



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Mecânica

Pós-graduação em Engenharia Mecânica

**Geração Automática do Código NC para
Operações de Fresamento em 2 1/2 eixos**

Eduardo Silva Neves

Dissertação de Mestrado

Recife
16 de junho de 2008

N518g

Neves, Eduardo Silva.

Geração automática do código NC para operações de fresamento em 2 ½ eixos / Eduardo Silva Neves. - Recife: O Autor, 2008.
xii, 84 folhas, il : figs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2008.

Orientador: Prof. Dr. Félix Christian Guimarães Santos.
Inclui Bibliografia e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Código NC. 3. Fresamento.
4. Automação – CAD/CAM. I. Santos, Félix Christian Guimarães
(Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2010-263

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Mecânica

Eduardo Silva Neves

Geração Automática do Código NC para Operações de Fresamento em 2 ½ eixos

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: *Prof. Dr. Félix Christian Guimarães Santos*
Co-orientador: *Profa. Dra. Noemia Gomes de Mattos de Mesquita*

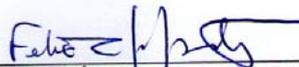
Recife
16 de junho de 2008

“GERAÇÃO AUTOMÁTICA DO CÓDIGO NC PARA O FRESAMENTO”.

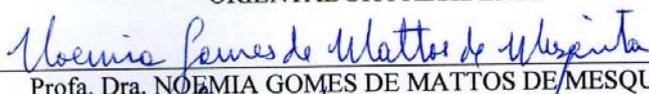
EDUARDO SILVA NEVES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

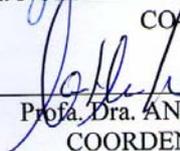
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE



Prof. Dr. FÉLIX CHRISTIAN GUIMARÃES SANTOS
ORIENTADOR/PRESIDENTE

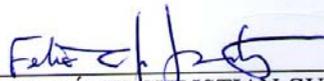


Profa. Dra. NOEMIA GOMES DE MATTOS DE MESQUITA
CO-ORIENTADORA

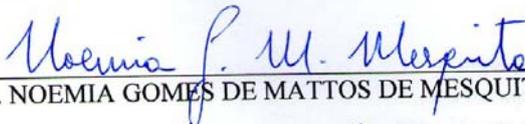


Profa. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO
COORDENADORA DO CURSO

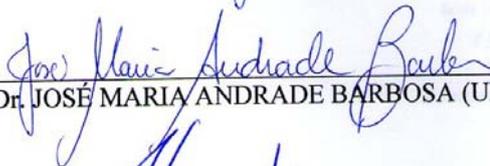
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. FÉLIX CHRISTIAN GUIMARÃES SANTOS (UFPE)



Profa. Dra. NOEMIA GOMES DE MATTOS DE MESQUITA (UFPE)



Prof. Dr. JOSÉ MARIA ANDRADE BARBOSA (UFPE)



Prof. Dr. ADRIANO FRAGALI DE SOUZA (IST/SC)

*Dedico esta dissertação à minha mãe,
cujo exemplo de honestidade e trabalho
tem sido um norteador para a minha vida,
e para meus irmãos e meu pai, que têm
me dado apoio nos momentos difíceis
e mostrado a simplicidade de ter esperança.*

Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos para:

- o professor doutor Félix Christian Guimarães Santos, pela orientação e incentivo;
- a professora doutora Noemia Gomes de Mattos de Mesquita, pelos conselhos, orientação e incentivo;
- a equipe do Laboratório de Computação (Labcom) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, em especial aos colegas mestrandos Eduardo Brito, Guaraci, Felipe e Manassés, pela ajuda em diversos momentos;
- a coordenadora do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, professora doutora Ana Rosa Mendes Primo, pelo apoio sempre manifestado;
- o professor doutor Tiago Leite Rolim, pelo auxílio nos tópicos referentes à Usinagem;
- o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela oportunidade de realização deste trabalho;
- os colegas da oficina do Departamento de Engenharia Mecânica, nas pessoas de Orlando Rocha e Euclides Cabral;
- todos os colegas do Mestrado em Engenharia Mecânica da UFPE.

Quem conduz e arrasta o mundo não são as máquinas, mas as idéias.

—VICTOR HUGO

Resumo

No âmbito deste trabalho foi abordada a problemática da geração automática do código NC para o processo de usinagem por fresamento em 2 ½ eixos. Nele foi desenvolvida uma metodologia que visa auxiliar a obtenção dos parâmetros necessários para a construção do programa de comando numérico (código NC). Esta metodologia propõe desenvolver um sistema de reconhecimento geométrico. O sistema lê arquivos neutros como entrada e traduz a informação em um arquivo de informação de fabricação. A metodologia se divide nas seguintes partes a considerar: 1) Extrações das informações geométricas do CAD; 2) Determinação das seqüências de corte; 3) Otimização dos parâmetros de usinagem e 4) Geração do código NC propriamente dito. A extração das informações geométricas é realizada através de um programa computacional desenvolvido neste trabalho, que captura as informações de dois arquivos neutros em formato IGES, um constituindo a peça bruta e o outro constituindo a peça ser fabricada. A informação geométrica de contorno (B-rep) é então analisada, onde através de processamento, os dados são armazenados em uma estrutura de grafo. Com a estrutura de grafo montada, podem-se obter informações, através das quais o programa fornece com relativa versatilidade as seqüências de operações de corte, que deverão ser executadas para a fabricação da peça. Após o reconhecimento geométrico e o sequenciamento das operações é realizada a otimização das condições de corte e dos percursos das ferramentas para cada operação, os quais são obtidos considerando-se o critério de mínimo tempo total de fabricação por peça, ou seja, critério de máxima produção. O programa computacional, assim, gera automaticamente programas em linguagem de máquina (código NC), para posterior envio a uma máquina CNC. O programa computacional foi desenvolvido por programação orientada a objetos (OOP) e escrito em linguagem C++ tendo como domínio o campo de peças prismáticas de base poligonal que possam ser usinadas em uma fresadora ou centro de usinagem CNC.

Palavras-chave: Código NC, Fresamento, CAD/CAM, Automação

Abstract

The problem of automatic generation of NC codes for the 2 ½ axis milling machining process is the subject considered in this work, where a methodology for supporting the definition of all parameters necessary for building the NC program was developed. This methodology makes use of the development of a geometric recognition system. This system takes neutral files as input and translates this information into a manufacturing information file. The methodology divides the tasks into four parts: 1) Extraction of geometric information from the CAD files; 2) Determination of cutting sequences; 3) Optimization of machining parameters and 4) Generation of the NC program. The extraction of geometric information is accomplished by a computational program, which captures the information from two neutral files in IGES format (containing the workpiece and the finished piece data, respectively). Next, the boundary geometric representation (B-rep) data is analyzed and processed and stored into a graph structure. The graph structure is used in order to obtain information through which the program can identify with relative versatility the sequences of cutting operations that should be performed by the manufacturing process. After that, the optimization of cutting conditions and tool path for each operation are obtained considering the criteria of minimum total manufacturing time, that is, the maximum production criteria. Finally, the computational program automatically generates the program in machine language (NC program), which is now ready to be sent to a CNC machine. The computational program was development within an object-orientated (OOP) design and programming methodology, which was written in C++ language, targeting the domain of prismatic parts with polygonal cross section that can to be machined in a CNC milling machine or CNC machining center.

Keywords: NC code, Milling, CAD/CAM, Automation

Sumário

1	Introdução	1
2	Integração de Sistemas de Manufatura	3
2.1	Sistema CAD	3
2.2	Sistema CAM	4
2.3	Sistema CAPP	5
2.4	Integração CAD/CAM	8
2.4.1	Extração de Informações Geométricas	9
2.4.2	Geração Automática da Trajetória da Ferramenta de Corte	10
2.4.3	Geração do Código NC por Sistemas CAD/CAM	11
2.4.4	Otimização de Processos de Fabricação	12
3	O Comando Computadorizado na Fabricação	14
3.1	Máquinas-Ferramenta CNC	15
3.2	Fresadoras e Centros de Usinagem	15
3.3	Fresamento CNC	16
3.3.1	Fresamento Frontal	17
3.3.2	Fresadoras CNC	17
4	Objetivos e Metodologia	19
5	Extrações das Informações Geométricas do CAD e Determinação do Sequenciamento das Operações de Usinagem	21
5.1	Extração das Informações Geométricas do CAD	22
5.1.1	Formato IGES	22
5.2	Estágio de Desenho	23
5.3	Estágio de Pré-Processamento	23
5.4	Determinação do Sequenciamento das Operações de Usinagem	24
5.4.1	Estágio de Decomposição	25
5.4.2	Estágio de Corte	27
5.4.3	Estágio de Geração da Trajetória da Ferramenta	31
6	Otimização dos Parâmetros de Usinagem	38
6.1	Definição dos Parâmetros de Corte	38
6.2	Determinação dos Critérios de Restrições	39
6.3	Dedução e Implementação das Equações do Processo	39

6.4	Otimização dos Parâmetros	42
7	Geração do Código NC	47
7.1	Código NC	47
7.1.1	Cabeçalho Inicial e Mudança de Ferramentas de Corte	47
7.1.2	Geração da Trajetória da Ferramenta e Término do Programa	47
7.2	Estágio de Geração do Código NC	48
8	Testes e Resultados	51
8.1	Extração das Informações Geométricas	51
8.2	Estágio de Pré-Processamento	52
8.3	Estágio de Decomposição	52
8.4	Estágio de Corte	53
8.5	Estágio de Geração da Trajetória da Ferramenta	53
8.6	Simulação do Processo	54
8.7	Análise de Resultados	55
9	Classes de Objetos de Geometria Complexa: Cavidade Interna	59
9.1	Representação Computacional de Curvas	59
9.1.1	Curvas de Bézier	60
9.2	Dedução e Implementação Matemática	60
9.3	Geração de Malhas	61
9.3.1	Visualização Computacional	61
9.4	Desenho no CAD	61
9.5	Extração das Informações Geométricas do CAD	62
9.6	Geração Automática do Código NC	62
9.7	Simulação do Processo	65
9.7.1	Pré-furação	65
9.7.2	Furação	65
9.7.3	Fresamento Frontal	65
9.7.3.1	Fresamento Frontal: etapa inicial	65
9.7.3.2	Fresamento Frontal Final: etapa final	65
10	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	70
A	Estruturas de Dados de Geometria Computacional Utilizadas	77
B	Arquivo Físico IGES	82
C	Arquivo Físico IGES	83
D	Entidades IGES Básicas	84
E	Tabela de Valores da Pressão Específica de Corte (K_s) para o Fresamento	85

Lista de Figuras

2.1	Atividades atribuídas ao CAPP.	6
2.2	Inter-relações em um sistema CIM.	7
3.1	Tipos de máquinas fresadoras.	18
4.1	Organograma da metodologia proposta no trabalho.	20
5.1	Estrutura global do sistema.	22
5.2	Situação usando arquivo neutro.	23
5.3	Polígonos da base das peças bruta e final.	25
5.4	Polígonos da base das peças bruta e final (Begging).	27
5.5	Sequência de cortes realizada no DecompositionStage - Step1.	27
5.6	Sequência de cortes realizada no DecompositionStage - Step2.	28
5.7	Sequência de cortes realizada no DecompositionStage - Step3.	28
5.8	Sequência de cortes realizada no DecompositionStage - End.	28
5.9	Polígonos da base das peças bruta e final (Begging).	31
5.10	Sequência de cortes realizada no CuttingStage - Step1.	31
5.11	Sequência de cortes realizada no CuttingStage - Step2.	32
5.12	Sequência de cortes realizada no CuttingStage - Step3.	32
5.13	Sequência de cortes realizada no CuttingStage - End.	32
5.14	Resultado final do CuttingStage.	33
5.15	Geração da trajetória da ferramenta: determinação da geometria da trajetória da ferramenta.	35
5.16	Geração da trajetória da ferramenta: início do movimento da ferramenta.	36
5.17	Geração da trajetória da ferramenta: término do movimento da ferramenta.	37
6.1	Gráfico do acabamento superficial no fresamento.	40
6.2	Fluxograma para otimização dos parâmetros de corte do fresamento frontal.	44
7.1	Modelo do cabeçalho de um programa NC.	48
7.2	Volumes iniciais do material a ser removido (linhas tracejadas e em negrito).	49
7.3	Fluxograma para gerar o código CNC.	50
8.1	Peça bruta e peça a ser fabricada.	51
8.2	Leitura dos dados geométricos das peças bruta e final.	52
8.3	Polígonos das peças bruta e final (ProfilePolygon e FinishedPolygon).	52
8.4	Volumes iniciais do processo de corte.	53

8.5	Subvolumes do processo de decomposição.	53
8.6	Geração da trajetória da ferramenta de corte.	54
8.7	Simulação do processo no CNC Programmer 3D.	54
9.1	Cavidade de geometria complexa.	59
9.2	Aproximação da curva original por <i>splines</i> .	61
9.3	Extração da malha de pontos pelo CAD.	62
9.4	Desenho da cavidade interna no CAD.	63
9.5	Trecho do arquivo para geração da cavidade interna.	64
9.6	Simulação do processo: pré-furação.	66
9.7	Simulação do processo: furação.	67
9.8	Simulação do processo: fresamento.	68
9.9	Simulação do processo: fresamento.	69
A.1	A estrutura de uma lista de tamanho cinco. Os itens na lista ocorrem nas posições 1 até 5; a posição <i>head</i> ocorre entre a primeira e a última posições. A janela, indicada em negrito, está atualmente sobre a posição 2.	78
A.2	Operação <i>push</i> e <i>push</i> .	79
A.3	Diferentes tipos de árvores de pesquisa binária.	80
B.1	Arquivo neutro IGES da peça bruta do estudo de caso.	82
C.1	Arquivo neutro IGES da peça a ser usinada do estudo de caso.	83

Lista de Tabelas

5.1	Elementos geométricos do Estágio de Decomposição.	32
5.2	Elementos geométricos do Estágio de Corte.	35
6.1	Dados de entrada e saída.	46
D.1	Entidades IGES básicas	84
E.1	Valores da Pressão Específica de Corte (K_s) para o Fresamento	85

CAPÍTULO 1

Introdução

A automação de atividades tem hoje um papel estratégico decisivo para as indústrias, pois o controle de equipamentos e a monitoração de processos significam padronização das tarefas produtivas, visando a diminuição de erros operacionais, evitando assim, re-trabalho e racionalizando o consumo de matérias-primas e insumos, enfim a automação significa a redução nos custos de produção.

A automação pode ser definida atualmente como a aplicação de técnicas computacionais, ou seja, o uso de computadores para controlar máquinas e processos, substituindo a operação humana.

Amplamente usados tanto no campo científico, como no setor comercial, os computadores têm combinado alto poder de processamento, elevada confiabilidade, tamanhos e custos cada vez menores, graças ao desenvolvimento da microeletrônica, tornando, portanto, sua aplicação cada vez mais viável. O desenvolvimento dos computadores tem contribuído, com a diminuição no tempo de execução de tarefas manualmente dispendiosas e laboriosas. Os computadores podem ser programados para resolver cálculos complexos, processar e armazenar grandes quantidades de dados com alta velocidade e eficiência. Como um resultado disso, os computadores estão sendo usados crescentemente, tanto no projeto, quanto na fabricação, levando a conceitos como *Computer-Aided Design (CAD)* e *Computer-Aided Manufacture (CAM)* ou simplesmente *CAD/CAM* (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989).

O auxílio do computador na determinação das informações tecnológicas que envolvem as condições de usinagem é uma característica importante dos sistemas CAD/CAM, pois além de facilitar a simulação da usinagem, reduz o tempo de geração de programas para as máquinas CNC, possibilitando assim, o aumento da produtividade ou economia de gastos relativos à produção (SIMÕES, 1999).

Os programas para realizar operações de usinagem em máquinas-ferramenta equipadas com comando numérico, isto é, máquinas CNC, são constituídos basicamente de informações geométricas e de dados tecnológicos. As informações geométricas estão relacionadas com as trajetórias das ferramentas de corte em todas as operações necessárias para definir a forma da peça a ser usinada. Os dados tecnológicos referem-se às condições de usinagem nessas operações (SIMÕES; SILVA, 1999).

A profundidade de corte e a penetração de trabalho são parâmetros de usinagem que dependem da posição relativa entre a ferramenta e a peça e, conseqüentemente, são funções da trajetória da ferramenta. Estes programas usualmente contêm valores gerais baseados em testes de tentativa-erro e em valores conservativos (ERDIM; LAZOGLU; OZTURK, 2006). Automatizar a criação da codificação dessas informações em seqüência apropriada (programa NC) é um fator importante para o aumento da eficiência de sistemas produtivos que empregam este tipo

de equipamento. Além da redução do tempo de programação, o aumento da produtividade é observado em decorrência da eliminação de erros típicos de programação manual, uma vez que diminui a probabilidade de interromper o processo produtivo para correções ou alterações dos programas NC, que normalmente são feitas no comando da máquina (SIMÕES; SILVA, 1999).

Recentemente diversos pesquisadores têm desenvolvido com diferentes modos e meios para integrar os conceitos CAD e CAM. O reconhecimento automático de *features* a partir de sistemas sólidos CAD aumentam significativamente o nível de integração dos sistemas de manufatura CAD/CAM. Diferentes CAD's ou pacotes de modelamento geométrico armazenam as informações relacionadas ao projeto nas suas próprias bases de dados. A estrutura destas bases de dados são diferentes de um para outro (NASR; KAMRANI, 2006).

A extração automática de informações de fabricação a partir de sistemas CAD tem tido uma função importante para facilitar o atual conceito de engenharia na medida que alcança o vínculo entre as atividades de projeto e de fabricação. O sucesso deste vínculo pode ser considerado com um passo fundamental para automatizar o desenvolvimento do produto a partir do estágio de projeto até os estágios de fabricação e transporte. Conseqüentemente o ciclo total de obtenção do produto pode ser reduzido drasticamente (NASR; KAMRANI, 2006).

Objetivando oferecer uma contribuição ao problema acima exposto, neste trabalho será desenvolvida uma metodologia computacional, a qual, realizará a geração do código NC automaticamente através de um reconhecimento geométrico das informações de projeto para operações de desbaste e acabamento no fresamento de 2 ½ eixos. Para tal foi desenvolvido um software em linguagem C++ que executa as seguintes tarefas do planejamento de usinagem: extrações das informações geométricas do CAD; determinação das seqüências de corte; otimização dos parâmetros de usinagem e geração do código NC para posterior envio à uma máquina ferramenta CNC.

Integração de Sistemas de Manufatura

Os computadores são usados extensivamente nas áreas científicas e comerciais. Os desenvolvimentos recentes na microeletrônica têm levado a sistemas de computadores que combinam alto poder de processamento com elevada confiabilidade, pequenos tamanhos e baixo custo, fazendo aumentar a faixa de aplicações do seu uso viável. Esses desenvolvimentos computacionais têm possibilitado a rápida execução de tarefas que são manualmente laboriosas e complicadas. Os computadores podem ser programados para resolver cálculos complexos, processar e armazenar grandes quantidades de dados com alta velocidade e eficiência. Como um resultado disto, os computadores estão sendo usados crescentemente, tanto no projeto quanto, na fabricação, levando a conceitos como projeto assistido por computador (*CAD - Computer-Aided Design*) e fabricação assistida por computador (*CAM - Computer-Aided Manufacture*) ou simplesmente *CAD/CAM* (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989).

O conceito de fabricação integrada por computador (*CIM - Computer Integrated Manufacturing*), relaciona o uso do computador em todas as etapas da fabricação, do projeto ao controle de qualidade, passando pelo planejamento e controle da produção. No ambiente CIM a saída de cada etapa fornece dados para a entrada da próxima e portanto, uma cadeia de atividades é interligada começando no pedido e terminando na expedição do produto acabado (LOUCA, 1997). Sistemas como o CAD e o CAM são sistemas componentes no CIM.

Assim, a finalidade deste capítulo consiste em realizar uma revisão bibliográfica de importantes conceitos relacionados ao desenvolvimento deste trabalho, tais como CIM, CAD/CAM/CAPP.

2.1 Sistema CAD

Os sistemas CAD abrangem o uso do computador para facilitar a etapa de projeto. Os sistemas CAD tiveram início com o surgimento da computação gráfica em 1963, quando Ivan Sutherland do Massachusetts Institute of Technology conseguiu desenhar figuras em um tubo de raio catódico ligado a um computador (Lincoln TX2). Ivan é considerado o pai da computação gráfica e conseqüentemente dos sistemas CAD (SIMÕES, 1999).

O desenvolvimento dos sistemas CAD no final dos anos 60, e sua introdução no início dos anos 70 na indústria americana significou, inicialmente, uma pequena redução da produtividade na engenharia de produtos, ainda não acostumada com a nova técnica de modelamento (SIMÕES, 1999).

Além disso, os primeiros sistemas não ofereciam uma boa interface com o usuário. No entanto, o potencial para aumento da produtividade nos setores de projetos já havia sido reconhecido determinando a continuidade do desenvolvimento destes sistemas. Logo após este

período, o desenvolvimento de *hardware* permitiu o surgimento de computadores cada vez mais rápidos e de preços comparativamente menores. Paralelamente, ocorreu uma melhoria dos sistemas CAD, fazendo com que hoje existam no mercado opções para todos os setores da indústria e para todos os portes de empresas.

Sistema CAD pode ser genericamente definido como o envolvimento do computador nas atividades de criação, modificação, análise e otimização de um projeto utilizando-se de sistemas gráficos interativos (GROOVER; ZIMMERS, 1984).

2.2 Sistema CAM

Um sistema CAM pode ser definido como sendo o uso de sistemas de computadores para planejar, gerenciar e controlar as operações de uma planta de manufatura através de interfaces diretas ou indiretas (GROOVER; ZIMMERS, 1984).

Um dos principais objetivos do CAM é a integração de várias atividades no ciclo de um produto dentro de um sistema unificado, no qual dados são transferidos de uma função para outra automaticamente. Isto leva ao conceito de fabricação integrada por computador (CIM).

Diversos desenvolvimentos têm sido realizados, mas nenhum sistema CIM totalmente integrado ainda foi alcançado (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989).

Atualmente os *softwares CAM* permitem que a maioria da programação CNC (Capítulo 3) possa ser realizada com rapidez e confiabilidade em computadores pessoais. A tecnologia existente está progredindo muito rapidamente e muitas aplicações de programação 2D e 3D são avaliados em uma fração do custo quando comparadas a apenas a alguns anos atrás e esta tendência continuará no futuro (SMID, 2003).

As principais características que um sistema de programação CNC assistido por computador deverá ter são (SMID, 2003):

- Ambiente para criação da geometria da trajetória da ferramenta;
- Geração da trajetória da ferramenta;
- Ambiente completo de programação;
- Pós-processamento;
- Suporte técnico e treinamento.

Uma análise através destas características citadas revela que atualmente um sistema CAM oferece um amplo e robusto suporte a automação do processo de fabricação em geral. Nestes sistemas pode-se observar uma completa interação do usuário com o processo como um todo que vai desde a geração automática da trajetória da ferramenta até considerações de pós-processamento.

2.3 Sistema CAPP

O principal objetivo do planejamento do processo assistido por computador (CAPP - *Computed Aided Process Planning*) é estabelecer automaticamente métodos e meios para converter uma peça bruta em uma peça final. A meta do planejamento do processo em um ambiente de produção é selecionar e definir, em detalhes, o processo envolvido na transformação do material bruto em um produto final específico com uma dada forma e certas especificações. Em outras palavras, determinar a viabilidade dos processos e operações que, junto com os parâmetros necessários, assegure que a peça final fabricada seja obtida sem quaisquer problemas (CIURANA et al., 2008).

Existem muitas definições na literatura para o termo “CAPP”, algumas delas são as seguintes:

- “O planejamento do processo é definido como a seleção e seqüenciamento de processos de manufatura para converter uma matéria prima em um componente acabado de acordo com especificações funcionais” (ALTING; ZHANG; LENAU, 1988).
- “Planejamento do processo pode ser também definido como a determinação sistemática dos métodos que permitem que um produto seja manufaturado de maneira econômica e competitiva” (IRANI; KOO; RAMAN, 1995).
- “Ele é a atividade de selecionar e definir os processos que devem ser executados para transformar um material bruto em um produto acabado” (PRAZERES, 2004).
- “Pode-se dizer que o sistema CAPP, dentro de um sistema de manufatura integrada por computador CIM, age como uma ponte entre o CAD e o CAM” (THOMAS; FISHER, 1996).

As fases do planejamento de processo englobam as seguintes etapas (PRAZERES, 2004) representadas na Figura 2.1:

- Interpretação do desenho do produto;
- Seleção de máquinas-ferramenta;
- Seleção de *set-up's*;
- Seleção sequenciamento de operações de usinagem ;
- Seleção de parâmetros de corte.

Todas estas fases acima descritas, para serem executadas pelo método tradicional de planejamento de processo, são centradas no responsável pelo planejamento, que necessita de conhecimentos extensos e diversos em planejamento e manufatura, além do que experiência na utilização de manuais de fabricação, tabelas e formulários. Condições fundamentais para se ter um bom planejamento, tornavam esta atividade, um procedimento tedioso, inconsistente e demorado (MACHADO, 1990).

