistema de planejamento de processo auxiliado por computador em um ambiente de usinagem (dissertação de Mestrado)**. Porto Alegre: UFRGS.

NELL, Jim; *STEP on page*. Disponível em: <<http://www.mel.nist.gov/sc5/soap/>> Acesso em: 01 jun. 2007.

OWEN, J., 1997. *STEP and introduction*. 2nd ed. Winschester: Information Geometers.

REMBOLD, U.; NNAJI, B. O.; STORR, A., 1994. CAD: its role in manufacturing. In: *Computer integrated manufacturing and engineering*. Great Britain: Addison Wesley.

REZENDE, Dárcio de F., 1996. **Planejamento de Processos de Fabricação Assistido por Computador através de um sistema especialista baseado na tecnologia de features (dissertação de Mestrado)**. Florianópolis: UFSC.

ROZENFELD, H. **CAPP – Computer Aided Process Planning**. Disponível em: <http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/cappv2.html>. Acesso em 02 out. 2006.

STEMMER, Caspar E, 1995. **Ferramentas de Corte I e II**. 4º Edição. Florianópolis. Editora da UFSC.

UNGERER, Max; BUCHANAN, Ken, 2001. **User Guide for the STEP PDM Schema V1.2**. Release 4.2. ProSTEP GmbH.

ANEXOS

ANEXO I - TECNOLOGIA DA USINAGEM

INTRODUÇÃO

Dentre os processos de fabricação mais empregados na indústria metal-mecânica destaca-se os processos de usinagem com remoção de material. Há inúmeras soluções de máquinas e ferramentas disponíveis atualmente, o que garante flexibilidade a este processo. Razão pela qual este processo foi escolhido para este trabalho. A seguir é tratada uma breve revisão deste assunto.

Usinagem são operações que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavacos [Diniz, 2006].

As operações de usinagem mais utilizadas são: torneamento, fresamento, furação, aplainamento, alargamento, mandrilamento, brochamento, roscamento, retificação, eletroerosão, etc. Entre os processos citados os que se destacam em função do número de operações e do tempo total de usinagem são: torneamento, fresamento e furação [Melo, 2003].

TORNEAMENTO

É a operação de usinagem mais antiga e é realizada em uma máquina denominada torno mecânico. Este é considerado a principal máquina-ferramenta, pois as outras máquinas originaram-se deste equipamento. Na operação de torneamento a peça realiza um movimento de rotação (denominado movimento de corte), e a ferramenta movimenta-se longitudinalmente e transversalmente em relação a peça (denominado movimento de avanço). Deste modo pode-se executar qualquer tipo de superfície de revolução, como: eixos, polias, pinos, eixos roscados, etc.

A. PARÂMETROS DE CORTE

Os principais parâmetros de corte de uma operação de usinagem são: a velocidade de corte (V_c), o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p). Estes parâmetros têm uma grande influencia durante o processo de corte.

A velocidade de corte pode se calculada para as operações de torneamento, fresamento e furação, onde os movimentos são concomitantes, de acordo com a equação 1:

$$V_c = \frac{D \pi n}{1000} \quad (1)$$

onde:

V_c = velocidade de corte (m/min)

D = diâmetro da peça ou da ferramenta (mm)

n = rotação da peça ou da ferramenta (rpm)

Na preparação de uma máquina ferramenta para a usinagem deve-se ajustar a rotação da peça ou da ferramenta, logo devemos determinar este parâmetro, que de acordo com a equação 1 é:

$$n = \frac{V_c 1000}{\pi D} \quad (2)$$

onde:

n = frequência da usinagem (rpm)

O avanço é o percurso da ferramenta em cada revolução ou em cada curso da ferramenta. O avanço influencia o acabamento superficial da peça juntamente com o raio de ponta da ferramenta (r_ϵ). O avanço é calculado de acordo com a equação 3.

$$f = \sqrt{\frac{R_{\max} 8 r_\epsilon}{1000}} \quad (3)$$

onde:

f = avanço (mm/rot)

