

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA INSERÇÃO DE CENTRO DE USINAGEM
CINCO EIXOS NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE MOLDES**

FERNANDO BRITO DE LACERDA

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS HELLENO

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2013

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA INSERÇÃO DE CENTRO DE USINAGEM
CINCO EIXOS NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE MOLDES**

FERNANDO BRITO DE LACERDA

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS HELLENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2013

ANÁLISE DA VIABILIDADE DA INSERÇÃO DE CENTRO DE USINAGEM CINCO EIXOS NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE MOLDES

FERNANDO BRITO DE LACERDA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, em 26 de Setembro de 2013, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. André Luis Helleno
PPGEP - UNIMEP

Prof. Dr. Felipe Calarge
UNINOVE

Prof^a. Dr^a. Maria Célia de Oliveira Papa
PPGEP - UNIMEP

DEDICATÓRIA

A Deus, pela vida e oportunidades oferecidas.

A minha amada Eliane, pelo amor, incentivo e apoio.

A minhas filhas, Ana Clara e Giovana pelo amor e incentivo.

Aos meus pais e irmãos, pelos valores e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor André Luís Helleno, pela orientação e incentivo para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Máquinas-Ferramentas das Indústrias Romi, pela constante ajuda no desenvolvimento dos ensaios.

Às Indústrias Romi S.A., pela disponibilidade de equipamentos e máquinas para a realização dos ensaios.

A todos os amigos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Capes pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	II
RESUMO	III
ABSTRACT	IV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO.....	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 OBJETIVOS GERAIS	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 FRESAMENTO DE MOLDES E MATRIZES	5
2.2 MÁQUINA-FERRAMENTA 5 EIXOS.....	9
2.3 ANÁLISE DE RUGOSIDADE EM SUPERFÍCIES USINADAS	25
2.4 FATORES ECONÔMICOS NA USINAGEM	29
2.5 MÉTODOS DE ANÁLISE DE INVESTIMENTO	31
2.5.1 VALOR PRESENTE LIQUIDO	33
2.5.2 TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	34
2.5.3 PERÍODO DE RECUPERAÇÃO DE CAPITAL – PAYBACK.....	35
2.5.4 ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE.....	35
2.5.5 VALOR ANNUAL EQUIVALENTE (VAE)	36
2.6 INCORPORAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS.....	36
2.7 MANUTENÇÃO EM CENTROS DE USINAGEM 3 E 5 EIXOS	37
3 TRABALHO EXPERIMENTAL	41
3.1 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO EXPERIMENTAL	42

3.1.1	MÁQUINAS-FERRAMENTA.....	43
3.1.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	45
3.1.2	SOFTWARES UTILIZADOS.....	47
3.1.3	CORPO DE PROVA.....	47
3.1.4	PARÂMETROS DO PROCESSO DE FRESAMENTO.....	49
3.1.5	ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA.....	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FLUXOGRAMA PROCESSO DE MOLDES (OLLING, ET AL., 1999).....	6
FIGURA 2–OPERAÇÃO DE USINAGEM 5 EIXOS POSICIONADOS (HONG, ET AL.,2011)	10
FIGURA 3 – USINAGEM COM 5 GRAUS DE LIBERDADE (BAPTISTA, SIMÕES, 2000).....	11
FIGURA 4 – POSSIBILIDADE DE ACESSO DA FERRAMENTA (ENDL, JAJE, 2006).....	12
FIGURA 5 - NOMENCLATURA DOS EIXOS PARA MÁQUINAS A 5-EIXOS (GROOVER, 2008) ..	14
FIGURA 6 - TRÊS TIPOS DE CENTROS DE USINAGEM EM 5-EIXOS(GRAY, ET. AL., 2006)	14
FIGURA 7– DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DA FERRAMENTA (RIDA; SHIQIAO, 2013).....	17
FIGURA 8 – ORIENTAÇÃO DO EIXO DA FERRAMENTA (RIDA;SHIQIAO, 2013)	17
FIGURA 9 - INCLINAÇÕES MÉTODO DA FERRAMENTA INCLINADA (GRAY ET. AL. 2001).....	18
FIGURA 10 - MOVIMENTO FERRAMENTA EM RELAÇÃO AO SEU EIXO (ENDL; JALE, 2006) .	19
FIGURA 11 - DIFERENTES EIXOS INCLINAÇÃO (BOUJELBENE, ET. AL., 2007).....	20
FIGURA 12 - USINAGEM COM A LATERAL DA FERRAMENTA (DELICAM, 2013).....	21
FIGURA 13 – CÁLCULO RUGOSIDADE ATRAVÉS DO SISTEMA M.....	27
FIGURA 14 – RUGOSIDADE MÉDIA (RA)(COSTA, GOMES, 2010).	28
FIGURA 15 - RUGOSIDADE MÁXIMA, RY (NESTE CASO Z3)(COSTA, GOMES, 2010).....	28
FIGURA 16 – ETAPAS DO MÉTODO DE PESQUISA.	41
FIGURA 17 - ESTRUTURA DO TRABALHO EXPERIMENTAL.....	42
FIGURA 18 - FOTO ILUSTRATIVA ROMI D 1000 AP DD V4.0.	44
FIGURA 19 – FOTO ILUSTRATIVA ROMI DCM 620 5X V1.0.	44
FIGURA 20 - DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO GERARDI – ZERO POINT.....	46
FIGURA 21– FERRAMENTAS UTILIZADAS NO EXPERIMENTO	46
FIGURA 22 - BLANK DE ALUMÍNIO 7075 UTILIZADO NO EXPERIMENTO.	46
FIGURA 23 - CORPO DE PROVA	47
FIGURA 24 – DESENHO TÉCNICO DO CORPO DE PROVA.....	48
FIGURA 25 – FLUXO DE CAIXA CONSIDERANDO TECNOLOGIA 3 EIXOS.....	54
FIGURA 26 – FLUXO DE CAIXA CONSIDERANDO TECNOLOGIA 5 EIXOS.....	54
FIGURA 27–REGIÕES UTILIZADAS PARA A MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.....	56
FIGURA 28 – GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DE RUGOSIDADE POR PROCESSO DE USINAGEM...	57

LISTA DE TABELAS

<i>TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA ALUMÍNIO 7075.....</i>	<i>45</i>
<i>TABELA 2 – MÁQUINAS-FERRAMENTAS ROMI UTILIZADAS NO EXPERIMENTO</i>	<i>43</i>
<i>TABELA 3 – PARÂMETROS USINAGEM DO CORPO DE PROVAS EM 5 EIXOS.</i>	<i>49</i>
<i>TABELA 4 – PARÂMETROS USINAGEM DO CORPO DE PROVAS EM 3 EIXOS.</i>	<i>49</i>
<i>TABELA 5 – TEMPO DE USINAGEM CORPO DE PROVA EM 3 E 5 EIXOS.</i>	<i>52</i>
<i>TABELA 6 – CUSTO FABRICAÇÃO CORPO DE PROVA EM 3 E 5 EIXOS.</i>	<i>53</i>

LACERDA, Fernando Brito de. **ANÁLISE DA VIABILIDADE DA INSERÇÃO DECENTRO DE USINAGEM CINCO EIXOS NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE MOLDES**. 2013. 75 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção - Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

RESUMO

A inserção do plástico como matéria prima de grande parte dos produtos de bens de consumo é uma realidade com tendência de crescimento na indústria. Da mesma forma, a redução do ciclo de vida dos produtos e o aumento da diversidade dos produtos tem resultado em mudanças do panorama da indústria de manufatura. Conseqüentemente, ocorre a necessidade da usinagem de um molde para cada novo produto e/ou nova versão. Neste processo de usinagem, os tempos e os custos envolvidos, podem inviabilizar um produto de plástico. Com isso, um processo de usinagem com alta qualidade dimensional, baixo custo e flexível torna-se uma vantagem competitiva. Desta forma, surgem na indústria inúmeras soluções de equipamentos para atender este panorama, dentre os quais se destaca os centros de usinagem 5 Eixos. Estes centros de usinagem destacam-se pela característica do alto nível tecnológico. No entanto, o uso desta tecnologia na fabricação de moldes resulta em paradigmas quanto à eficácia de sua aplicação, especialmente com relação à redução do tempo de usinagem e dos custos. Com isso, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade econômica da utilização de centro de usinagem 5 Eixos no processo de fresamento de moldes. A análise baseou-se no fresamento de um molde utilizado na indústria de calçados, o qual foi usinado em um centro de usinagem 3 Eixos e em um Centro de usinagem 5 Eixos. Para a comparação, utilizaram-se como parâmetros o tempo da usinagem, custo, qualidade e viabilidade econômica.

PALAVRAS-CHAVE: Molde, Centro de Usinagem, 5 Eixos, Viabilidade econômica.

LACERDA, Fernando Brito de. **ANALYSIS VIABILITY OF THE INSERTION FIVE-AXIS MACHINING CENTER IN THE MACHINING PROCESS OF DIE**. 2013. 75f. Dissertação Mestrado em Engenharia de Produção - Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

ABSTRACT

The insertion of plastic as raw material for most of the products of consumer goods is a reality with growth trend in the industry. The same way, the reduction of life cycle of the product and increase the diversity of products has resulted in changes of the landscape manufacturing industry. Consequently, there is the need of machining a die for each new product and / or new versions. In this machining process, the time and costs involved may prevent a product of plastic. With this, a process of dimensional machining with high quality, low cost and flexible becomes a competitive advantage. Thus, there are numerous solutions in the industry of equipment to meet this scenario, among which stands out the 5 Axis machining centers. These machining centers are distinguished by characteristic of high technology. However, the use of this technology results in die manufacturing paradigms as the effectiveness of its application, especially with respect to reducing the machining time and costs. Therefore, this study aims to evaluate the economic viability of the use of 5-axis machining center in the process of milling molds. The analysis was based on milling a mold used in the shoe industry, which was machined on a 3-axis machining center and a 5-axis machining center. For comparison, we used as parameters of the machining time, cost, quality and economic viability.

KEYWORDS: Die, Machining Center, 5 Axis, economic viability.

1 INTRODUÇÃO

A inserção do plástico como matéria prima de diversos produtos de bens de consumo e a redução do ciclo de vida, fez com que a indústria de molde se destacar-se no ambiente de manufatura. Isso ocorreu em função de que para o desenvolvimento de cada novo produto e/ou versão é necessário a usinagem de um molde. Nesse sentido, o processo de usinagem com alta qualidade dimensional, baixo custo, e flexível tornar-se uma vantagem competitiva (SIMON, 2009).

A necessidade de modernização no processo de fabricação de moldes se relaciona diretamente com o aumento do nível tecnológico das máquinas ferramentas que são utilizadas no processo de fabricação de moldes (HUANG, *et. al.*, 2011).

No processo de usinagem de um molde, devido a sua complexidade, muitas vezes é necessários vários posicionamentos e fixações da peça na mesa da máquina para a usinagem do molde, devido sua complexidade, isso ocasiona diversos problemas, tais como: erros geométricos no produto final, necessidade de dispositivos de fixação, aumentando o custo do produto final e processo mais dependente do operador de máquina (PENCHENG, KAI, 2011).

Nesse sentido a inserção de centros de usinagem 5 Eixos no processo de usinagem de moldes é um importante fator pois comparando estes centros de usinagem com os centro de usinagem de 3 eixos, normalmente utilizados nos processos de usinagem de moldes, tem-se, além de movimentos no plano cartesiano XYZ, os movimentos rotacionais sobre os eixos X (Eixo B) e Y (Eixo A). Isso faz com que os centros de usinagem 5 eixos tenham flexibilidade de usinagem podendo reduzir o tempo de *setup* e, conseqüentemente o tempo e o custo de usinagem (HONG, *et. al.*, 2011).

Além disso, outra vantagem no fresamento em centros de usinagem 5 eixos relaciona-se com a, acessibilidade da ferramenta em determinados ângulos negativos. Esta característica permite o acesso à faces da peça, nas quais a ferramenta de corte em um centro de usinagem 3 eixos não teria acesso sem o uso de dispositivos de fixação (HONG, *et. al.*, 2011).

Desta forma, no fresamento em 5 eixos, na maioria das vezes é possível usar peças com uma única fixação. Isto reduz consideravelmente o tempo e o custo de usinagem. Além disso, é possível utilizar ferramentas mais curtas, que proporcionam uma maior rigidez do processo e, conseqüentemente melhor acabamento da superfície usinada (YAN; TIAN, 2011).

1.1 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

A indústria de moldes tem grande impacto no cenário de manufatura atual em função de sua forte influência em diversos segmentos produtivos, tais como: eletrodoméstico, automobilístico, indústria civil, entre outros (MARSON, 2009).

No entanto, a indústria nacional de moldes não se destaca entre os principais fabricantes de moldes mundiais. Até o início do século, destacavam-se os seguintes países: EUA, Alemanha, Itália e Japão e, mais recentemente, os países asiáticos Coreia do Sul e China (MARSON, 2009).

Esta fato ocorre em função das dificuldades da indústria nacional relacionadas com a falta de mão de obra especializada, os altos custos dos recursos e o elevado tempo de produção dos moldes (SIMON, 2009).

Este trabalho irá analisar a viabilidade econômica da utilização de centro de usinagem 5 eixos no processo de fabricação de moldes, a análise será comparativa com o fresamento em um centro de usinagem em 3 eixos comumente usado na fabricação de moldes.

Segundo Yan e Tian (2011), a inserção de centros de usinagem 5 Eixos no processo de fresamento permite aumentar a taxa de remoção de material e melhorar a qualidade dimensional das peças usinadas. Isso contribui para o aumento da utilização do fresamento em 5 eixos em processos de fabricação modernos.

Além disso, o fresamento em 5 Eixos permite maior liberdade de orientação da ferramenta em relação ao fresamento em 3 eixos, o que possibilita inúmeras vantagens com relação ao processo de fresamento de moldes (PENCHENG, KAI, 2011).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar a viabilidade econômica da utilização de centro de usinagem 5 eixos no processo de fresamento de moldes.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho tem por objetivos específicos:

- a) Determinar um experimento, assim como o processo de fresamento de 3 e 5 eixos que represente as dificuldades do setor de moldes, como: Alto tempo de fabricação, custo e qualidade.
- b) Comparar os processos de fresamento utilizando centro de usinagem 3 e 5 eixos, considerando tempo e custo de fresamento.
- c) Comparar a qualidade de acabamento da superfície usinada considerando os processos de fresamento 3 e 5 eixos
- d) Analisar a viabilidade econômica sobre o processo de fresamento de molde utilizando centro de usinagem 3 e 5 eixos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1 – INTRODUÇÃO - neste capítulo são abordados o problema, e qual a solução apresentada para o problema abordado, importância do trabalho e objetivos.
- Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – detalha os conceitos teóricos fundamentais para o desenvolvimento do trabalho, são abordados os tópicos sobre o processo de fresamento de moldes, centros de usinagem 5 eixos, análise da viabilidade econômica e qualidade de superfície.

- Capítulo 3 – MÉTODO DE PESQUISA - detalha os, materiais, equipamentos empregados e metodologia utilizada durante os ensaios experimentais do trabalho.
- Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES - neste capítulo estão os resultados das medições de tempo, qualidade e viabilidade econômica encontrado no trabalho experimental e suas respectivas discussões.
- Capítulo 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS - contém as conclusões obtidas considerando os resultados dos ensaios e, ainda, sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos.
- Capítulo 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS - encontra-se as fontes consultadas para a elaboração deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura, esta revisão considera as etapas de fresamento de moldes, centro de usinagem 5 eixos, análise da viabilidade econômica e qualidade de superfícies que são os fatores determinantes para o desenvolvimento do trabalho experimental.

2.1 FRESAMENTO DE MOLDES E MATRIZES

O desenvolvimento do processo de fresamento de moldes está diretamente relacionado com a criação de novos produtos, devido ao desenvolvimento do processo de fresamento que possibilita criação de produtos que atendem a necessidade do mercado. Cerca de 70% de todos os produtos manufaturados no mundo são feitos de termoplásticos, incluindo bens duráveis, ou não (MARSON, 2009).

Para a realização de um projeto de molde, existem algumas informações que devem ser previamente conhecidas, pois influenciam na escolha do tipo do molde a ser utilizado e na projeção de seus sistemas. Sobre o produto devem-se conhecer as dimensões, peso, design, tipo de polímero e a demanda, além disso, os recursos disponíveis tanto para a confecção do molde quanto para a produção do produto também são informações fundamentais (MENGES *et al.*, 2001).

Os centros de usinagem são ferramentas fundamentais para a transformação do processo de fabricação de moldes, sendo requisito obrigatório nas empresas e base para qualquer tecnologia a ser aplicada neste setor.

A Figura 1 apresenta um fluxograma do processo de manufatura de moldes. A maior parte do tempo de manufatura do molde é consumido pelas operações de usinagem e acabamento. Isto ocorre em razão da necessidade do uso de dispositivos, intervenção do operador e a baixa qualidade superficial do molde após o processo de usinagem, sendo necessárias as etapas de acabamento

manual (polimento), que visa obter o acabamento superficial necessário para o molde começar a produzir (OLLING, *et al.* 1999).