Para a construção de sistemas CAPP duas abordagens básicas são seguidas (RESENDE, 1996):

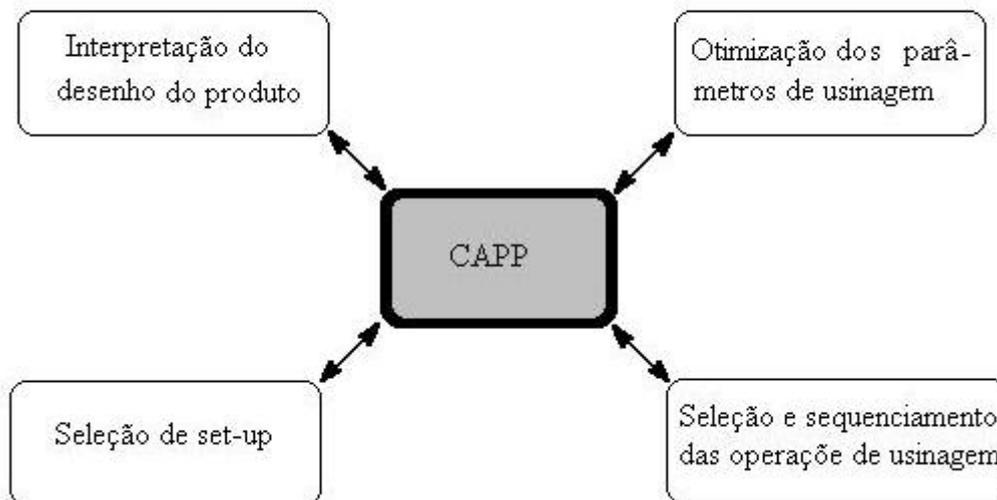


Figura 2.1 Atividades atribuídas ao CAPP.

1. Variante
2. Generativa

Variante: A abordagem variante para o planejamento de processos é comparável à forma manual utilizada por um projetista, onde o plano de processos para uma nova peça é obtido através de pequenas alterações executadas em um plano de processos já existente para uma peça similar. Em alguns sistemas variantes, as peças são agrupadas em famílias, caracterizadas por similaridades no processo de fabricação. Para cada família de peças, um plano de processos padrão que contém todas as possíveis operações, é armazenado no sistema. Através da classificação e codificação, um código é definido para cada peça, a partir de uma série de quesitos. Este código é então utilizado para definir a qual família a peça pertence e qual deve ser o plano padrão associado. Em comparação com o planejamento de processos manual, a abordagem variante é bastante vantajosa, pois a manipulação de informações se torna bem mais simples e os planos de processos podem ser padronizados. Contudo, neste tipo de abordagem, a qualidade final do plano de processos ainda depende da habilidade do projetista que realiza as modificações necessárias às particularidades de cada peça. Sendo assim, nos sistemas variantes, o computador é apenas uma ferramenta de auxílio às atividades de planejamento de processos (RESENDE, 1996);

Generativa: Neste tipo de abordagem, um novo plano de processos é gerado para cada peça do sistema, sem a intervenção de um projetista. São utilizadas tabelas de decisão, árvores de decisão, fórmulas, regras de produção etc., para definir quais são os procedimentos

necessários para converter um material bruto em uma peça acabada. A entrada de informações sobre a peça para um sistema generativo pode ser do tipo texto, onde o usuário responde a uma série de questões predefinidas, ou do tipo gráfica, onde as características da peça são definidas através de um módulo de CAD. Quando se pensa em um sistema CIM, a utilização de uma interface gráfica para a definição da peça é a maneira mais interessante, pois desta forma a comunicação entre os módulos de CAD e CAPP fica prontamente estabelecida. A grande vantagem deste tipo de abordagem é que os planos de processo gerados são padronizados e completamente automatizados. Este tipo de abordagem torna-se bastante atraente para empresas que trabalham com uma grande variedade de produtos que são feitos em pequenos lotes (RESENDE, 1996).

Contudo, alguns sistemas que foram construídos apresentam uma combinação das abordagens básicas descritas acima, dando origem a um terceiro tipo de denominada **Semi-Generativa**.

Embora a tecnologia computacional de Projeto Assistido por Computador (CAD) e Fabricação Assistida por Computador (CAM) tenham demonstrado significativo potencial para aumentar a produtividade, tanto no projeto, como na manufatura, ainda existe um espaço entre as tecnologias disponíveis e o entendimento geral de como utilizá-las de forma mais efetiva. As tecnologias computacionais existentes portanto, não preenchem todas as lacunas no sentido de solucionar os problemas da manufatura.

Com isto surgiu o conceito de Planejamento do Processo Assistido por Computador CAPP, que é a aplicação da tecnologia computacional para auxiliar as tarefas do planejamento de processos. O Planejamento do Processo Assistido por Computador (CAPP), é tido como parte fundamental de um sistema de Fabricação Integrada por Computador (CIM) por ser responsável pela ligação de dados de projeto (CAD) e de fabricação (CAM) (PRAZERES, 2004) (Figura 2.2).

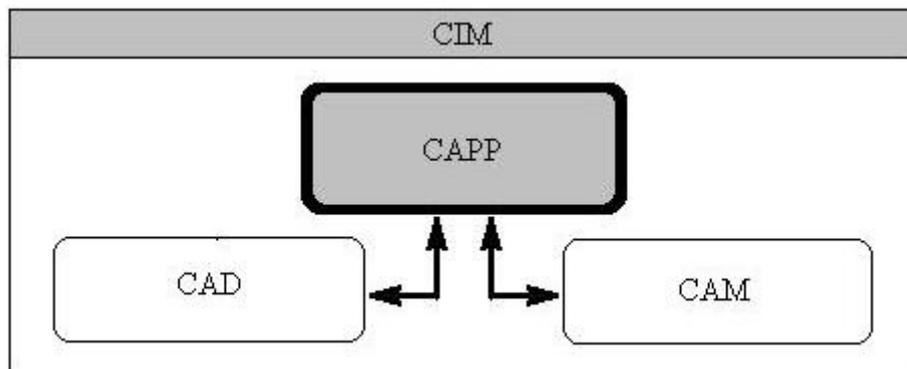


Figura 2.2 Inter-relações em um sistema CIM.

O planejamento de processo auxiliado por computador utiliza a tecnologia computacional, através de técnicas como tecnologia de grupo, inteligência artificial, redes neurais, estruturas de dados hierárquicas (MEDELLÍN et al., 2006), via rede de computadores (WU; SARMA, 2005), (MEDELLÍN et al., 2006), entre outras, para fazer o planejamento de processo. Os desenvolvimentos mais recentes em planejamentos de processos auxiliados por computador têm procurado reduzir a

tarefa do planejador, fazendo com que esta atividade seja toda realizada em um computador, de forma satisfatória.

No passado o desenvolvimento dos sistemas auxiliados por computador, foi principalmente concentrado nos sistemas (CAD) (projetos) e nos sistemas (CAM) (fabricação). Devido a sua grande importância no contexto de um sistema CIM, nas últimas décadas, tem sido empreendidos grandes esforços no sentido de um maior desenvolvimento dos sistemas CAPP (PRAZERES, 2004).

Os sistemas CAPP, em geral, deverão prover dois grupos de funções (BABIC; NESIC; MILJKOVIC, 2008):

1. Tradução eficiente de informações geométricas de peças, definida por um sistema CAD (entidades de baixo nível - vértices, arestas, etc.) em informações de fabricação, necessárias para o planejamento do processo e CAM (entidades de alto nível - furos, rasgos, cavidades, etc.)
2. Definição de possíveis planos de processos (seleção de processos de fabricação, seleção do tamanho de uma peça bruta, seleção de ferramentas auxiliares, planejamento de *setup*, seleção, determinação e agrupamento de operações de usinagem elementares, seleção de sistemas de usinagem, sequenciamento de operações e otimização de seqüências de operação, seleção de ferramentas de corte, determinação de parâmetros e condições de corte, determinação da trajetória da ferramenta, seleção da qualidade de métodos de inspeção, análise de custo, otimização dos elementos dos planos de processo e geração e verificação do código CNC).

Sistemas automáticos para auxiliarem planejamentos de processos, também conhecidos como Planejamento de Processo Assistido por Computador (CAPP), são projetados variando graus de sucessos. Estes sistemas CAPP foram desenvolvidos originalmente como um vínculo entre o projeto e a fabricação, preenchendo o espaço existente entre o Projeto Assistido por Computador (CAD) e a Fabricação Assistida por Computador (CAM) (HAM; LU, 1988), (ALTING; ZHANG, 1989).

2.4 Integração CAD/CAM

A integração CAD/CAM envolve a aplicação do computador na fabricação de componentes para a engenharia. Esta aplicação se inicia nos departamentos de projeto e continua virtualmente por todos os departamentos de uma fábrica: departamento de produção, controle de qualidade, linhas de montagem, e certamente até os setores de estoque de peças acabadas. Desta maneira, um sistema CAD/CAM integrado pode ser definido como o sistema onde a fabricação e o projeto foram ligados através de dados e informações acumuladas no processo de projeto e transmitidos diretamente para os procedimentos de manufatura. Este elo eliminou a geração independente de dados para programas de computador na área da fabricação (SIMÕES, 1999).

A integração CAD/CAM tem recebido atenção significativa, recentemente, de acordo com o desenvolvimento do poder de velocidade de ferramentas computacionais. A separação das

atividades de projeto e fabricação na indústria moderna é amplamente reconhecida como chave para contribuir para o crescimento dos custos do produto (NASR; KAMRANI, 2006), algo sem dúvida não desejável.

Os sistemas CAM ou a integração CAD/CAM alivia o operador da tarefa de ter que realizar a grande quantidade de cálculos, relativos às exigências de corte necessárias para a composição do programa para a máquina e todos os parâmetros de corte que serão usados durante a execução da peça (SIMÕES, 1999).

Entretanto, o verdadeiro desenvolvimento de sistemas de fabricação integrada tem mostrado não ser um empreendimento trivial. Uma importante razão para isso consiste nos desenhos de engenharia anotados ou no modelo sólido de um componente não serem específicos para a fabricação e geralmente representarem a geometria através de um baixo nível, ou seja, vértices, arestas e faces de um componente, considerando que o planejamento do processo trabalha com dados primitivos, tais como rasgos e furos e propriedades dessas primitivas, tais como dimensões e superfície acabada, que são formas produzidas pelos processos e ferramentas (JI; MAREFAT, 1997). Os dados de projeto, a partir de um modelo CAD não podem ser diretamente usados em um sistema de planejamento de fabricação, já que tais informações não estão contidas nos dados de sistemas CAD.

Diversos esforços têm sido realizados para superar a barreira da integração entre projeto e planejamento de processo, uma tarefa a qual era previamente confiada a um processo de interpretação manual por um engenheiro (JI; MAREFAT, 1997).

2.4.1 Extração de Informações Geométricas

A extração automática de informações de fabricação a partir de sistemas CAD tem tido uma função importante para facilitar o atual conceito de engenharia na medida que alcança o vínculo entre as atividades de projeto e de fabricação. O sucesso deste vínculo pode ser considerado como um passo fundamental para automatizar o desenvolvimento do produto a partir do estágio de projeto até os estágios de fabricação e transporte. Conseqüentemente o ciclo total de obtenção do produto pode ser reduzido drasticamente (NASR; KAMRANI, 2006).

Dependendo se a entrada do modelo de projeto contém informações em *features* ou não, existem duas principais técnicas de extração de informações geométricas:

1. Baseada na geometria
2. Baseada em *feature*

Existem muitas definições na literatura para o termo “*feature*” (CIURANA; ROMEU; CASTRO, 2003), (CUNNINGHAM; DIXON, 1988), (HARUN; CASE, 2000), (KUMAR; SHANKER; LAL, 2003), (SHEU; LIN, 1993), (SUBRAHMANYAM; WOZNY, 1995), algumas das quais são como segue:

- “Uma *feature* é qualquer entidade usada no sentido do projeto, engenharia ou fabricação de um produto (SREEVALSAN; SHAH, 1992)”

- “Uma forma geométrica ou entidade cuja presença ou dimensões são exigidas para efetuar ao menos uma função CIM e cuja utilidade como uma primitiva permite que o processo do projeto ocorra (DEVIREDDY; GHOSH, 1999), (LUBY; DIXON; SIMMONS, 1986)”
- “Uma região de interesse na superfície de uma peça (PRATT; WILSON, 1985)”

Na técnica baseada na geometria, as *features* de usinagem são reconhecidas diretamente a partir da geometria do projeto. Por outro lado, na técnica baseada em *feature*, elas são convertidas a partir do modelo de projeto baseado em *feature*.

A extração das informações geométricas para integração de sistemas CAD/CAM tem sido realizada, ao longo dos anos, em grande parte, por meio do reconhecimento de *features*. O reconhecimento automático de *feature* (AFR - *automated feature recognition*) tem sido a principal contribuição para o completo desenvolvimento do CAPP automático (BABIC; NESIC; MILJKOVIC, 2008). Esta técnica tem sido aplicada através, por exemplo, de modelamento matemático (GAO; ZHENG; GINDY, 2004b), geração de interpretações alternativas de *features* de usinagem (LEE; KIM, 1999), peças prismáticas (KARADKAR; PANDE, 1996), *features* específicas, tais como, séries de furos de componentes de caixas de embreagem (GAO; ZHENG; GINDY, 2004a), ou até mesmo, para estimação de custos de fabricação (JUNG, 2002). Todos tendo como foco principal de pesquisa a geração automática de informações de usinagem.

O modelo matemático apresentado em (GAO; ZHENG; GINDY, 2004b) foi usado para descrever um processo de conversão de *features* de projeto em *features* de usinagem e é representado por duas funções de mapeamento do processo.

Uma *features* é a média de informação de transmissão na integração, uma região de interesse na superfície de uma peça tais como, furos, rasgos, cavidades, chanfros, cantos arredondados, desníveis, e assim por diante.

Observa-se, no entanto, que o processo de mapeamento baseado em *features* é um processo complexo e difícil, especialmente no curso da interação das *features*. Além disso, a classificação de *features* é totalmente dependente da aplicação.

Estudos de peças de formato complexo, tais como perfis de aviões, veículos, navios, entre outros, exigem o desenvolvimento de métodos analíticos para obtenção do código NC (WEI; LIN, 2005).

A partir da literatura consultada, verifica-se, portanto a necessidade do desenvolvimento de sistemas de extração de informações geométricas, diferentemente de sistemas baseados em *features* geométricas, que tenham a capacidade de se comunicar com ambientes de projeto heterogêneos em formato de troca de dados padrão e generativa, para uma efetiva integração dos sistemas CAD e CAM.

2.4.2 Geração Automática da Trajetória da Ferramenta de Corte

Recentemente, uma vasta quantidade de novas pesquisas relativas à geração automática da trajetória da ferramenta de corte para comando numérico (NC - *Numerical Control*) tem surgido na literatura.

A geração da trajetória da ferramenta, na sua totalidade, é uma área ampla, envolvendo as Engenharias Mecânica, Elétrica, Eletrônica e de Produção, bem como a Ciência da Computação e da Matemática.

A geração da trajetória da ferramenta envolve os seguintes conceitos (DROGOMATZ; MANN, 1997):

- planejamento do processo de fabricação;
- projeto de controlador de *hardware* e máquina-ferramenta;
- modelamento e estimação da força de corte;
- geração da trajetória;
- verificação e simulação da usinagem.

Superfícies complexas, funcionais ou até mesmo superfícies estéticas de forma livre, são utilizadas por engenheiros e projetistas, na indústria automobilística, aeroespacial e de eletrodomésticos, para alcançar o desempenho desejável de um produto.

Em (OMIROU; NEARCHOU, 2007) é proposta uma estratégia de usinagem para fresamento de um conjunto de superfícies particulares, obtidas por uma técnica denominada de *cross-sectional design*. O objetivo é aumentar a precisão e diminuir o tempo de usinagem, para isso tenta-se evitar a contínua sucessão de acelerações e desacelerações dos motores causados pelas variações da taxa de avanço, assim, o método de fabricação proposto tenta ser flexível, simples e preciso. A técnica consiste na geração de superfícies tanto de revolução quanto tipos de superfícies mais complexos, onde o perfil de uma curva gira sobre um eixo de revolução, onde a rotação é controlada por uma curva de trajetória, ambas as curvas, do perfil e da trajetória, são curvas de Bezier localizadas em planos perpendiculares. As curvas de Bezier são poderosas ferramentas de projeto largamente utilizadas em sistemas CAD. Assim, o método proposto inclui o planejamento da trajetória da ferramenta, um algoritmo em tempo real para interpolação da trajetória do porta-ferramentas durante o corte e durante os tempos mortos.

Um método para planejamento da trajetória da ferramenta para usinagem CNC de cinco-eixos para superfícies esculpidas é apresentado em (ANOTAIPAIBOON; MAKHANOV, 2003). O método é baseado em algoritmos para geração de SFC (*space-filling curves*), amplamente usados na computação gráfica e processamento de imagem. Curvas de Hilbert, Moore ou Hamilton são usados nestes algoritmos. Assim, o método utiliza curvas adaptativas de Hilbert. As técnicas empregadas tentam, portanto, alcançar um comprimento da trajetória reduzido e um aumento da precisão.

Um outro exemplo da geração da trajetória da ferramenta para superfícies esculpidas está em (KIM; JUN; PARK, 2005), onde se objetiva desenvolver uma técnica para processos de usinagem volumes não removidos, os quais são deixados em regiões côncavas após o processo de acabamento. O método usa modelos poliédricos da forma STL (*Stereolithography*) para as superfícies das peças.

2.4.3 Geração do Código NC por Sistemas CAD/CAM

Os sistemas CAD/CAM são os meios mais modernos para a elaboração de programas NC. Tais sistemas permitem uma interpretação da geometria das peças armazenadas em arquivo

gráfico criado no CAD e a geração dos programas NC de acordo com algumas informações fornecidas pelo usuário através do módulo CAM (OLIVEIRA et al., 1998).

A programação via sistemas CAD/CAM consiste normalmente da modelagem geométrica da peça seguido da seleção de parâmetros como tolerâncias, sobre-metal, ferramentas e parâmetros de corte, que em alguns casos também podem ser determinados pelo sistema. As etapas finais consistem da geração automática da trajetória e conseqüente pós-processamento, adequando ao formato dos comandos e características da máquina (SIMÕES, 1999).

O auxílio do computador na determinação das informações tecnológicas que envolvem as condições de usinagem é uma característica importante dos sistemas CAD/CAM, pois além de facilitar, reduzem o tempo de geração de programas para as máquinas CNC possibilitando o aumento da produtividade ou economia de gastos relativos à produção (SIMÕES, 1999).

Os parâmetros de usinagem necessários aos programas NC podem ser determinados através de algum método empírico ou analítico, que por sua vez pode ser implementado em computador. Fazem parte destes parâmetros, o avanço, velocidade de corte e profundidade de corte, que dependem essencialmente do material da peça a ser usinada e das características da ferramenta de corte utilizada (SIMÕES, 1999).

Os métodos para determinar, através de computador, os parâmetros de usinagem, podem ser classificados em três categorias (FERREIRA; K.; BUTZKE, 1997):

- *extração de dados*, onde informações contidas em catálogos de fabricantes de ferramentas são cadastradas em bancos de dados, podendo ser extraídas diretamente pelo sistema. Estes são freqüentemente chamados "catálogos eletrônicos". Eles apresentam as desvantagens da elevada quantidade de memória necessária, e de serem valores conservativos;
- *métodos de otimização*, onde procura-se determinar os parâmetros de forma a minimizar o custo ou o tempo de produção, sujeito às restrições do processo. Dentre estas técnicas, inclusive métodos baseados em programação geométrica, programação dinâmica e otimização referente à área de bom controle de cavaco;
- *métodos baseados em sistemas especialistas*, onde os parâmetros são determinados a partir de uma base de conhecimento contendo regras correspondentes a uma usinagem eficiente.

2.4.4 Otimização de Processos de Fabricação

Custos e taxas de produção são de interesse vital para um engenheiro de fabricação. Estes dois fatores devem ser considerados separadamente, já que, na prática uma alta taxa de produção não significa baixos custos de produção, assim as condições de fabricação que levam a uma alta taxa de produção não são idênticas as condições que levam a um mínimo custo de produção. A análise de custos e taxas de produção pode ser um assunto complicado e em muitos casos a análise será aplicada apenas a operações particulares em questão. Entretanto, a experiência ganha ao longo dos anos tem levado a regras empíricas seguras ou princípios norteadores para a escolha de condições ótimas de corte para uma dada operação de usinagem (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989).

A otimização da usinagem é um objetivo importante na produção, especialmente quando se trabalha com lotes com um número de peças elevado, quando os custos de usinagem são elevados ou quando os prazos de entrega do produto são muito pequenos (BOEHS, 1988). Em (AMARAL; RENCIS; RONG, 2005), através do uso de elementos finitos, foi desenvolvido um método para minimizar o efeito das deformações provocadas pelas forças de usinagem e meios de fixação, objetivando aumentar a precisão de peças fresadas. Em (TANDON; KISHAWY, 2002) foi alcançada uma redução de 35% no tempo de usinagem através da otimização das condições de corte.

A otimização do processo de usinagem por torneamento, fazendo-se uso da programação linear foi abordada em (OLIVEIRA, 1999), determinando-se os parâmetros otimizados do processo, bem como as quantidades ótimas de peças a serem fabricadas, considerando-se demandas fixas e probabilísticas.

A taxa de avanço foi otimizada em (ERDIM; LAZOGLU; OZTURK, 2006), através de estratégias baseadas no mecanismo de processo do fresamento. Os tempos de produção dos exemplos testados conseguiram ser reduzidos de 45% a 65% comparados a casos de taxa de avanço constantes.

Uma abordagem combinada de técnicas de otimização é realizada em (PRAKASVUDHISARN; KUNNAPAPDEELERT; YENRADEE, 2008) para determinação das condições ótimas para a rugosidade superficial desejada e simultânea maximização da produtividade, em um processo de fresamento para acabamento.

O Comando Computadorizado na Fabricação

A tecnologia de Comando Numérico como é conhecida hoje, emergiu na metade do século 20. Ela pode ser levada para o ano de 1952, a Força aérea americana e os nomes de John Parsons e o Massachusetts Institute of Technology em Cambridge, MA, USA. Ela não foi aplicada na área de fabricação até meados de 1960. A verdadeira expansão veio na forma de CNC (*Computer Numeric Control*), por volta do ano de 1972 e décadas mais tarde com a introdução dos micro-computadores disponíveis.

No campo da fabricação, em particular na área da metalurgia, a tecnologia do Comando Numérico tem causado uma verdadeira revolução, até mesmo antes do surgimento dos computadores. A recente evolução da microeletrônica e o incessante desenvolvimento dos computadores, incluindo seu impacto no Comando Numérico, têm trazido mudanças significantes no setor de fabricação em geral e na indústria da metalurgia em particular.

A feroz competição global tem forçado fabricantes a encontrarem meios para aumentar a produtividade bem como melhorar a qualidade. Sistemas de fabricação automática são largamente empregadas na usinagem junto com máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) para alcançar tais objetivos (PRAKASVUDHISARN; KUNNAPAPDEELERT; YEN-RADEE, 2008).

O Comando Numérico pode ser definido como uma operação de máquinas-ferramenta por meio de instruções codificadas para o sistema de comando da máquina (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989).

O Comando Numérico Computadorizado (CNC) está entre as áreas de fabricação de maior crescimento hoje. O número de pessoas atualmente trabalhando nesta área não é suficiente para preencher as necessidades das companhias de fabricação que utilizam equipamentos CNC. A fabricação está encontrando mais e mais dificuldades para encontrar pessoas qualificadas em CNC. Normalmente um equipamento CNC está entre as máquinas mais sofisticadas que uma companhia possui (LYNCH, 1992).

Na área das técnicas de aplicação da programação CNC, computadores em todos os níveis, a partir de um computador pessoal até estações de trabalho são capazes de produzir mais programas de máquinas CNC em um tempo menor do que qualquer método de programação manual.

As principais vantagens do comando numérico são:

- Redução do tempo de *setup*
- Redução do tempo de preparo
- Precisão e repetibilidade
- Formas complexas de contorno

- Ferramental simplificado e trabalho manual
- Tempo de usinagem consistente
- Aumento geral da produtividade

3.1 Máquinas-Ferramenta CNC

Diferentes tipos de máquinas CNC cobrem uma variedade extremamente vasta. O número delas estão aumentando rapidamente com o avanço do desenvolvimento tecnológico. Uma breve lista de alguns grupos de máquinas CNC é descrita a seguir:

- Fresadoras e centros de Usinagem
- Tornos e centros de torneamento
- Furadeiras
- Máquinas de eletroerosão
- Máquinas brunidoras
- Máquinas de cortar chapas
- Perfiladoras de jato d'água e Laser
- Retíficas cilíndricas
- Máquinas de soldagem
- Máquinas de dobramento, etc.

Os centros de usinagem e os tornos CNC dominam o número de instalações nas indústrias. Estes dois grupos compartilham o mercado quase que igualmente. Algumas indústrias podem ter um número muito grande para um grupo destas máquinas, dependendo das suas necessidades. É importante observar que embora existam muitos tipos de tornos e centros de usinagem, o processo de programação para uma máquina vertical é similar a uma máquina horizontal ou uma simples fresadora CNC. Até mesmo entre diferentes grupos de máquinas, existe uma grande quantidade de aplicações gerais e o processo de programação é geralmente o mesmo.

3.2 Fresadoras e Centros de Usinagem

O número padrão de eixos de uma fresadora é três - X, Y e Z.

As fresadoras CNC são usualmente pequenas, simples, sem um trocador de ferramentas ou outras características automáticas. Sua potência é freqüentemente baixa. Na indústria, elas são

usadas na ferramentaria, para propósitos de manutenção ou pequenas produções de peças. Elas são usualmente projetadas para contornos, diferentemente das furadeiras CNC.

