



**Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba
Escola de Engenharia de Piracicaba
Curso de Engenharia Mecânica**



Renan Rodrigues Andrade

**Estudo da relação entre as principais estratégias de
fresamento de cavidades na usinagem de moldes
termoplásticos**

Piracicaba
2012

Renan Rodrigues Andrade

**Estudo da relação entre as principais estratégias de
fresamento de cavidades na usinagem de moldes
termoplásticos**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
Piracicaba como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MS. Marcelo Eurípedes da
Silva

Piracicaba
2012

Renan Rodrigues Andrade

**Estudo da relação entre as principais estratégias de
fresamento de cavidades na usinagem de moldes
termoplásticos**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
Piracicaba como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Piracicaba, 10 de novembro de 2012

Banca Examinadora:

Marcelo Eurípedes da Silva – (Presidente)
Mestre em Engenharia Mecânica
Escola de Engenharia de Piracicaba

Giovani Leandro Benato – (Membro)
Mestre em Engenharia de Produção
Escola de Engenharia de Piracicaba
Faculdade de Tecnologia de Piracicaba

Marcos Roberto G. Bertanha – (Membro)
Mestre em Engenharia de Produção
Colégio Técnico de Piracicaba

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus,
minha fonte de força e coragem nesta caminhada,
aos meus pais João Carlos e Rosângela, pelo
apoio e incentivo em mais esta etapa de minha
vida.*

AGRADECIMENTOS

A realização de mais essa etapa, somente tornou-se possível, com a colaboração e incentivo de muitas pessoas que fazem parte de minha vida, em especial quero agradecer:

Primeiramente a Deus, pois só Nele encontrei força e vontade para seguir minha caminhada, vencendo os momentos mais complicados durante toda a jornada.

Ao meu orientador Prof. MS. Marcelo Eurípedes da Silva, pela colaboração e dedicação durante todo esse trabalho, delineando os rumos a serem seguidos.

Aos meus pais e minha irmã, pelo exemplo de vida e incansável apoio, formando a minha estrutura e base para poder continuar.

A minha namorada pela compreensão e incentivo, pelas horas despendidas na realização deste trabalho.

Agradeço também a empresa Mecânica Ranaq, por todo suporte disponibilizado, o qual foi essencial para os testes e usinagens contidos no estudo de caso.

A todos os meus amigos pelos grandes momentos compartilhados ao longo do curso, meu agradecimento e minha gratidão.

Muito Obrigado, a todos!

“Tomai, portanto, a armadura de Deus, para que possais resistir nos dias maus e manter-vos inabaláveis no cumprimento do vosso dever”.

(Ef 6,13)

RESUMO

O presente trabalho tem como propósito demonstrar as principais estratégias utilizadas na usinagem de moldes e matrizes, comparando a diferença de tempo real com o estimado pelo software CAM, juntamente com o dimensional e a rugosidade obtidos em cada estratégia de acabamento. Uma relação da potência exigida pela máquina, através da variação da corrente, com o consumo médio para cada processo foi realizado, analisando os possíveis fatores que influenciaram nas alterações das forças de corte. Para isso foram abordados os fundamentos de fresamento e sua aplicação na abertura de cavidades, e a qualidade superficial obtida nesse processo, a estrutura dos moldes termoplásticos e os tipos de aço utilizados na sua construção, descrevendo as ferramentas e coberturas empregadas, seu material e geometria. Os conceitos de CAD e CAM foram abrangidos, assim como o funcionamento das máquinas CNC, os tipos de acionamentos, a tolerância na usinagem e os parâmetros de suavização programados.

Palavras-chave: Usinagem. Moldes e Matrizes. Estratégias.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Tipos de Fresamentos.....	20
Figura 2: Diversas geometrias de superfícies fresadas.....	21
Figura 3: Fresamento concordante e discordante – Espessura do cavaco.....	23
Figura 4: Forças nos fresamentos concordantes e discordantes, pontos de contato entre a porca e o fuso da mesa.....	24
Figura 5: Componentes da força de usinagem durante o fresamento.....	26
Figura 6: Tipos de entradas no fresamento de cavidades: A) Entrada em mergulho; B) Entrada em Rampa e C) Entrada em Hélice.....	30
Figura 7: Sobremetal resultante da usinagem em superfícies complexas.	31
Figura 8: Ponto de contato ferramenta/peça de acordo com o sentido de corte.	31
Figura 9: Componentes molde de injeção de termoplásticos.....	34
Figura 10: Rugosidade em superfícies fresadas.	43
Figura 11: Cabeçotes com insertos intercambiáveis.	51
Figura 12: Ferramentas de metal duro inteiriço com coberturas.	52
Figura 13: Macro geometria do inserto: iC – diâmetro do inserto; $d1$ – diâmetro do furo de fixação; s – espessura do inserto.....	53
Figura 14: Micro geometria da aresta de corte: b – largura do chanfro da aresta; γ – ângulo do chanfro da aresta; ER – raio de arredondamento da aresta.....	53
Figura 15: Tipos de avarias nas arestas de corte: a) Lascamento, b) Trinca de origem térmica, c) Trinca de origem mecânica e d) Quebra.....	55
Figura 16: Tipos de desgastes nas superfícies das ferramentas de corte: a) Desgaste de flanco e de entalhe; b) Desgaste de cratera; c) Deformação plástica da aresta de corte.	55
Figura 17: Formação de aresta postiça de corte (APC).	57
Figura 18: Curva Spline.....	60
Figura 19: Modelo matemático de cavidade e produto com geometrias complexas.	60
Figura 20: Tolerância de malha triangular.	61
Figura 21: Estratégias de fresamento em operações de acabamento: A) passes verticais paralelos; B) passes horizontais paralelos e C) passes em offset seguindo um perfil.....	62

Figura 22: Tolerância de cálculo nos programas NC.	63
Figura 23: Eixo árvore convencional (a) e integrado (b).....	65
Figura 24: Aplicação dos motores angulares e lineares.....	66
Figura 25: Componentes de um encoder angular (a). Representação de montagem da régua óptica (b).	67
Figura 26: Representação do comportamento da máquina com o recurso ativo.	68
Figura 27: Formas de aceleração da máquina CNC.	69
Figura 28: Conversão interna de interpolações para polinômios de 5º grau (Spline).	70
Figura 29: Modelamento do corpo de prova.....	72
Figura 30: Estratégia de Desbaste por Offset.	73
Figura 31: Medição de batimento radial, ferramentas de metal duro inteiriço.	74
Figura 32: Foto da placa com a representação de cada cavidade (C1 C2 e C3).	76
Figura 33: Representação do Raster e o ângulo de direção de corte.	76
Figura 34: Representação do Zconstante_Otimizado e linha de percurso gerada...	77
Figura 35: Representação do 3D offset e linha de percurso gerada.	77
Figura 36: Medição de corrente com o multímetro no painel traseiro.....	78
Figura 37: Osciloscópio Digital Portátil, com 2 ou 4 entradas.	78
Figura 38: Representação de referência para medição de rugosidade.....	84
Figura 39: Acabamento_C3, estratégia 3D_offset.....	86
Figura 40: Acabamento_C2, estratégia Zconstante_Otimizado.	86
Figura 41: Ponto de contato aresta/peça.	87
Figura 42: Acabamento_C1, estratégia Raster.	87
Figura 43: Inserto JOMT080320, classe VP15TF utilizado no desbaste.....	88
Figura 44: Ferramenta Metal Duro Inteiriço: A) Toroidal_Ø8_R1 (CMR0810) utilizada no Redesbaste; B) Esférica_Ø8 (CLB 0802) utilizada no Semiacabamento.....	89
Figura 45: Ferramentas de Metal Duro inteiriço Esférica_Ø6 (CMB 0602) utilizadas nos acabamentos : A) aplicada na cavidade C1 (Raster); B) aplicada na cavidade C2 (Zconstante_Otimizado); C) aplicada na cavidade C3 (3D_Offset).....	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais elementos e seus efeitos na liga de aço.	36
Quadro 2: Composição química dos aços para moldes e matrizes.....	37
Quadro 3: Principais aços para molde e suas características.	38
Quadro 4: Relação entre os aços e os tipos de tratamentos térmicos e de superfícies.	41
Quadro 5: Parâmetros de rugosidade.	42
Quadro 6: Classificação do metal duro segundo norma ISO 513 (2004).	48
Quadro 7: Comparação entre as ferramentas revestidas pelo processo de CVD e PVD.....	50
Quadro 8: Parâmetros de corte para a operação de desbaste.....	73
Quadro 9: Parâmetros de corte para a operação de redesbaste.	74
Quadro 10: Parâmetros de corte para a operação de semiacabamento.....	75
Quadro 11: Parâmetros de corte para as operações de acabamento.....	75
Quadro 12: Dados obtidos pelo processo em cada estratégia.....	80
Quadro 13: Valores médios obtidos para a cavidade C1 – Raster.....	82
Quadro 14: Valores médios obtidos para a cavidade C2 – Zconstante_otimizado.	83
Quadro 15: Valores médios obtidos para a cavidade C3 – 3D Offset.	83
Quadro 16: Média de rugosidade para cavidade C1 – Raster.....	84
Quadro 17: Média de rugosidade para cavidade C2 – Zconstante_Otimizado.	85
Quadro 18: Média de rugosidade para cavidade C3 – 3D_Offset.....	85
Quadro 19: Comparativo entre as estratégias de acabamento.	100