R_{\max} = rugosidade máxima (μm)

r_ϵ = raio do inserto (mm)

A profundidade de corte (a_p) é a profundidade de penetração da ferramenta em relação a peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. A profundidade de corte influencia diretamente na área da seção transversal do cavaco (A), determinada de acordo com a equação 4.

$$A = a_p f = b h \quad (4)$$

onde:

a_p = profundidade de corte (mm).

b = largura de corte (mm)

h = espessura de corte (mm)

A largura de corte do cavaco é determinada de acordo com a equação 5.

$$b = \frac{a_p}{\text{sen}\chi_r} \quad (5)$$

onde:

χ_r = ângulo de posição do gume principal da ferramenta ($^\circ$).

A espessura de corte do cavaco é calculada de acordo com a equação 6.

$$h = f \text{ sen}\chi_r \quad (6)$$

B. FORÇA E POTÊNCIA DE CORTE

Para a seleção adequada da máquina-ferramenta é necessário que se conheça a potência de corte necessária para realizar o corte, deste modo o conhecimento da força de corte (F_c) e de seu comportamento é fundamental. A força de corte é expressa pela equação 7.

$$F_c = K_s A \quad (7)$$

onde:

K_s = pressão específica de corte (N/mm^2)

A = área da seção de corte (mm^2)

A pressão específica de corte é uma propriedade muito pesquisada e possui diversas formulações proposta por diversos autores, onde se destacam: Taylor, ASME, AWF, Hucks e Kronennerg. Kienzle propõe uma fórmula simples e suficientemente precisa, com objetivo prático para o cálculo de K_s . Nesta equação a pressão específica é calculada em função da espessura de corte h . O aumento da pressão específica de corte com a diminuição de h é uma propriedade geral, que vale para todas as operações de usinagem. A equação para o cálculo de K_s proposta por Kienzle é dada pela equação 8.

$$K_s = \frac{K_{s1}}{h^z} = K_{s1} h^{-z} \quad (8)$$

Substituindo na equação 7 a equação 8, temos para a força de corte:

$$F_c = K_s h b = K_{s1} h^{1-z} b \quad (9)$$

Onde K_{s1} e $1-z$ são valores dos materiais ensaiados por Kienzle, nas condições de V_c entre 90 e 120m/min e h entre 0,1 e 0,4mm, para ferramenta de metal duro sem fluido de corte.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros $1-z$ e K_{s1} para diversos materiais

MATERIAL	σ_t (N/mm²)	1-z	K_{s1}(N/mm²)
Aço ABNT 1030	520	0,74	1990
1040	620	0,83	2110
1050	720	0,70	2260
1045	670	0,86	2220
1060	770	0,82	2130
8620	770	0,74	2100
4320	630	0,70	2260
4140	730	0,74	2500
4137	600	0,79	2240
6150	600	0,74	2220
Ferro fundido	HR _c = 46	0,81	2060

A potência de corte necessária para a usinagem é determinada de acordo com a equação 10.

$$P_c = \frac{F_c V_c}{60 \cdot 10^3} \quad (10)$$

onde:

F_c = força de corte (em N)

A potência de avanço (P_f) em uma situação extrema é em torno de 140 vezes menor que a potência de corte, deste modo permite-se desprezar a potência de avanço para determinar a potência da máquina-ferramenta. A potência fornecida pelo motor da máquina-ferramenta deve-se considerar o rendimento mecânico devido a perdas do sistema de transmissão. A potência do motor (P_m), desconsiderando a potência de avanço é:

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \quad (11)$$

onde:

η = rendimento da máquina operatriz

FRESAMENTO

É uma operação de usinagem de extrema versatilidade em termos de geometrias possíveis, devido a ferramenta empregada na operação ter arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de seu eixo, esta ferramenta denomina-se fresa. O movimento de corte é realizado pela ferramenta que gira em torno de seu eixo e o movimento de avanço é normalmente realizado pela peça que se desloca longitudinalmente ou transversalmente.

