

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

PROPOSTA E CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA PARA PLANEJAMENTO DE  
PROCESSO SEMI-GENERATIVO PARA USINAGEM DE PEÇAS CILÍNDRICAS  
BASEADO NO ARQUIVO STEP AP 203

por

Vinícius Spanhol Bordignon

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Maio de 2019

PROPOSTA E CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA DE PLANEJAMENTO DE PROCESSO  
SEMI-GENERATIVO PARA USINAGEM DE PEÇAS CILÍNDRICAS BASEADO NO  
ARQUIVO STEP AP 203

por

Vinícius Spanhol Bordignon  
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

Aprovada por:

Prof. Dr. Marco Aurélio da Fontoura Gonçalves (CTISM/UFSM)

Profª. Dra. Cintia C. Petry Mazzaferro (PROMEC/UFRGS)

Prof. Dr. Gilberto Dias da Cunha (DEMEC/UFRGS)

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 24 de Maio de 2019

*"It means your future hasn't been written yet, no one's has. Your future is whatever you make it, so make it a good one."*

*Dr. Emmett Brown, Back to the future III, 1990.*

*Aos meus pais, Luciane e Sérgio,  
À minha namorada Paola,  
À Pituka, pelos incontáveis anos de parceria.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para a conclusão de mais uma etapa de minha formação.

Aos meus pais, Luciane e Sérgio, pelo amor e apoio incondicionais.

À minha namorada Paola, pelo amor, companheirismo e incentivo para superar os momentos difíceis.

À minha tia Solange Bordignon, pela hospitalidade, suporte, carinho e amizade, fundamentais neste período do Mestrado.

Ao meu primo Júnior, por fomentar meu interesse pela pesquisa.

Aos demais familiares, que mesmo distantes fisicamente, demonstraram seu carinho e afeto.

Ao professor orientador Dr. Flávio José Lorini, pela acolhida, interesse, compreensão, amizade, dedicação e conhecimentos compartilhados.

Aos professores membros da banca avaliadora deste trabalho, pela disponibilidade e pelas considerações construtivas.

Aos funcionários do Laboratório de Usinagem da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, especialmente aos técnicos Guilherme Vargas Schirmer e Volnei Batista Lopes, pelo auxílio técnico, conselhos e amizade.

Ao amigo Pablo Leonardelli, pela colaboração no desenvolvimento do código de programação.

Aos colegas da pós-graduação, Juan David Espitia Pérez, Leandro Tognon, Celso Teixeira, André Markus e Rafael Farias Garcia, pela amizade, apoio e inúmeras risadas.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e à Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior, pelos recursos e suporte financeiro concedidos durante o mestrado.

Aos meus professores do período de graduação Charles Leonardo Israel, Leandro Spinelli e William Haupt, pelo enorme incentivo para o ingresso na carreira acadêmica.

## RESUMO

A competitividade no mercado é um dos principais objetivos almejados pelas indústrias. Para isso, os produtos desenvolvidos devem possuir maior qualidade, com tempos e custos de fabricação reduzidos. Neste sentido, na área da manufatura, uma das etapas importantes é o planejamento do processo produtivo, atividade que consiste em disponibilizar informações detalhadas e organizadas para o setor de produção. No setor metal-mecânico, um importante processo de fabricação é o de usinagem, o qual implica em um planejamento de processo que consiste na seleção de máquinas e ferramentas, definição dos principais parâmetros de corte e instruções de trabalho. Em muitas empresas, esse planejamento é realizado manualmente por profissionais experientes, despendendo tempo considerável com atividades que não agregam valor ao produto. O auxílio computacional é, portanto, fundamental, uma vez que permite a integração entre as informações de projeto e manufatura, possibilitando a elaboração de planos de processo otimizados e reduzindo a ocorrência de erros e a necessidade de profissionais mais experientes. Nessa perspectiva, a automatização do planejamento de processos de usinagem é um aspecto fundamental. O uso de arquivos neutros de desenho, como o padrão STEP, para tal fim constitui-se em uma boa alternativa, visto que o reconhecimento automático de características de usinagem pode ser realizado a partir da interpretação desse arquivo. Com o objetivo de reproduzir esse reconhecimento e integrar projeto e manufatura, esse trabalho propõe um sistema, denominado *S\_ProcPlan*, baseado na abordagem generativa interativa para o planejamento de processos de usinagem. Esse sistema é responsável por armazenar as informações de um arquivo STEP AP 203 gerado por um *software* CAD e, a partir de aplicação de regras, identificar geometrias cilíndricas em peças rotacionais, permitindo a associação das mesmas às respectivas operações necessárias para sua concepção. Essa relação ocorre a partir da interação do *S\_ProcPlan* com um banco de dados relacional com conhecimento de manufatura, contendo informações relativas a máquinas, ferramentas, operações e materiais. Rotinas de cálculos e critérios de tomada de decisão auxiliam o processista na seleção dos parâmetros de usinagem para cada processo. Como principais resultados, o sistema desenvolvido apresenta o plano de processo com informações otimizadas para a usinagem da peça, bem como o desenho técnico do componente, fornecendo, assim, dados suficientes para a fabricação segundo as especificações de projeto e colaborando para a integração CAD/CAPP/CAM.

Palavras-chave: Padrão STEP; Automação da manufatura; Planejamento de processo; Processos de usinagem.

## ABSTRACT

Economic market competitiveness is one of the main goals pursued by industries. For achieving this, the products developed must have higher quality, with reduced manufacturing times and costs. Therefore, in manufacture, one of the important steps is productive process planning, an activity that consists of providing detailed and organized information for the production sector. In metal-mechanic sector, an important manufacturing process is machining, which implies a process planning consisting of machines and tools selection, main cutting parameters definition and working instructions. In many companies, this planning is made manually by experienced professionals, spending considerable time on this activities without adding value to the product. Therefore, computational support is fundamental, since it allows the integration of design and manufacturing informations, enabling optimized process plans elaboration and reducing errors occurrence and experienced professionals requirement. In this perspective, the machining processes planning automation is a fundamental aspect. The use of neutral drawing files for this purpose, such as STEP standard, constitutes a good alternative, since the automatic recognition of machining characteristics can be performed through the interpretation of this file. In order to reproduce this recognition and integrate design and manufacture, this work proposes a system, called *S\_ProcPlan*, based on the generative-interactive approach to machining processes planning. This system is responsible for store the information of an STEP AP 203 file generated by CAD software and, through rules application, identify cylindrical geometries in rotational parts, allowing subsequently their association to the respective operations required for their manufacturing. This relationship occurs through the interaction of *S\_ProcPlan* with a manufacturing knowledge relational database, containing information about machines, tools, operations, and materials. Calculation routines and decision-making criteria assist the engineer in the selection of machining parameters for each process. As main results, the developed system presents the process plan with optimized informations for machining the part as well as their technical drawing, thus providing enough data to component manufacture according to the project specifications and collaborating for CAD/CAPP/CAM integration.

Keywords: STEP standard; Manufacturing automation; Process planning; Machining processes.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Descrição do problema .....	2
1.2	Objetivo do trabalho .....	2
1.3	Organização do trabalho.....	3
1.4	Revisão bibliográfica.....	3
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>10</b>
2.1	Conceituação de Planejamento de Processo.....	10
2.2	Abordagens de Planejamento de Processo .....	12
2.2.1	Planejamento Variante .....	12
2.2.2	Planejamento Generativo .....	14
2.2.3	Planejamento Semi-generativo.....	15
2.3	Principais etapas do planejamento de processo.....	16
2.3.1	Escolha das operações.....	16
2.3.2	Escolha das máquinas .....	17
2.3.3	Escolha da velocidade de corte .....	19
2.3.4	Escolha das ferramentas.....	21
2.3.5	Outras considerações.....	24
2.4	Principais métodos de planejamento de processo .....	25
2.5	Formatos de arquivo neutro.....	27
2.6	Reconhecimento automático de características .....	29
2.7	Norma ISO 10303 - Padrão STEP.....	31
2.7.1	Estrutura da norma ISO 10303.....	33
2.7.2	Hierarquia das informações.....	35
<b>3</b>	<b>TRABALHO DESENVOLVIDO.....</b>	<b>39</b>
3.1	Contextualização e definição do sistema proposto.....	39
3.2	Módulo de extração de geometrias do arquivo STEP .....	42
3.2.1	Extração e armazenamento de informações do STEP.....	44
3.2.2	Processamento e saída dos dados extraídos .....	45
3.3	Banco de dados de manufatura.....	47
3.4	Interface de planejamento de processo do <i>S_ProcPlan</i> .....	53

<b>4</b>	<b>PLANO DE PROCESSO DE UMA PEÇA EXEMPLO.....</b>	<b>58</b>
4.1	Identificação das geometrias da peça – Bloco 1.....	58
4.2	Detalhamento das operações do plano de processo – Bloco 2.....	61
4.2.1	Operações de faceamento.....	61
4.2.2	Operações de torneamento cilíndrico.....	67
4.2.3	Operação de furação.....	69
4.3	Plano de processo obtido.....	70
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>72</b>
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	73
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE A Rotina de extração de dados da hierarquia do STEP AP 203 .....</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE B Dados extraídos do arquivo STEP AP 203 da peça exemplo .....</b>	<b>82</b>
	<b>ANEXO I Recomendações de pastilhas para torneamento .....</b>	<b>84</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Estrutura de um planejamento de processo variante [Adaptada de Lorini, 1993; Yusof e Latif, 2014].....	13
Figura 2.2	Estrutura fundamental de um sistema generativo [Adaptada de Lorini, 1993; Yusof e Latif, 2014].....	14
Figura 2.3	Métodos adotados para sistemas CAPP entre 2002-2013 [Adaptada de Yusof e Latif, 2014].....	27
Figura 2.4	Hierarquia de dados do STEP para uma peça de geometria cilíndrica [Adaptada de Sreeramulu e Rao, 2008].....	37
Figura 3.1	Composição de um planejamento de processo ideal [Adaptada de Halevi, 2003].....	40
Figura 3.2	Fluxograma do sistema desenvolvido.....	42
Figura 3.3	Fluxograma do módulo de extração de geometrias.....	43
Figura 3.4	Interface do módulo de extração de geometrias.....	43
Figura 3.5	Parte de um arquivo STEP .....	44
Figura 3.6	Tabelas relacionais do banco de dados projetado.....	48
Figura 3.7	Alguns dos materiais inseridos no banco de dados.....	48
Figura 3.8	Algumas dimensões brutas de matéria-prima cadastradas no sistema.....	49
Figura 3.9	Algumas das operações registradas.....	49
Figura 3.10	Tipos de usinagem gravados no banco de dados.....	50
Figura 3.11	Parte do cadastro de máquinas no banco de dados.....	51
Figura 3.12	Algumas das ferramentas inseridas no banco de dados .....	51
Figura 3.13	Parte da inclusão de informações na tabela <i>CodFerTipo</i> .....	52
Figura 3.14	Registro de algumas velocidades de corte.....	52
Figura 3.15	Inserção dos dados de avanço para brocas.....	53
Figura 3.16	Interface de seleção de operações do sistema <i>S_ProcPlan</i> .....	54
Figura 3.17	Mensagem de alerta pra restrições energéticas da máquina.....	56
Figura 3.18	Interface do relatório do plano de processo.....	57
Figura 4.1	Desenho técnico da peça exemplo.....	58

Figura 4.2	Geometrias principais da peça exemplo.....	59
Figura 4.3	Fluxograma para registrar uma operação de faceamento .....	62
Figura 4.4	Seleção de materiais no <i>S_ProcPlan</i> .....	63
Figura 4.5	Diâmetros de matéria-prima bruta listados para a peça exemplo.....	63
Figura 4.6	Opções de condições de usinagem do <i>S_ProcPlan</i> .....	64
Figura 4.7	Lista de máquinas para a operação de faceamento.....	64
Figura 4.8	Ferramentas elencadas para a operação de faceamento .....	65
Figura 4.9	Ajuste da profundidade de corte para o faceamento.....	66
Figura 4.10	Verificação das condições da máquina para faceamento .....	66
Figura 4.11	Registro das informações das operações de faceamento .....	66
Figura 4.12	Fluxograma para operação de torneamento cilíndrico .....	67
Figura 4.13	Ajuste da profundidade de corte para torneamento cilíndrico .....	68
Figura 4.14	Operações de torneamento cilíndrico para a peça exemplo .....	68
Figura 4.15	Fluxograma para operação de furação .....	69
Figura 4.16	Operações de furação definidas para a peça exemplo .....	70
Figura 4.17	Relatório do plano de processo obtido para a peça exemplo .....	71
Figura 4.18	Desenho da peça obtido pela ligação do <i>S_ProcPlan</i> e SolidWorks.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Principais restrições examinadas na seleção de máquinas.....	19
Tabela 2.2	Considerações sobre os principais parâmetros de corte na usinagem de peças.....	22
Tabela 2.3	Métodos de reconhecimento automático de características.....	31
Tabela 2.4	Estrutura da norma ISO 10303 – STEP [Adaptada de Teich et al., 2010].....	34
Tabela 2.5	Alguns Protocolos de Aplicação do STEP e suas definições [Adaptada de Sateesh e Mahesh, 2017].....	35
Tabela 4.1	Resumo das informações extraídas do arquivo STEP AP 203.....	60
Tabela 4.2	Características automaticamente identificadas para a peça exemplo.....	60

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AP	Application Protocol
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
B-Rep	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAPP	Computer Aided Process Planning
CAx	Computer Aided Technologies
CC	Classes de Conformidade
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CNC	Computer Numercial Control
CSG	Constructive Solid Geometry
DXF	Drawing Exchange Format
GA	Genetic Algorithm
GT	Group Technology
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
ISO	International Organization for Standardization
LAUS	Laboratório de Usinagem
SAE	Society of Automotive Engineers - EUA
SC4	Subcommitte 4
SDAI	Standard Data Access Interface
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
STL	Stereolithography
TC184	Technical Committee 184
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_p$	Profundidade de corte, mm
$D$	Diâmetro de referência da peça, mm
$D_B$	Diâmetro da broca, mm
$f$	Taxa de avanço, mm/rot
$kc$	Força específica de corte, N/mm <sup>2</sup>
$Kr$	Ângulo de posição da aresta de corte, °
$n$	Rotação, em rpm
$P$	Potência efetiva necessária, em kW
$V_c$	Velocidade de corte, m/min
$\eta$	Rendimento, em %

# 1 INTRODUÇÃO

Desde o início da Revolução Industrial, no século XVIII, as empresas de manufatura sofreram inúmeras e constantes modificações. A começar pela introdução de máquinas a vapor até a globalização e o conceito de Indústria 4.0, as fábricas apresentam uma demanda crescente por sistemas automatizados de produção, a fim de atender as exigências de um mercado cada vez mais competitivo. O aumento de produtividade, aliado à redução de custos e garantia de qualidade, são os objetivos almejados. Para isso, é essencial estruturar o processo produtivo de modo eficiente, com automatização dos procedimentos.

Na área da fabricação, a interligação entre as atividades envolvidas no ciclo produtivo (projeto, planejamento de processo, manufatura e inspeção) é considerada essencial para a competitividade de uma indústria. De todas essas etapas, associadas aos respectivos sistemas CAx (*Computer Aided Technologies*), o planejamento de processo apresenta-se como um elo crucial, uma vez que utiliza as informações de projeto para transmitir instruções de trabalho para a produção das peças. Dentro desse contexto, a criação de ferramentas que auxiliem na elaboração de planos de processo consistentes e otimizados implica na adoção de importantes tecnologias para automação das tarefas.

Dentre essas tecnologias, destacam-se os CAPPs (*Computer Aided Process Planning*). Esses sistemas podem ser concebidos com capacidade de extrair informações do modelo de produto projetado de forma automática e de reproduzir uma lógica de tomada de decisão a partir do armazenamento do conhecimento de manufatura. Dessa forma, apresentam uma redução da necessidade de intervenção humana, diminuindo a ocorrência de erros. Contudo, em comparação com os CADs (*Computer Aided Design*) e os CAMs (*Computer Aided Manufacturing*), a aplicação de sistemas CAPP industrialmente apresenta-se restrita, dada a complexidade inerente à sua elaboração. Os sistemas desenvolvidos em pesquisas, na maior parte das vezes, limitam-se a aplicações específicas para determinado tipo de peça. Na automatização das tarefas de planejamento de processo, diferentes abordagens podem ser adotadas a partir da interpretação dos desenhos de componentes, avaliados sob o enfoque de fabricação, por meio das possibilidades de processos, equipamentos e parâmetros otimizados para sua concepção.

O trabalho proposto visa criar um sistema de planejamento de processo assistido por computador generativo-interativo compatível com o formato de arquivo neutro STEP

(*Standard for the Exchange of Product model data*) para peças rotacionais cilíndricas, capaz de identificar automaticamente características de usinagem a partir de informações extraídas do padrão e, posteriormente, relacioná-las com processos, máquinas, ferramentas e parâmetros de corte. Como resultado final, o sistema fornece a folha de roteamento de processos com os respectivos parâmetros, juntamente com o desenho da peça.

## 1.1 Descrição do problema

O planejamento de processo é uma importante etapa da produção de um componente, uma vez que executa a ligação entre projeto e manufatura. Esse estágio é normalmente realizado de forma manual por engenheiros experientes, fato que dificulta o armazenamento de informações e o compartilhamento do conhecimento, como também demanda extenso tempo do processista. O cenário existente determina a necessidade de produzir de forma ágil, com alta qualidade e baixo custo, o que torna a automatização do planejamento de processo fundamental.

No entanto, apesar dos esforços dispendidos nos últimos anos, existem poucos sistemas de planejamento de processo assistido por computador em ambiente industrial, dado a complexidade para criá-los. Justifica-se, assim, o desenvolvimento de novas abordagens nessa área como uma necessidade real e atual. Sistemas computacionais de planejamento de processo permitem a criação de bancos de dados de informações (armazenamento do conhecimento), além de auxiliar na tomada de decisão por parte do processista, colaborando para identificar as melhores alternativas para a execução das operações. Esses sistemas ainda restringem a necessidade de intervenção humana, reduzindo assim custos de produção e ocorrência de erros, gerando planos de processo mais consistentes.

## 1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho consiste em conceber um sistema de planejamento de processo generativo-iterativo compatível com o formato de arquivo neutro STEP para peças rotacionais cilíndricas, isto é, um sistema capaz de reconhecer automaticamente algumas características geométricas e topológicas de uma peça projetada em um *software* CAD e, subsequentemente, relacioná-las às operações, máquinas, ferramentas e parâmetros de corte

necessários para usiná-la. Para atingir esse propósito, é essencial atender alguns objetivos específicos, como:

- compreender o formato de arquivo neutro STEP e sua organização hierárquica;
- extrair informações geométricas e topológicas da peça a partir do arquivo STEP;
- reconhecer automaticamente características de usinagem, por meio de técnicas baseadas em regras pré-definidas;
- elaborar um banco de dados relacional, com máquinas, ferramentas e respectivos parâmetros de usinagem;
- desenvolver uma interface com o usuário em plataforma *Windows*, para permitir o planejamento de cada processo de usinagem necessário para a peça.

### 1.3 Organização do trabalho

O trabalho está organizado do seguinte modo:

- Capítulo 1 – Introdução do tema abordado, apresentação do estado da arte e explanação do problema e dos objetivos almejados.
- Capítulo 2 – Fundamentação teórica, abordando conceitos e teorias fundamentais acerca dos diversos assuntos envolvidos na realização desse estudo.
- Capítulo 3 – Metodologia de desenvolvimento do sistema de planejamento de processos *S\_ProcPlan*, relatando os *softwares* e abordagens utilizados para concebê-lo.
- Capítulo 4 – Aplicação do sistema desenvolvido a partir de uma peça exemplo, gerando o plano de processo correspondente.
- Capítulo 5 – Conclusões obtidas a partir da realização da pesquisa e sugestões para o aperfeiçoamento do sistema em trabalhos futuros.
- Referências Bibliográficas – Seção na qual estão incluídos todos os trabalhos consultados para a execução dessa pesquisa.

### 1.4 Revisão bibliográfica

Os sistemas de Planejamento de Processo Assistido por Computador baseiam-se em diferentes métodos para a obtenção de informações acerca da geometria das peças a serem planejadas. Um desses métodos é denominado compatível com o STEP, o qual utiliza um

arquivo neutro com informações de projeto nesse formato para inferir sobre a geometria de uma peça e os respectivos processos necessários para a fabricação da mesma. Existem diversos trabalhos e pesquisas envolvendo a leitura e a extração de dados dos arquivos STEP, bem como sua utilização, em seus mais variados protocolos, em aplicações de planejamento de processo e de automação de manufatura.

Kumar, 2005, desenvolveu um sistema para facilitar a integração entre CAD e CAM, considerando uma peça prismática com uma operação de fresamento. Esse sistema divide-se em dois módulos principais: o *STEP Reader* e o *Feature Recognizer*. O primeiro é responsável pela leitura do arquivo STEP AP 203 gerado, organizando os dados obtidos de forma hierárquica e armazenando-os em um banco de dados, de modo que possibilite o processamento posterior dessas informações. O segundo módulo, por sua vez, consiste na leitura das informações do banco de dados e na aplicação de algumas regras pré-definidas, no intuito de reconhecer as características de usinagem presentes na peça, definindo assim sua geometria. Essa abordagem possibilita utilizar esses dados como entrada para um sistema CAPP, relacionando as geometrias com operações de usinagem. Para a geração do arquivo STEP, o autor utilizou o *software Pro/Engineer*, enquanto que para a programação do *STEP Reader* e do *Feature Recognizer* utilizou-se o *software Visual Basic 6.0*.

Liang et al., 1996, Sreeramulu e Rao, 2008, Reedy et al., 2014, Venu et al., 2015 e Sateesh e Mahesh, 2017, também propuseram módulos de identificação de geometrias de usinagem para peças prismáticas. Todos os trabalhos seguiram a linha de Kumar, 2005, para a extração de dados do arquivo STEP, apresentando, no entanto, algumas diferenças em relação à abordagem para reconhecimento de características e aplicação futura. Liang et al., 1996, utilizaram os dados extraídos do arquivo STEP para gerar um código CNC (Comando Numérico Computacional) a partir do reconhecimento das *features* de usinagem. Sreermulu e Rao, 2008, e Reedy et al., 2014, elaboraram algoritmos com abordagem para raciocínio geométrico, no intuito de identificar geometrias como ranhuras, cavidades e furos. Venu et al., 2015, desenvolveram uma abordagem chamada *Object Slicing Approach*, que consiste na aplicação de um plano imaginário com definição de uma característica de usinagem específica em toda a superfície da peça, para a identificação dos recursos. Os autores testaram essa abordagem em peças com cavidades e com entalhes passantes e em formato V, obtendo resultados satisfatórios. Em outro trabalho, Sateesh e Mahesh, 2017, utilizaram algoritmos para reconhecimento de características como furos, protuberâncias, variações de diâmetro e

cavidades a partir de um arquivo STEP AP 214. Ressalta-se que a maior parte desses autores utilizou a linguagem de programação *JAVA* para a extração de dados do arquivo STEP e aplicação das regras de reconhecimento de características.

Malleswari, 2013, elaborou um método de reconhecimento automático de características para peças rotacionais, a partir do arquivo neutro STEP AP 203. De maneira semelhante a Kumar, 2005, o sistema realiza a leitura do STEP, organizando as informações obtidas dentro da hierarquia existente nesse tipo de arquivo. A partir da aplicação de regras, o método proposto permite reconhecer as características de fabricação de geometria cilíndrica, cônica e toroidal, como também algumas características especiais (furos cruzados e rasgo de chaveta). Como resultado final, o sistema fornece certos atributos de cada característica, como suas dimensões (comprimento e raio), seu tipo (externa ou interna), a natureza do furo (passante ou cego) e do contorno (côncava ou convexa) e a localização da característica em relação às coordenadas originais da peça (simétrico ao eixo ou com *offset*). A autora testou o programa desenvolvido para uma gama de peças, com diferentes formatos, obtendo resultados satisfatórios. Para gerar o arquivo STEP, utilizou-se o *software CATIA*, enquanto que para extrair os dados e reconhecer as características usou-se um código desenvolvido na linguagem *JAVA*.

Sivakumar e Dhanalakshmi, 2013, Malleswari et al., 2013 e Oussama et al., 2014, também desenvolveram métodos para extração de informações a partir do arquivo neutro STEP, utilizando regras semelhantes para a identificação de geometrias cilíndricas, furos e ranhuras. Sivakumar e Dhanalakshmi, 2013, obtiveram como dado de saída as informações acerca das dimensões principais da peça (diâmetro e comprimento), utilizando-as para gerar um código CNC. Oussama et al., 2014, por sua vez, propuseram uma técnica, desenvolvida em linguagem *C++*, para extrair os dados do arquivo STEP AP 203, analisá-los e gerar combinações entre as características, a partir das quais é possível fornecer possibilidades diferentes para a usinagem da peça, bem como para a escolha de máquinas e ferramentas.

A utilização de informações geométricas e topológicas advindas de arquivos neutros, como o STEP, é um fator importante para realizar a integração CAD/CAM. Uma das principais aplicações nesse sentido é sua utilização para a elaboração de um sistema CAPP, o qual permite relacionar a geometria da peça com a operação e os parâmetros de usinagem necessários para sua fabricação.

Melo, 2003, desenvolveu um CAPP híbrido com dois módulos principais. O primeiro, correspondente à parte variante, consiste em um sistema de codificação da peça, baseado no *MICLASS*, no intuito de formar famílias, em conformidade com a tecnologia de grupo (GT), gerando, assim, um plano de processo padrão para essa família. O segundo módulo é utilizado em casos nos quais não há um plano de processo padrão correspondente à peça cadastrada. Dessa forma, o sistema permite a geração de um plano de processo de forma generativa interativa, utilizando informações sobre máquinas, ferramentas, porta-ferramentas e parâmetros de usinagem advindos de um banco de dados relacional, desenvolvido no *Microsoft Access*. O sistema, denominado *SisPlan\_I*, foi elaborado na linguagem *Visual Basic* e permite planejar operações de torneamento e furação para peças rotacionais. Como resultado final, o programa apresenta a folha do plano de processo, com o sequenciamento de operações e parâmetros de usinagem necessários para a obtenção da peça analisada.