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Aproximação entre um intervalo definido de uma curva qualquer, pela Regra dos Trapézios Simples.	91
Gráfico 2: Aproximação entre um intervalo definido de uma curva qualquer, pela Regra dos Trapézios Composta.....	92
Gráfico 3: Potência Instantânea x Tempo, para o processo de Desbaste.	92
Gráfico 4: Potência Instantânea x Tempo, para a operação de Redesbaste.	93
Gráfico 5: Potência Instantânea x Tempo, para a operação de Semiacabamento. .	94
Gráfico 6: Potência Instantânea x Tempo, para o acabamento Raster.....	95
Gráfico 7: Potência Instantânea x Tempo, para o acabamento Zconstante Otimizado.	95
Gráfico 8: Potência Instantânea x Tempo, para o acabamento 3D Offset.	96
Gráfico 9: Comparação de consumo entre as operações de usinagem, no mesmo intervalo de tempo.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI: American Iron and Steel Institute

APC: Aresta Postiça de Corte

CAD: Computer Aided Design

CAM: Computer Aided Manufacturing

CNC: Controle Numérico Computadorizado

CVD: Deposição Química a Vapor

HRC: Rockwell Hardness, scale C

HSM: High Speed Machining

NC: Comandos Numéricos

PVD: Deposição Física a Vapor

TPB: Tempo de Processamento de Bloco

LISTA DE SÍMBOLOS

A: Área da seção do cavaco	[mm ²]
a_e: passo lateral ou avanço radial de corte	[mm]
a_p: passo vertical	[mm]
F: Avanço programado	[m/min]
F_{ap}: Força de Apoio	[N]
F_c: Força de corte	[N]
F_e: Força efetiva de corte	[N]
F_f: Força de avanço	[N]
F_p: Força passiva ou Força de profundidade	[N]
F_t: Força Ativa	[N]
F_u: Força de usinagem	[N]
f_z: avanço por dente	[mm/z]
h_D: espessura do cavaco formado	[mm]
h_{máx}: espessura máxima do cavaco formado	[mm]
I: Corrente elétrica	[A]
K_s: pressão específica de corte	[N/mm ²]
N: Rotação	[rpm]
P_c: Potência de corte	[N]
P_f: Potência de avanço	[N]
P_m: Potência fornecida pelo motor	[N]
R_a: Desvio aritmético médio	[μm]
R_{ku}: Fator de achatamento do perfil	[μm]
R_q: Desvio médio quadrático	[μm]
R_{sk}: Fator de assimetria do perfil	[μm]
R_t: Altura total do perfil	[μm]
R_z[*]: Altura máxima do perfil	[μm]
V_c: Velocidade de corte	[m/min]
η: rendimento	
φ: ângulo de contato do dente	[°]
Θ: ângulo da interpolação de entrapa	[°]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 PRINCIPAIS ABORDAGENS SOBRE A OPERAÇÃO DE FRESAMENTO	19
2.1 Tipos de Fresamentos	20
2.2 Movimentos do Processo	22
2.3 Forças e Grandezas envolvidas no Processo	25
2.3.1 Potências no fresamento	27
2.4 Usinagem de cavidades: Fresamento e Estratégias	28
3 MOLDES DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS	33
3.1 Estrutura e Componentes	33
3.2 Funcionamento	35
3.3 Principais aços na fabricação de moldes e matrizes	36
4 QUALIDADE DE SUPERFÍCIES	39
4.1 Tratamentos Térmicos	39
4.2 Rugosidade	42
4.2.1 Rugosidade em superfícies fresadas	43
4.3 Polimento	44
5 FERRAMENTAS UTILIZADAS NA USINAGEM DE MOLDE E MATRIZES	46
5.1 Metal Duro	47
5.2 Coberturas	49
5.3 Geometrias das arestas de corte	51
5.3.1 Macro-geometria dos insertos	52
5.3.2 Micro-geometria da aresta	53
6 DESGASTE DAS FERRAMENTAS	54
6.1 Mecanismos de desgastes	57
7 CAD / CAM / CNC	59
7.1 Softwares CAD	59
7.2 Softwares CAM	60
7.2.1 Tolerância de trajetórias em softwares CAM	62
7.3 Máquinas CNC	64
7.3.1 Acionamentos	64
7.3.2 Transdutores	66

7.3.3 Parâmetros de Suavização em Máquinas CNC -----	67
8 ESTUDO DE CASO -----	71
8.1 Metodologia -----	72
8.1.1 Procedimentos -----	73
8.1.2 Delineamento do estudo -----	76
8.2 Análise dos resultados -----	79
8.2.1 Tempo de usinagem -----	79
8.2.2 Dimensional e Rugosidade -----	82
8.2.3 Desgaste das ferramentas -----	88
8.2.4 Potência Média Consumida -----	90
9 CONCLUSÃO -----	101
REFERÊNCIAS -----	103
APÊNDICE -----	107
ANEXO -----	109

1 INTRODUÇÃO

A exigência do mercado consumidor criou a necessidade da evolução e intensificação constante no lançamento de novos produtos, com formas harmônicas e inovadoras, tornando a sua obtenção um processo complexo em muitos casos. Um crescente meio de obtenção desses produtos ou componentes é através da injeção de materiais polímeros em moldes termoplásticos, presente em vários segmentos da indústria de manufatura atual. (BONETTI, 2008)

Segundo Ventura (2010) as indústrias de moldes e matrizes tem crescido rapidamente devido a complexidade das formas dos produtos e pela diminuição do seu ciclo de vida, forçando essas empresas a expandir e buscar constantemente o aperfeiçoamento para poder garantir a concorrência no mercado.

De acordo com Bonetti (2008) a etapa de fabricação do molde é a principal e representa um grande impacto no mercado, pois o custo final do produto é influenciado pelo custo de construção e satisfação das exigências determinadas pelo tipo de produto obtido pelos moldes e matrizes.

Devido às superfícies complexas existentes na maioria dos produtos injetados, a usinagem representa maior parte tanto no tempo, quanto no custo da fabricação dos moldes, pois apresenta certa dificuldade em se obter a precisão requerida e a qualidade nos processos, em relação a rugosidade, geralmente não são satisfatórias para ser utilizado diretamente na produção, necessitando de etapas de acabamentos manuais, realizados por “artesãos”, aumentando consideravelmente o tempo na fabricação e o custo final do molde (SOUZA, 2004).

Nas ferramentarias o alvo centrado esta na qualidade superficial, na redução do tempo de usinagem e dos custos, assim a otimização nos processos de usinagem é vantajosa, garantindo uma fabricação em larga escala, com menor custo, aprimorando os parâmetros de corte, como a velocidade de corte e avanço.