Os centros de usinagem CNC são bem mais populares e eficientes do que furadeiras ou fresadoras, principalmente por sua flexibilidade. O principal benefício para um usuário utilizar um centro de usinagem CNC é a sua capacidade de realizar muitas operações, como até mesmo a usinagem de peças de revolução, em um único *setup*, podendo ser incorporadas em um único programa CNC. Além disso, a flexibilidade aumentada pela troca automática de ferramenta, usando *pallets* para minimizar o tempo morto, indexação para diferentes lados da peça, usando um movimento de rotação de eixos adicionais e muitas outras características. Centros de usinagem CNC podem ser equipados com *software* especial que controla as velocidades e avanços, a vida da ferramenta de corte, medição automática durante o processo e ajustes de *offset* e outros aumentos de produção e dispositivos de tempo de vida.

Existem dois formatos básicos de um típico centro de usinagem CNC. Eles são os *verticais* e *horizontais* centros de usinagem. A principal diferença entre os dois tipos é a natureza do trabalho que podem ser feito neles eficientemente. O trabalho que requer usinagem multiface em um único *setup* é mais desejável ser feito em um centro de usinagem CNC horizontal.

O processo de programação é o mesmo para ambos os formatos, mas um eixo adicional (usualmente um eixo B, ver Figura 3.1(b)) é somado para o formato horizontal. Este eixo é ou um simples eixo de posicionamento (eixo de indexação) para a mesa, ou um eixo de rotação completo para contorno simultâneo.

3.3 Fresamento CNC

O processo de usinagem por *fresamento* caracteriza-se por apresentar a ferramenta de corte realizando um movimento de rotação em torno do seu eixo, enquanto a peça a ser usinada realiza um movimento de translação de avanço ao encontro da ferramenta.

A ferramenta de corte do processo possui arestas cortantes dispostas simetricamente em relação a seu eixo de rotação e apresenta-se em diversas formas. Tal ferramenta é denominada de *fresa*.

O fresamento é principalmente utilizado para usinagem de peças não-planas e não-rotacionais.

De acordo com a posição dos dentes ativos da ferramenta de corte o processo de fresamento pode ser classificado em:

- **Fresamento Tangencial:** Caracteriza-se por apresentar os dentes ativos da ferramenta dispostos ao longo da superfície cilíndrica da ferramenta, o eixo de rotação da ferramenta é paralelo à superfície gerada, as fresas são denominadas cilíndricas ou tangenciais;
- **Fresamento Frontal:** Caracteriza-se por apresentar os dentes ativos da ferramenta dispostos na superfície frontal da ferramenta, o eixo de rotação da ferramenta é perpendicular à superfície gerada, as fresas são denominadas de topo ou frontais.

3.3.1 Fresamento Frontal

O fresamento frontal pode ser classificado em dois tipos:

1. **Fresamento Frontal Simétrico:** ocorre quando o eixo de deslocamento da ferramenta coincide com o eixo de simetria da peça. Existem dois tipos de fresamento frontal simétrico:
 - (a) *Fresamento de Canal*
 - (b) *Fresamento de Face*
2. **Fresamento Frontal Assimétrico:** ocorre quando o eixo de deslocamento da ferramenta não é coincidente ao eixo de simetria da peça.

3.3.2 Fresadoras CNC

Uma *fresadora* pode ser definida como:

uma máquina capaz de um movimento de usinagem simultâneo, usando uma fresa como ferramenta de corte, ao longo de ao menos dois eixos ao mesmo tempo (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989).

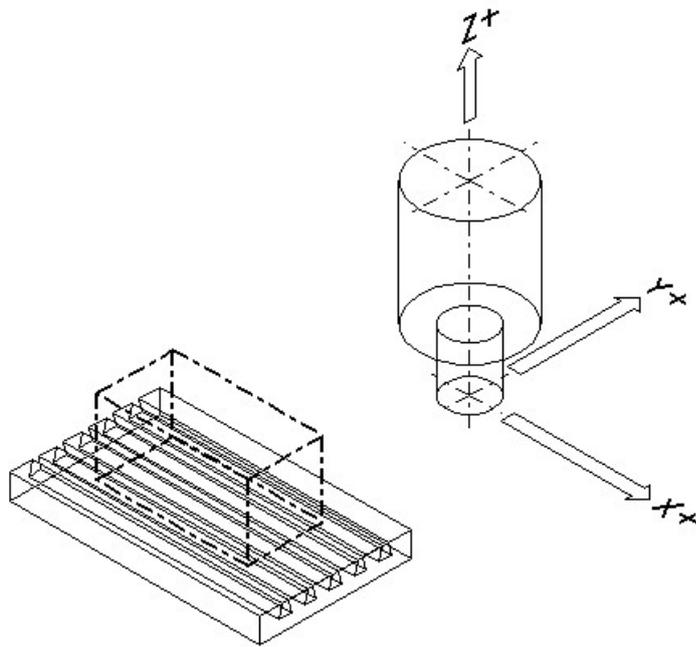
As fresadoras podem ser divididas em três categorias:

- **Pelo número de eixos** \leftrightarrow dois, três ou mais
- **Pela orientação dos eixos** \leftrightarrow vertical ou horizontal (Figura 3.1)
- **Pela presença ou ausência de um trocador de ferramentas**

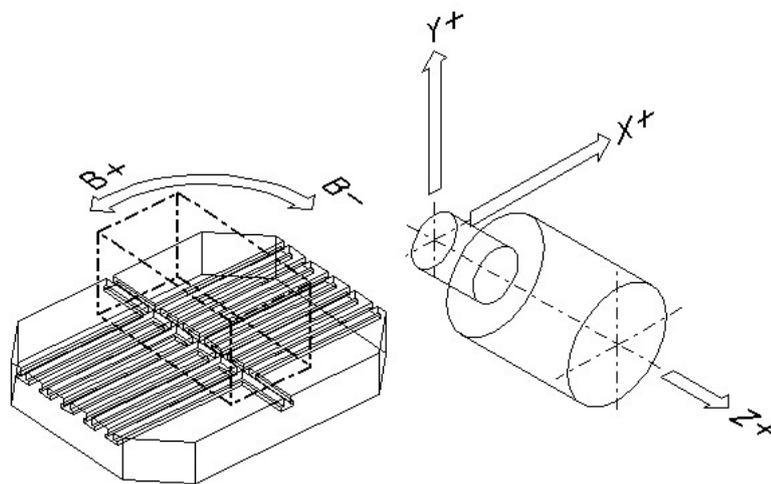
Atualmente as máquinas-ferramenta para usinagem torna as definições relativas aos tipos de fresadoras muito simplificadas. A indústria de máquinas-ferramenta está mudando constantemente. Novas e mais poderosas máquinas são projetadas e produzidas por muitos fabricantes ao redor do mundo.

A maioria das máquinas modernas projetadas para fresamento são capazes de realizarem uma multiplicidade de tarefas de usinagem, não apenas o fresamento tradicional, descrito anteriormente. Estas máquinas são também capazes de muitas outras operações em usinagem metálica. Elas podem ser equipadas com *magazine* multi-ferramenta, trocadores de ferramenta completamente automático, poderosas unidades de controle computadorizado e assim por diante. Alguns modelos podem até ter características adicionais, tais como: controle adaptativo, interface robótica, carregamento e descarregamento automático, sistema de sondagem, capacidade de alta velocidade de usinagem e outras maravilhas da tecnologia moderna.

Os centros de usinagem CNC são máquinas fresadoras que possuem ao menos algumas das características avançadas descritas acima (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989).



(a) Representação esquemática de um centro de usinagem CNC vertical.



(b) Representação esquemática de um centro de usinagem CNC horizontal.

Figura 3.1 Tipos de máquinas fresadoras.

Objetivos e Metodologia

Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia inteligente para desenvolver um sistema de reconhecimento geométrico, o qual, terá a capacidade de comunicar-se com vários sistemas CAD. A metodologia proposta tomará como domínio o campo das peças prismáticas de base poligonal. O sistema deve receber dois arquivos neutros de formato IGES como dado de entrada e traduzir a informação em um arquivo de informação de fabricação. A informação geométrica será então analisada por meio das informações de contorno (B-rep) da peça. Estas informações contendo a geometria dos volumes de material da peça bruta e da peça a ser usinada serão armazenados em uma estrutura em grafo. A partir das informações recebidas pelo grafo, o sistema fornecerá as seqüências de corte que deverão ser executadas para a fabricação da peça. Assim, a etapa seguinte ao sequenciamento de corte, consistirá da otimização das condições de corte, as quais serão obtidas considerando-se o critério de mínimo tempo total de fabricação por peça, ou seja, critério de máxima produção. Todo o processo é executado pelo uso de um *software* desenvolvido em linguagem de orientação a objeto (OPP) e escrito em linguagem C++. Finalmente, a descrição de um exemplo de aplicação para uma peça bruta será apresentada com propósito de demonstração.

Assim, o trabalho propõe-se a atingir os seguintes objetivos específicos:

- i) Desenvolvimento de um sistema de reconhecimento geométrico;
- ii) Desenvolvimento de uma metodologia que visa a obtenção dos parâmetros necessários para a obtenção do código NC;
- iii) Desenvolvimento de uma metodologia para otimização dos parâmetros de usinagem;
- iv) Desenvolvimento de um aplicativo que simule as metodologias desenvolvidas.

Portanto, atingidos os objetivos acima, o presente trabalho tem como objetivos gerais:

- i) Dar uma contribuição para o desenvolvimento de um sistema CAM para o processo de fresamento;
- ii) Dar uma contribuição para o desenvolvimento de um sistema CIM, sendo parte integrante do sistema CAM, já que os parâmetros caracterizados e otimizados pelo programa serão utilizados para geração automática de códigos NC.

A metodologia proposta para atingir os objetivos descritos acima será formada pelas seguintes etapas:

- Extrações das informações geométricas do CAD e determinação do sequenciamento das operações de usinagem;
- Otimização dos parâmetros de usinagem;
- Geração do código NC propriamente dito.

A Figura 4.1 ilustra o organograma da metodologia proposta no trabalho.

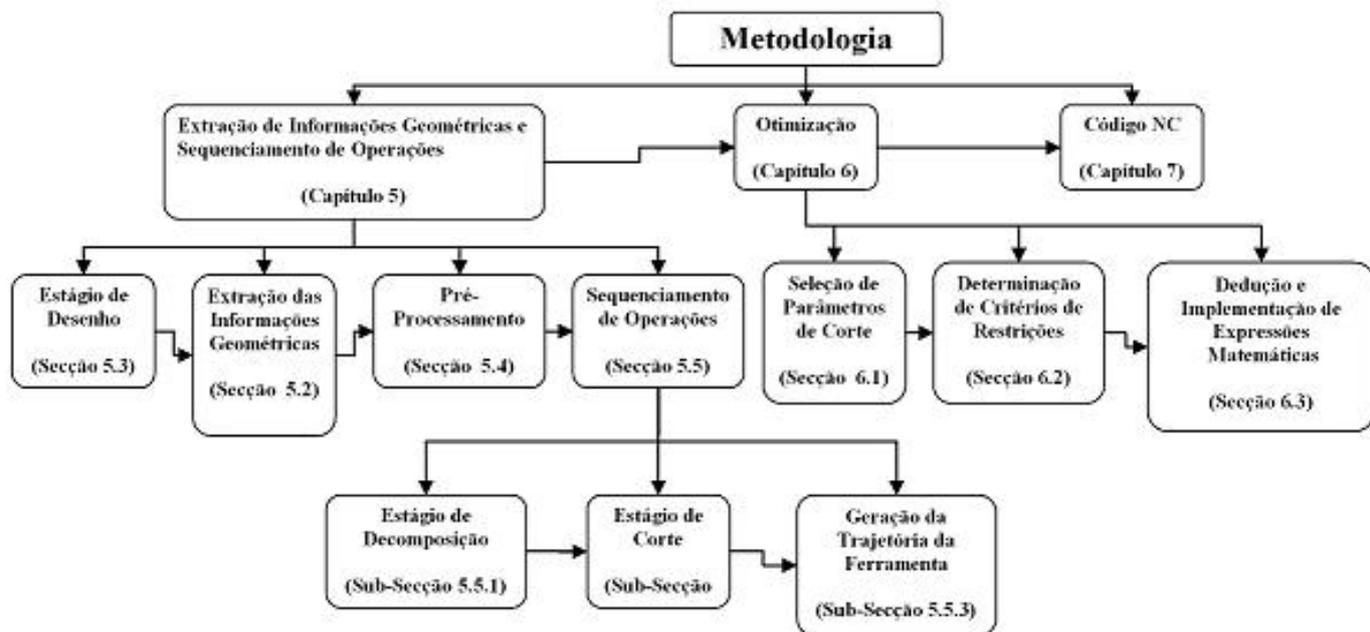


Figura 4.1 Organograma da metodologia proposta no trabalho.

Extrações das Informações Geométricas do CAD e Determinação do Sequenciamento das Operações de Usinagem

O principal objetivo do planejamento do processo é estabelecer métodos e meios para converter uma peça bruta em uma peça final. A metodologia proposta para o planejamento do processo de usinagem consiste basicamente na determinação dos percursos da ferramenta de corte e na escolha das condições de usinagem. Após os dados do CAD em formato IGES/B-rep serem convertidos em uma estrutura de dados orientada a objetos, determina-se o sequenciamento das operações necessárias para fabricação da peça e os percursos de corte para cada operação. Como parte do planejamento foi adotada uma otimização dos parâmetros de usinagem (Capítulo 6). A otimização consiste na entrada de condições de corte e processamento matemático de minimização do tempo de corte.

A estrutura global do sistema está ilustrada na Figura 5.1. A geometria do programa NC é inicialmente definida no CAD e convertida para o programa NC através da interpretação do arquivo de desenho. A rotação, o avanço e a profundidade de corte são determinados a partir de um algoritmo de otimização para minimizar o tempo de operação (Capítulo 6). O algoritmo utiliza uma série de restrições, tais como potência da máquina a ser utilizada, valores de corte recomendados para uma combinação material-ferramenta, bem como coeficientes de Taylor e dados de máquinas. O programa contendo o conjunto de códigos padronizados é finalmente transmitido à máquina onde será executado.

Os objetos geométricos abordados no presente trabalho consistem de perfis convexos prismáticos formados por segmentos de linha reta em superfícies planas. Esta abordagem preliminar tem como objetivo dar continuidade à proposta de desenvolvimento de uma abordagem generativa que visa o tratamento de problemas mais avançados e complexos tais como perfis não-convexos formados por curvas ou arcos de circunferência em superfícies cilíndricas, toroidais, entre outras.

No Capítulo 9 será apresentado uma abordagem do método desenvolvido para automatizar a seqüência de usinagem para um problema relativo a superfícies complexas, onde uma cavidade interna de perfil de revolução deve ser obtida por meio de um processo de fresamento, as técnicas computacionais de aproximação utilizadas, a seqüência de operações de corte propostas e a simulação do processo são mostrados no capítulo.

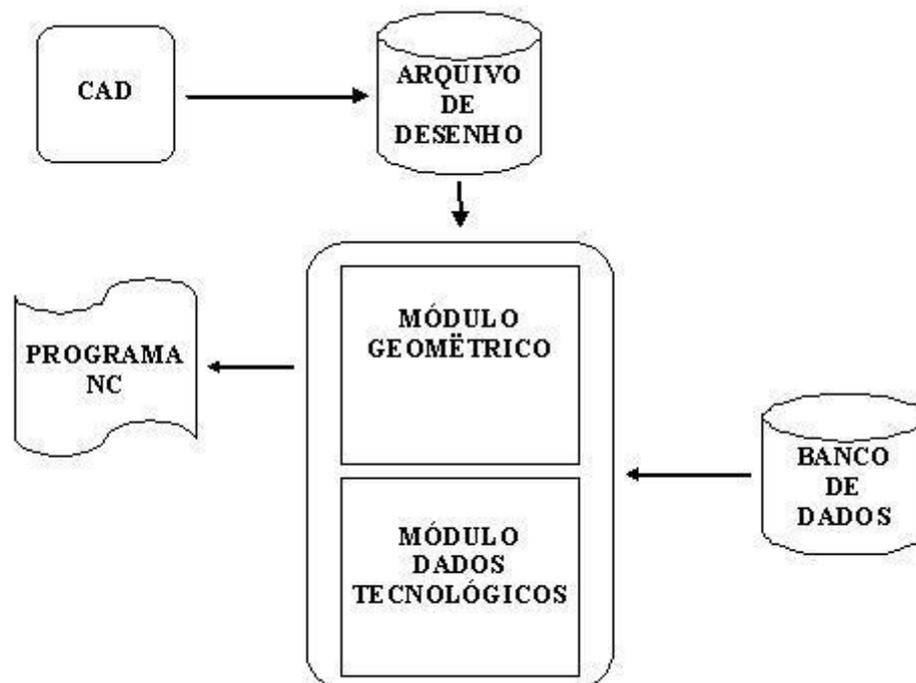


Figura 5.1 Estrutura global do sistema.

5.1 Extração das Informações Geométricas do CAD

A extração das informações geométricas consiste na retirada, utilização e verificação das informações passadas através de um sistema CAD. A partir de um arquivo neutro, dado de saída do sistema CAD, pode-se reconstruir o desenho através de uma estrutura geométrica adotada. Os arquivos neutros serviam inicialmente como interfaces para haver uma troca de dados produtos entre sistemas CAD. A Figura 5.2 mostra a situação da transferência de dados usando um formato de arquivo neutro.

O presente trabalho utilizou-se do arquivo neutro em padrão ASCII IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) isto porque é o mais antigo e de longe o mais difundido padrão de troca de dados CAD atualmente, além disso, é utilizado por todos distribuidores importantes de CAD. Assim, o programa computacional desenvolvido captura as informações geométricas contidas de dois arquivos neutros em formato IGES, um constituindo a peça bruta, e o outro constituindo a peça ser fabricada.

5.1.1 Formato IGES

IGES é um formato padrão que é usado para definir os dados do objeto de desenho no sistema CAD. As entradas dos campos que constituem um arquivo IGES representam informações geométricas e topográficas do objeto. As informações geométricas estão em baixo

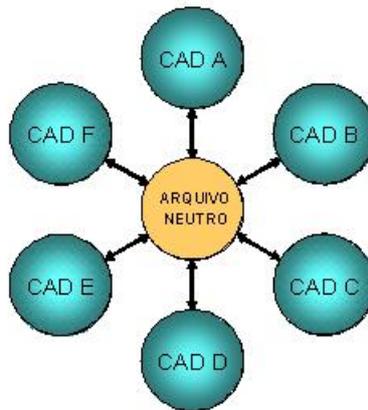


Figura 5.2 Situação usando arquivo neutro.

nível tais como linhas, planos, círculos e outras entidades geométricas para um dado objeto (peça projetada). Algumas das entidades IGES fundamentais são listadas na Tabela D.1 (ver Apêndice D) (NASR; KAMRANI, 2006). Um entendimento mais detalhado de como estas entidades são definidas é alcançado através de (IGES..., 2001).

5.2 Estágio de Desenho

Os dados geométricos para ambas, peça bruta e a peça final, são considerados como dados pelos desenhos gravados em formato IGES. Este processo é chamado **Estágio de Desenho**. Os desenhos podem ser feitos com qualquer sistema CAD, mas deverão seguir alguns requisitos para conter a informação necessária. Os requisitos são:

- i) Os desenhos deverão representar os perfis prismáticos para ambas peça bruta e peça final.
- ii) As coordenadas do sistema estão no espaço X-Y-Z, onde o eixo Z (coordenadas X e Y igual a zero) é considerado como o eixo de extrusão.
- iii) Cada perfil de extrusão deverá ser dado como um polígono convexo.

Assim, este estágio tem como objetivo principal discriminar os requisitos necessários para modelagem sólida CAD, ou seja, quais tipos de sólidos poderão ser processados pelo sistema.

5.3 Estágio de Pré-Processamento

Os dados vindos a partir do **Estágio de Desenho** (ver Apêndice B) deverão ser lidos dentro de uma forma de estruturas de dados especial em ordem para os outros estágios de processamento computacionais que serão atuados de uma maneira mais compreensiva. Este processo é chamado de **Estágio de Pré-Processamento** e seu resultado esperado é o perfil de extrusão das peças bruta e final. A estrutura de dados de geometria especial, a qual contém esse perfil

da peça bruta é chamada de **ProfilePolygon**, enquanto o perfil da peça final é representado pelo **FinishedProfilePolygon**. Estes perfis são compostos de componentes, cada um deles sendo um polígono orientado no sentido horário, representando o contorno de uma região simplesmente conectada do material a ser removido do perfil de extrusão. Ele é exatamente como um polígono, ou seja, a curva juntando dois pontos é necessariamente um segmento de linha reto.

A estrutura de dados utilizada para armazenar os dados geométricos do **ProfilePolygon** e do **FinishedProfilePolygon** é a estrutura de grafos, descrita no Apêndice A. Deste modo, cada elemento geométrico é convenientemente armazenado em uma estrutura de dados em grafo característico, ou seja, cada elemento geométrico é representado como objeto de uma classe. As classes utilizadas para representação dos elementos geométricos foram:

- **GeomEntity**: utilizada como classe base para as demais classes;
- **GE_0D_3D**: utilizada para representar elementos geométricos de dimensão zero (pontos);
- **LineSegment_1D_3D**: utilizada para representar elementos geométricos unidimensionais (segmentos de linha retos);
- **Plane_2D_3D**: utilizada para representar elementos geométricos bidimensionais (polígonos convexos);
- **Polyhedron_3D_3D**: utilizada para representar elementos geométricos tridimensionais (poliedros);

Finalmente, catalogados os elementos geométricos, observe que todos os elementos são representados no espaço, em classes convenientes para este fim, é criado um objeto da classe **GeomGraph**, o qual, estrutura os elementos geométricos do **ProfilePolygon** e **FinishedProfilePolygon** na forma de grafos.

5.4 Determinação do Sequenciamento das Operações de Usinagem

A determinação do sequenciamento das operações de usinagem que serão utilizadas na fabricação da peça é realizada através de três estágios:

1. **Estágio de Decomposição**
2. **Estágio de Corte**
3. **Estágio de Geração da Trajetória da Ferramenta**

As peças bruta e final serão, a seguir, representadas por dois sólidos prismáticos relativamente simples, onde tais peças, utilizadas como modelo, possuem um simples quadrado como polígono da base.

5.4.1 Estágio de Decomposição

Neste estágio inicial as informações geométricas da peça bruta e da peça final já foram catalogadas através de um pré-processamento (**Estágio de Pré-Processamento**), assim com tais informações colhidas defini-se os volumes iniciais a serem removidos da peça bruta. Basicamente estes volumes são obtidos por meio de operações geométricas de interseção entre as arestas ou “edges” dos polígonos base das peças final e bruta (Figura 5.3).

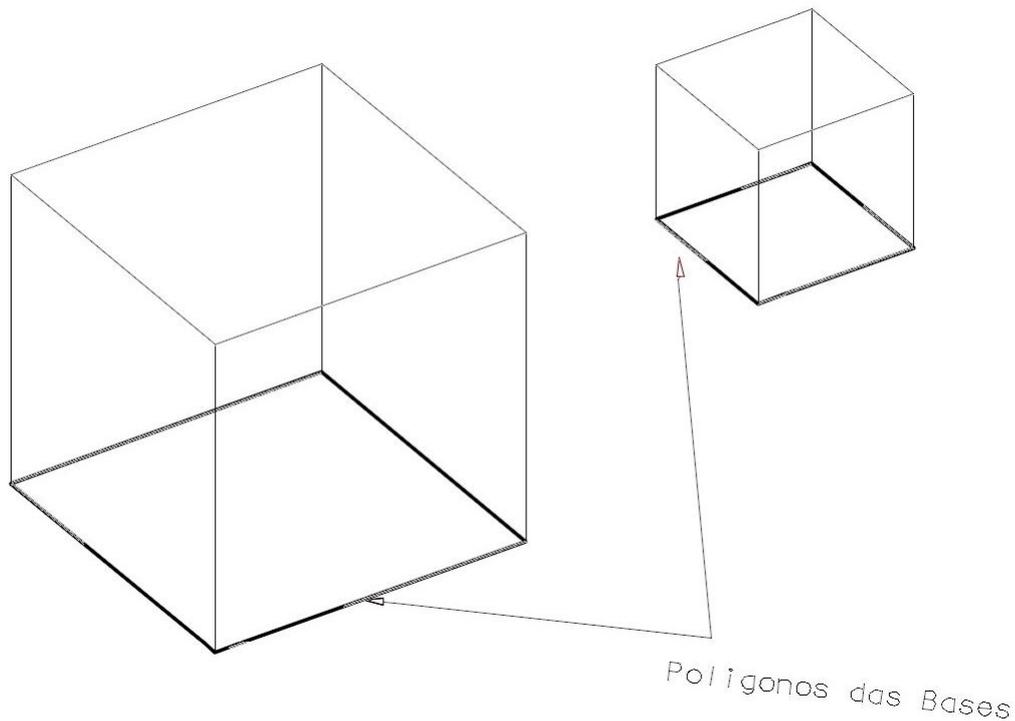


Figura 5.3 Polígonos da base das peças bruta e final.

A implementação computacional inicia-se através da definição dos polígonos base (peças bruta e final) em polígonos da classe **Polygon**. Assim, seleciona-se um **Edge** genérico do polígono da peça bruta, com tal **Edge** determina-se os devidos pontos de interseção entre as arestas dos polígonos, isto é realizado através da utilização do método **Intersect** da classe **Edge**. Observe aqui que tais pontos de interseção são na verdade objetos da classe **Point**. Logo, determinados os pontos de interseção convenientemente por meio do método **PointInConvexPolygon**, executa-se a divisão do polígono da peça bruta original, ou seja, obtém-se o primeiro volume a ser retirado na forma de cavaco do processo de corte. A utilização do método **Split** da classe **Edge** permite a realização desta operação, que tem como resultado dois novos polígonos, o polígono do volume a ser removido e o novo polígono da peça bruta.

O algoritmo a seguir, em forma de pseudocódigo, é usado para encontrar os volumes iniciais a serem removidos da peça bruta no **Estágio de Decomposição**.