A. PARÂMETROS DE CORTE

Os parâmetros do processo de fresamento utilizados no desenvolvimento do sistema são: velocidade de avanço, velocidade de corte, profundidade de usinagem (a_p), penetração de trabalho (a_e).

A velocidade de avanço é determinada de acordo com a equação 12.

$$V_f = f_z z n \quad (12)$$

onde:

f_z = avanço por dente da fresa (mm/dente)

z = número de dentes da fresa

A velocidade de corte no fresamento é calculada de acordo com a equação 1, e a rotação da fresa de acordo com a equação 2, substituindo na variável D o diâmetro da fresa.

B. POTÊNCIA DE CORTE

Segundo Diniz [2006], a potência de corte no fresamento varia em função do número de dentes no corte e da espessura média do cavaco (h_m), pois no fresamento a espessura h do cavaco não é constante. Na maioria das situações a potência é calculada através da potência média, principalmente quando o número de dentes simultaneamente no corte é alto e quando a máquina ferramenta se utiliza de um volante (disco fixado junto ao eixo-árvore que armazena energia, para utilizar nos momentos em que a usinagem requer mais ou menos potência). Deste modo, no fresamento tangencial como no fresamento frontal, a potência média é calculada através do uso de um valor médio de K_s , denominado K_{sm} , calculado utilizando-se um valor médio de espessura do cavaco, assim tem-se:

$$h_m = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} f_z \cdot \text{sen } \varphi \chi_r (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (13)$$

onde:

φ_1 = ângulo entre o ponto de entrada (ou saída no fresamento concordante) do dente e a vertical

φ_2 = ângulo entre o ponto de saída (ou entrada no fresamento concordante) do dente e a vertical

Com o valor de h_m calculado podem-se retirar da Tabela 2 o valor de K_{s1} e determinar a pressão específica média de acordo com a equação 14.

$$K_{sm} = K_{s1} \cdot h_m^{-1} \quad (14)$$

Após determina-se a potência de corte através da equação 15.

$$P_c = \frac{a_p a_e V_f k_{sm}}{60 \cdot 1000} \quad (15)$$

onde:

K_{sm} = pressão específica de corte média (N/mm²)

Tabela 2 – Valores de K_{s1} e $-z$ para o fresamento

Material da peça	K_{s1} (N/mm ²)	$-z$	Dureza Brinell
Aços ao carbono			
C = 0,10 a 0,25%	1500	0,25	125
C = 0,25 a 0,55%	1600	0,25	150
C = 0,55 a 0,80%	1700	0,25	170
Aços baixa liga	1700	0,25	175
Aços alta liga	1950	0,25	200
Aços inoxidáveis			
Austeníticos	2000	0,21	200
Ferríticos/Martensíticos	1800	0,21	200
Ferros fundidos cinzentos			
Alta resistência a tração	1100	0,28	245
Baixa resistência a tração	900	0,28	180

Para o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta utiliza-se a mesma equação do torneamento (equação 11).

FURAÇÃO

É o processo de usinagem que tem por objetivo gerar furos, na maioria das vezes cilíndricos, em uma peça, através do movimento relativo entre a peça e a ferramenta, denominada broca. A continuidade da retirada do material é garantida pelo movimento de avanço entre a peça e a ferramenta, que ocorre segundo uma trajetória coincidente ou paralela ao eixo longitudinal da ferramenta [Ferraresi, 1977].

A. PARÂMETROS DE CORTE

Segundo Melo [2003], na prática, utilizam-se as mesmas equações utilizadas no fresamento, substituindo apenas o número de dentes (z), pela quantidade de arestas de corte da broca, normalmente duas, e o diâmetro da fresa pelo diâmetro da broca. Na determinação dos esforços de corte, a furação apresenta formulário próprio, devido às características de o processo ser completamente diferentes do fresamento. Parâmetros de corte do processo de furação são: velocidade de corte (V_c); avanço (f) e a profundidade de corte a_p . O avanço é calculado de acordo com a equação 16.