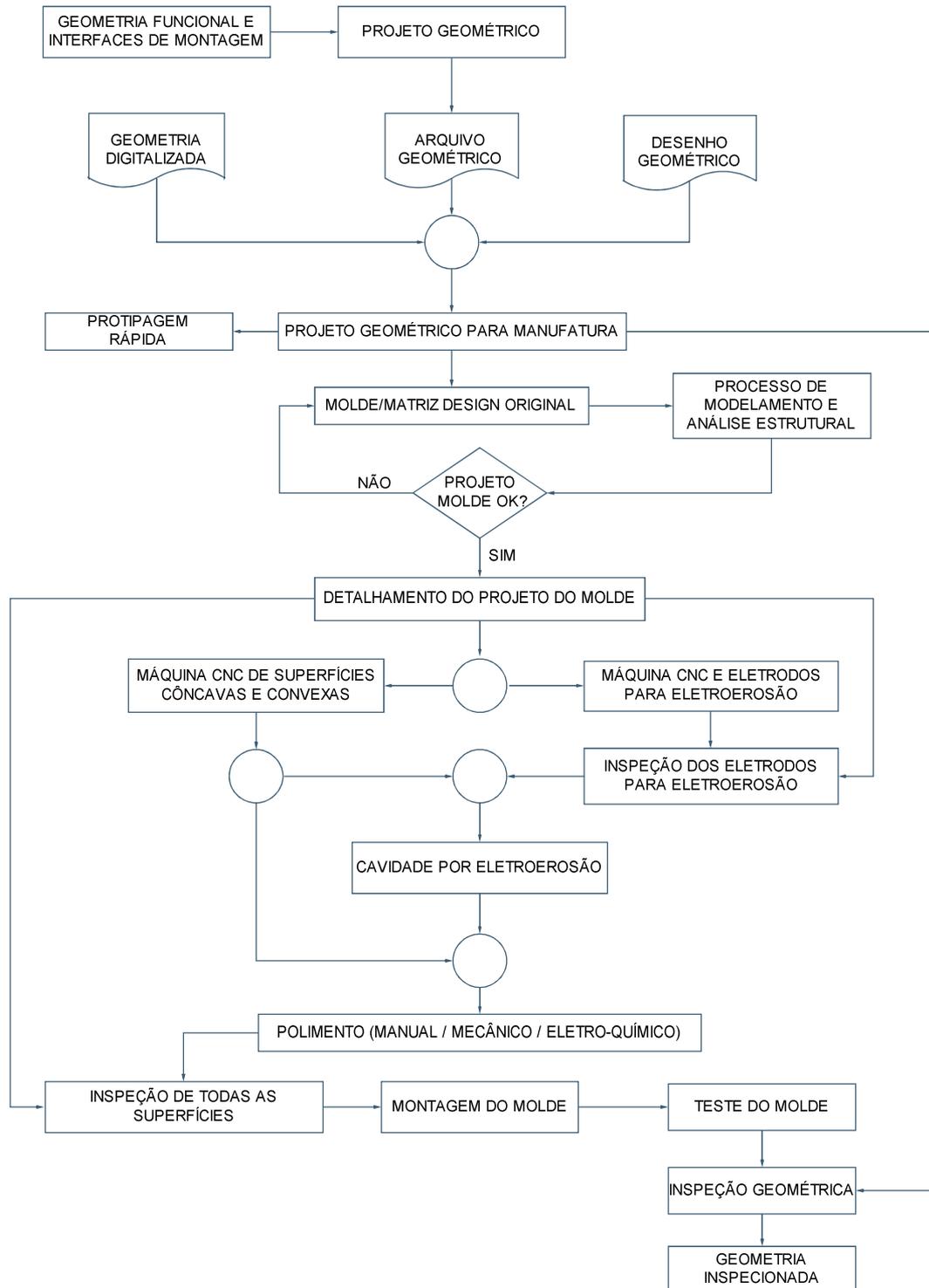


FIGURA 1 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE MANUFATURA DE MOLDES (OLLING, ET AL., 1999)

O processo de fresamento para fabricação de moldes envolve as seguintes etapas (SOUZA, BONETTI, 2007):

- a) Desbaste: operações de fresamento CNC, partindo de um material em estado bruto. Essa operação é pode ser executada em 2 eixos, pois a ferramenta é posicionada em uma determinada altura no eixo Z e depois executa movimentos nos eixos X e Y, para remoção de material desse nível. Quando a remoção de material é finalizada, a ferramenta se posiciona em uma nova altura no eixo Z (definida como profundidade de corte), remove o material desse plano, repetindo o processo até a conclusão do desbaste (CHOI; JERARD, 1998). Normalmente, após a operação de desbaste há um sobremetal teórico para ser removido na operação final de acabamento, além disso, um excedente de material permanece na peça, por limitações geométricas do processo como acesso a cavidade, ferramenta de corte e parâmetros do processo.
- b) Alívio de cantos e pré-acabamento: essas operações de fresamento têm a finalidade de eliminar grandes volumes de material deixados pelo desbaste. Podem ser realizadas devido à ineficiência do processo ou para remover material em áreas nas quais a ferramenta de desbaste não alcança devido a limitações geométricas.
- c) Acabamento por fresamento: essa é uma operação de fresamento CNC tridimensional, utilizando 3,4, ou 5 graus de liberdade, conforme a disposição da máquina-ferramenta. Essa operação visa a remover todo material excedente das operações anteriores e obter a melhor qualidade superficial possível no fresamento. Cada estratégia de usinagem pode ser mais adequada para uma geometria específica, como áreas planas, inclinadas, côncavas e convexas. Na usinagem de superfícies complexas, dependendo do grau de curvatura da superfície, a escolha da estratégia de corte é de grande importância para obtenção de uma superfície de melhor qualidade.

O processo de fresamento é a operação com maior capacidade de remoção de material, conforme a disposição dos dentes ativos da fresa durante o corte, o

fresamento pode ser classificado em dois tipos: fresamento tangencial e fresamento frontal. No primeiro caso, a superfície que está sendo gerada é paralela ao eixo da fresa, enquanto, no fresamento frontal, a superfície gerada é perpendicular ao eixo (WRULAK, *et. al.*, 2008).

Com a tecnologia dos centros de usinagem utilizados no processo de fresamento de moldes, possibilita a usinagem de superfícies complexas, neste caso contato ferramenta-peça se altera constantemente, tornando o processo instável, devido às constantes alternâncias entre o fresamento frontal e tangencial (SOUZA, BONETTI, 2007).

Souza (2004) evidencia em seus estudos a grande alteração do processo de corte nessas condições, alterando fortemente a força de usinagem e a qualidade da superfície usinada.

Desta forma, o posicionamento da ferramenta em relação à peça torna-se importante para o acabamento superficial. Conforme o ângulo de contato formado entre o par ferramenta-peça, pode-se melhorar o nível de acabamento da superfície usinada (SOUZA, BONETTI, 2007).

Souza (2004) conclui que, com o centro de uma ferramenta de corte com geometria ponta esférica deslocado da região de corte, há uma melhora no acabamento superficial e uma diminuição dos esforços decorrentes do processo.

Diante desse posicionamento entre o par peça-ferramenta, observa-se melhor aproveitamento da aresta de corte e, conseqüentemente, melhor desempenho devido há maior área de contato da ferramenta na peça (Souza, 2004).

Desta forma, no fresamento de moldes, normalmente utiliza-se, para a fabricação de moldes, aplica-se a usinagem por fresamento em 3 eixos (X, Y, Z). Porém, dependendo da geometria a ser usinada, o processo fica inacabado em algumas regiões devido à limitação de acessibilidade à cavidade, cantos e alguns perfis do molde (SOUZA, 2004).

Nesse caso, são necessárias operações para o acabamento final do molde como, por exemplo, a eletroerosão, ou usinagem por descargas elétricas, é um processo indicado na usinagem de formas complexas em materiais condutores elétricos, especialmente aqueles de alta dureza, e de dimensões diminutas, difíceis de serem usinados por processos tradicionais de usinagem (SOUZA, 2004).

2.2 MÁQUINA-FERRAMENTA 5 EIXOS

Em 1.958, a força aérea americana dos Estados Unidos da América, por intermédio de um projeto financiado pelo governo, executou um estudo para a viabilidade de construção do primeiro centro de usinagem vertical em 5 eixos. A empresa CINCINNATI assinou um contrato para construir um comando numérico computadorizado (CNC), capaz de controlar 5 eixos em uma fresadora vertical.

No entanto, por falta de tecnologia computacional na época, esse processo foi considerado impraticável. Somente com a evolução dos sistemas controladores CNC, das plataformas CAD/CAM e pesquisas para desenvolvimento dessa tecnologia é que foi possível a simulação e o controle das trajetórias em 5 eixos (HERRIN, 2007).

Segundo Tsutsumi e Saito (2004), o número de eixos de uma máquina ferramenta se refere ao número de graus de liberdade ou ao número de movimentos independentes controlados nos barramentos da máquina. Na programação CNC, os eixos principais são classificados como eixos geométricos. O eixo é uma direção segundo a qual se pode programar o movimento relativo entre a ferramenta e a peça de forma contínua e controlada.

A norma ISO 6983-1:2009 utiliza um sistema de coordenadas, obedecendo a um plano de trabalho, o qual corresponde a dois eixos lineares de deslocamento e um eixo paralelo á ferramenta de corte. Além dos eixos cartesianos (X, Y e Z), na usinagem em 5 eixos, é atribuído, uma possível rotação sob um eixo cartesiano (TSUTSUMI, SAITO, 2006).

Para cada caso e projeto de máquina, há graus de liberdade diferenciados, justificando o investimento do equipamento, conforme a gama ou tipo de peças a fabricar. Basicamente, os processos de usinagem por fresamento em 5 eixos podem ser empregados nas seguintes modalidades (HONG, *et. al.*, 2011):

- Usinagem 5 eixos posicionais (5 faces): nesse processo ou máquina, a remoção de material é realizada em movimentações de 3 eixos. Entretanto, a máquina pode se posicionar em outras duas direções. Nesse caso, a programação CNC, assim como a verificação de colisões, requer menos esforço. Essa aplicação beneficia, principalmente, a usinagem profunda ou em regiões específicas como ilustra a Figura2.

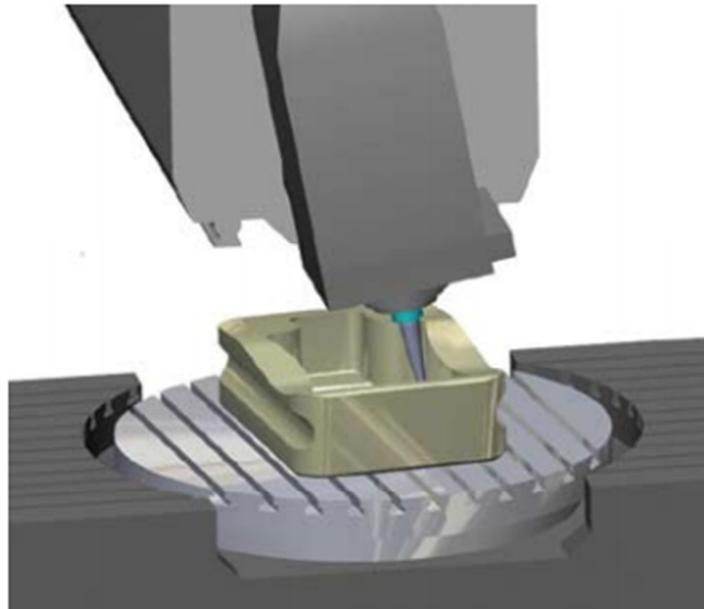


FIGURA 2—OPERAÇÃO DE USINAGEM 5 FACES / EIXOS POSICIONADOS (HONG, ET AL.,2011)

- Usinagem 5 eixos simultâneos: nesse caso, a remoção de material pode ser realizada em movimentações da ferramenta em 5 eixos, simultaneamente. Exige-se maior trabalho para a programação CNC e verificações de colisões. Entretanto, possibilita maior versatilidade de trabalho. Segundo Baptista e Simões (2000), a grande aplicação para o fresamento em 5 eixos simultâneos está na operação de acabamento, a qual se caracteriza por uma pequena quantidade de material a ser

removida e que necessita de condição constante de contato entre ferramenta e a superfície de trabalho. Essa técnica é indicada para a usinagem de formas complexas.

Na usinagem 5 eixos, é possível manter o centro da ferramenta sempre perpendicular a superfície da peça, como ilustra a Figura 3 (BAPTISTA, SIMÕES, 2000).

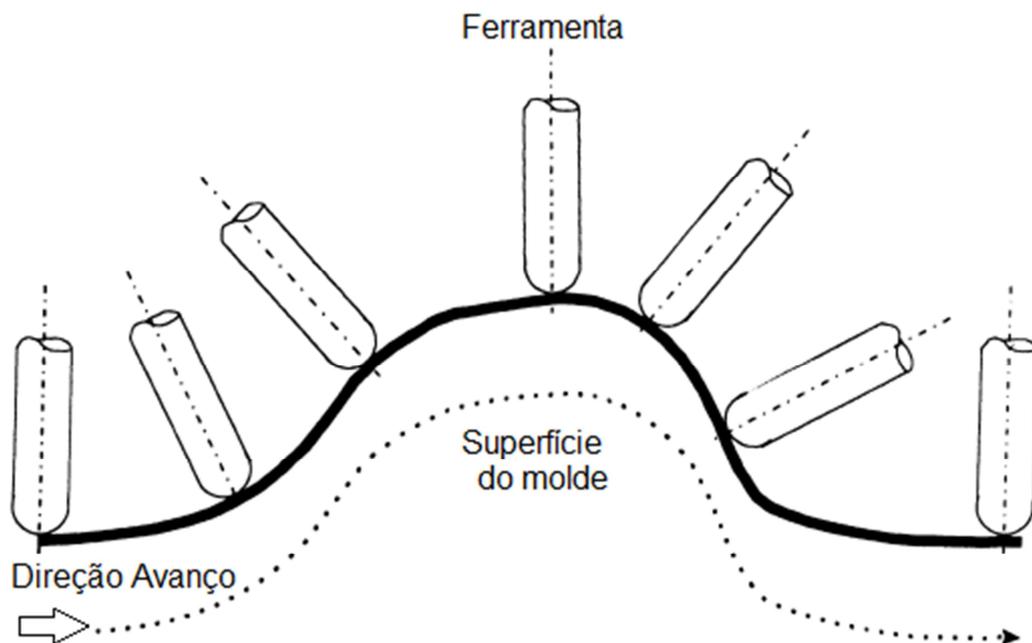


FIGURA 3 – USINAGEM COM 5 GRAUS DE LIBERDADE (BAPTISTA, SIMÕES, 2000)

A Figura acima apresenta o caminho da ferramenta percorrendo a superfície do molde.

O fresamento em 5 eixos possibilita maior flexibilidade, podendo trabalhar com a ferramenta em uma posição mais propícia ao processo de corte, outra ocasião bastante propícia ao fresamento 5 eixos é encontrada nos casos de usinagem de difícil acesso, utilizando apenas 3 eixos, a Figura 4 ilustra esse caso (ENDL, JAJE, 2006).

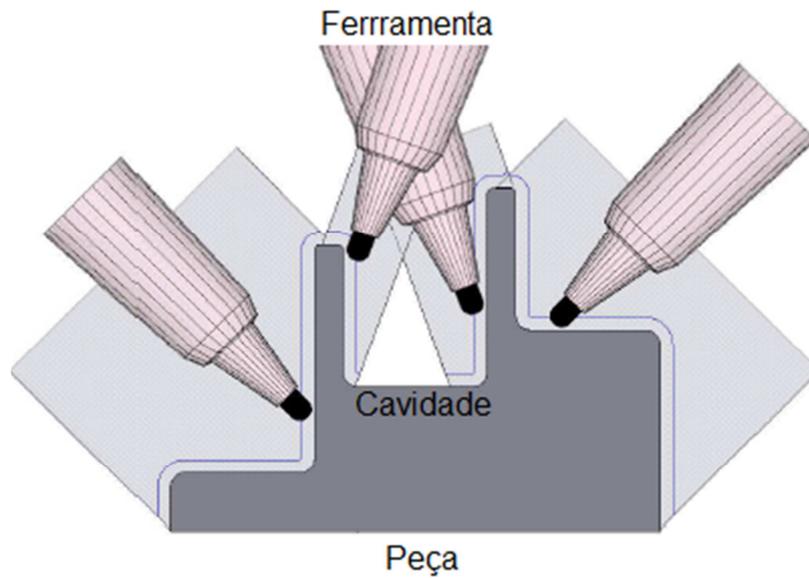


FIGURA 4 – POSSIBILIDADE DE ACESSO DA FERRAMENTA DE CORTE (ENDL, JAJE, 2006)

Nesta Figura podemos observar que a peça possui cavidade profunda de difícil acesso dificultando o processo de fresamento caso seja optado fresamento em 3 eixos o processo de fresamento ficaria inacabado necessitando de retrabalho.

A usinagem com 5 eixos permite uma maior liberdade de orientação da ferramenta do que o processo de usinagem 3 eixos, possível pelo fato de dispor de dois eixos rotacionais, o que permite inúmeras vantagens com relação ao processo convencional (PENCHENG; KAI , 2011).