Lau et al., 2004, propuseram um sistema inteligente, em linguagem *Visual C ++*, para o reconhecimento de características de usinagem e planejamento de processo para peças prismáticas com furo. Os dados de entrada para o programa provêm de um arquivo STEP, a partir do qual é realizada a extração de informações e o reconhecimento de características por meio de regras gerando um código GT (Tecnologia de Grupo). Nesse código é aplicado um algoritmo de decisão igualmente baseado em regras (com lógica semelhante ao *IF THEN*) que, associado a um banco de dados *Access* com informações de máquinas, ferramentas e parâmetros de usinagem, gera um plano de processo.

Marchetta e Forradellas, 2007, elaboraram um sistema CAPP generativo em linguagem *JAVA* e *C* para peças prismáticas com fresamento e furação. Utilizando o arquivo STEP AP 203 como entrada, um primeiro módulo do programa tem a função de ler e analisar as informações desse arquivo e traduzi-las no modelo de representação de limites (*B-rep*). O segundo módulo define as geometrias de usinagem, a partir dos dados recebidos do primeiro. Um terceiro módulo é responsável pelo planejamento de processo, utilizando as geometrias identificadas juntamente com o banco de dados de máquinas e ferramentas (representadas a partir de linguagem declarativa) para definir a sequência de usinagem.

Farias, 2008, propôs um CAPP semi-generativo, baseado no STEP AP 203, para peças cilíndricas, disposto em três módulos principais. No primeiro módulo, responsável pela leitura e extração de dados do arquivo STEP, foi utilizada a técnica *parser* para identificar a sintaxe e ordenar as informações obtidas em vetores. Posteriormente, esses dados foram processados,

para a identificação de geometrias. Uma etapa de reprocessamento é necessária, visto que alguns *softwares* CAD fornecem arquivos STEP com informações duplicadas. Os dados geométricos foram obtidos e utilizados como entrada para o sistema CAPP. O segundo módulo diz respeito ao banco de dados, com informações de máquinas, ferramentas e parâmetros de usinagem. Para sua elaboração, em *Firebird 1.5*, o autor utilizou tabelas relacionais, no intuito de associar ferramentas e máquinas às operações e ao material utilizado. O terceiro módulo consiste na etapa de planejamento de processo. As informações geométricas obtidas e os parâmetros de usinagem foram carregados automaticamente do banco de dados, mas o sistema também permite alterá-los. Como somente a geometria cilíndrica foi totalmente identificada a partir do STEP, o módulo permite também planejar *features* não obtidas automaticamente. O sistema desenvolvido possibilita o planejamento de operações de torneamento, furação e fresamento.

Saleh et al., 2013, elaboraram um CAPP generativo compatível com o STEP AP 203 para peças de chapa metálica de uma indústria automotiva. O sistema, desenvolvido em *Visual Basic 2008*, consiste em quatro módulos: (1) Reconhecimento de características do arquivo STEP; (2) Planejamento de processo para operações de dobra e perfuração; (3) CAPP semi-generativo para painéis automotivos (operações de estampagem e perfuração) e (4) Estimativa de custo. O banco de dados, implementado no *Microsoft Access*, possui informações de máquinas, materiais e ferramentas.

Majstorović et al., 2013, conceberam um CAPP compatível com STEP para peças prismáticas, baseado em aplicações nas indústrias sérvias. O sistema recebe o arquivo STEP, identifica a geometria da peça e compara o resultado obtido com um banco de dados de características. A informação obtida após a etapa de pós-processamento (definição da geometria) é utilizada como entrada de dados para o CAPP e geração do código CNC. Para cada conjunto de características geométricas e material, o sistema define a sequência de operações e os parâmetros de processo ideais, carregando ferramentas com informações pré-definidas.

Arunkumar, 2013, desenvolveu um sistema para planejamento de processo com interação mínima com o usuário, constituído basicamente de três módulos: (1) *Feature Extraction and Recognition*: extração de dados geométricos do arquivo STEP AP 203; (2) *Product Expert*: dados tecnológicos, como ferramentas, máquinas, custo, acabamento e tolerâncias, contidos em um banco de dados e (3) *Intelligent System for Manufacturing*

*Information*: formado a partir dos outros módulos e fornece os dados de saída, como o planejamento de processos, os custos de usinagem e o programa CNC para a peça. A grande inovação proposta pelo autor é a criação do *STEP +*, o qual permite o armazenamento de dados tecnológicos, adicionalmente ao *STEP AP 203*. O sistema foi testado para peças prismáticas, cilíndricas e combinações entre as duas, obtendo resultados satisfatórios.

Hussein e Kumar, 2014, elaboraram um CAPP de vários módulos, desenvolvidos em *Visual Basic*, para matrizes de estampagem. Basicamente, o sistema funciona por etapas: (1) Extração de informações do arquivo *STEP AP 203* da chapa metálica; (2) Identificação da sequência de operações; (3) Tipo de matriz necessária e sua organização; (4) Desenho 3D automático da matriz a partir de um banco de dados *Access*; (5) Extração dos dados do *STEP* da matriz; (6) Planejamento do processo dos componentes da matriz e (7) Geração do código G (CNC).

Em uma abordagem semelhante, Khan et al., 2015, desenvolveram um CAPP compatível com o *STEP AP 203*, em linguagem *Visual Basic*, para peças prismáticas dos componentes de uma matriz progressiva. O sistema divide-se em três partes: extração de dados do *STEP*, reconhecimento de características baseado em regras lógicas e planejamento de processo. A seleção da ferramenta é fundamentada na operação e na característica de usinagem. Os parâmetros de usinagem são definidos automaticamente a partir de um banco de dados. O sistema permite planejar operações de fresamento e furação.

Zarkti et al., 2015, implementaram um modelo otimizado para seleção de ferramentas de usinagem para fresamento, baseado em informações do catálogo da *Sandvik Coromant*. O sistema inicialmente extrai dados geométricos e topológicos de um arquivo *STEP AP 203*, acrescentando posteriormente informações técnicas do *STEP AP 238 (NC)*. Os autores realizaram um estudo sobre os principais aspectos influenciadores e influenciados no processo de fresamento, a partir do qual determinaram o mecanismo de pesquisa das ferramentas, cadastradas em um banco de dados relacional, de acordo com as especificações do fabricante. A otimização do sistema ocorre por meio de um modelo matemático. Como resultado final, obtêm-se um plano de processo otimizado e de acordo com a ISO 14649.

Sangolli et al., 2017, elaboraram um CAPP compatível com o *STEP AP 203* para peças prismáticas assimétricas. Assim como Farias, 2008, o sistema possui três módulos principais: (1) tradutor do arquivo *STEP*, baseado em sugestões e decomposição volumétrica, desenvolvido em linguagem *JAVA*; (2) banco de dados de material, ferramentas e parâmetros

de usinagem, produzido em *Oracle 11G* e (3) interface de planejamento de processos, que utiliza informações obtidas nos dois primeiros módulos. O sistema permite escolher a operação e a ferramenta para usinagem, carregando os dados de corte pré-cadastrados automaticamente.

Outros protocolos de aplicação do STEP podem ser utilizados para planejamento de processo e manufatura. Yifei et al., 2007, propuseram um CAPP para peças cilíndricas baseado no STEP AP 214, o qual apresentou como principal vantagem em relação ao AP 203 o acréscimo de dados de tolerância. Hua-bing, 2015, desenvolveu, em linguagem *VB.Net*, o *ST-ICAPP*, um CAPP compatível com o *SolidWorks* baseado no STEP-NC (AP 238), o qual valeu-se de tecnologias de inteligência artificial, como redes neurais, lógica difusa e algoritmos genéticos para a otimização do planejamento de processo. Pacheco et al., 2012, e Ferreira et al., 2016, verificaram a aplicação do STEP-NC para simulação de caminho de ferramenta e geração de código G em aplicações em máquinas CNC.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a realização do presente trabalho, foi necessário buscar conhecimentos acerca da conceituação e abordagens de planejamento de processos, de critérios para tomada de decisão no planejamento, de parâmetros de influência, de métodos de planejamento assistido por computador, de reconhecimento automático de características de usinagem, de arquivos neutros e de normas técnicas, entre outros. As principais definições e métodos, desde os clássicos até os mais modernos, os quais serviram de base para o desenvolvimento do trabalho com foco na fabricação de componentes, são abordados nesse capítulo.

### 2.1 Conceituação de Planejamento de Processo

A etapa produtiva de planejamento de processo abrange várias denominações, tais como: roteamento de máquina, processamento de material e engenharia de processo. Na fabricação de componentes mecânicos, o planejamento de processo pode ser definido como uma atividade a qual se estabelecem os processos de usinagem, os parâmetros de corte e os recursos de manufatura necessários para converter uma peça de sua forma inicial (matéria-prima bruta) para uma forma final determinada pelo projeto de engenharia. A responsabilidade de planejar processos requer quantidade significativa de tempo e de experiência. Dessa forma, os profissionais responsáveis por essa área habitualmente possuem um perfil determinado: engenheiros especialistas e veteranos. Por esses fatores, a demanda de processistas geralmente é maior que a oferta. Para contornar esse desequilíbrio, a automatização do planejamento de processo é uma alternativa incontestável [Chang e Wysk, 1985; Groover, 2013].

Os estudos para conceber sistemas de planejamento de processo assistidos por computador iniciaram-se há cerca de 40 anos. A importância de pesquisas nessa área justifica-se no intuito de desenvolver sistemas e arquiteturas CIM (*Computer Integrated Manufacturing*). Nesse sentido, o CAPP desempenha um papel fundamental, atuando como ponte para conectar o projeto (CAD) e a manufatura (CAM). Contudo, apesar dos inúmeros trabalhos referentes ao assunto, verifica-se relativo atraso no desenvolvimento de sistemas CAPP comerciais, comparando-se aos diversos CAD e CAM existentes [Xu, et al., 2011; Groover, 2013; Reddy et al., 2014].

No intuito de superar essa lacuna (e, dessa forma, minimizar a possibilidade de erros), uma interligação entre CAD/CAM deve abordar três metas principais: (1) obter um modelo uniforme de informações sobre o produto; (2) criar um sistema integrado de gerenciamento de banco de dados de manufatura e (3) elaborar um sistema CAPP para realizar a conexão a partir dos dados de (1) e (2). Normalmente, essa interface envolve um módulo de reconhecimento e interpretação de um arquivo com a definição do produto, com a finalidade de extrair informações específicas sobre a peça para cada aplicação [Sateesh e Mahesh, 2017].

O planejamento de processos também deve estar relacionado com o gerenciamento de produção, de forma que seja possível alcançar uma concordância entre a ocupação de máquinas e o tempo de espera do material em processo. Para isso, é essencial reduzir os períodos de transporte de peças entre máquinas. O planejamento de processo é, ainda, um ponto chave para a otimização de todo o cenário da produção, sendo, portanto, fundamental tanto para pequenas quanto para grandes indústrias [Halevi, 2003]. Os dados apresentados por Chang e Wysk, 1985, e Arunkumar, 2013, corroboram essa informação, visto que, segundo os autores, a etapa de planejamento de processo utiliza cerca de 40% do tempo de elaboração de um novo produto, constituindo-se como principal responsável pela qualidade, pelo custo e pela taxa de produção das peças.

O planejamento de processo assistido por computador produz inúmeros benefícios, segundo Chang e Wysk, 1985, e Groover, 2013: (1) redução da habilidade exigida para um planejador; (2) racionalização e padronização de processos; (3) planos mais lógicos, precisos e consistentes; (4) diminuição do tempo de processamento; (5) aumento da produtividade; (6) redução de custos; (7) capacidade de incorporação com outros módulos.

Um bom plano de processo deve satisfazer alguns requisitos, dentre os quais: (1) assegurar a qualidade da peça; (2) gerar produção compatível com a demanda; (3) garantir baixos custos de produção; (4) melhorar as condições de trabalho; (5) promover o desenvolvimento da tecnologia de fabricação. Para isso, o sistema CAPP deve ser eficiente, possuindo algumas características particulares: (1) possuir conexão com projeto e manufatura, utilizando o primeiro como dado de entrada para gerar saídas compatíveis com o segundo; (2) ser extensível, adaptável e customizável, tanto para empresas quanto para novos processos; (3) adquirir, caracterizar e manipular conhecimentos, garantindo integridade e consistência; (4) fornecer heurísticas para redução do tempo que não agrega valor ao produto, envolvendo

os usuários em apenas algumas etapas de tomada de decisão; (5) apresentar uma interface amigável para o usuário [Xu et al., 2011; Arunkumar, 2013].

O plano de processo, ademais, deve conter uma série de detalhes, no intuito de auxiliar o operador a configurar corretamente a máquina e obter o resultado desejado para a peça. Assim, um plano detalhado deve conter a rota, o processo, os parâmetros e as máquinas e ferramentas necessárias para a produção. Em um ambiente industrial, portanto, um plano de processo completo possui várias funções, dentre as quais: (1) escolha da matéria-prima inicial, (2) seleção e sequenciamento de operações de usinagem; (3) definição do método de fixação da peça; (4) seleção de ferramentas; (5) determinação das dimensões e tolerâncias para usinagem; (6) seleção da condição de usinagem e cálculo do tempo de cada operação; (7) geração do código NC para fabricação da peça [Chang e Wysk, 1985; Arunkumar, 2013].

Para a correta implementação de um sistema automatizado de planejamento de processo, também é necessária uma análise abrangente do volume de produção desejado, do número de famílias de peças, da capacidade e das condições de manufatura da fábrica [Chang e Wysk, 1985; Arunkumar, 2013].

## **2.2 Abordagens de Planejamento de Processo**

O planejamento de processos permite traduzir as informações do projeto em linguagem de manufatura. Por essa razão, é um ponto crítico na ligação entre eles. Para realizar essa integração, é necessário que o planejamento de processo seja automatizado, da mesma forma que o projeto (CAD) e a fabricação (CAM) são atualmente implementados comercialmente. Para a concepção desses sistemas, duas abordagens de planejamento de processo assistido por computador são habitualmente utilizadas: variante e generativa. Há ainda uma terceira sistemática, denominada semi-generativa ou generativa interativa.

### **2.2.1 Planejamento Variante**

O sistema de planejamento de processo variante utiliza o conceito de Tecnologia de Grupo como sua base fundamental, valendo-se da similaridade entre as peças para recuperar planos de processo existentes. Para isso, após a determinação das famílias de componentes, é necessário elaborar um plano de processo padrão para cada grupo, o qual deve possuir todas

as etapas e operações necessárias para usinar qualquer peça da família. Esse plano padrão deve ser armazenado permanentemente em uma base de dados, com o código da família como seu identificador. O mecanismo de recuperação utiliza esse código para buscar o plano padrão no banco de dados. A partir da recuperação, é possível realizar as modificações necessárias para adequar o plano ao novo componente [Chang e Wysk, 1985]. A Figura 2.1 ilustra a estrutura de um planejamento de processo variante.

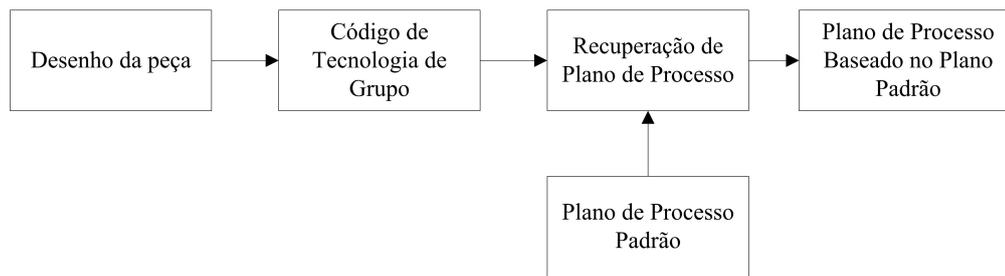


Figura 2.1 – Estrutura de um planejamento de processo variante [Adaptada de Lorini, 1993; Yusof e Latif, 2014].

De maneira geral, os sistemas variantes possuem dois estágios operacionais: uma etapa preparatória e uma etapa de produção. A fase preparatória requer trabalho intensivo (podendo exigir longo período de tempo), uma vez que consiste na codificação, classificação e agrupamento de componentes em famílias, além da elaboração e armazenamento dos planos padrões para cada grupo. A eficácia do sistema variante é consequência direta dessa etapa, já que a maior parte das decisões é tomada durante a preparação. O estágio de operação, por sua vez, ocorre a partir do momento no qual o sistema está apto para ser utilizado e resume-se a criação de planos de processo para novos componentes a partir da edição do plano padrão. A etapa de recuperação dos planos por meio do código de Tecnologia de Grupo, portanto, também acontece nessa fase [Chang e Wysk, 1985; Arunkumar, 2013].

A principal desvantagem do processo variante constitui-se no fato desse sistema não possuir armazenamento de conhecimento de processo, ou seja, não incorpora a implementação de uma lógica para tomada de decisões. Os planos padrões são elaborados manualmente pelos processistas, possuindo a capacidade do sistema de manufatura integrada a eles. Por consequência, no caso de acontecer uma grande renovação na fábrica, a atualização dos planos faz-se obrigatória. Além disso, a necessidade de modificar continuamente o plano padrão para cada componente adicionado e a ausência de automação total são grandes

inconvenientes dessa abordagem. Em contrapartida, esse método apresenta algumas vantagens: (1) uma variedade de componentes pode ser planejada a partir do mesmo plano padrão; (2) programação e instalação mais simples; (3) processista possui o controle sobre o plano final; (4) facilidade para utilização [Chang e Wysk, 1985; Arunkumar, 2013].

Esse tipo de estrutura possui aplicações em diferentes áreas da indústria, sendo, normalmente, a primeira escolha para iniciar o processo de automação do planejamento de processo. É importante ressaltar, no entanto, que cada emprego distinto dessa abordagem requer a reelaboração da base de dados de famílias de peças e planos padrão, que pode demandar longos períodos para definição e implementação de um sistema de codificação para os componentes [Chang e Wysk, 1985].

### 2.2.2 Planejamento Generativo

A abordagem generativa representa o principal foco dos estudos sobre planejamento de processo assistido por computador nos últimos anos. O objetivo principal desse método é criar um plano de processo para uma nova peça de forma automática, sem intervenção humana. Para esse fim, é necessário criar um banco de dados de informações e conhecimentos de manufatura, o qual, em conjunto com a descrição do modelo de projeto, permite o sequenciamento de operações do componente e a seleção de máquinas e ferramentas. Dessa maneira, o sistema torna-se habilitado para replicar o processo de tomada de decisão do engenheiro processista [Chang e Wysk, 1985; Groover, 2013; Arunkumar, 2013]. A Figura 2.2 ilustra a estrutura fundamental de um sistema generativo de planejamento de processos.

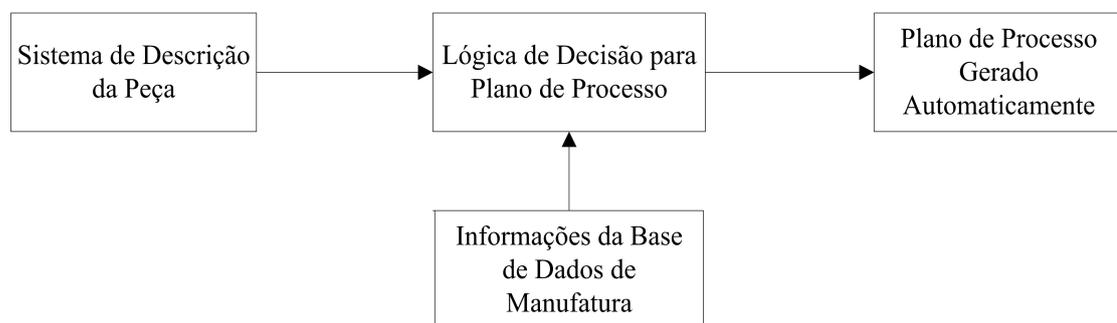


Figura 2.2 – Estrutura fundamental de um sistema generativo [Adaptada de Lorini, 1993; Yusof e Latif, 2014].

Sob essa perspectiva, em linhas gerais, para uma implementação bem-sucedida do sistema generativo são necessários três fatores elementares: (1) descrição clara e precisa da peça a ser produzida, em um formato compatível com sistemas computacionais; (2) base de dados de fabricação unificada e (3) identificação e captura da lógica de tomada de decisão. A descrição da peça pode ser realizada por meio de modelos geométricos de sistemas CAD ou códigos GT, enquanto que o banco de dados deve armazenar as informações de fabricação e o conhecimento humano, além de permitir facilmente alterações para adaptação ao sistema específico. As informações codificadas na base de conhecimento são, então, aplicadas na lógica de tomada de decisão sobre o planejamento, formando o denominado mecanismo de inferência do sistema, o qual é utilizado para sintetizar um novo plano de processo para cada peça indicada [Chang e Wysk, 1985; Groover, 2013; Arunkumar, 2013].

Essa abordagem apresenta três vantagens evidentes em relação à variante: (1) geração de planos de processo plausíveis de forma rápida; (2) novas peças são planejadas facilmente, de maneira semelhante às existentes, sem necessidade de edição de um plano padrão e (3) potencial de integração com a fabricação automatizada. Por outro lado, o principal problema reside na complexidade para conceber esse tipo de sistema especialista, uma vez que replicar computacionalmente a capacidade de processistas experientes ainda é um grande obstáculo [Chang e Wysk, 1985; Groover, 2013].

### **2.2.3 Planejamento Semi-generativo**

Conforme sua conceituação básica, o planejamento de processo generativo é, idealmente, um sistema com toda a lógica de decisão incorporada, com habilidade de gerar um plano de processo sem necessidade de intervenção humana. No entanto, os sistemas utilizados industrialmente não possuem esse estágio de desenvolvimento, constituindo, portanto, uma versão “atenuada” do método generativo. Assim, sistemas com alguma capacidade de lógica de decisão embutida podem ser classificados em uma categoria alternativa dos sistemas generativos, denominada semi-generativa ou generativa interativa, mesmo que variáveis como limitações e recursos do processo (máquinas e ferramentas) sejam escolhidas a partir da interação com o usuário. Normalmente, esses sistemas contêm lógicas que selecionam previamente algumas opções de máquinas e ferramentas capazes de realizar a operação desejada, contribuindo para uma elaboração rápida de planos de processo mais

consistentes. Nessa abordagem, portanto, os sistemas generativos interativos são uma ferramenta com a finalidade de transferir parte do trabalho manual do processista para a linguagem computacional, combinando características vantajosas tanto de sistemas variantes quanto de generativos.

## **2.3 Principais etapas do planejamento de processo**

Considerando-se a fabricação de componentes, especialmente por processos de usinagem, constata-se que o planejamento de processo implica em uma série de decisões do engenheiro processista, as quais se tornam restrições para todas as etapas posteriores. As principais abordagens existentes no intuito de otimizar o planejamento de processo consideram a velocidade de corte, devido a sua relação fundamental com o tempo de usinagem. No entanto, sabe-se que a escolha de operações, máquinas, ferramentas e fixações também produzem algumas limitações, devendo, portanto, receber uma análise detalhada de seu impacto em relação ao processo produtivo, como um todo.

### **2.3.1 Escolha das operações**

Na fabricação, inúmeros fatores afetam a seleção e o sequenciamento de operações, como a forma da peça, a tolerância especificada no projeto, o acabamento de superfície, o tipo de material, o tamanho de lote, o tempo de operação e o custo da produção. A elaboração de um plano de processo adequado não depende exclusivamente da experiência do engenheiro processista, mas também é resultado da sequência de decisões tomadas. Uma decisão equivocada, como a inserção de uma operação indevida, por exemplo, pode resultar em restrições artificiais, produzindo um impacto no custo e na qualidade final do produto. Assim, a escolha e a ordenação das operações necessárias para a peça é comumente realizada antes de selecionar as condições de corte, máquinas e ferramentas, e é baseada em dois objetivos principais: obter o menor tempo e o menor custo. Na maior parte das pesquisas, o critério de custo é utilizado como indicador chave para a definição dos processos de usinagem [Chang e Wysk, 1985; Halevi, 2003; Cosic et al., 2007; Xu et al., 2011].

As operações selecionadas, associadas às respectivas condições de corte e ferramentas, determinam os valores de rugosidade que o processo obtém. Conseqüentemente, é

fundamental compreender as implicações de cada decisão sobre o resultado final da peça, de forma que seja possível atender às especificações de projeto [Halevi, 2003].

O planejamento de processos de usinagem é bastante abrangente, uma vez que pode existir uma grande variedade de combinações de máquinas e ferramentas capazes de produzir a peça conforme as especificações de projeto. Essa característica multifatorial torna a tarefa de sequenciamento de operações complexa. Halevi, 2003, e Cosic et al., 2007, propõem que essa seleção seja baseada na capacidade do processo utilizado e em seus respectivos limites, valendo-se do conceito de relações de precedência baseadas em restrições técnicas e econômicas (tecnológicas, da peça, de material, de máquina e de ferramentas) e buscando utilizar os maiores valores possíveis para os parâmetros de corte (respeitando as recomendações dos fabricantes), com a finalidade de reduzir ao máximo o número de etapas de corte por operação. Apesar de o método mais econômico consistir em usinar a peça em um único passe, na grande maioria das vezes existem limitações que impedem que a usinagem ocorra dessa forma.

### **2.3.2 Escolha das máquinas**

A seleção de uma máquina envolve inúmeros fatores, dentre os quais: (1) dimensão física; (2) potência; (3) torque no fuso; (4) precisão; (5) velocidades e avanços disponíveis; (6) número de ferramentas; (7) tempo de troca de ferramenta; (8) taxa de produção por hora e (9) tamanho de lote. O método mais comumente utilizado para a escolha da máquina consiste em realizar uma estimativa dos parâmetros necessários, sobretudo da potência, a partir das dimensões da peça e sua demanda de precisão. Contudo, a partir dessa abordagem, as especificações da máquina acabam tornando-se restrições artificiais na seleção de operações, o que é indesejável, visto que para gerar um plano de processo o mais econômico possível, esse tipo de limitação deve ser evitado [Halevi, 2003].

