

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

**ANÁLISE DO EFEITO DA METODOLOGIA DE INTERPOLAÇÃO DA
TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA DE USINAGEM NA ETAPA DE
POLIMENTO DE MOLDES E MATRIZES**

Luiz Vicente Neto

Orientador: Prof. Dr. André Luís Helleno

**Santa Bárbara d'Oeste,
2012**

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

**ANÁLISE DO EFEITO DA METODOLOGIA DE INTERPOLAÇÃO DA
TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA DE USINAGEM NA ETAPA DE
POLIMENTO DE MOLDES E MATRIZES**

Luiz Vicente Neto

Orientador: Prof. Dr. André Luís Helleno

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – PPGEP – UNIMEP.

**Santa Bárbara d'Oeste,
2012**

**ANÁLISE DO EFEITO DA METODOLOGIA DE INTERPOLAÇÃO DA
TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA DE USINAGEM NA ETAPA DE
POLIMENTO DE MOLDES E MATRIZES**

Luiz Vicente Neto

Prof. Dr. André Luis Helleno, Presidente
PPGEP - UNIMEP

Prof. Dr. Milton Viera Junior
PPGEP - UNINOVE

Prof. Dr. André de Lima
PPGEP - UNIMEP

Às pessoas que me ajudaram tanto nesse caminho, Samira, esposa, companheira e amiga de todas as horas e Ana Luiza, minha filha tão amada, e aos amigos do SCPM e de toda Unimep, que tanto me ajudam a ter forças para continuar crescendo e aprendendo.

Dedico

Às principais pessoas em minha vida, José Luiz (*in memoriam*), Marilda e Gisele que são minha família e que me inspiraram, formaram e me fizeram seguir o reto caminho superando minhas limitações e todos obstáculos para atingir meus objetivos.

Ofereço

Agradecimentos

À Deus pela Vida, pela graça em Jesus Cristo e pela vocação concedida na construção desse trabalho, que tem o fim último de honrá - lo e exaltá – lo.

A minha esposa Samira e a minha filha Ana Luiza, meus pais José Luiz (*in memoriam* – obrigado por ter sempre depositado em mim sua confiança) e Marilda (por todo seu apoio e orações ontem, hoje e para sempre), minha irmã Gisele, meus amigos e toda minha família, pela compreensão e dedicação constantes, os meus sinceros agradecimentos.

Ao professor Dr. Eng^o. André Luís Helleno, docente desta Universidade e Pesquisador do Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM), pela exímia orientação, disponibilidade, oportunidade, amizade e grande incentivo, possibilitando – me o desenvolvimento pessoal e o acesso a novas fronteiras do conhecimento.

A Banca Examinadora, pelas sugestões feitas na defesa do projeto de pesquisa.

Aos amigos de trabalho do SCPM, pelo companheirismo, apoio e atenção.

Aos meus amigos que sempre me ajudaram e estiveram ao meu lado, em especial, Alexandre Martins, Viumar dos Santos Junior, José Rafael Ronchi, Orlando Luiz Gonzaga Junior, Carlos E. Miralles, Renato Monaro, Douglas, Jhonathan, Erick Del Conte, ao pessoal da ETEc “Pedro Ferreira Alves” e a todos os outros que não haveria possibilidades de inserir aqui, mas que vivem sempre em minha lembrança.

A Villares Metals na figura do Sr. José Bacalhau pelo apoio técnico e pela doação do material para o desenvolvimento dos ensaios práticos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – pela bolsa concedida e ao PPGEP – UNIMEP por disponibilizar a reserva técnica que me auxiliou em todo o processo de realização dessa dissertação.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“...Aliás nós sabemos que tudo concorre para o bem dos que amam a Deus, que são chamados segundo o seu designo...”

(Rm 8, 28.)

Sumário

Lista de Tabelas.....	v
Lista de Siglas	vi
Lista de Institutos e Laboratórios	vii
Resumo	viii
Abstract.....	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Importância do Trabalho.....	2
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivos Específicos.....	5
:	5
1.3 Metodologia.....	5
1.4 Estrutura do Trabalho	7
2. Usinagem de Moldes e Matrizes.....	8
2.1 Evolução do Processo Produtivo	8
2.2 Cadeia CAD/CAM/CNC aplicada ao Processo de Fabricação de Moldes e Matrizes	13
2.2.1 Sistemas CAD.....	14
2.2.2 Sistemas CAM	16
2.2.3 Integração dos Sistemas CAD/CAM.....	17
2.2.3.1 Tolerância CAM.....	20
2.2.3.2 Estratégias de Usinagem	20
2.2.4 Métodos de Interpolação da Trajetória da Ferramenta	25
2.2.4.1 Interpolação Linear.....	26
2.2.4.2 Interpolação Circular	28
2.2.4.3 Interpolação Spline.....	28
2.3 Polimento de Moldes e Matrizes	31
2.3.1 Princípios do Polimento	32

2.3.2	Características do Processo de Acabamento Superficial dos Moldes e Matrizes.....	34
2.3.3	Qualidade Superficial dos Moldes e Matrizes.....	37
3	Desenvolvimento dos ensaios preliminares	39
3.1	Característica dos ensaios preliminares.....	39
3.2	Metodologia.....	39
3.1	Resultados dos ensaios preliminares	42
3.2	Considerações dos ensaios preliminares.....	44
4	Materiais e Métodos	45
4.1	Corpo de prova	46
4.2	Descrição das Operações de Usinagem	47
4.3	Centro de Usinagem.....	51
4.4	Polimento dos Corpos de Prova	52
4.5	Medição dos Corpos de Prova	53
5	Resultados.....	57
5.1	Tempo de usinagem do corpo de prova	57
5.2	Exatidão geométrica em comparação com o modelo CAD após a usinagem	58
5.2.1	Interpolação Linear	58
5.2.2	Interpolação Spline	60
5.3	Tempo de polimento do corpo de prova.....	62
5.4	Exatidão geométrica em comparação com o modelo CAD após o polimento.....	64
5.4.1	Interpolação Linear	64
5.4.2	Interpolação Spline	65
6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	67
7	Referência Bibliográfica	70

Lista de Figuras

Figura 1: Porcentagem do Tempo consumido na Manufatura de Moldes e Matrizes Fallbohmer, et al., (2000).	3
Figura 2: Outline da Pesquisa adaptado do Yin(2001).....	6
Figura 3: Processo Tradicional de Fabricação de Moldes e Matrizes (BAUCO, 2003). 10	
Figura 4: Fabricação de Moldes e Matrizes utilizando os conceitos HSC (BAUCO, 2003).	12
Figura 5: Integração CAD/CAM/CNC na manufatura de Moldes e Matrizes adaptado de Lasemi et al., (2010).....	14
Figura 6: Malha de triângulo sobre o modelo geométrico (HELLENO, 2004).	19
Figura 7: Trajetória da ferramenta em função da tolerância CAM (SOUZA, 2004)	20
Figura 8: Característica de Flexibilidade da fresa de topo esférica (SCHULZ et. al, 2001).	21
Figura 9: Representação da Estratégia Zig Zag (CHOI e JERARD, 1998).	23
Figura 10: Representação da Estratégia Follow Periphery (CHOI e JERARD, 1998)....	23
Figura 11: Representação da Estratégia de Usinagem Radial Lines (CHOI e JERARD, 1998).	24
Figura 12: Estratégia Concentric Arcs (CHOI e JERARD, 1998).	24
Figura 13: Exemplo de Estratégia Trochoidal (CHOI e JERARD, 1998).	24
Figura 14: Interpolações da Trajetória da Ferramenta (SOUZA, 2001).....	26
Figura 15: Interpolação Linear e Tolerância CAM (SOUZA, 2004).	26
Figura 16: Efeito da interpolação linear sobre a velocidade de avanço (STROH e ABELE, 2005).....	27
Figura 17: Interpolação Circular e Tolerância CAM (SOUZA, 2004).	28
Figura 18: Representação da Interpolação Spline (SCHÜTZER e HELLENO, 2003)....	29
Figura 19: Exemplos de Interpolação Spline para o Comando Siemens Sinumerik (2000).....	30
Figura 20: Classificação dos Diferentes Processos de Polimento (KASAI et al., 1990)	31
Figura 21: Princípio de Polimento segundo Klocke, (2009).....	33
Figura 22: Zonas de Deformação Elástica e Plástica do material (KLOCKE, 2009).	33
Figura 23: Formação do Cavaco no processo de Polimento (KLOCKE et.al.,2005)	35
Figura 24: Método para manufatura do Corpo de Prova dos ensaios preliminares.....	40
Figura 25: Gráfico do tempo de Polimento no Corpo de Prova com as indicações das regiões analisadas.	43

Figura 26: Metodologia para Manufatura do Corpo de Prova	45
Figura 27: Corpo de Prova.	46
Figura 28: Pré – acabamento do Corpo de Prova utilizando fresa ball nose.....	49
Figura 29: Acabamento dos Corpos de Prova utilizando fresa ball nose e com duas Interpolações (linear e spline).	50
Figura 30: Gravação para Rastreabilidade.....	51
Figura 31: Sequência do Polimento seguindo as etapas da Tabela 4.....	53
Figura 32: Procedimento de medição do corpo de prova.....	54
Figura 33: Plano de medição baseado na varredura por pontos.....	55
Figura 34: Controle da temperatura em diversos pontos do ambiente para correção dos erros.	55
Figura 35: Tempo de polimento para cada metodologia de interpolação.....	56
Figura 36: Tempo de usinagem por operações.....	57
Figura 37: Exatidão Geométrica do corpo de prova com interpolação linear	59
Figura 38: Acabamento do corpo de prova com interpolação linear	60
Figura 39: Exatidão Geométrica do corpo de prova com interpolação spline	61
Figura 40: Acabamento superficial do corpo de prova com interpolação spline.....	62
Figura 41: Tempo de polimento.....	62
Figura 42: Característica da Superfície com interpolação spline.....	63
Figura 43: Característica da Superfície com interpolação linear	63
Figura 44: Exatidão Geométrica da interpolação linear após o polimento	64
Figura 45: Exatidão Geométrica da interpolação spline após o polimento.....	65

Lista de Tabelas

Quadro1: Padrões de comunicação entre sistemas CAD/CAM (DÜRR et al., 2000)....	18
Tabela 2: Erros Dimensional e de Forma Fallbohmer et al. (2000).	37
Tabela 3: Rugosidade Média para diferentes Processos de Usinagem (HUTCHINGS, 1992).	38
Tabela 4: Etapas de Polimento dos ensaios preliminares.	41
Tabela 5: Comparativo entre rugosidade usinagem x polimento.	42
Tabela 6: Tempo de Polimento.	44
Tabela 7: Etapas do Processo de Polimento.	52
Tabela 8: Tempo de usinagem teórico x real do corpo de prova.	57

Lista de Siglas

CAD – Computer Aided Design

CAM – Computer Aided Manufacturing

CEFAMOL – Associação Nacional da Indústria de Molde de Portugal

CNC – Computer Numeric Control

CPU – Central Processing Unit

HSC – High Speed Cutting

NC – Numeric Control

Lista de Institutos e Laboratórios

ABADI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.

SCPM – Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura

UNIMEP – Universidade Metodista de Piracicaba

ISO – International Organization for Standardization

Resumo

Atualmente, a redução do ciclo de vida dos produtos e conseqüentemente a redução do seu tempo de desenvolvimento faz com que a produtividade e a flexibilidade sejam características importantes dos sistemas produtivos e um desafio para a indústria de moldes e matrizes. Apesar das constantes evoluções tecnológicas das máquinas ferramentas, que buscam o aumento significativo das velocidades de corte e avanços aplicados na usinagem, de recursos para a melhoria da exatidão geométrica dos movimentos, o processo de manufatura de moldes e matrizes tem como característica um alto tempo de manufatura, tornando – se uma restrição ao sistema produtivo, principalmente em função da etapa de manual de polimento para atingir a qualidade superficial necessária ao produto final. Para isso, foram usinados corpos de prova com características geométricas semelhantes às necessidades da indústria de moldes e matrizes com dois processos distintos de acabamento, ou seja, com trajetória representada por interpolação Linear e *Spline*. Os ensaios de usinagem foram realizados em um centro de usinagem de três eixos e a etapa de polimento foi realizada em uma empresa especializada nesta operação. Além das características de tempo de usinagem, tempo de polimento e qualidade superficial, foram realizadas comparações da exatidão geométrica após a operação de usinagem e polimento.

Palavras-chave: Polimento; Trajetória da Ferramenta; Exatidão Geométrica; Moldes e Matrizes.

Abstract

Actually, reduced product life cycle and consequently the reduction of development time makes the productivity and flexibility are important characteristics of production systems and a challenge for the die and mold industry . Despite constant technological evolutions of machines tools, seeking the significant increase cutting speeds and applied advances in machining, and resources for improving the geometric accuracy of the movements, the process of manufacturing of molds and dies has a characteristically high time manufacturing, making it a restriction to the production system, mainly due to manual polishing step to achieve the surface quality required for the final product. For this, work pieces were machined with geometric characteristics similar to the needs of mold and die industry with two different finishing processes, with, trajectory represented by Linear Interpolation and Spline. The machining tests were performed on a machining center three axes and polishing step was performed in a company that specializes in this operation. Besides the characteristics of machining time, while polishing and surface quality, we compared the geometric accuracy after machining and polishing operation.

Keywords: Polishing; Trajectory Tool, Geometric Accuracy, Die and Mould.

1 INTRODUÇÃO

A manufatura de moldes e matrizes sofre forte influência da redução do ciclo de vida e aumento da variedade do produto, da qualidade, do tempo e do custo. Para atender esses requisitos e manter o nível de competência global, as empresas envolvidas nessa cadeia produtiva estão desenvolvendo soluções e inovações tecnológicas dentre as mais diversas áreas, tais como:

- Máquinas ferramentas;
- CNC;
- Ferramentas de corte;
- Sistemas de gestão;
- Sistemas integrados CAD/CAM entre outras. (ALTAN, LILLY e YEN, 2001), (MESQUITA e BARBOSA, 2005).

No entanto, apesar da eficiência pontual destas soluções, a etapa de polimento, por sua complexidade, tem sido por muitas vezes colocadas à margem na maioria dos estudos, pois as operações de acabamento final dos moldes e matrizes requerem um grande percentual de polimento manual, processo este que necessita da habilidade excepcional do colaborador. (SCHULTZ, 2001).

Os principais fatores que constituem o custo de produção dos moldes e matrizes são a usinagem e o acabamento, sendo que as reduções desse custo são de grande auxílio para que as empresas se tornem competitivas, reduzindo o tempo de retorno dos investimentos e, assim, podendo investir em pesquisa e desenvolvimento. (MESQUITA e BARBOSA, 2005).

Na produção dos moldes e matrizes por volta de 12% a 15% dos custos e de 30% a 50% do tempo gasto com a fabricação estão associados com a atividade de polimento. O trabalho de acabamento final (polimento) das ferramentas de moldagem contém uma interface de subjetividade na sua constituição. As práticas profissionais aplicadas ao polimento têm a capacidade de modificar os padrões dominantes de qualidade e, portanto, de alterar o modo de pensar e buscar encontrar uma relação direta entre esses dois fatores (custo e tempo gasto) conforme Willenborg e Ostholt (2009).

Para Altan, Lilly e Yen (2001), existe um longo período entre a manufatura e o *try-out* (teste) dos moldes e matrizes de um veículo automotivo, são utilizados modelos complexos de serem fabricados.

Desta forma, o avanço da tecnologia HSC (*High Speed Cutting*) surge como uma proposta de solução, pois apresenta como características, a alta remoção de material e grande qualidade superficial, otimizando assim os tempos de fabricação, custos e demonstrando uma melhora significativa no acabamento superficial do produto final. Podendo, assim, auxiliar a minimizar os tempos de polimento. (SCHULTZ, 2001), (SCHÜTZER, 2003), (HIOKI, 2006) e (ABELE e KREIS, 2010).

A estratégia de usinagem e o polimento contribuem bastante para essa redução do ciclo de produção dos moldes e matrizes. Em função disso, procura se relacionar dois métodos de Interpolação da trajetória da ferramenta de usinagem com a etapa de polimento, assim como a influência na qualidade final do produto. O presente trabalho versa sobre a relação entre os métodos de Interpolação e o polimento como fontes de vantagens competitivas. Sua investigação apresenta destaque relevante no segmento dedicado a manufatura de superfícies complexas, com um viés voltado basicamente à indústria de moldes e matrizes.

Na sequência, será feita uma descrição da importância deste trabalho para a fabricação de produtos com superfícies complexas, buscando fazer um levantamento da problemática a ser abordada ao longo desta pesquisa. Em seguida, serão apresentados os objetivos propostos para este projeto e, por fim, uma apresentação da estrutura utilizada.

1.1 Importância do Trabalho

A análise do efeito da estratégia de usinagem na etapa de polimento (acabamento) torna se importante na manufatura de moldes e matrizes, à medida que o tradicional método aplicado (usinagem e polimento) representa uma parcela notável do tempo consumido nessa produção, como ilustra a Figura 1, indicando a usinagem e o acabamento manual como sendo os fatores de maior tempo consumido.

Na fabricação dos moldes e matrizes, o aumento da exatidão e a redução dos tempos de produção e custos na usinagem são desafios constantes. No entanto, a cadeia produtiva CAD/CAM/CNC ainda apresenta potencial a ser desenvolvido no aumento da exatidão, tempo de fabricação e qualidade superficial do produto final.

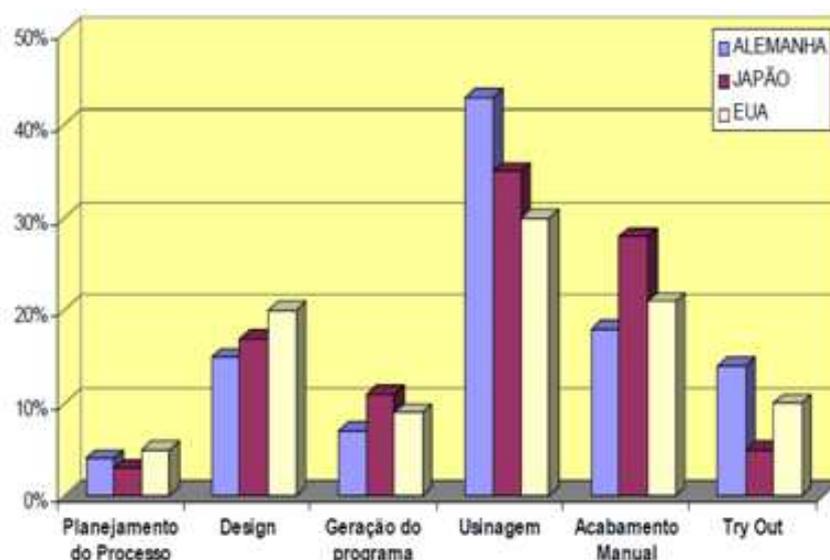


Figura 1: Porcentagem do Tempo consumido na Manufatura de Moldes e Matrizes Fallbohmer, et al., (2000).

Analisando a literatura verificou-se que, as tecnologias aplicadas à manufatura de moldes e matrizes cresceram a partir da necessidade das empresas em reduzir o *lead time* entre o início e o fim do processo, enquanto a etapa de polimento não desenvolveu proporcionalmente as demais tecnologias aplicado a cadeia de moldes e matrizes.

Em 2009, a ABADI (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial) elaborou um Estudo Prospectivo Setorial da Cadeia dos Plásticos, juntamente com um comitê gestor formado por representantes dos setores público e privado, onde demonstram que existe a necessidade de:

- Promover o desenvolvimento tecnológico junto as instituições de ensino;
- Melhorar as maneiras de produzir e gerenciar;

Esse estudo não ilustrou os segmentos de matrizes (estampos), embora atualizasse os trabalhos realizados por Resende e Gomes (2004), sendo que os maiores produtores de moldes são: Alemanha, seguida pelas EUA, Japão, Coreia do Sul, China e Portugal.

Ponce (2010), indica que o Brasil importa entre 60 e 70% dos moldes de maior complexidade, enquanto os mercados nacionais ficam com a menor parcela e a mais simples, dificultando a implantação das propostas indicadas no Estudo Prospectivo Setorial da Cadeia dos Plásticos elaborada pela ABADI em 2009.

Um exemplo da importância estratégica desse mercado para a indústria nacional pode ser observado em Portugal, que, de acordo com os dados da CEFAMOL (Associação Nacional da Indústria de Molde de Portugal), somente no ano de 2006, o segmento de moldes gerou aproximadamente 400 milhões de euros em receitas, desde

1990 destinou 90% de produção para a exportação, dentre as quais 72% destinados ao setor automobilístico (FERREIRA, 2006).

Antes disso, os mercados consumidores eram tidos apenas como “*mercados domésticos*”, cuja objetivação era satisfazer apenas os próprios interesses, e os clientes eram vistos como simples consumidores obrigados a aceitarem aquilo que lhes era oferecido e, portanto, qualidade era sinônimo de preços altos. (GAITHER e FRAZIER, 2002).

Para Ribeiro *et. al.* (2003), a globalização fragmentou o mercado, empresas com forte crescimento em outros países, altos investimentos tecnológicos, melhorando suas características de qualidade, menores preço e assim os consumidores puderam ter parâmetros comparativos e consumirem o que julgarem melhor.

Com a abertura do mercado e o aumento na competitividade, diversas áreas sofreram com estas mudanças nos últimos anos, dentre elas: as empresas da área de fabricação de moldes e matrizes que, para atenderem as novas exigências funcionais e estéticas no desenvolvimento do produto com superfícies cada vez mais complexas, tiveram que modernizar todo seu processo produtivo por meio de da inserção de sistemas computacionais de auxílio às etapas de engenharia, investimento em novas ferramentas, novos materiais e novos equipamentos.

Bauco (2008) estimou que, somente em 2008, o mercado mundial de moldes e matrizes atingiu o valor de 4 bilhões de dólares, e que a previsão, é de que ele supere os 38 bilhões de dólares, entre 2009 e 2013.

Existem apenas poucos estudos não conclusivos realizados por empresas sobre os benefícios e as contrapartidas da utilização das metodologias de interpolação da ferramenta de usinagem na etapa de polimento, destacando-se apenas os pontos de interesse e muitas vezes sem metodologia aplicada.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é análise do efeito da metodologia de interpolação da trajetória da ferramenta de usinagem na etapa de polimento, de forma a contribuir para a redução do *lead time* na manufatura de moldes e matrizes.

Para atingir o principal objetivo deste trabalho foram definidos os objetivos específicos que são investigar duas metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta (Linear e *Spline*) utilizadas na manufatura de moldes e matrizes, para obter

a melhor processo quanto ao tempo de usinagem, tempo de acabamento superficial (polimento) e a qualidade final, contribuindo assim, na redução do *lead time* do atual processo de fabricação utilizado.

1.2.1 *Objetivos Específicos*

:

- Analisar a influência das interpolações Linear e *Spline* sobre o tempo de manufatura e da etapa de polimento;
- Analisar o impacto da operação de polimento sobre a exatidão do produto final;
- Identificar qual metodologia de interpolação da ferramenta destacará como vantagem competitiva.

1.3 **Metodologia**

Os objetivos propostos nos tópicos anteriores serão atingidos plenamente com a realização de uma pesquisa explicativa, com abordagem experimental e fundamentada em uma pesquisa bibliográfica - foi realizada por meio de de livros sobre estes temas, artigos de revistas especializadas (nacionais e internacionais), artigos de congressos e seminários e artigos científicos disponíveis no portal de periódicos da CAPES.

As metodologias de interpolação da ferramenta a serem investigadas foram aplicadas em dois corpos de prova, sendo usinados cinco exemplares de cada corpo de prova para efeito de comparação e validação dos resultados, totalizando, assim, dez corpos de prova.

A análise das metodologias do que será verificada por meio de da operação de acabamento, mantendo, assim, as operações de desbaste e semi-acabamento dos corpos de prova iguais. A escolha desse procedimento é justificada por ser uma operação crítica no processo de produção dos moldes e matrizes quanto ao tempo de usinagem e ao acabamento final, além de ser a operação onde são aplicadas as maiores velocidades de corte.

Como o objetivo deste trabalho é a investigação de metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta sobre a etapa de polimento na manufatura de moldes e

matrizes, os parâmetros de corte foram mantidos iguais para todos os corpos de prova conforme ilustrado na Figura 2.