Em um processo de usinagem 3 eixos contendo múltiplas faces, muitas vezes são necessários vários posicionamentos e fixação da peça na mesa da máquina para a usinagem, ocasionando diversos problemas, como (PENCHENG; KAI ,2011):

- Maior imprecisão do produto final, devido ao reposicionamento das outras faces a serem usinadas;
- Necessidade de projetar dispositivos de fixação, aumentando o custo do produto final;

- Processo com maior dependência do operador de máquina para reposicionamento e operação da mesma.

Segundo HONG, *et. al.* (2011), atualmente, impulsionado pelo desenvolvimento tecnológico, a aplicação da tecnologia de usinagem por 5 eixos para a fabricação de moldes, pode se tornar um importante diferencial nesse segmento. No caso do processo de usinagem com centro de usinagem 5 eixos, primeiramente, pode-se relatar a vantagem da acessibilidade da ferramenta em determinados ângulos negativos e faces da peça, onde a máquina 3 eixos não teria acesso. Isso permite, na maioria das vezes, a usinagem de peças com uma única fixação, implicando em uma considerável redução de tempo e custo de usinagem, além da possibilidade de utilizar ferramentas mais curtas, que proporcionam uma maior rigidez do processo e, conseqüentemente, melhor acabamento da superfície usinada.

Devido a essa flexibilidade outro benefício a ser destacado no fresamento em 5 eixos é a possibilidade de redução do tempo de preparação de máquina, além da opção de utilizar fresa mais curtas para cavidades, aprimorando a rigidez (JUN *et. al.*, 2003).

Outro benefício é a possibilidade de orientar a fresa com uma inclinação constante relativa à normal da superfície usinada, o que resulta em cargas mecânicas constantes na ferramenta (ALTMÜLLER *et. al.*, 2001).

As principais desvantagens no fresamento 5 eixos são: maiores possibilidades de colisões e danos à peça provocados pela ferramenta; programação e pós-processamento mais complexos, implicando em considerável necessidade de conhecimento, dedicação e habilidade, intelectual e manual, para programar e operar as máquinas; e suporte ineficiente dos sistemas CAM convencionais. Outro fator a se considerar é o fato dos custos serem maiores, tanto para a aquisição e manutenção dos centros de usinagem, como para a compra de programas CAM e qualificação de programadores e operadores (CHIOU; LEE, 2004).

Os centros de usinagem 5 eixos geralmente apresentam três eixos de translação e dois eixos de rotação. Estes últimos, instalados em torno de dois dos eixos lineares, X, Y e Z, esta especificidade que atribui os nomes A, B, ou C, respectivamente, aos eixos de rotação (Figura 5) (GROOVER, 2008).

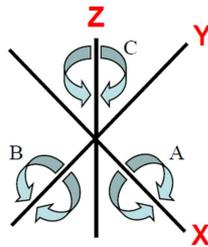
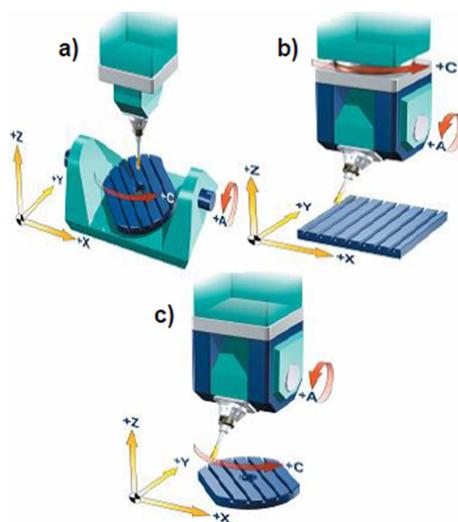


FIGURA 5 - NOMENCLATURA DOS EIXOS ROTACIONAIS PARA MÁQUINAS A 5-EIXOS (GROOVER, 2008)

Os eixos X, Y e Z são eixos de translação perpendiculares entre si, sendo que o último será sempre perpendicular ao eixo de rotação do fuso onde é montada a ferramenta (GROOVER, 2008).

Os centros de usinagem em 5 eixos podem ser divididos em três tipos básicos, e são definidos de acordo com a disposição dos eixos de rotação (Figura 6) (GRAY, *et. al.*, 2006).



*FIGURA 6 - TRÊS TIPOS BÁSICOS DE CENTROS DE USINAGEM EM 5-EIXOS (GRAY, *et. al.*, 2006)*

Centros de Usinagem tipo (a): possuem movimentos lineares nos eixos X, Y e Z localizados no cabeçote e movimentos rotacionais nos eixos A e C localizados na mesa.

Centros de Usinagem tipo (b): possuem movimentos lineares nos eixos X, Y e Z e movimentos rotacionais nos eixos A e B localizados no cabeçote.

Centros de Usinagem tipo (c): possuem movimentos lineares nos eixos X, Y e Z e um movimento rotacional no eixo B localizado no cabeçote além de um movimento rotacional no eixo A localizado na mesa.

Os centros de usinagem do tipo (a) permitem que este tipo de configuração seja aplicada em máquinas convencionais. Ou seja, pode-se adaptar eixos rotativos na mesa de uma máquina convencional e transformá-la em uma máquina com 5 eixos com as características do tipo (a) (LEE, *et. al.*, 2002)

A vantagem deste tipo de máquina é que as cargas impostas sobre fuso são menores em relação a outros tipos de máquinas. Outra vantagem é a maior precisão na usinagem de contorno de formas circulares quando utilizado o eixo de rotação C (LEE, *et. al.*, 2002). Porém, peças grandes e pesadas não são adequadas a esse tipo de máquina, pois para a movimentação dos eixos rotacionais a máquina necessitará de grande torque, o que implica em um baixo desempenho de usinagem (LEE, *et. al.*, 2002).

Os centros de usinagem do tipo (b) são recomendadas para peças grandes e pesadas, pois o cabeçote que contém todos os eixos se movimenta em torno da peça, porém o cabeçote possui menor rigidez devido aos eixos rotacionais localizados no mesmo (LEE, *et. al.*, 2002).

Os centros de usinagem do tipo (c) possuem um eixo de rotação localizado no cabeçote (eixo B), e outro em sua mesa (eixo A). Ela pode ser utilizada em várias aplicações de usinagem e, em alguns casos, há variação de configuração da estrutura da máquina, fazendo com que o eixo C possa estar localizado na mesa da máquina. Esse tipo de configuração é considerado por

estar mais adequado para usinagem de peças cilíndricas e que possuem furos ou rebaixos em torno de sua periferia (LEE, *et. al.*, 2002).

A programação CAM é um dos pontos críticos do fresamento em 5 eixos, devido à forte dependência de interação homem/máquina. Colisões, durante o fresamento em 5 eixos simultâneos, são choques entre a ferramenta, sua haste ou seus dispositivos de fixação, com a peça, com os dispositivos de fixação da mesma, ou com algum componente da máquina. Interferências de corte, por sua vez, são contatos indesejados, de baixa intensidade, da ferramenta com a peça, que causam um leve dano na superfície usinada, podendo ser locais ou traseiras (GRAY, *et. al.*, 2006).

As trajetórias de ferramenta (*tool paths*) para o fresamento em 5 eixos simultâneos devem prover os dados a respeito do caminho a ser seguido pela ferramenta e, também, informar a forma como o eixo da ferramenta deve se comportar ao executar estas tarefas. As trajetórias para o fresamento em 5 eixos devem ser distribuídas de forma a varrer toda a superfície a ser usinada. A ferramenta, por sua vez, ao percorrer essa superfície, deve fazê-lo de forma a remover o máximo de material sem que haja interferências de corte ou colisões. Assim, a geração de trajetórias para o fresamento em 5-eixos, de maneira geral, pode ser dividida em duas partes (CHIOU, 2005).

A primeira parte compreende a definição dos pontos de contato ferramenta-superfície (*CC Cutter Contact*); seu seqüenciamento é definido pontos ao longo de toda a superfície pelos quais a ferramenta deverá passar tangenciando a mesma. Posteriormente, haverá a conversão para os pontos de localização da ferramenta (*CL Cutter Location*). O CL é baseado no ponto de contato ferramenta-superfície e na orientação do eixo da fresa. Para uma fresa de topo esférico, por exemplo, é o centro de sua ponta esférica (Figura 7). Ou seja, corresponde à distribuição dos trajetos ao longo da superfície, e o sentido de avanço da ferramenta.

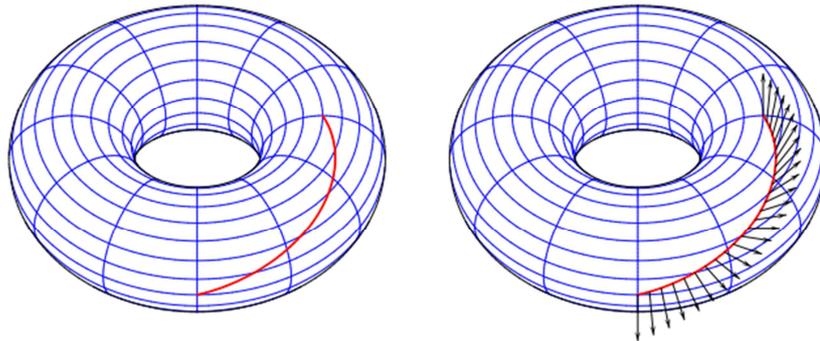


FIGURA 7– DETERMINAÇÃO DOS PONTOS AO LONGO DA SUPERFÍCIE NORMAL A FERRAMENTA (RIDA; SHIQIAO, 2013)

A segunda parte engloba a determinação da orientação do eixo da ferramenta. É esta etapa que define como a ferramenta deve ser inclinada com relação à peça, e conseqüentemente, qual a configuração dos eixos de rotação (Figura8).

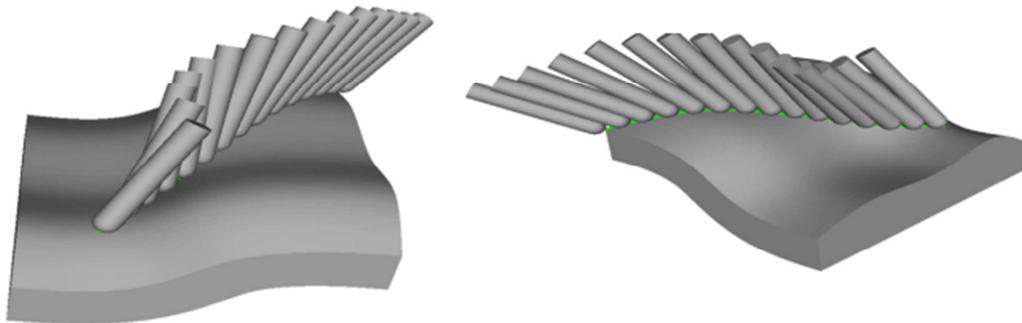


FIGURA 8 – ORIENTAÇÃO DO EIXO DA FERRAMENTA EM RELAÇÃO À PEÇA (RIDA;SHIQIAO, 2013)

Os métodos de trajetória de ferramentas de corte comumente usados podem ser classificados como(CHIOU, 2005):

- Isoparamétricos: neste método, as trajetórias são geradas com base nas curvas “u” e “v” da superfície. Possui como vantagem maior simplicidade matemática. Uma desvantagem deste método é a alta dependência no que diz respeito ao modo de construção da superfície e de seu grau de discretização.

- Isoplanares ou APT65: as trajetórias geradas por esses métodos são feitas a partir de interseções entre a superfície a ser usinada e um conjunto de superfícies paralelas, superfícies-guia (*drive surfaces*), que a seccionam. Excluem, estes, a necessidade de intensa atividade matemática, além de não lidarem bem com conjuntos de superfícies.
- Cartesianos: estes calculam os caminhos a serem percorridos pela ferramenta a partir de projeções de entidades geométricas sobre a superfície a ser usinada. São encontrados na maioria dos sistemas CAM para a geração de programas para a usinagem em 5-eixos. As vantagens desse método consistem em sua maior flexibilidade com relação aos padrões de movimentação ao longo da superfície e no fato de lidarem melhor com as transições entre superfícies (CHIOU, 2005).

Com relação ao método de orientação do eixo da ferramenta e que possui vários métodos encontrados na literatura, o método de Sturz ou o método da ferramenta inclinada é o método preferido dos desenvolvedores de aplicações para fresamento 5 eixos (CHIOU, 2005).

Isso se deve em função de sua simplicidade computacional relativa aos demais métodos desenvolvidos até então. Nesse método, a ferramenta é inclinada num ângulo arbitrário com respeito ao vetor normal local da superfície usinada (Figura 9).

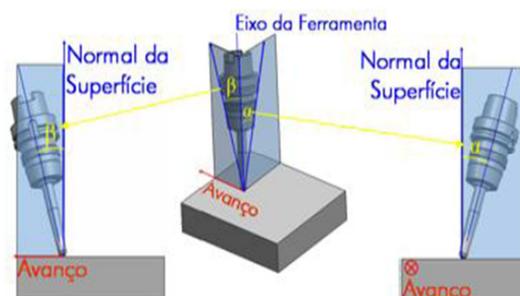


FIGURA 9 - INCLINAÇÕES PROGRAMÁVEIS NO MÉTODO DA FERRAMENTA INCLINADA
(GRAY ET. AL. 2001)

Na Figura 9, podemos observar que quanto menor for os ângulos, maior o risco de interferência de corte, mas, em contrapartida, quanto maiores forem estes,

maiores cristas serão geradas, aumentando a necessidade de passes adicionais (GRAY *et. al.* 2001).

Balasubramaniam *et. al.* (2000), conclui que diversos ângulos são testados até que se chegue à menor inclinação possível onde não ocorreriam interferências, tornando este processo muito dependente da interação do homem. É necessário verificar minuciosamente os caminhos de ferramenta e, se identificada alguma interferência, o programa deve ser refeito. Esses passos tornam a geração de programas morosa e as trajetórias geradas geralmente carecem de otimização.

Segundo Gray *et. al.* (2001), podem ser encontradas informações a respeito de novos métodos para geração da trajetória da ferramenta em 5 eixos, como os métodos multipontos, eixo principal e eixo principal modificado. Entretanto, esses métodos têm limitações em sua aplicação nos sistemas em virtude da falta de robustez e complexidade de utilizá-los nos sistemas CAD/CAM.

Considerando o fresamento 5 eixos, a ferramenta pode percorrer caminhos com inclinações na ferramenta, a fim de obter melhor posicionamento da mesma, a ferramenta pode obedecer a uma inclinação conforme o vetor normal à superfície (Figura 10) (ENDL; JALE, 2006).

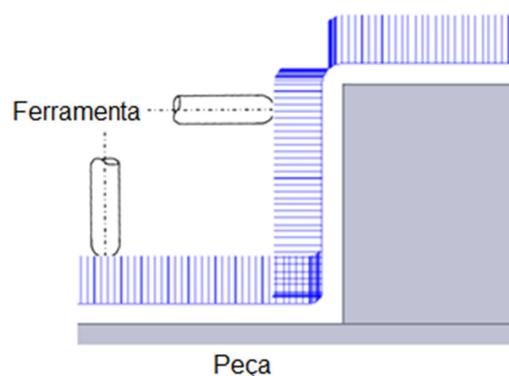


FIGURA 10 - MOVIMENTO DA FERRAMENTA EM RELAÇÃO AOS VETORES PARALELOS AO SEU EIXO (ENDL; JALE, 2006)

A Figura 10 apresenta um exemplo da trajetória da ferramenta com diferentes inclinações.

A movimentação de um ponto A para um ponto B, na trajetória em 5 eixos, pode ocasionar deslocamentos translacionais e rotacionais simultaneamente ou não. A Figura 11a exemplifica a usinagem sem rotação e posicionamento entre a ferramenta e a peça (fresamento 3 eixos). A Figura 11b exemplifica uma usinagem onde ocorre movimento rotacional em torno do eixo Y. A Figura 11c, uma usinagem em torno do eixo X. Essas rotações posicionais podem ocorrer simultaneamente e, dependendo da concepção da máquina, podem ocorrer pela rotação da ferramenta, pela rotação da peça ou pela rotação de ambas (BOUJELBENE, *et. al.*, 2007).

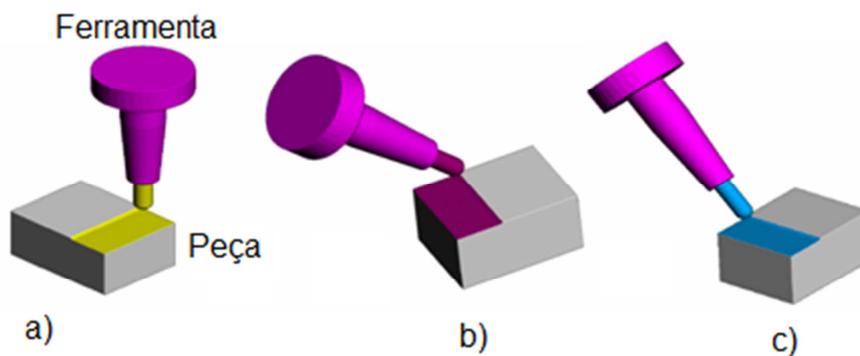
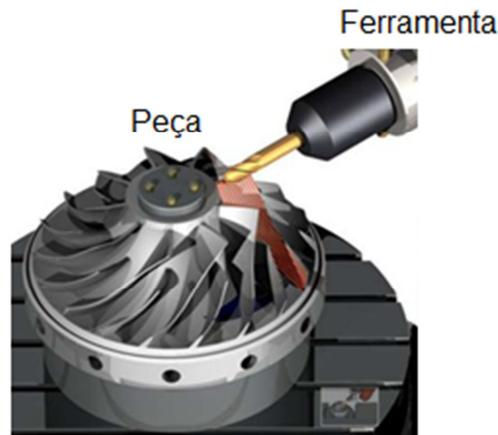


FIGURA 11 - DIFERENTES EIXOS DE INCLINAÇÃO ENTRE O PAR FERRAMENTA-PEÇA
(BOUJELBENE, ET. AL., 2007)

Nesta figura podemos observar as varias possibilidade de inclinações da ferramenta no fresamento 5 eixos simultâneos favorecendo o contato ferramenta peça.