Em uma pesquisa realizada pela Revista Plástico Industrial em Janeiro de 2012, mostra que o setor da transformação onde houve maior demanda de moldes e matrizes foi o da injeção com expressivos 74,9%, seguido por sopro (11,55%), extrusão (4,7%), rotomoldagem (2,85%) entre outros. Tendo como principais consumidores dos moldes os seguimentos automobilísticos, de embalagens,

construção civil, eletrodomésticos, entre outros nos quais podem se enquadrar a linha branca, doméstica, agrícola e de brinquedos.

De acordo com a pesquisa a maioria das empresas trabalha com pedidos em carteira e que o prazo de entrega de uma nova ferramenta é de 60 dias, o que sofre uma variação de 30 a 180 dias de acordo com a complexibilidade do molde.

Com a forte concorrência internacional, onde destas 80,4% é proveniente da China, as ferramentarias estão investindo em novas máquinas e equipamentos, diminuindo o tempo que o molde fica em manufatura/manutenção dentro da empresa, o tempo de usinagem e as etapas de processo.

Assim esse estudo de caso objetivou demonstrar os aspectos entre as principais estratégias existentes na maioria dos softwares CAM, utilizadas para o acabamento dos moldes e matrizes, onde o tempo e o acabamento final são de extrema importância para um processo enxuto e de qualidade, reduzindo custos extras com polimentos, horas máquina e ajustes manuais que em geral são processos comuns e rotineiros nas ferramentarias.

Dessa forma o presente estudo foi desenvolvido da seguinte forma:

No capítulo 2 são abordados os fundamentos do processo de fresamento, os tipos de movimento, forças e potências envolvidas juntamente com os tipos de fresamento na abertura de cavidades.

No capítulo 3 a estrutura de um molde termoplástico é apresentada, assim como seu funcionamento e os tipos de aço empregados na fabricação.

No capítulo 4 são abrangidas as qualidades de superfície, os tipos de rugosidade no fresamento, tratamentos térmicos comumente empregados na fabricação dos moldes e seus componentes e o polimento final.

No capítulo 5 os tipos de ferramentas utilizadas no processo de usinagem dos moldes e matrizes são descritas. O metal duro e as coberturas existentes bem como a geometria das arestas de corte.

No capítulo 6 descreve-se o desgaste e os seus mecanismos para as ferramentas empregadas.

No capítulo 7 é abordado o conceito básico dos softwares CAD e CAM, a estrutura e funcionamento das máquinas CNCs, as tolerâncias programadas e o módulo de suavização do comando.

No capítulo 8 encontra-se o estudo de caso, realizando a usinagem do corpo de prova, analisando o tempo, dimensional, rugosidade e consumo em cada processo.

2 PRINCIPAIS ABORDAGENS SOBRE A OPERAÇÃO DE FRESAMENTO

O fresamento é um dos processos de usinagem mais empregados na indústria de manufatura, devido a sua elevada taxa de remoção de material e pelo caráter versátil, sendo este, tanto pelas diversas geometrias de superfícies geradas quanto pelas ferramentas aplicadas no processo (MACHADO et al., 2011).

Utilizado e desenvolvido ao longo dos anos, o fresamento sofre constantemente aprimoramento de suas técnicas e aplicações, mas partindo do conceito principal expressado através do seguinte trecho:

Processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer. (FERRARESI, 1970, p. XXXIII)

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), a operação de usinagem por fresamento é aquela em que a ferramenta, denominada fresa, possui a disposição de suas arestas cortantes em torno de um eixo, simetricamente, onde o movimento de rotação ao redor deste eixo gera o movimento de corte do processo. A mesa da máquina, onde a peça está fixada, realiza o movimento, forçando a peça contra a ferramenta em rotação, gerando a remoção de cavaco, dando-lhe formas e dimensões desejadas.

Assim como Machado et al. (2011), defende a idéia de que o fresamento é umas das operações mais reconhecidas pela sua versatilidade na produção de superfícies com geometrias diversas, além da alta remoção de material, devido sua ferramenta possuir múltiplas arestas cortantes.

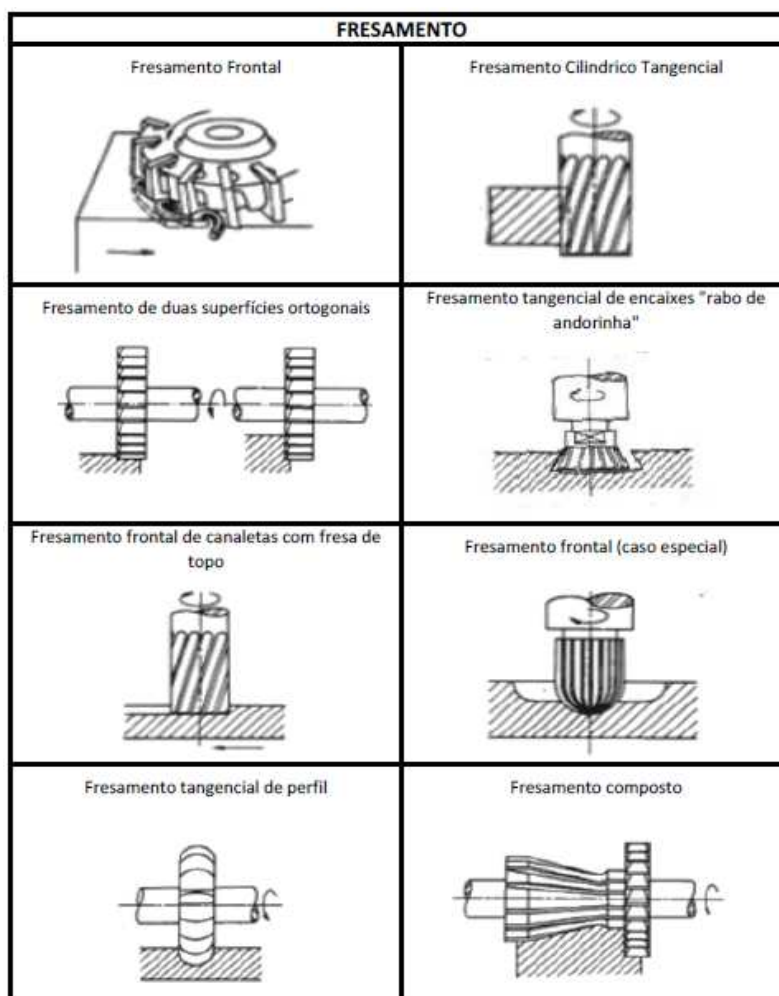
O fato de a ferramenta poder assumir uma grande quantidade de arestas de corte aliou a qualidade da superfície gerada, em relação ao acabamento, com a produtividade elevada, pois a ferramenta pode ser empregada com altas velocidades de avanço com um avanço por dente (f_z) pequeno (COSTA, A., 2003). O mesmo fato, comparado com as demais operações de usinagem ressaltou a capacidade do fresamento e suas vantagens em face dos vários tipos de superfícies necessárias na usinagem de uma peça. (FERRARESI, 1970)

Seguindo o conceito Diniz, Marcondes e Coppini (2008) assumem que “boa parte das superfícies planas ou não de peças mecânicas somente podem ser geradas por fresamento”.

2.1 Tipos de Fresamentos

A operação de fresamento pode ser classificada segundo a posição do eixo-árvore da máquina ferramenta em relação superfície gerada ou em relação à disposição dos dentes cortantes da fresa. (FERRARESI, 1970) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008)

Figura 1: Tipos de Fresamentos.