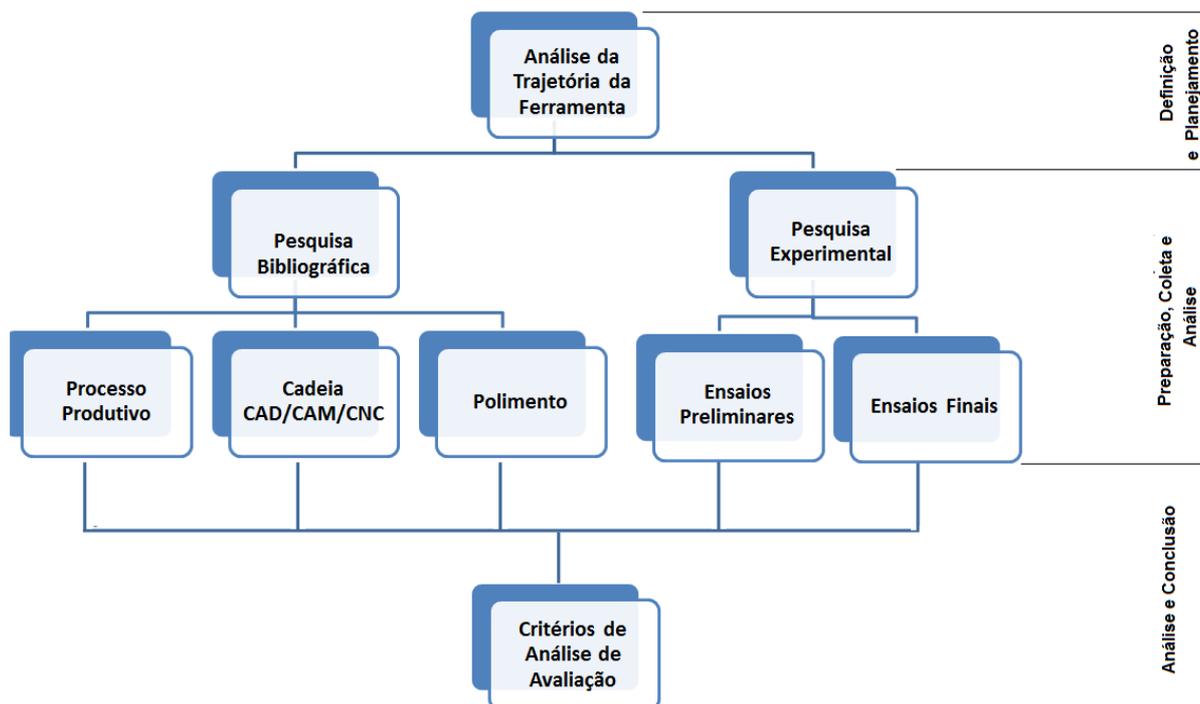


Figura 2: Outline da Pesquisa adaptado do Yin(2001).

Estes valores foram determinados de forma a obter um processo de usinagem dentro das características e especificações dos fabricantes de ferramentas de corte.

A análise das metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta sobre a etapa de polimento será realizada por meio de das seguintes características:

- tempo de usinagem, obtido durante a usinagem do corpo de prova;
- tempo de polimento relacionado com as diferentes metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta, obtido durante o polimento do corpo de prova;
- exatidão da geometria final por meio de de sua varredura em intervalos de 0,5mm por máquina de medição por coordenadas e comparação com o modelo CAD, após a usinagem e após o polimento.

Um detalhamento desta metodologia poderá ser observado no Capítulo 4 por meio de do desenvolvimento dos ensaios.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em sete capítulos, os quais são seguidos pelos anexos, e estão brevemente descritos a seguir.

Capítulo 1 - Introdução Objetivos e Metodologia – Detalhamento dos objetivos deste trabalho e análise sobre as metodologias utilizadas para a realização dos ensaios de usinagem e polimento.

Capítulo 2 - Usinagem de Moldes e Matrizes - Revisão bibliográfica sobre a Usinagem de Moldes e Matrizes, abordando o seu processo de fabricação, a importância da cadeia CAD/CAM/CNC, o Polimento e os fatores que influenciam no processo de fabricação.

Capítulo 3– Desenvolvimento dos ensaios preliminares – Em paralelo à revisão bibliográfica, o desenvolvimento deste projeto envolve, ainda, as etapas de ensaios preliminares, desenvolvimento da estratégia de usinagem sobre o tempo de polimento de superfícies inclinadas.

Capítulo 4 – Materiais e Métodos – Descrição dos ensaios de usinagem, polimento e medições realizadas nos corpos de prova, a fim de avaliar a influência das estratégias utilizadas, assim como o acabamento superficial e a influência na exatidão geométrica.

Capítulo 5 - Análise dos resultados – Neste capítulo, são analisados os resultados obtidos com os ensaios de usinagem, polimento e a medição dos corpos de prova.

Capítulo 6 - Conclusões e sugestões para futuros trabalhos – Conclusões obtidas por meio de dos ensaios de usinagem, polimento e medição dos corpos de prova, das pesquisas bibliográficas, assim como, as sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 7 - Referência Bibliográfica – Referência bibliográfica utilizada na apropriação do conhecimento necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

2. USINAGEM DE MOLDES E MATRIZES

O Brasil se encontra num forte crescimento industrial e agrícola, bem como no desenvolvimento sócio econômico, infraestrutura e tecnológico. Seus vastos recursos naturais, sua flexibilidade de trabalho transforma o país na primeira potência econômica sul americana e uma entre as sete potências mundiais (SCHÜTZER *et al.*, 2011).

Este capítulo faz uma revisão bibliográfica sobre o processo de Usinagem de Moldes e Matrizes e está dividido em 03 sub-capítulos que abordam, respectivamente, as pesquisas referentes à Evolução do Processo Produtivo, Utilização da Cadeia CAD/CAM/CNC com aplicações na Etapa de Polimento.

2.1 Evolução do Processo Produtivo

O aumento das exigências do *design* industrial, buscando cada vez mais formas harmônicas, estéticas e funcionais para a apresentação de um produto (Choi e Jerard, 1998), aliadas ao desenvolvimento dos métodos e *softwares* para o modelamento e manipulação de superfícies, bem como a redução dos custos de *hardware*, possibilitam o uso de objetos e produtos contendo formas geométricas complexas (*free form*), tornando os produtos cada dia mais atrativos para os consumidores (SAVIO *et al.*, 2007).

De acordo com a ASM (1999), os processos de usinagem podem ser agrupados em três categorias:

- os processos de formação de cavaco,
- a usinagem abrasiva e;
- processos de fabricação não tradicionais.

Esse trabalho abordará dois aspectos das definições da ASM nos processos de usinagem - formação de cavaco e a usinagem abrasiva (com foco no polimento).

Em uma análise histórica antes da aplicação do comando numérico computadorizado (CNC) nas máquinas ferramentas, o processo produtivo de moldes e matrizes com superfícies complexas era baseado em um molde padrão em madeira ou argila, construído manualmente por um mestre artesão.

Como demonstraram Granvill e Denton (1970), o molde final em aço era manufaturado em fresadora copiadora, por meio de um dispositivo traçador montado ao

lado do cabeçote do equipamento, que transmitia a trajetória para a ferramenta executar a usinagem. Com isso, à medida em que a mesa se deslocava, o dispositivo em contato com o modelo sofria movimentos verticais que eram transferidos para a ferramenta.

Para Granvill e Denton (1970) e Choi e Jerard (1998), destacam - se as seguintes características dos processos utilizando a fresadora copiadora:

- limitação do modelo final e a baixa qualidade superficial, aumentando o tempo de execução das fases seguintes da usinagem como acabamento manual (polimento) e tempo para a ajustagem dos moldes (*try out*);
- imprecisão na representação do *design* de superfícies complexas;
- produção rígida, altos tempos para de *set up* dos equipamentos e dispositivos de trabalho;
- o armazenamento do “banco de dados” (modelo copiador) necessitava de ambientes climatizados para estocagem e a integridade das informações vai se deteriorando com o tempo e com o desgaste do modelo físico decorrente ao uso.

Historicamente, este processo somente sofreu alteração no final dos anos 1940, quando a Força Aérea Americana achou que precisava de um método mais rápido e preciso de usinar as peças de formas complexas utilizadas em seus aviões. Assim, em conjunto com uma empresa chamada *Parsons Corporation*, o MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) começou a trabalhar num novo tipo de fresadora (ASM,1999).

Essa máquina deveria ser capaz de interpretar um arquivo de texto elaborado seguindo uma sintaxe e um formato pré definido de códigos, que continham as instruções necessárias para a usinagem da peça e transmitidas por meio de uma fita de papel perfurada. Para que pudesse compreender estas ordens e transformá-las em movimentos da ferramenta, instalou-se na máquina um equipamento eletrônico chamado controlador, conforme indicado por ASM (1999) e Walsh e Cormier (2006).

O controlador recebia essas ordens e as interpretava e, por intermédio de outros dispositivos eletrônicos, movimentava os motores elétricos associados a cada um dos eixos (transversal, longitudinal e vertical). A fresadora ficou pronta em 1952. Começava, assim, a era das máquinas operatrizes CN, conforme (MACHADO, 1990), (DEGARMO, 1997), (SMID, 2000)

Com a evolução respectiva da máquina NC e do computador, conforme relatam Choi e Jerard (1998), que o molde padrão feito pelo artesão fosse representado virtualmente por meio de uma nuvem de pontos capturados numa máquina de medição por coordenadas. Esta era então interpolada matematicamente gerando as superfícies e repassadas para a máquina por meio de programas NC. (CHOI e JERARD,1998).

Os principais problemas na manufatura dos modelos das ferramentas começaram a ser superados com o desenvolvimento de sistemas CAD (*Computer Aided Design*), capazes de substituir o modelo físico por um modelo virtual e de sistemas CAM (*Computer Aided Manufacturing*), capazes de gerar os programas NC para a manufatura destes modelos.

Com isso, “pode-se afirmar que o desenvolvimento das tecnologias CAD, CAM e CNC foram ferramentas fundamentais para a transformação do processo de fabricação e da utilização de superfícies complexas” (HELLENO, 2004), sendo estes requisitos obrigatórios nas empresas e base para qualquer tecnologia a ser aplicada neste setor atualmente, garantindo a competitividade e a sua permanência no mercado (ABADI, 2009).

A Figura 3 mostra um esquema da manufatura tradicional de moldes e matrizes em que se pode observar cada uma das etapas.

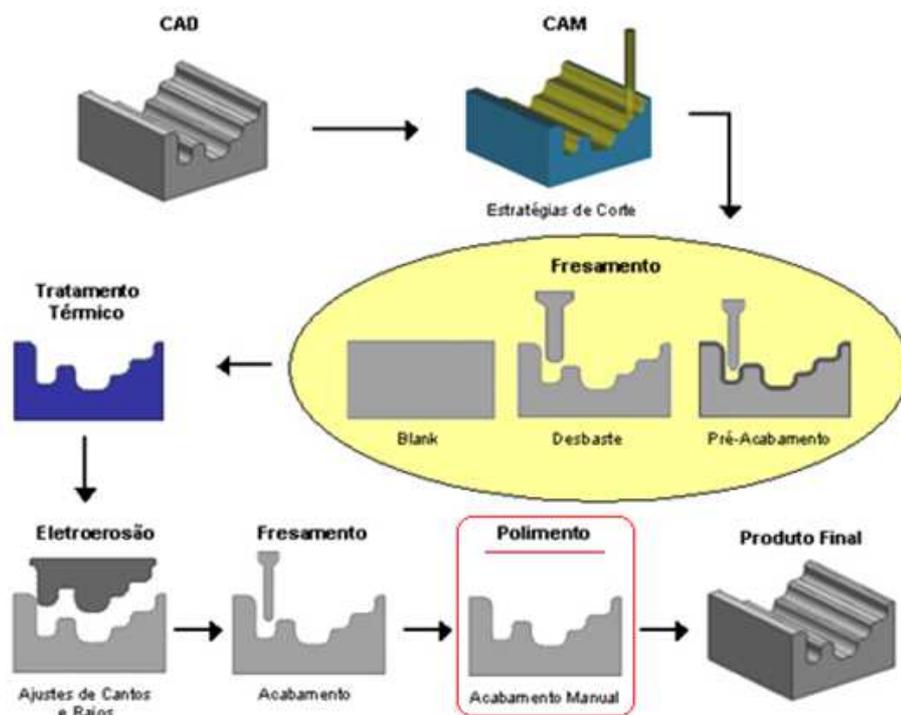


Figura 3: Processo Tradicional de Fabricação de Moldes e Matrizes (BAUCO, 2003).

Apesar da flexibilidade no processo de fabricação por meio de da integração entre os sistemas CAD/CAM/CNC, o *lead time* ainda continua sendo um fator crítico deste

processo. Conforme pode ser observado na Figura 1 a maior parte deste tempo é consumido pelas operações de usinagem e acabamento manual. Isto ocorre em razão da baixa qualidade superficial do molde após o processo de usinagem com velocidades convencionais, sendo necessárias as etapas de acabamento manual (polimento), realizadas por artesões, que visa a obter o acabamento superficial necessário para o ferramental começar a produzir.

Estes processos têm sido melhorados devido às inúmeras pesquisas que vêm sendo realizadas neste setor, como por exemplo, as pesquisas de (BRECHER *et al.*, 2006) (BRINKSMEIER e AUTSCHBACH, 2004) (KATAHIRA *et al.*, 2003) (KLOCKE e DAMBON, 2003) (LASEMI *et al.*, 2010).

Pode se conceituar um processo tradicional para a manufatura de moldes e matrizes como (BAUCO, 2003) (TOH, 2004) (LASEMI *et al.*, 2010):

- Operação Desbaste: processo que visa à maior taxa de remoção de material possível, de acordo com o material a ser usinado, a ferramenta de corte escolhida e os parâmetros adotados;
- Operação Pré-Acabamento: tem como finalidade conseguir uniformizar a geometria para as operações de acabamento;
- Operação Acabamento: remover todo o material deixado das operações anteriores, a fim de obter a melhor qualidade superficial.
- Operações de Eletroerosão: O tempo de produção pode diminuir consideravelmente com estes processos; porém, algumas vezes a geometria complexa dos moldes não permite a aplicação destas operações automáticas.
- Operações Manuais de Acabamento (polimento): etapa realizada por chamados “mestres polidores” que utilizam instrumentos como lixas, pedras, esmerilhadeiras manuais, etc.. Este processo tem grande influência nos custos e tempos de produção, pois tem como finalidade eliminar as imperfeições deixadas pelas operações de usinagem, que podem ser replicadas no produto final principalmente no processo de injeção plástica.

Devido à constante busca por reduções de tempo, o uso da Tecnologia HSC (*high speed cutting* – usinagem com altas velocidades de corte) tem se tornado atrativo, pois é possível se obter acabamento superficial final tão eficiente que permite reduções dos

tempos envolvidos nas operações, dando início a uma nova forma de conceituar a o processo de manufatura (WEINERT e GUNTERMANN, 2000).

De acordo com os estudos realizados por Fallböhmer *et al.* (2000), as vantagens da Tecnologia HSC são:

- alta taxa de remoção de material;
- a redução do tempo de espera;
- baixa força de corte;
- dissipação de calor com a remoção do cavaco resultando em uma redução nas distorções;
- aumento na exatidão geométrica da peça e na qualidade superficial.

Porém, só a aplicação da Tecnologia HSC não é suficiente para alcançar as metas desejadas. O que se pretende com ela é a usinagem de materiais já endurecidos, reduzindo as de etapas de produção pela eliminação total ou parcial dos processos de eletroerosão, bem como a supressão dos processos de tratamento térmico e redução do tempo de polimento manual, obtendo-se, assim, um processo de fabricação reduzido, como pode ser observar na Figura 4 (BAUCO, 2003).

Assim, ganhos com a qualidade superficial e geométrica do produto final fizeram com que as fases do processo produtivo, como acabamento manual e ajustes (*try out*), fossem reduzidas, resultando numa redução do *lead time* (BAUCO, 2003) e (WEINERT; GUNTERMANN, 2000).

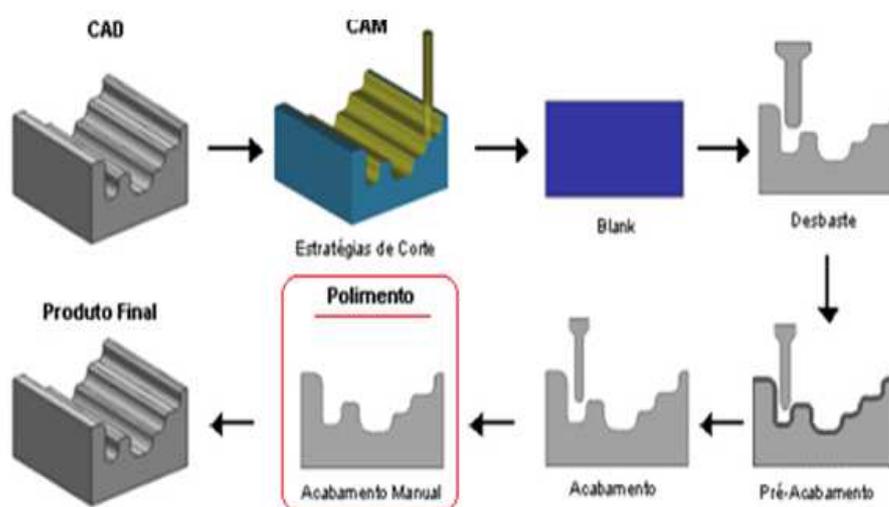


Figura 4: Fabricação de Moldes e Matrizes utilizando os conceitos HSC (BAUCO, 2003).

Mesmo assim, pode - se observar nas Figura 3 e Figura 4 que essas fases ainda são representativas para o processo. Em virtude disso, esse trabalho gostaria de abordar outro ponto de vista, para contribuir para o desenvolvimento do setor de moldes e matrizes.

Em virtude do enfoque deste trabalho estar direcionado para os métodos de interpolação da trajetória da ferramenta que é fruto do processo CAD/CAM/CNC, sobre a etapa de Polimento, os próximos tópicos irão tratar somente os fatores que estão diretamente relacionados com estes ciclos na manufatura de moldes e matrizes

2.2 Cadeia CAD/CAM/CNC aplicada ao Processo de Fabricação de Moldes e Matrizes

A cadeia CAD/CAM/CNC forma as bases da manufatura de moldes e matrizes. Por meio de de um Sistema CAD (*Computer Aided Design*), um modelo geométrico contendo a concepção e o projeto de fabricação de um produto é obtido. Transfere-se, esse modelo geométrico gerado no sistema CAD ao Sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*), no qual, os dados da manufatura serão inseridos, tais como:

- as dimensões da matéria prima;
- estratégias de usinagem;
- parâmetros tecnológicos para que a trajetória da ferramenta seja calculada e simulada.

Nesse momento, a trajetória da ferramenta será representada por um arquivo nativo, conhecido como CLDATA (*cutter location data file*), (CHOI e JERARD,1998 MAON e BROWNE, 1993). Esse arquivo contém as coordenadas no plano cartesiano da trajetória da ferramenta. Os dados contidos nesse arquivo só serão reconhecidos pelo Sistema CAM, no qual foi gerado, e, por não estar na linguagem de programação ISO 6983, não é interpretado pelo CNC (CHOI e JERARD,1998) (WOLF e WECK, 2003). Os Sistemas CAM, contém um módulo de processamento dos dados conhecido como pós-processador, responsável por transformar o arquivo CAM em Programa NC, com a linguagem apropriada para o CNC.

A Figura 5 é um exemplo de aplicação na indústria de moldes e matrizes, da integração do ciclo CAD/CAM/CAM na manufatura. Observa se que no setor de

fabricação de moldes e matrizes, a tecnologia que se tornou uma referência foi a cadeia CAD/CAM/CNC. Os itens a seguir tratam, de forma detalhada, cada um dos sistemas apresentados.

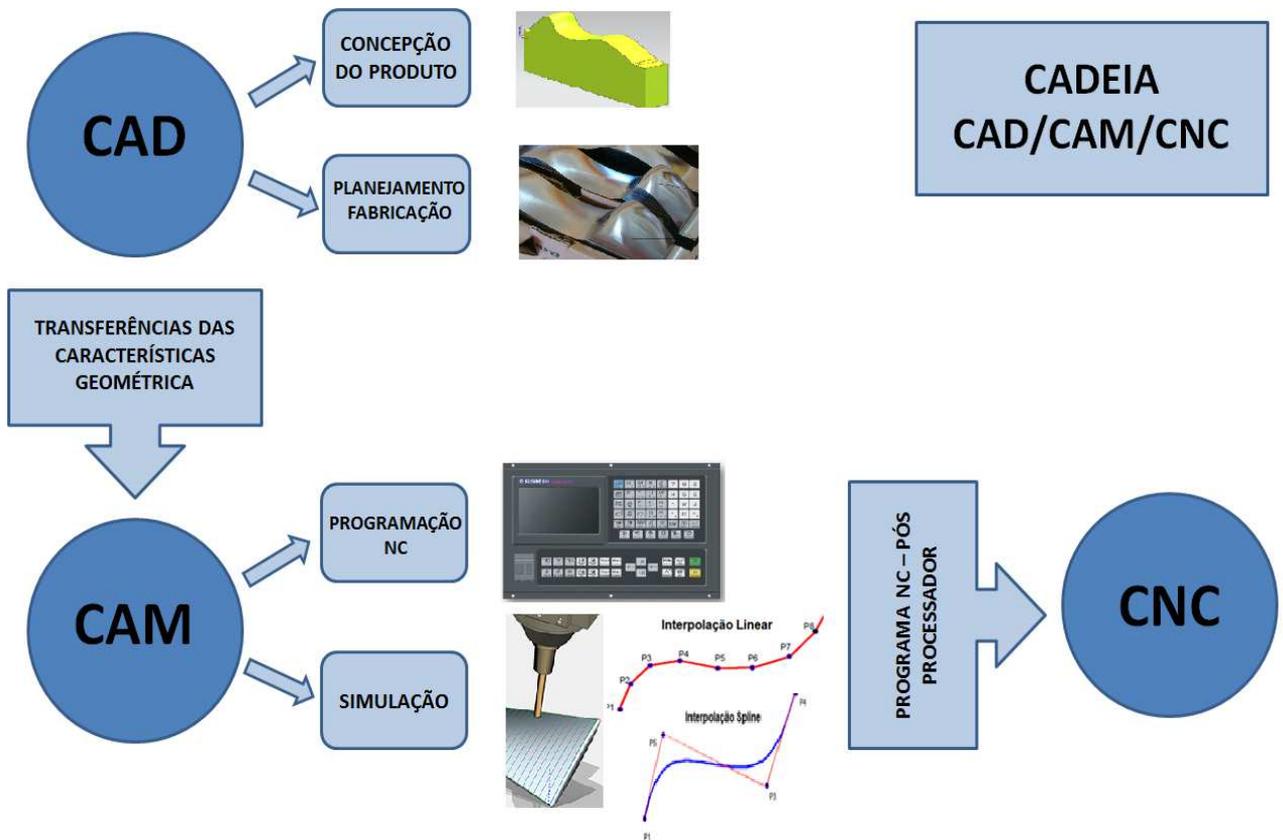


Figura 5: Integração CAD/CAM/CNC na fabricação de Moldes e Matrizes adaptado de Lasemi et al., (2010)..

2.2.1 Sistemas CAD

As aplicações de computadores para auxiliar no desenvolvimento industrial tiveram início nos anos 1950, quando o MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), 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. O primeiro passo em direção aos gráficos de computadores foi dado por um sistema chamado *SKETCHPAD* desenvolvido por Ivan Sutherland, no MIT, em 1963.

Esse sistema consistia em um osciloscópio de raios catódicos acionado por um computador Lincoln TX2, onde as informações eram exibidas na tela. Os desenhos podiam ser elaborados na tela, mas o sistema exigia muito recurso, boa potência do computador e era extremamente dispendioso (BÉZIER, 1993).

Contudo, para Bézier (1993) e Kong *et al* (2003), nesta época estes sistemas CAD já propiciavam várias vantagens:

- Possibilidade de envio, ou recebimento de desenhos por processos virtuais;
- Gerenciamento eficaz dos desenhos;
- Precisão dimensional;
- Rapidez na recuperação, modificação ou atualização de desenhos.

Uma geração de sistemas CAD marcou os anos 1970 como o desenvolvimento de técnicas computacionais para a representação de objetos tridimensionais. De acordo com Volpato (1995), 1980 foram marcados pela utilização da integração CAD/CAM, sem bons resultados, pois a comunicação entre diferentes sistemas era ineficiente e as integrações dos mesmos não permitiam a geração eficiente dos programas NC.

Para Souza (2004), os sistemas CAD são utilizados no início do desenvolvimento do produto para o modelamento das suas formas geométricas. Posteriormente, o sistema CAD ainda é aplicado no projeto de fabricação dos moldes e matrizes.

As geometrias oriundas dos sistemas CAD representam elos entre outros sistemas computacionais de auxílio a engenharia. Suas informações geométricas são utilizadas como base de cálculo.

Portanto, a correta escolha do *software* CAD a ser implantado em um ambiente de trabalho tem uma importância significativa, não apenas para as etapas de desenho e projeto, mas também para as etapas que se sucedem. Os sistemas CAD são classificados como (COELHO e SOUZA, 2003):

- Sistemas de pequeno porte (*low end*): apresentam menor custo de hardware e software; porém, só permite a modelagem em duas dimensões;
- Sistema médio porte (*meddle end*): apresentam como principal característica a representação de objetos tridimensionais, além da possibilidade de comunicação com outros sistemas. Esses sistemas possuem dois recursos que são muito utilizados nas etapas de desenvolvimento do produto que são: Sistemas Paramétrico e Sistemas Associativos;

- Sistemas de grande porte (*high end*): possuem todos os recursos das classes anteriores e, também, a capacidade de modelamento híbrido e integração entre diferentes módulos.