Uma estratégia de usinagem muito utilizada no fresamento 5 eixos é denominada “Swarf”. Esta estratégia permite fresar com a lateral da ferramenta, enquanto percorre o contorno da peça, podendo melhorar o acabamento da peça usinada devido ao maior contato da superfície da ferramenta na peça (Figura 12) (DELCAM, 2013).



*FIGURA 12 - USINAGEM COM A LATERAL DA FERRAMENTA EM ESTRATÉGIA “SWARF”
(DELCAM, 2013)*

A Figura 12 mostra o fresamento de uma turbina utilizando em uma estratégia de corte a inclinação da ferramenta de modo que o fresamento seja feito com a lateral da ferramenta estratégia “SWARF”.

Conforme Langeron e Bourdet (2004) concluíram em seu estudo, há necessidade de novos desenvolvimentos para cálculo das curvas de interpolação em 5 eixos, a fim de diminuir os pontos de controle e os pontos com descontinuidade das trajetórias da ferramenta, além da necessidade de buscar melhor controle das movimentações simultâneas dos eixos lineares em combinação com os eixos angulares.

Contudo, pode-se observar uma gama de benefícios como usinagem em 5 eixos, mas a grande maioria das peças podem ser usinadas por 5 eixos na configuração de eixos posicionados, ou seja, não sendo necessário a usinagem dos 5 eixos simultâneos.

Para a programação em máquinas CNC com mais de 5 graus de liberdade, é indispensável à utilização de sistemas CAD / CAM. As primeiras aplicações de computadores para auxiliar as etapas de engenharia tiveram início na década de 1.950, quando o Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) iniciou a discussão sobre a tecnologia CAD/CAM. Os sistemas CAD desta geração se limitavam à descrição de entidades geométricas em duas dimensões, à criação

e manipulação de desenhos em terminais gráficos monocromáticos (SARAVANAN, *et. al*, 2005).

Os sistemas CAD propiciam várias vantagens, tais como (SARAVANAN, *et. al*, 2005):

- Possibilidade de envio ou recebimento de desenhos por processos eletrônicos;
- Melhor gerenciamento dos desenhos;
- Precisão do dimensionamento;
- Maior rapidez na recuperação, modificação ou atualização de desenhos.

A utilização de sistemas CAD/CAM foi, por anos, limitada à aplicação em grandes empresas, como aeroespacial e automobilística. Isto ocorria, direta ou indiretamente, pelos custos envolvidos, desde *software* e *hardware* até a qualificação da mão de obra, requerendo usuários com maior grau de instrução. Ao final da década de 1.990, com o desenvolvimento de um sistema operacional robusto para aplicação em PCs (Windows NT), houve uma migração das empresas que desenvolviam seus sistemas CAD/CAM baseados em sistema operacional UNIX. Este fato, além de reduzir o custo de *hardware*, reduziu também a necessidade de usuários extremamente especializados (HONG *et al.*, 2003).

Por sua vez, os custos relacionados diretamente aos *softwares* CAD/CAM também estão bastante acessíveis atualmente, tornando sua utilização viável, mesmo para pequenas empresas, isto devido à concorrência de mercado e à própria evolução desta tecnologia. A década de 1.970 marcou uma nova geração dos sistemas CAD, o desenvolvimento de técnicas computacionais para a representação de objetos tridimensionais (SOUZA, COELHO, 2003).

Os sistemas CAD não se restringem apenas à geração e manipulação de desenhos em duas dimensões. Este recurso é considerado somente uma funcionalidade destes sistemas e representa apenas uma pequena parcela dos possíveis benefícios a serem obtidos com a utilização desta tecnologia. Hoje,

um *software* CAD, pode representar uma potente e indispensável ferramenta para a indústria moderna, permitindo, além da geração de desenhos 2D (SOUZA, COELHO, 2003):

- Modelar produtos tridimensionais com formas complexas;
- Realizar análise de forma geométrica para auxiliar a manufatura;
- Realizar análise de interferências entre peças e conjuntos-montado;
- Definir volume e centro de massa do produto;
- Comunicação com outros *softwares*, através de interfaces padronizadas.

Devido à evolução da tecnologia necessária para o desenvolvimento dos sistemas CAD/CAM atingindo seu ápice, a facilidade de utilização destes sistemas, devido à qualidade de sua interface, passa a ser um foco importante na concorrência entre diferentes fornecedores, o desenvolvimento de *software* e *hardware*, se dá de forma mais efetiva.

Contudo o processo de modelamento do produto no sistema CAD possibilita a transferência desta geometria para o sistema CAM, visando à geração de programas NC para a manufatura. Na transferência de dados do sistema CAD para o sistema CAM, utilizam uma malha de triângulos gerada sobre a geometria original do CAD e que se aproxima da representação geométrica real através de um valor de tolerância para a geração de programa que serão utilizados nos centros de usinagem (SOUZA, SCHUTZER, 2004).

Os sistemas CAM permitem a geração de programas NC para operações de torneamento, eletro-erosão e fresamento, que corresponde a sua principal aplicação. Nas operações de fresamento, pode-se destacar softwares CAM para geração de usinagens simples com 2 eixos de movimentação, usinagens com três eixos e usinagens mais complexas com até cinco eixos programáveis.

Em geral, os sistemas CAM geram os programas NC através de segmentos de retas, utilizando os comandos G01. Na usinagem de formas complexas, o comprimento destes segmentos está relacionado com a tolerância utilizada no

CAM para cálculo dos programas, associado ao grau de curvatura da superfície do produto.

Para a geração de programas NC utilizando um sistema CAM, o usuário deverá possuir inicialmente o modelo geométrico a ser usinado, definir as dimensões do bloco de matéria prima, definir os parâmetros tecnológicos e por fim, definir e calcular as trajetórias da ferramenta.

Após o cálculo do percurso da ferramenta realizado pelo *software* CAM, este deverá ser codificado em comandos, os quais devem ser interpretados e transformados pelo CNC da máquina em movimentações de eixos segundos as características dos centros de usinagem. Cada sistema de máquina - CNC envolve diferentes possibilidades de movimentações de seus eixos, troca de ferramentas, entre outras.

Desta forma, o cálculo inicial no sistema CAM gera um arquivo genérico, sem estas especificações; este arquivo é conhecido como *Cutter Location File* (CLF). Após esta etapa, o programa genérico deverá ser formatado de acordo com as características específicas do equipamento a ser utilizado.

O pós processador é o *software* que realiza esta conversão, transformando o arquivo CLF em um programa NC específico para uma dada comunicação Máquina - CNC. Portanto, dois elementos são necessários para o pós-processamento:

1. Trajetória de ferramenta calculada pelo CAM em formato computacional;
2. Pós-processador - programa computacional que lê o arquivo CFL e o converte em um programa para ser executado em uma dada combinação máquina - CNC.

O pós-processador possibilita a utilização de qualquer arquivo CLF para qualquer configuração de equipamento (máquina - CNC), desde que as configurações dos eixos da máquina e do arquivo CLF sejam compatíveis (SOUZA, SCHUTZER, 2004).

2.3 ANÁLISE DE RUGOSIDADE EM SUPERFÍCIES USINADAS

A rugosidade superficial trata-se de um tipo de erosão microscópica deixada pela usinagem, que são imperceptíveis ao olho humano. Esta rugosidade ou acabamento superficial está diretamente ligado a afiação e tipo de ferramenta utilizada. Por este motivo, melhores resultados são obtidos com ferramentas de corte adequadas e afiadas com precisão para cada tipo e dureza de material a ser usinado (COSTA, GOMES, 2010).

As superfícies dos componentes mecânicos devem ser adequadas ao tipo de função que exercem. Por esse motivo, a importância do estudo do acabamento superficial aumenta à medida que crescem as exigências do projeto. Superfícies de componentes deslizantes, como o eixo de um mancal, devem ser lisas para que o atrito seja o menor possível. Essas exigências de acabamento não são tão rigorosas no caso das superfícies externas da tampa e da base de um mancal por exemplo (AGOSTINHO *et. al.*, 2004).

Os diferentes processos de fabricação de componentes mecânicos determinam acabamentos diversos nas suas superfícies. Obviamente, a produção de superfícies lisas exige, em geral, custo de fabricação mais elevado. No entanto, essas superfícies por mais lisas que se apresentem visualmente, apresentam irregularidades. Essas irregularidades compreendem dois grupos conhecidos de erros: erros macrogeométricos e erros microgeométricos (COSTA, GOMES, 2010).

Os chamados erros macrogeométricos são os erros de forma, verificáveis por meio de instrumentos convencionais de medição, como micrômetros, relógios comparadores, projetores de perfil etc. Entre esses erros, incluem-se divergências de ondulações, ovalização, retilidade, planicidade, circularidade etc (COSTA, GOMES, 2010).

Durante a usinagem, as principais causas dos erros macrogeométricos são (COSTA, GOMES, 2010):

- Defeitos em guias de máquinas-ferramenta;
- Desvios da máquina ou da peça;
- Fixação errada da peça;
- Distorção devida ao tratamento térmico.

Já os erros microgeométricos são as rugosidades superficiais que nada mais são do que de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro (COSTA, GOMES, 2010).

A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos como (COSTA, GOMES, 2010):

- Qualidade de deslizamento;
- Resistência ao desgaste;
- Possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- Resistência à corrosão e à fadiga;
- Vedação;
- Aparência.

As principais causas dos erros do tipo rugosidade são imperfeições nos mecanismos das máquinas, vibrações no sistema peça-ferramenta, desgaste das ferramentas e o próprio método de conformação da peça. Essa constatação é feita através da análise da grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade (COSTA, GOMES, 2010).

Para medir a rugosidade superficial o sistema básico de medida adotado é o da linha média M. Nesse sistema, todas as grandezas da medição da rugosidade são definidas a partir do seguinte conceito de linha média: linha média é linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo,

seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem (l_e). A Figura 13 abaixo ilustra como funciona esse mecanismo de cálculo (COSTA, GOMES, 2010).

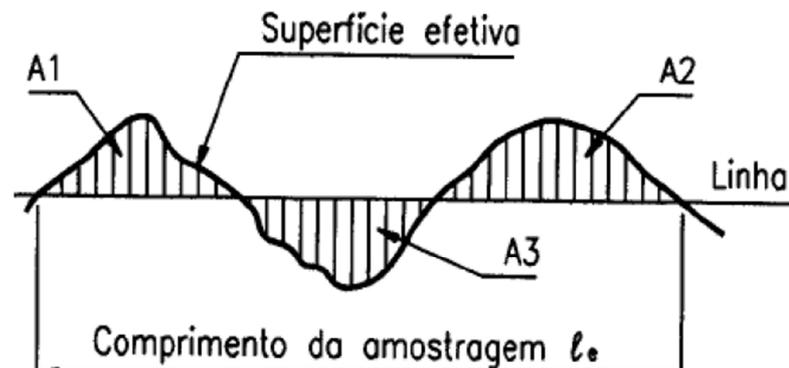


FIGURA 13 – CÁLCULO RUGOSIDADE ATRAVÉS DO SISTEMA M

$$A1 + A2 = A3$$

Na qual:

A1 e A2 são as áreas acima da linha média e A3 é a área abaixo da linha média.

A superfície de peças apresenta perfis bastante diferentes entre si. As saliências e reentrâncias (rugosidade) são irregulares. Para dar acabamento adequado às superfícies, é necessário, portanto, determinar o nível em que elas devem ser usinadas. Ou seja, deve-se adotar um parâmetro que possibilite avaliar a rugosidade (ALVES, 2002).

O parâmetro de rugosidade média é denotado por R_a e faz a média aritmética dos valores absolutos das distâncias h_i do perfil real ao perfil médio como mostrado na Figura 14 (COSTA, GOMES, 2010).

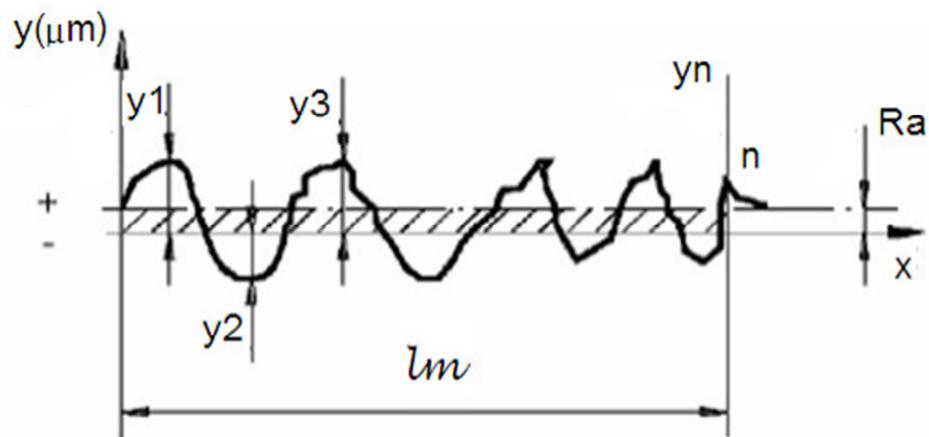


FIGURA 14 – RUGOSIDADE MÉDIA (RA)(COSTA, GOMES, 2010).

$$Ra = \frac{1}{l} \int_n^1 |y_i| dx$$

Já o parâmetro de rugosidade máximo, R_y , é definido como sendo o maior dos valores de rugosidade parcial, Z_i , que se apresenta no percurso de medição (l_m). No caso da Figura 15, o maior valor parcial é Z_3 .

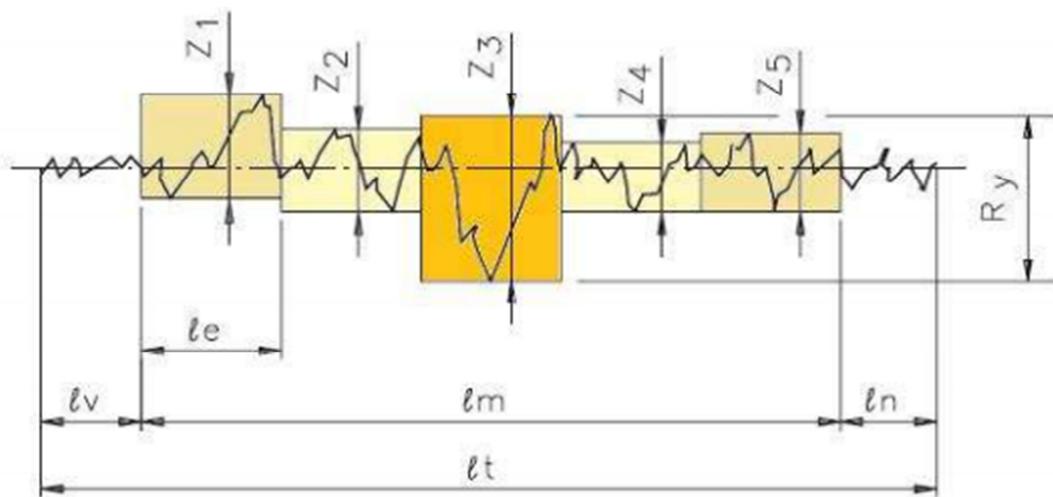


FIGURA 15 - RUGOSIDADE MÁXIMA, R_y , DEFINIDA PELA RUGOSIDADE PARCIAL (NESTE CASO Z_3)(COSTA, GOMES, 2010).

$$R_5 = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5}$$

A rugosidade R_5 corresponde a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial, Z_i , ao longo do comprimento de medição, l_m . A equação acima mostra a relação desse parâmetro no caso ilustrado na Figura 15.

2.4 FATORES ECONÔMICOS NA USINAGEM

A evolução dos processos de usinagem acompanhou, ao longo dos tempos, o desenvolvimento de vários setores da indústria, como a engenharia de produção e a engenharia de produtos. Neste último campo, é importante citar a atenção dada à flexibilidade da produção, à diminuição dos tempos de preparação e à constante preocupação em fabricar com o menor custo possível (SUN *et. al.*, 2006; ALMEIDA, 2003).

Os novos projetos de produtos quase sempre implicam peças de geometria complexa, o que exige novos requisitos e soluções dos fabricantes de moldes e matrizes e, por conseqüência, dos fabricantes de máquina-ferramenta, software de programação e ferramentas de corte (SUN *et. al.*, 2006).

É na manufatura que muitas indústrias têm buscado suporte para reduzir tempo, custos e prazos. Por isso, os investimentos em novas tecnologias como máquinas-ferramenta CNC, capazes de usinar peças complexas de pequenas dimensões e fabricadas em materiais endurecidos, são constantes. O desafio hoje é encontrar soluções que aperfeiçoem os processos produtivos, e os tornem mais enxutos e flexíveis (LEE, 2006).