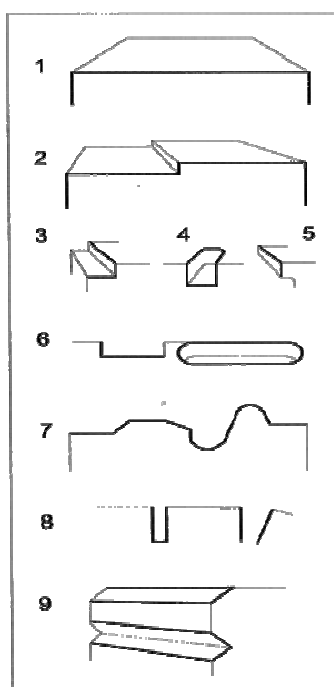


Fonte: Ferraresi, 1970, p. XXXIV.

Segundo a posição do eixo-árvore o fresamento pode ser classificado como horizontal, vertical ou inclinado. Pela disposição dos dentes ativos da fresa a classificação pode ser feita em fresamento tangencial, quando as arestas cortantes estão na superfície cilíndrica da ferramenta, ou seja, o eixo de rotação da fresa é paralelo a superfície que está sendo usinada e fresamento frontal onde o eixo de rotação é perpendicular a superfície gerada, onde as arestas cortantes estão na superfície frontal da ferramenta, conforme Figura 1. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008)

Já a norma ABNT NBR 6175, lista três tipos de fresamento conforme a disposição das arestas cortantes da fresa: os dois tipos básicos de fresamento, o tangencial e o frontal, e o fresamento composto, que equivale a junção dos mesmos. (RIGATTI, 2010)

Figura 2: Diversas geometrias de superfícies fresadas.



Fonte: Diniz, Macondes e Coppini, 2008, p. 210.

Além das classificações básicas do fresamento Diniz, Marcondes e Coppini (2008) relaciona diversos tipos de formas de ferramentas podendo ser aplicadas especificamente conforme os diferentes modelos de geometrias usinadas, representados na Figura 2. A escolha da ferramenta e do tipo de usinagem vai variar de acordo com a máquina disponível e a forma da superfície desejada.

2.2 Movimentos do Processo

Rigatti (2010) destaca os dois tipos de classificação que o fresamento tangencial pode receber conforme o sentido de movimento executado:

O movimento concordante, onde o sentido do movimento de avanço é o mesmo do sentido da rotação da fresa e o movimento discordante onde o movimento de avanço é contrário ao sentido de rotação da ferramenta.

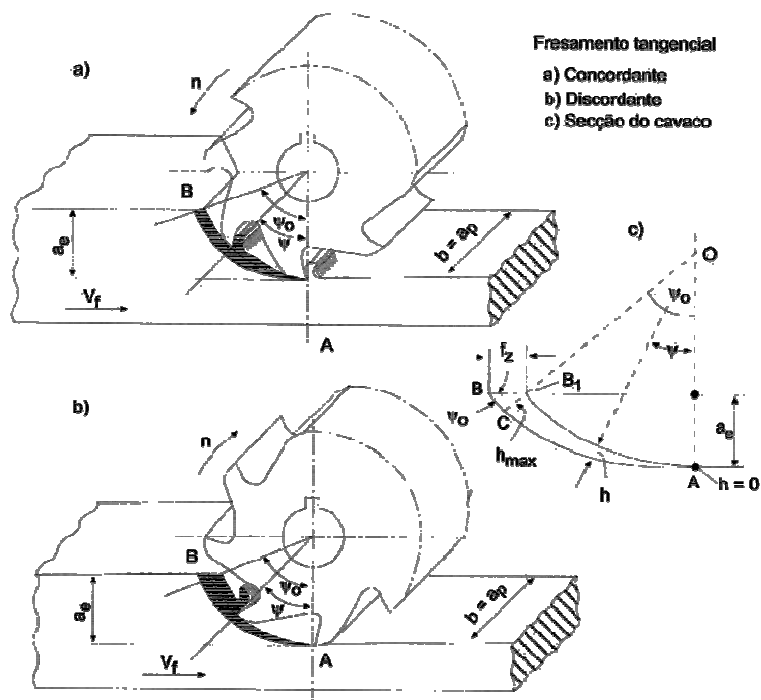
Já Diniz, Marcondes e Coppini (2008) define que é fundamental antes dessas definições, a compreensão do ângulo de contato do dente (ϕ), que equivale ao ângulo formado entre o ponto de contato aresta-peça até o ponto onde a espessura do cavaco formado (h_D) seja zero ou de valor máximo, conforme demonstrado na Figura 3.

Por conseqüência no movimento discordante a espessura do cavaco aumenta progressivamente de zero a um valor máximo ($h_{m\acute{a}x}$) que pela composição dos movimentos de corte e avanço realiza a retirada de uma porção de material. Devido ao grande atrito gerado, desde a entrada da ferramenta na peça até sua capacidade em vencer o valor da tensão de ruptura do material, e pela alternância da força vertical que no início do corte afasta a ferramenta da peça empurrando-a contra a mesa da máquina e no fim tende a arrancá-la da mesa, este tipo de movimento gera grandes vibrações, desgaste excessivo da ferramenta além da superfície acabada e das dimensões da peça que saem prejudicadas. (FERRARESI, 1970) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008)

No movimento concordante, segundo Rigatti (2010), alguns dos problemas resultantes do movimento discordante são sanados, pelo fato da componente da força vertical sempre empurrar a peça em direção a mesa da máquina, pois essa não alterna o seu sentido. Outro fator importante é o valor da espessura do cavaco, que é máxima no início do corte ($h_{m\acute{a}x}$) decrescendo até chegar a zero, fazendo com que o atrito gerado na entrada da ferramenta seja maior que o movimento discordante, porém a saída da mesma é mais suave.

Entretanto a entrada da aresta cortante no movimento concordante acontece em condições desfavoráveis diminuindo a vida útil da ferramenta, pois o material a ser usinado pode apresentar uma superfície endurecida, seja ela por tratamento térmico, crosta de fundição ou forjamento, por exemplo. (FERRARESI, 1970)

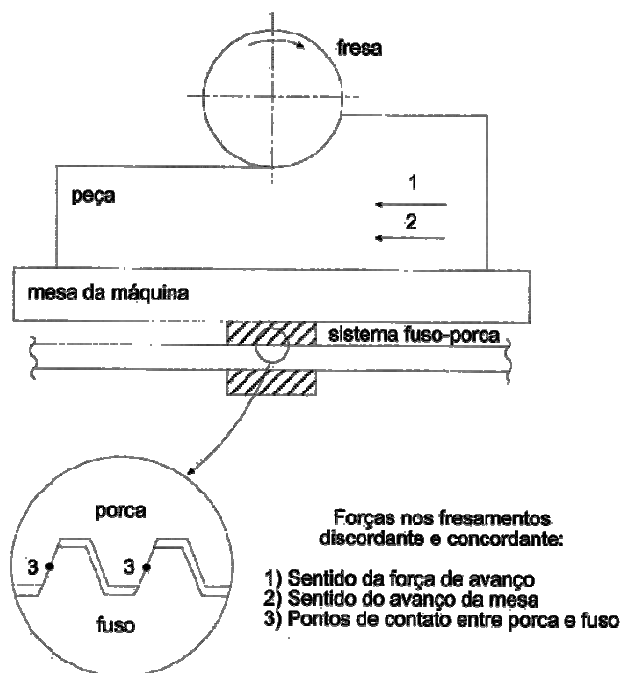
Figura 3: Fresamento concordante e discordante – Espessura do cavaco.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 2008, p. 213.

Outro ponto crucial na operação de fresamento com movimento concordante de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2008) é a folga entre a porca e o fuso, sistema de movimentação utilizado geralmente nas fresadoras. A componente horizontal da força de usinagem é do mesmo sentido do avanço da mesa, ou seja, a porca para movimentar a mesa da máquina necessita ter contato com o lado oposto do flanco do fuso em relação ao sentido de avanço, assim enquanto a porca tenta movimentar a mesa em um sentido a componente horizontal da força de usinagem empurra-a para o lado oposto, gerando vibração. O que pode ser corrigido diminuindo-se as folgas entre o fuso e a porca ou utilizando o sistema de fuso/porca de esferas, onde não há folgas, pois o contato entre os mesmos é maior, conforme Figura 4:

Figura 4: Forças nos fresamentos concordantes e discordantes, pontos de contato entre a porca e o fuso da mesa.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 2008, p. 214.