Outra forma de classificar os sistemas CAD é de acordo com a forma que se gera as geometrias, ou seja, os sistemas CAD podem possuir tipos diferentes de modeladores, que podem ser sólidos, de superfícies ou híbridos (PIEGL e TILLER, 1997) (MCMAHON e BRONWE, 1999) (CUNHA e DIAS, 2000) (ROGERS, 2001) (COELHO e SOUZA, 2003) (SOUZA e ULBRICH, 2009):

- Modelagem Geométrica por Sólidos: são capazes de gerar objetos tridimensionais por meio de da utilização de sólidos primitivos e, quando se faz o modelamento de produtos, utiliza também operações booleanas (adição, subtração, intersecção, etc.);
- Modelagem Geométrica de Superfícies: emprega formulações matemáticas complexas, conhecidas como funções Spline. Assim torna se possível a modulação de formas geométricas mais complexas que não possuem espessura, ou seja, são apenas superfícies onde qualquer ponto do polígono de controle pode ser editado para alterar a forma desta superfície mantendo o objeto tridimensional.
- Modelagem Geométrica Híbrida: são sistemas mais robustos, que utilizam complexos algoritmos matemáticos, sendo esta sua principal característica, o que permitem a utilização de qualquer um dos métodos citados acima, de acordo com o produto que está sendo modelado. Desta forma, o trabalho se torna muito mais versátil, porém requer usuários com um conhecimento muito maior.

A tecnologia CAD vem exercendo cada vez mais influência na competição industrial, proporcionando cada vez mais o aprimoramento técnico, aumento da produtividade, da qualidade dos produtos, diminuição dos custos e principalmente a rapidez na introdução de novos produtos no mercado (SOUZA e ULBRICH, 2009).

2.2.2 Sistemas CAM

O primeiro sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*) também foi desenvolvido pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology) nos EUA, por volta de 1950 para

propósitos militares. Posteriormente, na década 1960 surgem os primeiros sistemas comerciais utilizados em grandes indústrias como a aeroespacial e automobilística (BÉZIER, 1993).

A manufatura auxiliada por computador, CAM, consiste na utilização de sistemas computacionais nas tarefas de planejamento, gerenciamento e controle da manufatura, podendo-se programar diversos processos de fabricação, como, por exemplo, fresamento, torneamento, furação, eletroerosão a fio, retificação, prototipagem rápida e outros (COELHO e SOUZA, 2003).

Para Souza e Ulbrich (2009), os diversos processos de fabricação existentes, o fresamento tem se destacado, pois, neste processo, as movimentações da ferramenta de corte são, muitas vezes, complexas, exigindo muitos recursos computacionais para calculá-las.

Na fabricação de moldes e matrizes, o sistema CAM proporcionou uma significativa melhora na sua manufatura, pois muitas vezes as formas geométricas desses produtos são complexas.

Inicialmente para a realização da programação, é necessário um modelo CAD do produto. No item 2.2.3, será abordada a integração entre CAD e CAM.

O programador CAM inicia o processo inserindo as informações pertinentes à fabricação do produto/peça, tais como: tipo de operação, estratégias de corte e parâmetros tecnológicos.

Depois de inseridas todas as informações da fabricação do produto, o programador fará a conversão da linguagem CLDATA (*cutter location data file*) que contém apenas o percurso da ferramenta representado por coordenadas no plano cartesiano, para a linguagem da máquina-ferramenta que será utilizada para a sua fabricação (SOUZA, 2004) (HELLENO, 2008) (SOUZA; ULBRICH, 2009).

2.2.3 Integração dos Sistemas CAD/CAM

Para o desenvolvimento dos moldes e matrizes por meio da cadeia CAD/CAM/CNC, primeiramente é necessário transmitir todos os dados do modelo geométrico gerado pelo CAD para o sistema CAM. Essa transferência dos dados do modelo geométrico pode acontecer de algumas maneiras diferentes, de acordo com os sistemas CAD/CAM que estão sendo utilizados (SOUZA; ULBRICH, 2009):

- Transferência direta: conhecida como transferência de dados por formato nativo, pode ser realizada entre sistemas diferentes de um

mesmo fabricante. Nestes sistemas, o recurso de associatividade é muito importante, pois permite que alterações feitas no modelo tridimensional gerado pelo Sistema CAD sejam automaticamente atualizadas pelo Sistema CAM.

- Transferência por interfaces padronizadas: conhecida como transferência de dados geométricos por formato neutro, são utilizados elementos geométricos para descrever o modelo original que será transferido. Quanto maior for à quantidade de recursos geométricos utilizados para a transferência, menor será a possibilidade de ocorrerem problemas com a qualidade e a precisão do modelo convertido (SCHÜTZER e HELLENO, 2005) (SOUZA e ULBRICH, 2009).

Para Dürr *et al.* (2000), um modelo tridimensional gerado pelo sistema CAD é salvo em um formato padrão, sendo os mais conhecidos os formatos STEP, IGES e VDA-FS. Estes formatos podem ser decodificados por diversos *softwares* diferentes, sejam eles CAD ou CAM. Na Quadro1, pode-se observar uma comparação entre os tipos de geometrias codificados por cada padrão de comunicação.

Quadro1: Padrões de comunicação entre sistemas CAD/CAM (DÜRR *et al.*, 2000).

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

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

Como observado em Henriques (2004) e Miralles (2009), problemas com qualidade e precisão geométrica podem ocorrer durante a conversão do modelo geométrico gerado em um sistema CAD específico para modelo geométrico de formato neutro, pois

se o modelo geométrico original contiver elementos geométricos que não fazem parte dos recursos geométricos disponíveis na interface de transferência escolhida, o mesmo será eliminado ou substituído por outro elemento geométrico. Esses problemas com qualidade e precisão advindas do formato neutro podem acarretar em má geração da trajetória da ferramenta e possíveis colisões da máquina-ferramenta.

A escolha da interface de transferência é um fator importante para garantir a qualidade e precisão do modelo geométrico a ser transferido e evitar futuros problemas de geração da trajetória da ferramenta em um sistema CAM.

Como demonstrado na Quadro1, a interface de transferência que apresenta maior quantidade de recursos geométricos é a do tipo *STEP* definida nas normas ISO 10303, e que, portanto, é a que realiza a conversão do modelo geométrico original em formato neutro com melhor qualidade e precisão (HENRIQUES, 2004).

Outra possibilidade é a conversão do modelo geométrico do sistema CAD em um modelo matemático, por meio da geração de malhas de triângulos sobre a geometria original. Desta maneira, ao invés de elementos geométricos, serão transferidas informações de pontos definidos por coordenadas cartesianas (XYZ), permitindo assim uma comunicação simples entre os sistemas CAD/CAM (KNOPPERS e GUNNINK, 2000).

Para Dürr *et al.* (2000), a malha de triângulo consiste de elementos planos, é necessária a introdução de uma tolerância de contorno, usada principalmente no caso de superfícies complexas (curvas), como ilustra a Figura 6. Geração da malha de triângulos sobre um modelo geométrico. Quanto menor a tolerância da geração da malha de triângulos, melhor será a exatidão do modelo geométrico e, conseqüentemente o produto final. No entanto, o número de triângulos e o tamanho final do arquivo também aumentam com a redução da tolerância de triangularização (HELLENO, 2004).

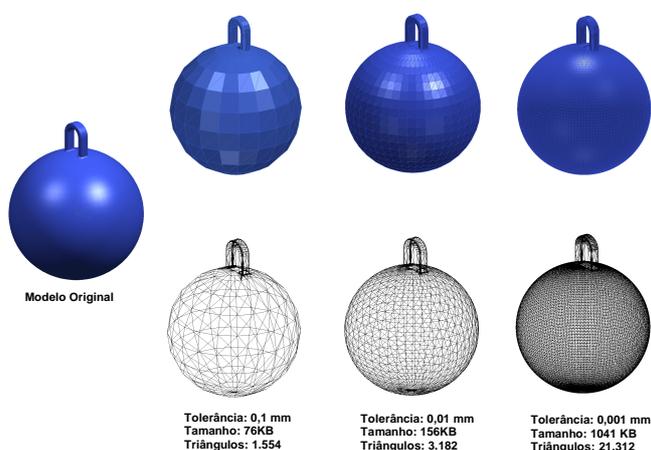


Figura 6: Malha de triângulo sobre o modelo geométrico (HELLENO, 2004).

2.2.3.1 Tolerância CAM

O programador fornece ao sistema CAM uma faixa de tolerância para o cálculo da trajetória da ferramenta, normalmente definida por uma tolerância superior e inferior, que será aplicada ao modelo geométrico para determinar uma trajetória de ferramenta que melhor se adapta dentro deste campo (CHOI e JERARD,1998) (CHOI e BANERJEE, 2007)

A Figura 7 ilustra um exemplo de determinação da trajetória da ferramenta por meio da interpolação linear para um mesmo modelo geométrico, com valores diferentes de tolerâncias fornecidas ao sistema CAM.

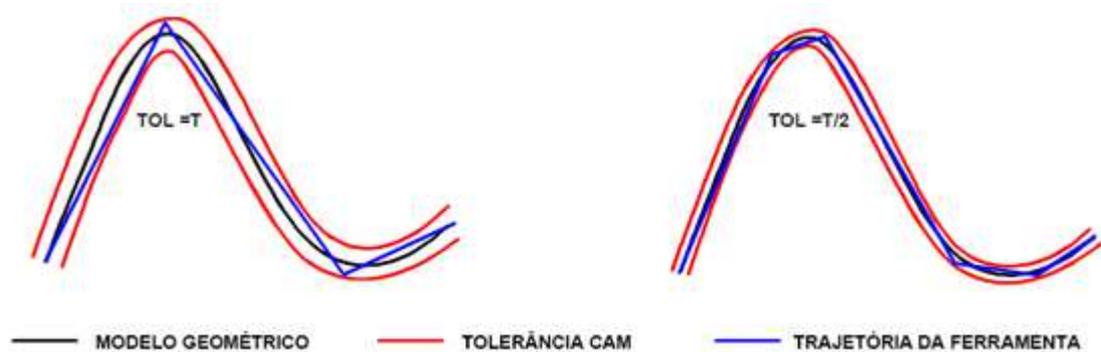


Figura 7: Trajetória da ferramenta em função da tolerância CAM (SOUZA, 2004)

Para Souza (2004), Lasemi *et al.* (2010), o valor da faixa de tolerância adotada está relacionado com a exatidão com que a ferramenta irá percorrer sua trajetória desta forma, a escolha da tolerância é um parâmetro muito importante durante a definição das estratégias de corte, ou seja, quanto menor a faixa adotada, maior será a exatidão da trajetória da ferramenta e, assim, conseqüentemente, mais próximo será o modelo final do modelo gerado no sistema CAD.

Com isso, a faixa de tolerância adotada para o modelo geométrico também está diretamente relacionada com a exatidão da trajetória da ferramenta, com o tamanho do programa NC e com o seu tempo de cálculo, fazendo com que o estudo desta influência ganhe importância na usinagem de superfícies, normalmente utilizadas na indústria de moldes e matrizes.

2.2.3.2 Estratégias de Usinagem

Com o desenvolvimento dos *softwares* CAM, diferentes possibilidades de estratégias de usinagem, principalmente para as operações de acabamento, vêm

sendo implementadas na indústria de moldes e matrizes. Isto permite flexibilidade ao usuário para definir a mais adequada para cada campo de aplicação.

A estratégia de planejamento da usinagem é uma tarefa crítica na manufatura de moldes e matrizes com superfícies complexas (CHOI e JERARD, 1998) (MCMAHON e BROWNE, 1999) (LASEMI *et al.*, 2010). A escolha dentre as diferentes trajetórias de ferramenta pode representar uma grande influência sobre o tempo de usinagem, desgaste de ferramentas de corte, exatidão geométrica e polimento (qualidade superficial) (SOUZA, 2003) (MCMAHON e BROWNE, 1999).

O processo de desbaste tem como função deixar o material em bruto no formato mais próximo da geometria desejada, sendo responsável pela maior parte da remoção de material do processo de fabricação. A produtividade está ligada diretamente ao parâmetro taxa de remoção do cavaco da ferramenta (FERRARESI, 1981)

O aumento do tempo de usinagem na operação de pré-acabamento, tem como benefícios: ganhos com a qualidade superficial e geométrica do produto final, reduzindo assim os tempos com as fases de acabamento manual (polimento) e ajustes (SOUZA, 2003) (MCMAHON e BROWNE, 1999). A operação de acabamento tem como objetivo deixar a superfície dos moldes e matrizes com o acabamento superficial final necessário para o seu uso, sem perder a exatidão em relação à geometria original.

Normalmente, são utilizadas ferramentas com geometria de ponta esférica para a execução desta operação, em decorrência de sua flexibilidade no contorno das superfícies. Esta flexibilidade ocorre em virtude da usinagem ser realizada por meio de um único ponto da ferramenta, gerando uma usinagem final por linhas (SCHULZ *et. al*, 2001) (GOMES, 2002). Com isso, a qualidade superficial está relacionada diretamente com o intervalo entre estas linhas, conforme pode ser observado na Figura 8.

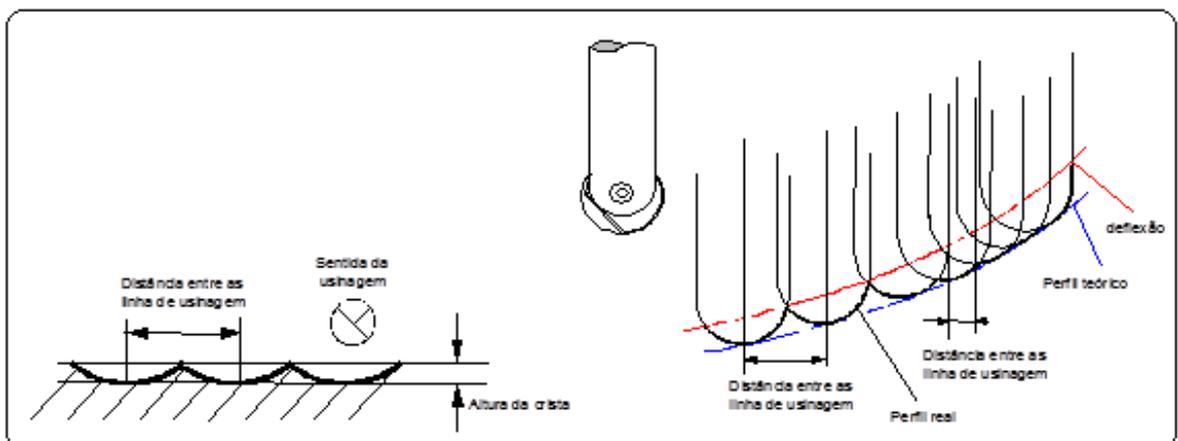


Figura 8: Característica de Flexibilidade da fresa de topo esférica (SCHULZ *et. al*, 2001).

Os sistemas CAM permitem aos usuários definirem para a operação de acabamento a distância entre as linhas de usinagem ou altura da crista, conforme pode ser observado na Figura 8. Em decorrência disso, alguns sistemas CAM apresentam como recurso aplicar estes parâmetros em relação à geometria da peça, mantendo assim, uma altura de crista constante independente da complexidade da geometria (WARKENTIN *et al.*, 2001). Porém, é importante enfatizar que uma menor altura de crista não significa necessariamente um melhor caminho da ferramenta, uma vez que interfere no aumento do custo com o tempo de usinagem, no tempo de acabamento manual (LASEMI *et al.*, 2010).

De acordo com Choi e Jerard (1998), a etapa de planejamento do caminho da ferramenta é composta de 2 aspectos:

- Topologia: é definida pelo tipo de movimento que a ferramenta fará sobre a superfície a ser usinada;
- Parâmetros: são os dados referentes a estratégia, por exemplo, o passo lateral entre movimentos sucessivos e a velocidade de avanço da ferramenta em cada passo.

Na fabricação de moldes e matrizes, em geral, existem duas estratégias que são as mais utilizadas dentre as muitas possíveis que podem ser adotadas para definir a topologia do caminho da ferramenta, que são: *Zig Zag* e *Follow Periphery* (KIM e CHOI, 2000) (REN *et al.*, 2004) (GOELLNER *et al.*, 2004) (GOLOGLU e SAKARYA, 2008). Estas estratégias são as mais utilizadas devido à sua simplicidade e adaptabilidade em aplicações desse segmento da engenharia (LASEMI *et al.*, 2010).

Para Gologlu e Sakarya (2008), a estratégia *Zig Zag* tem por característica o movimento da ferramenta percorrendo toda a superfície da peça por meio de da criação de linhas paralelas que cortam nas duas direções de corte (ida e volta), maximiza os movimentos de corte, pois mantém um passo lateral constante em apenas uma direção, conforme ilustra a Figura 9.

Outra característica importante é que este tipo de movimento não permite que as linhas geradas na trajetória da ferramenta se cruzem.

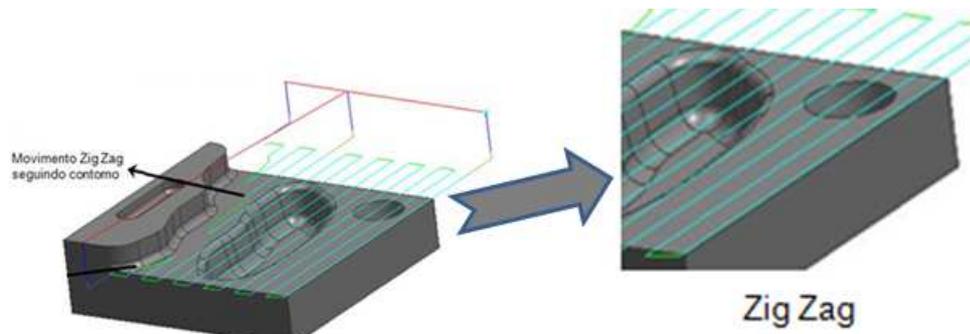


Figura 9: Representação da Estratégia Zig Zag (CHOI e JERARD, 1998).

A *Follow Periphery*, para Goellner et al. (2004), tem como base o caminho da ferramenta em uma estratégia do tipo *offsets* sobre a geometria da peça, fazendo com que a ferramenta tenha uma trajetória otimizada, com sequência de passes concêntricos, seguindo os contornos da região de corte, ou seja, consiste em gerar trajetórias equidistantes ou paralelas à geometria da peça e os passes criados com esta estratégia são em forma de ciclos fechados, como ilustra a Figura 10.

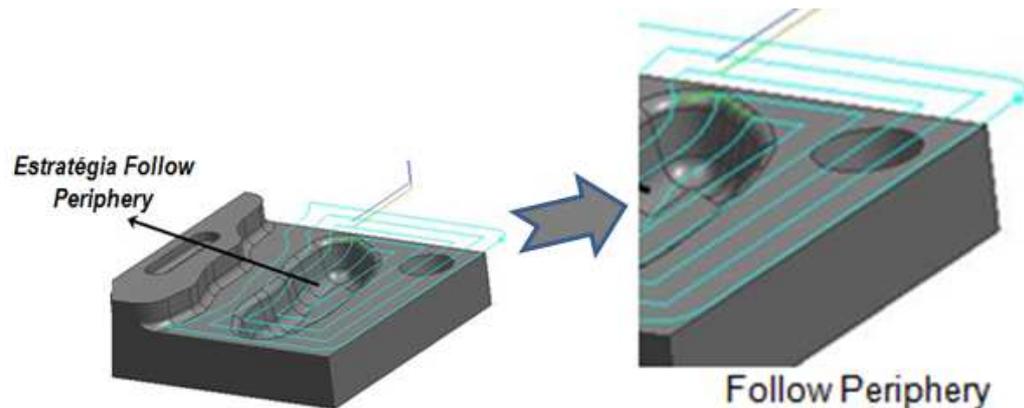


Figura 10: Representação da Estratégia Follow Periphery (CHOI e JERARD, 1998).

Além destas duas estratégias (*Zig/Zag* e *Follow Periphery*), existem diversas outras que podem ser utilizadas nos mais diversos processos produtivos e que serão descritas a seguir, mais estas não irão compor os métodos para a elaboração da pesquisa, tendo em vista que o trabalho visa auxiliar um ponto de vista da indústria de Moldes e Matrizes.

A *Radial Lines* é outra estratégia de usinagem que gera o caminho da ferramenta com movimentos perpendiculares a partir da definição de um ponto central, e é normalmente utilizado para realizar operações de acabamento, cujos movimentos são do tipo *Zig/Zag* ou *Zig* conforme demonstrado na Figura 11 (CHOI e JERARD, 1998)

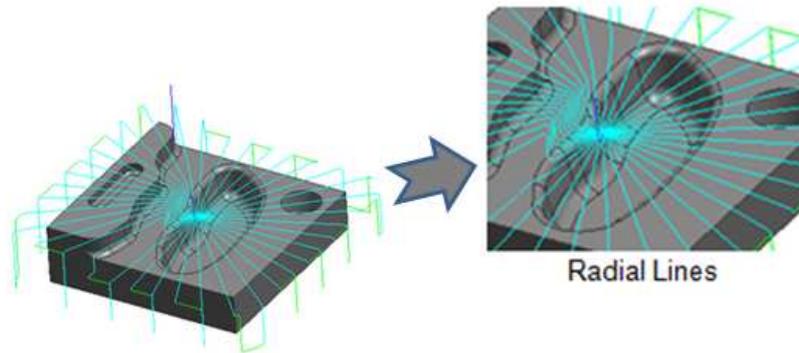


Figura 11: Representação da Estratégia de Usinagem Radial Lines (CHOI e JERARD, 1998).

A *Concentric Arcs* é uma estratégia, que cria movimentos circulares da trajetória da ferramenta, conforme ilustra a Figura 12 e que tem o mesmo princípio da *Radial Lines*, ou seja, que também parte de um ponto inicial para o início da usinagem (GOLOGLU e SAKARYA, 2008) (CHOI e JERARD, 1998). Sendo divididas em duas formas, fazendo movimentos circulares para fora da peça, conhecida como *Outward*. A segunda é fazendo movimentos que se iniciam fora da peça e vão até o ponto central, conhecida como *Inward*.

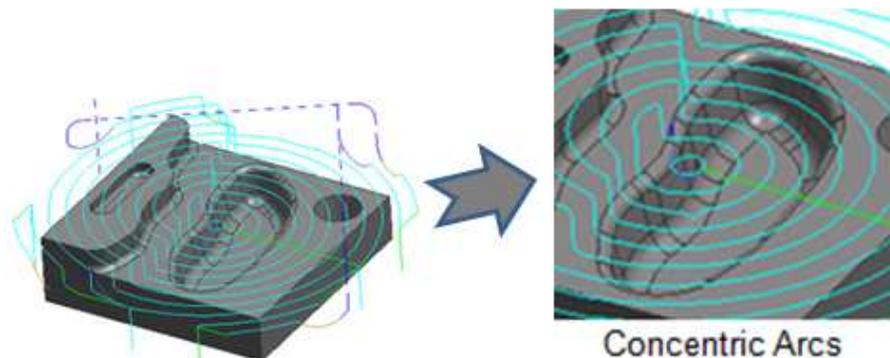


Figura 12: Estratégia Concentric Arcs (CHOI e JERARD, 1998).

A Figura 13 demonstra a aplicação da estratégia *Trochoidal*, que utiliza caminhos em forma de ciclos que controlam o corte, sendo esse método bastante utilizado quando existe a necessidade de limitar os passos laterais para prevenir que a ferramenta quebre durante o movimento de corte.

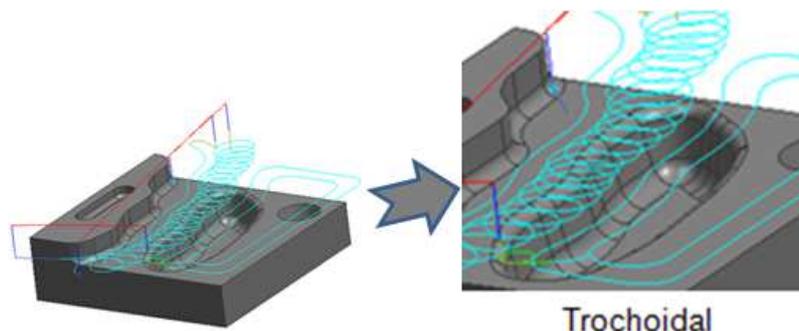


Figura 13: Exemplo de Estratégia Trochoidal (CHOI e JERARD, 1998).

A grande diversidade parâmetros tecnológicos aplicados ao sistema CAM para auxiliar nas estratégias de usinagens disponíveis comercialmente, torna a tarefa de definir o sistema mais adequado para determinada aplicação, uma tarefa árdua, mas bastante representativa. Assim, para a geração do caminho da ferramenta, devem ser avaliados 3 critérios (MARSHALL e GRIFFITHS, 1994) (LI e JERARD, 1994) (LASEMI *et al.*, 2010):

- Qualidade: parâmetros de caminho devem estar livre de colisões e a altura de crista deve estar dentro da faixa de tolerância.
- Eficiência: dois tipos de medidas de eficiência precisam ser considerados:
 - na simulação baseada no tempo de processamento da CPU e no uso da memória;
 - do tempo real de usinagem, é alcançada pelo sistema por meio de a geração e simulação de diferentes topologias e parâmetros.
- Robustez: é considerada como a capacidade de adaptação com diferentes superfícies, estratégias, máquinas, condições dinâmicas e habil em sua condição de continuidade ao longo do processo.

É frequente observar empresas realizando investimentos equivocados nesta tecnologia por falta de esclarecimento, devido à simplicidade matemática e facilidade de uso pelo programador, a trajetória da ferramenta representada pela interpolação linear tornou-se um padrão no ambiente industrial.