A revisão teórica sobre os aspectos econômicos da usinagem está fundamentada, em aplicar formulações com intuito de estratificar variáveis que influenciam na produtividade e custos do processo de fabricação de peças usinadas (DINIZ, *et al.* 2006).

A condição ideal de otimização de usinagem consiste na redução de custos e nos tempos de fabricação, com o aprimoramento dos processos de fabricações, auxílio de novas tecnologias, novos dispositivos, adequações operacionais. A correta especificação e determinação do conjunto peça

ferramenta, bem como a seleção da velocidade adequada de corte de uma peça são fatores preponderantes para uma usinagem eficiente e, sobretudo, econômica para a peça e para o sistema. A correta seleção da velocidade de corte é um fator de extrema importância, pois estão nesta variável inserido questões como: produtividade, gasto, balanceamento do sistema e qualidade do produto. (DINIZ, *et al.* 2006)

Segundo Diniz (2006), existe uma velocidade crítica de usinagem onde a velocidade escolhida sempre deve ser superior à velocidade crítica, evitando assim diversos fenômenos causadores dos desgastes da ferramenta.

Se a velocidade de corte estabelecida é imediatamente superior a velocidade crítica logo ocorreram poucos desgastes na ferramenta propiciando assim uma longa vida à ferramenta. Porém o tempo de corte será alto ocasionando uma baixa produtividade e a princípio aumento nos custos de utilização da máquina e do operador. Entretanto, deve-se considerar que os tempos passivos, referindo-se especificamente aos de troca de ferramentas, será reduzido (DINIZ, *et al.* 2006).

Se a velocidade de corte estabelecida é muito superior à velocidade crítica logo ocorrerão grandes desgastes na ferramenta, propiciando assim, uma vida útil da ferramenta reduzida. Porém, o tempo de corte será baixo, com alta produtividade e altos custos de ferramental. Os tempos passivos, referindo-se especificamente aos de troca de ferramentas também serão altos (DINIZ, *et al.* 2006).

Portanto, existe uma velocidade intermediária entre uma velocidade crítica e uma velocidade muito superior à crítica. A determinação desta velocidade é a busca pela situação de trabalho ideal do conjunto peça ferramenta (DINIZ, *et al.* 2006).

A condição de mínimo custo é trabalhar com a velocidade de mínimo custo (V_{cmc}) e a condição de máxima produção exige trabalhar com a velocidade máxima de produção (V_{cmxp}), onde V_{cmxp} é sempre maior que V_{mc} , onde

sempre deve-se considerar situações de contorno como processo, estado do equipamento, qualidade da peça, dispositivos de fixação, etc. (DINIZ, *et al.* 2006).

Entendem-se como propriedades de usinagem de um material, aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem, tais como a vida da ferramenta, o acabamento superficial da peça, o esforço de corte, a temperatura de corte, a produtividade e as características do cavaco. Pode-se ter um material que tenha uma boa usinabilidade quando se leva em conta uma propriedade de usinagem, como, por exemplo, a vida da ferramenta e não possuir boa usinabilidade quando se leva em conta outra propriedade, como por exemplo, a rugosidade da peça usinada (DINIZ, *et al.* 2006).

2.5 MÉTODOS DE ANÁLISE DE INVESTIMENTO

Um investimento, para qualquer empresa, é um gasto feito visando gerar um fluxo de caixa de benefícios futuros, usualmente superior a um ano. Atualmente, em função da própria dinâmica do negócio organizacional, as técnicas de análise de investimento estão sendo usadas, tanto para investimentos de porte, associados a longos horizontes de planejamento, como também para operações de curto prazo. A decisão de fazer investimento de capital é parte de um processo que envolve a geração e avaliação das diversas alternativas que atendam às especificações técnicas do investimento (BREALEY, MYERS, 2005).

No entanto, Brealey e Myers (2005), corroboram dizendo que “as decisões de investimentos são as decisões mais importantes feitas pelas corporações”. A escolha de projetos e o nível de investimentos não são críticas só para os acionistas da empresa, mas também para o bem-estar econômico da sociedade como um todo.

Por meio de pesquisas, empresas utilizam um método de estimativa de avaliação da rentabilidade para “todos” os projetos no processo de seleção e análise de investimento efetuado. Também, observou-se que empresas de complexo industrial estabelecem um limite mínimo de rentabilidade (ROI – *Return on Investment*) para a realização de seus projetos de investimentos, estando este nível entre 11% e 20% (BIEGER, PUDEL, 2010).

Entretanto, aqueles projetos com retorno abaixo de níveis estabelecidos são rejeitados, e os projetos acima desse limite são efetuados. Para algumas empresas, esse nível de rentabilidade somente varia em função da natureza do produto ou da produção. Conclui-se, assim, que as empresas não investem em projetos sem que tenham um mínimo de retorno sobre o capital investido (BREALEY, MYERS, 2005).

Desta forma, enfatiza-se que a avaliação de projetos deve contemplar uma abordagem patrimonial e outra de rentabilidade, ligada ao valor de oportunidade dos capitais investidos; vinculada aos fluxos financeiros (BOKHORST, SURESH, 2002).

Brealey e Myers (2005) lembram que a teoria financeira recomenda a utilização de métodos de rentabilidade, baseados no princípio do desconto, que são os chamados métodos de fluxos de caixa descontados, os quais consideram o valor do dinheiro no tempo, considerando todos os fluxos de caixa associados a um determinado projeto de investimento ao longo de sua vida útil.

Já Bokhorst e Suresh (2002) salientam que, dentre os critérios recomendados pela teoria financeira, os que consideram o dinheiro no tempo são o critério do valor presente líquido (VPL), o critério do índice de lucratividade (IL) e o critério da taxa interna de retorno (TIR).

No entanto, o VPL é o critério recomendado pela teoria financeira como sendo a melhor técnica para a seleção e avaliação de projetos de investimento e como sendo o único que maximiza a riqueza dos acionistas. Constatou-se ainda, que as empresas não utilizam os métodos de investimentos

recomendados pela teoria financeira, elas possuem como critério principal e secundário na seleção e avaliação de seus projetos de investimentos apenas a utilização da urgência do projeto ou da oportunidade de negócio (BREALEY, MYERS, 2005).

2.5.1 VALOR PRESENTE LÍQUIDO

O Valor Presente Líquido - VPL, também chamado Valor Atual Líquido, pode ser considerado como um critério rigoroso, de maneira geral, o melhor procedimento para comparação de projetos diferentes, mas com o mesmo horizonte em relação ao tempo (BREALEY, MYERS, 2005).

Este indicador é o valor no presente ($t=0$) que equivale a um fluxo de caixa de um projeto, calculado a uma determinada taxa de desconto. Portanto, corresponde, à soma algébrica das receitas e custos de um projeto, atualizados a uma taxa de juros que reflita o custo de oportunidade do capital. Assim sendo, o projeto será viável se apresentar um VPL positivo e na escolha entre projetos alternativos, com mesmo horizonte de tempo, a preferência recai sobre aquele com maior VPL positivo (BREALEY, MYERS, 2005).

O VPL de um fluxo de caixa pode ser calculado pela seguinte expressão (BREALEY, MYERS, 2005):

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+i)^t}$$

onde:

F_t = Fluxo de caixa líquido do projeto, no período t .

Se o valor do VPL for positivo, então a soma na data 0 de todos os capitais do fluxo de caixa será maior que o valor investido. Como se trabalha com estimativas futuras de um projeto de investimento, pode -se dizer que o capital

investido será recuperado, que será remunerado à taxa de juros que mede o custo de oportunidade do capital e que o projeto irá gerar um lucro extra, na data 0, igual ao VPL. (BREALEY, MYERS, 2005).

Portanto, o critério do VPL estabelece que enquanto o valor presente das entradas for maior que o valor presente das saídas, calculados com a taxa mínima de atratividade, que mede o custo de oportunidade do capital, o projeto deve ser aceito (BREALEY, MYERS, 2005).

VPL > 0 o projeto deve ser aceito;

VPL = 0 é indiferente aceitar ou rejeitar projeto;

VPL < 0 o projeto deve ser rejeitado.

Uma desvantagem deste indicador seja a dificuldade da escolha da taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade. Os pontos fortes do VPL são a inclusão de todos os capitais do fluxo de caixa e o custo do capital (BREALEY, MYERS, 2005).

2.5.2 TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)

A taxa interna de Retorno (TIR) faz com que o VPL de um projeto seja igual à zero. Representa o ponto de reversão da decisão de investir. Projetos com taxas de descontos (taxa mínima de atratividade) superiores à TIR devem ser rejeitados. Projetos cujos valores de taxa de desconto são inferiores aos seus valores de TIR devem ser aceitos (BOKHORST, SURESH, 2002).

A apuração da TIR é feita de maneira iterativa ou por métodos de interpolação. As planilhas eletrônicas e calculadoras financeiras possuem funções pré programadas, capazes de fazer tais iterações (BOKHORST, SURESH, 2002).

2.5.3 PERÍODO DE RECUPERAÇÃO DE CAPITAL – PAYBACK

O método do payback mede o tempo necessário para se ter de volta o capital investido, considerando-se a mudança de valor do dinheiro no tempo (efeito do custo de capital). O método também é conhecido como Payback descontado. Seu valor fornece indicativo do risco do investimento, ou seja, quanto maior for o payback mais tempo será necessário para se obter o capital investido de volta. Por outro lado, projetos com payback menor pode ser projetado um período curto de recuperação do capital investido e assim fica menos suscetível às flutuações do mercado (BREALEY, MYERS, 2005).

Existe também, outra metodologia de payback, denominada payback simples, cuja metodologia payback descontado tem como princípio. O payback simples é uma metodologia menos desenvolvida que o payback descontado, porém mede de uma forma menos precisa o tempo de retorno da capital investido. Essa metodologia é utilizada apenas para tomada de decisões a priori e sem grandes conseqüências, ou seja, só para efeito de conhecimento ou para nortear uma decisão (BREALEY, MYERS, 2005).

2.5.4 ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE

O índice de lucratividade compreende a relação entre o valor presentelíquido dos projetos e o módulo do valor presente dos desembolsos dos respectivos. Na prática, o Índice de lucratividade é o VPL por unidade investida. É representado em forma de porcentagem e sua interpretação é, resumidamente, quantos por cento cada unidade monetária rende (BREALEY, MYERS, 2005).

Para se comparar projetos pelo índice de lucratividade, deve-se considerar melhor, o investimento que possuir o melhor Índice entre eles, e deve-se considerar aceitável um investimento que tenha índice maior que zero, se for analisado separadamente (BREALEY, MYERS, 2005).

2.5.5 VALOR ANUAL EQUIVALENTE (VAE)

Dentre todos os métodos supracitados, o mais recomendado para se fazer análises de investimento é o método do VPL, ou seja, as decisões baseadas nesse método trazem informações mais precisas quanto ao retorno do investimento. Porém, o método só pode ser utilizado para projetos de horizontes iguais, pois quando utilizado para projetos de diferentes horizontes, o mesmo distorce os resultados, podendo conduzir o analista a tomar decisões erradas (BREALEY, MYERS, 2005).

Assim sendo, quando comparar projetos mutuamente excludentes e com vida útil diferenciada, evento bastante raro dentro das corporações, o critério VPL, deve ser adaptado de maneira a se obter seu equivalente anual (VAE Valor anual Equivalente). O VAE nada mais é do que a distribuição uniforme do VPL entre os anos de vigência do investimento, como mostrado abaixo (BREALEY, MYERS, 2005):

$$VAE = \frac{VPL \times i}{1 - (1 + i)^{-n}}$$

Onde:

VAE = Valor anual equivalente

VPL = Valor presente líquido

i = Taxa dos fluxos de caixa estimados

n = Vida Útil do projeto

2.6 INCORPORAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS

Bokhorste Suresh (2002) concluem que, para competir de forma efetiva, às empresas têm que inovar e melhorar suas vantagens competitivas continuamente. Essas inovações e melhorias são resultados de investimentos

em ativos tangíveis e intangíveis. Portanto os benefícios, decorrentes dessas novas tecnologias incorporadas pelas empresas, repercutem sob os aspectos mencionados, destacando-se, principalmente, os ganhos em produtividade, qualidade e competitividade para a melhoria da empresa no mercado em que atua.

Brealey e Myers (2005) corroboram dizendo que a busca do crescimento e da maximização do valor da empresa não se resume nem coincide com o lucro a qualquer preço e em curto prazo. Pois esse crescimento é o resultado de sofisticadas estratégias de longo prazo e de uma percepção, do decisor, de que o crescimento da riqueza só tem sustentação no tempo se sua imagem for positiva para a sociedade.

Bokhorste Suresh (2002) constataram que o aporte de novas tecnologias e a modernização ao processo administrativo e produtivo é uma preocupação constante e transparente dos empresários, tanto em projetos de reposição quanto em projetos novos.

Assim, empresas realizam investimentos em projetos novos, de reposição e investimentos em projetos para diferentes finalidades, as empresas destinam investimentos para a melhoria e modernização tecnológica, aperfeiçoando principalmente para suas máquinas e equipamentos para uma melhor qualidade e competitividade de seus produtos no mercado em que atuam, já que é tão competitivo (BORKHORST, SURESH, 2002).

2.7 MANUTENÇÃO EM CENTROS DE USINAGEM 3 E 5 EIXOS

Os centros de usinagem são equipamentos com alta tecnologia agregada, um plano de manutenção é destinado a estes centros de usinagem. O plano de manutenção dos centros de usinagem deve ser seguido de acordo com as determinações do fabricante do centro de usinagem, o seguimento deste plano

de manutenção contribui para a disponibilidade da máquina e seu bom funcionamento (ROMI, 2013).

Abaixo o plano de manutenção dos centros de usinagem que devem ser aplicado no seu dia-a-dia de forma a favorecer a produtividade e bom funcionamento do equipamento de forma continuada.

Toda e qualquer operação de centros de usinagem deve ser precedida de cuidadoso planejamento e preparação. Sempre verificar os procedimentos descritos nos manuais dos equipamentos antes de iniciar a operação. Observar atentamente todas as instruções de segurança e verificar quanto ao abastecimento de fluidos lubrificantes e de corte, suprimento de ar comprimido, disponibilidade de ferramentas (ROMI, 2013).

Devem ser verificados diariamente (ROMI, 2013):

1. Deslocamentos sobre guias sujas e não lubrificadas: Barramentos expostos são acumuladores de poeira e partículas, especialmente durante os períodos de inatividade como finais de semana por exemplo. Recomenda-se, portanto que antes de instalar um dispositivo sobre a mesa do centro de usinagem, seja executada uma limpeza com pano seco.
2. Fixação da ferramenta suja ou deformada: Durante períodos de inatividade como em um fim de semana, por exemplo, poeira e partículas se acumulam sobre os cones do porta-ferramenta. Portanto na retomada do trabalho é recomendável limpá-los com pano seco e aplicar o mesmo cuidado no interior do eixo-árvore. Não se deve por o centro de usinagem em ciclo sem antes verificar cuidadosamente os cones quanto à isenção de batidas, oxidação, pinos de fixação danificados ou soltos além de verificar a fixação e integridade dos insertos ou ferramentas.

3. Identificar ruídos e temperaturas anormais: É conveniente que o operador do centro de usinagem esteja atento a ruídos estranhos ou temperaturas anormais.
4. Identificar vazamentos e/ou consumo excessivo de óleos/fluidos: É imprescindível que o operador examine diariamente a unidade de lubrificação automática além da unidade hidráulica e tanque de fluido de corte a fim de assegurar a funcionalidade dos equipamentos. Grandes vazamentos podem ser facilmente identificados e visualizados ao aparecerem diretamente no piso da fábrica, mas podem existir vazamentos que escoem para o interior da máquina, portanto requerem maior atenção. Verificar igualmente as conexões pneumáticas a fim de evitar desperdícios com ar comprimido que não realiza trabalho algum ao ser jogado fora.
5. Medidas preventivas para longos períodos de inatividade: Os finais de semana com longos períodos de inatividade oferecem ótima oportunidade para ataques corrosivos, ou, no mínimo, escurecimento de partes retificadas dos centros de Usinagem. Por isso recomenda-se que sejam tomados cuidados especiais a fim de prolongar a vida útil da máquina, por exemplo: total remoção de cavacos, secagem de superfícies molhadas com fluido de corte, proteção das partes vitais com fluido protetivo ou papel especial. Além disso especial atenção em não deixar peças presas em dispositivos, ou placas, bem como jamais deixar cones presos ao eixo-árvore nos centros de usinagem. Para as peças de grande porte, como matrizes não acabadas, é desejável que os eixos sejam movimentados de forma a buscar o equilíbrio do centro de gravidade da máquina, ou seja, aproximadamente no meio do curso de cada eixo. Medidas como essas asseguram a preservação do equipamento.

6. Geometria: A geometria dos centros de usinagem guarda relação direta com a ancoragem ao solo. Uma máquina não chumbada a uma fundação adequadamente executada estará sujeita a vibração na usinagem e poderá sofrer empenamentos ao longo do tempo. Colisões podem afetar drasticamente a geometria dos centros de usinagem.