Para a obtenção da superfície desejada é necessário a escolha do movimento adequando em relação a aresta cortante e peça que no caso do fresamento é considerada estacionária. (MACHADO et al., 2011)

Os principais movimentos envolvidos no processo são classificados por Diniz, Marcondes e Coppini (2008) e Machado et al. (2011) basicamente em dois grupos, como os movimentos que promovem diretamente a retirada do material (ativos) e movimentos que não envolvem remoção de material (passivos), descritos a seguir:

- ativos: movimento de corte; movimento de avanço e movimento efetivo de corte;
- passivos: movimento de ajuste, movimento de correção e movimento de aproximação.

2.3 Forças e Grandezas envolvidas no Processo

Nas operações de fresamento as forças de corte têm seu valor alterado constantemente durante o processo, tornando necessário que algumas observações sejam realizadas, pois essa variação é o principal causador da diminuição da vida útil da ferramenta. (COSTA, A., 2003)

Segundo Machado et al. (2011) o conhecimento e o estudo das componentes das forças de usinagem que agem sobre a cunha de corte são de grande importância, pois influem diretamente na potência necessária para o corte, assim como nas forças que atuam nos elementos da máquina-ferramenta. Além destas a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas e a temperatura no processo de corte também são afetadas, como afirma Diniz, Marcondes e Coppini (2008).

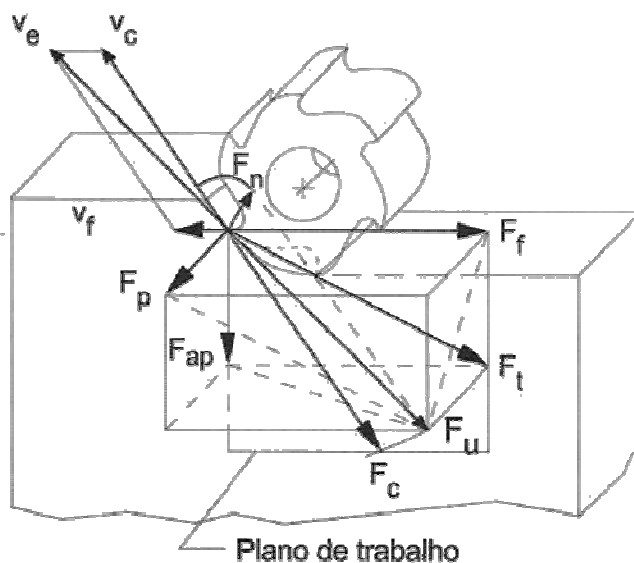
A força de usinagem (F_u), expressada na equação 1 em newton [N], estando situada em um espaço tridimensional, é decomposta em varias direções, mas é normalmente relacionada a três componentes básicas conforme descrito por Machado et al. (2011), que propôs a relação abaixo:

- força de avanço (F_f): é a força de usinagem projetada sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, gerada pela velocidade de avanço.
- força passiva ou força de profundidade (F_p): é força de usinagem projetada perpendicularmente em relação ao plano de trabalho.
- força de apoio (F_{ap}): é a força de usinagem projetada sobre uma direção perpendicular à direção de avanço, no plano de trabalho.

$$F_u = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (1)$$

Já Diniz, Marcondes e Coppini (2008) descreve a decomposição de F_u de acordo com a norma DIN 6584, onde essa é decomposta em uma componente situada no plano de trabalho, denominada força ativa (F_t) e em uma componente situada perpendicularmente ao plano de trabalho chamada força passiva ou força de profundidade (F_p).

Figura 5: Componentes da força de usinagem durante o fresamento.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 2008, p. 59.

Além da força de avanço (F_f) e da força de apoio (F_{ap}) a força ativa (F_t) é decomposta em duas outras componentes, responsáveis pelo consumo de potência:

- força de corte (F_c): é a força de usinagem projetada sobre a direção de corte.
- força efetiva de corte (F_e): é a força de usinagem projetada sobre direção efetiva de corte.

Sabendo que da decomposição feita segundo a norma DIN 6584, onde somente as componentes da força ativa (F_t) contribuem para a potência de usinagem, a força passiva ou de profundidade (F_p) também deve ser relacionada, pois influem na operação de fresamento, onde a flambagem do porta-ferramentas depende diretamente do valor dessa componente (COSTA, A., 2003). Além destas, Diniz, Marcondes e Coppini (2008) atribui a responsabilidade pela difícil obtenção de tolerâncias de forma e dimensão a esta componente, pois a mesma causa a deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o processo de corte, o que compôs a relação:

$$F_U = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} \quad (2)$$

2.3.1 Potências no fresamento

A potência gerada para girar o eixo-árvore da máquina-ferramenta resulta da soma das potências necessárias para a realização de cada operação, ou seja, a potência de usinagem é composta somente pelas componentes de corte e avanço (MACHADO et al., 2011):

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6,0 \cdot 10^4} \quad (5)$$

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{6,0 \cdot 10^7} \quad (6)$$

Geralmente F_c (força de corte) e F_f (força de avanço) são dadas em [N], a v_c (velocidade de corte) é dado em [m/mim] e a v_f (velocidade de avanço) é dado em [mm/mim].

Na relação entre a potência de corte (P_c) com a potência de avanço (P_f), ambas resultantes em kW, em situações extremas a potência de avanço chega a ser muito menor que a de corte, fazendo que ela seja desprezada no dimensionamento do motor da máquina. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008)

Assim Machado et al. (2011, p. 123) confirma que “somente o cálculo da força de corte é suficiente para que se proceda à seleção de uma máquina-ferramenta, com base na potência requerida para uma operação de usinagem”.

Desprezando, portanto a força de avanço tem-se a potência fornecida pelo motor (P_m) na relação entre a potência de corte e o rendimento ou eficiência da máquina em que se executa a operação, conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2008):

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \quad (7)$$

Onde η denominado rendimento, cujo valor pode variar dependendo do tipo de transmissão de movimento do motor, por exemplo, em máquinas convencionais varia de 60 a 80% e pode ser maior de 90% nas máquinas CNC.

2.4 Usinagem de cavidades: Fresamento e Estratégias

A produção de um molde ou matriz segundo Bonetti (2008), pode ser dividida em três fases distintas: o projeto do produto, o projeto do molde e a manufatura do molde.

Dentro da fase da manufatura do molde a usinagem assume diferentes etapas no processo de composição das superfícies geométricas, as quais foram listadas por Souza (2004):

- desbaste: partindo de um material bruto, a usinagem é executada por níveis, a qual é denominada 2 ½ eixos (dois eixos e meio), onde ocorre o movimento da ferramenta em relação a altura referente ao passo vertical e em seguida o percurso dos outros dois eixos, podendo ser em movimentos simultâneos ou individuais, realizando a remoção de material.
- alívios de cantos e pré-acabamentos: ocorre a possibilidade da ferramenta de desbaste deixar material de excesso em regiões limitadas pela sua geometria, assim faz-se necessário essa operação de alívio e redesbaste eliminando grandes volumes de material para um próximo acabamento.
- acabamento por fresamento: objetivando o melhor acabamento e dimensional possível essa operação remove todo o material em excesso deixado nas operações anteriores. Geralmente utilizada em máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) onde se tem 3,4 ou 5 eixos de liberdade.
- operações manuais de acabamento: todas as imperfeições deixadas na superfície são eliminadas de forma manual, o que gera custos, tempo de produção e até imprecisão na forma final do produto. Considerado um “artesão” o profissional que realiza esta operação utiliza-se de lixas, pedras, esmerilhadeiras manuais, entre outros, polindo a superfície usinada com sua habilidade manual.

Por Souza e Bonetti (2008 apud BONETTI, 2007, p. 25) “o molde pode ser subdividido em duas classes”:

- Cavidades: representam a parte central onde o produto é transformado, composta de macho e fêmea
- Porta-Molde: vários componentes formam a estrutura do molde, entre outros o conjunto extrator, a parte de refrigeração, etc.