$$f = a_f z \quad (16)$$

onde:

a_f = avanço por aresta de corte (mm/aresta)

z = número de arestas de corte

B. FORÇAS E POTÊNCIA DE CORTE

Durante o processo de furação uma broca helicoidal é normalmente submetida a dois esforços, um de torção devido à rotação da ferramenta e outro de compressão ocasionado pelo avanço da broca. De acordo com vários autores [Diniz, 2006; Stemmer, 1995], verificam-se as seguintes resistências à penetração da broca, devido respectivamente ao: corte do material nas duas arestas principais de corte, corte e esmagamento do material pelo gume transversal e atrito das guias com a parede do furo e entre a superfície de saída da broca e do cavaco.

Entre as formulações de forças, momentos e potências de corte Kienzle oferecem resultados mais precisos, segundo Stemmer [1995], pois leva em consideração a variação de K_c com a espessura do cavaco (h). A força de corte é calculada de acordo com a equação 17.

$$F_c = K_{c1,1} b h^{1-mc} \quad (17)$$

onde:

$K_{c1,1}$ = pressão específica de corte para um cavaco com $b = 1\text{mm}$ e $h = 1\text{mm}$ (N/mm^2)

A largura e a espessura do cavaco são calculadas respectivamente:

$$b = \frac{D}{2 \cdot \text{sen } \sigma / 2} \quad (18)$$

$$h = \frac{f}{2} \cdot \text{sen } \sigma / 2 \quad (19)$$

Substituindo a equação 18 e 19 na equação 17, tem-se a força de corte por gume na furação em cheio.

$$F_c = K_{c1.1} \frac{D}{2 \cdot \text{sen } \sigma / 2} \left(\frac{f}{2} \sigma / 2 \right)^{1-mc} \quad (20)$$

Os valores de $K_{c1.1}$ e mc podem ser encontrados em tabelas na bibliografia. O momento torçor total é determinado de acordo com a equação 21.

$$M_t = F_c \frac{D}{2000} \quad (21)$$

A potência de corte em função do momento torçor é determinada de acordo com a equação 22.

$$P_c = \frac{M_t \cdot n}{9,549} [\text{w}] \quad (22)$$

Para a força de avanço H. Daar desenvolveu a equação 23.

$$F_f = C_2 \cdot D^{x2} \cdot f^{y2} [\text{gf}] \quad (23)$$

onde:

C_2 , x_2 e y_2 = constantes empíricas do material da peça de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes C_2 , x_2 e y_2 da equação de H. Daar para a obtenção da força de avanço na furação em cheio.

Aço	C_2	x_2	y_2
1085	161 ± 8	1,02	0,79
1020	$32,5 \pm 0,4$	1,32	0,65
1065	$49,6 \pm 0,8$	1,07	0,54
1055	$22,0 \pm 0,5$	1,32	0,54
1025	$33,4 \pm 0,8$	1,21	0,60
52100	$41,9 \pm 0,8$	1,41	0,66
VM20	$27,3 \pm 0,6$	1,3	0,59
VND	$55,1 \pm 1,4$	1,29	0,72
VS60	$42,7 \pm 1,0$	1,35	0,70

A partir da força de avanço determina-se a potência de avanço de acordo com a equação 24.

$$P_f = \frac{F_f f n}{60 \cdot 1000} \quad (24)$$

A potência total da operação de furação é a soma das equações (22) e (24), então:

$$P_{total} = P_c + P_f \quad (25)$$

A potência do motor é determinada da mesma forma que os outros processos, isto é, é a razão entre a potência necessária para a usinagem, no caso da furação é a potência total, e o rendimento (η) mecânico da máquina-ferramenta.