7. Nivelamento: Mesmo para um centro de usinagem rigidamente ancorada numa fundação devidamente apropriada o nivelamento não se mantém ao longo do tempo, considerado em torno de 6 meses. Isso ocorre devido a acomodação natural da massa da máquina mais peças e principalmente por conta das vibrações típicas de usinagem. Portanto, a fim de manter a precisão geométrica do equipamento em função das exigências de cada processo, recomenda-se revisão do nivelamento periodicamente observando a tolerância indicada nos manuais que acompanham o equipamento.

O plano de manutenção indicado pelo fabricante do centro de usinagem independe se possui 3 ou cinco eixos as mesmas medidas descritas acima devem ser adotadas, embora no caso dos centros de usinagem 5 eixos em caso de possibilidade de quebra o risco é maior devido esses centros de usinagem possuir 2 eixos a mais que os centros de usinagem 3 eixos.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem o objetivo de definir o método de pesquisa e descrever o desenvolvimento do trabalho experimental que permite avaliar a inserção do processo de fresamento 5 eixos para a fabricação de moldes.

O experimento envolveu a comparação dos processos de fresamento de um molde real, cedido por uma empresa fabricante de moldes do setor calçadista. Foram fabricados dois moldes denominados corpo de prova empregando ambos os processos de fresamento utilizando centros de usinagem 3 e 5 eixos.

O corpo de prova foi escolhido para avaliar a viabilidade da inserção de centro de usinagem cinco eixos no processo de fresamento de moldes, pois representa as dificuldades de fresamento de moldes em 3 eixos, como por exemplo: alto tempo de fabricação, alto custo, e baixa qualidade, a Figura 16 ilustra o as etapas de definição do trabalho experimental.

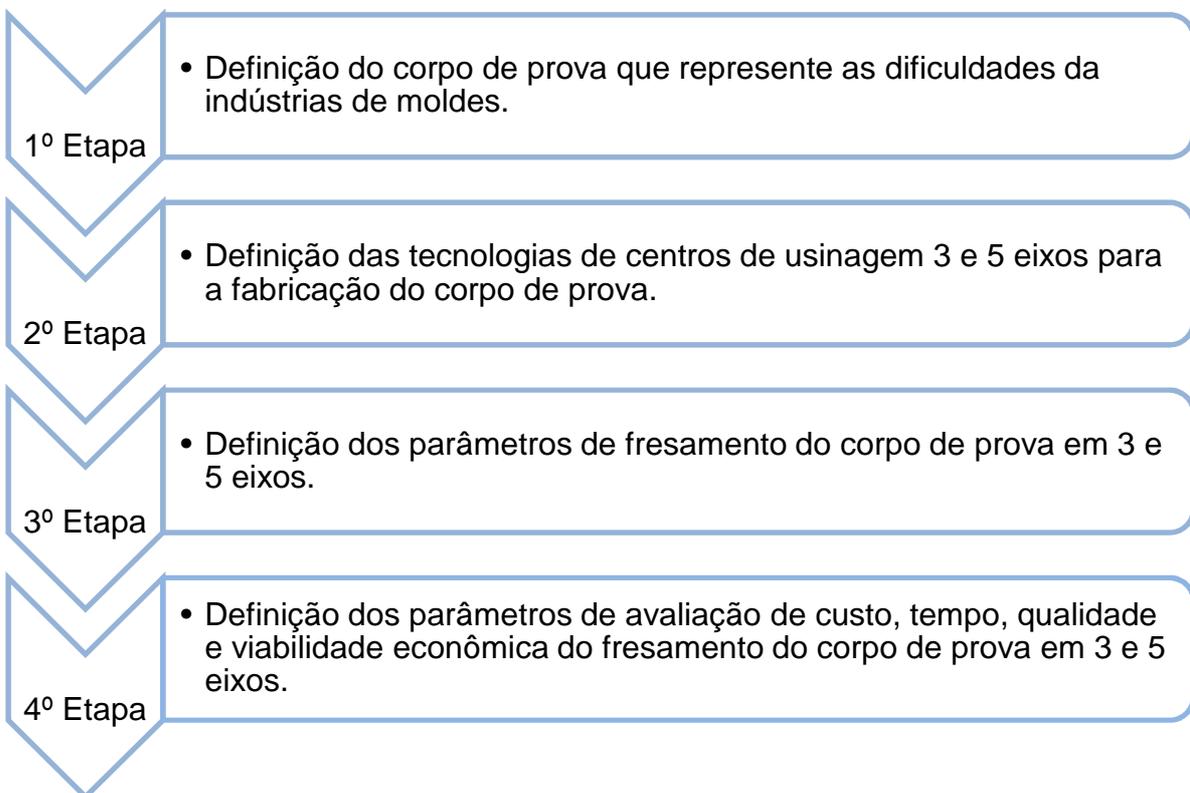


FIGURA 16 – ETAPAS DO MÉTODO DE PESQUISA.

O corpo de prova estudado possui uma característica de usinagem, na qual há a necessidade de se passar por varias intervenções humanas durante o processo de fresamento 3 eixos. O trabalho experimental foi realizado nas dependências de uma empresa fabricante de máquinas-ferramenta, em parceria com uma empresa que fornece software CAM, que foi responsável por gerar o programa de fresamento para ambos os processos 3 e 5 eixos.

3.1 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO EXPERIMENTAL

Após a definição das etapas descritas na Figura 16, foram analisados os tempos de fabricação, custo e qualidade do molde e viabilidade econômica. Após a fabricação dos corpos de prova, foi realizada uma avaliação entre os processos de fresamento 3 e 5 eixos. Para auxiliar na visualização do procedimento experimental realizado, a Figura 17 apresenta as etapas realizadas no trabalho experimental. O procedimento experimental está, então, subdividido nos tópicos de materiais e equipamentos, corpo de prova, parâmetros de fresamento e métodos de avaliação.

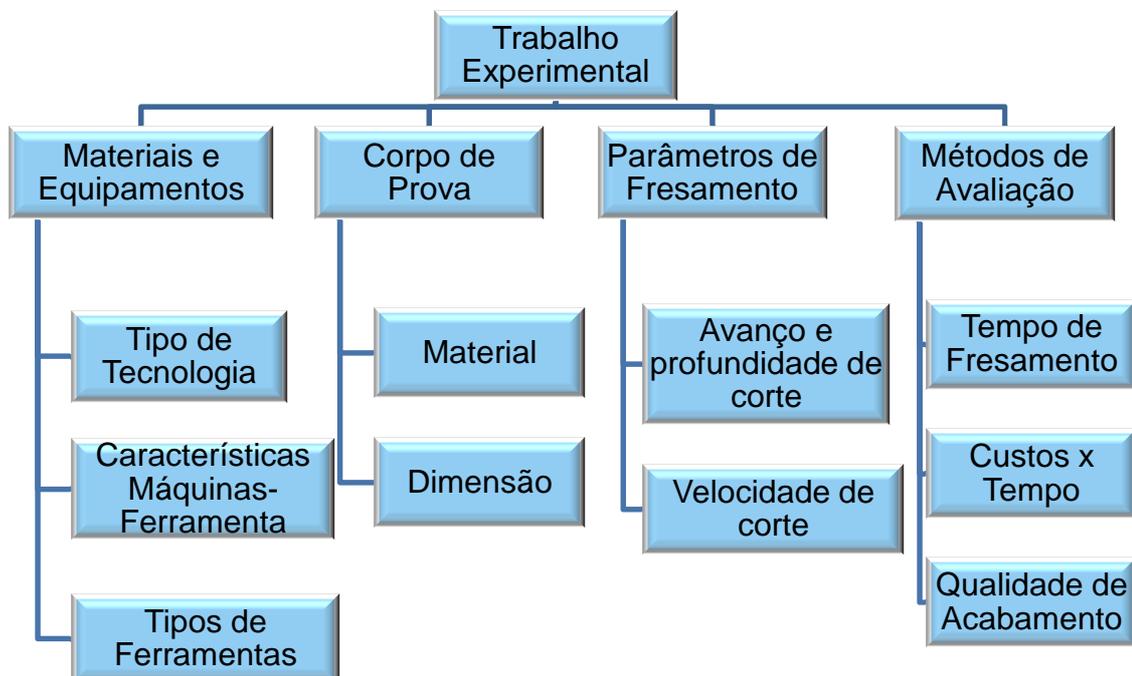


FIGURA 17 - ESTRUTURA DO TRABALHO EXPERIMENTAL

A estrutura do trabalho experimental foi definida conforme processo de fabricação do molde, ou seja, são procedimentos adotados por empresas fabricantes de moldes.

3.1.1 MÁQUINAS-FERRAMENTA

A definição da máquina ferramenta utilizada para a fabricação do corpo de prova utilizou como critério, centros de usinagem que possuam característica semelhante, de velocidade de avanço, velocidade no eixo árvore, cursos de eixos. O fresamento foi realizado em dois centros de usinagem vertical. O centro de usinagem escolhido para o fresamento em 3 eixos foi a ROMI D1000 AP DD V4.0 (Figura 18), para o fresamento em 5 eixos foi a DCM 620 - 5X (Figura 19), as especificações dos centros de usinagem estão apresentados na Tabela 2.

TABELA 1 – MÁQUINAS-FERRAMENTAS ROMI UTILIZADAS NO EXPERIMENTO

Máquinas-Ferramenta		
Modelo	ROMI DCM 620 5X V1.0	ROMI D 1000 AP DD V4.0
Curso	X = 620mm Y = 520mm Z = 460mm	X = 1020mm Y = 610mm Z = 640mm
Eixo B	-50 à +110°	-
Eixo C	360°	-
Transmissão eixo árvore	Direta	Direta
Cone	NBT40	NBT40
Rotação	12000 rpm	15000 rpm
Trocador de Ferramenta	32 Ferramentas	30 Ferramentas
Potência Spindle	12,5KW	18,5KW
Avanço máximo	X = 36000 mm/min Y = 36000 mm/min Z = 36000 mm/min B = 25 rpm C = 25 rpm	X = 40000 mm/min Y = 40000 mm/min Z = 40000 mm/min B = - C = -
Dimensões	Altura: 2.865 mm Largura: 2.795 mm Comprimento: 4.685 mm	Altura: 3.185 mm Largura: 2.490 mm Comprimento: 4.310 mm

Como pode se observar na Tabela 1 os centros de usinagem escolhidos permitem que o processo de fresamento 3 e 5 eixos possuem as mesmas velocidades de avanço, velocidade de corte e as mesmas ferramentas.



FIGURA 18 - FOTO ILUSTRATIVA ROMI D 1000 AP DD V4.0.

O centro de usinagem ROMI D1000 AP DD possui 3 eixos, é normalmente utilizado para a fabricação de moldes.



FIGURA 19 – FOTO ILUSTRATIVA ROMI DCM 620 5X V1.0.

O centro de usinagem ROMI DCM 620 – 5X, possui 5 eixos, utilizado para a fabricação de peças com alta complexidade que possuam a necessidade de usinagem em 5 eixos.

3.1.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

A matéria-prima dos corpos de prova foi o alumínio aeronáutico 7075. O alumínio 7075 dispõe de uma boa usinabilidade e estabilidade, assim como dureza e elevada resistência, necessários para grandes produções. Em comparação a outros materiais, o alumínio 7075 oferece benefícios como: cortar, tornear, fresar, perfurar e polir, de uma maneira mais fácil e rápida. Admite tratamentos de superfície é econômico, tenaz, duro, resistente á corrosão, soldável e reciclável (GGD METALS – ALUMÍNIO, 2013).

O alumínio 7075 vem se tornando um referencial para a fabricação de moldes para uma série de produtos plásticos, atendendo, desde componentes para a indústria automobilística até elementos para computadores, robótica, matrizaria, automação, brinquedos, entre outros a composição química do alumínio 7075 é dada pela tabela 1 (GGD METALS – ALUMÍNIO, 2013).

TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA ALUMÍNIO 7075

Composição Química - Alumínio 7075	
Cr (cromo)	0,28
Cu (cobre)	2
Fe (ferro)	0,5
Mg (manganês)	2,9
Mn (magnésio)	0,3
Ni (níquel)	0,05
Si (silício)	0,4
Ti (titânio)	0,2
Zn (zinco)	6,1
Zr+ti (zircônio + titânio)	0,25
Outros	0,05
Al (alumínio)	Restante

A tabela 2 mostra a composição do alumínio 7075, a definição de um bom tipo de alumínio é importante para a usinagem, pois influencia no resultado e qualidade do produto final.

Para a fixação da matéria-prima (*Blank* de alumínio), foi utilizado um sistema de fixação tipo morsa conforme ilustra a Figura 20.



FIGURA 20 - DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO GERARDI – ZERO POINT.

O sistema de fixação deve proporcionar rigidez de fixação entre mesa do centro de usinagem e a matéria prima que será usinada. Dispositivos de fixações não adequados podem ocasionar erros geométricos e vibrações durante o fresamento.

As ferramentas utilizadas para o fresamento em 3 e 5 eixos foram escolhidas para atender a necessidade de fresamento do corpo de prova. Foram utilizadas ferramentas de uso comercial, conforme ilustra a Figura 21.

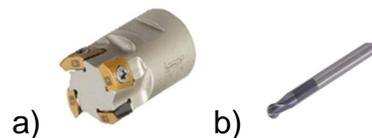


FIGURA 21– FERRAMENTAS UTILIZADAS NO EXPERIMENTO A) FRESA TOPO DIÂMETRO DE 16MM; B) FRESA ESFÉRICA DIÂMETRO DE 5MM

As ferramentas para a usinagem de moldes devem possuir boa rigidez, ou seja, no conjunto ferramenta e eixo árvore. As ferramentas devem ser escolhidas para atenderem os parâmetros de corte do molde como avanço de corte e velocidade de corte.

A Figura 22 apresenta a matéria prima (*Blank*) utilizado no experimento.



FIGURA 22 - BLANK DE ALUMÍNIO 7075 UTILIZADO NO EXPERIMENTO.

A matéria prima deve ser adquirida de acordo com as dimensões do molde.

Matérias primas, escolhida de maneira errada, como por exemplo, maior do que necessário e ou com irregularidades podem fazer com que o fresamento demande mais tempo do que o necessário.

3.1.2 SOFTWARES UTILIZADOS

O *software* utilizado para a programação do corpo de prova no fresamento em 5 eixos foi o *VISI Machining*, que é um software CAD/CAM com possibilidade de gerar programas NC em 3, 4 e 5 eixos. O *VISI Machining 5*. Para a usinagem em 3 eixos, foi utilizado o Software *EDGE CAM*.

3.1.3 CORPO DE PROVA

O corpo de prova utilizado nos ensaios de usinagem, conforme ilustrado na Figura 23 é um molde real de uma empresa fabricante de moldes e matrizes para o setor calçadista, com dimensões de 380mm x 180mm x 60mm. Este molde é representado por geometrias complexas, que necessitam de usinagens negativas, resultando em um alto tempo de fabricação.