2.2.4 Métodos de Interpolação da Trajetória da Ferramenta

A interpolação da trajetória da ferramenta é o que determina como o movimento da ferramenta se comportará no espaço.

Os sistemas CAM, em uma programação de usinagem com 3 eixos, podem utilizar diferentes tipos de interpolação (linear, circular e *spline*), conforme observado na Figura 14 para a geração da trajetória da ferramenta que melhor se adaptam à faixa de tolerância CAM e, conseqüentemente, influência na manufatura dos moldes e matrizes.

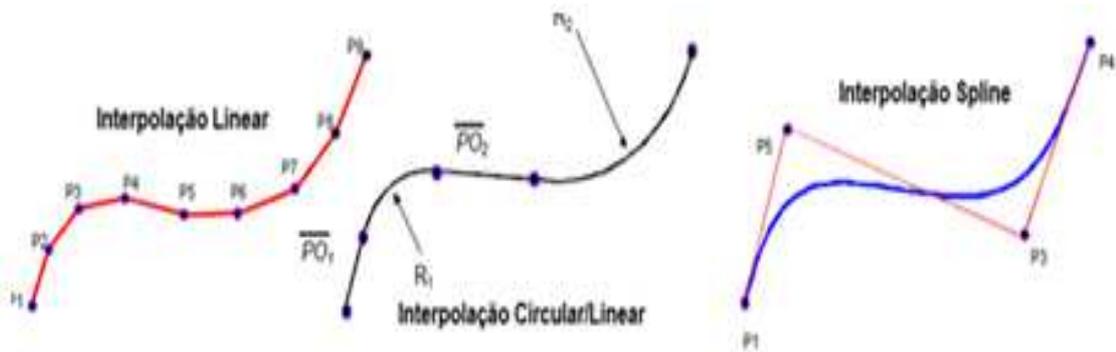


Figura 14: Interpolações da Trajetória da Ferramenta (SOUZA, 2001).

Esses tipos de interpolação da trajetória da ferramenta serão detalhados e explicados na sequência deste trabalho.

2.2.4.1 Interpolação Linear

Para Souza (2004), a interpolação linear (Figura 15 A e B) é determinada por uma representação matemática simples (comparada aos demais métodos), cuja trajetória da ferramenta é dada por meio de segmentos de retas **(A)**, que melhor se adaptam à faixa de tolerância do sistema CAM **(B)**. De acordo com linguagem de programação ISO 6983, estes segmentos de retas são representados pelo comando G01 (Interpolação Linear). Sendo esta característica extremamente importante para a introdução da Programação CAD/CAM no ambiente industrial, uma vez que não necessitava de características especiais do CNC e do sistema CAM.

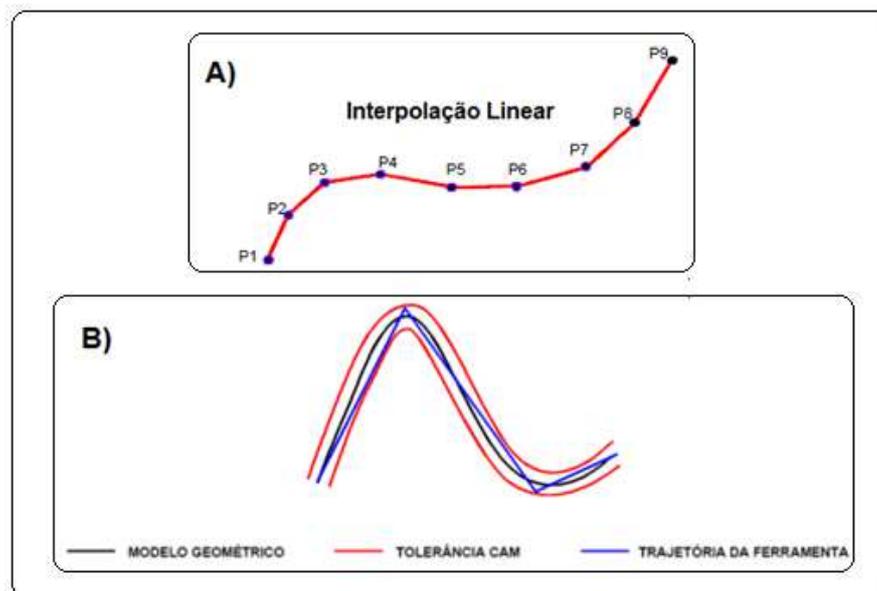


Figura 15: Interpolação Linear e Tolerância CAM (SOUZA, 2004).

Para Arnome (1998) e Olling (1999), as características principais deste método são:

- programas NC extensos;
- trajetória da ferramenta representada por segmentos de retas, ocasionando baixa qualidade de acabamento gerando “faceteamento” da superfície usinada;
- pequena tolerância no sistema CAM aplicadas em modelos geométricos com superfícies complexas (características de muitos moldes e matrizes), resultando em um número excessivo de pequenos segmentos de retas;

Esse “faceteamento” gerado na trajetória da ferramenta, associada às altas taxas de velocidade de avanço, resultará em significativos problemas, tempo de resposta, características de aceleração, desaceleração devido ao tempo de processamento de bloco (TPB - varia entre 1 a 10 ms, para os comandos brasileiros), resultando em uma redução do avanço real e conseqüentemente, um aumento do tempo de usinagem e desempenho dinâmico na manufatura em máquinas ferramentas, ilustrado pela Figura 17 (MOREIRA, 2003) (EBERLEIN, 2003) (LARTIGUE *et al.*, 2004) (LANGERSON *et al.*, 2004).

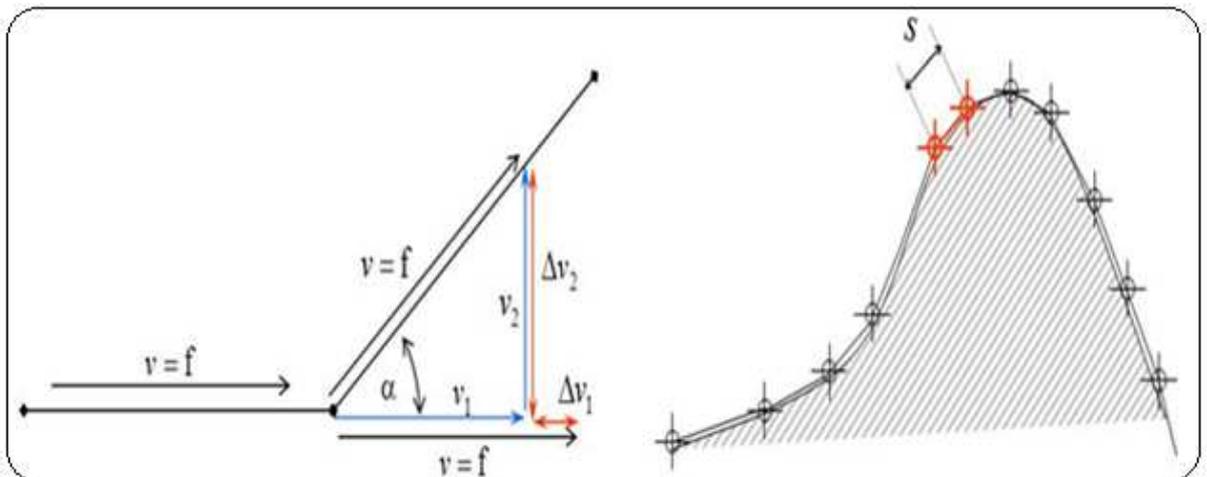


Figura 16: Efeito da interpolação linear sobre a velocidade de avanço (STROH e ABELE, 2005).

Para a manufatura de moldes e matrizes, os CNCs apresentam tempos de processamento de blocos inferiores à 1 ms (KOELSCH, 2003).

Estes picos de aceleração e desaceleração irão refletir em oscilações na máquina ferramenta, resultando em uma sobrecarga extrema nos eixos e um pior acabamento superficial dificultando as etapa de acabamento manual (polimento) e exatidão da geometria usinada (STROH e ABELE, 2005).

2.2.4.2 Interpolação Circular

Método associativo que determina a trajetória da ferramenta, conforme ilustrado na figura 17. A partir da união da interpolação linear (segmentos de retas) e da interpolação circular (arcos) **(A)**, que melhor se adaptam no campo de tolerância do sistema CAM **(B)**. Estes segmentos de retas e arcos são representados pelos comandos G01, G02 e G03 da linguagem ISO 6983.

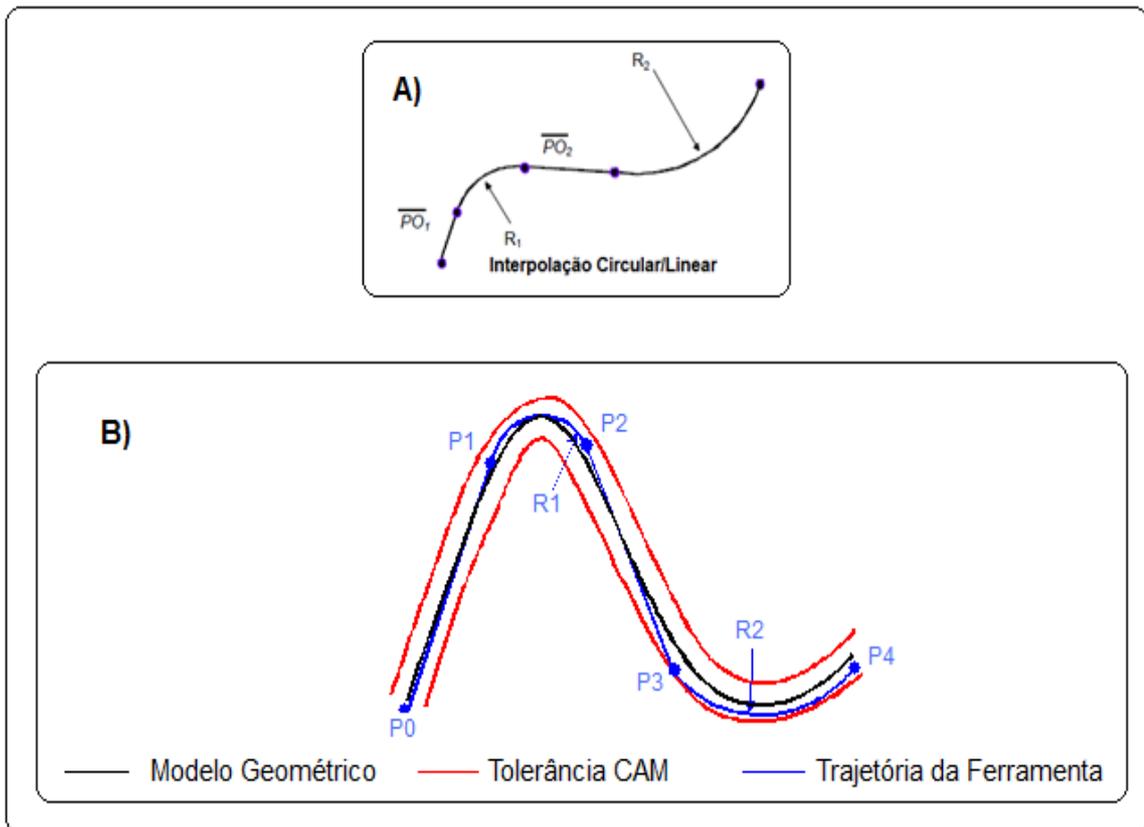


Figura 17: Interpolação Circular e Tolerância CAM (SOUZA, 2004).

Enquanto na interpolação linear as superfícies complexas são representadas por meio de pequenos segmentos de reta, na interpolação circular estes pequenos segmentos serão substituídos por arcos, resultando numa trajetória da ferramenta mais suave eliminando o aspecto faceteamento, programas NC menores e conseqüentemente num melhor desempenho da velocidade de avanço real (SOUZA, 2001).

2.2.4.3 Interpolação Spline

Com a Interpolação *Spline*, tem - se uma nova fase nas metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta, baseado em modelos matemáticos bastante

complexos, em que a trajetória da ferramenta não será mais representada por meio da utilização de elementos geométricos simples (Retas e Arcos) **(A)**, como ocorre na interpolação linear e interpolação circular, mas por segmentos de curvas (C_0, C_1, \dots, C_n) **(B)**. Desta forma, os sistemas CAM poderão determinar uma trajetória da ferramenta mais suave e precisa que se adapte no campo de tolerância do sistema CAM, conforme ilustrado na Figura 18 (SCHÜTZER e HELLENO, 2003).

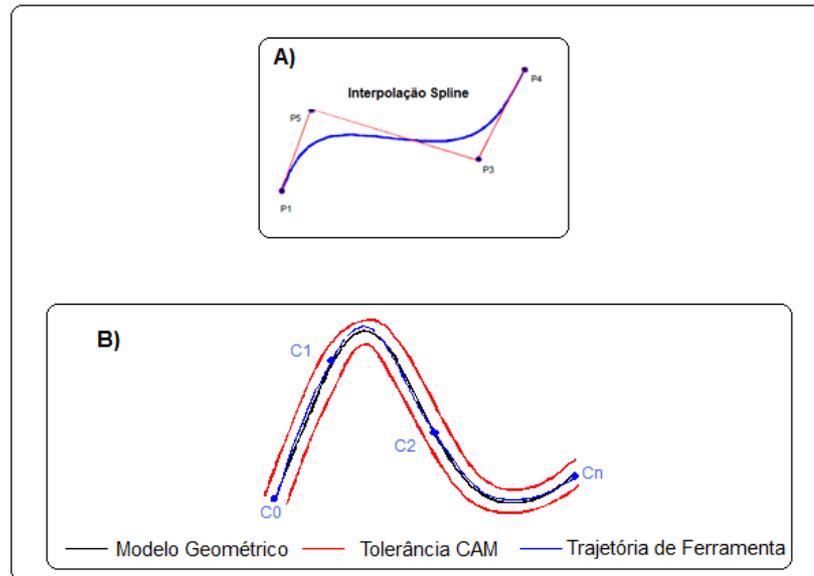


Figura 18: Representação da Interpolação Spline (SCHÜTZER e HELLENO, 2003).

A Interpolação *Spline* apresenta uma linguagem própria e diferente para cada fabricante de comando numérico não sendo encontrada norma de programação ISO 6983 (G1, G2, G3). E mesmo, entre os Sistemas CAM, não existe uma padronização de representação desse tipo de interpolação (SCHÜTZER e HELLENO, 2003), (HELLENO, 2008).

Para Zelinski (2003) e Moreira (2003), as principais características da aplicação do método de Interpolação *Spline* são:

- melhor acabamento superficial devido a trajetória mais suave da ferramenta (segmentos curvos);
- redução do tempo de usinagem, principalmente para superfícies complexas, uma vez que a velocidade avanço real se aproxima do avanço programado.
- eliminação dos problemas decorrentes do tempo de processamento de bloco (TPB) e picos de aceleração e desaceleração em função dos segmentos de reta serem substituídos por curvas;

- programas extremamente menores em relação aos da Interpolação Linear em decorrência da necessidade de um número menor de pontos para representar a mesma superfície;

No grupo de interpolações *Spline* existem diversos tipos de curvas com características e aplicações distintas, conforme pode ser observado na Figura 19.

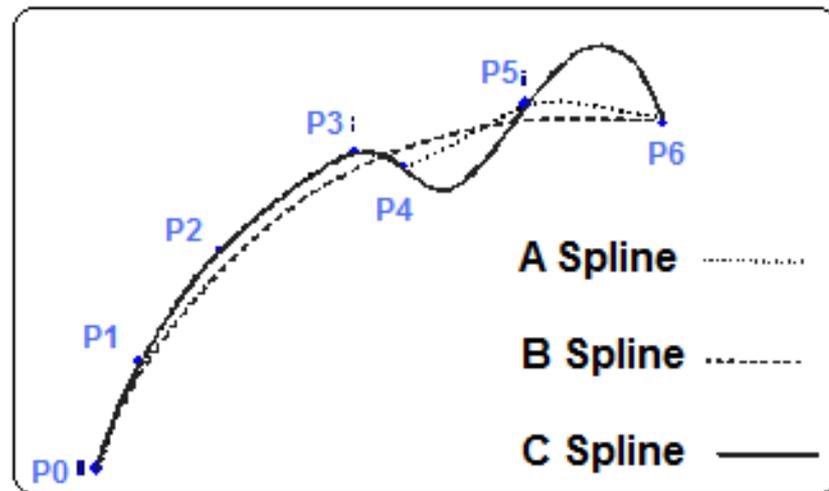


Figura 19: Exemplos de Interpolação Spline para o Comando Siemens Sinumerik (2000).

- Interpolação *A Spline* - a trajetória da ferramenta é definida por um conjunto de curvas baseadas em um polinômio de grau 3, que passam exatamente pelos pontos de controle, priorizando sempre o menor caminho entre eles, mesmo que não haja harmonia entre as curvas, o que acaba prejudicando a suavização do caminho da ferramenta. Este tipo de interpolação é normalmente aplicada em construções de peças a partir da digitalização do produto, não sendo uma opção na manufatura de moldes e matrizes (SIEMENS - SINUMERIK, 2000) (MOREIRA, 2003);
- Interpolação *C Spline* - irá priorizar a suavização do caminho da ferramenta, mais da mesma forma que ocorre na interpolação *A Spline*, a trajetória da ferramenta será definida por inúmeras curvas baseadas modelo matemático utilizando uma equação polinomial de grau 3, que passam exatamente pelos pontos de controle (SIEMENS - SINUMERIK, 2000) (MOREIRA, 2003);
- Interpolação *B Spline* - a trajetória da ferramenta será representada por uma curva baseada nos mesmo modelos matemáticos utilizados nos Sistemas CAD e definida a partir de um polígono de controle, sendo que, esta irá passar apenas pelo primeiro e último ponto do polígono de controle,

buscando uma melhor suavização nos demais pontos. Em virtude disso, esse tipo de interpolação representa atualmente o método mais eficaz na representação de curvas e superfícies complexas para os Sistemas CAD/CAM, sendo com isso, amplamente estudado para representar a trajetória da ferramenta na manufatura de moldes e matrizes (ARNOME,1998).

2.3 Polimento de Moldes e Matrizes

É um dos processos abrasivos e têm sido empregado na fabricação desde a antiguidade. A falta de tecnologia significava essas operações se limitavam a simples operações manuais. (WOODBURY, 1959) (ASM,1999).

O polimento é realizado pelo atrito de partículas abrasivas contra uma superfície gerando a usinagem (remoção de material) (MACHADO *et. al.*, 2009). Ao invés de mudar a forma geométrica da superfície, a característica do polimento é melhorar o acabamento de superfície tornando - a mais atraente, ou pode ser utilizada para melhorar a rugosidade e ondulação de superfície. Muitas indústrias de diversos segmento utilizam esse processo devido a sua alta precisão, por exemplo o setor de moldes e matrizes, a fabricação de semicondutores nas indústria eletro eletrônica, a manufatura do setor ópticos e as industrias de cerâmica, dentre outras (TAM *et. al.*, 1998) (MACHADO *et. al.*, 2009).

Conforme sugerido por Kasai *et al.*(1990) existe uma aparente na distinção nos diferentes métodos de acabamento com base e do tamanho do grão do material abrasivo, conforme ilustrado na Figura 20.

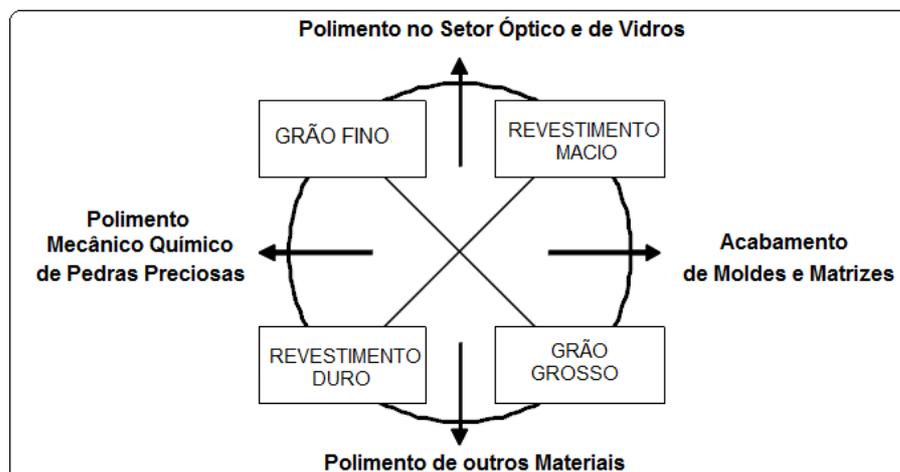


Figura 20: Classificação dos Diferentes Processos de Polimento (KASAI *et al.*, 1990)

Por isso, a simples divisão em materiais duros e moles e em abrasivos de grão fino ou grosseiro conduz a quatro diferentes processos de acabamento usados para diferentes aplicações. No polimento de materiais de vidro, por exemplo, um transportador mole abrasivo e um abrasivo de grão fino são utilizados como uma regra para Kasai *et al.*, (1990).

Na Manufatura de Moldes e Matrizes, o acabamento superficial, que envolve os processos de lixamento e polimento são tratados da mesma maneira, sendo chamados apenas de polimento. No entanto, para Oliveira (2006), o processo de lixamento trata-se de uma usinagem com grãos abrasivos sem geometria definida, fixos em um transportador abrasivo ou em um substrato. Enquanto o polimento é caracterizado pela remoção de material (usinagem), em que, os grãos abrasivos estão envoltos em um fluido de polimento chamado pelos mestres polidores de “pasta de polir” (MARINESCU *et al.*, 2007).

O processo de lixamento dos moldes e matrizes tem por objetivo a redução da rugosidade superficial, por meio de etapas definidas, com a utilização de diferentes tipos de abrasivos (tamanhos de grãos) e acessórios de movimentação em condições controladas de direção, pressão, tempo e velocidade (MACHADO *et al.*, 2009). Para Steiner *et al.* (2005), a diferença entre uma superfície espelhada e uma outra com baixa rugosidade e opaca é o arredondamento dos picos que refletem a luz em linhas paralelas no acabamento espelhado, enquanto na opaca as linhas de reflexão da luz são dispersas devido à superfície possuir picos pontiagudos.

Muitas vezes, uma superfície polida, vista por meio de instrumentos ópticos, mostrará riscos que, entretanto poderão ser aceitáveis à olhos nus, principalmente no setor de molde para a injeção plástica. Na realidade industrial a análise final da qualidade do polimento dependerá da experiência dos mestres polidores.

2.3.1 Princípios do Polimento

No processo de polimento, a superfície da peça a ser processada entra em contato com a superfície do corpo da ferramenta, do transportador do abrasivo (podem ser de couro, resina natural (breu) e sintética), com o abrasivo, formando um sistema de polimento. Para que haja a remoção de material, existe a necessidade de exercer uma pressão em uma determinada velocidade conforme ilustra a Figura 21 (MARINESCU *et al.*, 2007) (KLOCKE, 2009).

Por esta razão, as interações físicas e químicas devido ao atrito gerado ocorrem ativamente entre as partes do sistema de polimento em uma importância como afirma Klocke (2009):

- O fluido de Polimento e a superfície de trabalho;
- Entre o grão abrasivo e a superfície de trabalho.

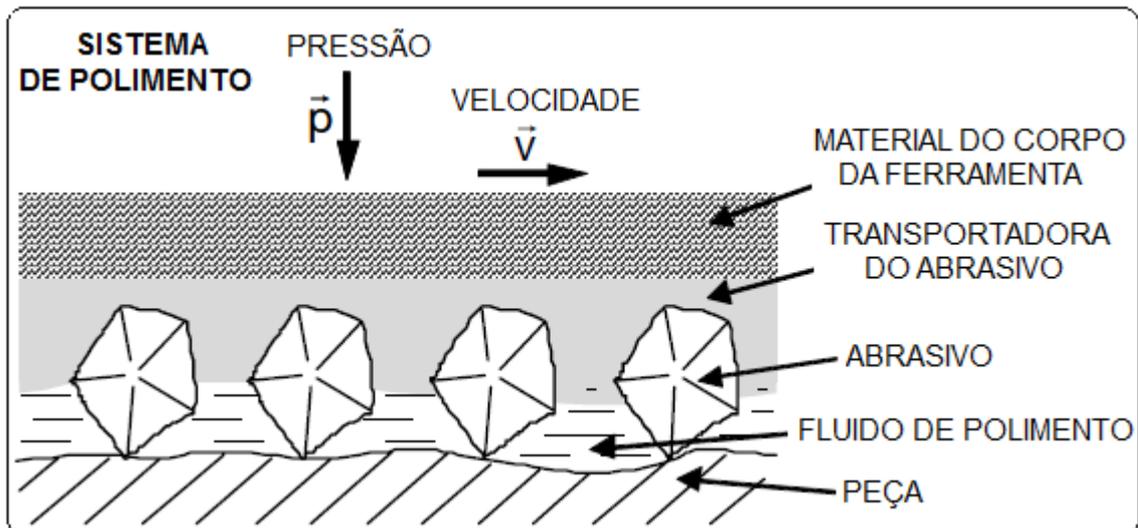


Figura 21: Princípio de Polimento segundo Klocke, (2009).