ANEXO II – ARQUIVO *STEP* DA PEÇA EXEMPLO

```

ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION("",'2;1');
FILE_NAME('0003-EXTRUDE', '2007-11-11T', ('Rolf Rieck'), (''),
'PRO/ENGINEER BY PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION, 2004110',
'PRO/ENGINEER BY PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION, 2004110', '');
FILE_SCHEMA(('CONFIG_CONTROL_DESIGN'));
ENDSEC;
DATA;
#1=CARTESIAN_POINT(",(5.E1,0.E0,0.E0));
#2=DIRECTION(",(1.E0,0.E0,0.E0));
#3=DIRECTION(",(0.E0,0.E0,-1.E0));
#4=AXIS2_PLACEMENT_3D("#1,#2,#3);
#6=CARTESIAN_POINT(",(5.E1,0.E0,0.E0));
#7=DIRECTION(",(1.E0,0.E0,0.E0));
#8=DIRECTION(",(0.E0,0.E0,1.E0));
#9=AXIS2_PLACEMENT_3D("#6,#7,#8);
#11=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,0.E0,0.E0));
#12=DIRECTION(",(1.E0,0.E0,0.E0));
#13=DIRECTION(",(0.E0,0.E0,-1.E0));
#14=AXIS2_PLACEMENT_3D("#11,#12,#13);
#16=DIRECTION(",(1.E0,0.E0,0.E0));
#17=VECTOR("#16,5.E1);
#18=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,0.E0,-1.5E1));
#19=LINE("#18,#17);
#20=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,0.E0,0.E0));
#21=DIRECTION(",(-1.E0,0.E0,0.E0));
#22=DIRECTION(",(0.E0,-1.E0,0.E0));
#23=AXIS2_PLACEMENT_3D("#20,#21,#22);
#25=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,0.E0,0.E0));
#26=DIRECTION(",(-1.E0,0.E0,0.E0));
#27=DIRECTION(",(0.E0,1.E0,0.E0));
#28=AXIS2_PLACEMENT_3D("#25,#26,#27);
#30=DIRECTION(",(-1.E0,0.E0,0.E0));
#31=VECTOR("#30,5.E1);
#32=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,-3.E1,0.E0));
#33=LINE("#32,#31);
#34=DIRECTION(",(-1.E0,0.E0,0.E0));
#35=VECTOR("#34,5.E1);
#36=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,3.E1,0.E0));
#37=LINE("#36,#35);
#38=CARTESIAN_POINT(",(-5.E1,0.E0,0.E0));
#39=DIRECTION(",(-1.E0,0.E0,0.E0));
#40=DIRECTION(",(0.E0,-1.E0,0.E0));
#41=AXIS2_PLACEMENT_3D("#38,#39,#40);
#43=CARTESIAN_POINT(",(-5.E1,0.E0,0.E0));
#44=DIRECTION(",(-1.E0,0.E0,0.E0));
#45=DIRECTION(",(0.E0,1.E0,0.E0));