A abertura de cavidades por fresamento pode ser realizada por meio de diferentes estratégias de usinagem, que tem por base o tipo de entrada da ferramenta na peça e o seu percurso durante a remoção de cavaco. O tempo de corte, esforços envolvidos e acabamento da superfície, além do desgaste da ferramenta e potência consumida pela máquina são uns dos fatores levados em consideração na escolha da estratégia que melhor se aplica a geometria desejada (VENTURA, 2010).

As superfícies complexas que geralmente apresentam os moldes e matrizes são geradas no CAD (Computer aided design) e interpretadas por softwares CAM (Computer aided manufacturing), os quais, com variáveis internas pode-se definir o avanço, velocidade de corte, a geometria da ferramenta, além de diversas estratégias que melhor se adaptam ao desbaste ou acabamento do produto. (BRANDÃO et al., 2011)

Ainda segundo o autor, “não existe uma estratégia de corte ideal e única para produzir um molde com acabamento ótimo em todos os seus detalhes”, como nas indústrias de manufatura de moldes e matrizes as máquinas-ferramentas, em sua maioria os CNC's, são compostos apenas por três eixos, provenientes das antigas máquinas tradicionais (convencionais), o que dificulta ainda mais o emprego de estratégias diferentes pelos softwares CAM.

De acordo com Costa, A., (2003) o tipo de geometria da ferramenta para o desbaste da cavidade também influencia na escolha da estratégia bem como da entrada da ferramenta na peça, pois a capacidade de avanço no sentido axial da fresa é fundamental nessa operação.

Pode-se destacar 3 tipos de entradas mais empregadas, segundo Ventura (2010) e conforme ilustrado na Figura 6:

- em mergulho: o avanço nesse tipo de entrada é somente axial, como se fosse um ciclo de furação realizado pela própria fresa. Como a saída de cavaco

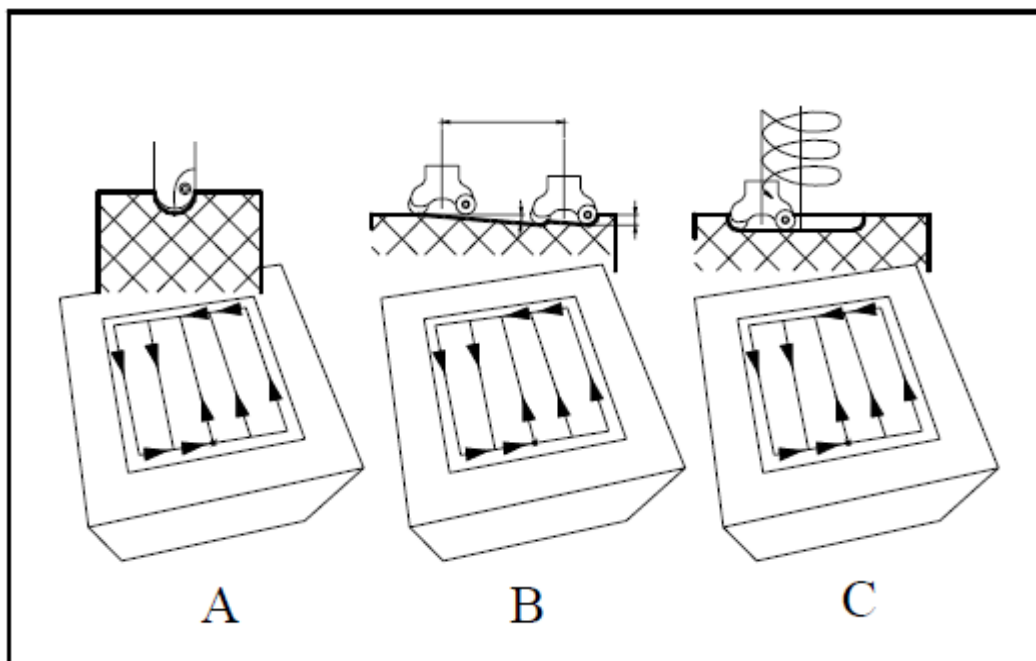
pelos centros da ferramenta é prejudicada, em cavidades profundas a aplicação do fluido de corte pode ajudar na remoção do mesmo.

- em rampa: a fresa com uma combinação de avanço axial e radial, realizando uma interpolação linear entra na superfície a ser usinada com um ângulo (Θ), de maneira mais suave.

O ângulo da rampa de entrada deve respeitar a máxima inclinação permitida à ferramenta em relação ao seu tamanho e geometria, pois dependendo do mesmo pode ocorrer o choque do porta-ferramenta com a peça ou a quebra de insertos, no caso de ferramentas intercambiáveis. (COSTA, A., 2003)

- em hélice: a ferramenta realiza um movimento de interpolação helicoidal, utilizado geralmente na abertura de cavidades circulares. Com ferramentas intercambiáveis, nessa operação, o diâmetro da cavidade deve ser considerado em relação ao diâmetro da ferramenta para que não haja colisão da peça com o centro da mesma que não possui aresta cortante.

Figura 6: Tipos de entradas no fresamento de cavidades: A) Entrada em mergulho; B) Entrada em Rampa e C) Entrada em Hélice.

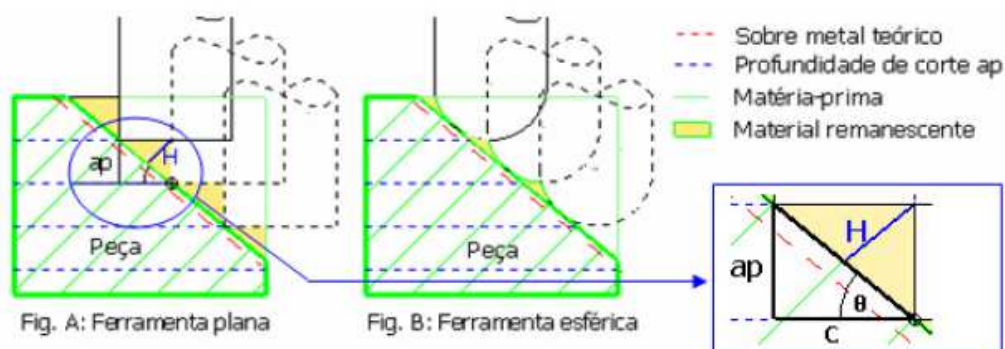


Fonte: Costa, 2003, p. 29.

Ventura (2010) conclui que dentre os principais tipos de ferramentas para fresamento: fresas de topo, toroidal (topo com raio de ponta) e esféricas

(denominadas “Ball nose”), a toroidal apresenta melhores vantagens em relação à remoção de material e marcas na superfície usinada.

Figura 7: Sobremetal resultante da usinagem em superfícies complexas.

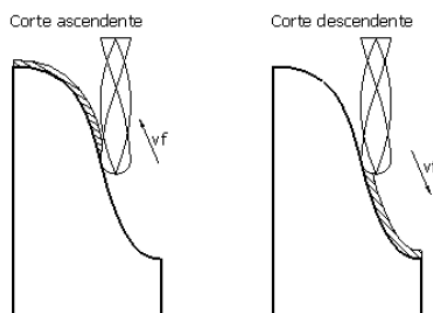


Fonte: Souza, 2004, p. 55.

Seguindo o conceito de geometria das ferramentas, Souza (2004) demonstra que após a usinagem de um perfil com uma ferramenta de ponta esférica o volume de material remanescente é 80% menor se comparado a usinagem realizada com uma ferramenta de topo plana, entretanto o tempo de usinagem é bem maior, pois os parâmetros de corte para a ferramenta esférica (a_e – avanço radial de corte) devem ser reduzidos por motivos geométricos.