Begin

```
//Variables

variable WPEdge           // Edge do polígono da WorkPiece
variable FPEdge           // Edge do polígono da FinishedPiece
variable IntersectionPoint // Ponto de intersecção
variable Quu              // Fila de pontos (Queue)
variable ListPolygons     // Lista de polígonos
variable WPCurrent        // Polígono da WorkPiece atual
variable WPSize           // Tamanho do polígono da WorkPiece
variable FPSize           // Tamanho do polígono da FinishedPiece
variable GenericPoint     // Ponto genérico

FPEdge = 0
WPEdge = 0

for (i=FPEdge; i<FPSize; i++)
{
    for (j=WPEdge; j<WPSize; j++)
        IntersectionPoint=FPEdge.intersect(WPEdge)
        if (PointINConvexPolygon(IntersectionPoint,WPCurrent)=TRUE)
            WPCurrent.insert(IntersectionPoint)
            Quu.push(IntersectionPoint)
        end if
        WPEdge=j
    next j
    FPEdge=i
next i
}

GenericPoint=Quu.pop()

if (GenericPoint.classify(FPEdge)==BEYOND) ||
GenericPoint.classify(FPEdge)==DESTINATION)
    Quu.push(Quu.pop())

WPCurrent.setV(Quu.pop())
ListPolygons.insert(WPCurrent.split(Quu.pop()))

End
```

Durante a execução do método **Split**, a orientação do vértice do polígono a ser utilizado no

processo é importante, assim se faz necessário o uso dos métodos **Classify** e **setV**, respectivamente das classes **Edge** e **Polygon**.

Para ilustrar o processo realizado durante este estágio são mostradas as Figuras 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8.

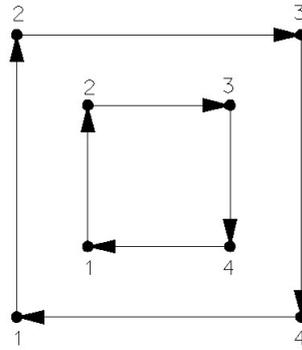


Figura 5.4 Polígonos da base das peças bruta e final (Begging).

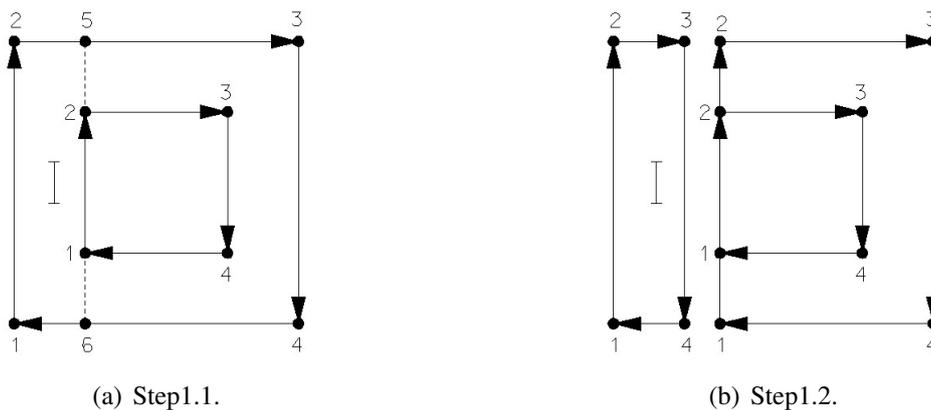


Figura 5.5 Sequência de cortes realizada no DecompositionStage - Step1.

Os elementos geométricos presentes em cada etapa do estágio são citados na Tabela 5.2.

5.4.2 Estágio de Corte

Os volumes obtidos no estágio inicial de sequenciamento de corte, o **Estágio de Decomposição**, deve obedecer a critérios de restrições de usinagem, isto é, deve-se observar se a máxima espessura de penetração satisfaz as condições de projeto para o processo de fresamento a ser realizado.

Assim, os volumes iniciais obtidos no estágio anterior seguramente serão reduzidos a valores menores, os quais, devem obedecer aos critérios de corte estabelecidos previamente. O método proposto para execução desse processo consiste inicialmente em dividir convenientemente os volumes obtidos pelo **Estágio de Decomposição** de modo a ser considerado neste

momento a máxima espessura de penetração da aresta de corte e a trajetória a ser percorrida pela ferramenta de corte. Observando que a espessura de penetração da ferramenta está diretamente relacionada com o diâmetro da fresa no processo de fresamento frontal, a trajetória da ferramenta aqui proposta consiste na execução de percursos paralelos as arestas poligonais da peça a ser usinada.

A implementação computacional deste processo consiste inicialmente no armazenamento dos volumes do **Estágio de Decomposição** em polígonos da classe **Polygon**. Define-se assim, um polígono da peça bruta inicial e a aresta da peça final correspondente. A partir desta definição inicial, determinam-se linhas paralelas a atual aresta da peça final, onde a distância entre as linhas corresponde a espessura máxima de penetração estabelecida. O passo seguinte consiste na obtenção de pontos de interseção convenientes entre as linhas paralelas obtidas e as arestas da peça bruta, onde assim, como fora realizado durante o **Estágio de Decomposição**, tais pontos são tratados como objetos da classe **Point** e também de modo similar, o polígono corrente é dividido em polígonos menores através da utilização do método **Split** da classe **Edge**. O processo continua através da seleção do polígono seguinte da peça bruta e repetição dos passos anteriores até a execução do último polígono restante da peça bruta em questão. A seleção dos polígonos seguintes é realizada em uma orientação horária proposta. Finalmente, o **Estágio de Corte** tem como resultado a obtenção de novos volumes resultantes da divisão do material da peça bruta, onde foram agora levados em consideração critérios de usinagem, espessura máxima de penetração, e a trajetória a ser executada pela ferramenta de corte. O processo executado durante o **Estágio de Corte** é descrito através do pseudocódigo do algoritmo a seguir.

Begin

```
//Variables

variable WPn // Número de sub-polígonos da WorkPiece
variable WPPolygon // Sub-polígono da WorkPiece
variable WPEdge // Edge do sub-polígono da WorkPiece
variable WPEdgeFirst // Primeiro do sub-polígono da WorkPiece
variable WPsize // Tamanho do sub-polígono da WorkPiece
variable WPEdge_ ) // Edge do sub-polígono da WorkPiece paralela à aresta da WorkFinished
variable WPCurrent // Polígono da WorkPiece atual
variable WPPoint // Ponto do sub-polígono da WorkPiece
variable GenericPoint // Ponto genérico
variable GenericEdge // Edge genérica
variable e // Espessura de penetração máxima
variable IntersectionPoint // Ponto de intersecção
variable WPCurrent // Sub-polígono da WorkPiece atual
variable Quu // Fila de pontos (Queue)
variable ListPolygons // Lista de sub-polígonos

WPEdge = 0
```

```

WPPolygon = 0

for (i=WPPolygon;i<WPn;i++)
{
  for (j=WPEdge;j<WPSize;j++)
    if (WPEdge.point().distance=MaxDist)
      GenericEdge=parallel(WPEdge,e)
      IntersectionPoint=GenericEdge.intersect(WPEdge)
      if (PointINConvexPolygon(IntersectionPoint,WPCurrent)=TRUE)
        WPCurrent.insert(IntersectionPoint)
        Quu.push(IntersectionPoint)
      end if
    end if
  WPEdge=j
next j
WPPolygon=i
next i
}

GenericPoint=Quu.pop()

if (GenericPoint.classify(WPEdge)==BEYOND) ||
GenericPoint.classify(WPEdge)==DESTINATION)
  Quu.push()

ListPolygons.insert(WPCurrent.splice(Quu.pop(),Quu.pop()))

End

```

O cálculo do número de passos a serem executados (sub-volumes a serem obtidos), por aresta da **FinishedProfilePolygon**, ou seja, por sub-volume do **WorkPiece** resultante do **Estágio de Corte**, é dado pelo algoritmo a seguir:

1. Para cada **WPPolygon** $i = 1$ até **WPn**
 - (a) Faça **GenericEdge = WPEdge_i**
 - (b) Para cada **WPPoint** $i = 1$ até **WPsize**
 - i. Calcular a distância entre **WPPoint** e **GenericEdge**
 - ii. Armazenar o valor em uma fila **Quu_i**
2. O número de passes é dado pelo valor do maior inteiro da divisão $\max_{1 \leq i \leq n} \{Quu_i\} / a_e$
3. Fim do cálculo

As Figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 representam os passos correspondentes ao **CuttingStage**. Assim, a Figura 5.9 representa os dados de entrada do estágio, resultantes do **Estágio de Decomposição**, as Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 ilustram a subdivisão dos volumes durante o estágio, finalmente os volumes resultantes das sucessivas divisões ao longo do processo de corte são demonstrados na Figura 5.14.

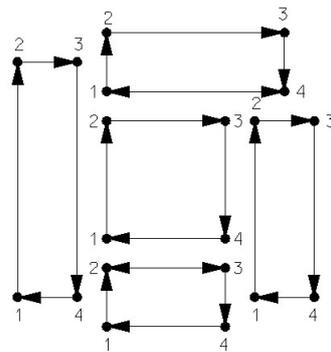


Figura 5.9 Polígonos da base das peças bruta e final (Begging).



Figura 5.10 Sequência de cortes realizada no CuttingStage - Step1.

5.4.3 Estágio de Geração da Trajetória da Ferramenta

Neste estágio, subsequente, tem-se os volumes resultantes do **Estágio de Corte**, onde tais volumes formam os volumes derivados do **Estágio de Decomposição**, ou seja, cada volume resultante do **Estágio de Corte** pertence a um único volume do **Estágio de Decomposição**. Tomando-se como base os volumes resultantes do **Estágio de Corte** (Figura 5.15(a)), o objetivo aqui é a determinação final da trajetória da ferramenta de corte.

Inicialmente, definiu-se dois polígonos externos ao polígono da peça bruta o **WPPolygon**, tais polígonos são denominados aqui de **ContactPolygon** (Figura 5.15(b)) e **SafetyPolygon** (Figura 5.15(c)), o primeiro polígono imediatamente externo ao **WPPolygon**, o **ContactPolygon** consiste no polígono que auxiliará a determinação do trajeto da ferramenta sempre que esta

Tabela 5.1 Elementos geométricos do **Estágio de Decomposição**.

Elemento geométrico	WorkPiece	FinishedPiece	Volume (I,II,III,IV)
<i>Point</i>	1, 2, 3, 4 (5,6)	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4
<i>Edge</i>	1-2, 2-3, 3-4, 4-1	1-2, 2-3, 3-4, 4-1	1-2, 2-3, 3-4, 4-1
<i>Polygon</i>	1-2-3-4	1-2-3-4	1-2-3-4

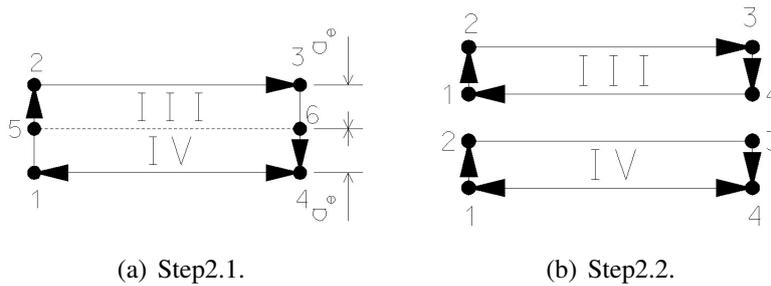


Figura 5.11 Sequência de cortes realizada no CuttingStage - Step2.

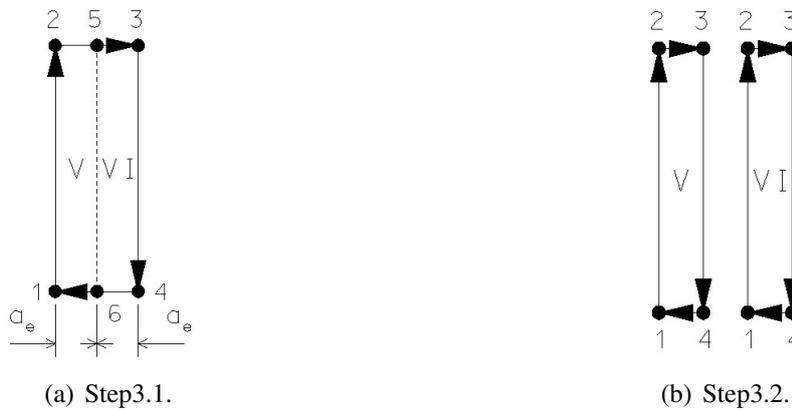


Figura 5.12 Sequência de cortes realizada no CuttingStage - Step3.

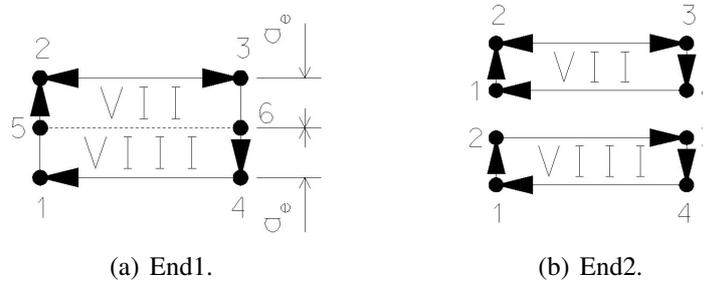


Figura 5.13 Sequência de cortes realizada no CuttingStage - End.

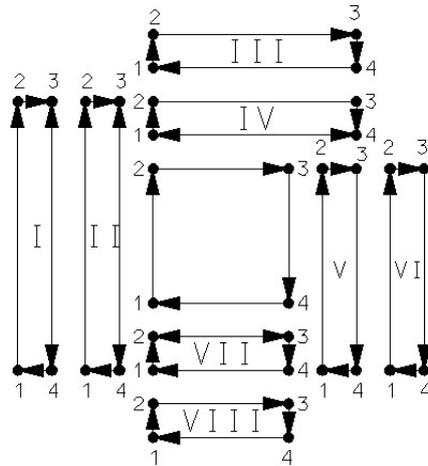


Figura 5.14 Resultado final do CuttingStage.

entrar em contato com a peça bruta, enquanto o **SafetyPolygon** determinará a trajetória pela qual a ferramenta não entrará em contato com a peça, ou seja, em tempos mortos ou vazios, isto é, onde permite-se avanços rápidos.

Através de tais polígonos toma-se pontos de intersecção em relação a linhas geratrizes de arestas de polígonos do **Estágio de Corte**. Assim, tem-se como resultado a obtenção da trajetória da ferramenta de corte.

O processo como um todo pode ser entendido através do seguinte pseudocódigo que representa o algoritmo do atual estágio do trabalho:

Begin

```
//Variables

variable WPN // Número de sub-polígonos da WorkPiece
variable WPPolygon // Sub-polígono da WorkPiece
variable WPEdge_ ) // Edge do sub-polígono da WorkPiece paralela à aresta da WorkFinished
variable WPEdgeFirst // Primeira edge do sub-polígono da WorkPiece
variable WPsize // Tamanho do sub-polígono da WorkPiece
variable WPCurrent // Polígono da WorkPiece atual
variable GenericPoint // Ponto genérico
variable GenericEdge // Edge genérica
variable e // Espessura de penetração máxima
variable IntersectionPoint // Ponto de intersecção
variable WPCurrent // Sub-polígono da WorkPiece atual
variable Quu // Fila de pontos (Queue)
variable ListPolygons // Lista de sub-polígonos
variable ContactPolygon // Polígono de contato
```

```

variable SafetyPolygon           // Polígono de segurança

WPPolygon = 0

for (i=WPPolygon;i<WPN;i++)
{
    GenericEdge=parallel(WPEdgev_, e)
    IntersectionPoint=GenericEdge.intersect(ContactPolygon)

    IntersectionPoint=Quu.pop()

    IntersectionPoint=WPEdgev_.intersect(ContactPolygon)

    textitIntersectionPoint=Quu.pop()

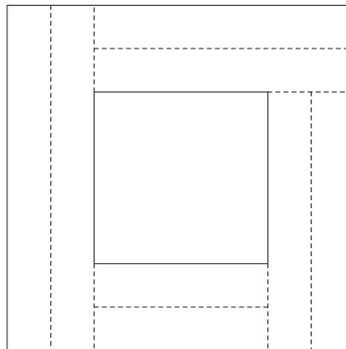
    WPPolygon=i
next i
}
End

```

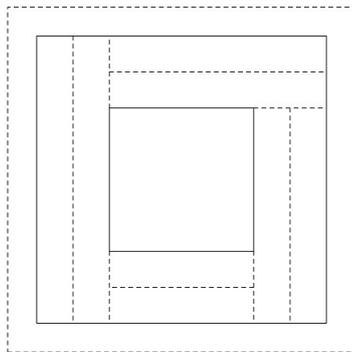
Tomando-se a aresta do primeiro sub-polígono do **Estágio de Corte** paralela à aresta da peça final, traça-se uma aresta paralela à direita desta aresta, de distância igual a espessura máxima de penetração de projeto a_e , através desta aresta obtida, determina-se os pontos de intersecção entre a linha geratriz de tal aresta e a linha geratriz das arestas do **ContactPolygon**, assim armazena-se os pontos de intersecção que pertencem ao **ContactPolygon**. Repete-se o processo para os demais polígonos. Observa-se que a seqüência de pontos deve obedecer a uma série alternada ou em “zig-zag” entre as distâncias horizontais e verticais, dependendo do caso. Sempre nos inícios e nos finais de cada polígono do **Estágio de Decomposição** deve-se acrescentar um ponto extra projetado perpendicularmente no **SafetyPolygon**, onde os vértices do **SafetyPolygon** auxiliarão ligando os pontos entre os polígonos em questão. A representação da geração da trajetória da ferramenta de corte durante o **Estágio de Geração da Trajetória da Ferramenta** pode ser acompanhada através das Figuras 5.15, 5.16 e 5.17. Observe que a distância de paralelismo entre as linhas relativas à trajetória da ferramenta de corte correspondem ao valor da espessura máxima de penetração de projeto (a_e). Uma otimização da trajetória da ferramenta de corte se faz necessário como pode ser observado nas Figuras 5.16(b) e 5.17.

Tabela 5.2 Elementos geométricos do **Estágio de Corte**.

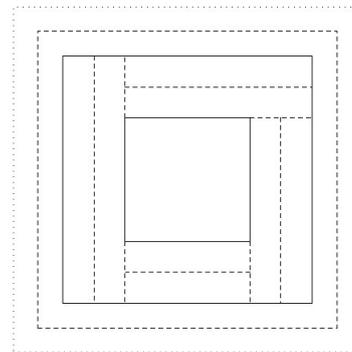
Elemento geométrico	WorkPiece	FinishedPiece	Volume (I,II,III,IV, V, VI, VII, VIII)
<i>Point</i>	1, 2, 3, 4 (5,6)	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4
<i>Edge</i>	1-2, 2-3, 3-4, 4-1	1-2, 2-3, 3-4, 4-1	1-2, 2-3, 3-4, 4-1
<i>Polygon</i>	1-2-3-4	1-2-3-4	1-2-3-4



(a) Begging.

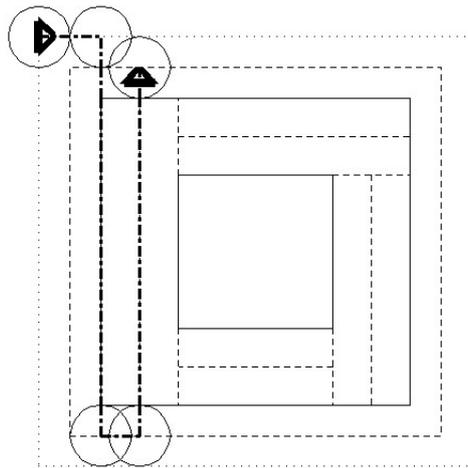


(b) ContactPolygon.

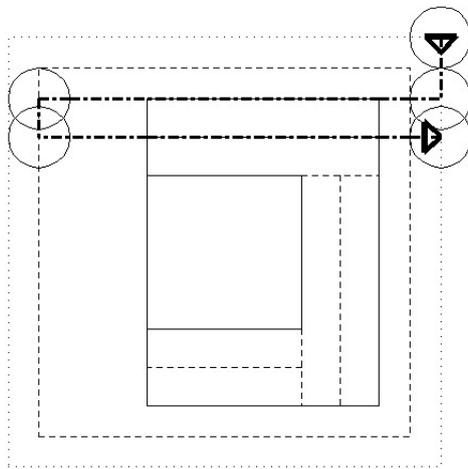


(c) SafetyPolygon.

Figura 5.15 Geração da trajetória da ferramenta: determinação da geometria da trajetória da ferramenta.

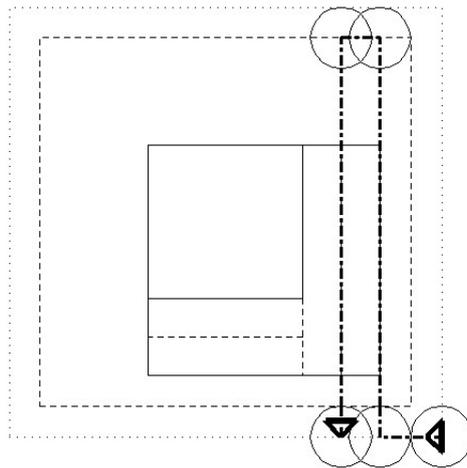


(a) Step1.

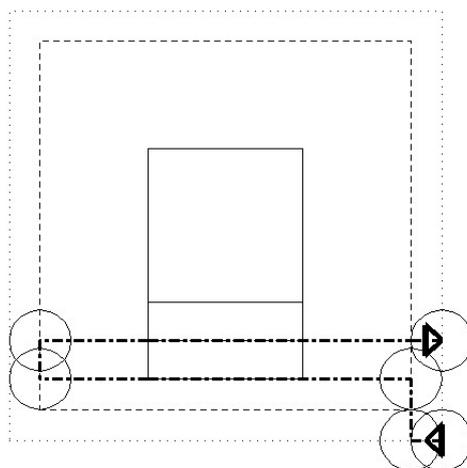


(b) Step2.

Figura 5.16 Geração da trajetória da ferramenta: início do movimento da ferramenta.



(a) Step3.



(b) End.

Figura 5.17 Geração da trajetória da ferramenta: término do movimento da ferramenta.

Otimização dos Parâmetros de Usinagem

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia que visa auxiliar a obtenção dos parâmetros ótimos de usinagem para o processo de fresamento frontal. O estágio que descreve esta metodologia é chamado de **Estágio de Otimização**. Esta metodologia se divide em três partes a considerar:

1. Seleção dos parâmetros que influenciam significativamente o processo de fresamento frontal;
2. Determinação de critérios de restrições;
3. Dedução e implementação de expressões matemáticas para otimização do processo.

A seleção dos parâmetros de influência no fresamento frontal foi feita levando-se em conta essencialmente o mecanismo do processo. Na metodologia desenvolvida, foram entendidos como critérios de restrições os valores limites dentro dos quais um parâmetro pode variar no processo. A otimização dos parâmetros é, então, realizada através de uma série de cálculos que um programa computacional desenvolvido para este fim processa, tomando-se como ponto de partida estes limites. Da literatura sobre o assunto (FERRARESI, 2003), (STEMMER, 1995), (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003), é muito bem conhecido que as condições que levam a um mínimo custo de fabricação diferem daquelas que levam a um tempo mínimo de fabricação. Neste trabalho foi utilizada como critério de otimização as condições que levam à máxima produção.

6.1 Definição dos Parâmetros de Corte

Os principais fatores a serem levados em conta na seleção das condições de usinagem no fresamento são:

1. avanço por dente (f_z);
2. profundidade de usinagem (a_p);
3. rotação (n).

1. O *avanço* (f_z) é o percurso de avanço (espaço percorrido pela ferramenta, segundo a direção de avanço) em cada volta ou em cada curso (FERRARESI, 2003).

2. A *profundidade* ou *largura de corte* (a_p) é a profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho (FERRARESI, 2003).
3. A *rotação* (n) da ferramenta é responsável pela velocidade de corte (V_c) que depende também do diâmetro da fresa.

6.2 Determinação dos Critérios de Restrições

A escolha do avanço em uma operação de fresamento deve levar em conta vários fatores como, tipo e material da fresa, acabamento superficial especificado para a peça a ser usinada, potência da máquina, entre outras. A espessura média do cavaco (h_m) não deve ser inferior a determinados valores, para que a pressão específica de corte não cresça demasiadamente. Para o fresamento frontal (h_m) não deve ser menor que 0,10 mm (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003). Quando uma operação de acabamento está para ser tomada, o avanço será tal que forneça uma superfície final aceitável.

Neste caso a escolha do avanço está nas mãos do projetista, o qual especificou as exigências para a superfície final (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989). A qualidade da peça fabricada não depende apenas da sua geometria mas também da sua textura superficial, tal como a rugosidade (PRAKASVUDHISARN; KUNNAPAPDEELERT; YENRADEE, 2008). Neste trabalho os valores para o avanço foram determinados através do critério de limitação quanto ao acabamento superficial da peça e da espessura mínima de (h_m). Do ponto de vista econômico, deve-se usar a maior profundidade de usinagem possível, já que esta influencia pouco no desgaste da ferramenta e seu aumento provoca um aumento proporcional na remoção do cavaco. Assim, em fresas frontais, deve-se utilizar ao máximo o comprimento das arestas. Deve-se, porém, obedecer à recomendação de que o comprimento de corte ($b = a_e \cdot \sin(\chi_r)$) não deve exceder a $\frac{2}{3}$ do comprimento total da aresta da pastilha, para se evitar vibrações. Existem, porém, outros fatores que limitam o emprego da profundidade de corte grande, por exemplo, a potência e a rigidez da máquina, rigidez da peça e da fixação. Os fatores limitantes da profundidade de corte utilizados neste trabalho foram os que dizem respeito ao comprimento da aresta da ferramenta e a potência da máquina. Os fatores limitantes da rotação utilizados deste trabalho foram os que dizem respeito às características inerentes à máquina, ou seja, as rotações oferecidas por ela.