Para isso, é recomendado dividir as atividades do plano de processo em duas etapas. A primeira considera somente limitações tecnológicas e de engenharia, determinando os parâmetros de corte com o auxílio de dados recomendados pelo fabricante da ferramenta, de tal modo que a peça seja produzida de forma econômica e respeite às especificações de projeto. A segunda etapa corresponde à análise das máquinas disponíveis no parque fabril. A principal dificuldade encontrada nesse estágio é ajustar as operações aos equipamentos

disponíveis. Para resolvê-la, uma abordagem de natureza combinatória é necessária, dado que se devem elencar todas as alternativas possíveis e disponíveis em termos das instalações industriais. Dessa forma, a seleção de máquinas torna-se um problema matemático e de engenharia, cuja solução é buscar a melhor sequência de operações e utilização da máquina

O tamanho de lote é outra variável que impacta na seleção de máquinas. Lotes menores podem, em algumas circunstâncias, ser usinados em uma única máquina, enquanto que a produção de grandes quantidades normalmente é dividida em várias, cada qual adequada para determinada operação. A precisão requisitada em projeto é um cuidado adicional, uma vez que o equipamento deve ser capaz de atendê-la. Em alguns casos, um único centro de usinagem ou torno CNC pode ser capaz de obter essa especificação, enquanto que em outros sistemas podem ser necessário o uso de inúmeras máquinas. Dessa maneira, o planejador deve possuir conhecimento acerca das especificações das máquinas e sua carga aceitável de trabalho. Porém, durante a etapa de planejamento, determinar essas condições com exatidão é uma tarefa complexa, adotando-se, como solução genérica, a seleção da máquina com as melhores especificações. Contudo, esse fato normalmente sobrecarrega a máquina escolhida e subutiliza as demais. Para evitar essa condição, o processista deve gerar planos alternativos e também consultar o encarregado do setor, de forma que sejam possíveis ajustes nos planos de processos gerados (planejamento com características interativas) [Chang e Wysk, 1985; Halevi, 2003].

A ocorrência de vibrações ocasiona inúmeros inconvenientes durante o processo de usinagem, constituindo-se, portanto, em um importante fator de análise em relação à seleção das máquinas. Vibrações em excesso comprometem consideravelmente o acabamento superficial da peça, bem como reduzem a vida útil da ferramenta, devido à ocorrência de choques entre o inserto e a peça. Alguns parâmetros, como avanço e profundidade de corte, influenciam diretamente na questão das vibrações. Um avanço baixo, assim como o aumento da profundidade de corte, tendem a amplificar a vibração. Utilizar a máquina com rotação próxima à nominal também pode aumentar a incidência de vibrações. Nestes casos, é recomendável desligar a máquina imediatamente e alterar as condições de usinagem, adequando-as ao equipamento [Diniz et al., 2013; Ferraresi, 2017].

A seleção de uma máquina vincula-se também a restrições de energia. Inicialmente, sem a determinação dos parâmetros de corte, a restrição existente corresponde às dimensões máximas admissíveis para a máquina (restrições físicas). Após a obtenção dos valores dos

parâmetros, no entanto, pode-se estimar a potência e rotação necessárias para a operação, compará-las com as especificações das máquinas da fábrica e, assim, selecionar a máquina mais adequada. Se a potência resultante da operação teórica for igual ou menor à potência da máquina, os parâmetros determinados anteriormente podem ser utilizados. Caso contrário, são necessários alguns ajustes, a fim de diminuir a potência requisitada. A alteração mais lucrativa é a redução da velocidade de corte, uma vez que a mesma também contribui para o aumento da vida útil da ferramenta. Assim, a ordem de modificação de condições de corte é: (1) velocidade de corte; (2) taxa de avanço e (3) profundidade de corte. Também é importante ressaltar que não existe vantagem em termos de tempo de usinagem ao utilizar uma máquina com potência disponível muito superior à potência necessária [Halevi, 2003].

Halevi, 2003, sintetiza os três estágios principais para a seleção de uma máquina: (1) verificação das dimensões principais da peça em relação às dimensões máximas da máquina; (2) conferência entre a potência e rotação necessárias para a operação e as nominais do equipamento; (3) estabelecimento de um critério baseado na comparação de tempo de usinagem e custo (utilizado apenas quando ainda houver muitas possibilidades de máquinas). A Tabela 2.1 ilustra as principais restrições examinadas na seleção das máquinas, bem como suas respectivas considerações.

Tabela 2.1 – Principais restrições examinadas na seleção das máquinas.

<b>Restrição</b>	<b>Consideração</b>
Físicas	Verificar se as dimensões máximas da peça são menores que as máximas aceitáveis da máquina
Energéticas	Apurar se a potência e a rotação necessárias para a usinagem são suportadas pela máquina
Precisão	Analisar se a máquina selecionada permite de usinar a peça com a precisão requerida

### 2.3.3 Escolha da velocidade de corte

A seleção de determinada velocidade de corte envolve inúmeros fatores: o tipo de usinagem (acabamento, média ou desbaste), a potência e a rotação da máquina e a classe da ferramenta escolhida. Seu valor pode ser obtido de inúmeras fontes, como catálogos de fabricantes de ferramentas, manuais de usinagem, livros técnicos e sistemas informatizados. No entanto, esses dados constituem-se apenas em um ponto de partida, uma vez que é

necessário verificar a viabilidade da utilização da velocidade recomendada, adequando-a, caso necessário, às restrições de máquina, material e ferramenta a ser utilizada.

O tipo de usinagem se estabelece como importante parâmetro para a seleção da velocidade de corte. Em operações de desbaste, essa velocidade deve ser mais baixa, no intuito de, associada com avanços e profundidades de corte maiores, retirar grande quantidade de cavaco na unidade de tempo. Já para operações de acabamento, a velocidade deve ser mais alta, com a finalidade de, relacionada a avanços e profundidades de corte menores, atender às especificações de rugosidade definidas em projeto. A determinação de uma faixa de valores recomendados para a velocidade de corte, portanto, é fundamental. Geralmente, o limite inferior consiste na velocidade crítica, abaixo da qual ocorrem fenômenos indesejáveis, como a formação da aresta postiça de corte [Diniz et al., 2013; Ferraresi, 2017].

A escolha da velocidade de corte está também associada com a vida útil da ferramenta, segundo relação definida inicialmente por Taylor: quanto maior a velocidade, menor a vida útil. Portanto, a decisão tomada pelo processista não diz respeito apenas ao valor da velocidade, como também da vida útil relacionada à respectiva ferramenta. O custo e o tempo de usinagem, o custo do ferramental, o tempo de troca de ferramenta e a taxa de produção horária são igualmente afetados por essa decisão. Um aumento da velocidade de corte acarreta em redução do tempo de usinagem e aceleração significativa do desgaste da aresta, com consequente aumento no tempo de troca e no custo de ferramental. Uma velocidade substancialmente baixa, por sua vez, reduz o desgaste do inserto (vida longa da ferramenta), embora aumente o tempo efetivo de usinagem (com consequente baixa produção horária e elevados custos com máquinas e operários), resultando, igualmente, em um elevado tempo total de produção da peça [Diniz et al., 2013; Machado et al., 2015; Ferraresi, 2017].

Dessa forma, pode-se inferir a existência de um intervalo de máxima eficiência para a seleção da velocidade, determinado com base nos limites de mínimo custo e máxima produção. Nesse intervalo, todo aumento de velocidade representa um aumento da produção, ainda que com aumento de custos. Um valor abaixo da velocidade de mínimo custo caracteriza longos tempos de corte, enquanto que um valor acima da velocidade máxima de produção acarreta no aumento do número de trocas de ferramental [Machado et al., 2015].

Destaca-se, portanto, que a escolha da velocidade de corte não é somente uma decisão técnica, como também econômica, uma vez que influencia em inúmeros parâmetros referentes ao processo de fabricação. Desse modo, considera-se a velocidade como uma variável a qual

pode ser modificada, dentro de uma determinada faixa, a fim de obter uma usinagem econômica.

### 2.3.4 Escolha das ferramentas

A seleção de ferramentas é uma das funções essenciais de um sistema CAPP, visto que afeta a determinação de parâmetros de usinagem, a taxa de produção, o custo e a qualidade do produto. A escolha incorreta de uma ferramenta pode ocasionar a elaboração de planos de processo inviáveis por fatores técnicos e/ou econômicos, os quais devem ser descartados e retificados, aumentando assim o tempo improdutivo de fabricação. Dessa forma, é fundamental abordar minuciosamente a seleção de ferramentas, considerando o estudo de vários fatores: forma da pastilha, classe do inserto, tipo de suporte da ferramenta e fixação da pastilha no suporte. Em vista da existência de inúmeras considerações, deve-se optar pela ferramenta com a melhor aproximação aos parâmetros ideais [Halevi, 2003; Xu et al., 2011].

No planejamento de processos, a seleção de ferramentas usualmente é abordada após a seleção do material, das operações, das condições de usinagem e das máquinas. Essa lógica de solução justifica-se devido à variedade de ferramentas presente em uma fábrica, fato esse que praticamente assegura a existência de uma ferramenta compatível com as decisões anteriormente tomadas. As diferentes formas, diâmetros, comprimentos, números de dentes e materiais de insertos devem ser consideradas no momento da seleção. De maneira análoga à seleção de máquinas, escolher uma ferramenta previamente, sem o conhecimento de todas as demais condições, estabelece restrições artificiais [Chang e Wysk, 1985; Halevi, 2003].

Uma prática comum para a escolha das ferramentas é vinculá-las a determinadas operações. Para isso, deve-se dividi-las em internas, externas e especiais (rosqueamento, sangramento e corte), cada qual com os insertos correspondentes [Halevi, 2003]. A observação do ângulo de posição da aresta de corte ( $K_r$ ) também é fundamental, dada sua influência na distribuição de tensões de corte e na direção de saída do cavaco, bem como na ocorrência de flexão em peças esbeltas em operações de torneamento cilíndrico externo. Contudo, esse ângulo é usualmente limitado pelo porta-ferramenta escolhido [Machado et al., 2015].

Os principais parâmetros vinculados à seleção de ferramentas são: profundidade de corte ( $ap$ ), avanço ( $f$ ) e velocidade de corte ( $V_c$ ), cada qual com seus limites máximos e

mínimos. É aconselhável a utilização de uma faixa de valores contida entre esses limites, fornecida pelo fabricante do inserto em função do material da peça e da ferramenta de corte. A Tabela 2.2 mostra as considerações gerais acerca da influência dos principais parâmetros de corte na usinagem de peças.

Tabela 2.2 - Considerações sobre os principais parâmetros de corte na usinagem de peças.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Considerações</b>
Avanço ( $f$ )	Muito elevado	Aumenta o desgaste da ferramenta
	Pequeno	Formação de abrasivo
Profundidade de corte ( $ap$ )	Alta	É limitada pelas dimensões do inserto
	Muito baixa	Não ocorre formação de cavacos
Velocidade de corte ( $Vc$ )	Muito elevada	Altera o mecanismo de desgaste do inserto
	Baixa	Formação da aresta postiça de corte

É recomendável, sob a ótica econômica, a utilização do menor número possível de ferramentas para usinar uma peça, visto que a substituição manual adiciona tempo e custo de manuseio ao processo. Dessa forma, comumente são realizadas, de forma ininterrupta, todas as operações de desbaste/acabamento, as quais, possivelmente, utilizam as mesmas ferramentas e porta-ferramentas, ou ferramentas diversas presentes na mesma máquina [Halevi, 2003].

A aresta de corte de uma ferramenta pode ser afetada por inúmeras circunstâncias: (1) altas temperaturas do processo de corte; (2) carregamentos mecânicos e térmicos cíclicos; (3) reações químicas com a superfície da peça e (4) altas tensões normais e tangenciais. Para suportar a influência desses fatores, os materiais para ferramentas devem apresentar uma série de propriedades: (1) dureza a quente; (2) tenacidade ao impacto suficiente para evitar falha por fratura; (3) alta resistência ao desgaste abrasivo; (4) estabilidade química; (5) alta resistência ao cisalhamento; (6) alta resistência ao choque térmico; (7) alta resistência ao impacto. No entanto, encontrar um material que atenda a todas essas características é uma tarefa complexa, uma vez que, por exemplo, dureza e tenacidade são duas propriedades distintas e inversamente proporcionais. Portanto, para adequar os materiais de ferramentas existentes às aplicações, deve-se priorizar algumas propriedades, como também modificar os valores de velocidade de corte do processo (maiores para acabamento, menores para desbaste) [Diniz et al., 2013; Machado et al., 2015].

Com a finalidade de atender aos diversos processos de usinagem, existem inúmeras classes de ferramentas comerciais, as quais se associam ao tipo de material a ser usinado e às condições de usinagem. Essa diversidade é desenvolvida a partir da modificação dos teores de carbonetos presentes no material do inserto. A norma ISO 513, 2004, apresenta uma classificação das classes de ferramentas, na qual a letra de designação dos metais (P, M, K, N, S, H) é acompanhada de um número que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta. Quanto maior esse número, o qual geralmente varia entre 01 e 50, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste. Classes com números maiores apresentam maior tenacidade (essencial para operações de desbaste, devido à variação de esforços e da dureza da peça usinada), enquanto que classes de numeração menor possuem maior resistência ao desgaste (ideal para acabamento, em função das altas velocidades de corte). As classes intermediárias associam-se com processos de desbaste leve (usinagem média), com velocidades e avanços médios. Geralmente, cada fabricante apresenta suas classes de ferramenta em catálogos comerciais, com as respectivas faixas de trabalho e aplicações adequadas para elas. [Diniz et al., 2013; Machado et al., 2015; Ferraresi, 2017].

Algumas características do inserto são importantes para determinar sua correta aplicação, dentre elas: forma da pastilha, angulações, tipo de inserto e raio de ponta. É recomendável utilizar o formato de pastilha mais robusto possível, uma vez que, assim, ocorre uma melhor dissipação de calor e, conseqüentemente, permite-se um aumento da velocidade de corte sem perdas na vida útil da ferramenta. Em catálogos de fabricantes, as formas de pastilhas são comumente relacionadas a determinadas operações. As angulações relevantes resumem-se aos ângulos de entrada, de saída e de folga, enquanto que o tipo de inserto define a necessidade de orifícios de fixação e o uso de quebra-cavacos (sobretudo quando produzirem-se cavacos em forma de fita). Como a maior parte dos sistemas CAPP baseia-se em um banco de dados de ferramentas existentes em uma indústria, esses valores característicos encontram-se vinculados ao inserto disponível, impondo a seleção de valores próximos aos adequados para a operação [Halevi, 2003].

O raio de ponta determina a resistência mecânica da aresta de corte da ferramenta, bem como influencia diretamente no acabamento superficial da peça (associado ao avanço). De forma geral, raios de ponta grandes garantem maior resistência e melhor acabamento superficial, mas também podem proporcionar o aumento das vibrações e o conseqüente lascamento da aresta de corte. A redução do raio é recomendada para operações de

acabamento com pequena profundidade de corte [Diniz et al., 2013; Machado et al., 2015]. De maneira análoga aos demais parâmetros geométricos do inserto, o valor do raio de ponta é imposto a partir da seleção do inserto disponível no ambiente industrial.

A seleção dos insertos deve ser feita de forma conjunta com a escolha do porta-ferramentas, uma vez que ambos consistem em uma única ferramenta de trabalho. Por consequência, a tomada de decisão deve considerar tanto restrições referentes ao inserto quanto ao porta-ferramenta. As dimensões principais do porta-ferramenta tem duas funções básicas: posicionar corretamente a aresta de corte na linha central da peça (altura e largura da haste) e fornecer sustentação suficiente (comprimento do porta-ferramenta). É desejável utilizar porta-ferramentas com inclinação negativa, no intuito de suportar forças de corte mais elevadas. Os porta-ferramentas apresentam três versões, relacionadas ao movimento da ferramenta durante as operações: direita, esquerda e neutra. Normalmente, a seleção do porta-ferramentas ocorre a partir de sua compatibilidade com a máquina escolhida, limitando, deste modo, o número de ferramentas que podem ser designadas. Caso mais de um porta-ferramentas seja adequado, costuma-se optar pelo que possui maior tamanho de haste [Halevi, 2003].

### 2.3.5 Outras considerações

Algumas ponderações acerca do projeto da peça, dos dispositivos de fixação, do volume de produção e do número de famílias de peças também são importantes para a correta elaboração de um plano de processo.

O projeto de um componente tem a função de fornecer a base essencial para o planejamento de processo. Para isso, é necessária a compreensão de todas as informações detalhadas no arquivo proveniente do sistema CAD. A presença de qualquer inconsistência no projeto do componente acarreta em decisões de planejamento equivocadas e, consequentemente, em planos de processo ineficientes [Arunkumar, 2013].

O planejamento de *setup* e os dispositivos de fixação contribuem para garantir a precisão de cada processo de usinagem e, por conseguinte, do produto final. Por esse motivo, as tolerâncias de projeto são uma condição relevante para a tomada de decisão referente a esses dois aspectos [Chang e Wysk, 1985; Xu et al., 2011].

O volume de produção também causa implicações na concepção do plano de processo. Como regra básica, utilizam-se máquinas e ferramentas especiais para produção em massa, enquanto que equipamentos de uso geral são empregados em pequenos lotes. Habitualmente, a economia de produção é fator decisivo para essa deliberação.

O número de diferentes famílias de peças influencia, sobretudo, na abordagem de planejamento de processo a ser adotada. Um sistema variante não é recomendado caso existam muitas famílias e poucos componentes semelhantes, visto que haveria a necessidade de um enorme esforço na etapa preparatória. Em uma situação como essa, o método generativo seria mais adequado. Em contrapartida, para um número moderado de famílias de componentes ou para peças com alto grau de similaridade, a abordagem variante justifica-se como a alternativa mais econômica e simples e, portanto, mais utilizada [Chang e Wysk, 1985].

A avaliação das inúmeras alternativas de plano de processo existentes para fabricar determinada peça apresenta-se como uma questão crucial para um sistema CAPP, visto que consistem em maneiras distintas de realizar o mesmo trabalho. Apesar de aparentar ser um benefício, a análise desse ponto é considerada complexa, uma vez que dificulta a obtenção de um plano de processo otimizado [Xu et al., 2011].

## 2.4 Principais métodos de planejamento de processo

Em suas pesquisas, Xu et al., 2011, e Yusof e Latif, 2014, verificaram a utilização de cerca de 10 métodos distintos para o planejamento de processo nas últimas duas décadas: (1) baseado em características; (2) baseado em conhecimento; (3) redes neurais; (4) algoritmos genéticos; (5) lógica difusa; (6) redes de Petri; (7) baseada em agentes; (8) baseada na Internet; (9) em conformidade com o STEP e (10) blocos funcionais.

A tecnologia baseada em características possui duas abordagens principais: reconhecimento de geometrias e projeto por *features*. A primeira possui um domínio complexo e infinito, fato que proporciona a elaboração de sistemas com estrutura voltada para características específicas. A segunda proposta, por sua vez, possibilita uma interpretação mais direta das informações advindas do CAD, conjuntura que facilita a automatização do CAPP. No entanto, mesmo com a vantagem apresentada pelo projeto por *features*, os sistemas baseados em reconhecimento de geometrias ainda são mais utilizados [Xu et al., 2011].

A abordagem baseada em sistemas especialistas é vista como uma alternativa apropriada para auxiliar no planejamento de processos, uma vez que permite armazenar o conhecimento de profissionais e simular a habilidade humana para a solução de problemas. Dentre seus inúmeros benefícios, ressaltam-se as decisões práticas, a eficiência e a qualidade. No entanto, é necessária certa atenção em sua elaboração, no intuito de não gerar um sistema inflexível ou tendencioso [Xu et al., 2011].

O uso de redes neurais em CAPPs representa algumas vantagens, como rapidez no reconhecimento de características complexas, facilidade de cálculo, robustez e capacidade de derivar regras por meio de treinamento (o que permite considerar várias restrições paralelamente). Contudo, a ausência de métodos eficientes para a determinação do conjunto de treinamento apropriado para cada aplicação limita o uso dessa abordagem [Xu et al., 2011].

Os algoritmos genéticos (GA) são utilizados, sobretudo, para a otimização de um sistema CAPP. Essa técnica é bastante robusta, porém não garante a definição de uma solução ideal para o problema, muito embora encontre alternativas aceitáveis de maneira relativamente rápida. A principal desvantagem desse método é a necessidade de codificá-lo e estruturá-lo cautelosamente. [Xu et al., 2011; Yusof e Latif, 2014].

Conforme Xu et al., 2011, a lógica difusa e as redes de Petri geralmente manifestam-se em conjunto com outros métodos, visto que apresentam tanto vantagens quanto desvantagens significativas.

A possibilidade de dividir o planejamento de processo de uma peça complexa em problemas menores é a principal vantagem da abordagem baseada em agentes. Essa divisão torna os problemas controláveis por uma quantidade de entidades inteligentes, denominadas agentes, as quais atuam em conjunto. No entanto, essa tecnologia ainda apresenta algumas limitações, como a seleção adequada da construção de sistema para o agente e a abordagem correta para seu encapsulamento [Xu et al., 2011].

A Internet também é utilizada como meio de integração e comunicação de sistemas CAPP, visando garantir a competitividade no mercado e o atendimento das demandas dos clientes. Essa abordagem permite a geração de planos de processo realistas e econômicos por meio do CAPP, bem como possibilita interações a mudanças inesperadas e avaliação da manufaturabilidade. Geralmente, as aplicações que utilizam a Internet atuam combinadas com outros métodos, sobretudo com o STEP [Xu et al., 2011; Yusof e Latif, 2014].

O método em conformidade com o STEP manifesta como notável benefício a utilização de dados obtidos por meio de um padrão em toda a cadeia de processo do produto na manufatura, ampliando, por conseguinte, a capacidade de integração do CAPP com os demais sistemas. A técnica de blocos funcionais, de desenvolvimento mais recente em comparação às demais, possibilita a tomada de decisões adaptativas em relação às alterações no tempo de execução, além de possuir potencial de integração com programação dinâmica e sistemas NC [Yusof e Latif, 2014].

Nota-se que, usualmente, os sistemas de planejamento de processo não se restringem a apenas um método, mesclando os principais benefícios de duas ou mais abordagens. No período entre 2002 e 2013, Yusof e Latif, 2014, verificaram um grande destaque para as técnicas baseadas em características, em conhecimento, algoritmos genéticos e em conformidade com o STEP, sendo a última a de maior relevância, conforme ilustrado na Figura 2.3.

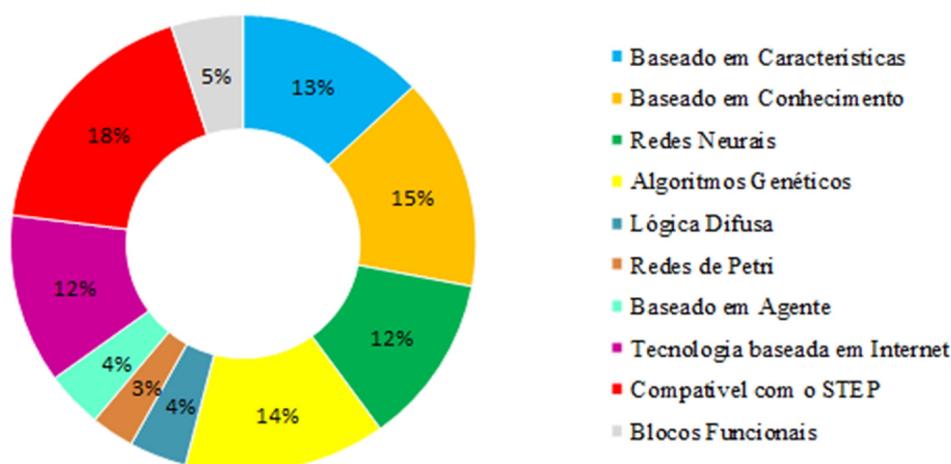


Figura 2.3 – Métodos adotados para sistemas CAPP entre 2002-2013 [Adaptada de Yusof e Latif, 2014].

## 2.5 Formatos de arquivo neutro

Os formatos de arquivo neutro, também designados padrões de troca de dados, podem ser conceituados como estruturas que permitem a transferência de informações da peça projetada para diferentes plataformas CAD ou entre sistemas CAD/CAPP/CAM. Nota-se,

entretanto, que a maioria desses padrões não transmite dados diretamente, necessitando de etapas de pré-processamento e pós-processamento para sua correta aplicação. O pré-processador é fundamental para realizar a conversão do formato interno de representação do sistema CAD para o formato de arquivo neutro, enquanto que o pós-processador realiza a conversão dos dados provenientes do padrão para permitir a visualização e edição da peça (no caso de sistemas CAD) ou o reconhecimento de características (em CAPPs) [Sateesh e Mahesh, 2017].

A tendência de manufatura ágil, na qual empresas se unem no intuito de fabricar um produto com qualidade, menor custo e com capacidade para atender à demanda também colaborou para o desenvolvimento dos formatos de arquivos neutros, uma vez que sua interoperabilidade permite o compartilhamento instantâneo de informações. Dessa maneira, as empresas podem ampliar o desenvolvimento de projetos e fabricação para partes distintas do mundo, uma necessidade na era da globalização. A transferência de toda a geração de informações para a etapa de projeto implica na redução significativa dos custos, com alguns estudos indicando que alterações no projeto despenderiam cerca de dez vezes menos que nos últimos estágios do ciclo de vida do produto [Bhandarkar e Nagi, 2000].

Os sistemas CAD/CAM comerciais utilizam vários formatos distintos de arquivo neutro, como o STL (*Stereolithography*), DXF (*Drawing Exchange Format*), IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) e STEP. Os dois últimos tornaram-se mais populares, visto que as evoluções obtidas nesses formatos tornaram o DXF e o STL obsoletos. O STEP destina-se ao compartilhamento dinâmico de dados de produtos entre sistemas diferentes por meio da interface SDAI (*Standard Data Access Interface*), sendo reconhecido por quase todos os *softwares* CAD comerciais, enquanto que o IGES limita-se à troca de dados de geometria. Outra importante diferença reside no fato de o IGES concentrar-se apenas no significado dos dados, ao passo que o STEP considera também as relações entre eles. [Kumar, 2005; Malleswari, 2013; Venu et. al, 2015].