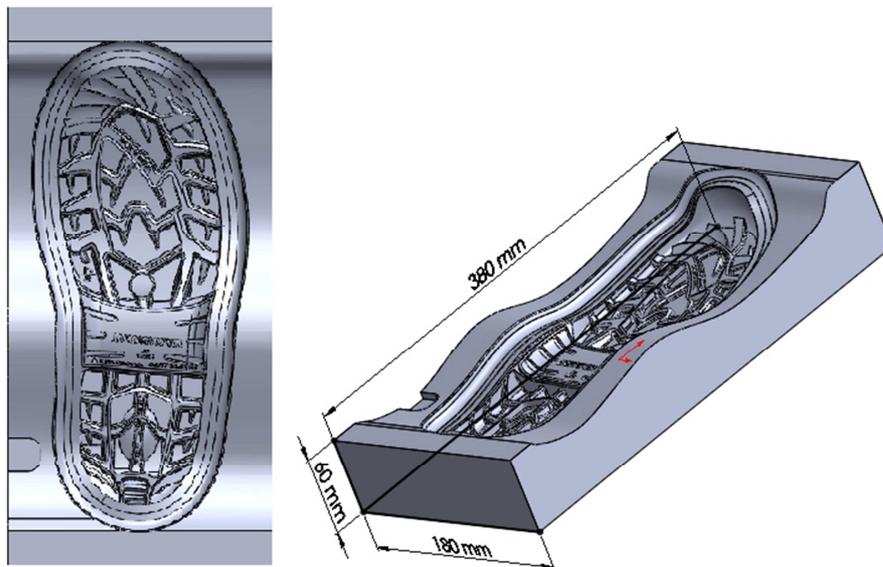


FIGURA 23 - CORPO DE PROVA

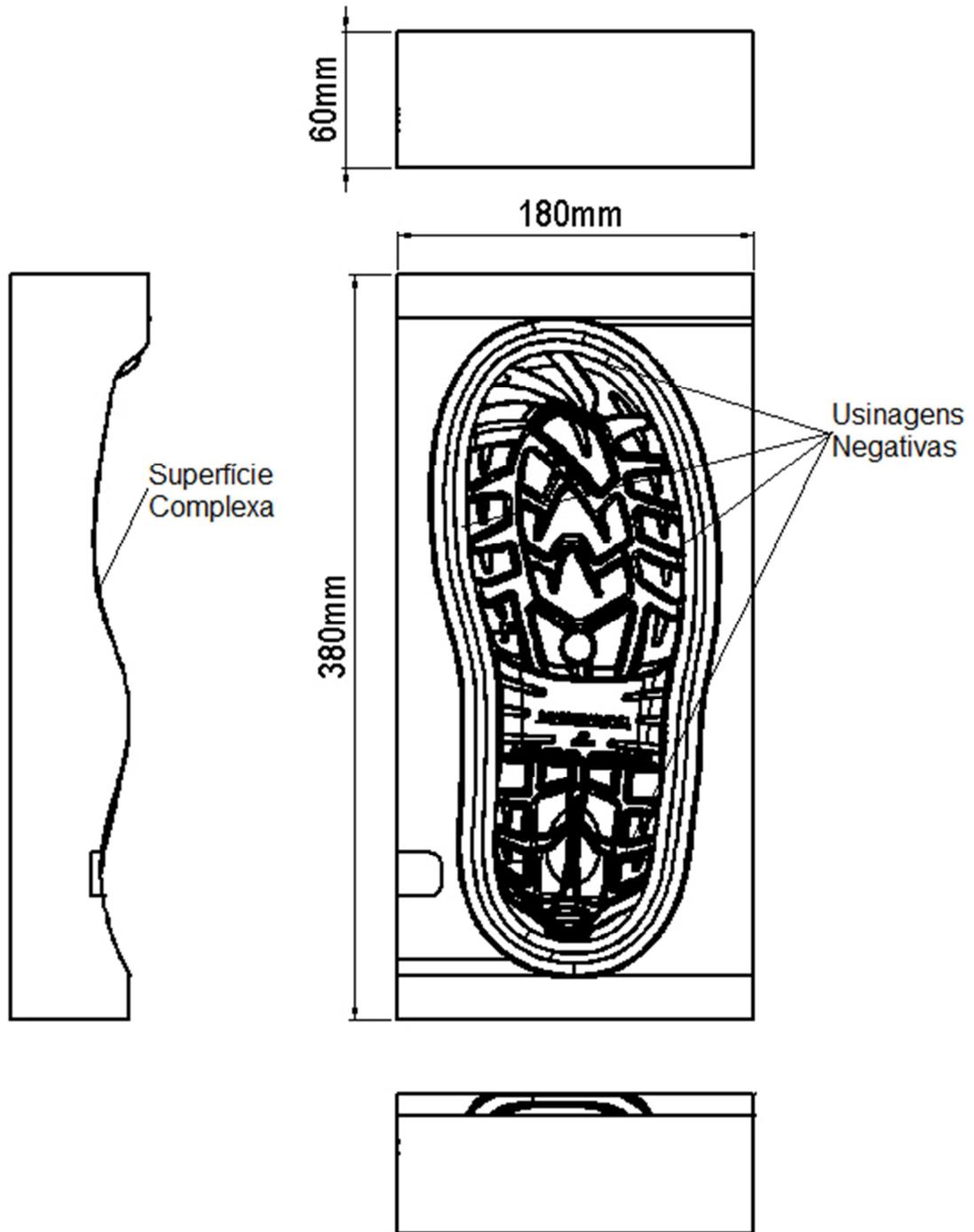


FIGURA 24 – DESENHO TÉCNICO DO CORPO DE PROVA

O molde foi escolhido devido a sua complexidade de fresamento em centro de usinagem 3 eixos as usinagens negativas (Figura 24), nas laterais internas do molde faz com que seja necessário vários reposicionamentos do molde durante o processo de fresamento, aumentando o tempo de fabricação.

3.1.4 PARÂMETROS DO PROCESSO DE FRESAMENTO

As Tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, as características dos processos de usinagem com 5 e 3 Eixos.

TABELA 3 – PARÂMETROS USINAGEM DO CORPO DE PROVAS EM 5 EIXOS.

Parâmetros de usinagem corpo de prova em 5 eixos				
Ferramenta [mm]	RPM	Avanço F[mm/min]	Operação	Estratégia de Corte
Fresa Topo Diâmetro 50mm	7000	4500	-Desbaste	-Traçar -Desbaste em espiral para fora
Fresa Topo Diâmetro 25mm	10000	4000	-Desbaste	-Desbaste em espiral para fora
Fresa Topo Diâmetro 16mm	11000	3000	-Desbaste	-Desbaste em espiral para fora
Fresa Esférica Diâmetro 10mm	12000	3600	-Desbaste	-Desbaste em espiral para fora
Fresa Esférica Diâmetro 6mm	12000	3600	-Redesbaste	-Helicoidal
Fresa Esférica Diâmetro 5mm	12000	2000	-Redesbaste	-Helicoidal
Fresa Esférica Diâmetro 4mm	12000	2400	Acabamento	-Raster

TABELA 4- PARÂMETROS USINAGEM DO CORPO DE PROVAS EM 3 EIXOS.

Parâmetros de usinagem corpo de prova em 3 eixos				
Ferramenta [mm]	RPM	Avanço F[mm/min]	Operação	Estratégia de Corte
Fresa Topo Diâmetro 50mm	7000	4500	-Desbaste	-Traçar -Desbaste em espiral para fora
Fresa Topo Diâmetro 25mm	10000	4000	-Desbaste	-Desbaste em espiral para fora
Fresa Topo Diâmetro 16mm	11000	3000	-Desbaste	-Desbaste em espiral para fora
Fresa Esférica Diâmetro 10mm	12000	3600	-Desbaste	-Desbaste em espiral para fora
Fresa Esférica Diâmetro 6mm	12000	3600	-Redesbaste	-Helicoidal
Fresa Esférica Diâmetro 5mm	12000	2000	-Redesbaste	-Helicoidal
Fresa Esférica Diâmetro 4mm	12000	2400	Acabamento	-Raster

As Tabelas 3 e 4 apresentam os parâmetros do processo de fresamento 3 e 5 eixos, os parâmetros escolhidos são de acordo com as características dos centros de usinagem material a ser fresado e o tipo de operação de fresamento.

3.1.5 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise sobre a decisão de investimento nas tecnologias de fresamento 3 e 5 eixos foi baseada no Valor Presente Líquido, método capaz de avaliar e comparar se a implementação de projetos deverá ser aceita ou rejeitada. As variáveis utilizadas para a análise da viabilidade econômica são:

- Horas máquina trabalhadas/ano: foi considerando uma jornada de trabalho de 44 horas semanais e um turno de trabalho.
- Disponibilidade de máquina: foi considerado um índice de 94% de máquina disponível para a produção, as horas improdutivas são aquelas para manutenção da máquina conforme estudado por Belinelli, Pilatti e Frasson (2009).
- Tempo de usinagem corpo de prova: tempo de usinagem do corpo de prova utilizando os processos 3 e 5 eixos.
- Peças produzidas / ano: é a quantidade de peças produzidas dividindo-se o total de horas para a fabricação do corpo de provas por o tempo disponível de máquina no ano.
- Preço de venda peça produzida: consideração do custo de venda final do molde, esse custo independe da tecnologia aplicada, pois é o custo de venda mercado.
- Custo da aquisição do centro de usinagem: custo do investimento para a fabricação do corpo de prova em 3 e 5 eixos.
- Receita de caixa: calculo da quantidade de peças produzidas por ano, assim com o preço de venda do corpo de prova.

O cálculo do VPL é dado pela seguinte expressão:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+i)^t}$$

Na qual:

F_t = Fluxo de caixa líquido do projeto, no período t , neste caso para a análise de viabilidade econômica um período de 5 anos.

i = Custo capital, foi considerado um custo de capital de 20% a.a.

Se o valor do VPL for positivo, então a soma na data zero de todos os capitais do fluxo de caixa será maior que o valor investido. Como se trabalha com estimativas futuras de um projeto de investimento, pode-se dizer que o capital investido será recuperado, que será remunerado à taxa de juros que mede o custo de oportunidade do capital e que o projeto irá gerar um lucro extra, na data 0, igual ao VPL.

Segundo os resultados do VPL considerando as tecnologias 3 e 5 eixos podem ser observados-se que:

- $VPL > 0$ o projeto deve ser aceito;
- $VPL = 0$ é indiferente aceitar ou rejeitar projeto;
- $VPL < 0$ o projeto deve ser rejeitado.

Considerando a utilização do VLP para a análise de viabilidade econômica de um projeto são: o custo de capital adotado no trabalho de 20% a.a.. A resposta em valor monetário é difícil responder se é melhor investir R\$100,00 para um VPL de R\$ 5,00 ou investir R\$ 10,00 para um VPL de R\$ 3,00.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 5 apresenta os resultados dos tempos de usinagem do corpo de prova usinado em ambas as tecnologias.

TABELA 5 – TEMPO DE USINAGEM CORPO DE PROVA EM 3 E 5 EIXOS.

Tempo de Usinagem do Corpo de Prova em 3 e 5 Eixos				
Ferramenta [mm]	Operação	Estratégia de corte	Tempo Fresamento em 3 eixos [hrs]	Tempo Fresamento em 5 eixos [hrs]
Fresa Topo Diâmetro 50mm	- Desbaste (Esquadrear)	- Traçar - Desbaste em espiral para fora	0:29:26	00:05:25
Fresa Topo Diâmetro 25mm	- Desbaste - SWARF 90°	- Desbaste em espiral para fora	-	00:08:50
Fresa Topo Diâmetro 16mm	- Desbaste	- Desbaste em espiral para fora	00:49:08	00:08:00
Fresa esférica Diâmetro 10mm	- Desbaste - Pré- Acabamento	- Desbaste em espiral para fora	00:41:17	00:47:50
Fresa esférica Diâmetro 6mm	- Redesbaste	- Helicoidal	00:46:41	00:42:50
Fresa esférica Diâmetro 5mm	- Redesbaste	- Helicoidal	02:18:57	00:29:00
Fresa esférica Diâmetro 4mm	- Acabamento	-Raster	01:22:40	01:52:00
Fresa esférica Diâmetro 6mm	- Bico 45° (Setup Dispositivo)	- Desbaste em espiral para fora	00:45:00	-
Fresa esférica Diâmetro 5mm	- Calcanhar 45°(Setup Dispositivo)	- Desbaste em espiral para fora	00:45:00	-
Fresa esférica Diâmetro 5mm	- Lateral interna 45° (Setup Dispositivo)	- Desbaste em espiral para fora	01:20:00	-
Fresa esférica Diâmetro 5mm	- Lateral externa 45° (Setup Dispositivo)	- Desbaste em espiral para fora	01:20:00	-
Total:			10:38:09	4:13:55

Observou-se um ganho importante no tempo de fresamento do corpo de prova em 5eixos devido à não necessidade de *setup* e dispositivos nas usinagens negativas, além da possibilidade de liberdade de programação que proporcionaos eixos rotativos no centro de usinagem 5 eixos.

A usinagem em 3 eixos poderia obter um ganho no tempo de fresamento caso fosse realizado um estudo de otimização do processo, como aumento da velocidade de avanço e rpm devido as suas características técnicas possibilitar esta otimização, no entanto o aumento possibilitaria um ganho de tempo em torno de 10% no fresamento 3 eixos, para este estudo manteve-se as mesmas condições de usinagem.

A Tabela 6 apresenta os dados considerados para a análise da viabilidade econômica do fresamento3 e 5 eixos.

TABELA 6—ANÁLISE DE INVESTIMENTO PARA DECISÃO DE TECNOLOGIA.

Análise de Investimento para a decisão de tecnologia				
Técnologia	3 Eixos		5 Eixos	
a) Horas máquina trabalhadas/ano (Hrs)	2112		2112	
b) Disponibilidade Máquina (considerando 94%)	1985,28		1985,28	
c) Tempo usinagem corpo de prova (Hrs)	10,39		4,14	
d) Peças Produzidas / ano (UND)	191,08		479,54	
e) Custo Venda peça Produzida (UND)	R\$	5.000,00	R\$	5.000,00
f) Investimento para aquisição centro de usinagem	R\$	298.000,00	R\$	579.400,00
g) Receita de Caixa / ano	R\$	955.380,17	R\$	2.397.681,16

Considerações:

a) Horas máquina trabalhadas/ano:foi considerando uma jornada de trabalho de 44 horas semanais e um turno de trabalho.

- b) A disponibilidade de máquina: foi considerado um índice de 94% de máquina disponível para a produção, as horas improdutivas são aquelas para manutenção da máquina conforme estudado por Belinelli, Pilatti e Frasson (2009).
- c) Tempo de usinagem corpo de prova: tempo de usinagem do corpo de prova utilizando os processos 3 e 5 eixos.
- d) Peças produzidas / ano: é a quantidade de peças produzidas dividindo-se o total de horas para a fabricação do corpo de provas por o tempo disponível de máquina no ano.
- e) Preço de venda peça produzida: consideração do custo de venda final do molde, esse custo independe da tecnologia aplicada, pois é o preço de venda do mercado.
- f) Custo da aquisição do centro de usinagem: custo do investimento para a fabricação do corpo de prova em 3 e 5 eixos.
- g) Receita de caixa: podemos calcular a quantidade de peças produzidas por ano, assim com o preço de venda do corpo de prova então obtemos o fluxo de caixa para cada tecnologia conforme (Figura 25) e (Figura 26).

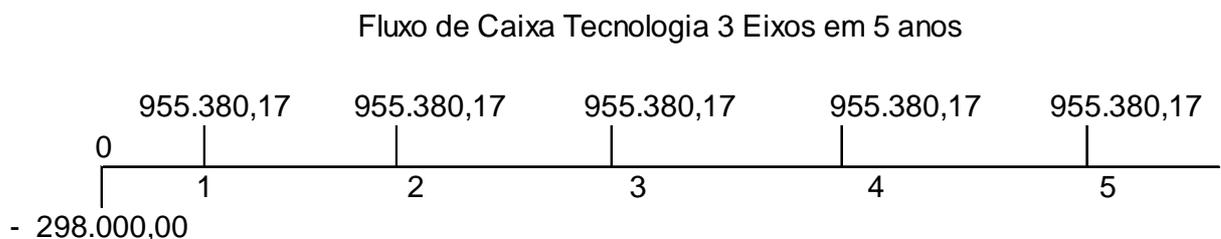


FIGURA 25 – FLUXO DE CAIXA CONSIDERANDO TECNOLOGIA 3 EIXOS

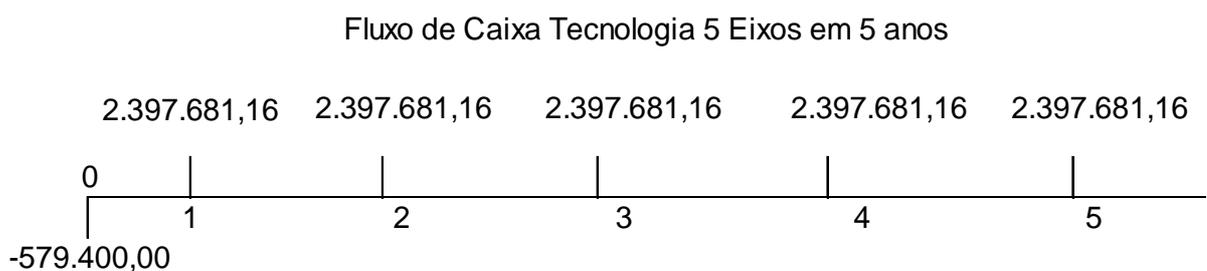


FIGURA 26 – FLUXO DE CAIXA CONSIDERANDO TECNOLOGIA 5 EIXOS

A Figura 24 e 25 apresenta o fluxo de caixa para ambas tecnologias num período de 5 anos, foram considerados somente os fluxos de caixa da receita gerada em função da venda do corpo de prova, o custo de venda da peças já incluiu os gastos de manutenção e gastos de produção do corpo de prova.

O cálculo para da análise e decisão de qual projeto deverá ser adotado foi realizado por meio do VLP, considerando um custo de capital de 20% a.a.(adotada para calculo, valor das taxas de juros adotadas por entidades financeiras):

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+i)^t}$$

Considerando a tecnologia 3 eixos:

$$\begin{aligned} VPL = & -298.000,00 + \frac{955.380,17}{(1+0,2)^1} + \frac{955.380,17}{(1+0,2)^2} + \frac{955.380,17}{(1+0,2)^3} + \frac{955.380,17}{(1+0,2)^4} \\ & + \frac{955.380,17}{(1+0,2)^5} \cong 2.559.171,54 \end{aligned}$$

Considerando a tecnologia 5 eixos:

$$\begin{aligned} VPL = & -579.400,00 + \frac{2.397.681,16}{(1+0,2)^1} + \frac{2.397.681,16}{(1+0,2)^2} + \frac{2.397.681,16}{(1+0,2)^3} + \frac{2.397.681,16}{(1+0,2)^4} \\ & + \frac{2.397.681,16}{(1+0,2)^5} \cong 6.591.134,38 \end{aligned}$$

Análise:

Segundo os resultados do VPL considerando as tecnologias 3 e 5 eixos observa-se que:

- Ambos os projetos são viáveis apresentam $VPL > 0$;
- A tecnologia 5 eixos é o que apresenta o maior VPL, portanto, nesse caso, a opção recairia sobre a tecnologia de 5 eixos.