6.3 Dedução e Implementação das Equações do Processo

Os intervalos de variação para cada parâmetro, descritos anteriormente (Item 6.2), são obtidos através do desenvolvimento de fórmulas de usinagem já consagradas e encontradas nas mais variadas literaturas sobre o assunto (FERRARESI, 2003), (STEMMER, 1995), (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003), de modo que o desenvolvimento das expressões é descrito a seguir. Como já foi dito na seção anterior, o valor mínimo para a espessura média do cavaco (h_m) que não deve ser inferior a 0,10 mm e a espessura média da área da seção do cavaco é dada pela

Equação 6.1.

$$h_m = \frac{f_z \cdot \sin \chi_r \cdot (\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2)}{(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (6.1)$$

onde:

- h_m : espessura média do cavaco (mm);
- f_z : avanço por dente ($mm/volta$);
- χ_r : ângulo de posição normal (rad);
- φ_1 : ângulo entre o ponto de saída (ou entrada no fresamento concordante) do dente e a vertical (rad);
- φ_2 : ângulo entre o ponto de entrada (ou saída no fresamento concordante) do dente e a vertical (rad);

Assim, tem-se que

$$f_{z,hm} = \frac{0,1 \cdot (\varphi_2 - \varphi_1)}{\sin \chi_r \cdot (\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2)} \quad (6.2)$$

onde:

- $f_{z,hm}$: avanço por dente em função da espessura do cavaco ($mm/volta$);

A partir da escolha do acabamento superficial é possível determinar o avanço durante a usinagem. Para que seja fixada a rugosidade da peça, faz-se necessária a análise da variação do grau de acabamento em relação ao avanço da fresa, mostrado no gráfico da Figura 6.1. Nele nota-se que o acabamento é pior na direção do deslocamento do centro da fresa.

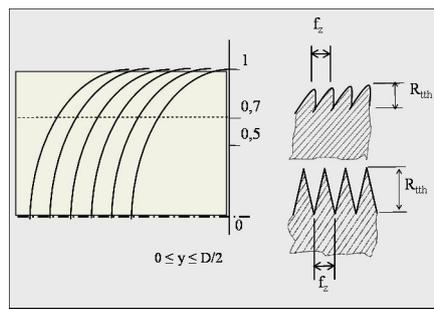


Figura 6.1 Gráfico do acabamento superficial no fresamento.

O valor do acabamento é dado pela Equação 6.3.

$$R_{tth} = \frac{f_z \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot y}{D}\right)^2} \cdot (\tan \chi \cdot \tan \chi_l)}{(\tan \chi + \tan \chi_l)} \quad (6.3)$$

onde:

- R_{tth} : profundidade de rugosidade (μm);
- y : distância em y (mm);
- D : Diâmetro da fresa (mm);
- χ : ângulo de posição da aresta principal de corte (rad);
- χ_l : ângulo de posição da aresta lateral de corte (rad);

Se R_{tthmax} é um valor máximo, então $y = 0$, onde y representa a distância ao centro da fresa. Assim, tem-se que

$$f_{z,Rtthmax} \leq \frac{R_{tthmax} \cdot (\tan \chi + \tan \chi_l)}{(\tan \chi \cdot \tan \chi_l)} \quad (6.4)$$

onde:

- $f_{z,Rtthmax}$: avanço por dente em função do grau de rugosidade da peça ($mm/volta$);
- R_{tthmax} : profundidade máxima de rugosidade (μm);

Uma vez que, deve-se obedecer à recomendação de que o comprimento de corte não deve exceder a $\frac{2}{3}$ do comprimento total da aresta da pastilha para se evitar vibrações (Item 6.2), o comprimento de corte (b) é dada por ($b = a_p \cdot \sin(\chi_r)$). Assim, a profundidade de corte máxima é dada pela Equação 6.5

$$a_{pmax,CA} \leq \frac{2 \cdot CA}{3 \cdot \sin \chi_r} \quad (6.5)$$

onde:

- $a_{pmax,CA}$: profundidade de corte máxima em função do comprimento total da aresta da pastilha (mm);
- CA : comprimento total da aresta da pastilha (mm);

A limitação mínima da profundidade de corte foi estabelecida como sendo a menor profundidade que pode ser ajustada na máquina ferramenta. A profundidade de corte máxima não deve ultrapassar a profundidade de corte em função da potência da máquina, Equação 6.6.

$$N_c = 2,22 \cdot 10^{-7} \cdot K_m \cdot a_e \cdot a_p \cdot v_f \quad (6.6)$$

Uma vez que, a potência de corte deve ser menor que o produto da potência motor pelo rendimento da máquina tem-se pela Equação 6.7 a seguinte relação

$$a_{pmax,Nm} \leq \frac{N_m \cdot \eta}{2,22 \cdot 10^{-7} \cdot K_{sm,max} \cdot a_e \cdot a_p \cdot v_{f,max}} \quad (6.7)$$

onde:

- $a_{pmax,Nm}$: profundidade de corte máxima em função da potência máquina (mm);

- N_m : potência motor (CV);
- η : rendimento da máquina;
- K_{smmax} : potência específica de corte média para o valor mínimo de hm (Kgf/mm^2);
- v_{fmax} : velocidade de avanço máxima (mm/min);

As rotações mínima e máxima serão aquelas permitidas pela máquina. A determinação dos valores numéricos dos parâmetros de usinagem escolhidos é realizada através de um programa computacional. Os dados de entrada são inseridos pelo usuário através de uma interface gráfica. O valores para pressão específica de corte K_s foram obtidos da Tabela E.1(ver Anexo E) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

6.4 Otimização dos Parâmetros

Uma vez fixada a faixa possível de variação dos parâmetros de corte a serem utilizados,

$$f_{z,hm} \leq f_z \leq f_{z,Rtt hmax} \quad (6.8)$$

$$a_{p,min} \leq a_p \leq a_{pmax,CA} \text{ ou } a_{pmax,Nm} \quad (6.9)$$

$$n_{min} \leq n \leq n_{max} \quad (6.10)$$

onde $a_{p,min}$ é a menor variação de profundidade permitida pela máquina, assim como, n_{min} e n_{max} , correspondem a menor variação de rotação e a rotação máxima permitida pelo equipamento, respectivamente. A profundidade máxima de corte deve obedecer aos dois critérios de restrições estabelecidos, ou seja, tanto para o critério do máximo comprimento da arresta da ferramenta, quanto da potência motor da máquina-ferramenta.

O próximo passo é realizar a otimização do processo definindo-se que valores levarão a um mínimo tempo de corte. A otimização dos parâmetros consiste na determinação de valores pontuais para a profundidade de corte, o avanço por dente e para a rotação. Assim, o programa varre os intervalos de valores dos parâmetros e calcula os valores pontuais que levam ao menor tempo de usinagem, isto é realizado através da Equação 6.11.

$$t_t = t_m + \sum_{i=1}^{NP} t_{c_{di}} + t_{c_a} \quad (6.11)$$

onde:

- t_t : tempo total de usinagem (min);
- t_m : tempo morto (tempo em que a ferramenta de corte não está produzindo cavaco, este tempo envolve a fixação da peça bruta na máquina, eventual inspeção e retirada da peça usinada, além da movimentação da ferramenta em vazio) (min);
- NP: o número de passes para o desbaste;

- t_{cd} : tempo de corte para o desbaste (*min*);
- t_{ca} : tempo de corte para o acabamento (*min*);

O programa tenta fazer com que as profundidades de corte, nos passes de desbaste, sejam iguais, mas em alguns casos o último passe de desbaste poderá ter uma profundidade de corte diferente dos demais. O principal termo da Equação 6.11, o tempo de desbaste (t_{ca}), consiste no tempo necessário para realizar uma operação de desbaste, dado pela Equação 6.12.

$$t_{cd} = \frac{L_t}{f_z \cdot z \cdot n} \quad (6.12)$$

onde:

- L_t : comprimento total de corte (*mm*);
- z : número de dentes da ferramenta;
- n : rotação do eixo árvore (*rpm*);

O comprimento total de corte L_t (*mm*) é obtido pela soma dos comprimentos útil L (*mm*), dimensão da peça, diâmetro da ferramenta D (*mm*) e um valor para margem de segurança de saída da ferramenta m (*mm*), Equação 6.13.

$$L_t = L + D + 2 \cdot m \quad (6.13)$$

O número de passes (NP) é determinante no valor final do tempo de corte. A quantidade de vezes que a operação de desbaste deve ser repetida, quando necessária, consiste em um fator que deve ser considerado e determinado através de um planejamento da operação, observa-se que tal planejamento é de natureza complexa e envolve diversas possibilidades. Neste trabalho foram seguidos três caminhos para o planejamento do desbaste, de modo que um complementa o outro nos aspectos da operação, Figura 6.2.

1. Primeiro caminho - O objetivo principal aqui consiste em determinar os parâmetros dentro dos intervalos de variação de (a_p, f_z, n) que levam a máxima potência da máquina, através da “flexibilização” dos três parâmetros. As etapas deste caminho são as seguintes:
 - (a) escolha do limite superior do intervalo da profundidade de corte (a_{pmax}), a profundidade máxima do intervalo é sempre o menor valor entre o sobremetal (S_r) e a máxima profundidade em função da aresta de corte (a_{pmaxCA});
 - (b) determinado os intervalos de cada parâmetro (conforme anteriormente) calcula-se a potência de corte correspondente aos valores máximos dos parâmetros (a_p, f_z, n) ; e
 - (c) compara-se o valor da potência em (b) com a máxima potência permitida pela máquina (N_{maq}). Caso a potência de corte em (b) seja menor que a potência máxima da máquina os parâmetros ótimos são, então, os valores superiores dos (a_p, f_z, n) . Caso contrário, o programa vai diminuindo estes valores até atingir uma potência permitida pela potência motora da máquina.

2. Segundo Caminho - O segundo caminho busca a determinação dos parâmetros que levam a potência mais próxima da máquina, utilizando-se como parâmetro para profundidade de corte o valor do sobremetal:
 - (a) escolha do limite superior do intervalo da profundidade de corte (a_{pmax}); para valores do sobremetal menores que e a máxima profundidade permissível pela aresta de corte, a profundidade máxima do intervalo é igual ao valor do sobremetal; valores do sobremetal superiores em relação a (a_{pmaxCA}), a profundidade máxima do intervalo passa a ser igual ao valor de (S_T) dividido por dois, ou por três, assim por diante até se atingir o valor menor e mais próximo de (a_{pmaxCA});
 - (b) determinado os intervalos de cada parâmetro, calcula-se inicialmente a potência de corte correspondente aos valores máximos dos intervalos (a_p, f_z, n);
 - (c) repete-se o terceiro passo do primeiro caminho.

3. Terceiro caminho - O terceiro caminho de busca consiste em um caso especial do segundo caminho, o qual ocorre apenas quando o sobremetal é maior do que máxima profundidade em função da aresta de corte. Os passos deste último caminho são:
 - (a) escolha do limite superior do intervalo da profundidade de corte (a_{pmax}). O (a_{pmax}) é sempre igual a (a_{pmaxCA});
 - (b) determinado os intervalos de cada parâmetro, calcula-se a potência de corte correspondente aos valores máximos dos intervalos (a_p, f_z, n);
 - (c) repete-se o terceiro passo do primeiro caminho.

A otimização dos parâmetros de usinagem, para o processo de fresamento é representado na Figura 6.2, onde os incrementos utilizados pelo programa são tais que o avanço varia de 0,05 mm/volta, a profundidade de corte de 0,1 mm e a rotação de 100 RPM. A vida da ferramenta em função dos parâmetros otimizados é dada pela Equação 6.14.

$$t_2 = \left(\frac{l_f \cdot \pi \cdot D \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_{ft} \quad (6.14)$$

onde:

- t_2 : tempo de vida da ferramenta (*min*);
- l_f : comprimento de corte (*mm*);
- D : diâmetro da fresa (*mm*);
- V_c : velocidade de corte (*m/min*);
- K, x : parâmetros da fórmula simples de Taylor;
- Z : Lote de peças;

- t_{ft} : tempo de troca da ferramenta (*min*);

Teoricamente os valores de t_2 serão zero quando a vida da ferramenta não tiver sido atingida, isto é quando não houver troca. Quando o tamanho do lote for um, os valores de t_2 serão baixos.

A Tabela 6.1 mostra os dados de entrada necessários para o processamento e os dados de saída gerados pelo programa.

Tabela 6.1 Dados de entrada e saída.

Dados de Entrada
D_c : diâmetro da ferramenta (mm)
C_a : comprimento da aresta de corte da ferramenta (mm)
z : número de dentes da ferramenta
a_e : largura de corte por passada da ferramenta
φ_1 : ângulo de posicionamento inicial (rad)
φ_2 : ângulo de posicionamento final (rad)
S_m : comprimento do sobremetal (mm)
Dados de Saída
a_p : profundidade de corte por passada da ferramenta (mm)
f_z : avanço por dente da ferramenta (mm/dente)
N : potência de corte (CV)
t_c : o tempo efetivo de corte (min)

A aplicação da metodologia para otimização dos parâmetros de usinagem descrita pode ser vista através de outros estudos de casos característicos do processo de fresamento frontal (MESQUITA; ROCHA; NEVES, 2006), que foge ao escopo deste trabalho a descrição mais aprofundada destes casos.

Geração do Código NC

O estágio final do sistema é a geração do código NC para o fresamento da peça a ser usinada. Neste estágio são processados os dados obtidos nos estágios que o antecedem, como o **Estágio de Desenho**, **Estágio de Pré-processamento**, **Estágio de Decomposição**, **Estágio de Corte**, **Estágio de Geração da Trajetória da Ferramenta** e **Estágio de Otimização**.

7.1 Código NC

O programa gerado é apresentado aqui seguindo o formato e a sintaxe exata pela norma ISO 6983 (ISO..., 1982), a qual regula a aplicação das funções em um programa de comando numérico (código NC). O programa completo é composto das seguintes partes:

- cabeçalho inicial;
- mudança de ferramentas de corte;
- geração da trajetória da ferramenta;
- término do programa.

7.1.1 Cabeçalho Inicial e Mudança de Ferramentas de Corte

No início do programa, o cabeçalho do programa NC é gerado, onde: é dado um nome ao programa. Restabelecido a origem do zero máquina; deslocamento da origem do zero máquina para o zero da peça bruta; define as coordenadas para a troca da ferramenta; inicia o fluido de corte; entre outras funções. O modelo de um típico cabeçalho de um programa NC é mostrado na Figura 7.1.

7.1.2 Geração da Trajetória da Ferramenta e Término do Programa

Em seguida é definida a seqüência de operações, furação, desbaste, canal, etc, para cada *setup* de quanto a peça bruta será usinada. Uma vez reconhecidas as sub-operações de usinagem é feita a seleção da ferramenta de corte adequada para cada sub-processo com a ajuda de um banco de dados. A seqüência de sub-processos começa sempre da camada mais externa a camada mais interna. Depois de definida a seqüência e a seleção da primeira ferramenta de corte, a combinação dos parâmetros de corte são observados, dentro do possível intervalo de utilização, que assegura a máxima produção. Na determinação das condições de corte, deve-se

INÍCIO	
: _____#	(Nome do Programa)
TROCA DE FERRAMENTA	
T00: _____#	(Comentário da Próxima Operação)
G00X___ Y___ Z___#	(Ponto de Troca da Ferramenta)
T___#	(Número da Próxima Ferramenta)
M06#	(Libera o giro da torre)
M___#	(Faixa de Rotação)
VELOCIDADE DE CORTE CONSTANTE	
G96#	(Velocidade de Corte Constante)
S___#	(Valor da velocidade de Corte)

Figura 7.1 Modelo do cabeçalho de um programa NC.

tomar cuidado sempre: a potência do motor da máquina nas condições de trabalho, acabamento desejado na operação de acabamento, comprimento útil da aresta de corte, principalmente. Definidas as condições de corte, a trajetória mais curta da ferramenta é gerada assegurando o mínimo tempo de fabricação. O próximo passo é descobrir se todas as ferramentas de corte foram chamadas. Se não, é chamada a próxima na seqüência, até que todas as trajetórias tenham sido geradas. Finalmente o programa é finalizado com a função M30 (ISO..., 1982).

7.2 Estágio de Geração do Código NC

O primeiro passo neste estágio é a determinação do volume de material a ser removido no eixo de extrusão z, resultante do sobre-metal existente entre a peça bruta e a peça a ser usinada. A profundidade de corte a ser retirada dos sobre-metais resultantes é representada na Figura 7.2 por D_{z1} e D_{z2} . Assim, seja D_z a altura do sobre-metal da peça bruta a ser removido no eixo z e a profundidade máxima de corte permitida por projeto representada por a_{pmax} , o número de passes necessários para operação é dado pelo valor do maior inteiro resultante da divisão : D_z/a_{pmax} sendo, portanto, o valor da profundidade de corte do último passe menor do que a_{pmax} se necessário.

Verifica-se também, que o número de *setup's* pode ser inicialmente definido, através das considerações descritas acima.

A trajetória da ferramenta durante a remoção destes volumes não foram criteriosamente analisadas, isto é, o sequenciamento de operações para o corte destes volumes iniciais de material a ser removido foram considerados através de trajetórias comuns de fresamento.

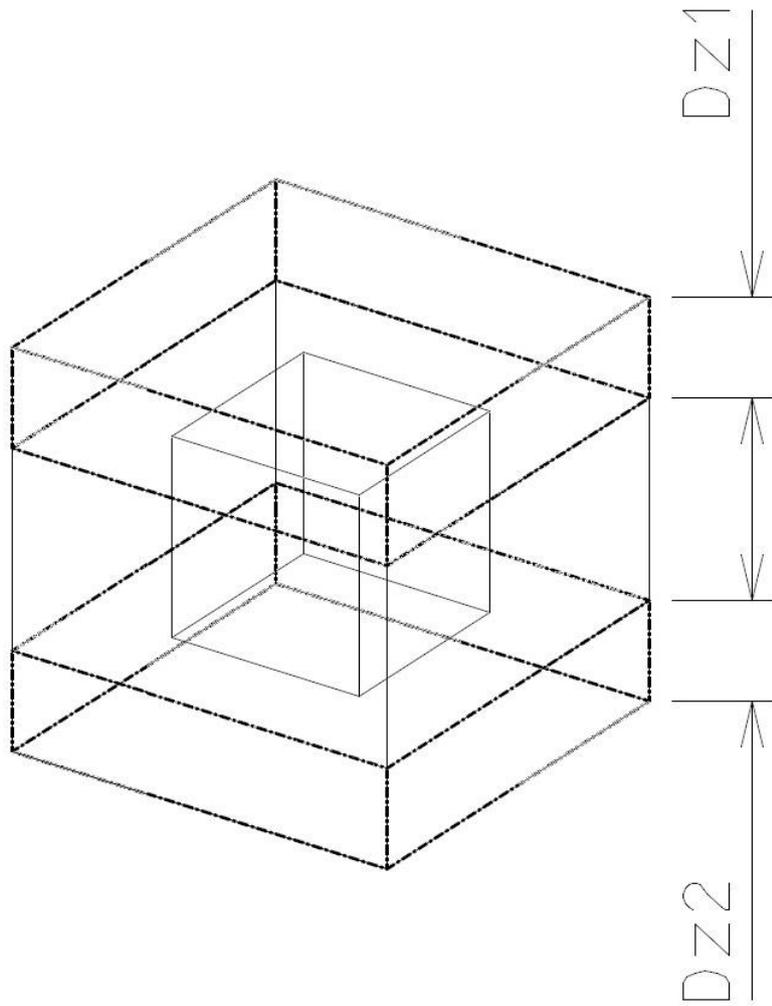


Figura 7.2 Volumes iniciais do material a ser removido (linhas tracejadas e em negrito).

Definido o sequenciamento para remoção do volume de material a ser removido como desbaste inicial, processam-se então os dados obtidos durante os estágios efetivamente contemplados pela metodologia proposta. Finalmente, os dados de entrada catalogados são devidamente inseridos para construção da estrutura do código NC para o fresamento da peça a ser usinada.

Assim, definidas as etapas anteriormente descritas, início do programa, troca de ferramenta, seleção do modo de trabalho (velocidade de corte ou rotação constante) geração do percurso da ferramenta e final de programa, o programa de comando numérico (código NC) é finalmente obtido. A Figura 7.3 mostra o fluxograma para desenvolvimento do código NC.

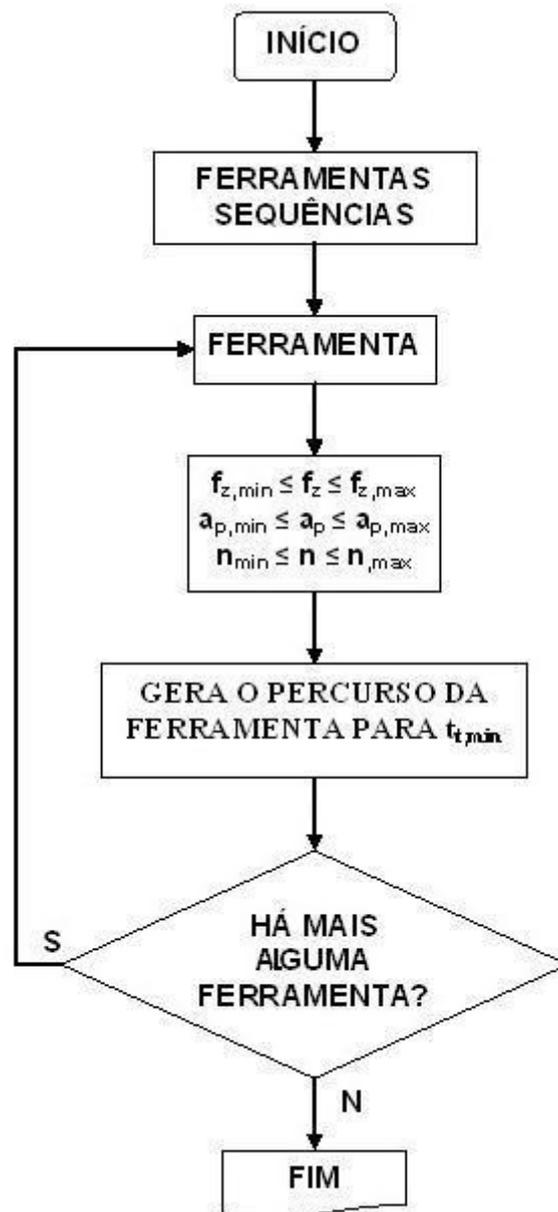


Figura 7.3 Fluxograma para gerar o código CNC.

Testes e Resultados

O seguinte exemplo é usado para exemplificar como o sistema gera o código NC com seus respectivos parâmetros de usinagem. O MATLAB foi utilizado para a visualização do processo. A Figura 8.1 mostra os desenhos da peça bruta e da peça que deverá ser usinada em uma fresadora CNC ou um centro de usinagem.

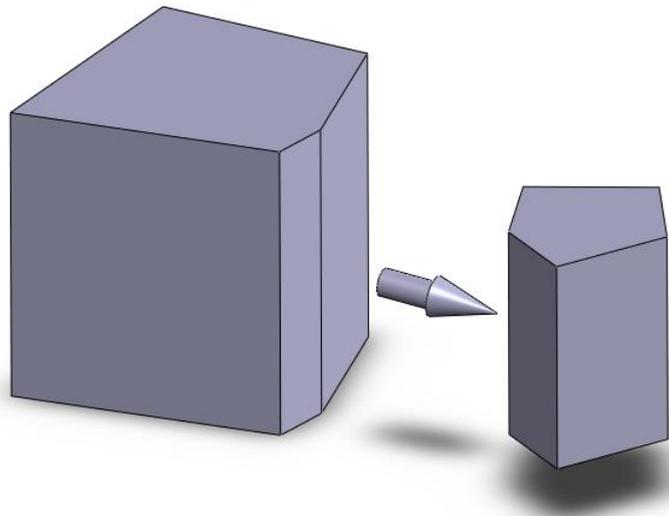


Figura 8.1 Peça bruta e peça a ser fabricada.

8.1 Extração das Informações Geométricas

A Figura 8.2 demonstra a leitura inicial dos dados geométricos das peças pelo sistema, ou seja, a extração das informações geométricas dos arquivos de desenho oriundas do CAD. A partir dos desenhos, devidamente feitos obedecendo aos requisitos exigidos do **Estágio de Desenho**, tem-se assim a representação dos perfis prismáticos das peças bruta e final.

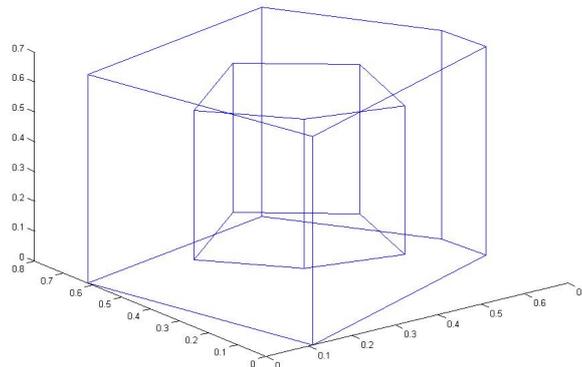


Figura 8.2 Leitura dos dados geométricos das peças bruta e final.