O IGES surgiu como a principal solução para a troca de dados de um sistema CAD. Entretanto, esse formato de arquivo neutro apresentou alguns problemas significativos: (1) necessidade de pré e pós-processadores muito robustos, visto que possui várias maneiras de capturar a mesma informação; (2) perda de alguns dados no momento da transmissão entre sistemas distintos e (3) ausência de suporte em relação ao ciclo de vida do produto. De maneira análoga, a geração de códigos G e M para máquinas CNC a partir de arquivos DXF

resultava na perda de informações geométricas, as quais deveriam obrigatoriamente ser editadas e preenchidas manualmente pelo usuário [Kumar, 2005; Sreeramulu e Rao, 2008; Venu et. al, 2015].

Dessa forma, o STEP surgiu como um esforço mundial no intuito de desenvolver um padrão para o intercâmbio de dados de engenharia e, assim, minimizar a ocorrência dessas dificuldades. A principal premissa era que a transmissão das características ocorresse relacionada à geometria do produto, em uma representação não ambígua, neutra e interpretável por computador. A natureza dessa descrição tornou o STEP propício não somente para a troca de dados, mas também para suporte na implementação de bancos de dados de produtos, facilitando a integração CAD/CAPP/CAM [Kumar, 2005].

## **2.6 Reconhecimento automático de características**

Uma “característica” pode ser entendida como uma região da peça que possui alguns padrões geométricos ou topológicos relevantes, os quais podem ser utilizados para auxiliar nas etapas de projeto, planejamento e fabricação de determinado produto. Portanto, uma característica é uma informação de alto nível. As características de forma são as mais comumente identificadas, possuindo relevância em todo o ciclo de vida do produto, e podem ser classificadas de acordo com suas aplicações em: (1) características de usinagem; (2) características de montagem e (3) características de análise. De uma forma geral, os sistemas CAPP valem-se apenas das características usinadas, ou seja, aquelas que podem ser associadas à determinada operação [Bhandarkar e Nagi, 2000; Kumar, 2005; Malleswari, 2013; Reddy et al., 2014; Sateesh e Mahesh, 2017].

O propósito do reconhecimento de características é, em síntese, extrair entidades de nível superior (características de usinagem – furos, cilindros, canais, ranhuras) de elementos de nível inferior (como superfícies, arestas e pontos), a partir de um modelo de produto gerado em sistema CAD. Para definir uma característica, é preciso primeiramente identificar um conjunto de elementos que correspondem à dada regra padrão, a qual, por sua vez, é responsável por indicar determinada característica. O reconhecimento de recursos também pode ser definido como um processo no qual um padrão de entidades do modelo é confrontado com condições gerais de características anteriormente definidas [Arunkumar, 2013; Venu et al., 2015].

O reconhecimento pode ser realizado tanto de forma interativa (pelo projetista) quanto automaticamente (pelo computador). Apesar de o método interativo ser mais flexível, uma vez que o projetista pode definir qualquer combinação de elementos como uma característica, seu uso não é habitual, visto que demanda um extenso trabalho e pode proporcionar a ocorrência de erros. O reconhecimento automático por computador é a alternativa mais viável e, conseqüentemente, mais utilizada [Kumar, 2005].

Esse método, cujo estudo iniciou-se na década de 1970, reduz a necessidade de intervenção humana por meio da manipulação da geometria da peça, com a finalidade de prepará-la para a usinagem. Além disso, é fundamental para garantir a competitividade industrial, promovendo a interligação entre CAD e CAM, já que permite a transferência de dados geométricos e topológicos do modelo sólido. A forma com a qual a descrição da peça é inserida também interfere no grau de automação que pode ser atingido pelo sistema de planejamento de processos, uma vez que todas as decisões do plano gerado baseiam-se nas informações relativas às características, que, por sua vez, são extraídas pelo módulo de reconhecimento a partir do arquivo gerado no CAD [Arunkumar, 2013; Malleswari, 2013; Venu et al., 2015].

Inicialmente, as pesquisas relacionadas ao reconhecimento automático de características dedicaram-se à elaboração de algoritmos baseados no conceito de representação interna de um sistema CAD, fato que impedia sua compatibilidade com os demais sistemas existentes. No intuito de superar essa desvantagem, os estudos voltaram-se então aos formatos de arquivo neutro, os quais contêm dados de coordenadas de fácil extração. As primeiras alternativas de arquivos nesse formato, como IGES e DXF, apenas transferiam informações geométricas, não suportando os dados durante todo o ciclo de vida do produto. Dessa forma, sistemas de reconhecimento de características mais recentes valem-se do uso do STEP, o qual supera essa limitação. Portanto, o processo de reconhecimento de características geralmente consiste em elaborar uma plataforma capaz de identificar as diversas *strings* presentes no arquivo STEP e interpretá-las em termos de características de usinagem [Sreeramulu e Rao, 2008; Sivakumar e Dhanalakshmi, 2013; Reddy et al., 2014].

É importante ressaltar, entretanto, que esse reconhecimento torna-se mais complexo à medida que ocorrem interações de recursos, uma vez que algumas superfícies são perdidas. Outro obstáculo no fluxo de informações é a não incorporação de dados de tolerância geométrica e dimensional no modelo gerado pela maioria dos CADs atuais. Isso ocorre pelo

fato dos modelos CAD representarem essas tolerâncias apenas como texto no desenho, não as anexando como atributos reais [Oussama et al, 2014].

Para a construção do modelo sólido do produto, existem dois sistemas principais de representação: o B-Rep (*Boundary Representation*) e o CSG (*Constructive Solid Geometry*). O primeiro constitui o modelo a partir de entidades geométricas, como faces, arestas e vértices, enquanto que no segundo a peça é desenhada combinando sólidos pré-definidos, como blocos e cilindros. Embora o processo possa ser facilitado pelo uso de sistemas CSG, a maior parte dos trabalhos desenvolvidos emprega o B-Rep [Kumar, 2005; Arunkumar, 2013; Malleswari, 2013].

Ao longo das últimas décadas, desenvolveram-se inúmeros métodos para o reconhecimento automático de características, destacando-se: (1) padrão sintático; (2) baseado em regras; (3) baseado em gráficos e (4) redes neurais [Oussama et al., 2014]. A Tabela 2.3 apresenta sucintamente os principais aspectos acerca dessas abordagens.

Tabela 2.3 – Métodos de reconhecimento automático de características.

<b>Método</b>	<b>Abordagem para reconhecimento de característica</b>
Padrão sintático	Analisador sintático verifica a consonância da descrição do produto com um conjunto de gramática padrão
Baseado em regras	Extraí informações geométricas e topológicas, armazena em um banco de dados e aplica regras lógicas
Baseado em gráficos	Sistema constrói banco de dados de semelhanças geométricas e topológicas
Redes Neurais	Utiliza treinamento de rede neural a partir de um grande conjunto de padrões de características

Ressalta-se que, muito embora avanços significativos tenham sido realizados ao longo dos anos de pesquisa, existem poucos sistemas capazes de reconhecer inúmeras características de usinagem de forma totalmente automatizada [Kumar, 2005]. Isto posto, constata-se que a maior parte dos sistemas desenvolvidos concentra-se em determinado grupo de características, sendo, então, específico para determinada aplicação.

## 2.7 Norma ISO 10303 - Padrão STEP

O desenvolvimento do STEP iniciou-se em 1984, despendendo grandes esforços de uma colaboração mundial de pesquisadores, os quais trabalharam cerca de uma década para

sua elaboração. As primeiras partes da regulamentação foram publicadas em 1994. Atualmente, ele tem sido controlado pela ISO (*International Organization for Standardization*), a partir do TC184 (*Technical Committee 184*), referente aos sistemas industriais de automação, e do SC4 (*Subcommittee 4*), relativo aos dados industriais e às linguagens de programação de manufatura global. Grande parte do esforço para a concepção do padrão justifica-se pela tentativa de permitir extensibilidade ao formato, ou seja, possibilitar que seu desenvolvimento continue ocorrendo ao longo dos anos [Pratt, 2001; Reddy et al., 2014; Ribeiro, 2016; Sateesh e Mahesh, 2017].

Conforme descrito na seção 2.6, o padrão STEP é, atualmente, o formato de arquivo neutro mais utilizado para implementar a tecnologia de reconhecimento de características de usinagem. Esse tipo de arquivo fornece dados importantes acerca da peça, apresentando como característica fundamental a interoperabilidade, isto é, a independência de qualquer sistema em particular. Essa peculiaridade justifica seu uso para transferência, processamento e comunicação entre projeto e manufatura. O STEP pode ser considerado como um substituto do IGES, com recursos sobressalentes em relação a esse padrão, como o fato de trabalhar com dados referentes a todo o ciclo de vida de um produto [Majstorović et al., 2013; Sateesh e Mahesh, 2017].

O STEP abrange uma enorme variedade de aplicações, sendo, dessa forma, reconhecido como o principal padrão internacional para tecnologias baseadas em reconhecimento de características. A norma concebida, informalmente conhecida pelo nome do formato, é denominada oficialmente como ISO 10303: Sistemas de automação industrial e integração – Representação e troca de dados de produtos. Disponível na grande maioria dos *softwares* CAD comerciais, o padrão STEP é um arquivo de texto que possui informações de fácil extração, como dados geométricos de uma peça (incluindo dados de representação de limites, como *shells*, faces, *edge loops*, vértices), dados geométricos de superfície (como planos, cilindros, cones, toroidais, esferas) e de geometria curva (linhas, círculos, *b-splines* e elipses) [Majstorović et al., 2013; Oussama et al., 2014; Reddy et al., 2014].

O STEP é baseado em uma arquitetura de três classes: (1) modelo referencial, o qual gera diversos modelos específicos para cada aplicação; (2) camada lógica, a qual define a linguagem *EXPRESS* e (3) classe física, a qual estabelece a estrutura de comunicação do arquivo STEP [Bhandarkar e Nagi, 2000].

As informações de um arquivo STEP não podem apresentar ambiguidade. Para evitar esse inconveniente, seus desenvolvedores utilizaram uma linguagem de especificação orientada a objetos para modelar o relacionamento dentro dos dados do arquivo. Essa linguagem, denominada *EXPRESS*, é descrita detalhadamente na ISO 10303-11, e está estruturada em esquemas, os quais representam o modelo de produto. Um esquema compõe-se de entidades (objetos principais) e tipos de dados nos quais essas definições se sustentam. Dentro de cada entidade, estão enclausurados atributos e vínculos, os quais limitam o valor do atributo. O esquema *EXPRESS* possui ainda declarações de funções, procedimentos e regras, os quais restringem entidades ou tipos de dados. Cada elemento do modelo de produto, portanto, possui uma forma de representação *EXPRESS*, a qual descreve todos os parâmetros associados à definição desse elemento [ISO TC184/SC4/WD, 1997; Amaitik e Kiliç, 2002; Majstorović et al., 2013; Ribeiro, 2016].

Ademais, o STEP possibilita o gerenciamento de dados de fabricação, por meio do conceito de STEP-NC, exposto na ISO 14649. Esse padrão fornece informações sobre o estoque, características de corte e requisitos de ferramentas, os quais são fundamentais para a geração do código NC para a peça [Sateesh e Mahesh, 2017].

A utilização do arquivo neutro STEP pode promover inúmeros benefícios, tais como: (1) redução do tempo de lançamento do produto, em função da facilidade de comunicação; (2) aumento da capacidade de trabalho conjunto e simultâneo no desenvolvimento de uma peça; (3) redução do custo final do componente, uma vez que se diminui o tempo gasto em atividades que não agregam valor e (4) possibilidade de utilizar novos *softwares*, devido à interoperabilidade do STEP [Mitchell, 1997].

### **2.7.1 Estrutura da norma ISO 10303**

A norma ISO 10303 engloba uma gama de itens (eletrônicos, eletromecânicos, mecânicos, chapas metálicas, navios, móveis, arquitetura) e estágios do ciclo de vida do produto (projeto, análise, planejamento, fabricação, inspeção). Por esse motivo, a regulamentação é fragmentada em várias partes, as quais são publicadas separadamente, com a finalidade de possibilitar o desenvolvimento de cada uma de forma independente, permitindo a implementação por etapas nos sistemas. O método de numeração das divisões da ISO 10303 obedece a um padrão estabelecido, onde cada parte é denominada ISO 10303-xxx,

onde xxx é o número correspondente à divisão [Bhandarkar e Nagi, 2000; Pratt, 2001]. A Tabela 2.4 ilustra a estrutura da ISO 10303, ressaltando suas principais partes.

Tabela 2.4 – Estrutura da norma ISO 10303 – STEP [Adaptada de Teich et al., 2010].

<b>Parte da ISO</b>	<b>Definição</b>
ISO 10303-1	Visão geral
ISO 10303-10	Descrição de métodos
ISO 10303-20	Métodos de implementação
ISO 10303-30	Metodologia e estrutura de testes de conformidade
ISO 10303-40/50	Recursos integrados genéricos
ISO 10303-100	Recursos integrados de aplicação
ISO 10303-200	Protocolos de Aplicação
ISO 10303-300	Conjuntos de testes abstratos associados
ISO 10303-500	Construção interpretada de aplicações

A parte 1 da norma ISO 10303 define os princípios e conceitos fundamentais do padrão STEP. Já as divisões da série 01x apontam os procedimentos padrão utilizados para a descrição de entidades, no intuito de eliminar ambiguidade e garantir consistência. A sequência 02x, por sua vez, condiz com as representações físicas da informação suportadas pelo STEP. A cadeia 03x retrata a estrutura, os procedimentos e as ferramentas necessárias para realizar teste de desempenho em produtos. O agrupamento 04x, no que lhe concerne, fornece a representação do conteúdo de dados do produto no qual o desenvolvimento dos protocolos de aplicação é baseado. Alguns desses recursos são complementados na série 1xx. Os APs (*Application Protocol*), retratados na sequência 2xx, evidenciam os dados necessários, o modo não ambíguo para a transferência de dados e os requisitos de conformidade para determinada aplicação. Por fim, a série 3xx corresponde a testes abstratos fundamentais para um AP suportar os requisitos de conformidade, enquanto que a 5xx define a padronização dos componentes básicos dos APs [Bhandarkar e Nagi, 2000; Pratt, 2001; Ribeiro, 2016].

O estudo dos APs necessita de maior ênfase, uma vez que esses protocolos são os fragmentos implementáveis da ISO 10303. Cada AP é aplicável para uma ou mais etapa do ciclo de vida do produto, definindo os requisitos de contexto, escopo e informações acerca da área de aplicação. O escopo do AP é determinado a partir de uma série de informações, como: (1) tipo de produto; (2) estágios do ciclo de vida do produto; (3) tipos de dados necessários e (4) finalidade de aplicação dos dados e instruções de uso. Alguns dos protocolos mais

utilizados são o AP 203, o AP 214 e o AP 224, sendo que os dois primeiros são fornecidos pela maioria dos sistemas CAD comerciais. O AP 203, definido como “Controle de configuração no projeto 3D de peças e montagens mecânicas”, baseia-se na representação de limites para modelar o produto [ISO, 1994; Pratt, 2001; Malleswari, 2013; Reddy et al., 2014]. A Tabela 2.5 representa alguns dos APs e suas respectivas definições.

Tabela 2.5 – Alguns Protocolos de Aplicação do STEP e suas definições [Adaptada de Sateesh e Mahesh, 2017].

<b>Protocolo de Aplicação (AP)</b>	<b>Definição</b>
AP 201	Elaboração explícita
AP 202	Desenho associativo
AP 203	Projeto controlado por configuração
AP 207	Planejamento e projeto de matrizes de chapas de metal
AP 210	Montagem eletrônica, interconexão e projeto de embalagens
AP 212	Projeto e instalação eletrotécnicos
AP 214	Dados principais para processos de projeto mecânico automotivo
AP 224	Definição de produto mecânico para planejamento de processo utilizando características de usinagem
AP 227	Configuração especial da fábrica
AP 238	STEP-NC
AP 240	Plano de Processo

Os Protocolos de Aplicação determinam ainda um conjunto de CCs (Classes de Conformidade). Essas classes caracterizam subconjuntos do conteúdo total do AP, os quais devem ser completamente implementados pelos tradutores STEP, a fim de garantir conformidade com o padrão. Uma das classes mais utilizadas é a CC6, a qual condiz com formas de representação de limite avançada (não facetada) [Pratt, 2001].

### 2.7.2 Hierarquia das informações

O padrão STEP fornece uma variedade de informações referentes ao ciclo de vida de um produto, o que inclui dados necessários para projeto, planejamento de processos e fabricação. No entanto, essas informações são representadas em um arquivo de texto no formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) ou binário. Por esse motivo, é necessária, na maior parte das aplicações, uma etapa de processamento de dados

após sua extração, interpretando-os de tal maneira que proporcione os elementos necessários para cada abordagem [Liang et al., 1996; Kumar, 2005].

A estrutura de um arquivo STEP pode ser dividida em dois segmentos principais: cabeçalho e seção de dados. O primeiro inclui as informações acerca do tipo de *software* CAD utilizado para projetar a peça e da versão de tradutor STEP aplicada, enquanto que o segundo consiste em definições de entidades geométricas e elementos topológicos, como faces, *loops* e limites. Os dados do STEP, por sua vez, são classificados em descritivos, geométricos e topológicos [Loffredo, 2000; Reddy et al., 2014].

O arquivo STEP é delimitado por duas palavras-chave: inicia-se com *ISO-10303-21* e encerra-se com *END-ISO-10303-21*, possuindo outras seções intermediárias determinadas de maneira análoga. O conteúdo de cada seção é restringido pelas instâncias da entidade, isto é, pela representação do objeto de interesse. A interpretação das informações contidas em cada instância de entidade segue um padrão fundamentado na estrutura de cada linha no arquivo. De forma sintetizada, cada linha inicia-se com uma *hash* (#), seguida por um número inteiro positivo. A esse conjunto é dado o nome de indicador de instância. Cada indicador refere-se à determinada cadeia da hierarquia do arquivo STEP. A linha se encerra com um ponto e vírgula (;). As informações contidas entre a entidade e o fim de uma linha podem referenciar uma entidade subsequente na hierarquia ou fornecer dados geométricos da peça. As entidades podem ser referenciadas antes de serem definidas no arquivo [Sreeramulu e Rao, 2008; Malleswari, 2013].

Os relacionamentos entre entidades podem ser de dois tipos: “é um” ou “tem um”. O primeiro realiza uma hierarquização das entidades, relacionando uma de nível superior com a respectiva subsequente, enquanto que o segundo descreve uma combinação entre diferentes tipos de dados, os quais constituem a entidade. É importante ressaltar ainda que os indicadores não possuem significado semântico individual, visto que apenas identificam uma instância do arquivo STEP. Portanto, para assegurar a conectividade adequada entre os elementos e, assim, a correta representação do modelo, é necessário rastrear todos os indicadores listados no STEP. A sequência das instâncias não é especificada pelo padrão, uma vez que varia conforme a forma que o modelo foi projetado [Liang et al., 1996; Loffredo, 2000; Reddy et al., 2014; Ribeiro, 2016].

Os dados do arquivo STEP são representados por meio de uma hierarquia em forma de árvore invertida. O elemento raiz da árvore (primeiro nível) é a entidade *Closed Shell*,

enquanto que o elemento inferior (menor nível) é chamado de *Cartesian Point*. Os dados necessários para determinada aplicação devem ser extraídos a partir do elemento superior, percorrendo a árvore hierárquica até o elemento inferior [Liang et al., 1996]. A Figura 2.4 representa a hierarquia de dados de um arquivo STEP gerado para uma peça rotacional de geometria cilíndrica.

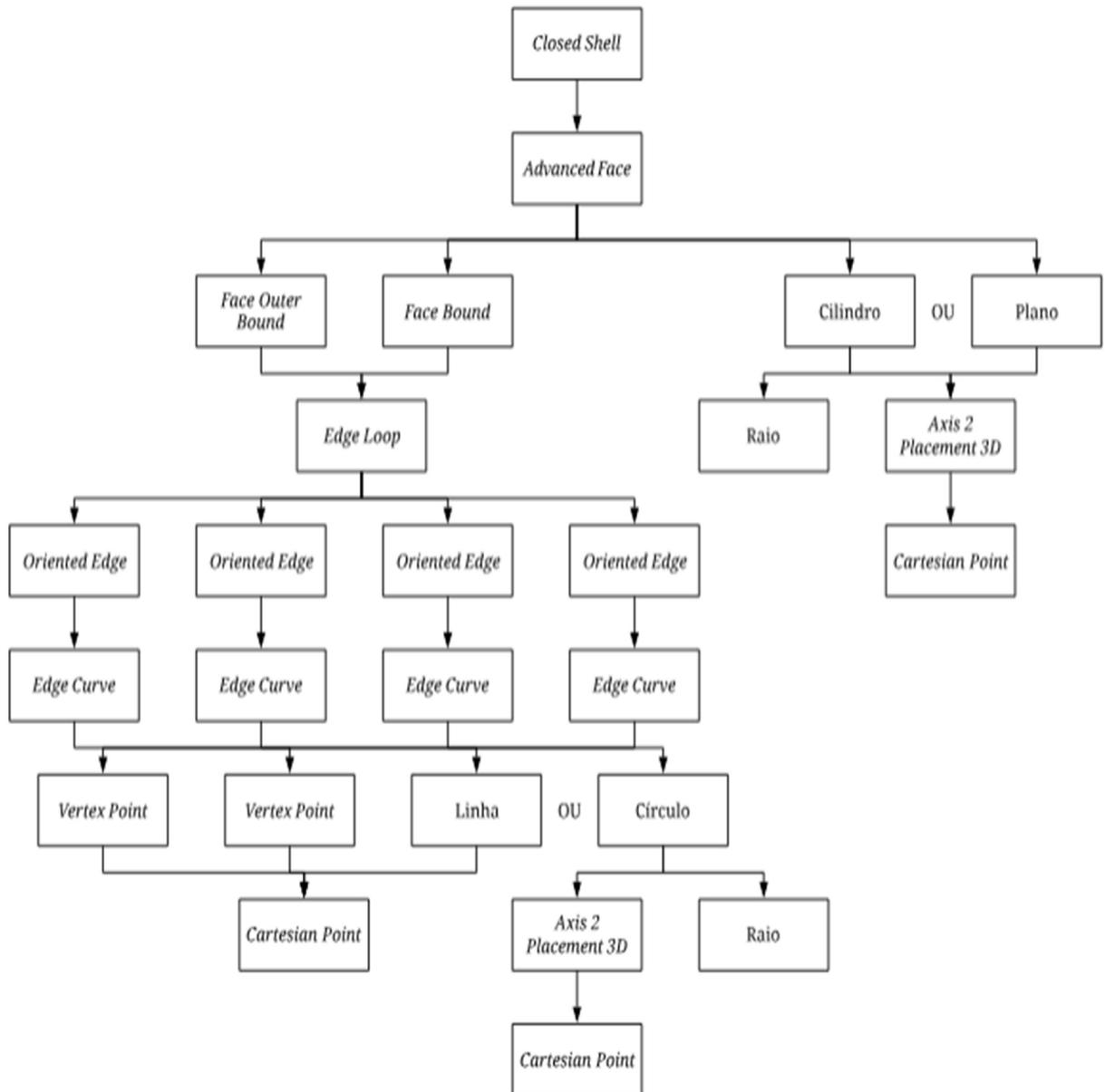


Figura 2.4 – Hierarquia de dados do STEP para uma peça de geometria cilíndrica [Adaptada de Sreeramulu e Rao, 2008].

Sreeramulu e Rao, 2008, apresentam uma breve descrição acerca das principais entidades de um arquivo STEP:

- ***Closed Shell***: um conjunto de faces, o qual delimita uma região no espaço tridimensional, dividindo-o em duas partes (finita e infinita);
- ***Face Surface***: um tipo de face no qual a geometria é determinada pela superfície, limites e vértices associados;
- ***Face Bound***: um ciclo utilizado para delimitar uma face;
- ***Edge-loop***: um trajeto no qual os vértices inicial e final são coincidentes;
- ***Oriented-edge***: uma aresta formada a partir de outra (original), contendo a informação de direção (orientação);
- ***Edge-curve***: um tipo de aresta que tem sua geometria totalmente estabelecida;
- ***Vertex Point***: um ponto que estipula a geometria de um vértice;
- ***Cartesian Point***: localização de um ponto no espaço cartesiano.

Algumas constatações acerca da representação do modelo da peça no arquivo STEP são fundamentais para o correto reconhecimento de características de usinagem. Em uma peça com superfície cilíndrica, por exemplo, a entidade *Face Bound* é verificada somente se o cilindro contiver um furo. Caso contrário, a peça apresenta apenas a entidade *Face Outer Bound*. Normalmente, o tipo de superfície de uma *Advanced Face* é plana ou cilíndrica. O plano é definido pela superfície associada, limites e vértices, sendo fundamental para a indicação do comprimento do cilindro [Sivakumar e Dhanalakshmi, 2013].

Malleswari, 2013 e Sivakumar e Dhanalakshmi, 2013, ressaltam ainda que, para cada cilindro, existem duas *Advanced Faces* correspondentes. Isso significa que, ao implementar um algoritmo de reconhecimento de características a partir da extração de informações do STEP, a mesma superfície cilíndrica será verificada por meio de duas *Advanced Faces* distintas, uma vez que a mesma geometria está representada a partir de duas construções diferentes de *Edge Curve*.

### 3 TRABALHO DESENVOLVIDO

O presente trabalho pode ser dividido em três etapas distintas, cada uma correspondente a um módulo do sistema proposto. As principais definições e lógicas de programação utilizadas na elaboração desses módulos são abordadas nesse capítulo, no intuito de elucidar o funcionamento do CAPP apresentado, denominado *S\_ProcPlan*.

#### 3.1 Contextualização e definição do sistema proposto

No contexto da manufatura, o planejamento de processo pode ser interpretado como um conjunto de atividades, as quais, quando organizadas sequencialmente, transformam a matéria-prima bruta em um produto final, de acordo com as especificações de projeto. No segmento metal-mecânico e, especificamente, na fabricação por processos de usinagem, as atividades que constituem um plano de processo ideal e completo, segundo Halevi, 2003, são: (1) interpretação das informações contidas no projeto do produto; (2) seleção de operações, máquinas, ferramentas e parâmetros capazes de usinar uma peça de forma apropriada; (3) adoção de métodos de inspeção, com a finalidade de garantir a qualidade da peça; (4) cálculo dos tempos de trabalho e custos de cada operação, a fim de avaliar posteriormente a efetividade do plano de processo; (5) agrupamento (quando possível) de operações semelhantes em uma mesma máquina, minimizando os tempos de preparação; (6) certificação da estabilidade da peça, por meio de um sistema de fixação adequado, obtendo a precisão requisitada no projeto e (7) organização dos processos em função de prioridades de precisão e restrições tecnológicas. A Figura 3.1 ilustra a composição do plano de processo teórico ideal proposto por Halevi, 2003.