Marinescu *et. al.* (2007), afirma que o polimento é realizado sem deixar que partículas abrasivas finas gerarem micro fratura na superfície de trabalho, enquanto que a remoção desses materiais é realizada pouco à pouco apenas por meio de deformação plástica conforme a Figura 22 mostra, para finalmente produzir um espelho liso na superfície de trabalho.

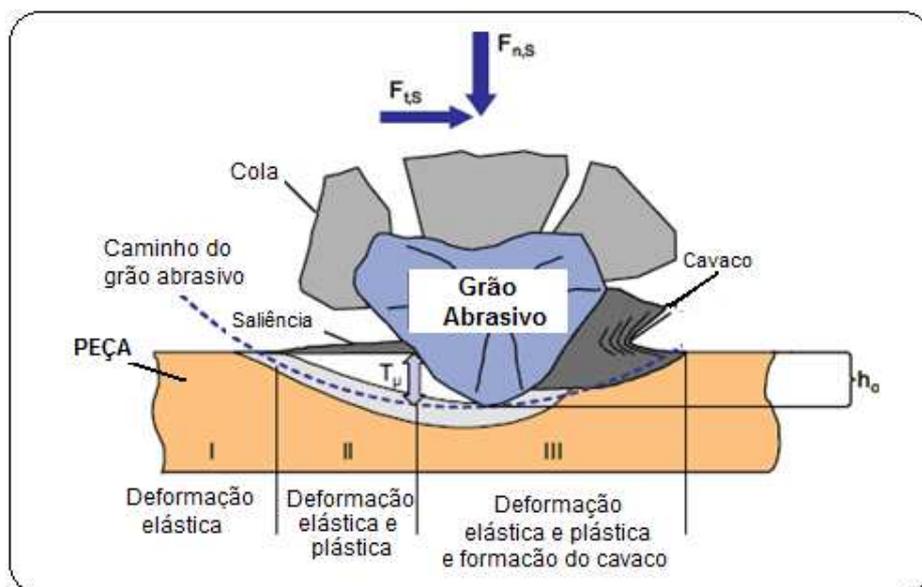


Figura 22: Zonas de Deformação Elástica e Plástica do material (KLOCKE, 2009).

Mecanismos de remoção de material por polimento foi desenvolvido principalmente para o processamento de elementos ópticos, mais muito difundidos entre outros setores industriais, pois, o polimento é realizado sem deixar que as partículas abrasivas finas gerem fratura sobre as superfícies de trabalho, enquanto a remoção desses materiais por meio de deformação plástica, para finalmente produzir um espelhamento liso superfície (KLOCKE, 2009). Desta forma o processo de moldes e matrizes tem esse processo como de extrema importância para a sua cadeia.

2.3.2 Características do Processo de Acabamento Superficial dos Moldes e Matrizes.

Na Manufatura de Moldes e Matrizes o acabamento superficial, que envolve os processos de lixamento e polimento são tratados da mesma maneira, sendo chamados apenas de polimento, para facilitar o estudo foi dividido em 03 partes: Lixamento, Polimento e Materiais pois, esses influenciam diretamente na polibilidade das ferramentas.

De acordo com Machado *et. al.*(2009), pode-se afirmar que no mecanismo de lixamento, em corpos metálicos, ocorre a remoção de material por meio de abrasão, com isso, pode-se dividi-lo em três etapas (KLOCKE *et al*, 2005):

a) o grão abrasivo entra em contato com a superfície do material, o qual sofrerá deformação elástica como pode ser observado na. Figura 22 acima. Devido ao deslocamento relativo de fricção entre o abrasivo e a peça surge, por um lado, uma tensão de cisalhamento na superfície da peça, por outro lado, é gerado um estresse de compressão devido à pressão aplicada pelo abrasivo sobre a superfície;

b) limite de escoamento plástico quando é excedido, este é plasticamente deformado;

c) a penetração do abrasivo na superfície, a força elástica é excedida, no local, formando o cavaco. Após isto, uma sub - superfície deformada plasticamente continua existindo, logo abaixo da linha da superfície (Klocke *et al*, 2005).

As três etapas citadas podem ser observadas na Figura 23, em que está representada a superfície externa (1), sub - superfície deformada (2) e o material base (3) **(A)**. Ainda pode-se observar a ferramenta que provoca tal situação indicada na figura que seria a representação de um grão abrasivo da pedra ou lixa de lixamento. No processo de lixamento também ocorrem deformações na sub - superfície, como se pode observar. Estas deformações são causadoras por modificações na integridade

superficial, com geração de tensões residuais **(B)**, deformação dos grãos entre outros fatores.

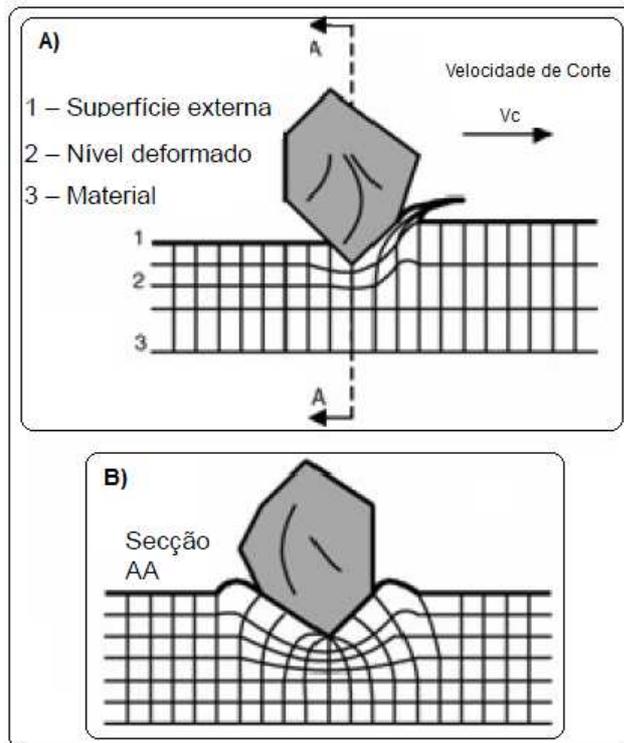


Figura 23: Formação do Cavaco no processo de Polimento (KLOCKE et.al.,2005)

O polimento também pode ser classificado como um processo de usinagem convencional, pois consiste na remoção de material na forma de cavaco, sendo um processo que utiliza geometria não definida. Segundo Machado *et al.* (2009), usinagem é o termo dado aos processos empregados na fabricação de componentes, a partir da remoção progressiva de material na forma de cavacos.

Na manufatura de fabricação de moldes, o polimento é um fator cada vez mais importante, pois além do aspecto final da peça (espelhado), ele ainda pode colaborar na diminuição da corrosão (na injeção de alguns tipos de plásticos, por exemplo), facilitar a extração de peças, reduzindo o risco de quebra das mesmas (KLOCKE et.al.,2005).

Para a obtenção de um correto polimento deve-se atentar a quatro principais fatores que tem interferência direta no polimento, sendo: técnica de polimento; características do aço; tratamento térmico; áreas com soldas (BENGTSSON, 1983).

- Técnica de polimento – as técnicas manuais são as melhores para obter um bom acabamento, devido a capacidade de poder variar a pressão exercida ou parar, no momento e na superfície correta, mais logicamente para isso existe a necessidade de um mestre polidor experiente;

- Características do material – para que obtenhamos uma superfície sem manchas ou pontos escurecidos existe a necessidade de uma limpeza e homogeneidade do material. Para Inoguchi, (2007) a polibilidade pode ser entendida como uma medida da facilidade de polimento de um material. A facilidade no polimento pode ser entendida de várias formas, como por exemplo, a possibilidade de obtenção de determinado nível de espelhamento. São diversos os fatores metalúrgicos que influenciam na polibilidade. Inclusões não metálicas como óxidos e sulfetos, podem diminuir a polibilidade, dependendo do tamanho e de como estão distribuídas. Além disso, a dureza deve ser uniforme e a presença de carbonetação é indesejável (MESQUITA e BARBOSA, 2005) e (INOBUCHI, 2007).
- Segundo Mesquita e Barbosa (2005), a relação entre a usinabilidade e polibilidade de um aço para molde, está focada principalmente no teor de enxofre. Formando inclusões com o manganês, tipo MnS, que possuem baixo ponto de fusão e alta deformabilidade, melhorando a usinabilidade. Estas causam um efeito lubrificante na aresta de corte e facilitam a quebra do cavaco na zona de cisalhamento. No entanto, estas inclusões diminuem a polibilidade do material. A dureza do material também pode influenciar a sua polibilidade (ZHAO, 2007), com o aumento da dureza causa também um aumento na polibilidade da superfície, mas essa dureza diminui a usinabilidade;
- Tratamento térmico – o material tem que ser endurecimento de forma correta, para evitar a carburação e a formação de partículas oxidadas que possam desenvolver sobre a superfície; e
- Áreas de soldagem – as áreas soldadas podem causar danos ao polimento, devido a variação de temperatura, como consequência a mudança na composição química e a variação da dureza. Como sugestão para obter melhores resultados recomenda-se o pré-aquecimento da região a ser trabalhada e pós-soldagem um alívio das tensões residuais.

O polimento é uma importante etapa na fabricação dos moldes e matrizes. No entanto, são operações manuais em função da própria geometria da ferramenta, que não dificulta automatização do processo. As operações de polimento manual são executadas por profissionais treinados, que possuem habilidades e técnicas

tradicionais. Além disso, a falta de dados sobre os parâmetros de polimento dificulta ainda mais sua automatização (HUISSOON *et al*, 2000); STEINER *et al*, 2005).

2.3.3 Qualidade Superficial dos Moldes e Matrizes.

Para moldes e matrizes o acabamento superficial é bastante rigoroso (Ra normalmente menor que 0,1 μm) e bastante crítico principalmente no molde para injeção de plástico, pois a qualidade superficial é reproduzida diretamente para o produto final, além de auxiliar na desmoldagem. A qualidade do acabamento requerida nas superfícies de moldes para injeção é maior que aquelas requeridas nas matrizes de forjamento e estampagem, além disso, sua geometria complexa dificulta ou até mesmo impede a aplicação do polimento automático (HUISSOON *et al*, 2000); STEINER *et al*, 2005). Somente a geração de superfícies convexas e ligeiramente curvas, além de furos na matriz, permite o uso de equipamento automático de polimento. Segundo Fallbohmer *et al*. (2000), os valores médios dos erros dimensionais e de forma de moldes são dados pela Tabela 2.

Tabela 2: Erros Dimensional e de Forma Fallbohmer *et al*. (2000).

	Erro dimensional médio (mm)	Erro médio de forma (mm)
Moldes para injeção	0,020	0,015
Matrizes para fundição	0,046	0,041
Matrizes para estamparia	0,061	0,043
Matrizes para forjaria	0,028	0,023

O polimento manual é o mais utilizado nas indústrias, o que onera em tempo a fabricação dos moldes e matrizes, além de depender da experiência do funcionário no acabamento final.

Para Mesquita (1992), o grau de rugosidade do processo de polimento quando comparado com outros processos de usinagem fica evidente na comparação realizada na Tabela 3 abaixo, demonstrando dessa forma a necessidade de equipamentos de medição com alta precisão. Esse equipamento para medir a rugosidade é chamado de Rugosímetro. Existem vários métodos para a medição da rugosidade:

- Comparação tátil visual;
- Rugosímetro Mecânico;
- Rugosímetro Digital;
- Medição Ópticas de Superfície.

Tabela 3: Rugosidade Média para diferentes Processos de Usinagem (HUTCHINGS, 1992).

Processo	R _a (µm)
aplainamento, perfilamento	1 – 25
fresamento	1 – 6
trefilação, extrusão	1 – 3
torneamento, furação	0,4 – 6
retífica	0,1 – 2
brunimento	0,1 – 1
polimento	0,1 – 0,4
polimento com disco	0,05 – 0,04

Para Bengtsson (1983), durante a obtenção do acabamento superficial alguns problemas podem surgir no processo de acabamento (polimento), que são chamados de *overpolishing*, onde nota-se o aumento da rugosidade com o aumento do tempo de polimento, surgindo dois fenômenos:

- *Orange Peel* – aspecto superficial como uma casca de laranja, causada pelo superaquecimento da superfície devido às altas pressões e o elevado tempo de polimento; e
- *Pitting* - são pequenas cavidades derivadas das inclusões não metálicas, geralmente são extraídos os sulfetos e os óxidos. Sendo as principais causas disso: o tempo e a pressão de polimento, homogeneidade do material, tipos de ferramentas e o abrasivo utilizado.

Geralmente, o polimento é avaliado a olho nu, o que significa dizer que a superfície examinada deve estar totalmente livre de riscos, porosidades e abrasivos utilizados durante a execução. No caso de polimentos espelhados, a avaliação final do resultado da superfície pode também ser feita por meio da utilização de instrumentos ópticos. Muitas vezes um polimento, visto por meio destes instrumentos, mostrará riscos que, entretanto, poderão ser aceitáveis a olho nu e, conseqüentemente, não aparecerão na peça pronta. Na verdade uma análise final da qualidade do polimento dependerá muito da experiência do polidor (BENGTSSON, 1983).

Embora o processo de polimento seja, na sua maior parte, manual existem estudos para um desenvolvimento automatizado do polimento, utilizando braços robóticos, laser para o trabalho, que no devido momento do estudo não será observado.

3 DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS PRELIMINARES

Em paralelo à revisão bibliográfica, o desenvolvimento deste projeto envolveu, ainda, as etapas de ensaios preliminares, de análise das diferentes estratégias de usinagem sobre o tempo de polimento de superfícies inclinadas.

3.1 Característica dos ensaios preliminares

Este ensaio tem como objetivo analisar a influência da estratégia de usinagem e inclinação da superfície usinada sobre o tempo de polimento. Para isto, utilizou-se um corpo de prova em aço AISI P20, contendo nove regiões com dimensões de 30 mm x 22 mm, as quais foram usinadas com uma fresa de topo esférica de $\varnothing 16$ mm, com um formato que contemplasse uma superfície plana, duas rampas (10° e 20°) e três diferentes estratégias de usinagem (Zig, Zig/Zag e Zig/Zag 45°). O ensaio foi realizado em uma máquina ferramenta de três eixos de fresamento e a etapa de polimento, foi realizada em uma empresa especializada. As comparações foram realizadas por meio de da medição do fator de rugosidades (RA), antes e depois da etapa de polimento, possibilitando um parâmetro de análise do ensaio (aspecto visual).

3.2 Metodologia

Para atingir os objetivos propostos foram realizados, ensaios no corpo de prova e pesquisas experimentais tratam de um estudo sobre a relação causal entre duas ou mais variáveis. A estratégia de Usinagem e o Polimento são as variáveis, em relação ao acabamento superficial encontrado após a usinagem e depois da execução do polimento.

Os ensaios foram realizados utilizando o aço AISI P20 cuja composição química é a seguinte: C = 0,35%; Si = 0,30%; Mn = 1,10%; Cr = 1,7%; Mo = 0,40% e V = 0,25%. Foi utilizado um centro de usinagem vertical com três eixos Romi Discovery 760, muito utilizado no setor da fabricação dos moldes com a máxima rotação de 10.000 rpm, comando Siemens 810D configurado especialmente, devido solicitação do SCPM (Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura), permitindo além de sua configuração standard, características adicionais como: execução de funções *Splines* e interface para ethernet.

As dimensões externas do corpo de prova eram de 117 mm x 90 mm x 82 mm e cada superfície apresentava as medidas de 30 mm x 22 mm, e as operações utilizadas

foram de desbaste, semi acabamento e acabamento. As variáveis de corte foram selecionadas de acordo com as recomendações do catálogo do fabricante das ferramentas.

Para a usinagem foi utilizado os seguintes materiais:

- fresa ball nose $\varnothing 16\text{mm}$, com insertos intercambiáveis;
- fresa de topo de metal duro com $\varnothing 8\text{mm}$;
- fresa de topo de metal duro $\varnothing 12\text{mm}$;

Com os seguintes parâmetros de corte:

- profundidade de Corte (A_p) = 0,20mm;
- espessura de corte (A_e) = 0,20mm;
- avanço por dente (f_z)= 0,20mm; e
- velocidade de corte (V_c) = 250m/min.

Na execução dos corpos de prova foram utilizadas três estratégias de fresamento (Zig, Zig/Zag e Zig/Zag 45°), para a operação de acabamento (Figura 24).



Figura 24: Método para manufatura do Corpo de Prova dos ensaios preliminares.

Após, concluído a seqüência de usinagem dos corpos de prova, foi medida a rugosidade R_a das três regiões (superfície plana, rampa com 10° e rampa com 20°), conforme Tabela 5. Para a medição foi utilizado um rugosímetro portátil Mitutoyo

modelo Surfrest 211, e a sala de metrologia encontrava se com uma temperatura média de 20,3°C, medida pelo aparelho Lutron HT – 3003.

O levantamento da rugosidade Ra (Tabela 5) proporciona avaliar o acabamento superficial das diferentes estratégias empregadas no teste, pois o mecanismo de corte varia com o deslocamento da ferramenta e em função de cada estratégia escolhida. Essa avaliação proporcionou um comparativo empírico com o polimento, assim como é realizado nas empresas de moldes e matrizes.

Em seguida o corpo de prova foi enviado para uma empresa especializada em polimento. O produto foi polido por um “mestre polidor” dentro das características empregadas (conhecida como espelhamento (Tabela 4)), geralmente pelas empresas desse tipo de ferramental. Foi acompanhada pessoalmente todo o processo de polimento, depois de concluído o acabamento superficial, as peças retornaram para a medição da rugosidade Ra (Tabela 5). E em seguida foi levantado os tempos de polimento conforme indicado na Tabela 6.

Tabela 4: Etapas de Polimento dos ensaios preliminares.

Item	Acabamento Superficial	Observação
1	Polimento mecanizado com Pedra Abrasiva #320	Utilizado Lapidador vibratório para moldes com avanço f= 8mm.
2	Polimento mecanizado com Pedra Abrasiva #400	Idem item 1.
3	Polimento manual com Lixa Abrasiva #400	Para verificar melhor o sentido dos riscos.
4	Polimento mecanizado com Pedra Abrasiva #600	Idem item 1.
5	Polimento manual com Lixa Abrasiva #400	Idem item 3.
6	Polimento manual com Lixa Abrasiva #800	Idem item 3.
7	Polimento manual com Lixa Abrasiva #1200	Idem item 3.
8	Limpeza com solvente	Para retirar todo pó abrasivo que possa estar sobre a superfície da peça.
9	Espelhamento com Pasta de Polir 15µm	Polimento com disco giratório de cerda com pelos, até sumir os riscos deixados pela lixa #1200.
10	Limpeza com solvente	Para retirar todo pó abrasivo que possa estar sobre a superfície da peça.
11	Espelhamento com Pasta de Polir 15µm	Polimento com disco giratório de feltro.
12	Espelhamento com Pasta de Diamantada 3µm	Polimento com disco giratório de feltro.
13	Espelhamento com Pasta de Diamantada 1µm	Polimento manual com algodão

3.1 Resultados dos ensaios preliminares

Os valores de rugosidade Ra das superfícies usinadas e polidas foram obtidos de acordo com a Figura 25 e a Tabela 2. Assim, foram escolhidos cinco pontos aleatórios para a tomada da rugosidade para cada uma das estratégias adotada, porém sempre no sentido transversal da profundidade de Corte Ap. O comprimento de amostragem percorrida pelo apalpador do rugosímetro (*cut - off*), padronizado para as medições de fresamento é de 0,8 mm e para o polimento o *cut - off* foi de 0,25 mm de acordo com as normas DIN/ISO 4288. Em geral, considerando os valores médios, independentemente de haver uma inclinação acentuada da ferramenta, os valores mostraram se na mesma ordem de grandeza.

Tabela 5: Comparativo entre rugosidade usinagem x polimento

Estratégia - ZIG	Rugosidade Ra(μ m)	
	Usinado - Cut off 0,8mm l = 4,00mm	Polido - Cut off 0,25mm l = 1,25mm
A	0,62	0,05
	0,74	0,05
	1,08	0,04
	0,96	0,05
	0,89	0,04
B	0,49	0,03
	0,47	0,04
	0,84	0,04
	0,44	0,05
	0,88	0,04
C	0,81	0,05
	0,86	0,05
	0,99	0,04
	0,67	0,05
	0,68	0,05

Estratégia - ZIG/ZAG	Rugosidade Ra(μ m)	
	Usinado - Cut off 0,8mm l = 4,00mm	Polido - Cut off 0,25mm l = 1,25mm
D	1,34	0,05
	1,51	0,05
	1,64	0,05
	1,57	0,05
	1,64	0,05
E	0,51	0,04
	0,60	0,04
	0,51	0,05
	0,47	0,05
	0,67	0,04
F	1,53	0,05
	1,33	0,05
	1,21	0,05
	1,50	0,04
	1,23	0,05

<i>Estratégia – ZIG/ZAG</i>	<i>Rugosidade Ra(μm)</i>	
Superfície	<i>Usinado – Cut off 0,8mm l = 4,00mm</i>	<i>Polido – Cut off 0,25mm l = 1,25mm</i>
G	0,71	0,04
	0,86	0,05
	0,81	0,05
	0,90	0,05
	0,88	0,05
H	0,94	0,04
	1,03	0,05
	1,08	0,05
	1,02	0,05
	0,98	0,04
I	0,91	0,04
	1,06	0,05
	1,21	0,05
	0,99	0,04
	0,98	0,05

Pode se notar que nas regiões A, D e G (Tabela 5), por utilizar a região central da ferramenta de ponta esférica para usinar o material, essa situação provoca o esmagamento, o que influencia diretamente nos valores do Ra, mais não provoca qualquer tipo de dificuldade para o polimento. Dessa forma, a solução seria utilização de um cabeçote de inclinação para que a ferramenta sempre tocasse a peça fora do seu centro onde existe uma tendência da Velocidade de corte ser nula.

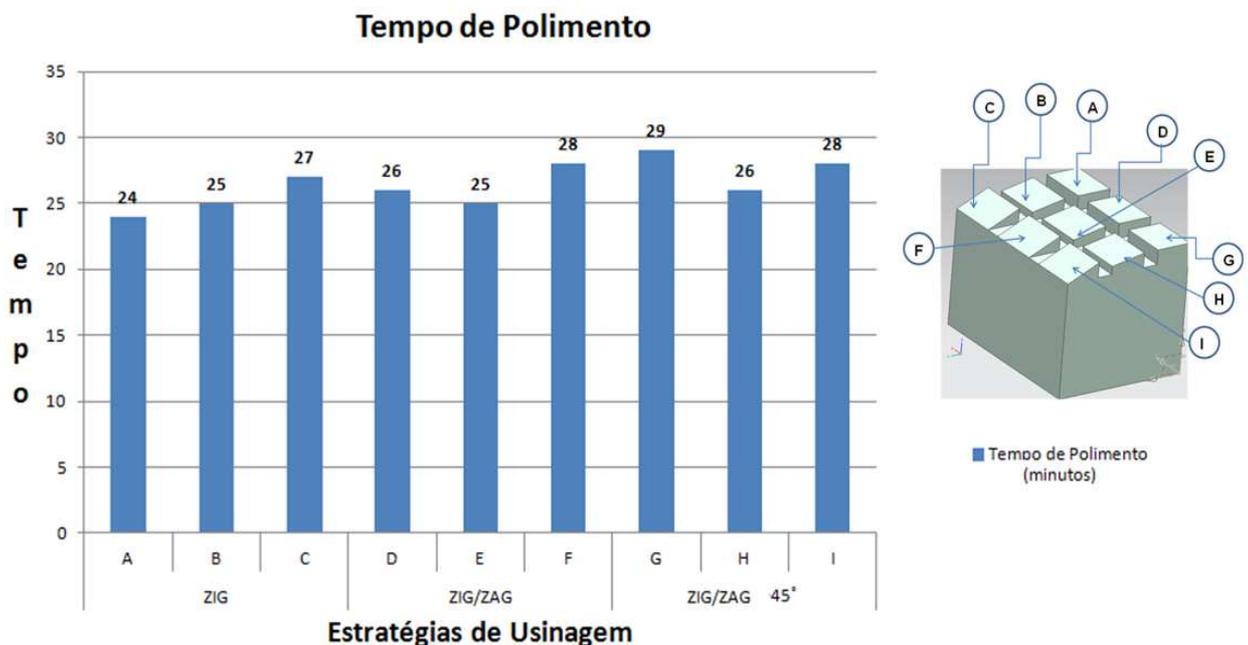


Figura 25: Gráfico do tempo de Polimento no Corpo de Prova com as indicações das regiões analisadas.

Tabela 6: Tempo de Polimento.

Estratégia	Regiões	Tempo de Polimento (minutos)
ZIG	A	24
	B	25
	C	27
ZIG/ZAG	D	26
	E	25
	F	28
ZIG/ZAG 45°	G	29
	H	26
	I	28

3.2 Considerações dos ensaios preliminares

De acordo com os experimentos realizados pode se concluir que:

- Os valores de rugosidade (Ra) nas superfícies usinadas variam significativamente de acordo com o ponto de contato da ferramenta de ponta esférica;
- Na superfície onde o ponto de contato ocorreu no centro da ferramenta, com menor velocidade de corte, foram registrados os maiores valores de rugosidade, para as três estratégias;
- Nas superfícies de maior inclinação, onde as velocidades de corte são superiores, os valores de rugosidade foram menores;
- Os valores de rugosidade (Ra) nas superfícies polidas não alteraram significativamente os tempos de polimento;
- Em uma análise visual, os perfis apresentaram um excelente acabamento espelhado para as três estratégias, com as características solicitadas pelos fabricante de moldes de injeção; e
- A influência da estratégia de usinagem influi no tempo de polimento das superfícies e de acordo com os polidores as dimensões do corpo de prova não demonstraram as dificuldades do polimento.