```

```

#46=AXIS2_PLACEMENT_3D("#43,#44,#45);
#48=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,0.E0,0.E0));
#49=DIRECTION(",(1.E0,0.E0,0.E0));
#50=DIRECTION(",(0.E0,0.E0,1.E0));
#51=AXIS2_PLACEMENT_3D("#48,#49,#50);
#53=DIRECTION(",(1.E0,0.E0,0.E0));
#54=VECTOR("#53,5.E1);
#55=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,0.E0,1.5E1));
#56=LINE("#55,#54);
#57=CARTESIAN_POINT(",(5.E1,0.E0,-1.5E1));
#58=CARTESIAN_POINT(",(5.E1,0.E0,1.5E1));
#59=VERTEX_POINT("#57);
#60=VERTEX_POINT("#58);
#61=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,-3.E1,0.E0));
#62=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,3.E1,0.E0));
#63=VERTEX_POINT("#61);
#64=VERTEX_POINT("#62);
#65=CARTESIAN_POINT(",(-5.E1,-3.E1,0.E0));
#66=CARTESIAN_POINT(",(-5.E1,3.E1,0.E0));
#67=VERTEX_POINT("#65);
#68=VERTEX_POINT("#66);
#69=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,0.E0,-1.5E1));
#70=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,0.E0,1.5E1));
#71=VERTEX_POINT("#69);
#72=VERTEX_POINT("#70);
#73=CARTESIAN_POINT(",(5.E1,0.E0,0.E0));
#74=DIRECTION(",(1.E0,0.E0,0.E0));
#75=DIRECTION(",(0.E0,0.E0,-1.E0));
#76=AXIS2_PLACEMENT_3D("#73,#74,#75);
#77=PLANE("#76);
#79=ORIENTED_EDGE(",*,*,#78,.F.);
#81=ORIENTED_EDGE(",*,*,#80,.F.);
#82=EDGE_LOOP(",(#79,#81));
#83=FACE_OUTER_BOUND(",#82,.F.);
#84=ADVANCED_FACE(",(#83),#77,.T.);
#85=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,0.E0,0.E0));
#86=DIRECTION(",(1.E0,0.E0,0.E0));
#87=DIRECTION(",(0.E0,0.E0,-1.E0));
#88=AXIS2_PLACEMENT_3D("#85,#86,#87);
#89=CYLINDRICAL_SURFACE(",#88,1.5E1);
#91=ORIENTED_EDGE(",*,*,#90,.F.);
#93=ORIENTED_EDGE(",*,*,#92,.T.);
#94=ORIENTED_EDGE(",*,*,#78,.T.);
#96=ORIENTED_EDGE(",*,*,#95,.F.);
#97=EDGE_LOOP(",(#91,#93,#94,#96));
#98=FACE_OUTER_BOUND(",#97,.F.);
#99=ADVANCED_FACE(",(#98),#89,.T.);
#100=CARTESIAN_POINT(",(0.E0,0.E0,0.E0));
#101=DIRECTION(",(-1.E0,0.E0,0.E0));
#102=DIRECTION(",(0.E0,-1.E0,0.E0));
#103=AXIS2_PLACEMENT_3D("#100,#101,#102);

```

```

#104=PLANE("#103);
#106=ORIENTED_EDGE("*,*,#105,.T.);
#108=ORIENTED_EDGE("*,*,#107,.T.);
#109=EDGE_LOOP("(#106,#108));
#110=FACE_OUTER_BOUND("#109,.F.);
#111=ORIENTED_EDGE("*,*,#90,.T.);
#113=ORIENTED_EDGE("*,*,#112,.T.);
#114=EDGE_LOOP("(#111,#113));
#115=FACE_BOUND("#114,.F.);
#116=ADVANCED_FACE("(#110,#115),#104,.F.);
#117=CARTESIAN_POINT("(0.E0,0.E0,0.E0));
#118=DIRECTION("(-1.E0,0.E0,0.E0));
#119=DIRECTION("(0.E0,-1.E0,0.E0));
#120=AXIS2_PLACEMENT_3D("#117,#118,#119);
#121=CYLINDRICAL_SURFACE("#120,3.E1);
#122=ORIENTED_EDGE("*,*,#105,.F.);
#124=ORIENTED_EDGE("*,*,#123,.T.);
#126=ORIENTED_EDGE("*,*,#125,.T.);
#128=ORIENTED_EDGE("*,*,#127,.F.);
#129=EDGE_LOOP("(#122,#124,#126,#128));
#130=FACE_OUTER_BOUND("#129,.F.);
#131=ADVANCED_FACE("(#130),#121,.T.);
#132=CARTESIAN_POINT("(0.E0,0.E0,0.E0));
#133=DIRECTION("(-1.E0,0.E0,0.E0));
#134=DIRECTION("(0.E0,-1.E0,0.E0));
#135=AXIS2_PLACEMENT_3D("#132,#133,#134);
#136=CYLINDRICAL_SURFACE("#135,3.E1);
#137=ORIENTED_EDGE("*,*,#107,.F.);
#138=ORIENTED_EDGE("*,*,#127,.T.);
#140=ORIENTED_EDGE("*,*,#139,.T.);
#141=ORIENTED_EDGE("*,*,#123,.F.);
#142=EDGE_LOOP("(#137,#138,#140,#141));
#143=FACE_OUTER_BOUND("#142,.F.);
#144=ADVANCED_FACE("(#143),#136,.T.);
#145=CARTESIAN_POINT("(-5.E1,0.E0,0.E0));
#146=DIRECTION("(-1.E0,0.E0,0.E0));
#147=DIRECTION("(0.E0,-1.E0,0.E0));
#148=AXIS2_PLACEMENT_3D("#145,#146,#147);
#149=PLANE("#148);
#150=ORIENTED_EDGE("*,*,#125,.F.);
#151=ORIENTED_EDGE("*,*,#139,.F.);
#152=EDGE_LOOP("(#150,#151));
#153=FACE_OUTER_BOUND("#152,.F.);
#154=ADVANCED_FACE("(#153),#149,.T.);
#155=CARTESIAN_POINT("(0.E0,0.E0,0.E0));
#156=DIRECTION("(1.E0,0.E0,0.E0));
#157=DIRECTION("(0.E0,0.E0,-1.E0));
#158=AXIS2_PLACEMENT_3D("#155,#156,#157);
#159=CYLINDRICAL_SURFACE("#158,1.5E1);
#160=ORIENTED_EDGE("*,*,#112,.F.);
#161=ORIENTED_EDGE("*,*,#95,.T.);