8.2 Estágio de Pré-Processamento

Após a leitura e armazenamento dos dados geométricos, ocorre o processo de catalogação de tais informações em uma estrutura de dados em grafo (**Estágio de Pré-Processamento**) determinando-se assim, os polígonos da base dos respectivos perfis prismáticos das peças (Figura 8.3).

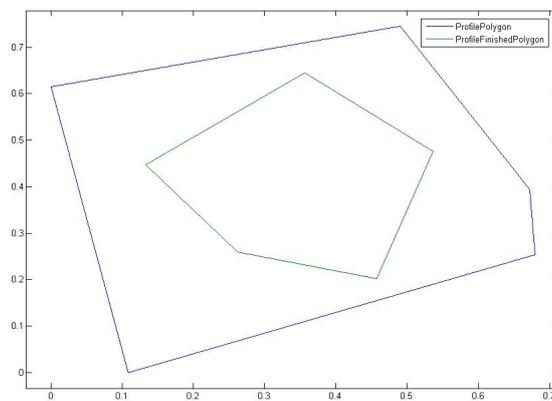


Figura 8.3 Polígonos das peças bruta e final (ProfilePolygon e FinishedPolygon).

8.3 Estágio de Decomposição

Os volumes iniciais a serem removidos da peça bruta, caracterizados pelo **Estágio de Decomposição**, são representados em vista explodida na Figura 8.4.

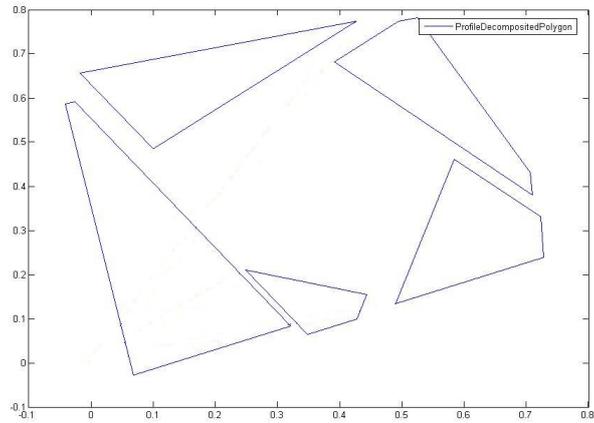


Figura 8.4 Volumes iniciais do processo de corte.

8.4 Estágio de Corte

A seqüência de determinação dos volumes a serem removidos ao longo do processo de fresamento é representada pela Figura 8.5, onde é mostrado o resultado do **Estágio de Corte**.

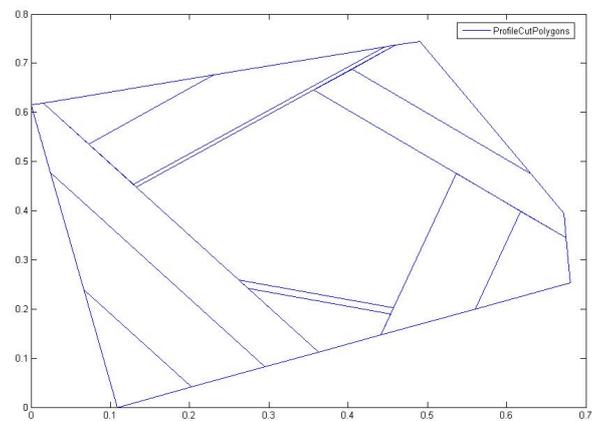


Figura 8.5 Subvolumes do processo de decomposição.

8.5 Estágio de Geração da Trajetória da Ferramenta

A determinação do sequenciamento de cortes é completada através da geração final da trajetória da ferramenta de corte **Estágio de Geração da Trajetória da Ferramenta** como mostra a Figura 8.6.

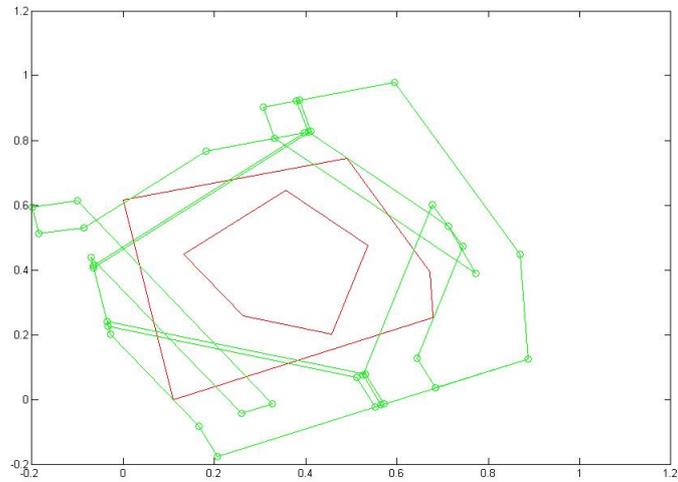


Figura 8.6 Geração da trajetória da ferramenta de corte.

8.6 Simulação do Processo

Os dados de saída do sistema consistem do código NC obtido, o código pode ser enviado diretamente para uma máquina CNC ou para um simulador. A Figura 8.7 mostra a simulação do processo de fresamento da peça tomada como exemplo. Um *software* comercial foi utilizado para esta simulação.

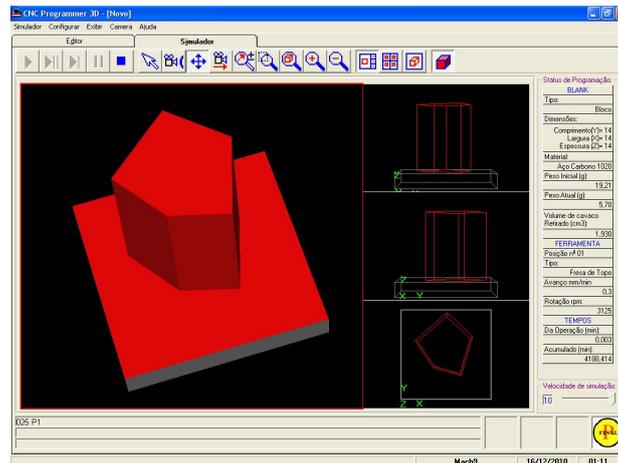


Figura 8.7 Simulação do processo no CNC Programmer 3D.

8.7 Análise de Resultados

Para o caso estudado, foi possível desenvolver o código NC para a fabricação em fresadora CNC ou centro de usinagem, a partir de informações providas do CAD, e da metodologia desenvolvida para sequenciamento das operações de corte, compartilhando o mesmo ambiente.

As etapas que compõe o processo como um todo puderam ser visualizadas através de representações visuais computacionais. As informações geométricas provenientes do CAD, devidamente requisitadas pelo **Estágio de Desenho**, foram extraídas, utilizadas e verificadas, onde tais informações puderam, então, ser catalogadas em uma estrutura de dados em grafo no **Estágio de Pré-Processamento**, obtendo-se os perfis de extrusão da peça bruta (**ProfilePolygon**) e da peça a ser usinada (**FinishedProfilePolygon**), seguindo-se então a determinação das seqüências de operações a serem executadas, começando com os volumes iniciais a serem extraídos da peça bruta durante o **Estágio de Decomposição**, seguindo-se a subdivisão conveniente destes volumes, através de critérios de usinagem estabelecidos no projeto, espessura de penetração máxima, através do **Estágio de Corte**, para finalmente obter-se a geração da trajetória final da ferramenta no **Estágio de Geração da Trajetória Ferramenta**.

O método proposto no **Estágio de Otimização**, para sugerir os parâmetros de corte otimizados do processo, não foi utilizado, uma vez que este não se encontrava ainda totalmente integrado ao sistema.

A simulação resultou em um modelo geométrico sólido com dimensões exatas ao modelo da peça desejada, validando o código NC gerado e demonstrando que não haverá passagem da ferramenta por lugares indesejados na própria peça.

O programa NC gerado para fabricação da peça tomada como exemplo é apresentado a seguir.

;PolyhedronSample	Y-2.00	X18.00
;StartProgram	Y22.00	Y-2.00
G99	X6.00	Z16.00
G0 X200. Y200. Z200.	Y-2.00	X0.00
;MillingCutting	X8.00	Y-2.00
T01 ; FRESA DE TOPO DE 4MM	Y-2.00	Y22.00
M06	Y22.00	X2.00
O02 S3125.00 M03	X10.00	Y-2.00
G0 X0. Y-2.00 Z21.00	Y-2.00	X4.00
G01 Z20.00 F0.30	X12.00	Y-2.00
Z18.00	Y-2.00	Y22.00
G01 X0.00	Y22.00	X6.00
Y-2.00	X14.00	Y-2.00
Y22.00	Y-2.00	X8.00
X2.00	X16.00	Y-2.00
Y-2.00	Y-2.00	Y22.00
X4.00	Y22.00	X10.00

Y-2.00	Z12.00	X10.49 Y22.00
X12.00	X2.58 Y22.00	X-2.00 Y9.51
Y-2.00	X22.00 Y12.29	X-2.00 Y8.83
Y22.00	X22.00 Y11.24	X11.17 Y22.00
X14.00	X0.47 Y22.00	X11.17 Y24.00
Y-2.00	X0.47 Y24.00	X24.00 Y24.00
X16.00	X24.00 Y24.00	X24.00 Y19.00
Y-2.00	X24.00 Y-4.00	X22.00 Y19.00
Y22.00	X20.00 Y-4.00	X16.00 Y22.00
X18.00	X20.00 Y-2.00	X11.53 Y22.00
Y-2.00	X20.00 Y22.00	X22.00 Y16.76
Z14.00	X18.00 Y22.00	X22.00 Y14.53
X24.00 Y-4.00	X18.00 Y-2.00	X7.06 Y22.00
X1.75 Y-4.00	X18.00 Y-4.00	X2.58 Y22.00
X1.75 Y-2.00	X-4.00 Y-4.00	X22.00 Y12.29
X-2.00 Y2.29	X-4.00 Y24.00	X22.00 Y11.24
X-2.00 Y5.32	X24.00 Y24.00	X0.47 Y22.00
X4.41 Y-2.00	X24.00 Y0.00	X0.47 Y24.00
X7.07 Y-2.00	X22.00 Y-0.00	X24.00 Y24.00
X-2.00 Y8.36	X-2.00 Y-0.00	X24.00 Y-4.00
X-2.00 Y11.40	X-2.00 Y2.0	X20.00 Y-4.00
X9.72 Y-2.00	X22.00 Y2.00	X20.00 Y22.00
X10.59 Y-2.00	X24.00 Y2.00	X18.00 Y22.00
X-2.00 Y12.39	Z12.00	X18.00 Y-2.00
X-4.00 Y12.39	X24.00 Y-4.00	X18.00 Y-4.00
X-4.00 Y18.00	X1.75 Y-4.00	X-4.00 Y-4.00
X-2.00 Y18.00	X1.75 Y-2.00	X-4.00 Y24.00
X2.00 Y22.00	X-2.00 Y2.29	X24.00 Y24.00
X4.83 Y22.00	X-2.00 Y5.32	X24.00 Y0.00
X-2.00 Y15.17	X4.41 Y-2.00	X22.00 Y-0.00
X-2.00 Y12.34	X7.07 Y-2.00	X-2.00 Y-0.00
X7.66 Y22.00	X-2.00 Y8.36	X-2.00 Y2.00
X10.49 Y22.00	X-2.00 Y11.40	X22.00 Y2.00
X-2.00 Y9.51	X9.72 Y-2.00	X24.00 Y2.00
X-2.00 Y8.83	X10.59 Y-2.00	Z10.00
X11.17 Y22.00	X-2.00 Y12.39	X24.00 Y-4.00
X11.17 Y24.00	X-4.00 Y12.39	X1.75 Y-4.00
X24.00 Y24.00	X-4.00 Y18.00	X1.75 Y-2.00
X24.00 Y19.00	X-2.00 Y18.00	X-2.00 Y2.29
X22.00 Y19.00	X2.00 Y22.00	X-2.00 Y5.32
X16.00 Y22.00	X4.83 Y22.00	X4.41 Y-2.00
X11.53 Y22.00	X-2.00 Y15.17	X7.07 Y-2.00
X22.00 Y16.76	X-2.00 Y12.34	X-2.00 Y8.36
X22.00 Y14.53	X7.66 Y22.00	X-2.00 Y11.40

X9.72 Y-2.00	G01 X22.00 Y2.00	X20.00 Y-2.00
X10.59 Y-2.00	G01 X24.00 Y2.00	X20.00 Y22.00
X-2.00 Y12.39	G01 Z8.00	X18.00 Y22.00
X-4.00 Y12.39	G01 X24.00 Y-4.00	X18.00 Y-2.00
X-4.00 Y18.00	X1.75 Y-4.00	X18.00 Y-4.00
X-2.00 Y18.00	X1.75 Y-2.00	X-4.00 Y-4.00
X2.00 Y22.00	X-2.00 Y2.29	X-4.00 Y24.00
X4.83 Y22.00	X-2.00 Y5.32	X24.00 Y24.00
X-2.00 Y15.17	X4.41 Y-2.00	X24.00 Y0.00
X-2.00 Y12.34	X7.07 Y-2.00	X22.00 Y-0.00
X7.66 Y22.00	X-2.00 Y8.36	X-2.00 Y-0.00
X10.49 Y22.00	X-2.00 Y11.40	X-2.00 Y2.00
X-2.00 Y9.51	X9.72 Y-2.00	X22.00 Y2.00
X-2.00 Y8.83	X10.59 Y-2.00	X24.00 Y2.00
X11.17 Y22.00	X-2.00 Y12.39	Z6.00
X11.17 Y24.00	X-4.00 Y12.39	X24.00 Y-4.00
X24.00 Y24.00	X-4.00 Y18.00	X1.75 Y-4.00
X24.00 Y19.00	X-2.00 Y18.00	X1.75 Y-2.00
X22.00 Y19.00	X2.00 Y22.00	X-2.00 Y2.29
X16.00 Y22.00	X4.83 Y22.00	X-2.00 Y5.32
X11.53 Y22.00	X-2.00 Y15.17	X4.41 Y-2.00
X22.00 Y16.76	X-2.00 Y12.34	X7.07 Y-2.00
X22.00 Y14.53	X7.66 Y22.00	X-2.00 Y8.36
X7.06 Y22.00	X10.49 Y22.00	X-2.00 Y11.40
X2.58 Y22.00	X-2.00 Y9.51	X9.72 Y-2.00
X22.00 Y12.29	X-2.00 Y8.83	X10.59 Y-2.00
X22.00 Y11.24	X11.17 Y22.00	X-2.00 Y12.39
X0.47 Y22.00	X11.17 Y24.00	X-4.00 Y12.39
X0.47 Y24.00	X24.00 Y24.00	X-4.00 Y18.00
X24.00 Y24.00	X24.00 Y19.00	X-2.00 Y18.00
X24.00 Y-4.00	X22.00 Y19.00	X2.00 Y22.00
X20.00 Y-4.00	X16.00 Y22.00	X4.83 Y22.00
X20.00 Y-2.00	X11.53 Y22.00	X-2.00 Y15.17
X20.00 Y22.00	X22.00 Y16.76	X-2.00 Y12.34
X18.00 Y22.00	X22.00 Y14.53	X7.66 Y22.00
X18.00 Y-2.00	X7.06 Y22.00	X10.49 Y22.00
X18.00 Y-4.00	X2.58 Y22.00	X-2.00 Y9.51
X-4.00 Y-4.00	X22.00 Y12.29	X-2.00 Y8.83
X-4.00 Y24.00	X22.00 Y11.24	X11.17 Y22.00
X24.00 Y24.00	X0.47 Y22.00	X11.17 Y24.00
X24.00 Y0.00	X0.47 Y24.00	X24.00 Y24.00
X22.00 Y-0.00	X24.00 Y24.00	X24.00 Y19.00
X-2.00 Y-0.00	X24.00 Y-4.00	X22.00 Y19.00
X-2.00 Y2.00	X20.00 Y-4.00	X16.00 Y22.00

X11.53 Y22.00	X-2.00 Y15.17
X22.00 Y16.76	X-2.00 Y12.34
X22.00 Y14.53	X7.66 Y22.00
X7.06 Y22.00	X10.49 Y22.00
X2.58 Y22.00	X-2.00 Y9.51
X22.00 Y12.29	X-2.00 Y8.83
X22.00 Y11.24	X11.17 Y22.00
X0.47 Y22.00	X11.17 Y24.00
X0.47 Y24.00	X24.00 Y24.00
X24.00 Y24.00	X24.00 Y19.00
X24.00 Y-4.00	X22.00 Y19.00
X20.00 Y-4.00	X16.00 Y22.00
X20.00 Y-2.00	X11.53 Y22.00
X20.00 Y22.00	X22.00 Y16.76
X18.00 Y22.00	X22.00 Y14.53
X18.00 Y-2.00	X7.06 Y22.00
X18.00 Y-4.00	X2.58 Y22.00
X-4.00 Y-4.00	X22.00 Y12.29
X-4.00 Y24.00	X22.00 Y11.24
X24.00 Y24.00	X0.47 Y22.00
X24.00 Y0.00	X0.47 Y24.00
X22.00 Y-0.00	X24.00 Y24.00
X-2.00 Y-0.00	X24.00 Y-4.00
X-2.00 Y2.00	X20.00 Y-4.00
X22.00 Y2.00	X20.00 Y-2.00
X24.00 Y2.00	X20.00 Y22.00
Z4.00	X18.00 Y22.00
X24.00 Y-4.00	X18.00 Y-2.00
X1.75 Y-4.00	X18.00 Y-4.00
X1.75 Y-2.00	X-4.00 Y-4.00
X-2.00 Y2.29	X-4.00 Y24.00
X-2.00 Y5.32	X24.00 Y24.00
X4.41 Y-2.00	X24.00 Y0.00
X7.07 Y-2.00	X22.00 Y-0.00
X-2.00 Y8.36	X-2.00 Y-0.00
X-2.00 Y11.40	X-2.00 Y2.00
X9.72 Y-2.00	X22.00 Y2.00
X10.59 Y-2.00	X24.00 Y2.00
X-2.00 Y12.39	GZO M5
X-4.00 Y12.39	M30
X-4.00 Y18.00	
X-2.00 Y18.00	
X2.00 Y22.00	
X4.83 Y22.00	

Classes de Objetos de Geometria Complexa: Cavidade Interna

Neste capítulo será demonstrada uma metodologia para geração automática do código NC de uma cavidade interna de geometria complexa, este tem como objetivo a validação da metodologia desenvolvida para formas geométricas complexas.

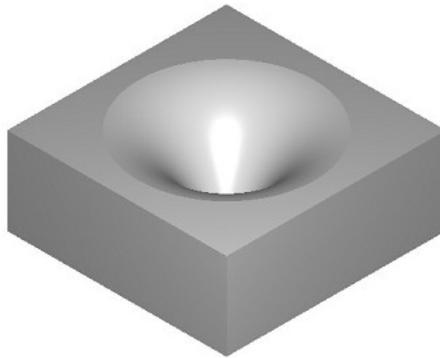


Figura 9.1 Cavidade de geometria complexa.

Considere a Figura 9.1, o problema inicial aqui consiste na modelagem geométrica do sólido apresentado, observa-se que a cavidade interna pode ser aproximada por meio da rotação de uma curva geratriz, tem-se, então, que o problema apresentado poderá ser resolvido através de técnicas de aproximação computacional.

9.1 Representação Computacional de Curvas

A *interpolação* e a *aproximação* são os principais dois modos, no qual, um conjunto de pontos (*pontos de controle*) podem ser usados para descrever uma curva. Na interpolação, a curva passa através de cada um dos pontos de controle, enquanto na aproximação, a curva

não passa necessariamente através de todos os pontos de controle, mas, usualmente envolve todos eles. Em geral, a aproximação é mais acessível para cálculos computacionais do que a interpolação. (DAVIES; SAMUELS, 1996).

9.1.1 Curvas de Bézier

A técnica de aproximação computacional utilizada aqui foi a de *curvas de Bézier*, esta técnica consiste em uma das técnicas computacionais de aproximação mais usadas. A computação da curva de Bézier é realizada por meio do *algoritmo de Casteljau*. O procedimento desenvolvido para isso foge ao escopo deste trabalho e pode ser consultado através de (DAVIES; SAMUELS, 1996).

9.2 Dedução e Implementação Matemática

A equação original proposta para a curva geratriz de rotação é dada por:

$$f(t) = (2t^2 - 3t + 1)x_0 + (-4t^2 + 4t)x_1 + (2t^2 - t)x_2 \quad (9.1)$$

onde $x_0, x_1, x_2, y_0, y_1, y_2$ são constantes a serem calculadas a partir das constantes escolhidas d, D e H por meio das seguintes relações:

$$x_0 = \frac{d}{2} \quad (9.2)$$

$$x_1 = \frac{d}{4} \quad (9.3)$$

$$x_2 = \frac{d}{2} \quad (9.4)$$

$$y_0 = 0 \quad (9.5)$$

$$y_1 = \frac{2.05}{3H} \quad (9.6)$$

$$y_2 = H \quad (9.7)$$

Os valores escolhidos foram:

$$d = 10 \quad (9.8)$$

$$D = 80 \quad (9.9)$$

$$H = 40 \quad (9.10)$$

onde:

- d : diâmetro interno da cavidade (mm);
- D : diâmetro externo da cavidade (mm);
- H : altura da cavidade (mm);

9.3 Geração de Malhas

Assim, a partir dos dados fornecidos acima, o sistema desenvolvido será capaz de gerar uma malha de pontos, correspondentes à aproximação computacional da equação da curva descrita anteriormente, para posterior envio a um módulo CAD, onde tal aproximação foi então relacionada de acordo com o grau de acabamento desejado.

9.3.1 Visualização Computacional

A Figura 9.2 demonstra graficamente a sobreposição da curva aproximada computacionalmente (verde) em relação à curva original (azul).

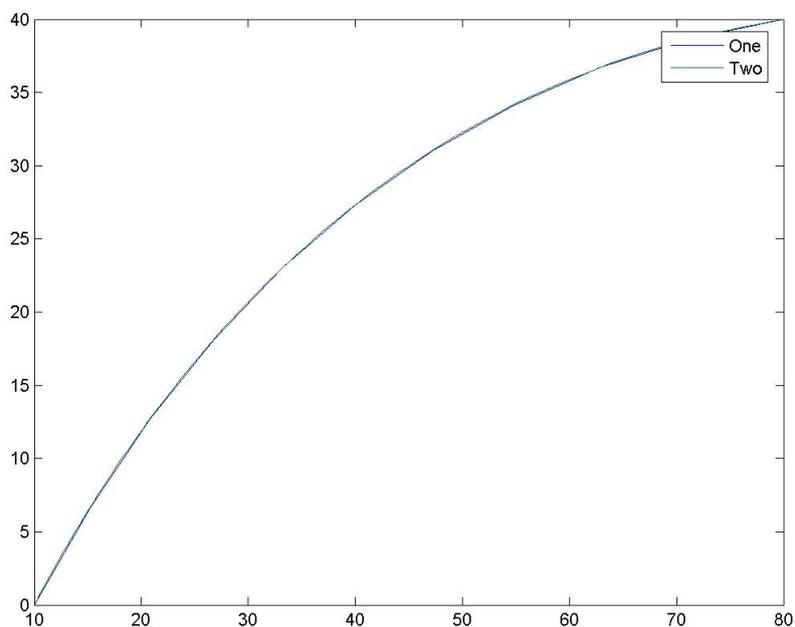


Figura 9.2 Aproximação da curva original por *splines*.

9.4 Desenho no CAD

Catalogada a malha de pontos que representa a aproximação da curva geratriz original da cavidade interna da peça a ser usinada, transfere-se tal informação para um sistema CAD, onde será projetada a peça (Figura 9.3).

A partir da malha de pontos extraídas pelo sistema CAD, projeta-se a cavidade interna da peça por meio de interpolações características do sistema de projeto, assim utilizando-se a interpolação do tipo *B-Spline* disponível no sistema CAD utilizado, pode-se, portanto obter a curva geratriz da cavidade interna da peça em questão. A rotação da curva obtida propicia a

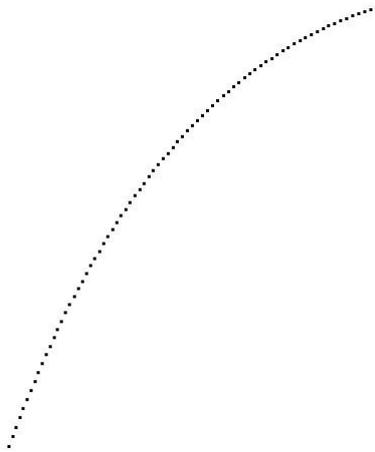


Figura 9.3 Extração da malha de pontos pelo CAD.

obtenção do volume correspondente à cavidade interna, onde através de uma simples operação booleana de diferença entre o volume da peça bruta e o volume obtido na rotação da curva interpolada, tem-se, portanto o desenho desejado da peça a ser usinada (Figura 9.4).

9.5 Extração das Informações Geométricas do CAD

Utilizando-se os pontos capturados, pode-se então projetar a peça desejada. Assim, projetada a peça no CAD, envia-se suas informações geométricas por meio do arquivo padrão IGES, onde estas informações são então extraídas pelo sistema, tomando-se como desenvolvimento metodológico apenas técnicas padrões de fresamento, ou seja, aqui a automação do sequenciamento processo de corte não é contemplada, no momento, com o desenvolvimento de uma metodologia automática. A extração das entidades geométricas, por meio de um arquivo de padrão IGES, porém dá-se de modo idêntico às técnicas de extração já mencionada.

9.6 Geração Automática do Código NC

Identificadas as entidades geométricas do CAD (Ver Apêndice D), tem-se então a geração do código NC. Um trecho do arquivo para geração da cavidade interna é apresentado na Figura 9.5.