Assim, não existe uma estratégia de corte ideal e única para produzir um molde com acabamento espelhado. Além disso, na indústria de moldes e matrizes a maioria das máquinas ferramenta é adotada de apenas três eixos, o que também dificulta o emprego de muitas estratégias definidas pelo software CAM.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma revisão bibliográfica foi realizada ao longo de todo o trabalho, abordando temas como a manufatura de moldes e matrizes, a cadeia CAD/CAM/CNC, metodologia da interpolação da trajetória da ferramenta e a etapa de polimento.

Em paralelo à revisão bibliográfica, o desenvolvimento deste projeto envolve, ainda, as etapas de ensaios preliminares, desenvolvimento da etapa de polimento em comparação com a trajetória da ferramenta utilizada na estratégia de usinagem.

A etapa de ensaios prevê o aprofundamento teórico-prático na compreensão dos fatores envolvidos com a manufatura de moldes e matrizes diretamente relacionadas com os efeitos da estratégia de usinagem sobre a etapa do polimento.

Para alcançar plenamente os objetivos propostos nos itens 3.1 e 3.2, foram desenvolvidos dois corpos de prova e usinados cinco exemplares de cada um deles para efeito de comparação e validação dos resultados, totalizando, com isso, um número de dez corpos de prova. Figura 26.

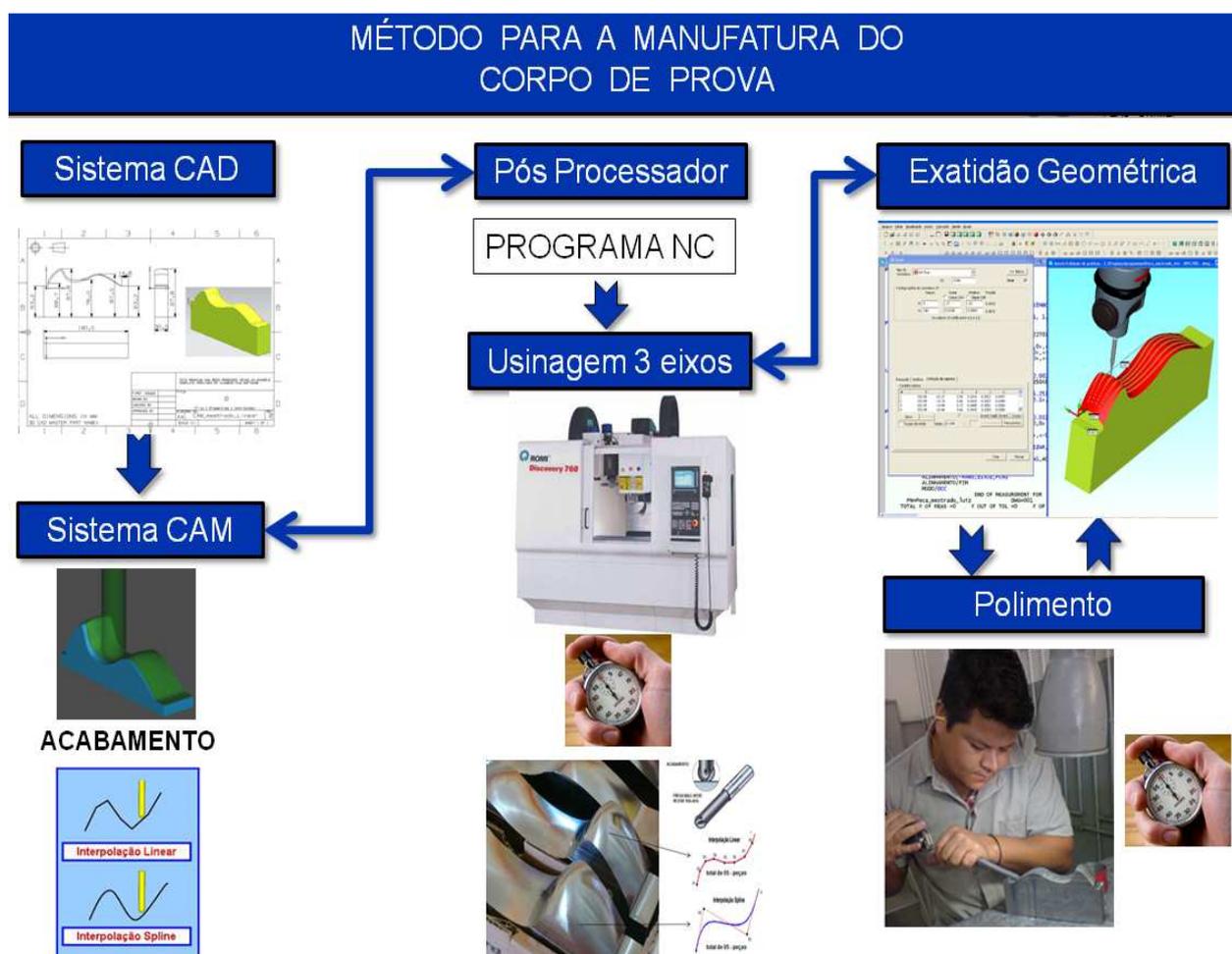


Figura 26: Metodologia para Manufatura do Corpo de Prova

A figura 26, demonstra a sequência do experimento, que seguiu os seguintes passos:

1. Elaboração do corpo de prova no sistema CAD;
2. A Transferência das características geométricas para o sistema CAM; e a Simulação da usinagem;
3. Programação NC sub dividido em:
 - a. Desbaste;
 - b. Pré Acabamento
 - c. Acabamento – interpolação linear e Spline
4. Transferência do programa NC gerado pelo pós processador para a máquina CNC;
5. O envio dos corpos de prova para departamento de metrologia para a medição da exatidão geométrica;
6. O envio dos corpos de prova para o polimento manual;
7. O retorno dos corpos de prova para departamento de metrologia para a uma nova medição da exatidão geométrica após o polimento das peças;
8. Análise dos dados coletado.

Os detalhes do desenvolvimento e usinagem dos corpos de prova serão detalhados e explicados na sequência deste trabalho.

4.1 Corpo de prova

Foi elaborado um corpo de prova que representasse os desafios da manufatura de superfícies complexas com dimensões de 190 x 100 x 30 mm, conforme figura 27.

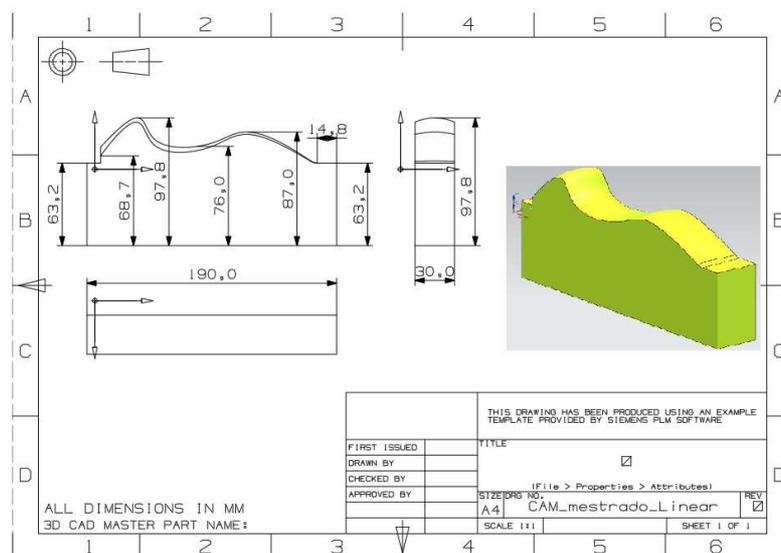


Figura 27: Corpo de Prova.

A geometria escolhida apresenta uma superfície com diferentes graus de curvatura, semelhante às utilizadas nos moldes e matrizes.

Ao final, espera-se simular as condições da manufatura de moldes e matrizes. Os ensaios de usinagem foram realizados em aço VP Atlas com as seguintes características (VILLARES, 2012):

- Composição química: aço ligado ao Cr – Mo – Mn + microadições. Aço desgaseificado a vácuo;
- Dureza: na faixa de 38 – 42 HRC (350 – 390 HB);
- Propriedades Mecânicas: resistência à tração em temperatura ambiente
 - $\sigma_{0,2}$ - 1087 MPA;
 - σ Ruptura - 1246 MPA;
 - Alongamento (A) – 10%;
 - Redução Área (z) – 31%
- Aplicações:
 - Molde de injeção de plásticos não clorados;
 - Para aplicações que necessitem maior resistência mecânica e ao desgaste que os aços AISI P20 ou DIN 1.2738;
 - Matrizes para extrusão de termoplásticos não clorados;
 - Diversas aplicações em moldes para plásticos.

4.2 Descrição das Operações de Usinagem

Os corpos de prova serão usinados utilizando as operações:

- desbaste,
- pré-acabamento;
- acabamento.

Para todos os corpos de prova, serão utilizados os mesmos parâmetros tecnológicos para a realização das operações (de desbaste e pré acabamento), tais como: velocidade de avanço programada, profundidade e espessura de corte e avanço por aresta de corte.

As metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta a serem analisadas durante a operação de acabamento foram distribuídas ao longo do corpo de prova, nas seguintes configurações:

- Cinco peças - Interpolação Linear - tolerância CAM de 0,05 mm;
- Cinco peças - Interpolação Spline - tolerância CAM de 0,05 mm.

Os dados tecnológicos foram extraídos de catálogos do fornecedor das ferramentas descritos a seguir:

- **Desbaste:** A operação de desbaste foi realizada no sentido transversal, com uma ferramenta de fresamento de cantos a 90 graus e com a geometria da pastilha do tipo “M” (média – para fresamento geral) contendo duas arestas de corte, utilizando os seguintes parâmetros de corte:
 - rotação do eixo árvore (η): 3.619 rpm;
 - velocidade de avanço da mesa (V_f): 580 mm/min;
 - velocidade de avanço por rotação (f_η): 0,16 mm/rot
 - velocidade de corte (V_c): 250 m/min;
 - avanço por aresta (f_z): 0,08 mm;
 - profundidade de corte (a_p): 0,4 mm;
 - espessura de corte (a_e): 1,0 mm;
 - sobremetal: 0,4 mm;
 - diâmetro da ferramenta: 22,0 mm;
 - aresta de corte: 2;
 - pastilha de corte: R390 – 11 T3 08 M – PM classe 1030 - Sandvik.
- **Pré – acabamento:** Esta operação tem como finalidade eliminar o excedente de material deixado pelo desbaste, procurando dessa forma, manter um sobremetal constante de 0,4 mm. Os parâmetros de corte utilizados foram:
 - pré-acabamento (*zig/zag*) interpolação da trajetória da ferramenta Linear;
 - rotação do eixo árvore (η): 3.000 rpm;

- velocidade de avanço da mesa (V_f): 2280mm/min;
- velocidade de avanço por rotação (f_n): 0,41 mm/rot;
- velocidade de corte (V_c): 150 m/min;
- avanço por aresta (f_z): 0,21 mm;
- espessura de corte (a_e): 1 mm;
- sobremetal: 0,4 mm;
- diâmetro da ferramenta: 16 mm;
- aresta de corte: 2.
- pastilha de corte (*ball nose*): R216 F – 16 A 16S - Sandvik.

Em virtude do excesso de material, deixado pela operação de desbaste, a operação de pré-acabamento é realizada por duas fases: eliminação do excesso de material da operação de desbaste (Fase 1) e uniformização do sobremetal para a operação de acabamento (Fase 2). Conforme figura 28.



Figura 28: Pré – acabamento do Corpo de Prova utilizando fresa ball nose

Todos os dez corpos de prova tiveram os mesmos parâmetros de corte para o desbaste e para o pré-acabamento (ver itens 3.2.1 e 3.2.2), modificando apenas a metodologia de interpolação para o acabamento conforme item 3.2.3.

- **Acabamento:** Esta operação tem por finalidade dar acabamento à peça, deixando-a conforme o modelo geométrico, sendo, por isso a operação utilizada para analisar as metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta (Linear e *Spline*) em que foram realizados todos os ensaios desse trabalho. Os parâmetros de corte utilizados foram:
 - Interoplação Linear: tolerância CAM de 0,05 mm;
 - Interoplação *Spline*: tolerância CAM de 0,05 mm;;
 - rotação do eixo árvore (η): 3.120 rpm;
 - velocidade de avanço da mesa (V_f): 1295 mm/min;
 - velocidade de avanço por rotação (f_n): 0,41 mm/rot;
 - velocidade de corte (V_c): 157 m/min;
 - avanço por aresta (f_z): 0,08mm;
 - espessura de corte (a_e): 0,2 mm;
 - diâmetro da ferramenta: 16 mm;
 - aresta de corte: 2.
 - pastilha de corte (*ball nose*): R216 F – 16 A 16S - Sandvik.



Figura 29: Acabamento dos Corpos de Prova utilizando fresa ball nose e com duas Interpolações (linear e spline).

A manufatura da operação de acabamento do corpo de prova foi realizada de forma aleatória (sorteio) totalizando 10 peças (05 – interpolação linear e 05 – interpolação *spline*), conforme a sequência descrita:

- 1ª peça - interpolação *spline*;
- 2ª peça - interpolação linear;
- 3ª peça - interpolação linear;
- 4ª peça - interpolação *spline*;
- 5ª peça - interpolação *spline*;
- 6ª peça - interpolação linear;
- 7ª peça - interpolação *spline*;
- 8ª peça - interpolação linear;
- 9ª peça - interpolação linear;
- 10ª peça - interpolação *spline*.



Figura 30: Gravação para Rastreabilidade.

Todas as peças foram gravadas para facilitar rastreabilidade na verificação metrológica e após o retorno do polimento.

4.3 Centro de Usinagem

A usinagem foi realizada em um centro de usinagem vertical, modelo Discovery 760, fabricado pelas Indústrias ROMI S.A, apresentando as seguintes especificações técnicas:

- Rotação máxima: 10.000 RPM;

- Avanço rápido : 25.000 mm/min;
- Máximo avanço programável: 5.000 mm/min;
- comando Siemens 810D configurado especialmente, devido solicitação do SCPM, permitindo além de sua configuração *standard*, características adicionais como: execução de funções *Splines* e interface para *ethernet*.

4.4 Polimento dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram enviados para uma empresa especializada em polimento, onde, foi aplicada, a técnica de acabamento superficial conhecida com “espelhamento”, geralmente utilizada pelas empresas de moldes de injeção plástica. Todo o processo será acompanhado pessoalmente, fotografado e filmado para verificação posterior, bem como o acompanhamento dos tempos de polimento, as características, as dificuldades e as análises para cada trajetória da ferramenta, seguindo a sequência de operação descrita:

Tabela 7: Etapas do Processo de Polimento

Etapas do Processo	Acabamento Superficial	Observação
1ª etapa	Polimento mecanizado com Pedra Abrasiva #320	Utilizado Lapidador vibratório para moldes com avanço $f=8\text{mm}$.
2ª etapa	Polimento mecanizado com Pedra Abrasiva #400	Idem item 1.cruzando para remoção dos riscos deixados pela pedra abrasiva #320.
3ª etapa	Polimento manual com Lixa Abrasiva #400	Para verificar melhor o sentido dos riscos.
4ª etapa	Polimento mecanizado com Pedra Abrasiva #600	cruzando para remoção dos riscos deixados pela lixa abrasiva #400.
5ª etapa	Polimento com Lixa rotativa #800	No mesmo sentido da superfície.
6ª etapa	Polimento com a Escova Rotativa utilizando a pasta de $15\ \mu\text{m}$.	No mesmo sentido da superfície..
7ª etapa	Polimento com o disco giratório de Feltro utilizando a pasta diamantada de $5\ \mu\text{m}$.	No mesmo sentido da superfície.
8ª etapa	Polimento manual com o Feltro utilizando a pasta diamantada de $5\ \mu\text{m}$.	Para corrigir as imperfeições deixadas pelo disco de feltro rotativo.
9ª etapa	Espelhamento com Pasta de Diamantada $3\ \mu\text{m}$	Polimento manual de feltro.
10ª etapa	Espelhamento com Pasta de Diamantada $1\ \mu\text{m}$	Polimento manual com algodão.
<i>Entre cada etapa se faz necessário a limpeza da superfície com solvente, para retirar todo pó abrasivo que possa estar sobre a peça.</i>		

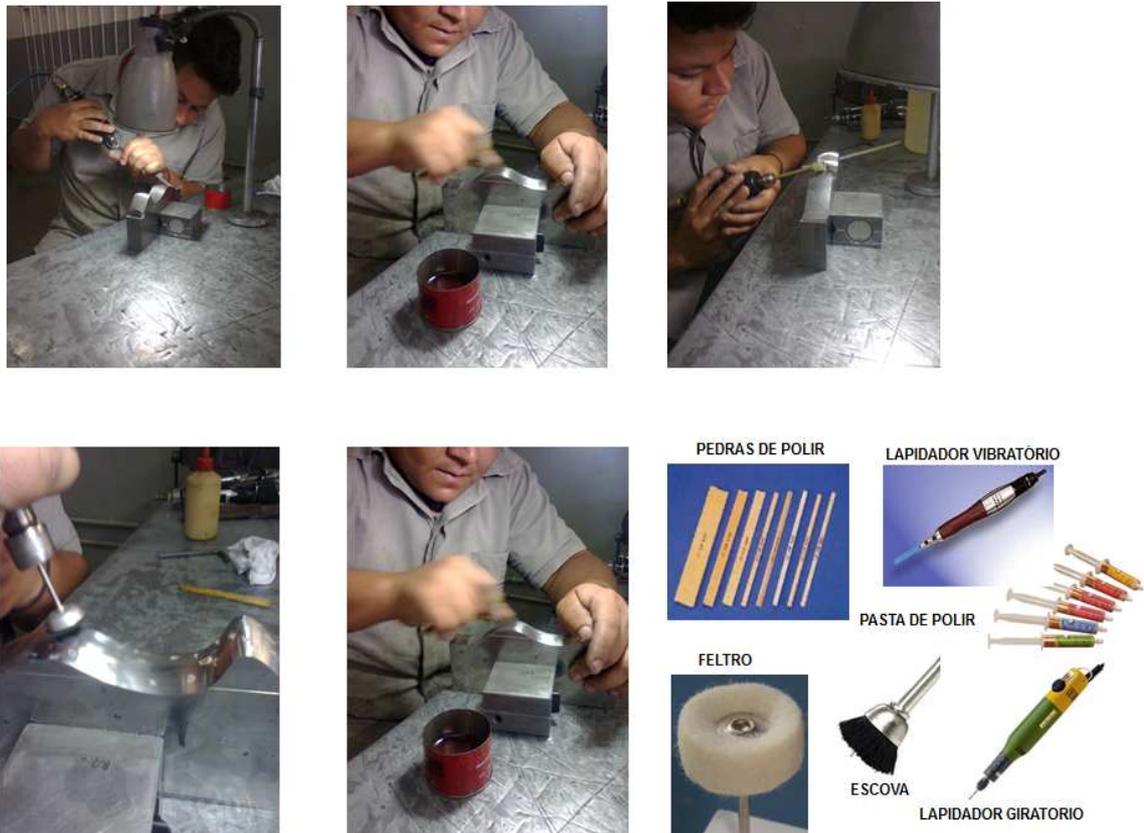


Figura 31: Sequência do Polimento seguindo as etapas da Tabela 4.

4.5 Medição dos Corpos de Prova

A análise comparativa das metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta será realizada por meio de das seguintes características:

- **tempo de usinagem do corpo de prova** - Durante a usinagem foram medidos os tempos de usinagem de cada uma das metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta, a fim de avaliar os seus desempenhos;
- **exatidão geométrica do corpo de prova** em comparação com o modelo geométrico desenvolvido no sistema CAD após a usinagem e o polimento - A exatidão geométrica do corpo de prova será determinada por meio de de uma máquina de medição por coordenadas, conforme procedimento ilustrado na Figura 31.



Figura 32: Procedimento de medição do corpo de prova.

- O modelo geométrico, inicialmente desenvolvido no Sistema CAD, é transferido para o software da máquina de medição por coordenada, por meio de formatos neutros de conversão geométrica, tais como: IGES e STEP.
- Baseado nesse modelo geométrico, o software de medição localizará o corpo de prova e a partir de um plano de medição faz a medição do corpo de prova, comparando as coordenadas teóricas, obtidas no modelo geométrico, com as coordenadas encontradas no corpo de prova usinado e depois de polido.
- Nesse procedimento, o ajuste do modelo geométrico, desenvolvido no Sistema CAD, com o corpo de prova usinado e polido é extremamente importante, uma vez que, os erros provenientes desse ajuste serão automaticamente transferidos para a comparação geométrica.
- Em função disso foram usinadas nos corpos de provas uma face de referência para cada eixo do sistema de coordenadas (X,Y,Z).
- O plano de medição do corpo de prova foi baseado na varredura por pontos, ao longo de sua geometria. Esta varredura foi realizada em cem pontos com cinco posições em cada faixa de usinagem e polimento do corpo de prova. A Figura 33 ilustra o plano de medição adotado.

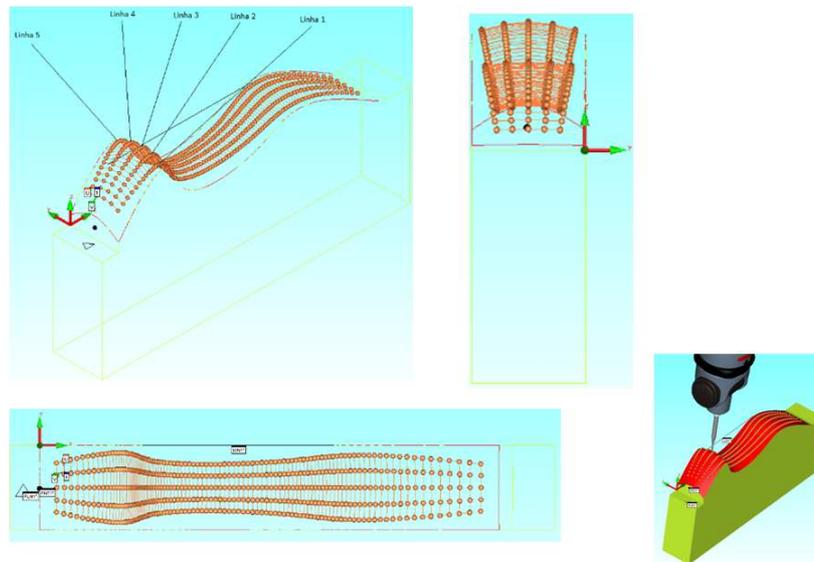


Figura 33: Plano de medição baseado na varredura por pontos.

- Esse procedimento de análise, na qual os desvios geométricos sofrem grande influência das faces de referência usinadas, a análise da exatidão geométrica estará fundamentada em um segundo procedimento de análise que desconsidera as faces de referências, comparando assim, diretamente a semelhança entre as geometrias projetada (Modelo CAD) e medida (corpo de prova) e a temperatura do laboratório de metrologia.

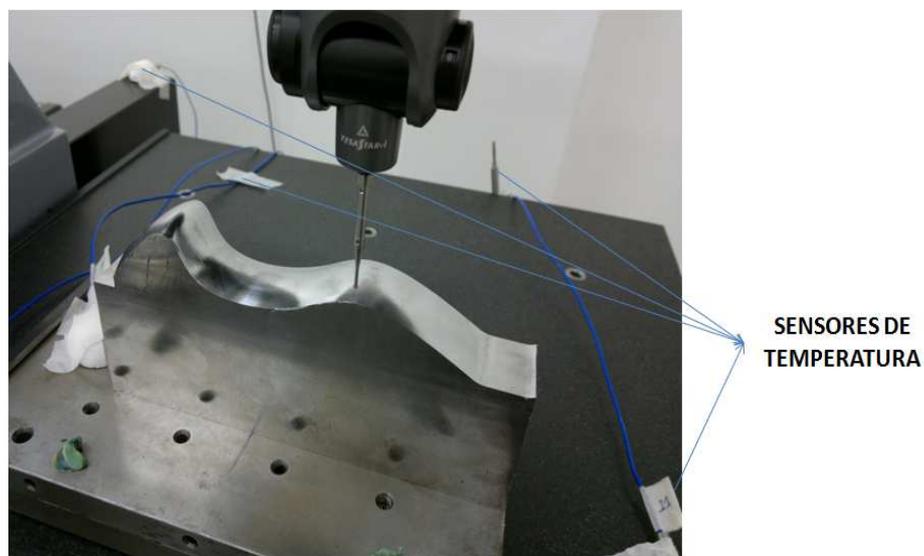


Figura 34: Controle da temperatura em diversos pontos do ambiente para correção dos erros.

- Considerando cem pontos e as cinco linhas pertencentes ao modelo CAD, o desvio de exatidão foi determinado pelo tamanho do segmento obtido entre o ponto do modelo CAD e o ponto da curva

ajustada com intersecção à reta normal e por meio de da correção dos desvios de temperatura.