Como as ferramentas esféricas são geralmente empregadas em estratégias de acabamento das superfícies complexas o sentido de corte da ferramenta deve ser avaliado com cuidado para que o centro da ferramenta, onde apresenta velocidade de corte zero, não seja utilizado, pois pode causar vibração ou deflexão da ferramenta (SOUZA, 2004). Assim o autor representa dois sentidos de corte que a ferramenta esférica pode assumir: o corte ascendente e o corte descendente.

Figura 8: Ponto de contato ferramenta/peça de acordo com o sentido de corte.



Fonte: Souza, 2004, p. 58.

No corte ascendente a ferramenta pode variar seu ponto de contato aresta/peça pelo diâmetro efetivo de corte com a curva da superfície. Já no descendente a ferramenta pode realizar o corte com o centro da ferramenta, dependendo do excesso de material deixado pela operação anterior (sobremetal) e do raio da ferramenta esférica.

3 MOLDES DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

A moldagem por injeção compreende-se pelo aquecimento de um material polímero no formato de grãos, fundido e forçado sobre pressão por meio de um pistão para dentro de um molde. (DE BLASIO, 2007)

Segundo Harada (2004) compreende-se por molde de injeção uma unidade completa que possui em seu interior as formas e as dimensões da peça a ser moldada pelo plástico.

O processo de injeção é indicado para a produção em série, onde em muitos casos apenas uma etapa separa a matéria-prima utilizada do produto final desejado, com qualidade elevada e aplicação da produção em massa. (MICHAELI, 2000)

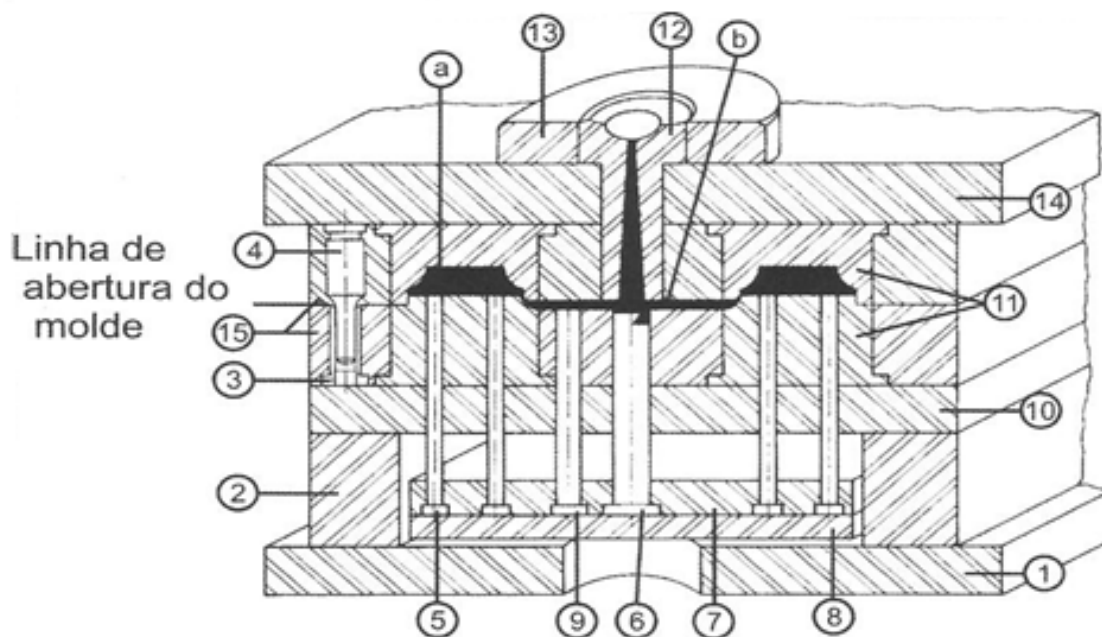
Assim De Blasio (2007) afirma que 35% dos artigos plásticos são obtidos pelo processo de transformação de termoplásticos por injeção, por ser um processo simples, rápido e preciso, onde sua utilização em larga escala vem tornando-o cada vez mais econômico.

Na construção de um molde de injeção o projeto é a base inicial, onde as primeiras considerações, segundo Harada (2004), em relação ao produto devem ser definidas, entre elas o peso, o tamanho e a forma do mesmo para que possa ser feita a distribuição da quantidade de cavidades no molde, e assim estruturar os elementos de fixação, alimentação, extração e demais componentes.

3.1 Estrutura e Componentes

De acordo com Harada (2004) a estrutura de um molde de injeção se constitui de uma montagem básica, onde as placas de aço seguem uma determinada ordem, conforme Figura 9:

Figura 9: Componentes molde de injeção de termoplásticos.



Fonte: Harada, 2004, p. 100.

1. Placa de fixação inferior
 2. Coluna ou espaçador
 3. Bucha-guia
 4. Coluna-guia
 5. Pino extrator
 6. Extrator de canal
 7. Placa porta-extratores
 8. Placa impulsora
 9. Pino de retorno
 10. Placa suporte
 11. Postiços
 12. Bucha de injeção
 13. Anel de centragem
 14. Placa de fixação superior
 15. Placa de montagem de postiços superior e inferior
- a. Cavidade
b. Canal de distribuição

Harada (2004) compõem a região de moldagem do produto como sendo uma junção de duas partes: a placa cavidade (unidade fêmea) que forma a parte externa do produto e a placa macho (núcleo) que constitui a parte interna, formando a espessura de parede do produto.

A linha de abertura do molde é considerada outra base para a divisão dos componentes do molde em conjuntos, o superior e o inferior. (AREDA, 2008)

No conjunto superior geralmente é composto pelo anel de centragem, bucha de injeção e a placa cavidade. Já o conjunto inferior é formado pela placa macho e o sistema de extração do produto.

3.2 Funcionamento

O processo de moldagem por injeção é intermitente caracterizando um ciclo. Segundo De Blasio (2007) as etapas básicas que constituem esse ciclo do processo são: alimentação, plastificação (homogeneização), enchimento, resfriamento, abertura do molde e extração do produto.

Sors e Radnóti (s.d. apud VAZ, 2010, p. 22) apresentam o ciclo de moldagem de acordo com as etapas:

- Enchimento: após o polímero fundido e comprimido pela máquina injetora na bucha de injeção do molde, o material entra no canal de injeção que faz a distribuição do mesmo nas cavidades do molde preenchendo o produto.
- Resfriamento: tomando a forma das paredes do produto no interior da cavidade, o material resfria, se solidificando.
- Abertura: a máquina injetora abre o molde separando o conjunto superior do conjunto inferior, permitindo a retirada do produto solidificado que permanece no conjunto inferior do molde.
- Extração: o conjunto extrator da máquina injetora aciona o sistema de extração do molde, sacando o produto solidificado.

3.3 Principais aços na fabricação de moldes e matrizes

A placa cavidade e macho que formam o produto nos moldes de injeção, são confeccionadas a partir de blocos de aços forjados ou laminados, onde a usinagem dessas placas representam grande parte do tempo de manufatura e boa porcentagem do custo final do molde (SILVA et al., 2009).

Assim, Harada (2004) sugere que os aços utilizados na fabricação de moldes devem resistir às solicitações (tensões) e ser fáceis de usinar. As elevadas pressões internas no processo de injeção exigem do material resistência a flexão e altas cargas de compressão, além da resistência de seu núcleo e boa dureza superficial.

Portando a integridade superficial, o bom acabamento, bem como o mínimo desgaste da ferramenta de corte aliado a baixa potência consumida, definem a boa usinabilidade do aço empregado (SILVA et al., 2009).

Segundo Chiaverini (1990) os aços para moldagem são caracterizados pelo baixo teor de carbono e pela presença de diversos elementos de liga, sendo o cromo e o níquel os principais, em porcentagens variadas que melhoram as características e propriedades do aço. Os mesmos são classificados pelo grupo P conforme quadro contido no Anexo A.

No Quadro 1 Harada (2004) sucinta os efeitos dos diferentes elementos adicionados na liga de aço:

Quadro 1: Principais elementos e seus efeitos na liga de aço.