Como o planejamento de processos envolve a análise de inúmeros fatores, o uso de sistemas computacionais é fundamental para auxiliar sua elaboração. Esse tipo de sistema permite a redução de custos e de tempo de preparação, bem como minimiza a ocorrência de erros e, geralmente, otimiza os planos de processo. Contudo, devido à complexidade de implementação de lógicas de decisão para vários parâmetros distintos, a maior parte dos sistemas CAPPs desenvolvidos aborda apenas parte dos itens indicados na Figura 3.1 como essenciais para um planejamento de processo. Mesmo com essa limitação, as indústrias que se valem dessa tecnologia apresentam grandes vantagens em relação àquelas que operam da

forma tradicional (planejamento elaborado manualmente por engenheiros experientes). De maneira análoga à descrita, o sistema proposto explana apenas alguns desses tópicos.

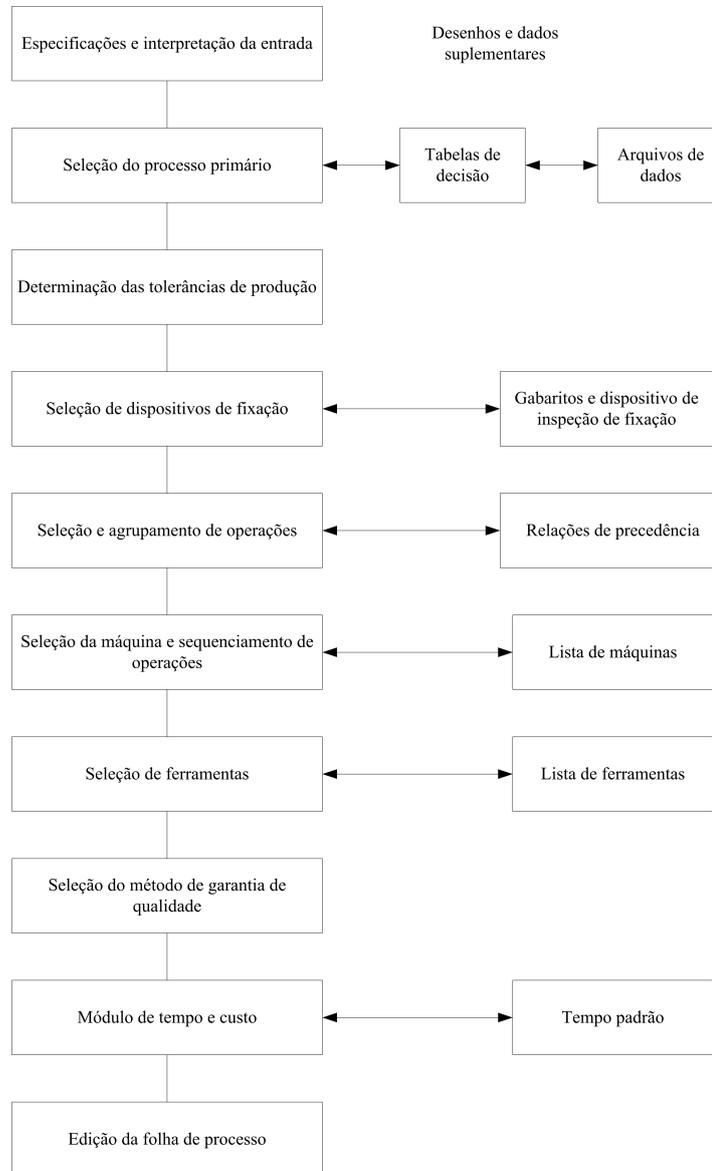


Figura 3.1 – Composição de um planejamento de processo ideal [Adaptada de Halevi, 2003].

As tolerâncias de produção e o sistema de inspeção de qualidade, por exemplo, não são retratadas no trabalho proposto de forma explícita. Entretanto, é considerado um banco de dados com informações referentes à geometria do inserto e a parâmetros de usinagem recomendados pelo fabricante, bem como ferramentas específicas para operações de acabamento nas máquinas de capacidade adequada. Desse modo, a fabricação do produto

final, seguindo essas recomendações, deve atender aos requisitos de qualidade especificados em projeto.

De igual modo, a seleção de dispositivos de fixação para peças não é diretamente tratada no sistema desenvolvido. No entanto, o modo de fixação do inserto pode ser determinado por meio da vinculação da ferramenta escolhida ao respectivo porta-ferramenta adequado, procedimento realizado com informações do banco de dados do sistema.

Da mesma forma, os cálculos de tempo e custo não são estimados no sistema de planejamento de processo concebido, devido à complexidade que esse tipo de análise apresenta, como, por exemplo, a necessidade de conceitos de planejamento de produção, os quais não são objeto de estudo do trabalho proposto.

A necessidade de utilização de fluidos de corte em processos de usinagem não é abordada de forma direta no *S\_ProcPlan*, devido aos diversos fatores envolvidos nessa análise, tais como: (1) relação entre refrigeração e vida útil da ferramenta; (2) comparação entre custos do sistema de refrigeração e custos relativos às ferramentas; (3) aspectos ambientais e (4) especificações de tolerâncias dimensionais e/ou geométricas. Em decorrência dessa complexidade, a exigência do uso de um fluido de corte para determinada operação torna-se uma decisão estabelecida de acordo com o tipo de operação, condições de usinagem e adequação dos sistemas de refrigeração com as máquinas selecionadas.

Isto posto, o sistema desenvolvido apresenta uma abordagem híbrida de planejamento de processo, também denominada generativa interativa. Apesar de essa concepção não permitir a geração automática do plano de processo, o sistema consiste em uma importante ferramenta para auxiliar o processista em sua elaboração, reduzindo o tempo em atividades que não agregam valor ao produto.

Primeiramente, o sistema recebe como dado de entrada o modelo de produto armazenado em um arquivo neutro STEP AP 203, a partir do qual identifica as *features* de usinagem de forma automática por meio de um algoritmo baseado em regras. Os dados extraídos por esse algoritmo interagem com um banco de dados com informações de manufatura e com rotinas de cálculos de parâmetros de usinagem através da interface de planejamento de processo do *S\_ProcPlan*, a qual permite planejar cada operação sequencialmente. Como dados de saída, o sistema fornece o plano de processo associado ao desenho técnico do produto. A Figura 3.2 ilustra o fluxograma do sistema desenvolvido, definindo seus blocos principais.

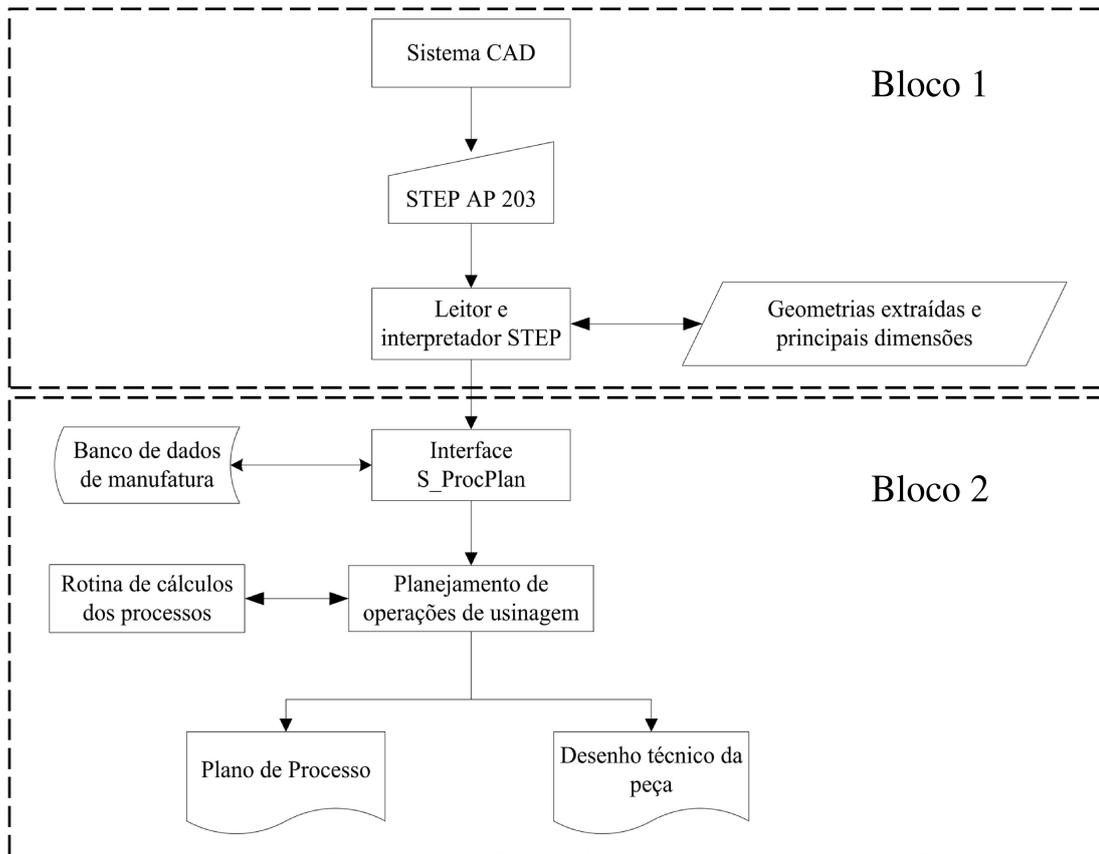


Figura 3.2 – Fluxograma do sistema desenvolvido.

O sistema *S\_ProcPlan* compreende, portanto, três componentes principais: (1) módulo de extração de geometrias a partir do arquivo STEP; (2) banco de dados de manufatura e (3) módulo gerador de plano de processo. Para o desenvolvimento do sistema, foram utilizados os recursos de programação em linguagem *Visual Basic* (para codificação e elaboração da interface dos módulos do sistema) e os *softwares Microsoft Access* (para o projeto e construção do banco de dados de manufatura) e *Solid Works* (para projeto de peças e geração de arquivo STEP).

### 3.2 Módulo de extração de geometrias do arquivo STEP

O primeiro módulo do sistema CAPP proposto é responsável pela extração de geometrias a partir do arquivo neutro STEP. Essa etapa constitui-se, basicamente, de três passos: (1) leitura de todas as linhas do arquivo STEP; (2) armazenamento dos dados em

vetores e (3) processamento das informações a partir de regras lógicas. A Figura 3.3 ilustra o fluxograma básico do módulo desenvolvido.

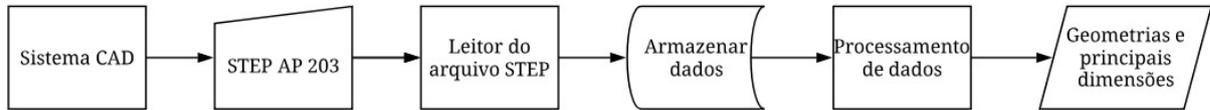


Figura 3.3 – Fluxograma do módulo de extração de geometrias.

Inicialmente, o sistema CAD utilizado fornece os dados de entrada, armazenando o projeto da peça em um arquivo no formato STEP AP 203. Esse arquivo é então carregado no módulo, a partir de uma busca no computador por meio da instrução *Procurar*. Por meio de uma rotina (*Ler linhas*), o sistema efetua a leitura de todas as linhas do arquivo, buscando e armazenando as entidades representadas na hierarquia mostrada na Figura 2.4. A etapa de processamento é realizada em três estágios, relacionados aos comandos *Dados gerais*, *Resumo dos dados* e *Identificação da geometria*. A conclusão de cada etapa é informada por meio das caixas de texto presentes ao lado de cada comando. A Figura 3.4 representa a interface do módulo desenvolvido para extração de geometrias a partir do arquivo neutro STEP.

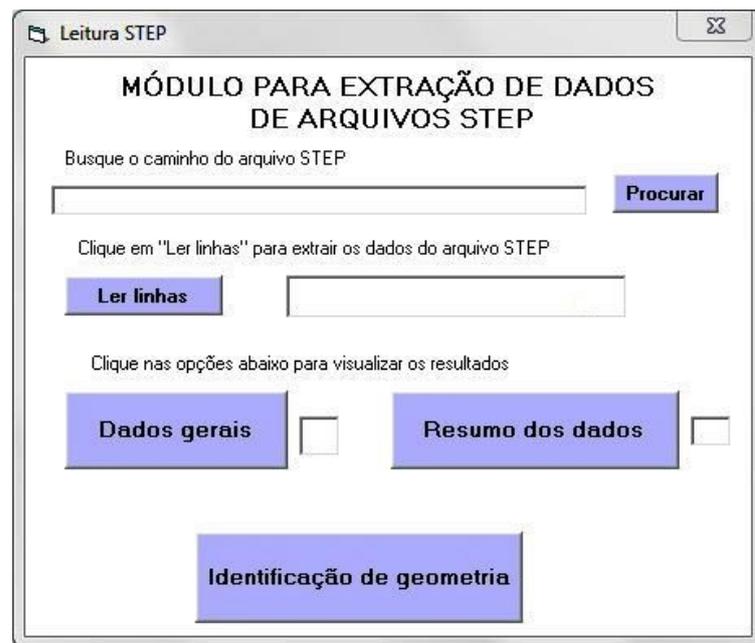


Figura 3.4 – Interface do módulo de extração de geometrias.

### 3.2.1 Extração e armazenamento de informações do STEP

As informações contidas em um arquivo STEP não possuem uma ordem sequencial previamente estabelecida. Portanto, antes de extrair os dados, é necessário organizá-los. Sabe-se, ainda, que as relações entre entidades são do tipo “tem um” ou “é um”, ou seja, uma entidade pode referenciar outra ou possuir elementos geométricos que a definem. A lógica de extração de dados do módulo tem essas relações como premissas básicas. Inicialmente, o sistema busca em todas as linhas do arquivo STEP a entidade presente no topo da hierarquia e, a partir das informações obtidas nessa linha, identifica as relações existentes com as demais entidades. Para ilustrar o procedimento de organização e extração de informações, toma-se como exemplo uma parte de um arquivo STEP, representada na Figura 3.5.

```
#217 = CLOSED_SHELL (NONE, (#216, #84, #140, #243, #322, #40, #203, #11, #116));
#216 = ADVANCED_FACE (NONE, (#74), #155, F.);
#84 = ADVANCED_FACE (NONE, (#58), #36, T.);
#140 = ADVANCED_FACE (NONE, (#175), #329, T.);
#243 = ADVANCED_FACE (NONE, (#147, #277), #93, T.);
#322 = ADVANCED_FACE (NONE, (#73), #304, T.);
#40 = ADVANCED_FACE (NONE, (#110, #307), #26, F.);
#203 = ADVANCED_FACE (NONE, (#6), #209, T.);
#11 = ADVANCED_FACE (NONE, (#184, #194), #188, T.);
#116 = ADVANCED_FACE (NONE, (#190), #4, F.);
```

Figura 3.5 – Parte de um arquivo STEP

As entidades visualizadas na Figura 3.5 correspondem aos dois primeiros níveis da árvore do STEP. A primeira entidade a ser buscada, portanto, é o *Closed Shell*. Para isso, o sistema lê todas as linhas do arquivo, registrando-as como uma variável do tipo *string*. Ao encontrar uma *string* que contém *Closed Shell*, o módulo inicia a extração de informações dessa linha. No caso do exemplo, o sistema registra o indicador correspondente ao *Closed Shell* (#217) e todos os indicadores presentes entre os parênteses (#216, #84, #140, #243, #322, #40, #203, #11, #116), os quais correspondem à entidade de segundo nível *Advanced Face*. Cada indicador de *Advanced Face* é armazenado juntamente a um índice, o qual é utilizado para organizar os dados em disposição hierárquica. Dessa forma, nesse caso, é possível interpretar que o *Closed Shell* é composto por nove *Advanced Faces* distintas. O

Apêndice A apresenta a rotina de programação utilizada para a extração de informações dos primeiros níveis hierárquicos do STEP.

A extração de dados é realizada de maneira semelhante para todos os demais níveis da hierarquia, mantendo a relação existente entre eles por meio da indexação. Ao final desse processo, todas as informações existentes para cada nível da hierarquia estão armazenadas em matrizes, as quais permitem a organização dos dados (formação da árvore hierárquica para cada *Advanced Face*) e sua posterior utilização para a identificação das geometrias.

### 3.2.2 Processamento e saída dos dados extraídos

A interpretação de geometrias exige a extração de uma grande quantidade de dados de diferentes variáveis, uma vez que o arquivo STEP possui diversos níveis em sua hierarquia. Mesmo em peças de baixa complexidade, como um cilindro com variação de diâmetro e furo passante, por exemplo, o arquivo gerado contém cerca de 330 entidades. Por conta disso, o sistema elaborado subdivide o processamento em três etapas.

A primeira, realizada a partir do comando *Dados gerais*, fornece uma tabela com todas as informações extraídas do arquivo STEP, relacionando as entidades aos respectivos indicadores e apresentando os dados geométricos referentes às entidades de baixo nível. Assim como o arquivo STEP, a tabela gerada é extensa. Conseqüentemente, é necessária uma segunda etapa de processamento, acionada pela opção *Resumo dos dados*, na qual o módulo seleciona e reorganiza algumas das informações extraídas na primeira tabela, adaptando-as para sua utilização como dado de entrada para a terceira etapa de processamento.

A terceira etapa consiste na aplicação de regras de reconhecimento automático de características a partir do arquivo STEP. Essas regras relacionam-se tanto com entidades de alto nível quanto, principalmente, com as de baixo nível, concatenando dados geométricos e topológicos da geometria da peça. Para o processamento dos dados, o sistema utiliza a metodologia proposta por Malleswari, 2013, a qual permite a identificação de *geometrias cilíndricas e furos* baseada no arquivo STEP AP 203. As regras, aplicadas automaticamente a partir da seleção da instrução *Identificação de geometria*, são definidas como:

- a construção da *Edge Curve* é “círculo-linha-círculo-linha”/“linha-círculo-linha-círculo”;
- a superfície da *Advanced Face* é cilíndrica;

- os raios dos círculos na construção da *Edge Curve* são iguais;
- duas coordenadas (x e y) dos centros dos círculos são iguais;
- se a coordenada z diminui do primeiro para o segundo círculo na construção da *Edge Curve*, então o cilindro é externo, com comprimento igual à diferença entre as coordenadas;
- se a coordenada z aumenta do primeiro para o segundo círculo na construção da *Edge Curve*, então o cilindro é interno, com comprimento igual à diferença entre as coordenadas;
- se a coordenada y do centro do círculo de um cilindro interno for igual à zero, então o cilindro é classificado como simétrico ao eixo principal;
- se a coordenada y do centro do círculo de um cilindro interno for diferente de zero, então o cilindro é classificado como assimétrico em relação ao eixo principal, com *offset* igual à coordenada y.

Conforme Farias, 2008, Malleswari, 2013 e Sivakumar e Dhanalakshmi, 2013, os arquivos STEP podem fornecer informações referentes a um mesmo cilindro a partir de duas *Advanced Faces* distintas (com duas construções diferentes de *Edge Curve*, consequentemente). Por esse motivo, uma etapa adicional de reprocessamento de dados é fundamental, no intuito de eliminar informações duplicadas e permitir a correta interpretação da geometria da peça. Nesse sentido, o módulo proposto utiliza como princípio representar apenas geometrias cuja construção da *Edge Curve* é *círculo-linha-círculo-linha*. É importante ressaltar que essa opção não elimina nenhum dado fundamental para o reconhecimento de características, mas apenas a duplicidade.

A saída de informações ocorre de duas maneiras distintas, igualmente acionadas pelo comando *Identificação de geometria*. A primeira reproduz uma tabela com a geometria identificada, suas dimensões principais (diâmetro e comprimento) e tipo de cilindro (interno ou externo), enquanto que a segunda fornece a informação da característica reconhecida em forma de lista, vinculando esse módulo com a interface do sistema CAPP. De modo semelhante, as dimensões máximas da peça também são armazenadas e carregadas automaticamente no módulo de planejamento.

### 3.3 Banco de dados de manufatura

O banco de dados projetado para o sistema possui a função de armazenar o conhecimento de manufatura. Dessa forma, deve conter as informações disponíveis para o ambiente de usinagem, ou seja, compreende o cadastro de materiais e suas respectivas dimensões brutas, máquinas, ferramentas, operações e dados auxiliares necessários para a determinação de alguns parâmetros de usinagem, como avanço e velocidade de corte para diversas ferramentas. Através da estrutura elaborada, podem-se cadastrar novos dados (no caso de compra de novas máquinas e/ou ferramentas), alterar informações anteriormente registradas e excluir elementos em desuso, conforme a necessidade da fábrica. Como a ligação entre essa estrutura de informações e o sistema CAPP ocorre de forma automática, basta acrescentar ou alterar uma informação no banco de dados para o sistema ser atualizado.

A Figura 3.6 ilustra as tabelas criadas no banco de dados e seus respectivos campos, bem como os relacionamentos existentes entre os mesmos. A tabela *DimensaoBruta* relaciona-se com *Materiais*, uma vez que o sistema deve fornecer apenas as medidas padrão disponíveis no estoque da fábrica para determinada matéria-prima. De maneira análoga, a tabela *Máquinas* associa-se com *Operação*, visto que determinada operação pode ser específica ou comum para diferentes máquinas. A tabela *Ferramentas* relaciona-se com as condições de usinagem, com o material da peça, com as operações e com as máquinas, uma vez que sua seleção é influenciada por todas as restrições anteriormente definidas. Dessa forma, somente uma ferramenta compatível com a máquina selecionada e apropriada para o material da peça pode ser escolhida para realizar determinada operação. As tabelas auxiliares *CodFerTipo*, *Velocidade* e *AvancoBroca* simulam as tabelas de decisão dos catálogos de ferramentas, ou seja, permitem a seleção, de forma automática, de velocidades de corte e avanços (no caso de brocas) compatíveis com as recomendações dos fabricantes, a partir da ligação entre a classe da ferramenta com o material da peça e o tipo de usinagem previamente escolhidos. Consequentemente, o valor adotado para a velocidade de corte ou para o avanço é diferente para cada material/ferramenta escolhido.

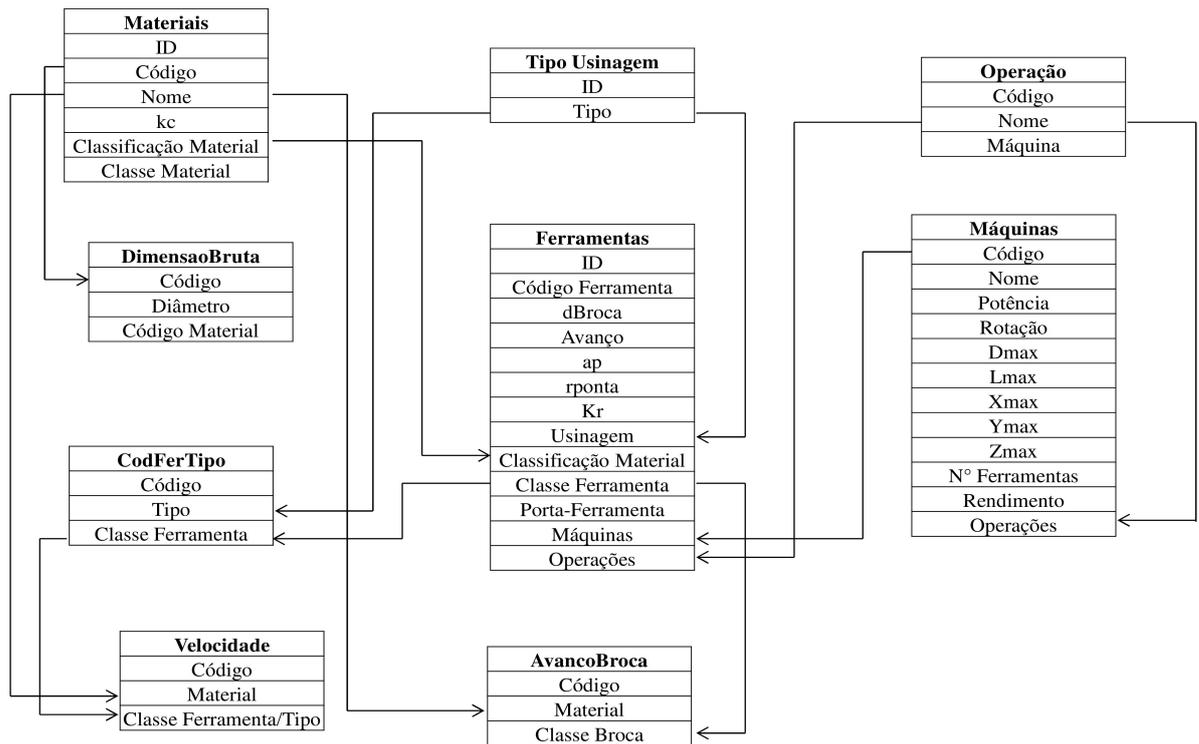


Figura 3.6 – Tabelas relacionais do banco de dados projetado.

A observação de algumas propriedades da matéria-prima a ser utilizada é essencial para o planejamento de processos. Desse modo, a tabela *Materiais* insere informações a respeito da classificação ISO e da força específica de corte (*kc*) dos materiais considerados. Esses dados são extraídos de catálogos comerciais [Sandvik, 2017a]. A classificação ISO é fundamental para a relação entre materiais e ferramentas, enquanto que a força específica de corte é utilizada no cálculo da potência necessária para realizar a operação. A descrição dos materiais ocorre a partir de seus respectivos nomes e de códigos identificadores relacionados. Os materiais selecionados são alguns dos mais aplicados industrialmente, abrangendo várias classes ISO diferentes. A Figura 3.7 mostra alguns dos materiais inseridos no banco de dados.