- **Análise do tempo de Polimento** - Durante a operação de acabamento superficial foram medidos os tempos de polimento de cada uma das metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta, a fim de avaliar os seus desempenhos.



Figura 35: Tempo de polimento para cada metodologia de interpolação.

A semelhança entre a curva e o modelo CAD é avaliada por meio de da somatória dos desvios ao quadrado, sendo que quando maior o valor obtido menor a semelhança entre as geometrias e vice-versa.

5 RESULTADOS

Neste capítulo será descrita a análise das metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta sobre o polimento, obtida por meio de dos ensaios de medição realizados nos corpos de prova, assim como a análise das trajetórias da ferramenta sobre o tempo de acabamento superficial e sua exatidão geométrica utilizadas nos ensaios práticos.

5.1 Tempo de usinagem do corpo de prova

Os resultados de tempos obtidos com os ensaios realizados na interpolação linear e na interpolação *spline* foram comparados com os parâmetros teóricos de tempo. A Tabela 8 mostra os dados comparativos dos tempos ensaio.

Tabela 8: Tempo de usinagem teórico x real do corpo de prova

OPERAÇÃO		TEMPO TEÓRICO (minutos)		TEMPO REAL (minutos)	
DESBASTE		78		130	
PRÉ - ACABAMENTO		18		30	
ACABAMENTO	Linear	19		31	
	<i>Spline</i>	10		17	
Total		L = 115	S = 106	L = 191	S = 177

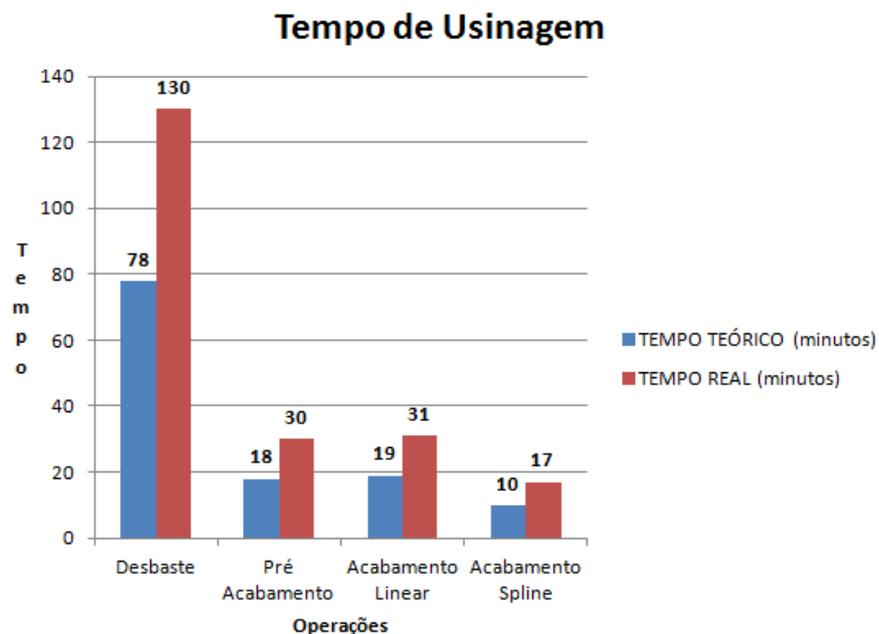


Figura 36: Tempo de usinagem por operações

Para comparação entre as metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta, a Interpolação Linear foi utilizada para definir o tempo de usinagem de referência, sendo por isso indicada com o valor de 100% nas discussões a seguir.

Nos ensaios realizados, as Interpolações *Spline* apresentaram um melhor desempenho uma redução de 54,8% do tempo de usinagem (acabamento) em relação à Interpolação Linear.

A tolerância no sistema CAM, na faixa de 0,05 mm apresenta um efeito significativo para a Interpolação Linear. O tempo de usinagem aumenta com a redução da tolerância no Sistema CAM, ou seja, a maior segmentação da trajetória da ferramenta resulta num aumento do tempo de usinagem.

5.2 Exatidão geométrica em comparação com o modelo CAD após a usinagem

Analisando a trajetória da ferramenta, apesar geometria do corpo de prova ser única para todos os ensaios de usinagem e polimento, a geração da trajetória da ferramenta na cadeia CAD/CAM/CNC (ver Figura 28) proporciona trajetórias de ferramenta com acabamentos distintos de acordo com a metodologia adotada.

A simulação da operação de desbaste do corpo de prova realizada no Sistema CAM. Observa-se que, em função do diâmetro da ferramenta, as regiões côncavas corpo de prova apresentam uma grande quantidade de sobremetal. Desta forma houve a necessidade de uma operação de pré – acabamento para suavização dos pontos de sobre metal deixados pelo processo de desbaste.

Em função disso, a seguir serão analisadas as características das trajetórias da ferramenta utilizadas nas operações de acabamento do corpo de prova.

5.2.1 Interpolação Linear

Em função da trajetória da ferramenta neste caso ser composta por segmentos de retas, sua análise está fundamentada na comparação dos parâmetros dos segmentos, especificamente o tamanho e a inclinação.

Os valores obtidos com o erro resultante da exatidão da geometria real, apresentados a seguir, são resultantes da soma dos desvios de exatidão individuais dos eixos X, Y e Z, obtidos por meio de da medição dos corpos de prova.

A Figura 37 ilustra respectivamente a exatidão geométrica e os erros resultantes obtidos no corpo de prova com interpolação linear.

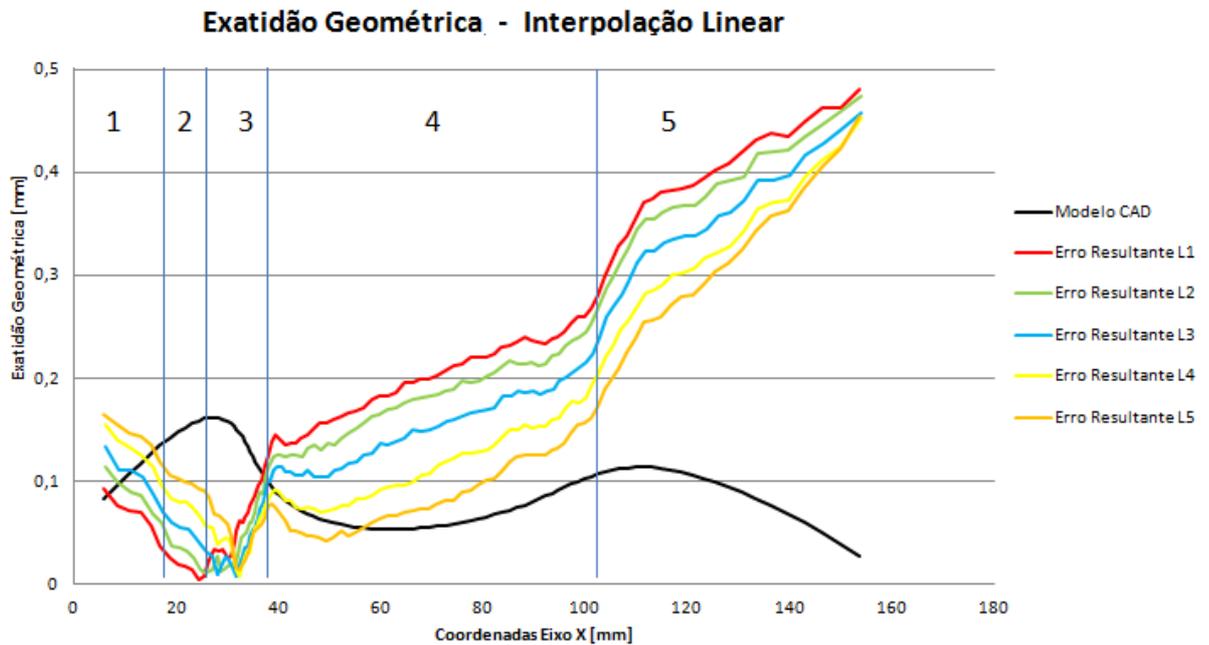


Figura 37: Exatidão Geométrica do corpo de prova com interpolação linear

Por meio de dessa Figura 37 é possível observar que:

- Para as regiões 4 e 5 o erro resultante (L1 até L5) da metodologias de interpolação linear apresentaram uma geometria real deslocada no sentido externo em relação ao modelo CAD. A maior variação, com 0,08 e 0,45 mm respectivamente para as regiões 4 e 5, podendo inclusive, ser observada;
- A interpolação linear apresentou uma tendência de redução dos erros resultantes entre as regiões 2 e 3 a menor variação (0,02 à 0,1 mm);
- Nas regiões 2 e 3 os erros resultantes das metodologias de interpolação linear apresentaram uma geometria real deslocada no sentido interno em relação ao modelo CAD;
- Pode se observar que o erro resultante para cada linha demonstra uma tendência de estabilidade e com poucas variações de amplitude com relação a exatidão geométrica.

A Figura 38 ilustra as características das trajetórias da ferramenta com Interpolação Linear e o acabamento do corpo de prova

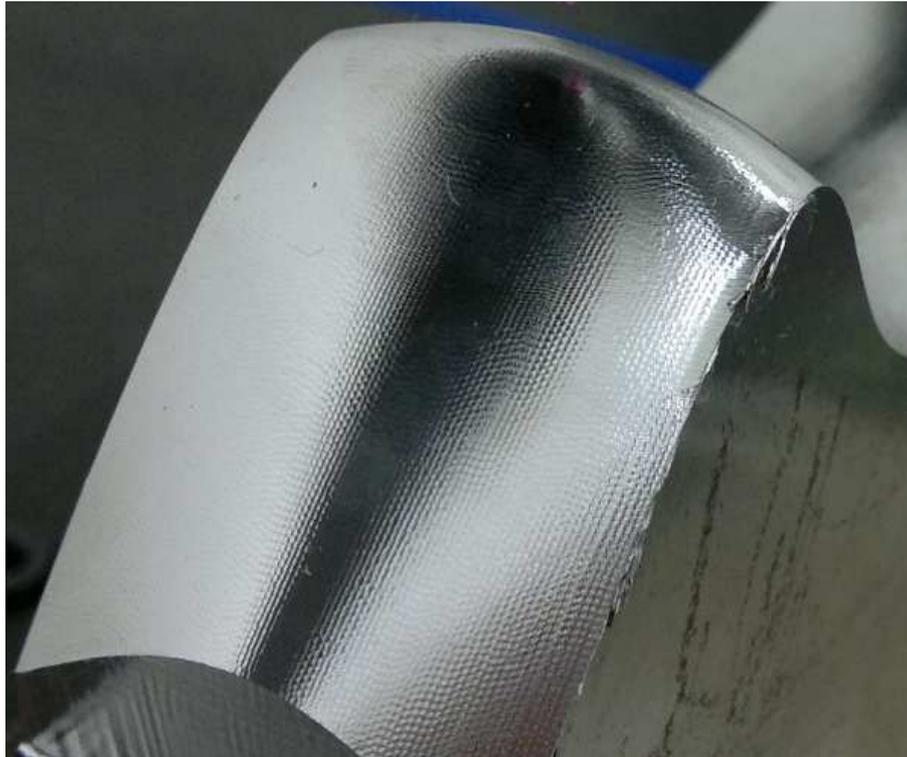


Figura 38: Acabamento do corpo de prova com interpolação linear

A interpolação linear com a faixa da tolerância CAM de 0.05 mm resultou em um melhor acabamento do corpo de prova.

5.2.2 Interpolação Spline

Com a trajetória da ferramenta baseada em Interpolação *Spline* ser composta por segmentos de curvas, sua análise não pode ser fundamentada nos mesmos critérios utilizados na Interpolação Linear, mas sim nas características do modelo matemático de sua curva de origem.

No sistema CAM as características das trajetórias geradas com Tolerância CAM de 0,05 mm podem ser observadas respectivamente na Figura 38.

Assim como na interpolação linear, os valores obtidos com o erro resultante da exatidão da geometria real, apresentados a seguir, são resultantes da soma dos desvios de exatidão individuais dos eixos X, Y e Z, obtidos por meio de da medição dos corpos de prova.

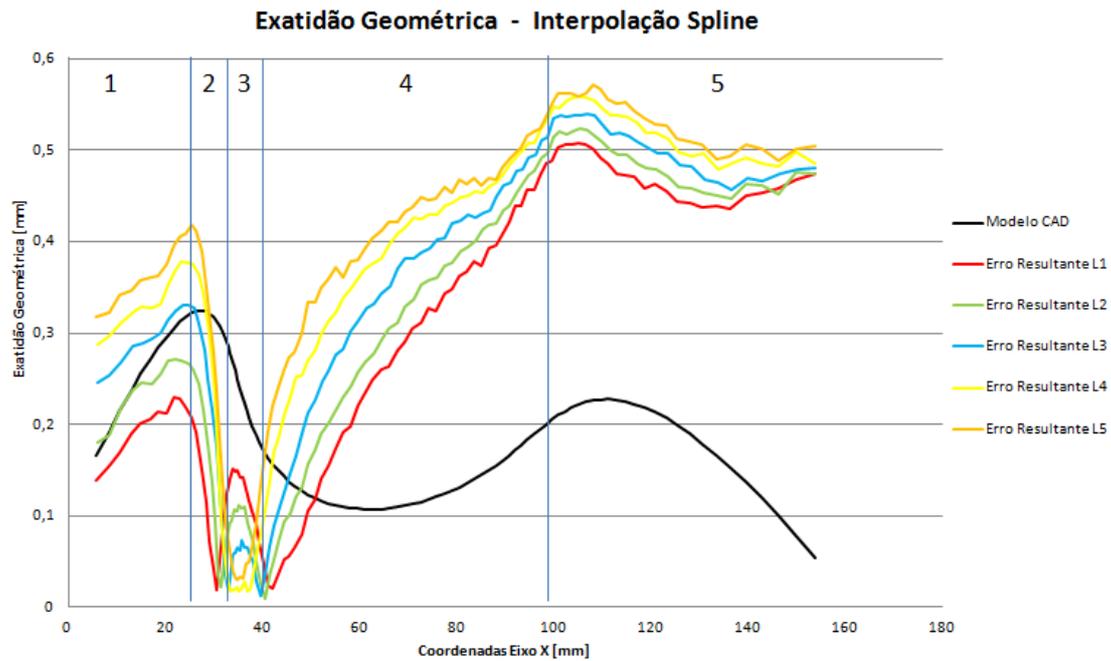


Figura 39: Exatidão Geométrica do corpo de prova com interpolação spline

Na análise da exatidão geométrica da interpolação *Spline* é possível observar que:

- Para as regiões 1, 4 e 5 o erro resultante (L1 até L5) da interpolação *spline* apresentaram uma geometria real deslocada no sentido externo em relação ao modelo CAD, sendo que apenas as linhas 1 e 2 estão no sentido interno. A maior variação, com 0,02 e 0,56 mm respectivamente para as regiões 1, 4 e 5;
- A interpolação *spline* apresentou uma tendência de redução dos erros resultantes entre as regiões 2 e 3 a menor variação (0,45 à 0,02 mm);
- Nas regiões 4 e 5 os erros resultantes das apresentaram uma geometria real grande deslocamento no sentido externo em relação ao modelo CAD;
- Pode se observar que o erro resultante para cada linha demonstra uma tendência de estabilidade e com poucas variações de amplitude com relação a exatidão geométrica, sendo maior nas regiões 4 e 5.



Figura 40: Acabamento superficial do corpo de prova com interpolação spline

A interpolação *spline* com a faixa da tolerância CAM de 0,05 mm resultou em um acabamento com rugosidade mais aparente em relação a interpolação linear na superfície do corpo de prova.

5.3 Tempo de polimento do corpo de prova

Durante a operação de acabamento superficial foram medidos os tempos de polimento de cada uma das metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta.

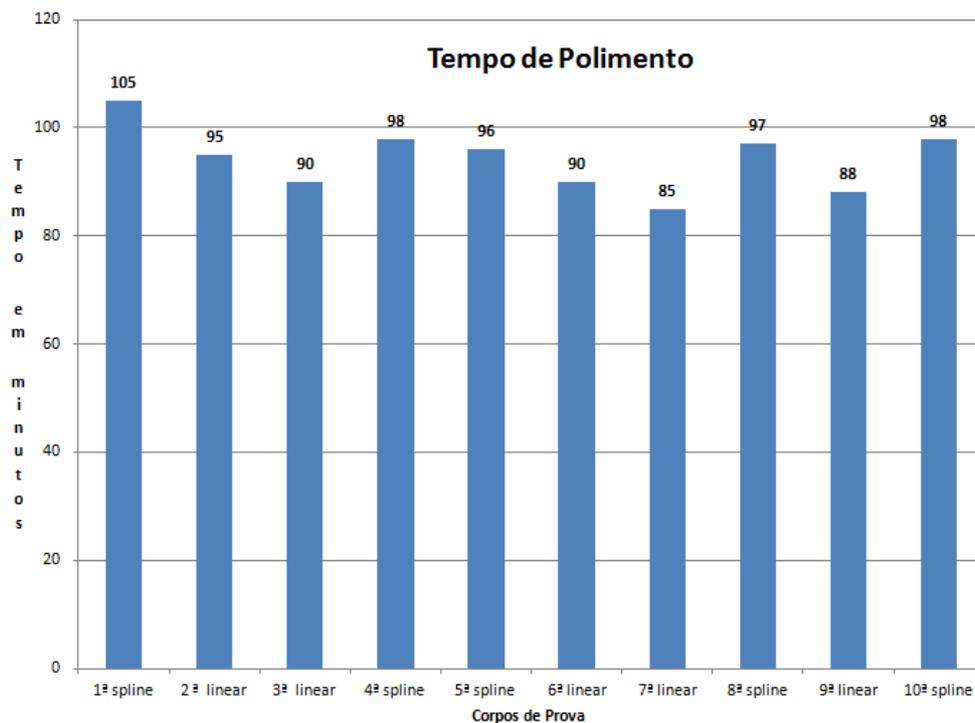


Figura 41: Tempo de polimento

A figura 42 mostra o acabamento superficial aparente na interpolação *spline* apresentou um tempo maior de polimento. Esses resultados obtidos estão de acordo com o esperado, ou seja, a maior rugosidade superficial gera um maior tempo de polimento para a retirada das marcas deixadas pela ferramenta de corte.

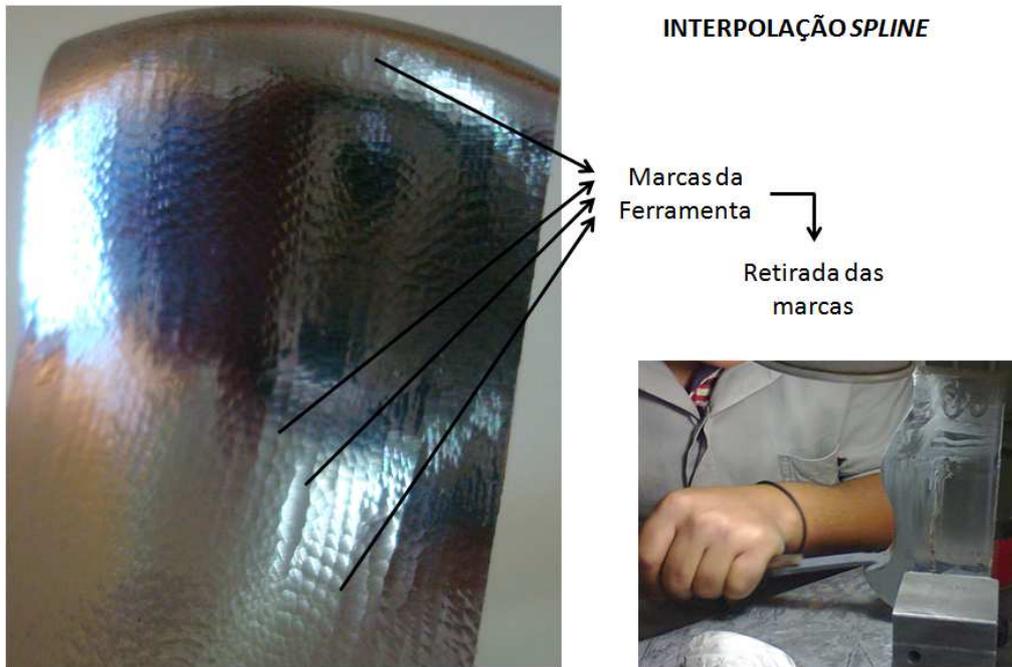


Figura 42: Característica da Superfície com interpolação spline.

No superficial aparente da interpolação linear apresentou um menor tempo de polimento, devido ao acabamento uniformidade e a baixa rugosidade aparente da superfície usinada.

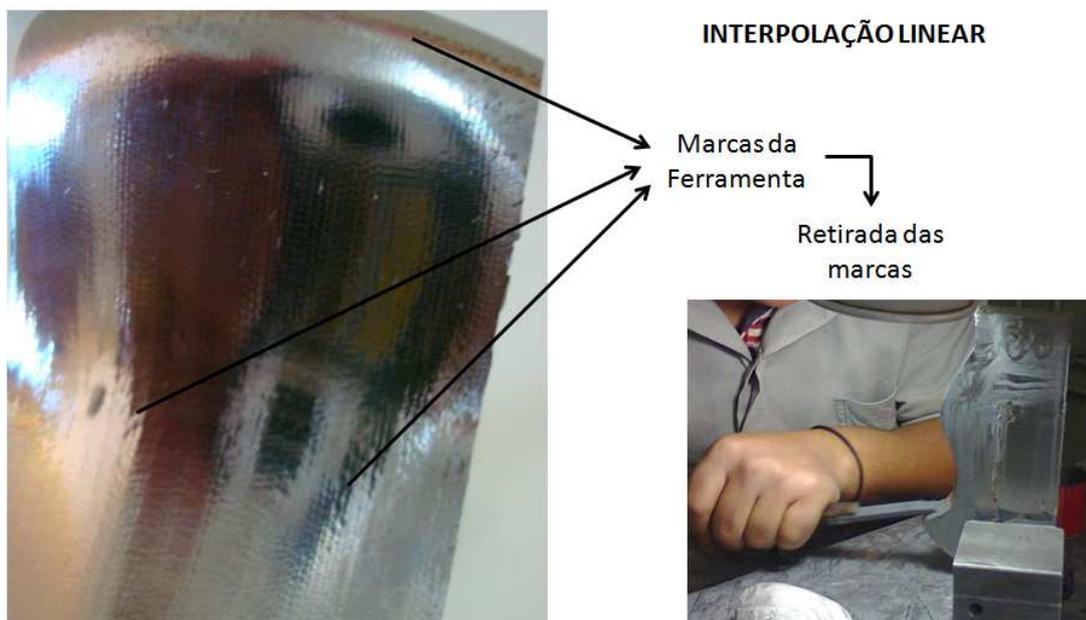


Figura 43: Característica da Superfície com interpolação linear

Analisando as duas metodologias de interpolação observa – se um tempo superior para o polimento dos corpos de prova usinados com a metodologia de interpolação *spline* em relação a interpolação linear.

5.4 Exatidão geométrica em comparação com o modelo CAD após o polimento

Analisando o polimento, apesar geometria do corpo de prova ser única para todos os ensaios, a aparência da superficial apresentou se de maneira “espelhada” para ambos as metodologia aplicadas.

5.4.1 Interpolação Linear

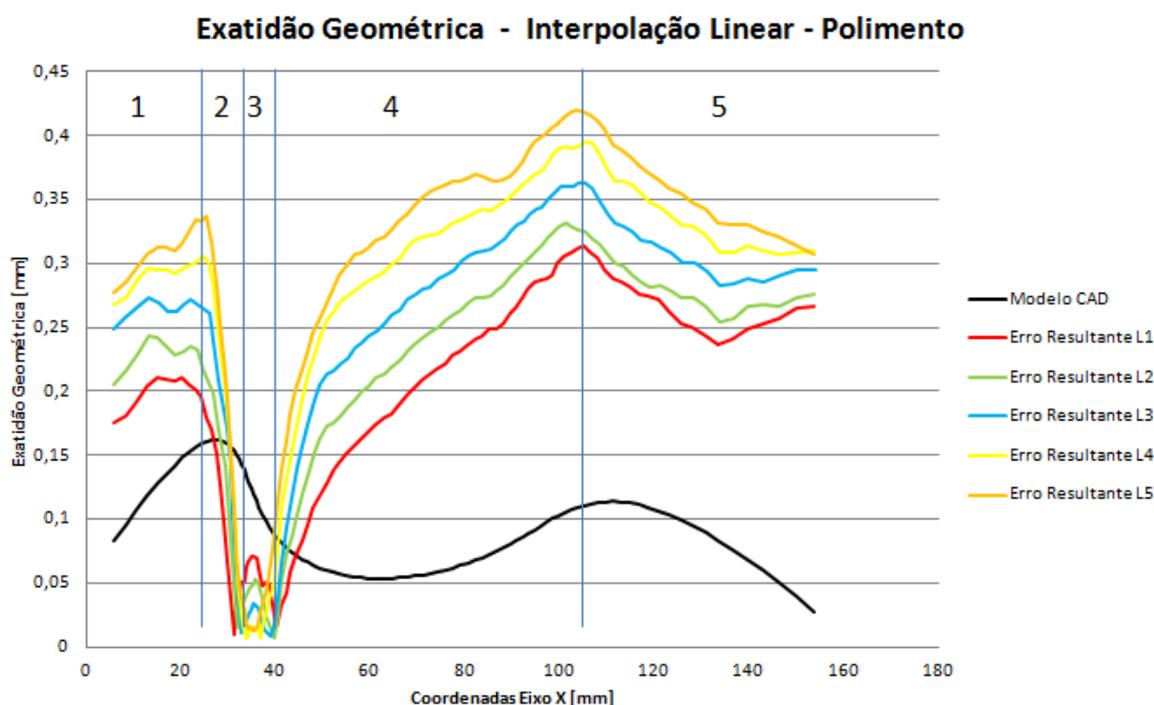


Figura 44: Exatidão Geométrica da interpolação linear após o polimento

Analisando Figura 44 é possível observar que:

- Para as regiões 4 e 5 o erro resultante após o polimento da metodologias de interpolação linear continua apresentando uma geometria real deslocada no sentido externo em relação ao modelo CAD. A maior variação, com 0,08 e 0,43 mm respectivamente para as regiões 4 e 5;

- Após o polimento da interpolação linear apresentou uma tendência de redução dos erros resultantes em relação ao corpo de prova usinado;
- Pode se observar que o erro resultante para cada linha demonstra uma tendência de estabilidade e com poucas variações de amplitude com relação a exatidão geométrica e que foi mantido após a etapa de polimento.