9.7 Simulação do Processo

O processo de usinagem da cavidade interna proposto é formado pelos seguintes sub-processos:

1. Pré-furação

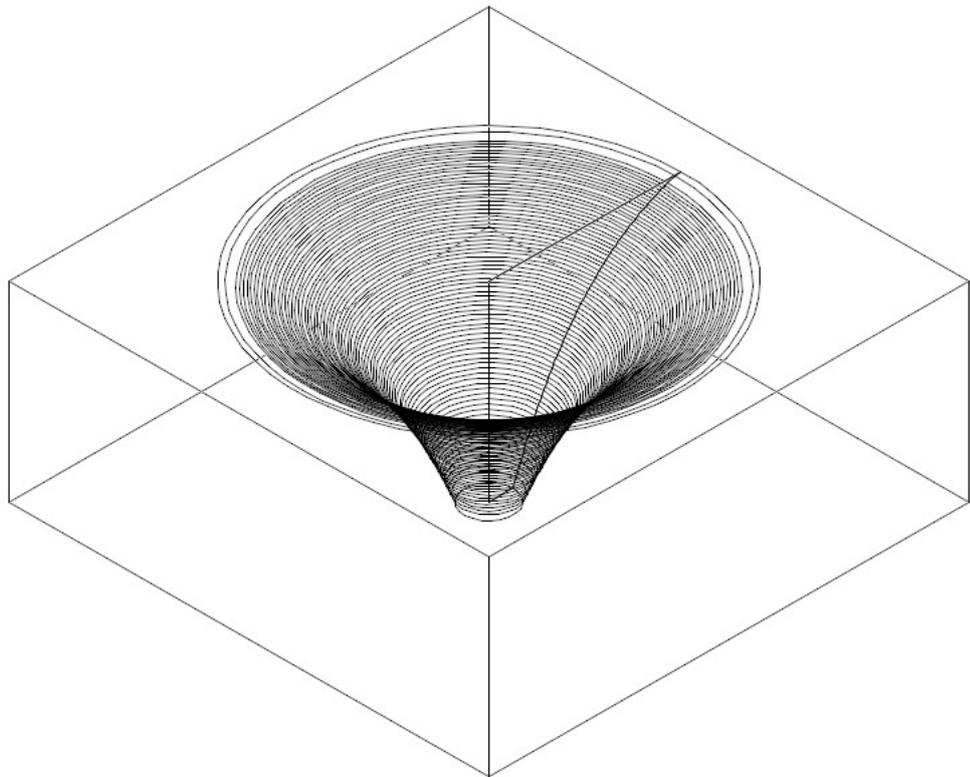


Figura 9.4 Desenho da cavidade interna no CAD.

<pre> ; Spine Sample ; StartProgram G99 G0 X200. Y200. Z200. T01 ; BROCA DE 10MM M06 O01 S3125 M03 G90 M08 ; Drilling G0 X50. Y50. Z5. G1 Z-45. F0.3 G1 Z5. GZ0 M5 T03 ; BROCA DE 20mm M06 O02 S3125 M03 G00 X50. Y50. Z5. G1 Z-27. F0.3 G1 Z5. GZ0 M5 ; Milling Cutting T02 ; FRESA DE TOPO DE 10MM M06 O02 S32125 M03 G0 X50. Y50. Z5. G01 X50. F0.30 ; STEP1 G01 Z-0.29 G01 X60. G02 X60. Y50. I50. J50. ; D=30mm G01 X65. G02 X65. Y50. I50. J50. ; D=40mm G01 X70. G02 X70. Y50. I50. J50. ; D=50mm </pre>	<pre> G01 X50. F0.30 ; STEP30 G01 Z-8.96 G01 X60. G02 X60. Y50. I50. J50. ; D=30mm G01 X65. G02 X65. Y50. I50. J50. ; D=40mm G01 X68.60 G02 X68.60 Y50. I50. J50. ; D=47.20mm G01 X50. F0.30 ; STEP31 G01 Z-9.39 G01 X60. G02 X60. Y50. I50. J50. ; D=30mm G01 X65. G02 X65. Y50. I50. J50. ; D=40mm G01 X68.14 G02 X68.14 Y50. I50. J50. ; D=46.28mm G01 X50. F0.30 ; STEP32 G01 Z-9.83 G01 X60. G02 X60. Y50. I50. J50. ; D=30mm G01 X65. G02 X65. Y50. I50. J50. ; D=40mm G01 X67.68 G02 X67.68 Y50. I50. J50. ; D=45.36mm G01 X50. F0.30 ; STEP33 G01 Z-10.28 G01 X60. G02 X60. Y50. I50. J50. ; D=30mm G01 X65. G02 X65. Y50. I50. J50. ; D=40mm G01 X67.23 G02 X67.23 Y50. I50. J50. ; D=44.45mm G01 X50. F0.30 ; STEP34 G01 Z-10.74 G01 X60. </pre>	<pre> G02 X52.60 Y50. I50. J50. ; D=15.20mm G01 X50. F0.30 ; STEP71 G01 Z-34.16 G01 X52.26 G02 X52.26 Y50. I50. J50. ; D=14.53mm G01 X50. F0.30 ; STEP72 G01 Z-34.97 G01 X51.93 G02 X51.93 Y50. I50. J50. ; D=13.86mm G01 X50. F0.30 ; STEP73 G01 Z-35.78 G01 X51.60 G02 X51.60 Y50. I50. J50. ; D=13.20mm G01 X50. F0.30 ; STEP74 G01 Z-36.61 G01 X51.27 G02 X51.27 Y50. I50. J50. ; D=12.55mm G01 X50. F0.30 ; STEP75 G01 Z-37.44 G01 X50.95 G02 X50.95 Y50. I50. J50. ; D=11.90mm G01 X50. F0.30 ; STEP76 G01 Z-38.28 G01 X50.63 G02 X50.63 Y50. I50. J50. ; D=11.26mm G01 X50. F0.30 ; STEP77 G01 Z-39.14 G01 X50.31 G02 X50.31 Y50. I50. J50. ; D=10.63mm G01 X50. F0.30 ; STEP78 G01 Z-40.00 G01 X50. G0 Z5. GZ0 M5 M30 </pre>
---	--	--

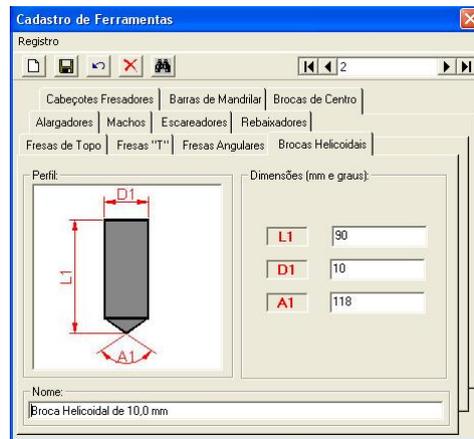
Figura 9.5 Trecho do arquivo para geração da cavidade interna.

2. Furação

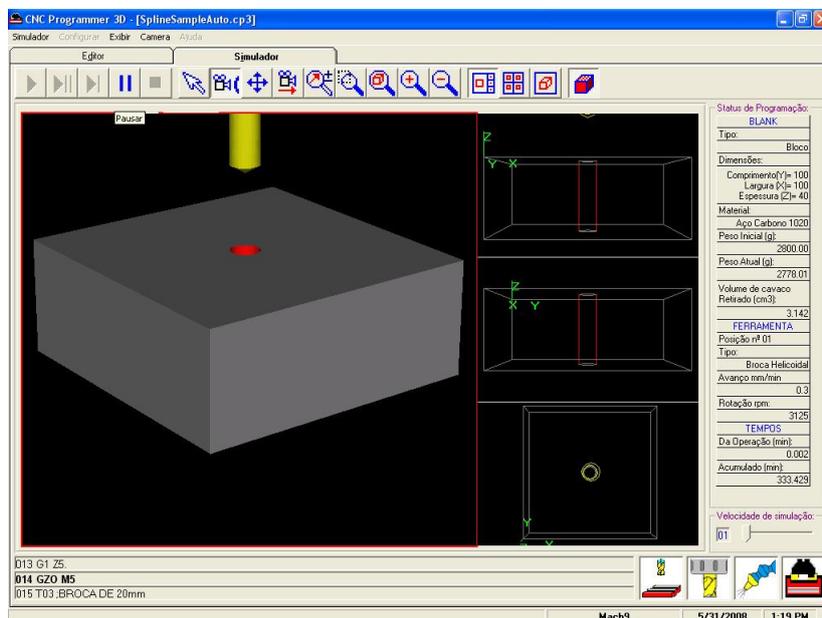
3. Fresamento Frontal

9.7.1 Pré-furação

O processo de usinagem da cavidade interna da peça começa através de uma pré-furação passante com uma broca helicoidal de diâmetro igual ao diâmetro interno da cavidade (10mm), a simulação deste processo de pré-furação pode ser visualizada através da Figura 9.6(b) e a broca selecionada no *magazine* do simulador é mostrada na Figura 9.6(a).



(a) Cadastro de broca helicoidal de 10mm.

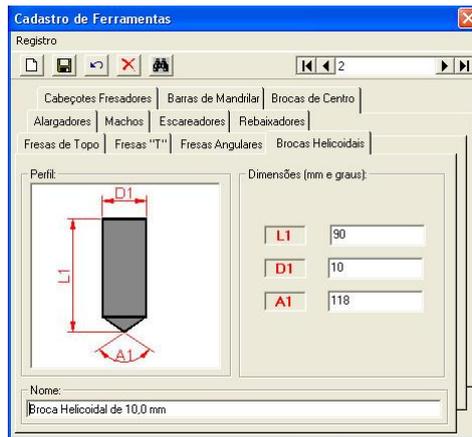


(b) Pré-furação com broca helicoidal de 10mm.

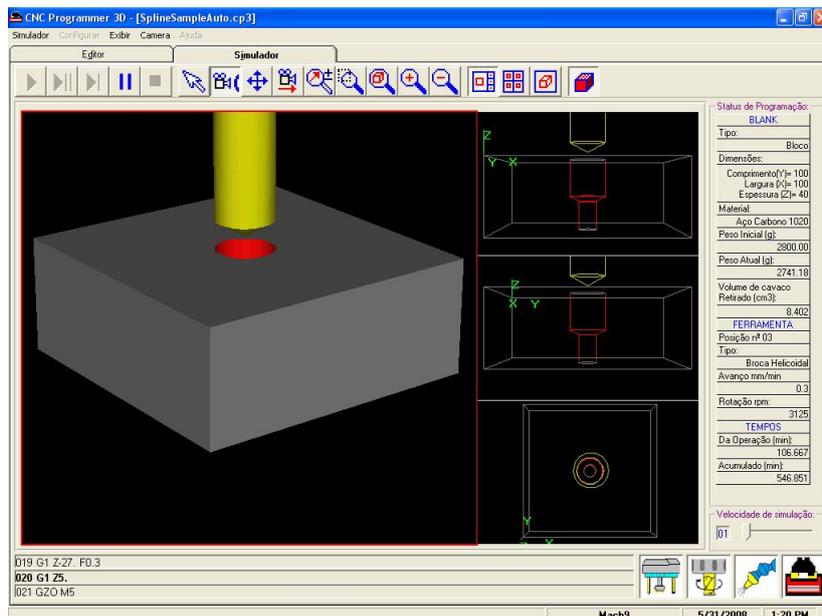
Figura 9.6 Simulação do processo: pré-furação.

9.7.2 Furação

Uma segunda furação é realizada utilizando-se agora uma broca helicoidal de 20mm, observa-se que a furação desta vez não será passante e deverá obedecer, portanto o ponto da curva geratriz onde o diâmetro correspondente equivale ao diâmetro da broca. O sub-processo pode ser visto na Figura 9.7(b) e sua respectiva broca helicoidal cadastrada é mostrada na Figura 9.7(a).



(a) cadastro de broca helicoidal de 20mm.



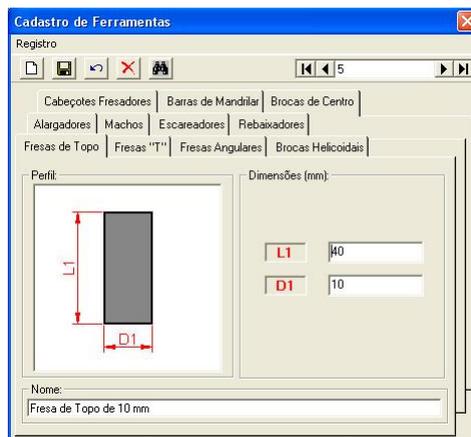
(b) furação com broca helicoidal de 20mm.

Figura 9.7 Simulação do processo: furação.

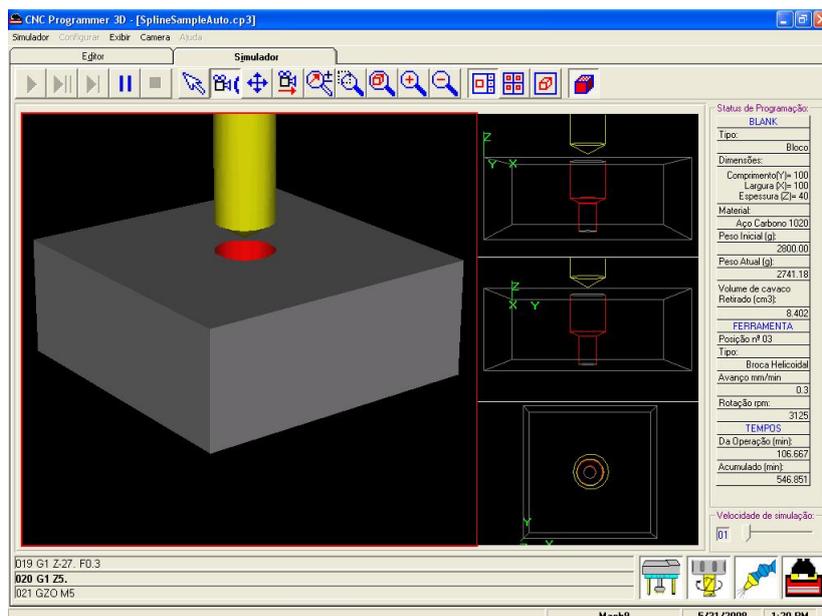
9.7.3 Fresamento Frontal

9.7.3.1 Fresamento Frontal: etapa inicial

Realizados os sub-processos de furação inicia-se, portanto o desbaste de fresamento frontal utilizando-se uma fresa de topo de 10mm (Figura 9.8).



(a) cadastro de fresa de topo de 10mm.

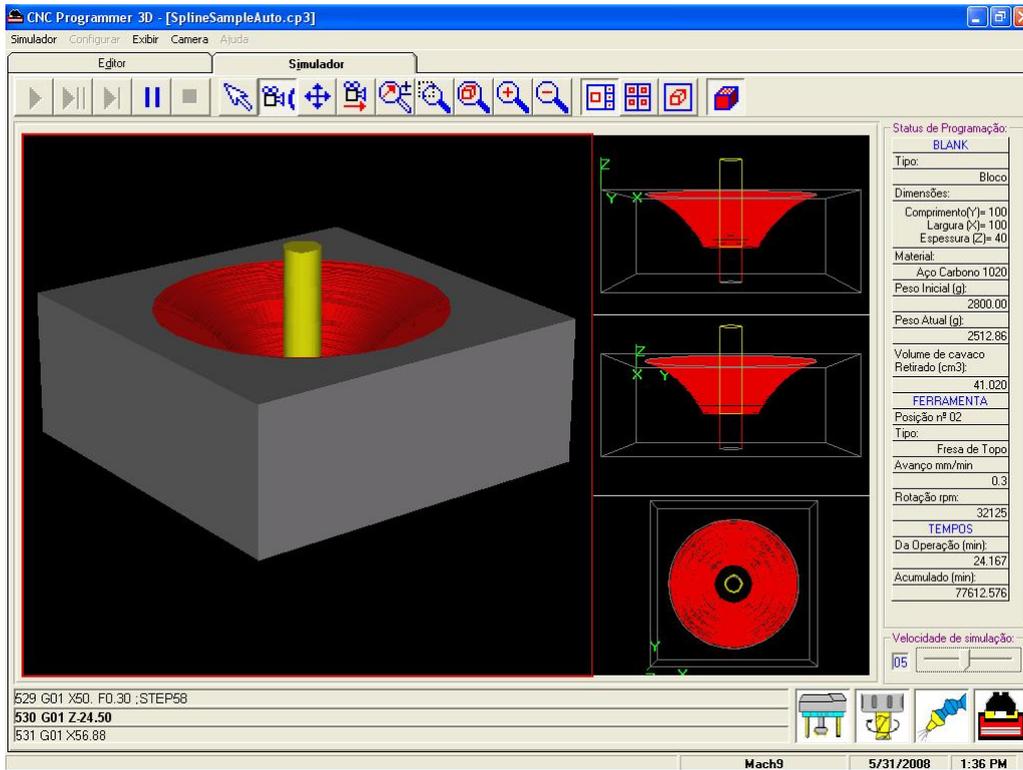


(b) fresamento frontal com fresa de topo de 10mm.

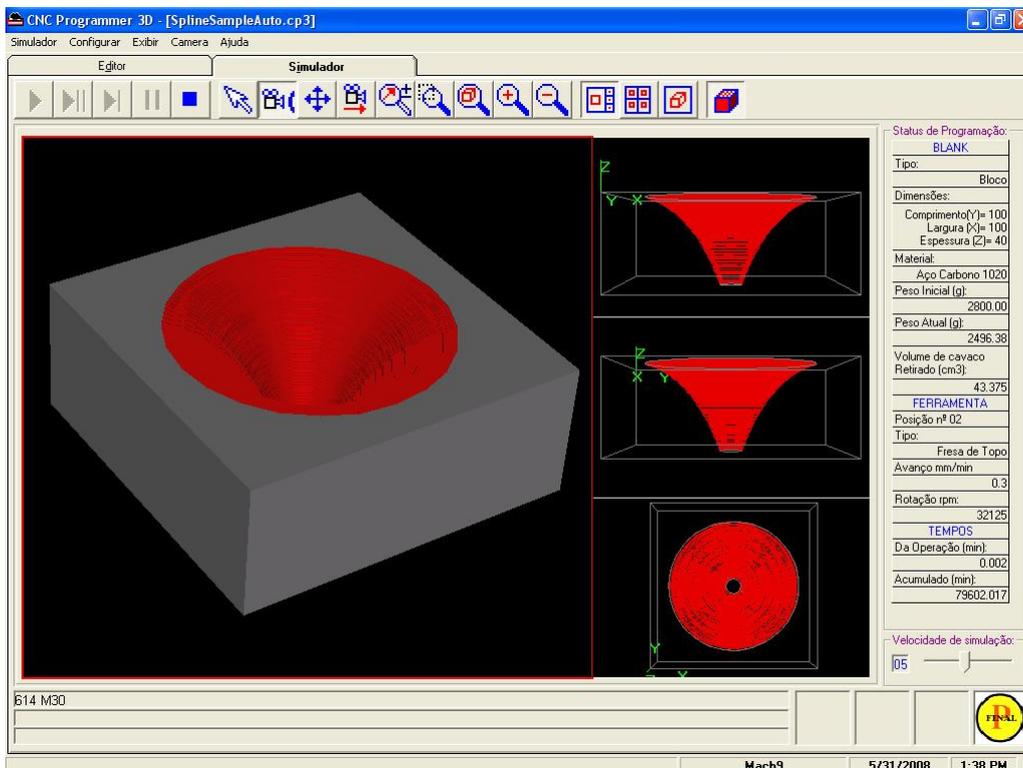
Figura 9.8 Simulação do processo: fresamento.

9.7.3.2 Fresamento Frontal Final: etapa final

A Figura 9.9 ilustra o momento final da simulação de usinagem sendo executada e a peça já pronta, como resultado da simulação.



(a) Usinagem de peça sendo executada.



(b) Peça resultado da simulação de usinagem.

Figura 9.9 Simulação do processo: fresamento.

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para desenvolvimento de um sistema de reconhecimento geométrico que têm por objetivo a geração automática do código NC para o processo de usinagem por fresamento em 2 ½ eixos. Nele foram mostrados os procedimentos a serem seguidos: 1) Extrações das informações geométricas do CAD; 2) Determinação do sequenciamento das operações de usinagem; 3) Otimização dos parâmetros de usinagem e 4) Geração do programa cnc propriamente dito. Foi mostrado como é possível reconhecer automaticamente as seqüências de operações de corte durante o processo, utilizando-se para isso de estruturas de dados de geometria computacional apresentados. Para o planejamento das operações de usinagem é necessário fornecer não só os dados geométricos das peças, mas também, os dados tecnológicos de usinagem, os dados das ferramentas de corte, como, tipos, ângulos, número de dentes, faixas de avanços e penetração admissíveis, e os dados da máquina, como, campo de trabalho possível de ser utilizado (curso dos 2 ½ eixos), faixas de rotações, potência motor, entre outros. A variação do tipo de material da peça a ser usinada vai influenciar diretamente o número de passes com que as operações devem ser realizadas, uma vez que suas propriedades mecânicas influenciam os parâmetros de Kienzle e com isto a potência de corte.

A geração do código NC, desenvolvido em linguagem C++, tendo como dados de entrada os dados da peça bruta e da peça a usinar importados de um sistema CAD qualquer, já foi implementada para aplicações no torneamento (2D), conforme (CAVALCANTE, 2001) e (ANDRADE, 2001) e adaptada no presente trabalho para a teoria para 3D (fresamento em 2 ½ eixos).

Entretanto, a pesquisa desenvolvida pretende abrir perspectivas quanto ao desenvolvimento de superfícies relativamente mais complexas em relação às abordadas no trabalho desenvolvido. Quanto a classes de objetos, as linhas, não apenas arcos de circunferência como também curvas genéricas quaisquer podem constituir o contorno de um polígono, observa-se a partir daí que em tais casos pode-se desenvolver um método de análise semelhante ao tratado, por meio da aplicação de polígonos de contorno (*bounding box ou minimum bounding rectangle (MBR)*), ao redor de tais polígonos formados por curvas. Sendo basicamente o fresamento externo o utilizado, pode-se, entretanto expandir a aplicação da metodologia proposta para casos de fresamento interno. Finalmente, superfícies complexas tais como, parabolóides, hiperbolóides, cônicas, cilíndricas ou planas podem ser aproximadas através de combinações booleanas das superfícies prismáticas abordadas durante o trabalho.

Assim, as sugestões para trabalhos futuros são as seguintes:

1. Seria de grande valor incluir tipos de constituição geométrica e classes de objetos mais avançados e complexos.
2. Critérios comparativos e avaliação de eficiência não foram incorporados ao sistema.

3. A otimização das seqüências de operações, assim como da largura de corte (a_c) e da trajetória da ferramenta, certamente contribuiria para aumentar a eficiência do sistema.
4. O processo de reconhecimento geométrico e o método de otimização não estão ainda bem integrados no sistema.
5. Desenvolver uma interface gráfica para comunicação com o usuário.
6. Melhorar a integração entre o processo de reconhecimento geométrico e o método de otimização.
7. Elaborar o manual de utilização, ou um tutorial do programa.
8. Um simulador para análise de falhas eventuais, baseada na metodologia proposta, deveria ser desenvolvido.

Referências Bibliográficas

- ALTING, L.; ZHANG, H. Computer aided process planning: the state-of-the art survey. *International Journal of Production Research*, v. 27, p. 553–585, 1989.
- ALTING, L.; ZHANG, H.; LENAU, T. Xplan - an expert process planning system and its further development. *27th International MATADOR Conference*, p. 20–21, abr. 1988.
- AMARAL, N.; RENCIS, J.; RONG, Y. Development of a finite element analysis for fixture design integrity verification and optimization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, n. 25, p. 409–419, 2005.
- ANDRADE, S. M. V. d. *Integração dos Processos CAD/CAPP/CAM com Geração Automática do Programa de Comando Numérico para Peças Rotacionais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, ago. 2001.
- ANOTAIPAIBOON, W.; MAKHANOV, S. Tool path generation for five-axis nc machining using space-filling curves. *Third Asian Conference on Industrial Automation and Robotics*, maio 2003.
- BABIC, B.; NESIC, N.; MILJKOVIC, Z. A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition. *Computers in Industry*, Elsevier Science Ltd, v. 59, p. 321–337, 2008.
- BOEHS, L. *Projeto e Implementação de um Sistema Computadorizado de Banco de Dados de Usinagem (CINFUS)*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 1988.
- BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. Second edition. 270 Madison Avenue, New York, New York 10016: Marcel Dekker, 1989. (Manufacturing Engineering and Materials Processing).
- CAVALCANTE, P. R. *Interface CAD/CAPP Aplicada a Sólidos de Revolução com Geração de um Grafo para Abordagem Generativa*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, maio 2001.
- CIURANA, J. et al. A model for integrating process planning and production planning and control in machining processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier Science Ltd, v. 24, p. 532–544, 2008.