ID	Código	Nome	kc	Classificação	ClasseFer
1	1020	Aço SAE 1020	1500	P	Classe P
2	1045	Aço SAE 1045	1600	P	Classe P
3	1060	Aço SAE 1060	1700	P	Classe P
4	6063	Alumínio 6063	400	N	Classe N
5	42012	Ferro Fundido Nodular 42012	900	K	Classe K
6	316	Inox 316	1800	M	Classe M

Figura 3.7 – Alguns dos materiais inseridos no banco de dados.

A matéria-prima é obtida dos fornecedores em dimensões pré-determinadas. No caso de peças cilíndricas, a dimensão principal é o diâmetro do material. Dessa forma, o cadastro dessa informação é indispensável. Para alimentação do banco de dados, registraram-se materiais de diversos fornecedores [Metalhaga, 2015; Martinelli, 2017; Elinox, 2017; Tenax, 2018]. A correspondência de cada diâmetro com o código do respectivo material é realizada por meio de um comando do tipo *CheckList*. A Figura 3.8 ilustra algumas das dimensões brutas de matéria-prima cadastradas no sistema.

Código	diâmetro	1020	1045	1060	316	42012	6063
1	7,93	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	15,88	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	25,4	<input checked="" type="checkbox"/>					
4	28,58	<input checked="" type="checkbox"/>					
5	31,75	<input checked="" type="checkbox"/>					
6	38,1	<input checked="" type="checkbox"/>					
7	50,8	<input checked="" type="checkbox"/>					
8	63,5	<input checked="" type="checkbox"/>					
9	88,9	<input checked="" type="checkbox"/>					

Figura 3.8 – Algumas dimensões brutas de matéria-prima cadastradas no sistema.

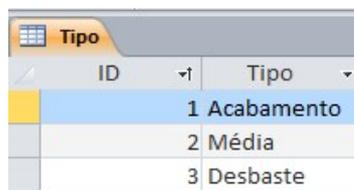
As operações são registradas no banco de dados a partir do respectivo nome. Como o sistema projetado reconhece automaticamente geometrias cilíndricas, a maior parte das operações cadastradas envolvem processos de torneamento e furação. O campo *Máquina* da tabela *Operação* auxilia na interligação entre máquinas e operações, já que as mesmas podem ser comuns em mais de uma máquina ou específicas. A Figura 3.9 mostra algumas das operações registradas.

Código	Operacao	Máquina
1	Cilindrar	Torno Mecânico e Torno CNC
2	Facear	Torno Mecânico e Torno CNC
3	Furar	Centro de Usinagem, Furadeira, Torno CNC e Torno Mecânico
4	Torneamento Interno	Torno Mecânico e Torno CNC
5	Ranhurar	Torno Mecânico e Torno CNC
6	Pré-furo	Centro de Usinagem, Furadeira, Torno CNC e Torno Mecânico

Figura 3.9 – Algumas das operações registradas.

A tabela referente aos tipos de usinagem é relativamente simples, possuindo apenas a função de listar as três condições nas quais uma operação pode ser realizada. O campo *Tipo*,

vinculado a um indexador *ID*, é fundamental para relacionar corretamente os insertos aos respectivos processos de usinagem. A Figura 3.10 exibe os tipos de usinagem definidos no banco de dados.



ID	Tipo
1	Acabamento
2	Média
3	Desbaste

Figura 3.10 – Tipos de usinagem inseridos no banco de dados.

As máquinas cadastradas no banco de dados são identificadas não apenas pelo seu respectivo nome, como também por meio de um código. Esse código é baseado no tipo do equipamento: o centro de usinagem, por exemplo, recebe o código CUSIx, no qual x é o incremento numérico para identificar cada máquina de determinado tipo. De maneira análoga, os códigos de tornos CNC iniciam-se com TCNC, os de tornos mecânicos com TMEC e os de furadeira de coluna com FURC. Todas as máquinas inicialmente cadastradas a título de ilustração no sistema correspondem às presentes no Laboratório de Usinagem (LAUS) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Conforme a Tabela 2.1, as principais restrições do planejamento de processo envolvendo máquinas dividem-se em físicas e energéticas. Dessa forma, os demais dados cadastrados para as máquinas abrangem essas restrições. As restrições físicas estão determinadas nos campos  $D_{max}$  e  $L_{max}$  (diâmetro máximo e comprimento máximo para tornos mecânicos, tornos CNC e furadeira) e  $X_{max}$ ,  $Y_{max}$  e  $Z_{max}$  (dimensões admissíveis da mesa do centro de usinagem). As limitações energéticas, por sua vez, associam-se ao cadastro da potência e da rotação nominais da máquina, bem como ao seu rendimento mecânico. Enquanto que a potência e a rotação são necessárias para verificar se a máquina possui condições de fabricar determinado componente de acordo com as especificações dos parâmetros de corte da ferramenta, o rendimento é fundamental para transformar o valor da potência calculada em potência efetiva. Os valores utilizados para rendimento são baseados em Melo, 2003. Cada máquina é relacionada às operações por meio de um comando do tipo *CheckList*. A Figura 3.11 ilustra parte do cadastro de máquinas no banco de dados.

Máquinas												
Código	Nome	Poti	Rot	Dmax	Lmax	Xmax	Ymax	Zmax	Ferra	Reni	Cilindrar	
CUSI1	CUSI Romi Discovery 308	4,50	4000	0	0	450	310	410	8	0,9	<input type="checkbox"/>	
FURC1	FURC Yadoya A38	1,50	1600	50	1000	0	0	0	1	0,7	<input type="checkbox"/>	
TCNC1	TCNC Mazak Nexus 100 II	11,00	6000	200	300	0	0	0	12	0,9	<input checked="" type="checkbox"/>	
TMEC1	TMEC Romi S20A	3,70	1500	240	1000	0	0	0	1	0,7	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 3.11 – Parte do cadastro de máquinas no banco de dados.

As informações referentes às ferramentas são essenciais para a elaboração do plano de processo, em função de dois fatores principais: (1) a relação existente com material, operações, máquinas e condições de usinagem e (2) a transferência de dados relativos aos principais parâmetros de corte. Os insertos são identificados a partir do código comercial do fabricante. O porta-ferramenta recomendado para cada aplicação é conectado ao respectivo inserto por meio do campo *Porta-Ferramenta*, igualmente a partir de seu código. Informações relevantes como valores recomendados para os principais parâmetros de corte (avanço e profundidade de corte), geometria da ferramenta (diâmetro da broca, raio de ponta e ângulo de posição) e identificação da classe da ferramenta (a partir de um código descrito na tabela auxiliar *CodFerTipo*) também são inseridas no banco de dados de manufatura. A associação com os materiais é realizada por meio de um comando do tipo *CheckList*, no qual cada inserto é relacionado com a classe ISO de cada matéria-prima. De maneira análoga, o inserto é ligado ao código das máquinas e às operações. A correspondência com o tipo de usinagem, por sua vez, ocorre a partir do campo *Usinagem*. Os dados registrados no sistema foram extraídos de catálogos comerciais de ferramentas de torneamento e de brocas [Sandvik, 2017a; Irwin, 2017]. A Figura 3.12 ilustra algumas das ferramentas inseridas no banco de dados.

Ferramentas																	
	Código	d	Avi	ap	rp	Kr	Usinagem	P	M	K	N	ClasseF	ClasseM	ClasseK	ClasseN	PortaFerramenta	CUSI1
1	CCMT 12 04 08 PM	0,24	0,96	0,8	95	Média	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		P4325M	-	-	-	SCLCR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
2	CCMT 12 04 08 MM	0,24	0,96	0,8	95	Média	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		-	M2025M	-	-	SCLCR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
3	CCMT 12 04 08 KM	0,24	0,96	0,8	95	Média	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		-	-	K3210M	-	SCLCR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
4	CCMT 12 04 08 UM	0,25	1,50	0,8	95	Média	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		P4325M	-	-	-	SCLCR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
5	CCMT 12 04 08 PR	0,30	2,40	0,8	95	Desbaste	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		P4335D	-	-	-	SCLCR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
6	CCMT 12 04 08 KR	0,30	2,40	0,8	95	Desbaste	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		-	-	K3225D	-	SCLCR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
7	CCMT 12 04 08 MR	0,30	2,40	0,8	95	Desbaste	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		-	M2035D	-	-	SCLCR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
8	CCMT 12 04 08 UR	0,30	2,50	0,8	95	Desbaste	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		P4335D	-	-	-	SCLCR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
9	VBMT 16 04 08 PF	0,14	0,32	0,8	93	Acabamento	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		P4315A	-	-	-	SVJBR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
10	VBMT 16 04 08 KF	0,14	0,32	0,8	93	Acabamento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		-	-	K3210A	-	SVJBR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
11	VBMT 16 04 08 MF	0,14	0,32	0,8	93	Acabamento	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		-	M2015A	-	-	SVJBR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
13	VBMT 16 04 08 PM	0,18	0,72	0,8	93	Média	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		P4325M	-	-	-	SVJBR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>
14	VBMT 16 04 08 MM	0,18	0,72	0,8	93	Média	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		-	M2025M	-	-	SVJBR/L 2020K 12	<input type="checkbox"/>

Figura 3.12 – Algumas das ferramentas inseridas no banco de dados.

Na tabela auxiliar *CodFerTipo*, cada classe de ferramenta cadastrada é vinculada ao material da peça e ao tipo de usinagem adequado à mesma. Para realizar essa correlação, é necessária a criação de um novo sistema de codificação. Esse código, basicamente, consiste na união da numeração da classe da ferramenta com uma letra representando o tipo de material (baseada na classificação ISO) e outra identificando o tipo de usinagem (*A* para acabamento, *M* para usinagem média e *D* para desbaste). Essa relação é fundamental para a obtenção da velocidade de corte na tabela *Velocidade* e do avanço na tabela *AvancoBroca*. A Figura 3.13 mostra parte da inclusão de informações na tabela *CodFerTipo*.

CodFerTipo							
Código	Tipo	GC 4315	GC4325	GC 4335	GC 2015	GC 2025	GC 2035
1	Acabamento	P4315A	P4325A	P4335A	M2015A	M2025A	M2035A
2	Média	P4315M	P4325M	P4335M	M2015M	M2025M	M2035M
3	Desbaste	P4315D	P4325D	P4335D	M2015D	M2025D	M2035D

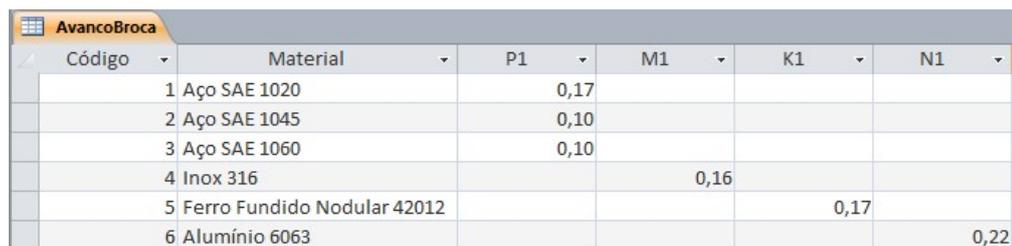
Figura 3.13 – Parte da inclusão de informações na tabela *CodFerTipo*.

A tabela *Velocidade*, portanto, correlaciona o material da peça usinada com o código criado na tabela *CodFerTipo*. Dessa forma, o valor registrado para a velocidade de corte considera o tipo de usinagem, a classe da ferramenta e o material da peça, da mesma forma que o catálogo do fabricante. Assim como para as ferramentas, os dados cadastrados para a velocidade de corte são baseados em catálogos de fabricantes [Sandvik, 2017a; Irwin, 2017]. A Figura 3.14 ilustra o registro de algumas velocidades de corte.

Velocidade										
Material	P4315A	P4315M	P4315D	P4325A	P4325M	P4325D	P4335A	P4335M	P4335D	M2015A
Aço SAE 1020	570	405	300	510	345	245	425	275	200	
Aço SAE 1045	510	365	265	455	305	215	380	245	180	
Aço SAE 1060	460	330	240	425	290	205	365	235	170	
Inox 316										290
Ferro Fundido Nodular 42012										
Alumínio 6063										

Figura 3.14 – Registro de algumas velocidades de corte.

De maneira análoga à *Velocidade*, a tabela *AvancoBroca* correlaciona o material da peça com a ferramenta selecionada para os processos de furação. Os dados cadastrados nessa tabela são fornecidos pelos fabricantes [Indaço, 2015; Irwin, 2017]. A Figura 3.15 representa um segmento da inserção dos dados de avanço para brocas.



Código	Material	P1	M1	K1	N1
1	Aço SAE 1020	0,17			
2	Aço SAE 1045	0,10			
3	Aço SAE 1060	0,10			
4	Inox 316		0,16		
5	Ferro Fundido Nodular 42012			0,17	
6	Alumínio 6063				0,22

Figura 3.15 – Inserção dos dados de avanço para brocas.

### 3.4 Interface de planejamento de processo do *S\_ProcPlan*

A interface do *S\_ProcPlan* específica para elaboração de planos de processo é definida a partir da associação das características obtidas por meio do identificador de geometrias com as informações registradas no banco de dados. Em função do código de programação desenvolvido, os dados provenientes dos dois módulos anteriormente descritos são carregados de forma automática na interface. O funcionamento do módulo de planejamento de processos pode ser compreendido a partir de quatro etapas principais: (1) seleção das informações anteriormente carregadas no módulo; (2) entrada manual de dados referentes ao acabamento; (3) verificação automática das condições da máquina e (4) ajuste no valor dos parâmetros de corte. A Figura 3.16 ilustra a interface de seleção de operações do sistema CAPP *S\_ProcPlan*.

No módulo de seleção de operações para planejamento de processos, seleciona-se o material da peça e sua dimensão bruta, bem como as características de usinagem reconhecidas automaticamente pelo identificador de geometrias, relacionando-as às respectivas operações, condições de usinagem, máquinas e ferramentas necessárias para obter a peça projetada. A escolha desses dados ocorre a partir de um comando do tipo *ComboBox*, o qual elabora uma lista de informações provenientes do banco de dados, respeitando as restrições estabelecidas pelos parâmetros anteriormente selecionados. Dessa forma, todas as opções listadas no *ComboBox* permitem efetuar o processo desejado.

As únicas entradas manuais de dados necessárias para a interface do *S\_ProcPlan* correspondem às informações referentes ao sobrematerial para acabamento das peças. Isso se deve ao fato de cada geometria possuir requisitos específicos de rugosidade e acabamento superficial, os quais se relacionam diretamente à quantidade de sobrematerial necessária para cada operação. O sobrematerial de comprimento associa-se fundamentalmente com operações

de faceamento, enquanto que o sobrematerial de diâmetro concatena-se com operações de torneamento cilíndrico.

Figura 3.16 – Interface de seleção de operações do sistema *S\_ProcPlan*.

A seção *Verificação das condições da máquina* tem a função de efetuar a comparação entre os dados calculados para cada operação e os limites nominais da máquina selecionada, ou seja, averiguar se a máquina possui condições de realizar a operação a partir dos parâmetros anteriormente definidos. Para isso, o sistema, primeiramente, calcula a potência e a rotação requeridas para a operação, com base nas informações carregadas do banco de dados a partir dos parâmetros selecionados. Como estimativa dessas variáveis, utilizam-se as equações descritas em manuais técnicos [Sandvik, 2017b].

Para avaliar a potência necessária em kW, o sistema associa as equações aos respectivos processos de usinagem. Como a aplicação é concentrada em peças rotacionais, aplicam-se equações referentes a processos de torneamento (Equação 3.1) e furação (Equação 3.2).

$$P = \frac{Vc \, ap \, f \, kc \, 1}{60000 \, \eta} \quad (3.1)$$

Onde  $P$  é a potência efetiva necessária em kW,  $Vc$  é a velocidade de corte em m/min,  $ap$  é a profundidade de corte em mm,  $f$  é a taxa de avanço em mm/rot,  $kc$  é a força de corte específica em N/mm<sup>2</sup> e  $\eta$  é o rendimento.

$$P = \frac{Vc \, f \, D_B \, kc \, 1}{240000 \, \eta} \quad (3.2)$$

Onde  $D_B$  é o diâmetro da broca em mm, para operações de furação.

A Equação 3.3, por sua vez, é utilizada para estimar a rotação requerida para a máquina.

$$n = \frac{Vc \, 1000}{\pi \, D} \quad (3.3)$$

Onde  $n$  é a rotação em rpm e  $D$  é o diâmetro de referência da peça em mm.

A verificação do diâmetro ocorre a partir da comparação entre o diâmetro máximo da peça (obtido pelo módulo de identificação de geometria) e o maior diâmetro admissível para a máquina. De maneira análoga, é realizada a conferência do comprimento.

As restrições relativas à máquina, portanto, vinculam-se a fatores energéticos (potência e rotação) e físicos (diâmetro e comprimento). Caso uma máquina pré-selecionada não atenda as especificações energéticas, o sistema emite uma mensagem de alerta e recalcula automaticamente a velocidade de corte, a partir de um rearranjo nas Equações 3.1 ou 3.2 (caso a potência estimada exceder o limite máximo) ou na Equação 3.3 (caso a rotação calculada ultrapassar o limite da máquina). Esse ajuste ocorre a partir do valor nominal do parâmetro da máquina, seguindo a lógica desenvolvida para o sistema. No entanto, valores próximos aos limites do equipamento podem ocasionar alguns problemas, como vibrações excessivas, as quais interferem na qualidade da peça produzida. Caso esse inconveniente seja verificado, o sistema permite a alteração dos valores máximos admissíveis cadastrados para a máquina no banco de dados, adicionando um limite efetivo para a rotação/potência. A necessidade desse ajuste pode ser determinada pelo engenheiro processista. Na hipótese de ocorrer alguma

incompatibilidade na comparação das dimensões físicas da peça e da máquina, o sistema emite um aviso, recomendando a seleção de outro equipamento para efetuar a operação. A Figura 3.17 mostra a mensagem de alerta para restrições energéticas da máquina.

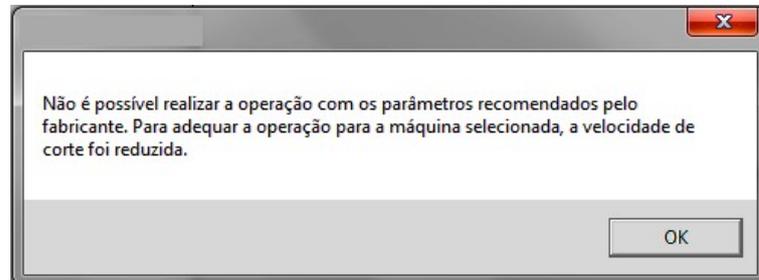


Figura 3.17 – Mensagem de alerta pra restrições energéticas da máquina.

A subdivisão *Ajuste da profundidade de corte para a operação* tem a finalidade de adequar a profundidade de corte a ser utilizada aos requisitos da peça, baseada no valor recomendado pelo fabricante, cadastrado no banco de dados do sistema. Para isso, o módulo toma as medidas de referência da peça como base para calcular o número de passes necessários, utilizando a profundidade de corte cadastrada. Para que esse valor seja um número inteiro, realiza-se primeiramente o arredondamento e, a partir disso, recalcula-se, de forma automática, a profundidade de corte. Com o uso dessa lógica, o valor calculado para a profundidade de corte tende ao recomendado pelo fabricante, seguindo o conceito implementado em todo o sistema.

A seleção do comando *Reposicionar Peça* permite identificar a necessidade de girar a peça antes de iniciar uma nova operação. Quando essa opção é escolhida, o sistema preenche automaticamente a informação *Reposicionar* no campo *Operação*, não necessitando nenhuma indicação complementar para caracterizar esse procedimento. A instrução *Avançar*, por sua vez, registra todas as informações selecionadas na interface em variáveis, integrando esses dados com o relatório do plano de processo.

O relatório do plano de processo sintetiza, em forma de tabela, as informações selecionadas para cada uma das operações. Dados como dimensões de referência, máquina, ferramenta, porta-ferramenta e parâmetros de corte são registrados nesse relatório. Essa interface possui dois comandos, os quais redirecionam para dois módulos distintos: enquanto que a opção *Nova Operação* inicia a seleção de informações referentes a uma operação subsequente, a instrução *Imprimir Desenho* imprime o relatório do plano de processo e

interliga o *S\_ProcPlan* de forma automática com o *software* CAD utilizado. Essa comunicação é fundamental, uma vez que permite a impressão do desenho técnico da peça, o qual pode ser anexado ao plano de processo, fornecendo informações suficientes para a fabricação da peça. A Figura 3.18 mostra a interface do relatório do plano de processo.

S_ProcPlan GPFAl/UFRGS		PLANO DE PROCESSO										Página 1 de 2	
		Material: <input type="text"/>		Descrição: <input type="text"/>									
		Processista: <input type="text"/>		Produto N: <input type="text"/>									
N°	Operação	Ø (mm)	L (mm)	Máquina	Ferramenta	Porta-Ferramenta	Potência (kW)	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Rotação (rpm)	Passes	
1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
6	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
7	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
8	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
9	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
10	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	

Figura 3.18 – Interface do relatório do plano de processo.

## 4 PLANO DE PROCESSO DE UMA PEÇA EXEMPLO

Com a finalidade de ilustrar a utilização do sistema desenvolvido, é tomada uma peça cilíndrica com variação de diâmetro e presença de furo passante, para a qual é gerado um plano de processo. A escolha de uma peça com essas características justifica-se pelo fato das mesmas estarem em conformidade com o propósito do trabalho e com as regras de identificação de geometrias descritas na metodologia. A Figura 4.1 representa o desenho técnico da peça exemplo.

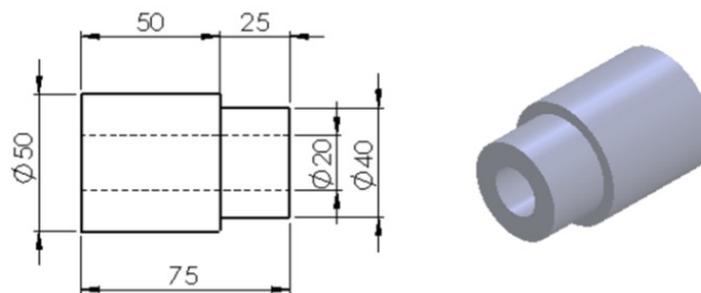


Figura 4.1 – Desenho técnico da peça exemplo.

O funcionamento do *S\_ProcPlan* está fundamentado em seus dois blocos constituintes, representados na Figura 3.2. Esses blocos correspondem, basicamente, aos processos de extração de geometrias do STEP (Bloco 1) e elaboração do plano de processo (Bloco 2). A explanação dos resultados obtidos, portanto, baseia-se no detalhamento dos procedimentos realizados em cada um desses blocos, evidenciando as estratégias de seleção de informações para cada tipo de operação e os critérios de tomada de decisão incluídos no sistema. Como resultado final, apresenta-se o plano de processo para a peça exemplo, acompanhado do respectivo desenho técnico.

### 4.1 Identificação das geometrias da peça – Bloco 1

Analisando o desenho da Figura 4.1, percebe-se claramente a presença de três geometrias distintas na peça exemplo (representadas na Figura 4.2): dois cilindros externos simples e um cilindro interno (furo) passante. Características desse tipo são comuns em peças rotacionais, fato que torna seu reconhecimento fundamental, uma vez que, baseado no

mesmo, pode-se relacionar cada geometria com os respectivos processos de usinagem necessários para obtê-la.

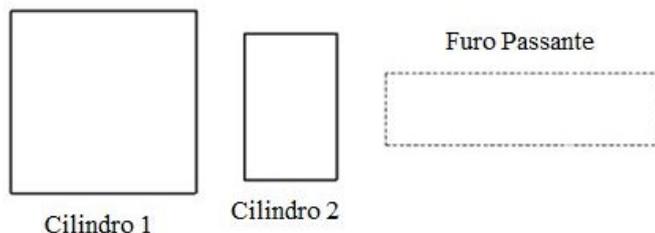


Figura 4.2 – Geometrias principais da peça exemplo.

Segundo a filosofia do sistema desenvolvido, essas características, bem como suas dimensões principais, devem ser identificadas automaticamente com base no arquivo STEP AP 203 do desenho da peça, no intuito de fornecer os dados de entrada da interface de planejamento de processo. Para isso, é necessário, primeiramente, projetar a peça em um *software* CAD. Para a peça exemplo, utilizou-se o *SolidWorks*. A partir do armazenamento do desenho em formato STEP, a conexão com o módulo de extração de características pode ser realizada, de acordo com os procedimentos descritos na seção 3.2. Os dados obtidos por meio do processamento do primeiro módulo são apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2, B.1 e B.2 (Apêndice B).

A primeira expõe todas as informações extraídas do arquivo STEP, relacionando os indicadores e os dados geométricos às respectivas entidades constituintes do padrão. As referências contidas nessa tabela permitem reorganizar as informações dispostas aleatoriamente no STEP, reconstituindo a árvore hierárquica para cada uma das *Advanced Faces* do modelo do produto, as quais estão relacionadas a uma respectiva geometria. A tabela contendo os dados gerais extraídos do STEP da peça exemplo é apresentada no Apêndice B.

As regras de identificação de características de usinagem são empregadas com base, principalmente, em entidades de baixo nível da hierarquia do STEP. Desse modo, é necessário selecionar as informações referentes a essas entidades da tabela com todos os dados extraídos. A segunda etapa de processamento, portanto, consiste na reorganização dos dados obtidos do STEP, adaptando-os para a utilização como informações de entrada para a aplicação das regras. A Tabela 4.1 ilustra o resumo das informações extraídas do STEP AP 203 da peça

exemplo. Os dados relacionados ao raio e às coordenadas cartesianas contidos na tabela referem-se aos círculos da *Edge Curve*.

Tabela 4.1 – Resumo das informações extraídas do arquivo STEP AP 203.