5.4.2 Interpolação Spline

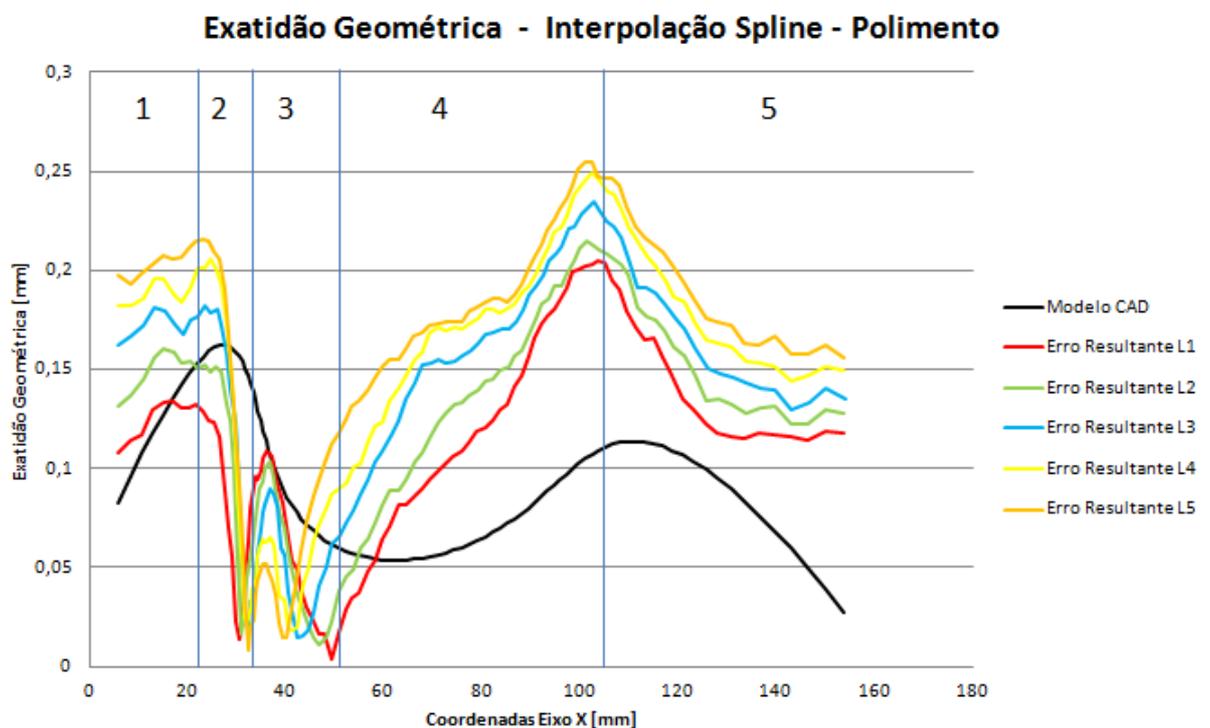


Figura 45: Exatidão Geométrica da interpolação spline após o polimento

Analisando a exatidão geométrica após a etapa de polimento do corpo de prova com a interpolação *Spline* é possível observar que:

- Para as regiões 1, 4 e 5 o erro resultante (L1 até L5) da interpolação *spline* o erro resultante após o polimento da metodologias de interpolação *spline* continua apresentando uma geometria real deslocada no sentido externo em relação ao modelo CAD. A maior variação, com 0,1 e 0,27 mm respectivamente para as regiões 1 e 4;
- Depois da etapa de polimento a interpolação *spline* apresentou uma tendência de redução dos erros resultantes na região 2 e a menor

variação (0,2 à 0,02 mm), e os erros resultantes na região 3 voltaram a subir mais continuaram apresentar uma geometria real deslocada no sentido interno em relação ao modelo CAD ;

- Nas regiões 4 e 5 os erros resultantes das apresentaram uma geometria real grande deslocamento no sentido externo em relação ao modelo CAD;
- Pode se observar que o erro resultante para cada linha demonstra uma tendência de estabilidade e com poucas variações de amplitude com relação a exatidão geométrica, sendo maior nas regiões 4 e 5.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio de da pesquisa bibliográfica foi possível evidenciar a importância da etapa de polimento na manufatura de moldes e matrizes, assim como, a importância da metodologia de interpolação da trajetória da ferramenta nessa manufatura.

Porém, esta pesquisa mostrou que, apesar da grande quantidade de pesquisas relacionadas sobre a metodologia de interpolação da trajetória da ferramenta, mas a sua aplicação na etapa de polimento não havia sido abordado no processo de manufatura dos moldes e matrizes.

Com isso, o estudo teórico abrangendo outras metodologias de interpolação, linear e *spline* sobre a etapa de polimento resultou numa apropriação de conhecimento técnico para a manufatura de moldes e matrizes.

Assim, como pode - se observar nas Figuras 37 e Figura 38, a interpolação *spline* com a faixa da tolerância CAM de 0,05 mm resultou em um acabamento com rugosidade mais aparente em relação à interpolação linear com a mesma faixa de tolerância na superfície do corpo de prova.

Essa variação da exatidão da geometria real deve-se principalmente aos erros inerentes ao processo de fabricação, desde a exatidão da máquina ferramenta até o balanceamento da porta ferramenta.

No entanto, pode-se observar que em decorrência de seu comportamento dinâmico na máquina ferramenta, a interpolação *spline* apresenta um desvio de exatidão superior em relação às interpolações linear, para todos os corpos de prova.

Além disso, em uma das regiões do corpo de prova, a interpolação linear apresentou uma uniformidade melhor no aspecto superficial, enquanto que na interpolação *spline* essa região apresentou um aspecto superficial ruim.

Em virtude disso, a tolerância CAM utilizada na geração da trajetória da ferramenta apresenta comportamentos distintos sobre essas metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta. Enquanto que na interpolação linear resulta num aumento significativo do tempo de usinagem e numa redução do desvio da exatidão do modelo geométrico real, na interpolação *spline* a variação dessa tolerância influencia de forma significativa apenas no aspecto superficial, mais reduziu o tempo de usinagem.

Com isso, tem-se que:

- A interpolação linear demonstrou ser uma metodologia mais precisa, principalmente com a faixa da tolerância CAM utilizada, porém, a geração de segmentos de retas com tamanhos inferiores ao

segmento mínimo estabelecido pelo tempo de processamento da máquina ferramenta e o aspecto superficial “faceteado” em superfícies complexas faz com que esta metodologia torne-se uma limitação a ser analisada no processo de manufatura de moldes e matrizes com altas velocidades;

- A interpolação *spline* surge como uma alternativa para a manufatura de moldes e matrizes, em virtude no seu desempenho em relação ao tempo de usinagem. Porém, o alto desvio de exatidão é corrigido com as etapas subseqüentes de polimento e ajustes do molde.
- Como na etapa de polimento, o acabamento final é avaliada a “olho nu” e depende muito da experiência do polidor à aparência superficial manteve se “espelhada” para ambos os métodos de interpolação linear e *spline*, o que é excelente, pois esse tipo de acabamento será repetido pela peça injetada.

Com isso, apesar da interpolação *spline* sofrer com os problemas desvios de exatidão geométrica, ganhos poderão ser obtidos se uma visão holística for aplicada, levando em consideração não apenas a escolha da interpolação mais também um aprofundamento da etapa de polimento e por meio de de algumas modificações sobre este tipo de interpolação, demonstrando que, com um aperfeiçoamento nos parâmetros técnicos, esse tipo de interpolação pode realmente ser uma solução na manufatura de moldes e matrizes.

Desta forma como sugestão para trabalhos futuros pode se:

- Analisar a influência do comportamento dinâmico da máquina ferramenta sobre a exatidão geometria real da peça polida
- Pesquisar sobre um metodologia que possa ser utilizado pela indústria de moldes e matrizes, durante a etapa de polimento para medir a rugosidade por refletividade.
- Estudar as forças de corte atuante na manufatura de superfícies complexas sem a condição de velocidade de corte no centro da ferramenta esférica, permitindo assim, a sua verificação sobre as condições de polimento;

- Pesquisar um método para medir a rugosidade de superfícies complexas, que possa ser utilizado na etapa de polimento;
- Pesquisar e Analisar estratégias de Automação do polimento.

7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Abele, E., Kreis, M.,. “A Alta Velocidade ainda é uma Questão de Interesse e Pesquisa”. In: Máquinas e Metais. São Paulo, p. 30 – 47, jan. 2010.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABADI). Caracterização da Cadeia Petroquímica e da Transformação de Plásticos. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.abdi.com.br/?q=system/files/ABDI_CadeiaPetroplast_ProdutoFim+%282%29.pdf>. Acesso em 28 set. 2011.

Alden, G.I., Operation of grinding wheels in machine grinding, Trans. ASME, 1914, 36, 451–460.

Altan, T., Lilly, B., Yen, Y.C., 2001, “Manufacturing of Dies and Molds.” In: Annals of the CIRP, v.50, n.2.

Arnome, A. High Performance Machining. USA, Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1998. ISBN 1-56990-246-1.

ASM International. ASM Handbook- Vol.16-Machining.3.ed.USA: ASM International, 1999.p.1-1089

BAUCO, S. Competitividade e tecnologia. Palestra realizada no 6º Encontro da cadeia de Ferramentas, Moldes e matrizes, 21/08/2008, São Paulo). Disponível em http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080821_6moldes_silviobauco.pps. Acesso em 10 abril 2011.

Bengtsson, K., 1983, “Polishing of Tool Steel”. Carl Hanser Verlag, Mold Handling Book: For the Plastic Engineer, pp 370 - 378.

BÉZIER, P. (1993) – Curvas e Superfícies em CAD/CAE/CAM. Aleph. São Paulo.

Brecher, C.; Lange, S.; Merz, M.; Niehaus, F.; Wenzel, C.; Winterschladen, M. NURBS Based Ultra-Precision Freeform Machining. In: Annals of the CIRP, v. 55/1, p. 547 - 550, 2006.

Brinksmeier, E.; Autschbach, L. Ball-end milling of Freeform Surfaces for Optical Mold Inserts. Proc. 19th Ann. Meeting ASPE, 2004.

Choi, B.K.; Jerard, R.B. Sculptured Surface Machining - Theory and applications. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 368 p. ISBN 0-412-78020-8.

- Choi, Y.K.; Banerjee A. Tool path generation and tolerance analysis for free-form surfaces. *International Journal of Machine tools & Manufacture*, v. 47, p. 689-696, 2007.
- Coelho, R. T.; Souza, A. F. Tecnologia CAD/CAM - Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23, Anais... Ouro Preto: UFOP, 2003.
- Cunha, R. R. M.; Dias, A. Uma revisão das tecnologias de integração de dados em CAD/CAM. CONEM 2000.
- DE GARMO, E.; *Materials and Processes in Manufacturing*, USA, Prentice-Hall, 1997
- Dürr, H.; Schünemann, R.; Schulze, J. Cadeia de processo baseada em NURBS. In: *Máquinas e Metais*. São Paulo, v. 33, n. 415, p. 18 – 27, AGO. 2000.
- Eberlein, W. Do modelo digital ao produto final mais rapidamente. In: III SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA. Santa Bárbara d'Oeste. 1998. p. 65-87.
- Fallbohmer, P., Rodriguez, C.A., Ozel, T., Altan, T., 2000, "Journal of Material Processing Technology" High Speed Machining of Cast Iron and Alloy for Die and Molds Manufacturing V98, pp104 -115.
- Ferraresi, D. Fundamentos da usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blücher, , 1981. 753 p.
- FERREIRA, V. H. S. Estratégia, Competências e Inovação na Indústria de Moldes – Portugal versus República Popular da China. Dissertação (Mestrado em Economia e Gestão da Ciência e Tecnologia) – Universidade Técnica de Lisboa, 2006.
- Gaither, N. Frazier, G. Tradução: Santos, J. C. B. Administração da Produção e Operações. 8. Ed. São Paulo, Ed. Thomson, 2002. ISBN 85-221-0237-6.
- Glanvill, A.B.; Denton, E.N. Princípios básicos e projetos de moldes de injeção. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1970. 309 p.
- Goellner, E.; Silva, A.D.; Oliveira, L.C. Os recursos CAD ajudam a selecionar ferramentas de corte. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v. 40, n. 458, p. 144-151. mar. 2004.
- Gologlu, C.; Sakarya, N. The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 206, p. 7-15, 2008

- Gomes, J.O. Influências que definem o sucesso da usinagem de formas complexas. *Máquina e Metais*, São Paulo, v. 38, n. 439, p. 76-105, ago. 2002.
- Helleno, A. L. Contribuição para a Manufatura de Superfícies Complexas com Altas Velocidades Baseada em novos Métodos de Interpolação da Trajetória da Ferramenta. Tese de Doutorado - Universidade Metodista de Piracicaba, 2008.
- Helleno, A. L. Investigação de Métodos de Interpolação para Trajetória da Ferramenta na usinagem de Moldes e Matrizes com Alta Velocidade. Dissertação (Mestrado) - Universidade Metodista de Piracicaba, 2004.
- Henriques, J. R.: Contribuição para a Otimização da Troca de dados Geométricos entre Sistemas CAD Utilizando Processadores STEP AP 214. Dissertação. Universidade Metodista de Piracicaba, Março 2004.
- Hioki, D.: Influência dos Parâmetros de Corte do Fresamento HSM sobre o Desempenho Tribológico do Aço AISI H13 endurecido. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, 2006.
- Huissoon, J., P., Ismail, F., Jafari, A., Bedi, S., Automated Polishing of Die Steel Surfaces. Springer – Verlag London Limited, 2002.
- Hutchings, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials – (Metallurgy & Materials Science Series), 1992.
- Inoguchi, T. Influence of Nom – Metallic inclusions and Carbides on Pinhole Susceptibility in Mirror Polishing. *Denki Seiko (Electric Furnace Steel)*. v.78, n 4, p 361 – 368, nov 2007.
- Kasai, T.; Horio, K.; Karaki-Doy, T.; Kobayashi, A.: Improvement of Conventional Polishing Conditions for Obtaining Super Smooth Surfaces of Glass and Metal Works, *Annals of the CIRP* 39/1/1990.
- Katahira K.; Ohmori, H.; Schmidt, C.; Dambon, O.; Schneider, U.; Klocke, F. ELID Grinding Characteristics for the Machining of Optical Surface Quality for Ceramic Spherical Lens Molds. *Proc. of Euspen Int. Top. Conf. Aachen, Germany*, p. 317 – 320, 2003.
- Kim, B. H.; Choi, B. K. Guide surface based tool path generation in 3-axis milling: an extension of the guide plane method. In: *Computer Aided Design*. v. 32(3), p. 191 – 199, 2000.

- Klocke, E., Dambom, O., Capudi Filho, G. G., Influence of the polishing process on the near surface zone of hardened and unhardened steel. Science Direct, 2005.
- Klocke, E., F., Manufacturing Processes 2 – Grinding, Honing, Lapping. Aachen: Editora Springer, 2009. p.3 - 356.
- Klocke, F.; Dambom, O. Precision Machining of Glass for Optical Applications. Proc. Of Int. Workshop on Extreme Optics and Sensors. Tokyo, Japan, p. 185 – 193. 2003.
- Knoppers, R.; Gunnink, J. W. Ferramental de compactação de tempo usando tecnologia e arquivos STL. Máquina e Metais, São Paulo, v. 36, n. 415, p. 124-137, ago. 2000.
- Koelsch, J.R. Máquinas para fabricação de moldes. Máquina e Metais, São Paulo, v. 39, n. 448, p. 134-149, mai. 2003.
- KONG, L.; FUH J. Y. H.; LEE, X. L.; LING, L. S. (2003) – A Windows-native 3D plastic injection mold design system. Journal of Materials Processing Technology. p. 1-9
- Langeron, J.M., Duc, E., Lartigue, C., Bourdet P., 2004, A new format for 5-axis tool path computation using BSpline curves, Computer-Aided Design, 36:1219-1229.
- Lartigue, C.; Tournier, C.; Ritou, M.; Dumir, D. High performance NC for HSM by means of Polynomial Trajectories. In: Annals of the CIRP, v. 53, n. 1, 2004.
- Lasemi, A.; Xue, D.; Gu, P. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. In: Computer Aided Design. v 42, p. 641 – 654, 2010.
- Li S. X.; Jerard R. B. 5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-end cutter. In: Computer-Aided Design. v.26(3), p. 165 -178. 1994.
- MACHADO, A. Comando Numérico Aplicado a Máquinas - ferramenta. São Paulo, Ícone,1990, 396p.
- Machado, A.R., Da Silva, M. B., Coelho, R. T., Abrão, A. M., Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Editora Bluncher, 2009.
- Mahon, Mc.; Browne, J. CAD/CAM from Principles to Practice. UK, Suffolk: Addison-Esley, 1993. 508 p. ISBN 0-201-56502-1
- Marinescu, I., D., Uhlmann, E., Doi, T., Handbook of Lapping and Polishing. New York: Editora CRC Press, 2007. p. 281 – 338.

- Marshall S.; Griffiths J. G. A survey of cutter path construction techniques for milling machines. *International Journal of Production Research*. v.32(12), p. 2861 – 2877. 1994.
- McMahon, C.; Browne, J. *CAD/CAM Principles, Practice and Manufacturing Management*. 2ª ed. 1999, ISBN 0-201-56502-1.
- Mesquita R.A., Barbosa, C.A., 2005, “Desenvolvimento de Aço com Usinabilidade Melhorada e Aços Endurecíveis por Precipitação para Moldes de Plástico”. *Tecnologia em Materiais*. São Paulo, v.1, n.4, p.11 – 14 – 15, abr. – jun. 2005.
- Mesquita R.A., Barbosa, C.A., 2005, “Desenvolvimento de Aço com Usinabilidade Melhorada e Aços Endurecíveis por Precipitação para Moldes de Plástico”. *Tecnologia em Materiais*. São Paulo, v.1, n.4, p.11 – 14 – 15, abr. – jun. 2005.
- Mesquita, N. G. M., *Avaliação e escolha de uma superfície segundo a sua função fabricação*. Tese Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.
- Miralles, C. E., *Análise de estratégias de Corte no Fresamento com 5 eixos* Dissertação de Mestrado - Universidade Metodista de Piracicaba, 2009.
- Monaro, R. L. G., *Desenvolvimento de um Índice para Avaliação Dinâmica de Estratégias de Usinagem voltadas para a Manufatura de Superfícies Complexas*. Dissertação de Mestrado - Universidade Metodista de Piracicaba, 2011.
- Moreira, J. *Tecnologia CNC para usinagem a alta velocidade*. *Máquina e Metais*, São Paulo, v. 39, n. 446, p. 148-159, mar. 2003.
- Oliveira, J. M. *Caracterização da Integridade de superfícies Usinadas para a Produção de Moldes e Matrizes*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Caxias do Sul, 2006.
- Olling, G.; Choi, B.K.; Jerard, R.B. *Machining Impossible Shapes*. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. 386 p. ISBN 0-07-100846-2
- Piegl, L.; Tiller, W. *The NURBS Book*. Germany, Ed. Springer, 1997. ISBN 3-540-61545-8.
- Ponce, A.,. “ A complexidade de um Simples Molde”. In: *Máquinas e Metais*. São Paulo, p. 28 – 43, jul. 2010.

Ren, Y.; Yau, H. T.; Lee, Y. S. Clean-up tool path generation by contraction tool method for machining complex polyhedral models. *Computers in Industry*. v. 54(1), p. 17 – 33, 2004.

RESENDE, M. F. C. ; GOMES, J. O. Competitividade e potencial de crescimento do cluster de produtos de moldes para a indústria do plástico de Joinville. *Nova Economia (UFMG)*, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, 2004.

Ribeiro, J. F.; Godoy, A. F.; Vieira Jr, M. A Integração de Tecnologias Avançadas de Manufatura em Ambiente de Ensino de Engenharia. In: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2003, Ouro Preto, MG.

Savio, E.; Chiffre, L.; Schmitt, R. Metrology of Freeform Shaped Parts. In: *Annals of the CIRP*, v. 56/2, 2007.

Schultz, H., Abele, E., Sahm, A., 2001, “High Speed Machining - Fundamental and Industrial Application”. In: 6th Seminário Internacional de Alta Tecnologia, Piracicaba, Brazil. pp. 25-56.

Schulz, H.; Abele, E.; Sahm, A. High Speed Machining - Fundamental and Industrial Application. In: VI SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA. Piracicaba. 2001. p. 25-56.

Schutzer, K., et al. 2003, “Usinagem em Altíssimas Velocidades. São Paulo: Ed. Érica, São Paulo, Brazil, 214 p.

Schutzer, K., et al. 2011, “Programa BRAGECRIM – Resultados dos Projetos FedMan e HoliMan”. In: 16th Seminário Internacional de Alta Tecnologia, Piracicaba, Brazil. pp. 103-117.

Schützer, K.; Helleno, A. L. A importância do recurso de associatividade entre os sistemas CAD/CAM para a geração do programa NC. In: *O Mundo da Usinagem*. N. 23. p. 26 – 32. 2005. ISSN 1518-6091.

Schützer, K.; Helleno, A. L. Programming and Data Transmission in HSC Technology. In: *High-Speed Machining – How the concepts of HSM/HSC can revolutionize the metal-mechanics industry*. São Paulo: Editora Érica, 2003. p. 148-179.

Sinumerik 840D/840Di/810D/FM-NC. *Programming Guide Advanced*. 10 ed. 2000.

SMID, P. *CNC Programming Handbook*, New York, Industrial Press, 2000, 620p.

Souza, A. F. “Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades” Tese (Doutorado) – EESC – USP. Faculdade de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos. 2004.

Souza, A. F. Análise das interpolações de trajetórias de ferramenta na usinagem HSC (High Speed Cutting) em superfícies complexas. Universidade Metodista de Piracicaba, 2001. Dissertação de Mestrado. 88 p.

Souza, A. F.; Ulbrich, C. B. L. Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC – Princípios e Aplicações. São Paulo. Ed. Artliber. 2009.

Steiner, C., Heinze, D., Pavezzi, L. A., Técnica de Polimento na Construção de Moldes. III Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, São Paulo, SP, 10 a 12 de agosto de 2005.

Stroh C.; Abele, E. NURBS based Tool Path generation. In: X SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA. Piracicaba. 2005. p. 49-68.

Tam, H. Y.; Lui, O. C.; Mok, A.C.K.; Robotic Polishing of free form surfaces using scanning paths. Journal of Materials Processing Technology, v. 95 p.191-200, 1998.

Villares Metals, Catálogo do aço VP Atlas, 2012.

Volpato, N. Modelamento e geração de programa CNC para a usinagem de Moldes. Máquinas e Metais, São Paulo, v.30, n.348. p. 62 – 76, jan. 1995.

Walsh, R. A.; Cormier, D. R. McGraw-Hill machining and metalworking handbook, 3 ed. USA: McGraw-Hill Companies, Inc, 2006, p 1- 974.

Warkentin, A.; Hoskins, P.; Ismail, F.; Bedi, S. Computer Aided 5-axis Machining. In: Computer Aided Design, engineering and manufacturing: system techniques and applications. CRC Press; 2001.

Willenborg E., Ostholt R., “Re-melting with laser radiation is a new method for the automated polishing of 3D surfaces in the tooling industry and medical engineering”. Em <http://www.optoiq.com/index/display/article-display.articles.optoiq2.lasers-for_manufacturing.laser-surface_treatment.laser-melting_.2009.11.polishing-metals-with-laser-radiation.QP129867.dcmp=rss.page=1.html >. Acesso em: 12 de Fevereiro de 2011.

Wolf, J.; Weck, M. ISO 14649 Provides Information for Sophisticated and flexible numerically controlled production. Production Engineering Reserchand Development, v. 10, Issue 2, p. 41-46, 2003.

Woodbury, R.S., History of the Grinding Machine, MIT Press, Cambridge, MA, 1959.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

Zhao, X. Effect of Hardness on the Polishing Performance of Steel for Plastic Molding. Moju Gongye (Die & Mold Industry). v.33, n 11, p 65 – 66, 2007.