- CIURANA, J.; ROMEU, M.; CASTRO, R. Optimizing process planning using groups of precedence between operations based on machine volume. *Engineering Computations*, v. 20, p. 67–81, 2003.
- CUNNINGHAM, J.; DIXON, J. Design with features: the origin of features. *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, p. 237–243, 1988.
- DAVIES, A.; SAMUELS, P. a. *An Introduction to Computational Geometry for Curves and Surfaces*. [S.l.]: Oxford University Press Inc., 1996. (Oxford applied mathematics and computing science series).
- DEVIREDDY, C.; GHOSH, K. Feature-based modeling and neural networks-based capp for integrated manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 12, n. 1, p. 61–74, 1999.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 4.ed.. ed. [S.l.]: Artliber, 2003.
- DROGOMATZ, D.; MANN, S. A classified bibliography of literature on nc tool path generation. *Computer-Aided Design*, v. 29, n. 3, mar. 1997.
- ERDIM, H.; LAZOGLU, I.; OZTURK, B. Feedrate Scheduling Strategies for Free-Form Surfaces. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, n. 7-8, p. 747–757, JUN 2006. ISSN 0890-6955.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. [S.l.]: Edgard Blucher, 2003. 11^a reimpressão.
- FERREIRA, J. C. E.; K., S. C. R.; BUTZKE, A. U. Determinação automática dos parâmetros de usinagem e geração do programa nc num sistema cad/capp/cam. *COBEM 97*, 1997.
- GAO, J.; ZHENG, D.; GINDY, N. Extraction of machining features for cad/cam integration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer-Verlag London Limited, n. 24, p. 573–581, abr. 2004.
- GAO, J.; ZHENG, D.; GINDY, N. Mathematical representation of feature conversion for cad/cam system integration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier Science Ltd, n. 20, p. 457–467, 2004.
- GROOVER, M. P.; ZIMMERS, E. W. *CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing*. USA: Prentice-Hall, Inc., 1984.
- HAM, I.; LU, S. Computer aided process planning: the present and future. *Ann CIRP*, v. 37, p. 591–601, 1988.
- HARUN, W.; CASE, K. Feature-based representation for manufacturing planning. *International Journal of Production Research*, v. 38, n. 17, p. 4285–4300, 2000.

- IGES - The Initial Graphics Exchange Specification Version 6.0. nov. 2001.
- IRANI, S. A.; KOO, H. Y.; RAMAN, S. Feature-based operation sequence generation in capp. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis Ltd, v. 1, n. 33, p. 17–39, 1995.
- ISO - International Organization for Standardization, Numerical Control of Machines - Program Format and Definitions of Address Word. Suíça: [s.n.], 1982.
- JI, Q.; MAREFAT, M. M. Machine interpretation of cad data for manufacturing applications. *ACM Computing Surveys*, v. 24, n. 3, p. 265–311, set. 1997.
- JUNG, J.-Y. Manufacturing cost estimation for machined parts based on manufacturing features. *Journal of Intelligent Manufacturing*, n. 13, p. 227–238, 2002.
- KARADKAR, R. B.; PANDE, S. Feature based automatic cnc code generation for prismatic parts. *Computers in Industry*, Elsevier Science Ltd, n. 28, p. 137–150, 1996.
- KIM, D.-S.; JUN, C.-S.; PARK, S. Tool path generation for clean-up machining by a curve-based approach. *Computer-Aided Design*, Elsevier Science Ltd, v. 37, p. 967–973, ago. 2005.
- KUMAR, S.; SHANKER, K.; LAL, G. A generative process planning system for cold extrusion. *International Journal of Production*, v. 2, n. 41, p. 269–295, 2003.
- LASZLO, M. J. *Computational Geometry and Computer Graphics in C++*. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc., 1996.
- LEE, J. Y.; KIM, K. Generating alternative interpretations of machining features. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer-Verlag London Limited, n. 15, p. 38–48, 1999.
- LOUCA, G. *CAD/CAM Project*. 1997. Sítio na INTERNET do Higher Technical Institute, <http://www.angelfire.com/hi/lgeorge/>.
- LUBY, S.; DIXON, J.; SIMMONS, M. Creating and using a feature database. *Computers in Mechanical Engineering*, v. 5, n. 3, p. 25–33, 1986.
- LYNCH, M. *Computer Numerical Control for Machining*. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 1992.
- MACHADO, A. *Comando Numérico Aplicado as Máquinas-Ferramentas*. 4ª ed.. ed. [S.l.]: Ed. Ícone, 1990.
- MEDELLÍN, H. et al. Algorithms for a physical redering and assembly of octree models. *Computer-Aided Design*, Elsevier Science Ltd, n. 38, p. 69–85, 2006.
- MESQUITA, N. G. d. M.; ROCHA, J. O. S. R.; NEVES, E. S. Otimização dos parâmetros de usinagem para o processo de fresamento frontal. *IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Recife, Pernambuco, 2006.

NASR, E. S. A.; KAMRANI, A. K. A new methodology for extracting manufacturing features from cad system. *Computers & Industrial Engineering*, n. 51, p. 389–415, set. 2006.

OLIVEIRA, J. *Otimização de Processos de Fabricação por Usinagem via Programação Linear*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, mar. 1999.

OLIVEIRA, L. C. d. et al. Geração de sequência de usinagem a partir de geometrias criadas em cad. *Revista Máquinas e Metais*, v. 389, p. 92–101, 1998.

OMIROU, S. L.; NEARCHOU, A. C. A cnc machine tool interpolator for surfaces of cross-sectional design. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier Science Ltd, n. 23, p. 257–264, 2007.

PRAKASVUDHISARN, C.; KUNNAPAPDEELERT, S.; YENRADEE, P. Optimal cutting condition determination for desired surface roughness in end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer-Verlag London Limited, 2008.

PRATT, M.; WILSON, P. *Requirements for Support of Form Features in a Solid Modeling System*. [S.l.], 1985. CAM-I Report R-85-ASPP-01.

PRAZERES, A. G. *Contribuição para o Reconhecimento Automático das Operações de Fresamento através da Teoria dos Grafos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, nov. 2004.

RESENDE, D. *Planejamento de Processo de Fabricação Assistido por Computador através de um Sistema Especialista Baseado na Tecnologia de Features: um modelo de desenvolvimento voltado para a realidade industrial*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, set. 1996.

SHEU, L.; LIN, J. Representation scheme for defining and operation from features. *Computer Aided Design*, v. 25, n. 6, p. 333–347, 1993.

SIMÕES, F. M. S. *Implementação de um Sistema CAD/CAM para Fresadoras CNC a partir de Funções CAM Integradas no CAD*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 1999.

SIMÕES, F. M. S.; SILVA, A. D. Geração automática de programas nc para fresamento. *Máquinas & Metais*, fev. 1999.

SMID, P. *CNC Programming Handbook: comprehensive guide to practical CNC programming*. Second edition. 989 Avenue of the Americas, New York, NY 10018: Industrial Press Inc., 2003.

SREEVALSAN, P.; SHAH, J. Unification of form feature definition methods. *Proceedings of the IFIP WG 5.2 Working Conference on Intelligent Computer Aided Design*, p. 83–106, 1992.

STEMMER, C. *Ferramentas de Corte I*. 4ª ed.. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

SUBRAHMANYAM, S.; WOZNY, M. An overview of automatic feature recognition techniques for computer-aided process planning. *Computers in Industry*, v. 26, n. 1, p. 1–21, 1995.

TANDON, V. E.-M.; KISHAWY, H. Nc end milling optimization using evolutionary computation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, n. 25, p. 595–605, 2002.

THOMAS, K. K.; FISHER, G. Integrating cad/cam software for process planning. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996.

WEI, E.-J.; LIN, M.-C. Study on general analytical method for cnc machining the free-form surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier Science Ltd, n. 168, p. 408–413, 2005.

WU, D.; SARMA, R. A framework for fast 3d solid model exchange in integrated design environment. *Computer in Industry*, Elsevier Science Ltd, n. 56, p. 289–304, 2005.

Estruturas de Dados de Geometria Computacional Utilizadas

Este apêndice tem como objetivo fazer uma breve descrição das estruturas de dados de geometria computacional utilizadas no presente trabalho. Estas forneceram suporte à implementação computacional da metodologia proposta no projeto. As classes e métodos utilizados são em quase sua totalidade implementações de algoritmos propostos em *Computational Geometry and Computer Graphics in C++* (LASZLO, 1996).

Uma estrutura de dados consiste de três componentes:

1. Um conjunto de operações para manipulação de tipos específicos de objetos abstratos;
2. Uma estrutura para armazenamento na qual os objetos abstratos são armazenados;
3. Uma implementação de cada um das operações, em termos da estrutura de armazenamento.

As principais estruturas de dados utilizadas no trabalho foram:

- **Listas:** Uma *lista* é um conjunto ordenado finito de muitos itens, ou seja, uma coleção de itens de um dado tipo. O *comprimento* de uma lista é igual ao número de itens que ela contém. Uma lista é aqui definida pela classe **List** (Figura A.1);
- **Pilhas e Filas:** São estruturas de dados que restringem o acesso aos seus itens. As *pilhas* limitam o acesso ao item mais recente inserido, por isso são conhecidas como *last-in-first-out lists* ou *LIFO lists*. As *filas* são extremamente similares, no entanto a restrição ocorre no primeiro item inserido, assim as filas são *first-in-first-out lists* ou *FIFO lists*. As duas operações básicas destas estruturas de dados são o *push* e o *pop*. A operação *push* insere um item na pilha ou fila e o *pop* remove o o último item colocado na pilha ou o primeiro item inserido na fila. Aqui uma pilha é representada pela classe **Stack** e uma fila através da classe **Queue** (Figura A.2);
- **Árvores de Pesquisa Binária:** As *árvores binárias* provém um modo mais eficiente para pesquisa relativamente às listas. Uma árvore binária é uma coleção estrutura de nós. Uma árvore binária é chamada de *árvore de pesquisa binária* se seus itens são ordenados de um modo específico. Em geral, existem diversas árvores de pesquisa binária, de diferentes formas, para um dado conjunto qualquer de itens. Aqui são utilizadas as classes **SearchTree**, **BraidedNode** e **RandomizedNode** para representar esta estrutura de dados (Figura A.3);

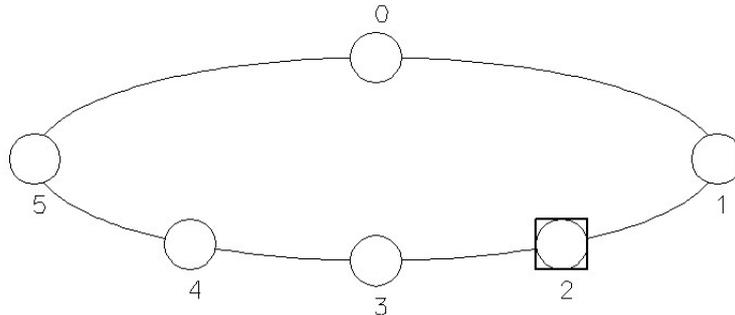


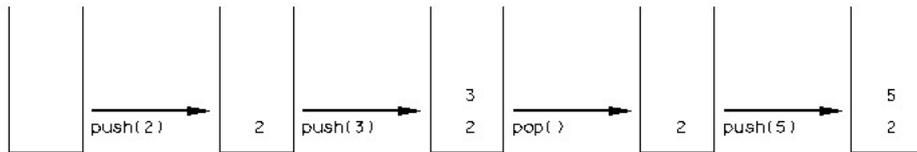
Figura A.1 A estrutura de uma lista de tamanho cinco. Os itens na lista ocorrem nas posições 1 até 5; a posição *head* ocorre entre a primeira e a última posições. A janela, indicada em negrito, está atualmente sobre a posição 2.

- Grafos:** Um *grafo* $G(V, A)$ é definido com um par de um conjunto V e A , onde V é um conjunto finito e não vazio de elementos os quais são os vértices do grafo (também chamados nós) e A é um conjunto de pares ordenados $a = (v, w)$, onde v e w são elementos de V , eles são as arestas. Usualmente é comum o uso de uma representação gráfica de um grafo. A classe **GeomGraph** foi utilizada para representação do conceito de armazenamento de dados em grafos;

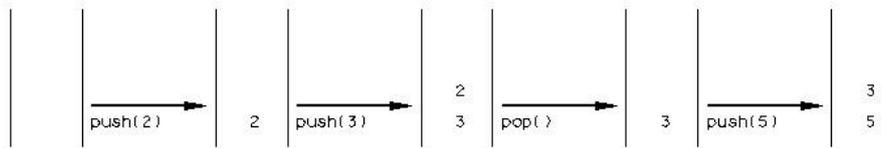
A representação computacional de objetos geométricos é realiza através de classes, as quais suportam operações que incluem divisão (*splitting*) de um polígono ao longo de uma corda em dois outros polígonos menores, computação de pontos de intersecção entre linhas e classificação de um ponto em relação a uma linha.

As principais estruturas de dados geométricas utilizadas no trabalho foram:

- Vetores:** O *vetor* (x, y) pode ser pensado geometricamente como um segmento de linha direcionado começando na origem $(0, 0)$ e terminando no ponto (x, y) . A classe **Point**, a qual contém como dados membros x e y , é utilizada para representar um vetor, com suas respectivas propriedades e sua aritmética;
- Polígonos:** Um polígono é uma curva fechada no plano composta por segmentos retos de linha. Os segmentos são chamados de arestas (*edges*) ou lados do polígono e os pontos finais, onde dois segmentos se interceptam são chamados de *vértices*. Um polígono é dito *convexo* se seu interior é convexo, sendo que uma região é convexa se para quaisquer dois pontos dentro da região, o segmento de linha entre os dois pontos pertencem à região. Um polígono é representado aqui pela classe **Polygon**;
- Linhas:** Um *segmento de linha* consiste dos pontos extremos junto com os pontos que estão entre eles. Um segmento linha é dito *orientado* quando a ordem dos seus pontos

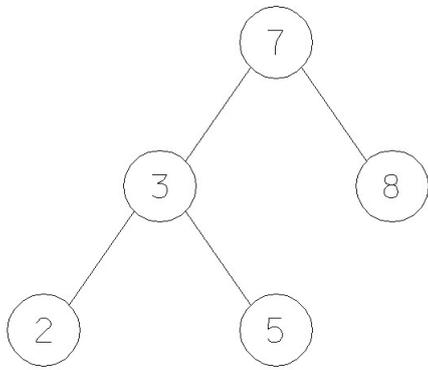


(a) Uma pilha em ação.

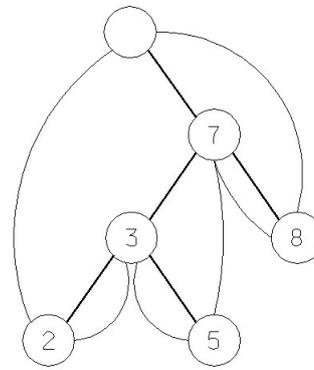


(b) Uma fila em ação.

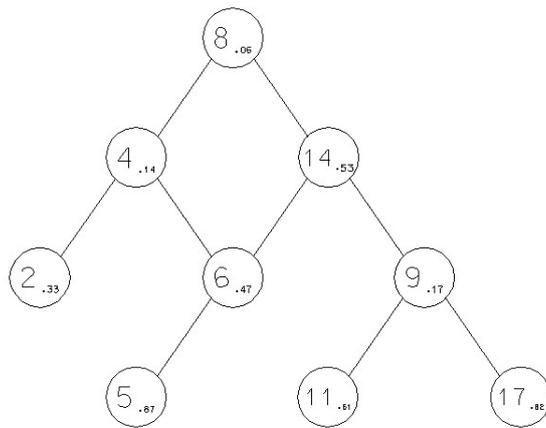
Figura A.2 Operação *push* e *pop*.



(a) Árvore de pesquisa binária.



(b) Uma árvore de pesquisa binária do tipo *braided binary search tree*.



(c) Uma árvore de pesquisa binária do tipo *randomized search tree*.

Figura A.3 Diferentes tipos de árvores de pesquisa binária.

do extremo são importantes, assim estes segmentos possuem uma *origem* e um *destino*. Usualmente, refere-se a um segmento de linha orientado como uma aresta (*edge*), quando este é o lado de algum polígono. A classe **Edge** será usada para representar todas as formas de linhas.

APÊNDICE B

Arquivo Físico IGES

```

This file was produced by MicroStation IGES
1H,,1H;,,13HworkPiece.igs,12HMicrostation,12HMicrostation,32,38,6,38,
15,,1,,2,2HMM,32,5.,15H20080326.114841,0.001,0.,,8,0,14H1080325.191829;G
116 1 0 1 64 0 0 00000000D 1 S 1
116 1 8 1 0 0 0 0D 2 G
116 2 0 1 64 0 0 00000000D 3
116 1 8 1 0 0 0 0D 4
116 3 0 1 64 0 0 00000000D 5
116 1 8 1 0 0 0 0D 6
116 4 0 1 64 0 0 00000000D 7
116 1 8 1 0 0 0 0D 8
116 5 0 1 64 0 0 00000000D 9
116 1 8 1 0 0 0 0D 10
116 6 0 1 64 0 0 00000000D 11
116 1 8 1 0 0 0 0D 12
116 7 0 1 64 0 0 00000000D 13
116 1 8 1 0 0 0 0D 14
116 8 0 1 64 0 0 00000000D 15
116 1 8 1 0 0 0 0D 16
110 9 0 1 64 0 0 00000000D 17
110 3 8 1 0 0 0 0D 18
110 10 0 1 64 0 0 00000000D 19
110 3 8 1 0 0 0 0D 20
110 11 0 1 64 0 0 00000000D 21
110 3 8 1 0 0 0 0D 22
110 12 0 1 64 0 0 00000000D 23
110 3 8 1 0 0 0 0D 24
110 13 0 1 64 0 0 00000000D 25
110 3 8 1 0 0 0 0D 26
110 14 0 1 64 0 0 00000000D 27
110 3 8 1 0 0 0 0D 28
110 15 0 1 64 0 0 00000000D 29
110 3 8 1 0 0 0 0D 30
110 16 0 1 64 0 0 00000000D 31
110 3 8 1 0 0 0 0D 32
110 17 0 1 64 0 0 00000000D 33
110 3 8 1 0 0 0 0D 34
110 18 0 1 64 0 0 00000000D 35
110 3 8 1 0 0 0 0D 36
110 19 0 1 64 0 0 00000000D 37
110 3 8 1 0 0 0 0D 38
110 20 0 1 64 0 0 00000000D 39
110 3 8 1 0 0 0D 40
116,0,,1,,1.; 1P 1
116,1,,1,,1.; 3P 2
116,1,,0,,1.; 5P 3
116,0,,0,,1.; 7P 4
116,1,,0,,0.; 9P 5
116,1,,1,,0.; 11P 6
116,0,,1,,0.; 13P 7
116,0,,0,,0.; 15P 8
110,0,,0,,1,,1,,0,,1.; 17P 9
110,1,,0,,1,,1,,1,,1.; 19P 10
110,1,,1,,1,,0,,1,,1.; 21P 11
110,1,,0,,0,,1,,0,,1.; 23P 12
110,1,,0,,0,,0,,0,,0.; 25P 13
110,0,,0,,0,,0,,0,,1.; 27P 14
110,0,,1,,0,,0,,0,,0.; 29P 15
110,0,,1,,0,,0,,1,,1.; 31P 16
110,1,,1,,0,,1,,0,,0.; 33P 17
110,1,,1,,0,,1,,1,,1.; 35P 18
110,1,,1,,0,,0,,1,,0.; 37P 19
110,0,,1,,1,,0,,0,,1.; 39P 20
S 1G 2D 40P 20 T 1

```

Figura B.1 Arquivo neutro IGES da peça bruta do estudo de caso.

APÊNDICE C

Arquivo Físico IGES

```

This file was produced by Microstation IGES
1H,,1H;,,17HFinishedPiece.igs,12HMicrostation,12HMicrostation,32,38,6, G
38,15,,1,,2,2HMM,32,5,,15H20080610.112739,0.001,0.439439,,8,0,14H108061G
0.104821; G
110 1 0 1 64 0 0 00000000D 1
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 2
110 3 0 1 64 0 0 00000000D 3
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 4
110 5 0 1 64 0 0 00000000D 5
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 6
110 7 0 1 64 0 0 00000000D 7
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 8
110 9 0 1 64 0 0 00000000D 9
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 10
110 11 0 1 64 0 0 00000000D 11
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 12
110 13 0 1 64 0 0 00000000D 13
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 14
110 15 0 1 64 0 0 00000000D 15
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 16
110 17 0 1 64 0 0 00000000D 17
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 18
110 19 0 1 64 0 0 00000000D 19
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 20
110 21 0 1 64 0 0 00000000D 21
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 22
110 23 0 1 64 0 0 00000000D 23
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 24
110 25 0 1 64 0 0 00000000D 25
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 26
110 27 0 1 64 0 0 00000000D 27
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 28
110 29 0 1 64 0 0 00000000D 29
110 1 8 2 0 0 0 00000000D 30
110,0.439999999988,0.199999999963,0.099999999978, 1P 1
0.839999999984,0.199999999951,0.099999999971; 1P 2
110,0.839999999984,0.199999999951,0.099999999971, 3P 3
0.839999999972,0.599999999947,0.099999999964; 3P 4
110,0.839999999972,0.599999999947,0.099999999964, 5P 5
0.439999999971,0.799999999956,0.099999999967; 5P 6
110,0.439999999971,0.799999999956,0.099999999967, 7P 7
0.159999999982,0.519999999967,0.099999999977; 7P 8
110,0.159999999982,0.519999999967,0.099999999977, 9P 9
0.439999999988,0.199999999963,0.099999999978; 9P 10
110,0.439999999942,0.199999999916,0.899999999964, 11P 11
0.839999999938,0.199999999904,0.899999999957; 11P 12
110,0.839999999938,0.199999999904,0.899999999957, 13P 13
0.839999999926,0.5999999999,0.89999999995; 13P 14
110,0.839999999926,0.5999999999,0.89999999995,0.439999999924, 15P 15
0.799999999991,0.899999999954; 15P 16
110,0.439999999924,0.799999999991,0.899999999954,0.159999999935, 17P 17
0.519999999921,0.899999999964; 17P 18
110,0.159999999935,0.519999999921,0.899999999964, 19P 19
0.439999999942,0.199999999916,0.899999999964; 19P 20
110,0.439999999988,0.199999999963,0.099999999978, 21P 21
0.439999999942,0.199999999916,0.899999999964; 21P 22
110,0.839999999984,0.199999999951,0.099999999971, 23P 23
0.839999999938,0.199999999904,0.899999999957; 23P 24
110,0.839999999972,0.599999999947,0.099999999964, 25P 25
0.839999999926,0.5999999999,0.89999999995; 25P 26
110,0.439999999971,0.799999999956,0.099999999967, 27P 27
0.439999999924,0.799999999991,0.899999999954; 27P 28
110,0.159999999982,0.519999999967,0.099999999977, 29P 29
0.159999999935,0.519999999921,0.899999999964; 29P 30
S 1G 3D 30P 30 T 1

```

Figura C.1 Arquivo neutro IGES da peça a ser usinada do estudo de caso.

APÊNDICE D

Entidades IGES Básicas

Tabela D.1 Entidades IGES básicas

Número	Tipo	Descrição
110	Linha	Uma linha em IGES é definida por seus pontos extremos. As coordenadas do ponto inicial e do ponto final são incluídas em parâmetros da seção de dados desta entidade
100	Arco circular	Para representar um arco circular no modelamento espacial, IGES provê as informações incluindo um novo plano (X_T, Y_T), o qual as coordenadas do ponto central, ponto inicial e ponto final pertencem. Um novo sistema de coordenadas (X_T, Y_T, Z_T) é definido pela transferência do sistema de coordenadas original (X_O, Y_O, Z_O) via matriz de transformação e todas as coordenadas dos pontos (ponto central, ponto inicial e ponto final) relacionadas a este novo sistema de coordenadas
124	Matriz de transformação	Esta entidade pode ser dada em relação a localização da informação entre dois sistemas de coordenadas X_O, Y_O, Z_O e X_T, Y_T, Z_T
120	Superfície de revolução	Uma superfície de revolução é criada pela rotação de uma geratriz sobre um eixo de rotação a partir da posição inicial até a posição final. O eixo de rotação é uma entidade linha. A geratriz pode ser um arco de cone, linha, arco circular ou uma curva composta. O ângulo de rotação é anti-horário sobre a direção positiva do eixo de rotação.
116	Ponto	Um ponto é definido por suas coordenadas (X, Y, Z)
123	Direção	Uma entidade direção é um vetor não nulo em 3D que é definido por seus três componentes com respectivos eixos de coordenadas. O vetor normal da superfície pode ser determinado por esta entidade.
190	Superfície plana	A superfície plana é definida por um ponto no plano e a direção normal à superfície
502	Lista de vértices	Esta entidade é usada para determinar a lista de vértices, a qual contém todos os vértices do objeto.
504	Lista de arestas	Esta entidade é usada para determinar a lista de arestas, a qual contém todas as arestas do objeto.
508	Loop	Esta entidade é usada para determinar os loops, os quais, envolvidos em todas as faces do objeto.
510	Face	Esta entidade é usada para determinar as faces, as quais consistem do objeto.
514	Shell	Uma shell é representada como um conjunto de arestas conectadas, orientadas usadas das faces. A normal da shell é está na mesma direção da normal da face.
192	Superfície cilíndrica circular reta	Uma superfície cilíndrica circular reta é definida por um ponto no eixo do cilindro, a direção do eixo do cilindro e um raio

APÊNDICE E

Tabela de Valores da Pressão Específica de Corte (K_s) para o Fresamento

Tabela E.1 Valores da Pressão Específica de Corte (K_s) para o Fresamento

Material	Resistência (s_t) [kgf/mm ²] ou Dureza	Valores Aproximados de (K_s) [kgf/mm ²]									
		Espessura de corte h(mm)									
		0.025	0.04	0.063	0.1	0.16	0.25	0.4	0.63	1.0	
1030	52	535	475	425	375	330	295	260	230	205	
1035	58	405	370	340	310	280	255	235	215	195	
1045	67	385	360	340	320	300	280	260	245	230	
1060	77	425	390	360	330	305	280	260	240	220	
8620	77	570	510	455	400	355	315	280	250	220	
4140	73	675	600	535	475	420	370	330	290	260	
4137	60	495	455	415	375	340	310	280	255	230	
6150	60	600	530	475	420	370	330	290	260	230	
Fofo duro	HRC = 46	420	390	355	325	300	275	250	230	210	
Ff GG26	HB = 200	270	240	215	190	170	150	135	120	105	