<i>Edge Curve</i> (#N)	Superfície	Construção <i>Edge Curve</i>	Raio (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)
167;62;109;270	cilindro	círculo-linha- círculo-linha	10;10	0;0	0;0	0;75
236;218;65;204	cilindro	círculo-linha- círculo-linha	20;20	0;0	0;0	75;50
75;189;25;132	cilindro	círculo-linha- círculo-linha	25;25	0;0	0;0	50;0
91;75/254;65	plano	círculo-círculo/ círculo-círculo	25;25/20;20	0;0/0;0	0;0/0;0	50;50/50;50
189;91;132;149	cilindro	linha-círculo- linha-círculo	25;25	0;0	0;0	50;0
45;167/149;25	plano	círculo-círculo/ círculo-círculo	10;10/25;25	0;0/0;0	0;0/0;0	0;0/0;0
218;306;204;254	cilindro	linha-círculo- linha-círculo	20;20	0;0	0;0	75;50
327;109/306;236	plano	círculo-círculo/ círculo-círculo	10;10/20;20	0;0/0;0	0;0/0;0	75;75/75;75
62;45;270;327	cilindro	linha-círculo- linha-círculo	10;10	0;0	0;0	0;75

A partir dos dados obtidos na Tabela 4.1, são aplicadas as regras de identificação de geometrias propostas, expostas na seção 3.2.2, no intuito de reconhecer as geometrias cilíndricas presentes na peça. A Tabela 4.2, obtida automaticamente a partir do processamento das informações do STEP, ilustra as características identificadas para a peça exemplo, evidenciando o tipo de cilindro e suas dimensões principais. As informações contidas no campo *Característica* dessa tabela também são armazenadas automaticamente na *ComboBox* de seleção de geometrias do módulo de planejamento de processo.

Tabela 4.2 – Características automaticamente identificadas para a peça exemplo.

Característica	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Tipo
cilindro interno de diâmetro 20 mm e comprimento 75 mm sem offset do centro	20	75	cilindro interno
cilindro externo de diâmetro 40 mm e comprimento 25 mm	40	25	cilindro externo
cilindro externo de diâmetro 50 mm e comprimento 50 mm	50	50	cilindro externo

Ao avaliar os dados obtidos na Tabela 4.2 e compará-los às Figuras 4.1 e 4.2, percebe-se que as características encontradas condizem com as *features* de usinagem presentes no desenho da peça, visto que o módulo interpreta as informações do STEP e reconhece corretamente todas as geometrias presentes.

No estágio alcançado, o interpretador de geometrias baseado no arquivo STEP é capaz de reconhecer geometrias cilíndricas com a presença de ranhuras e furos passantes ou cegos, ou seja, relaciona-se, predominantemente, com operações de torneamento e furação. A implementação do reconhecimento de características para outras formas de peça é semelhante, porém são necessárias aplicações de novas regras, incrementando a lógica analítica do sistema.

## **4.2 Detalhamento das operações do plano de processo – Bloco 2**

Ao observar as geometrias reconhecidas para a peça exemplo, representadas na Tabela 4.2, percebe-se a presença de cilindros externos e internos (furos). Para a elaboração do plano de processo, essas características devem ser relacionadas com os processos de usinagem necessários para obtê-las. No caso da peça exemplo, os cilindros externos requerem operações de torneamento cilíndrico, enquanto que a fabricação de um cilindro interno demanda um processo de furação. Uma operação de faceamento também é fundamental, no intuito de adequar o comprimento da matéria-prima bruta ao comprimento máximo da peça. Portanto, as operações necessárias para a fabricação da peça exemplo são as seguintes: (1) faceamento; (2) torneamento cilíndrico e (3) furação. Em vista disso, explana-se o funcionamento do Bloco 2 do *S\_ProcPlan* baseado nessas três operações, demonstrando detalhadamente os procedimentos para cada processo considerando as informações da peça exemplo.

### **4.2.1 Operações de faceamento**

A formulação do sistema considera que a matéria-prima bruta chega até a estação de trabalho cortada em comprimentos próximos ao máximo requerido para a peça. Dessa forma, não é necessário adicionar, inicialmente, uma operação de corte ao plano de processo. Portanto, o primeiro processo deve ser uma operação de faceamento, no intuito de eliminar as irregularidades resultantes do corte da matéria-prima e, assim, obter o comprimento máximo

da peça a ser produzida com bom acabamento. A lógica de programação implementada no sistema direciona a escolha dessa operação como inicial no plano de processo, uma vez que, após a determinação do material e sua respectiva dimensão bruta, os campos de seleção de geometrias e sobrematerial do diâmetro, essenciais para outras operações, não podem ser preenchidos. Em consequência disso, deve-se selecionar apenas o tipo de usinagem, a máquina e a ferramenta capazes de realizar a operação de faceamento. A Figura 4.3 mostra o fluxograma de ações para o registro de uma operação de faceamento no *S\_ProcPlan*.

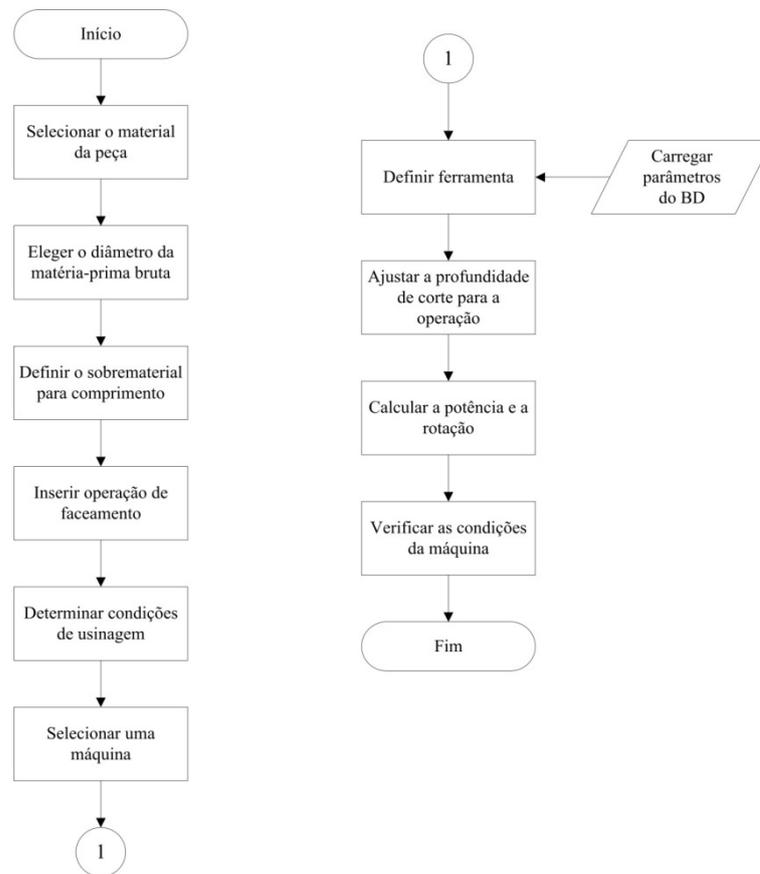


Figura 4.3 – Fluxograma para registrar uma operação de faceamento.

O material da peça é o primeiro parâmetro a ser determinado na interface do *S\_ProcPlan*, visto que não essa informação não é obtida a partir do arquivo STEP AP 203. Essa seleção, realizada pelo comando do tipo *ComboBox*, não tem nenhum tipo de restrição prévia, fato que possibilita ao processista identificar todos os materiais cadastrados no banco de dados de manufatura. No caso da peça exemplo, o material selecionado é o aço SAE 1020, comumente utilizado na indústria. Após a definição do material para a primeira operação, não

é necessário selecioná-lo novamente, uma vez que o sistema registra essa informação no relatório do plano de processo, mantendo-a para as operações subsequentes. A Figura 4.4 mostra a seleção de materiais do *S\_ProcPlan*.

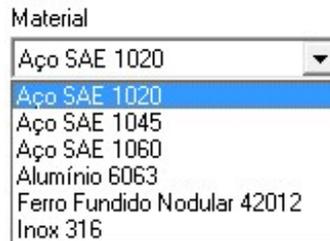


Figura 4.4 – Seleção de materiais no *S\_ProcPlan*.

A definição do diâmetro da matéria-prima bruta relaciona-se diretamente com a informação selecionada para o material. Essa ligação permite, por exemplo, identificar todos os diâmetros de tarugos disponíveis para confeccionar a peça. Para isso, o sistema lista todas as dimensões cadastradas maiores que o diâmetro máximo da peça e, portanto, possíveis de serem utilizadas para sua fabricação. Essa lista é apresentada em ordem crescente de dimensão, no intuito de estabelecer um critério de decisão baseado no menor desperdício de material. Assim, a dimensão cadastrada imediatamente maior que o diâmetro máximo da peça aparece ao processista no topo da lista, como primeira escolha sugerida. No caso da peça exemplo, sendo o diâmetro máximo de 50 mm, seleciona-se a dimensão bruta de 50,8 mm. De maneira análoga à escolha do material, o diâmetro da matéria-prima bruta deve ser selecionado apenas uma vez durante a elaboração do plano de processo. A Figura 4.5 mostra alguns diâmetros de tarugos listados para o material da peça exemplo.



Figura 4.5 – Diâmetros de matéria-prima bruta listados para a peça exemplo.

A determinação do sobrematerial para o comprimento é de responsabilidade do engenheiro processista, já que essa informação não pode ser extraída automaticamente do

arquivo STEP. Para a peça exemplo, determinou-se um sobrematerial de 2 mm no comprimento. Visto que esse parâmetro relaciona-se apenas com o processo de faceamento, sua definição é registrada no sistema e não é modificada para nenhuma outra operação.

A indicação das condições de usinagem é fundamental para a correta seleção da ferramenta para dada operação. No caso da operação de faceamento, deseja-se remover a quantidade de material definida no menor número de passes possível, proporcionando bom acabamento. Dessa forma, seleciona-se a condição de usinagem média. A Figura 4.6 ilustra as opções de condições de usinagem do *S\_ProcPlan*.



Figura 4.6 – Opções de condições de usinagem do *S\_ProcPlan*.

A seleção de uma máquina relaciona-se, basicamente, com a operação a ser executada. Por consequência, o sistema elenca todas as máquinas capazes de realizar determinada operação. Caso mais de um equipamento esteja apto, é necessário adotar um critério de tomada de decisão, com a finalidade de auxiliar na escolha do engenheiro processista. Para torneamento, por exemplo, a lista de máquinas é elaborada em ordem crescente de dimensão de barramento. No caso da peça exemplo, selecionou-se o torno CNC Mazak Nexus 100 II para efetuar a operação de faceamento. A Figura 4.7 mostra a lista de máquinas para a operação de faceamento.

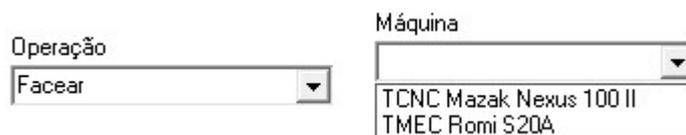


Figura 4.7 – Lista de máquinas para a operação de faceamento.

A definição de uma ferramenta é resultado de restrições impostas por todos os parâmetros anteriormente selecionados: material, operação, condições de usinagem e máquina. Por conseguinte, todas as ferramentas listadas no *ComboBox* de seleção da interface

de planejamento de processo respeitam essas restrições, ou seja, são insertos próprios para o material da peça e capazes de realizar a operação sob as condições de usinagem definidas em determinada máquina. No entanto, em alguns casos, mais de uma opção cumpre esses requisitos, tornando necessária a implementação de uma lógica de decisão para a seleção da ferramenta mais adequada para a aplicação.

No sistema proposto, essa lógica é baseada nas informações presentes em catálogos comerciais [Sandvik, 2017b] (Anexo I), as quais indicam os insertos de formatos C e S como os mais adequados para o faceamento. Baseado nessas orientações, as ferramentas são ordenadas da mais recomendada para a menos recomendada. Os parâmetros de corte vinculados aos insertos, utilizados para estimar a potência e a rotação, são carregados automaticamente do banco de dados do sistema. Para a peça exemplo, considerando a operação de faceamento, os insertos de formato C são os mais recomendados entre os cadastrados (C, V e T), sendo, portanto, elencados no topo da lista de seleção, conforme mostrado na Figura 4.8.

The image shows a software interface with two main sections. On the left, there are four dropdown menus for selecting parameters: 'Material' (Aço SAE 1020), 'Operação' (Facear), 'Condições de usinagem' (Média), and 'Máquina' (TCNC Mazak Nexus 100 II). On the right, there is a 'Ferramenta' dropdown menu that is open, displaying a list of tool options: CCMT 12 04 08 PM, CCMT 12 04 08 UM, VBMT 16 04 08 PM, VBMT 16 04 08 UM, TNMG 16 04 08 PM, TNMG 16 04 08 QM, and TNMG 16 04 08 XM.

Figura 4.8 – Ferramentas elencadas para a operação de faceamento.

O ajuste da profundidade de corte permite que a remoção de material necessária para a operação seja realizada a partir de passes de igual dimensão. No caso do faceamento, utiliza-se o valor do sobrematerial de comprimento para estimar o número de passes e, conseqüentemente, a profundidade de corte. É importante ressaltar que, como se deve realizar uma operação de faceamento para cada extremidade da peça, a dimensão de referência para cada extremo equivale à metade do valor do sobrematerial de comprimento. A Figura 4.9 exibe o ajuste da profundidade de corte para a operação de faceamento da peça exemplo.

**AJUSTE DA PROFUNDIDADE DE CORTE PARA A OPERAÇÃO:**

Recomendada  N° Passes

Profundidade calculada

Figura 4.9 – Ajuste da profundidade de corte para o faceamento.

A potência requisitada para a operação de faceamento é calculada a partir da Equação 3.1, enquanto que a rotação é estimada pela Equação 3.3. É importante ressaltar que, em razão de o processo de faceamento possuir diâmetro de referência variável, utiliza-se um valor de diâmetro médio para avaliar a rotação.

A verificação das condições da máquina é realizada de acordo com os procedimentos definidos na seção 3.4. Para a peça exemplo, é constatado que o torno CNC Mazak Nexus é adequado para efetuar a operação de faceamento utilizando os parâmetros de corte recomendados pelo fabricante, conforme mostrado na Figura 4.10.

**VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DA MÁQUINA:**

Verificação da Potência: <input type="text" value="Máquina atende os requisitos"/>	Verificação do Diâmetro: <input type="text" value="Máquina atende os requisitos"/>
Verificação da Rotação: <input type="text" value="Máquina atende os requisitos"/>	Verificação do Comprimento: <input type="text" value="Máquina atende os requisitos"/>

Figura 4.10 – Verificação das condições da máquina para faceamento.

Por fim, todas as informações selecionadas relativas ao processo são registradas no relatório, conforme ilustrado na Figura 4.11.

N°	Operação	Ø (mm)	L (mm)	Máquina	Ferramenta	Porta-Ferramenta	Potência (kW)	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Rotação (rpm)	Passes
1	Facear	50,8		TCNC Mazak Nexus 100 II	CCMT 12 04 08 PM	SCLCR/L 2020K 12	2,3	345	0,24	1	4323,5	1
2	Reposicioner	50,8										
3	Facear	50,8		TCNC Mazak Nexus 100 II	CCMT 12 04 08 PM	SCLCR/L 2020K 12	2,3	345	0,24	1	4323,5	1

Figura 4.11 – Registro das informações das operações de faceamento.

#### 4.2.2 Operações de torneamento cilíndrico

À medida que o material e sua respectiva dimensão bruta já foram definidos, o primeiro passo para registrar uma operação de torneamento cilíndrico é selecionar a geometria correspondente a esse processo. De modo geral, os cilindros externos identificados necessitam de ao menos uma operação de torneamento. Outro parâmetro primordial é a definição do sobrematerial para diâmetro, na eventualidade da geometria selecionada exigir um posterior processo de acabamento. No caso de um processo de desbaste ou de usinagem média, a designação dessa especificação é necessária, enquanto que, para uma operação de acabamento, essa informação deve ser igual à zero. As escolhas referentes às propriedades restantes assemelham-se às descritas na operação de faceamento. A Figura 4.12 demonstra o fluxograma para o apontamento de operações de torneamento cilíndrico.

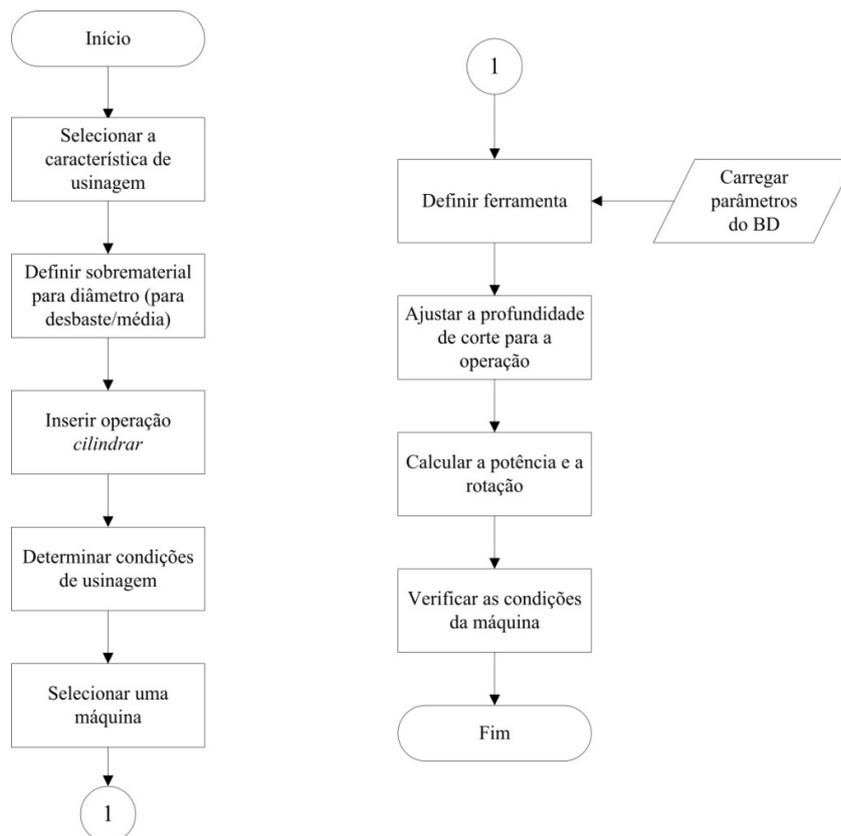


Figura 4.12 – Fluxograma para operação de torneamento cilíndrico.

As máquinas disponíveis para a seleção são aquelas capazes de realizar uma operação de torneamento, elencadas sob o critério de ordem crescente de dimensões de barramento,

descrito na operação de faceamento. A escolha da ferramenta segue as definições estabelecidas no manual técnico do fabricante [Sandvik, 2017b] (Anexo I). As considerações para desbaste e usinagem média assemelham-se às do faceamento. Por esse motivo, o sistema inicia a listagem das ferramentas que podem realizar a operação a partir dos insertos do tipo C, os quais são os mais recomendados para esse processo entre as ferramentas cadastradas no sistema. No caso de operações de acabamento, apresentam-se para seleção apenas as ferramentas dos tipos T e V, as quais possuem o mesmo grau de recomendação para essa aplicação.

A profundidade de corte é calculada com base no valor cadastrado no banco de dados, utilizando a metodologia descrita na seção 3.4. Essa análise é realizada com o objetivo de proporcionar a remoção de material para atingir o diâmetro desejado a partir de passes de igual dimensão. A Figura 4.13 ilustra o processo de ajuste de profundidade de corte para uma operação de torneamento cilíndrico.

#### AJUSTE DA PROFUNDIDADE DE CORTE PARA A OPERAÇÃO:

Recomendada       Diferença Diâmetros       N° Passes

Profundidade calculada

Figura 4.13 – Ajuste da profundidade de corte para torneamento cilíndrico.

A estimativa da potência e da rotação necessárias ocorre pelas Equações 3.1 e 3.3, respectivamente. A verificação das condições da máquina assemelha-se à descrita no processo de faceamento. A Figura 4.14 mostra as operações de torneamento cilíndrico de desbaste/acabamento registradas no plano de processo da peça exemplo.

N°	Operação	Ø (mm)	L (mm)	Máquina	Ferramenta	Porta-Ferramenta	Potência (kW)	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Rotação (rpm)	Passes
4	Cilindrar	50	75	TCNC Mazek Nexus 100 II	VBMT 16 04 08 PF	SVJBR/L 2020K 12	0,89	570	0,14	0,4	3628,73	2
5	Cilindrar	41	25	TCNC Mazek Nexus 100 II	CCMT 12 04 08 PR	SCLCR/L 2020K 12	3,75	200	0,3	2,25	1552,73	4
6	Cilindrar	40	25	TCNC Mazek Nexus 100 II	VBMT 16 04 08 PF	SVJBR/L 2020K 12	0,73	570	0,14	0,33	4535,92	3

Figura 4.14 – Operações de torneamento cilíndrico para a peça exemplo.

### 4.2.3 Operação de furação

A operação de furação geralmente é relacionada com as geometrias identificadas como cilindros internos. A lógica de seleção é semelhante aos processos de torneamento e faceamento, diferenciando-se apenas na dispensabilidade de determinar o sobrematerial de acabamento nos casos de não exigência de condições especiais de qualidade superficial. A Figura 4.15 demonstra o fluxograma para a documentação de uma operação de furação.

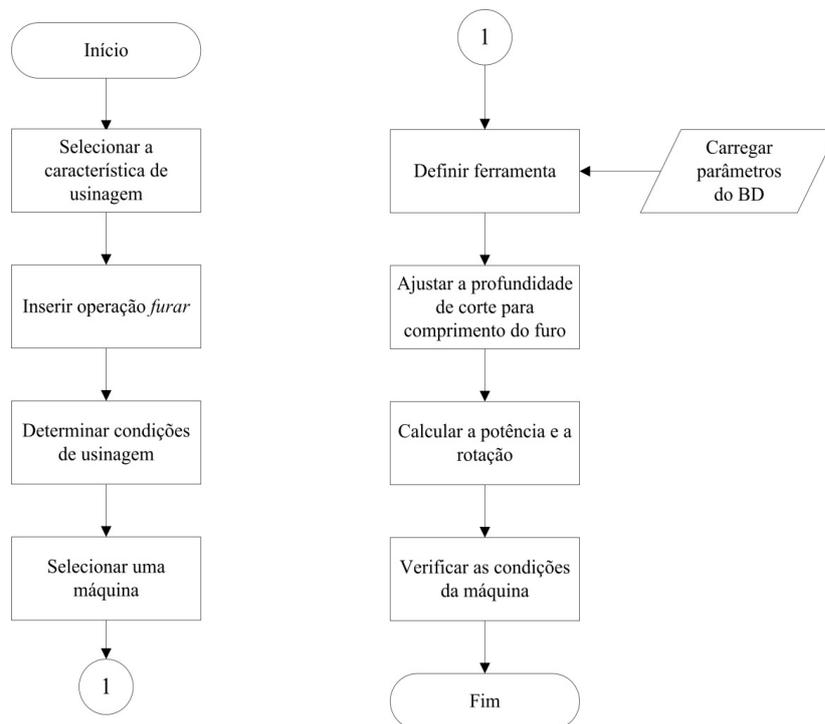


Figura 4.15 - Fluxograma para operação de furação.

Todas as brocas registradas no banco de dados do sistema estão relacionadas a condições médias de usinagem. Isso se deve ao fato de que o acabamento de um furo normalmente requisita outro tipo de operação (como torneamento interno e brunimento), enquanto que uma usinagem em condições mais agressivas (semelhante às de um desbaste) pode demandar a execução de uma furação com pré-furo. Esse tipo de operação é recomendado para reduzir os esforços de corte, sobretudo para furações em materiais com dureza elevada e/ou que utilizem brocas de maior diâmetro. Em vista disso, o *S\_ProcPlan* também permite o registro de uma furação de pré-furo.

De modo geral, os tornos e centros de usinagem também podem ser utilizados para realizar alguns tipos de furação. Para peças com a presença de um furo simétrico ao eixo principal, como no caso do exemplo, todas as máquinas cadastradas podem realizar a operação. Diante disso, a escolha da máquina a ser utilizada torna-se uma decisão técnica do engenheiro processista. Para o processo de furação da peça exemplo, seleciona-se a furadeira de coluna Yadoya A38, no intuito de reduzir a carga de trabalho do torno CNC Mazak Nexus, empregado para as demais operações.

A seleção de ferramentas é realizada de maneira semelhante aos demais processos, respeitando as mesmas restrições. No entanto, as brocas possuem outros dois parâmetros importantes a serem considerados: o comprimento do canal e o diâmetro da broca. A primeira característica limita a profundidade máxima de furo para um único passe, enquanto que a segunda relaciona-se diretamente com o diâmetro da geometria identificada. A lógica de programação do sistema define que somente sejam exibidas as brocas que obedecerem a essas restrições. No caso de uma operação de pré-furo, por exemplo, as brocas adequadas para o processo são listadas para seleção em ordem crescente de diâmetro.

A profundidade de corte é ajustada de modo que a broca possa executar o processo de furação em um único passe. Dessa forma, o valor registrado corresponde ao comprimento do furo. A potência é calculada a partir da Equação 3.2, enquanto que a rotação é estimada pela Equação 3.3. A verificação das condições da máquina é realizada conforme descrito para os outros processos. A Figura 4.16 ilustra as operações de furação definidas para a peça exemplo.

Nº	Operação	Ø (mm)	L (mm)	Máquina	Ferramenta	Porta-Ferramenta	Potência (kW)	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Rotação (rpm)	Passes
7	Pré-furo	8	75	FURC Yadoya A38	DIN 338 1282	Mandril Jacobs	0,3	25	0,17	75	994,72	1
8	Furar	20	75	FURC Yadoya A38	DIN 338 1378	Mandril Jacobs	0,76	25	0,17	75	397,89	1

Figura 4.16 – Operações de furação definidas para a peça exemplo.

### 4.3 Plano de processo obtido

Definidos todos os parâmetros das operações necessárias para a fabricação da peça, o relatório do plano de processo obtido é gerado, conforme visualizado na Figura 4.17. Esse relatório contém informações técnicas para produzir a peça sob condições operacionais ideais,

seguindo, portanto, as recomendações dos fabricantes das ferramentas. No intuito de complementar essas informações, o desenho técnico da peça (Figura 4.18) pode ser reproduzido, a partir da integração do *S\_ProcPlan* com o *software CAD SolidWorks*, descrita na seção 3.4. Ao anexar o desenho técnico ao plano de processo, o processista fornece dados suficientes para o setor de produção fabricar a peça segundo as especificações de projeto, colaborando, assim, para a integração entre CAD/CAPP/CAM, a qual é fundamental para garantir a competitividade da indústria no mercado.