Para a avaliação de qualidade do corpo de prova foi utilizado o parâmetro de rugosidade. As superfícies das peças apresentam irregularidades quando

observadas em detalhes. Estas irregularidades são provocadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça.

A importância do estudo do acabamento superficial aumenta na medida em que cresce a exatidão de ajuste entre as peças a serem acopladas, onde somente a exatidão dimensional, de forma e de posição não é suficiente para garantir a funcionalidade do par acoplado.

A rugosidade na fabricação de moldes é um importante fator pois determina a qualidade superficial do molde, caso o processo de fresamento de molde não alcançar a rugosidade determinada no projeto o molde deverá ser retrabalho.

Para o corpo de prova usinado a medição de rugosidade foi realizada nas regiões conforme ilustra a Figura 27.



FIGURA 27—REGIÕES UTILIZADAS PARA A MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.

Para a medição de rugosidade foi utilizado um aparelho Rugosímetro Digital com as seguintes especificações: modelo (Mitutoyo Surf-Test-21), parâmetro de medida (Ra), Cut-Off (0,8), temperatura (19,8 °C) e unidade de medida (μm).

A Figura 28 apresenta o gráfico com os valores de rugosidade medidos nas regiões apresentadas na Figura 27.

Pode se observar que o corpo de prova usinado em 5 eixos é que possui o melhor acabamento e o corpo de prova usinado em 3 eixos é a que está com o acabamento visualmente inferior a Figura 28 apresenta o gráfico das medições feitas nas regiões 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do corpo de prova.

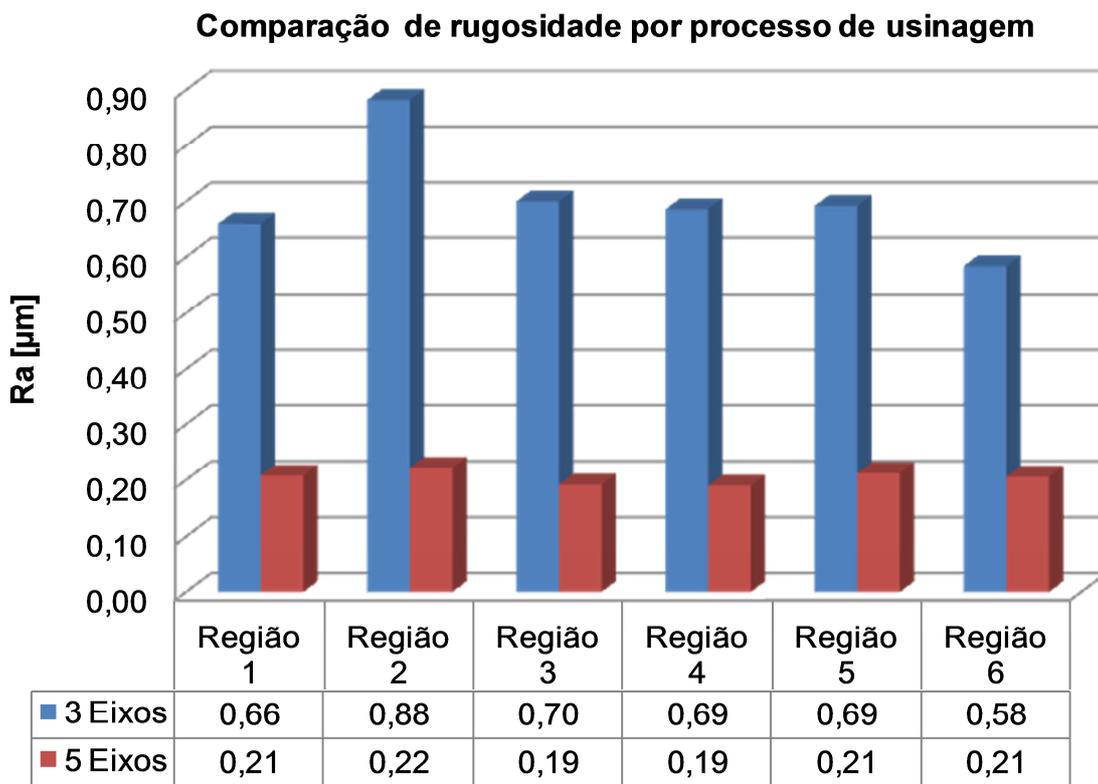


FIGURA 28 – GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DE RUGOSIDADE POR PROCESSO DE USINAGEM

Observa-se que o processo de fresamento 5 eixos possibilitou, devido a estratégia de corte utilizada um benefício nas regiões analisadas para a medição da rugosidade, alcançando valores de rugosidade de até $Ra = 0,19\mu\text{m}$.

Com a usinagem 3 eixos observa-se uma dificuldade de se obter valores baixos de Ra na usinagem do corpo de prova devido falta da possibilidade de adotar estratégias de corte que beneficiam a rugosidade na superfície analisada.

Valor de rugosidade baixo nas superfícies do molde faz com que a necessidade de retrabalho, como o polimento manual do molde após o processo de fresamento

sejam necessários. Isso também traz benefícios no tempo de fabricação do molde, conseqüentemente redução nos custos de fabricação.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais conclusões obtidas no desenvolvimento deste trabalho estão relacionadas a seguir.

Conclusões relacionada processo de fresamento 3 e 5 eixos:

- a) Observou-se que o tempo total de disponibilização do corpo de prova para o cliente final é menor no fresamento 5 eixos, devido a não necessidade de desenvolver dispositivos de fixação do molde complexos, o que faz com que a velocidade de entrega utilizando o fresamento 5 eixos seja reduzida.
- b) O processo 5 eixos mostra-se eficaz na aplicação da fabricação de moldes complexos, onde há a necessidade de fresamento em varias posições e de difíceis acessos à cavidade do molde.
- c) O processo de usinagem 5 eixos na fabricação do corpo de prova não necessita de nenhuma intervenção humana durante o processo de usinagem, o que difere na usinagem em 3 eixos, onde foi necessário, a intervenção para o reposicionamento do corpo de prova, isso traz benefícios como maior exatidão na peça e elimina tempo de *setup*.

Conclusões relacionada ao tempo de fresamento 3 e 5 eixos:

- a) Com a fabricação do corpo de prova em um centro de usinagem 5 eixos, obtém-se uma redução de 2,5 vezes no tempo de fabricação do corpo de prova em relação ao fabricado em um centro de usinagem 3 eixos.
- b) Para a fabricação do corpo de prova proposto o fresamento 5 eixos possibilitou uma redução no tempo de fresamento, conseqüentemente uma redução geral de custos do que na fabricação utilizando o processo em 3 eixos.

Conclusões relacionada à qualidade de acabamento utilizando fresamento 3 e 5 eixos:

- a) Observou-se que a implementação do fresamento 5 eixos na fabricação do corpo de prova apresentou uma qualidade de acabamento superior ao fresamento 3 eixos, conforme apresentado na Figura 27.
- b) Devido a flexibilidade dado pelos eixos rotacionais eixo (A) e eixo (B), e a estratégia de corte utilizada, o fresamento 5 eixos possibilita ao programador utilizar estratégias de corte que beneficiam a qualidade de acabamento, pois o contato ferramenta-peça dado a estratégia de corte adotada traz esta característica.

Conclusões relacionadas à viabilidade econômica:

- a) Para o caso estudado, segundo o cálculo do VLP a decisão deve ser sobre a implantação da tecnologia 5 eixos para a fabricação do corpo de prova, observou-se que no fresamento 5 eixos devido a redução de tempo de usinagem possibilita um aumento de peças produzidas conseqüentemente um fluxo de caixa maior.
- b) Embora o investimento na tecnologia de fresamento 5 eixos seja maior que para o fresamento 3 eixos, a possibilidade do aumento de produção de peças no fresamento 5 eixos faz com que a implementação se torne viável.

Sugestões para futuros trabalhos estão apresentadas a seguir:

- a) Avaliar as estratégias de usinagem em 5 eixos aplicadas a moldes e matrizes, a exploração dos recursos de fresamento de moldes e matrizes ainda necessita de estudos para poder avaliar os tipos de estratégias de usinagem e seus benefícios.
- b) Avaliar origens erros dimensionais dos eixos rotativos em centro de usinagem 5 eixos, é necessário avaliação das origens dos erros de geometria em peças em máquina 5 eixos, a identificação destes erros é complexa quando incorporada os erros dos eixos rotativos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTMÜLLER; KLOCKE; MARKWORTH. **Simultaneous five-axis milling of titanium alloys for turbomachinery components.** Production Engineering, v. 13, Ed 5, Julho 2001, p.17 -20.

AGOSTINHO. O L; RODRIGUES. A C S; LIRANI, J: Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões, Ed 2004, Editora Edgard Blucher, S Paulo.

ALMEIDA, D. A. **Gerência da produção.** Itajubá: **Universidade Federal.** 2003. Apostila, curso de especialização em qualidade produtiva, programa de pós-graduação em Engenharia de Produção.

ALVES, M. L. **Efeito da Medição de Rugosidade na Massa de Padrões de Massa Classe F2.** Rio de Janeiro, 2002. p. 37- 46 Dissertação (Mestrado em Metrologia para a Qualidade Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002.

BALASUBRAMANIAM M., LAXMIPRASSAD .P, SAMA, S., SHAIKH Z. **Generating 5-axis NC roughing paths directly from a tessellated representation.** Computer-Aided Design, v. 32, ed 4, Abril 2000, p.261-277.

BAPTISTA, R., SIMÕES, A. J. F. **Three and five axes milling of sculptured surfaces.** Journal of Materials Processing Technology, v. 103, n. 3, p. 398–403, Jul. 2000.

BELINELLI, M., PILATTI, L. A., FRASSON, A. C. A Manutenção Produtiva Total (TPM) como ferramenta para aumento de disponibilidade de máquina: estudo de caso em uma indústria do ramo Siderúrgico. XVI SIMPEP - Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru-SP, 2009.

BREALEY, R. A, MYERS, S. C. **Principles of Corporate Finance,** The McGraw–Hill Companies, 1221 Avenue of the Americas, Midtown Manhattan, 7 ed., p.,1062, 2005.

BOKHORST, A.C., SURESH, C. **An integrated model for part-operation allocation and investments in CNC technology.** International Journal of Production Economics, v. 75, ed 3, Fevereiro 2002, p. 267–285.

BOUJELBENE, M., MOISAN, A., TOUNSI, N., BREINER B. **Productivity enhancements in dies and molds manufacturing by the use of C1 continuous tool path.** International Journal of Machine Tool & Manufacture, v. 44, n 1, January 2004, p. 101–107.

CHIOU, J. C. **Floor, wall and ceiling approach for ball-end tool pocket machining.** Computer-Aided Design, v. 37, ed. 4, Abril 2005, p. 373-385.

CHIOU, C.J. LEE, Y.S.. **A shape-generating approach for multiaxis machining Gbuffer models.** International Journal of Machine Tools &Manufacture Design, Research &Application, v. 31, ed. 12, Outubro 2004.

CHOI, K. B., JERARD, B. R **Sculptured surface machining -Theory and applications.** Springer. Softcover reprint of the original 1st ed. 1998, n. XV, p. 368, 1998.

COSTA, J. D., GOMES J. O. **Análise de Rugosidade em Superfícies Usinadas de Forma Complexa.** Anais do XVI Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XVI ENCITA / 2010, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, 20 de outubro de 2010.

DELCAM. **POWERMILL 5 AXES versão 6.** Apostila de treinamento, disponível em <http://www.seacam.com.br/?seacam=powermill-5-eixos> ; Acesso em Julho 2013.

DINIZ, A. E. MARCONDES, F.C. COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagens dos materiais.** 6 ed. São Paulo: MM editor, 242p. 2006.

ENDL, R, JAJE, J. **The Challenges for CAM Systems and Users in 5-Axis Machining.** SESCOI R&D, Department Manager, Neu-Isenburg, Germany and SESCOI USA, Senior Engineer - Marketing, Southfield, Michigan, USA. p23-25. 2006.

GRAY, P., BEDI, S., ISMAIL, F., RAO, N., MORPHY, G. **Comparison of 5-axis and 3 axis finish machining of hydroforming die inserts.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 17, ed. 10, Setembro 2006, p.562-569.

GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 35, ed. 13, Outubro 2008, p. 345-368.

HERRIN, G.E. **History of 5-axis machining.** Disponível em <http://findarticles.com/p/articles/mi_m3101/is_/ai_16564341 >. Acessado em 25/08/2007.

HONG, C., IBARAKI, S., MATSUBARA, A. **Influence of position-dependent geometric erros of rotary axes on a machining test of cone frustum by five-axis machine tools.** Precision Engineering, Volume 35, Issue 1, January 2011, Pages 1–11.

HUANG, Q., G., QU, T., ZHONH R. Y., YANG, H., D., ZHANG, Y., F., CHEN, P. Y., JIANG. **Establishing production service system and information collaboration platform for mold and die products.** International Journal of Manufacturing Technology, Volume 52, Issue 9-12, Fevereiro 2011, pages 1149 -1160.

JUN, C., KYUNGDUCK, C., LEE, Y. **Optimizing tool orientation for 5-axis machining by configuration space search method.** Computer-Aided Design, v. 35, Ed. 6, Maio 2003, Pages 549–566.

LANGERON G. M., BOURDET, P. et al. **A new format for 5-axis tool path computation, using B-spline curves.** Computer-Aided Design.v.36, Edição 12, Outubro 2004, p. 1219–1229.

LAZOGLU, I. **Sculptured surface machining: a generalized model of ball-end milling force system.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 43, n. 5, April 2003, p. 453–462.

JUNG, Y.H.; LEE, D.W.; KIM, J.S.; MOK, H.S. **NC post-processor for 5-axis milling machine of table-rotating/tilting type.** Journal of Materials Processing Technology, v 18. n. 1, February, 2002, p. 159-164.

LEE, H. S., PARK, M. S., KIM, M. T., CHU, C. N. **Systematic finishing of dies and moulds**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v 46, Julho 2006, p. 1027–1034.

MENGES, G., MICHAELI, W., MOHREN, P. **How to make injection molds**. Edição 3 Carl Hanser, Munich 2001.

MARSON, D. **Filão de moldes aberto para exploração**, Revista Máquinas e Metais, nº 524, p.30 –49, 2009.

OLLING, G.; CHOI, B.K.; JERARD, R.B. **Machining Impossible Shapes**. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-07-100846-2, 386p. 1999.

PENCHENG HU., KAI, TANG. **Improving the dynamics of five-axis machining through optimization of workpiece setup and tool orientations**. Computer-Aided Design, doi:10.1007/s00170-011-3779-3, p.1693-1706, 2011.

RIDA T. FAROUKI, SHIQIAO LI. **Optimal tool orientation control for 5-axis CNC milling with ball-end cutters**. Computer Aided Geometric Design, v. 30, ed. 2, Fevereiro 2013, p. 226–239.

ROMI. Manual de Abordagens e Cuidados Preventivos Centros de Usinagem – Máquinas-Ferramenta CNC. Departamento de Assistência técnica. Equipe de Entrega Técnica, p. 37, 2013.

SARAVANAN, S., SANKAR R. S., ASOKAN, P., VIJAYAKUMAR, K., PRABHAHARAN, G. **Optimization of cutting conditions during continuous finished profile machining using non-traditional techniques**. International Journal Adv. Manufacturing Technology, v. 26, DOI 10.1007/00170-003.x, Março de 2005, p. 30-40.

SIMON, A. T. **X Inventário MM: panorama do parque nacional de máquinas-ferramenta de usinagem**, Revista Máquinas e Metais, nº64, p. 21-54, 2009.

SOUZA, A. F. **Contribuições ao Fresamento de Geometrias Complexas Aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidades.** 2004. 186f. Tese, Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2004.

SOUZA, A. F., BONETTI, I. **Estudo do contato ferramenta-peça no fresamento de formas geométricas complexas para a fabricação de moldes e matrizes;** 8º Congresso Ibero americano de Engenharia Mecânica, Anais, Cusco, 2007.

SOUZA, A. F., COELHO, R. T. **Tecnologia CAD/CAM - Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril.** XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção, Ouro Preto-MG, 21 a 24 de outubro de 2003.

SOUZA, A. F., SCHUTZER, K. **Análise dos Métodos de Interpolação na Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte para Superfícies Complexas.** Revista de Ciência & Tecnologia • v. 11, nº 21, p. 29-36, 2004.

SKA. **Recursos EDGE CAM.** Disponível em: <http://www.ska.com.br/ska/produtos/edgecam/milling/recursos>. Acessado em 13/07/2013.

SUN, Y. W; GUO, D. M; JIA, Z. Y. **Spiral cutting operation strategy for machining of sculptured surfaces by conformal map approach.** Journal of Materials Processing Technology, v. 180, Dezembro 2006, p 74–82.

TSUTSUMI, M, SAITO, A. **Identification of angular and positional deviation inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements.** International Journal of Machine Tools e Manufacture, v. 44, ed 12–13, Outubro 2006, p. 1333–1342.

WRULAK, O., PILATTI, L. A., PEDROSO, B. **Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto.** 4º Encontro de Tecnologia dos Campos Gerais, Agosto 2008.

YAN, X. G., TIAN, X. T. **The avoidance of cutter gouging in five-axis machining with a fillet-end milling cutter.** International Journal advanced of Manufacture technology, Springer-Verlag, London, p.89-97, 2011.