```

```

#162=ORIENTED_EDGE("*,*,#80,.T.);
#163=ORIENTED_EDGE("*,*,#92,.F.);
#164=EDGE_LOOP(",(#160,#161,#162,#163));
#165=FACE_OUTER_BOUND(",#164,.F.);
#166=ADVANCED_FACE(",(#165),#159,.T.);
#167=CLOSED_SHELL(",(#84,#99,#116,#131,#144,#154,#166));
#168=MANIFOLD_SOLID_BREP(",#167);
#169=(LENGTH_UNIT()NAMED_UNIT(*)SI_UNIT(.MILLI,..METRE.));
#170=DIMENSIONAL_EXPONENTS(0.E0,0.E0,0.E0,0.E0,0.E0,0.E0,0.E0);
#171=(NAMED_UNIT(*)PLANE_ANGLE_UNIT()SI_UNIT($,.RADIAN.));
#172=PLANE_ANGLE_MEASURE_WITH_UNIT(PLANE_ANGLE_MEASURE(1.74532925
1994E-2),#171);
#173=(CONVERSION_BASED_UNIT('DEGREE',#172)NAMED_UNIT(#170)PLANE_ANGL
E_UNIT());
#174=(NAMED_UNIT(*)SI_UNIT($,.STERADIAN.)SOLID_ANGLE_UNIT());
#175=UNCERTAINTY_MEASURE_WITH_UNIT(LENGTH_MEASURE(1.311435245352E-
2),#169,
'closure',
'Maximum model space distance between geometric entities at asserted connectivities');
#176=(GEOMETRIC_REPRESENTATION_CONTEXT(3)GLOBAL_UNCERTAINTY_ASSI
GNED_CONTEXT((
#175))GLOBAL_UNIT_ASSIGNED_CONTEXT((#169,#173,#174))REPRESENTATION_CO
NTEXT
('ID1','3'));
#178=APPLICATION_CONTEXT(
'CONFIGURATION CONTROLLED 3D DESIGNS OF MECHANICAL PARTS AND
ASSEMBLIES');
#179=APPLICATION_PROTOCOL_DEFINITION('international standard',
'config_control_design',1994,#178);
#180=DESIGN_CONTEXT(",#178,'design');
#181=MECHANICAL_CONTEXT(",#178,'mechanical');
#182=PRODUCT('0003-EXTRUDE','0003-EXTRUDE','NOT SPECIFIED',(#181));
#183=PRODUCT_DEFINITION_FORMATION_WITH_SPECIFIED_SOURCE('1','LAST_VE
RSION',#182,
.MADE.);
#187=PRODUCT_CATEGORY('part,");
#188=PRODUCT_RELATED_PRODUCT_CATEGORY('detail',"(#182));
#189=PRODUCT_CATEGORY_RELATIONSHIP(","#187,#188);
#190=SECURITY_CLASSIFICATION_LEVEL('unclassified');
#191=SECURITY_CLASSIFICATION(","#190);
#192=CC_DESIGN_SECURITY_CLASSIFICATION(#191,(#183));
#193=APPROVAL_STATUS('approved');
#194=APPROVAL(#193,");
#195=CC_DESIGN_APPROVAL(#194,(#191,#183,#184));
#196=CALENDAR_DATE(107,11,11);
#197=COORDINATED_UNIVERSAL_TIME_OFFSET(1,0,.BEHIND.);
#198=LOCAL_TIME(19,44,6.E0,#197);
#199=DATE_AND_TIME(#196,#198);
#200=APPROVAL_DATE_TIME(#199,#194);
#201=DATE_TIME_ROLE('creation_date');
#202=CC_DESIGN_DATE_AND_TIME_ASSIGNMENT(#199,#201,(#184));