S_ProcPlan GPFAI/UFRGS				PLANO DE PROCESSO						Página 1 de 2			
				Material: <input type="text" value="Aço SAE 1020"/>		Descrição: <input type="text" value="Peça Exemplo"/>							
				Processista: <input type="text" value="Vinicius Spanhol Bordignon"/>		Produto N°: <input type="text" value="0001"/>							
Nº	Operação	Ø (mm)	L (mm)	Máquina	Ferramenta	Porta-Ferramenta	Potência (kW)	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Rotação (rpm)	Passes	
1	Facear	50,8		TCNC Mazak Nexus 100 II	CCMT 12 04 08 PM	SCLCR/L 2020K 12	2,3	345	0,24	1	4323,5	1	
2	Reposicionar	50,8											
3	Facear	50,8		TCNC Mazak Nexus 100 II	CCMT 12 04 08 PM	SCLCR/L 2020K 12	2,3	345	0,24	1	4323,5	1	
4	Cilindrar	50	75	TCNC Mazak Nexus 100 II	VBMT 16 04 08 PF	SVJBR/L 2020K 12	0,89	570	0,14	0,4	3628,73	2	
5	Cilindrar	41	25	TCNC Mazak Nexus 100 II	CCMT 12 04 08 PR	SCLCR/L 2020K 12	3,75	200	0,3	2,25	1552,73	4	
6	Cilindrar	40	25	TCNC Mazak Nexus 100 II	VBMT 16 04 08 PF	SVJBR/L 2020K 12	0,73	570	0,14	0,33	4535,92	3	
7	Pré-furo	8	75	FURC Yadoya A38	DIN 338 1282	Mandril Jacobs	0,3	25	0,17	75	994,72	1	
8	Furar	20	75	FURC Yadoya A38	DIN 338 1378	Mandril Jacobs	0,76	25	0,17	75	397,89	1	
9													
10													

Figura 4.17 - Relatório do plano de processo obtido para a peça exemplo.

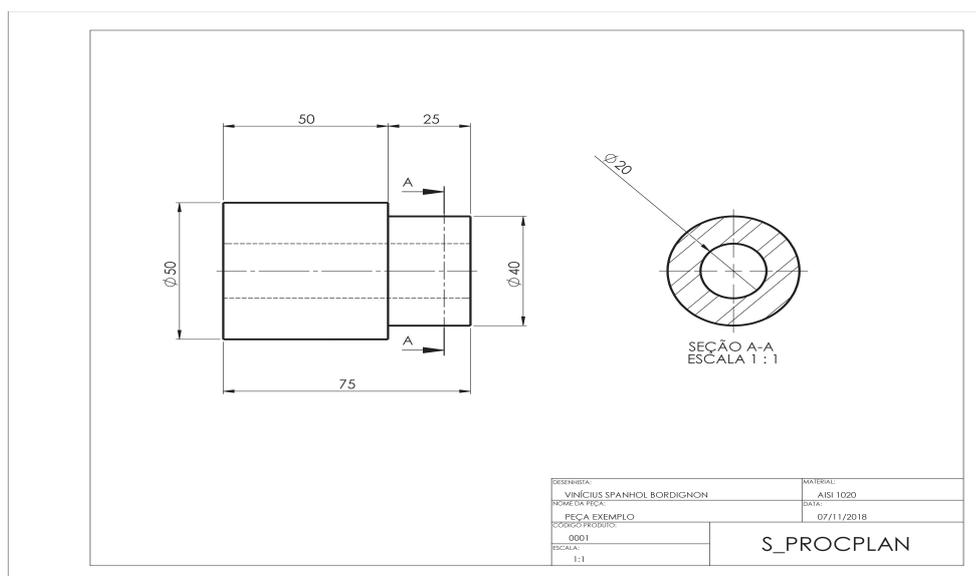


Figura 4.18 – Desenho da peça obtido pela ligação do *S\_ProcPlan* e *SolidWorks*.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar a produção científica nos últimos anos, verifica-se a existência de inúmeras pesquisas na área de automatização de planejamento de processos, as quais buscam superar a lacuna existente na concepção de sistemas CAPP, sobretudo em comparação aos seus adjacentes (CAD na área de projeto e CAM na manufatura). Nesse sentido, o presente trabalho justifica-se como um esforço para colaborar com o desenvolvimento nesse campo de pesquisa.

O sistema foi concebido como um CAPP semi-generativo com ênfase no planejamento de processos de usinagem para peças rotacionais, empregando como base de informações o arquivo neutro STEP AP 203. O uso desse padrão para troca de dados do produto se mostrou eficaz dentro dos objetivos propostos, corroborando sua confiabilidade para aplicações visando à automatização do planejamento do processo. O modelo apresentado consiste em uma importante ferramenta de auxílio ao engenheiro processista na elaboração de planos de processo, uma vez que possibilita a busca, de forma automática, de ferramentas, porta-ferramentas, materiais e máquinas necessários para as operações, bem como realiza os cálculos dos parâmetros envolvidos no processo. Dessa forma, reduz-se a carga de trabalho em atividades repetitivas e exaustivas, permitindo ao processista dedicar-se em ações as quais agregam valor diretamente ao produto.

O sistema concebido é composto por dois blocos principais: (1) armazenamento de informações e extração de geometrias do arquivo STEP e (2) elaboração do plano de processo baseado na interação com o banco de dados de manufatura. Por meio dos testes realizados, percebe-se a validade do primeiro módulo, visto que todas as geometrias identificadas para a peça exemplo, bem como suas principais dimensões e características, estão de acordo com as especificadas no projeto. Esse módulo pode ser utilizado para peças rotacionais com características de variações de diâmetro, presença de furos cegos ou passantes e ranhuras. Os resultados obtidos na interface de geração do plano de processo são considerados satisfatórios, uma vez que o plano gerado, em conjunto com o desenho técnico do componente, fornece informações referentes ao processo de usinagem as quais possibilitam a fabricação da peça conforme as especificações de projeto, colaborando, dessa forma, para a integração entre CAD/CAPP/CAM.

Ressalta-se, ainda, que o *S\_ProcPlan* gera o plano de processo seguindo, em princípio, as recomendações dos fabricantes das ferramentas. No entanto, caso sejam necessárias adequações a aspectos operacionais ou econômicos, o processista tem a opção de modificar os valores dos parâmetros no banco de dados de manufatura, substituindo-os por valores efetivos de usinagem.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com a finalidade de aprimorar o sistema de planejamento de processo concebido, verifica-se a necessidade de desenvolver alguns itens, tais como:

- ampliar o algoritmo de reconhecimento de características a partir do arquivo STEP para outras geometrias (como rasgos de chaveta) e outras formas de peças (prismáticas);
- utilizar outros protocolos de aplicação do STEP, os quais possuem informações adicionais referentes ao modelo do produto em comparação ao AP 203, como tolerâncias dimensionais e geométricas;
- expandir o sistema para outros processos de usinagem, como o fresamento;
- adicionar um módulo para cálculo de tempos e custos de fabricação, no intuito de permitir uma análise econômica do plano de processo gerado;
- acrescentar um módulo para o cálculo da rugosidade obtida em operações de acabamento, relacionando profundidade de corte e avanço e permitindo, caso necessário, a modificação do avanço utilizado, de forma análoga à desenvolvida para a profundidade de corte;
- ampliar o banco de dados do sistema para materiais e ferramentas de outros fornecedores;
- integrar o *S\_ProcPlan* com sistemas de manufatura CAM.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaitik, S. M., e Kiliç, S. E. A STEP-based product data model for CAPP. **10th International Conference On Machine Design And Production**, Cappadocia, Turquia, p.237-247, 2002.

Arunkumar, P. **An intelligent system for manufacturing information based on automatic extraction of product data from CAD models**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Jawaharlal Nehru Technological University, Hyderabad, 2013.

Bhandarkar, M P., e Nagi, R. STEP-based feature extraction from STEP geometry for Agile Manufacturing. **Computers In Industry**, Amsterdam, vol. 41, n. 1, p.3-24, 2000.

Cosic, P., Antolic, D., e Milic, I. Web oriented sequence operations. **19th International Conference on Production Research**, Valparaiso, 2007.

Chang, T., e Wysk, R. A. **An Introduction to Automated Process Planning Systems**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1985.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., e Coppini, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.

Elinox. **Aço Inox (Catálogo Técnico)**. [http://www.elinox.com.br/wp-content/uploads/2017/02/barra-de-aco-inox-redonda\\_quadrada\\_sextavadas.pdf](http://www.elinox.com.br/wp-content/uploads/2017/02/barra-de-aco-inox-redonda_quadrada_sextavadas.pdf), 2017, Acesso em: 14-12-2018.

Farias, J. B. S. **Desenvolvimento de um sistema semi-generativo para planejamento de processo auxiliado por computador para ambiente de usinagem**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

Ferraresi, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 17. ed. São Paulo: Blucher, 2017.

Ferreira, J. C. E., Benavente, J. C. T., e Inoue, P. H. S. A web-based CAD/CAPP/CAM system compliant with the STEP-NC standard to manufacture parts with general surfaces. **Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering**, vol. 39, n. 1, p.155-176, 2016.

Groover, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems**. 5. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2013.

Halevi, G. **Process and operation planning**. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2003.

Hua-Bing, O. A STEP-compliant Intelligent Process Planning System for Milling. **The Open Automation And Control Systems Journal**, vol. 7, p.510-520, 2015.

Hussein, H. M. A., e Kumar, S. A framework for development of an intelligent system for design and manufacturing of stamping dies. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, vol. 65, 2014.

Indaço. **Catálogo de ferramentas (Catálogo Técnico)**. <http://sistemaids.com.br/website/indaco/images/book/catalogo-indaco-2015.pdf>, 2015, Acesso em 18-12-2018.

Irwin. **Brocas para metal (Catálogo Técnico)**. [https://www.irwin.com.br/uploads/products/brochure/866\\_Brocas-para-Metal.pdf](https://www.irwin.com.br/uploads/products/brochure/866_Brocas-para-Metal.pdf), 2017, Acesso em: 18-12-2018.

ISO 513: **Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – Designation of Main Groups and Groups of Application**. 2004.

ISO 10303: **Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange**. 1994.

ISO TC 184/SC4/WD. **ISO 10303– Part 11 – Descriptive methods: The EXPRESS language reference manual**. 1997.

Khan, A. A., Hussein, H. M., Nasr, E. S. A., e Al-Ahmari, A. Computer-aided process planning in prismatic shape die components based on Standard for the Exchange of Product model data. **Advances In Mechanical Engineering**, vol. 7, n. 11, p.1-11, 2015.

Kumar, A. **Some aspects of feature based modelling and automatic feature recognition for computer aided process planning**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Tecnologia, Departamento de Engenharia de Produção, Jadavpur University, Kolkata, 2005.

Lau, H. C. W., Lee, C. K. M., Jiang, B., Hui, I. K., e Pun, K. F. Development of a computer-integrated system to support CAD to CAPP. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 26, n. 9-10, p.1032-1042, 2004.

Liang, M., Ahmed, S., e Van den Berg, B. A STEP based tool path generation system for rough machining of planar surfaces. **Computers In Industry**, Amsterdam, vol. 32, n. 2, p.219-231, 1996.

Loffredo, D. Fundamentals of STEP Implementation. **STEP Tools, Inc.**, Rensselaer Technology Park, Troy, New York, 2000.

Lorini, F. J. **Tecnologia de grupo e organização da manufatura**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1993.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., e Silva, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. Ed. São Paulo: Blucher, 2015.

Majstorović, V. D., Šibalija, T., Erčević, B., e Erčević, M. Capp Model for Prismatic Parts in Digital Manufacturing. **Ifip Advances In Information And Communication Technology Digital Product and Process Development Systems**, p.190-204, 2013.

Malleswari, V. N. **Automatic feature recognition for rotational components from STEP files**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Andhra University, Visakhapatnam, 2013.

Malleswari, V. N., Valli, P. M., e Sarcar, M. M. M. Automatic Recognition of Machining Features using STEP Files. **International Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT)**, vol. 2, n. 3, p.1-11, 2013.

Marchetta, M. G., e Forradellas, R. Q. Artificial intelligence planning for generative computer aided process planning. **19th International Conference On Production Research**, 2007.

Martinelli. **Produtos em ferro fundido (Catálogo Técnico)**. <http://fundicaomartinelli.com.br/wp-content/uploads/2017/catalogo-ferro.pdf>, 2017, Acesso em: 14-12-2018.

Melo, S. P. **Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Planejamento de Processo Auxiliado por Computador em um Ambiente de Usinagem**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

Metalthaga. **Tabela de dimensões e peso de barras – alumínio, cobre e latão (Catálogo Técnico)**. <http://metalthaga.com.br/wp-content/uploads/2015/11/6-Tabela-de-dimensoes-e-Peso-de-Barras.pdf>, 2015, Acesso em 10-12-2018.

Mitchell, M. J. Capabilities for Product Data Exchange. **National Institute of Standards and Technology**. Gaithersburg, EUA, 1997.

Oussama, J., Abdelilah, E., e Ahmed, R. Manufacturing Computer Aided Process Planning For Rotational Parts. Part 1: Automatic Feature Recognition From STEP AP203 Ed2. **International Journal Of Engineering Research And Applications**, vol. 4, n. 5, p.14-25, 2014.

Pacheco, N. O., Harbs, E., Rosso Jr., R. S. U., Hounsell, M. S., e Ferreira, J. C. E. Application of the STEP-NC standard in a computer numerical controlled machining device. **ABCM Symposium Series In Mechatronics: Section IV - Industrial Informatics, Discrete and Hybrid Systems**, vol. 5, p.713-723, 2012.

Pratt, M. J. Introduction to ISO 10303 - The STEP standard for product data exchange. **Journal Of Computing And Information Science In Engineering**, vol. 1, n. 1, p.102-103, 2001.

Reddy, A. S., Sekhar, Y. P., Prasad, T. R., e Ravindranath, K. Design and development of feature extraction and recognition information system for computer aided process planning systems. **5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design And Research Conference (AIMTDR 2014)**, Guwahati, 2014.

Ribeiro, M. A. J. V. **Product-process engineering integration using STEP - ISO 10303 AP242**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Informática e Computação, Universidade do Porto, Porto, 2016.

Saleh, M. A., Hussein, H. M. A., e Mousa, H. M. Computer Aided Process Planning for Freeform Surface Sheet Metal Features in Automotive Industry. **Applied Mechanics And Materials**, vol. 392, p.931-935, 2013.

Sandvik. **Ferramentas para torneamento (Catálogo Técnico)**. [http://sandvik.ecbook.se/se/pt/turning\\_tools\\_2017/](http://sandvik.ecbook.se/se/pt/turning_tools_2017/), 2017a, Acesso em: 12-11-2018.

Sandvik. **Tecnologia em usinagem (Manual Técnico)**. [http://sandvik.ecbook.se/se/pt/training\\_handbook/](http://sandvik.ecbook.se/se/pt/training_handbook/), 2017b, Acesso em: 12-11-2018.

Sangolli, S., Pilli, S. C., e Adake, C. V. Computer assisted process planning of asymmetrical prismatic parts. **International Journal Of Mechanical And Production Engineering**, vol. 5, n. 5, 2017.

Sateesh, P., e Mahesh, P. V. A Methodology For Feature Extraction And Recognition For Cad/Cam Integration Using Step File. **International Journal Of Research And Innovation (IJRI)**, vol. 4, n. 1, p.711-725, 2017.

Sivakumar, S., e Dhanalakshmi, V.. An approach towards the integration of CAD/CAM/CAI through STEP file using feature extraction for cylindrical parts. **International Journal Of Computer Integrated Manufacturing**, vol. 26, n. 6, p.561-570, 2013.

Sreeramulu, D., e Rao, C.S.P. A New Methodology for Recognition of Milling Features from STEP File. **The International Journal Of Applied Management And Technology**, Minneapolis, vol. 6, n. 3, p.172-190, 2008.

Teich, T., Militzer, J., Jahn, K., Kretz, D., e Neumann, T. Using ISO 10303-224 for 3D Visualization of Manufacturing Features. **Advanced Manufacturing And Sustainable Logistics**, p.198-209, 2010.

Tenax. **Aços para construção mecânica (Catálogo Técnico)**. [http://www.tenax.com.br/tenax/wp-content/themes/rocco/pdfs/acos-para-construcao-mecanica/Catalogo\\_Construcao\\_Mecanica.pdf](http://www.tenax.com.br/tenax/wp-content/themes/rocco/pdfs/acos-para-construcao-mecanica/Catalogo_Construcao_Mecanica.pdf), 2018, Acesso em: 10-12-2018.

Venu, B., Komma, V. R., e Srivastava, D. A Methodology to Recognize Manufacturing Features of Prismatic Parts from STEP AP 203 File. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, vol. 2, n. 4-5, p.3170-3177, 2015.

Xu, X., Wang, L., e Newman, S. T. Computer-aided process planning – A critical review of recent developments and future trends. **International Journal Of Computer Integrated Manufacturing**, vol. 24, n. 1, p.1-31, 2011.

Yifei, T., Dongbo, L., Changbo, L., e Minjian, Y. A feature-extraction-based process-planning system. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 38, n. 11-12, p.1192-1200, 2007.

Yusof, Y., e Latif, K. Survey on computer-aided process planning. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 75, n. 1-4, p.77-89, 2014.

Zarkti, H., Mesbahi, A., Rechia, A., e Jaider, O. Towards an Automatic-optimized tool selection for milling process, based on data from Sandvik Coromant. **Xème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées**, Tanger, 2015.

## APÊNDICE A - Rotina de extração de dados da hierarquia do STEP AP 203

A Figura A.1 apresenta a rotina de programação utilizada para a extração de informações dos primeiros níveis hierárquicos do STEP AP 203.

```

Private Sub cmdPesquisaPontos_Click()

Dim linhax As String 'Declara linhax como uma variável do tipo string

j = 1 'Contador das Advanced Faces
thash = 1 'Posição da # do Closed_Shell
Tv = 2 'Posição de referência para encontrar a 1ª # (indicador de entidade) relacionada às Advanced_Faces

f1 = FreeFile
Open ArquivoTexto For Input As f1 'Abre o arquivo STEP
Do While Not EOF(f1) 'Enquanto não for final do arquivo, executar essa rotina
Line Input #f1, linhax 'Lê linha por linha e armazena informações na variável linhax

    If InStr(linhax, "CLOSED_SHELL") Then 'Método para encontrar a linha contendo a entidade Closed_Shell
        tigual = InStr(thash, linhax, "=", 1) 'Método para encontrar a posição do "=" correspondente à # do Closed_Shell
        Cshell = Val(Mid$(linhax, thash + 1, tigual - thash - 1)) 'Método para encontrar o indicador do Closed_Shell

'Rotina para encontrar e armazenar as Advanced Faces
Advface:
        TPos = InStr(Tv, linhax, "#", 1) 'Método para encontrar a posição da primeira # referente às Advanced Faces
        Tv = InStr(TPos, linhax, ",", 1) 'Método para encontrar a posição da primeira "," após a #

        If Tv = 0 Then 'Método para encontrar todas as Advanced Faces presentes no Closed_Shell - Se verdadeiro, é a armazenada a última #.
            Advface(j) = Val(Mid$(linhax, TPos + 1, InStr(TPos, linhax, "#", 1) - TPos)) 'Método para encontrar a # da última Advanced_Face
            j = j + 1
            GoTo rot1 'Vai para a rotina da próxima entidade
        Else
            Advface(j) = Val(Mid$(linhax, TPos + 1, Tv - TPos)) 'Método para encontrar os indicadores das Advanced_Faces
            j = j + 1 'Adiciona uma unidade no índice de armazenamento
            GoTo Advface 'Segue na rotina, buscando armazenar informações sobre a próxima Advanced Face
        End If
    Else
        GoTo lop 'Se a linha não corresponder à entidade Closed_Shell, segue buscando essa entidade nas linhas do STEP
    End If
End Do
lop: Loop

```

Figura A.1 – Rotina de programação utilizada para a extração de dados do STEP AP 203.

## APÊNDICE B – Dados extraídos do arquivo STEP AP 203 da peça exemplo

As Tabelas B.1 e B.2 apresentam os dados extraídos do arquivo STEP AP 203 da peça exemplo para entidades de alto e baixo nível, respectivamente.

Tabela B.1 – Dados extraídos para entidades de alto nível do arquivo STEP AP 203 da peça exemplo.

AF	FOB/ FB	FB/FOB	Surf.	Tipo	Ax2_3D	Raio	PC	x-y-z	EL FOB/FB	EL FB/FOB	OE FOB/FB	OE FB/FOB	EC FOB/FB	EC FB/FOB	Elementos EC- FOB/FB	Elementos EC-FB/FOB
216	74	-	155	cilindro	127	10	71	0;0;0	164	-	102;14;279;99	-	167;62;109;270	-	208;238;250;271	-
84	58	-	36	cilindro	318	20	245	0;0;75	38	-	111;249;283;35	-	236;218;65;204	-	215;70;128;145	-
140	175	-	329	cilindro	57	25	282	0;0;50	100	-	118;227;237;129	-	75;189;25;132	-	321;134;47;143	-
243	147	277	93	plano	0	0	0	x;x;x	251	313	151;34	240;85	91;75	254;65	200;321	9;128
322	73	-	304	cilindro	224	25	142	0;0;50	323	-	177;162;90;56	-	189;91;132;149	-	134;200;143;68	-
40	110	307	26	plano	0	0	0	x;x;x	97	32	324;59	78;228	45;167	149;25	101;208	68;47
203	6	-	209	cilindro	103	20	154	0;0;75	197	-	176;20;104;186	-	218;306;204;254	-	70;17;145;9	-
11	184	194	188	plano	0	0	0	x;x;x	49	187	317;22	230;255	327;109	306;236	44;250	17;215
116	190	-	4	cilindro	39	10	31	0;0;0	23	-	161;173;285;257	-	62;45;270;327	-	238;101;271;44	-

Tabela B.2 – Dados extraídos para entidades de baixo nível do arquivo STEP AP 203 da peça exemplo.

AF	Construção EC-FOB/FB	Construção EC FB/FOB	Ax2_3D FOB/FB	Ax2_3D FB/FOB	Raio Circ. FOB/FB	Raio Circ. FB/FOB	PC FOB/FB	PC FOB/FB	x-y-z 1 FOB/FB	x-y-z 2 FOB/FB	x-y-z 3 FOB/FB	x-y-z 4 FOB/FB	x-y-z 1 FB/FOB	x-y-z 2 FB/FOB	x-y-z 3 FB/FOB	x-y-z 4 FB/FOB
216	circulo-linha-circulo-linha	-	18;0;276;0	-	10;0;10;0	-	272;0;170;0	-	0;0;0	x;x;x	0;0;75	x;x;x	-	-	-	-
84	circulo-linha-circulo-linha	-	72;0;248;0	-	20;0;20;0	-	205;0;291;0	-	0;0;75	x;x;x	0;0;50	x;x;x	-	-	-	-
140	circulo-linha-circulo-linha	-	261;0;165;0	-	25;0;25;0	-	265;0;316;0	-	0;0;50	x;x;x	0;0;0	x;x;x	-	-	-	-
243	circulo-circulo	circulo-circulo	298;261	138;248	25;25	20;20	96;265	2;291	0;0;50	0;0;50	-	-	0;0;50	0;0;50	-	-
322	linha-circulo-linha-circulo	-	0;298;0;1	-	0;25;0;25	-	0;96;0;229	-	x;x;x	0;0;50	x;x;x	0;0;0	-	-	-	-
40	circulo-circulo	circulo-circulo	213;18	1;165	10;10	25;25	126;272	229;316	0;0;0	0;0;0	-	-	0;0;0	0;0;0	-	-
203	linha-circulo-linha-circulo	-	0;178;0;138	-	0;20;0;20	-	0;326;0;2	-	x;x;x	0;0;75	x;x;x	0;0;50	-	-	-	-
11	circulo-circulo	circulo-circulo	210;276	178;72	10;10	20;20	69;170	326;205	0;0;75	0;0;75	-	-	0;0;75	0;0;75	-	-
116	linha-circulo-linha-circulo	-	0;213;0;210	-	0;10;0;10	-	0;126;0;69	-	x;x;x	0;0;0	x;x;x	0;0;75	-	-	-	-

Legenda:

- AF: *Advanced Face*;
- FOB: *Face Outer Bound*;
- FB: *Face Bound*;
- Ax2\_3D: *Axis 2 Placement 3D*;
- PC: *Cartesian Point*;
- EL: *Edge Loop*;
- OE: *Oriented Edge*;
- EC: *Edge Curve*;

## ANEXO I - Recomendações de pastilhas para torneamento

A Figura I.1 [Sandvik, 2017b] mostra as recomendações técnicas de aplicação em processos de torneamento para os diferentes formatos de pastilhas.

A		Escolha da ferramenta – formato						
Torneamento	Fatores que afetam a escolha do formato da pastilha							
	O formato da pastilha deve ser selecionado em relação à acessibilidade do ângulo de posição (ataque) da ferramenta. O maior ângulo de ponta possível deve ser aplicado para propiciar resistência e confiabilidade à pastilha.							
B	Cortes e canais							
C	Rotoqueamento							
D	Frasamento							
E	Furação							
F	Mandrilamento							
G	Sistemas de fixação							
H	Usabilidade Outras informações							
	Formato da pastilha							
	Robustez	++	++	++	+	+		
	Desbaste leve/semiacabamento		+	++	+	++	++	
	Acabamento			+	+	++	++	++
	Torneamento longitudinal			++	+	+	++	+
	Perfilamento	+				+	++	++
	Faceamento	+	++	++	+	+	+	
	Versatilidade operacional	+		++	+	+	++	+
	Potência limitada da máquina			+	+	++	++	++
	Tendências à vibração				+	++	++	++
	Materiais duros	++	++					
	Usinagem intermitente	++	++	+	+	+		
		++ = Mais adequado		+ = Adequado				
		A 42						

Figura I.1 – Recomendações técnicas de aplicação para os diferentes formatos de pastilhas.