```

```

#203=DATE_TIME_ROLE('classification_date');
#204=CC_DESIGN_DATE_AND_TIME_ASSIGNMENT(#199,#203,(#191));
#205=PERSON('UNSPECIFIED','UNSPECIFIED',$,$,$,$);
#206=ORGANIZATION('UNSPECIFIED','UNSPECIFIED','UNSPECIFIED');
#207=PERSON_AND_ORGANIZATION(#205,#206);
#208=APPROVAL_ROLE('approver');
#209=APPROVAL_PERSON_ORGANIZATION(#207,#194,#208);
#210=PERSON_AND_ORGANIZATION_ROLE('creator');
#211=CC_DESIGN_PERSON_AND_ORGANIZATION_ASSIGNMENT(#207,#210,(#183,#184));
#212=PERSON_AND_ORGANIZATION_ROLE('design_supplier');
#213=CC_DESIGN_PERSON_AND_ORGANIZATION_ASSIGNMENT(#207,#212,(#183));
#214=PERSON_AND_ORGANIZATION_ROLE('classification_officer');
#215=CC_DESIGN_PERSON_AND_ORGANIZATION_ASSIGNMENT(#207,#214,(#191));
#216=PERSON_AND_ORGANIZATION_ROLE('design_owner');
#217=CC_DESIGN_PERSON_AND_ORGANIZATION_ASSIGNMENT(#207,#216,(#182));
#5=CIRCLE("#4,1.5E1);
#10=CIRCLE("#9,1.5E1);
#15=CIRCLE("#14,1.5E1);
#24=CIRCLE("#23,3.E1);
#29=CIRCLE("#28,3.E1);
#42=CIRCLE("#41,3.E1);
#47=CIRCLE("#46,3.E1);
#52=CIRCLE("#51,1.5E1);
#78=EDGE_CURVE("#59,#60,#5,.T.);
#80=EDGE_CURVE("#60,#59,#10,.T.);
#90=EDGE_CURVE("#71,#72,#15,.T.);
#92=EDGE_CURVE("#71,#59,#19,.T.);
#95=EDGE_CURVE("#72,#60,#56,.T.);
#105=EDGE_CURVE("#63,#64,#24,.T.);
#107=EDGE_CURVE("#64,#63,#29,.T.);
#112=EDGE_CURVE("#72,#71,#52,.T.);
#123=EDGE_CURVE("#63,#67,#33,.T.);
#125=EDGE_CURVE("#67,#68,#42,.T.);
#127=EDGE_CURVE("#64,#68,#37,.T.);
#139=EDGE_CURVE("#68,#67,#47,.T.);
#177=ADVANCED_BREP_SHAPE_REPRESENTATION(",(#168),#176);
#184=PRODUCT_DEFINITION('design',"#183,#180);
#185=PRODUCT_DEFINITION_SHAPE(",'SHAPE FOR 0003-EXTRUDE.',#184);
#186=SHAPE_DEFINITION_REPRESENTATION(#185,#177);
ENDSEC;
END-ISO-10303-21;

```