Elemento	Efeitos
Silício	Dureza
Carbono	Endurecedor
Manganês	Desoxidante
Níquel	Tenacidade e resistência
Cromo	Dureza, melhora o polimento
Vanádio	Purificador, também aumenta a resistência à fadiga
Molibdênio	Amplia a margem de tratamento térmico
Tungstênio	Dureza e resistência ao calor

Fonte: Harada, 2004, p. 200.

A indústria de manufatura de moldes brasileira têm como o aço mais utilizado o AISI P20 ISO, considerado como um aço-ferramenta, é uma liga de aço-cromo-molibdênio, empregado também na construção de matrizes de extrusão, moldes de sopro, ferramentas de perfilar, entre outros componentes (SILVA et al., 2009).

Vários tipos de aço ou ligas podem ser empregados na fabricação de moldes, depende somente da aplicação e melhor desempenho para casos específicos. Assim os desenvolvimentos dos aços-ferramentas são constantes no mercado atual como é o caso do VP 20, criado pela Villares Metals, que é fornecido com dureza entre 30-34 HRC e teve sua usinabilidade melhorada em relação ao padrão P20 ISO, aumentando assim em aproximadamente 30% a vida da ferramenta. (SILVA et al., 2009)

Quadro 2: Composição química dos aços para moldes e matrizes.

MATERIAL	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	Al	Cu	S	V
VP 20	0,36	1,06	1,80	0,20	0,70	-	-	-	-	-
VP 50 IM	0,15	1,55	-	0,30	3,00	0,30	1,00	1,00	0,10	-
DIN 1.2711	0,56	0,70	0,70	0,30	1,65	-	-	-	-	0,075

Fonte: Adaptado Silva et al., 2009, p. 92.

Entre estas existem várias composições, onde as propriedades mecânicas variam de acordo com a combinação em porcentagens adequadas dos elementos de liga.

Quadro 3: Principais aços para molde e suas características.

Características	VP20 ISO	VP20 IM	VP50 IM	VP420 IM	VH13 IM
Usinabilidade	Boa, tanto recozido como beneficiado	Boa, tanto recozido como beneficiado	Excelente	Boa	Boa
Soldabilidade	Boa	Boa	Excelente	Excelente	Excelente
Polibilidade	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Reprodutibilidade Condição normal de entrega	Boa Beneficiado para 30/34 HRC	Boa Beneficiado para 30/34 HRC	Boa Solubilizado, dureza na faixa de 30/35 HRC. Pode ser entregue envelhecido com 40/42 HRC	Boa Recozido, dureza de 200 HB ou na versão VP420 TIM temperado e revenido para 28/32 HRC	Boa Recozido, dureza máxima de 197 HB
Aplicações típicas	Moldes para injeção de termoplásticos não clorados. Matrizes para extrusão de termoplásticos não clorados. Moldes para sopro.	Moldes para injeção de termoplásticos não clorados. Matrizes para extrusão de termoplásticos não clorados. Moldes para sopro.	Moldes para injeção de termoplásticos não clorados. Matrizes para extrusão de termoplásticos não clorados. Moldes para termoplásticos reforçados com carga. Plásticos de Engenharia. Moldes para sopro.	Moldes para plásticos corrosivos (clorados) acetato e PVC. Resistência a atmosfera úmidas. Moldes para sopro.	Mandris e outros componentes de extrusoras. Moldes para injeção de termoplásticos não clorados que requer alto grau de polimento.
Nitretação	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Cementação	Sim, antes de temperar	Sim, antes de temperar	Não	Não	Não

Fonte: Adaptado Harada, 2004, p. 107.

4 QUALIDADE DE SUPERFÍCIES

Na fabricação de moldes e matrizes a complexibilidade da construção das superfícies geométricas obrigam a utilização de ferramentas específicas e muitas vezes longas, ou seja, com grande balanço na usinagem acarretando em vibrações, deixando o corte instável e prejudicando o acabamento da superfície (OLIVEIRA, 2006). Ainda segundo o autor, as solicitações de esforços sofridas pelo molde, tanto pela pressão de injeção quanto pela força de fechamento sujeitam-no a fadiga de ciclos de injeção, o que torna fundamental que a integridade superficial seja compatível com tais solicitações.

Uma dureza superficial adequada permite (HARADA, 2004, p. 198):

- suportar efeitos de erosão dos materiais termoplásticos rígidos nas zonas do molde em que o fluxo é restrito ou obstruído,
- resistir ao desgaste, especialmente em grandes produções,
- manter na superfície um alto grau de polimento, que facilite a extração do produto e lhe proporcione um bom acabamento.

Por Oliveira (2006) o acabamento pode influenciar na resistência a fadiga de um componente, por conseqüência, a rugosidade, mudanças na microestrutura e tensões residuais causando alterações na estrutura do material.

Assim a integridade superficial tem grande relação com a resistência mecânica, a resistência à corrosão e a resistência ao desgaste superficial, para que na manufatura de moldes as tensões residuais decorrentes da usinagem da superfície sejam menores o possível para não causar amassamento durante a injeção ou não acarrete a formação de micro-trincas. (OLIVEIRA, 2006)

4.1 Tratamentos Térmicos

Segundo Harada (2004) as partes deslizantes que são submetidas a atritos, além daquelas que ficam em contato com o plástico fundido devem ser tratadas,

para garantir propriedades mecânicas específicas àquela região.

Para adquirir tais propriedades aos aços empregados na manufatura de moldes, os tratamentos térmicos ou superficiais são indicados como melhor meio.

Assim para a escolha do tratamento deve-se conhecer e saber qual o tipo de aço utilizado, a dureza que se deseja obter, a complexidade e precisão da peça, para que a deformação ocasionada pela elevada temperatura em alguns tipos de tratamento não seja um problema para o produto final. (BONETTI, 2008)

Dentre os tratamentos envolvidos nessa alteração da estrutura dos aços para cavidade e macho, podem ser citados como principais a normalização, recozimento, têmpera, revenimento, carbonitreção, cementação, etc.

A resistência a deformação plástica durante o processo de injeção nos aços é assegurada pelo tratamento térmico que eleva a dureza do material até a sua micro estrutura atingindo o seu núcleo e realizando uma alteração estrutural homogênea (BONETTI, 2008). Já os tratamentos superficiais garantem aos materiais características localizadas em uma faixa ou porção do material, assim a resistência ao desgaste, a corrosão, a diminuição do atrito, aumento da dureza superficial, melhora da polibilidade são uns dos benefícios adquiridos ao aço.

De acordo com Harada (2004) o desempenho da ferramenta (molde) e a sua vida útil, estão totalmente ligados a escolha, como no projeto em um todo, do aço empregado, assim como o melhor tipo de tratamento disponível e suas características, considerando todos os fatores que o influenciam.

Quadro 4: Relação entre os aços e os tipos de tratamentos térmicos e de superfícies.

Seleção padrão		Produção desejada		
		Baixa	Média	Alta
		—————>		
Abrasividade do produto	Baixa	Aço: ao carbono (1020/1045) TT: nenhum TS: nenhum	Aço: ao carbono (1020/1045) TT: nenhum TS: Nitrocarbonetação	Aço: ABNT 4340 ou P20 (1020/1045) TT: nenhum TS: Nitrocarbonetação
	Média	Aço: ao carbono (1020/1045) TT: nenhum TS: Nitrocarbonetação	Aço: ABNT 4340 ou P20 (1020/1045) TT: nenhum TS: Nitrocarbonetação	Aço: Class Precipitation Hardening (PH) TT: envelhecimento TS: Nitrocarbonetação/ Nitretação a plasma/ PVD
	Alta	Aço: Classe Precipitation Hardening (PH) TT: envelhecimento TS: Nitrocarbonetação/ Nitretação a plasma	Aço: ABNT H13 TT: Têmpera a vácuo TS: Nitrocarbonetação/ PVD	Aço: ABNT H13 TT: Têmpera a vácuo TS: Nitrocarbonetação/ PVD
Requisitos especiais	Polibilidade	Aço: P20 ou ABNT 420 (ESR) TT: Têmpera a vácuo (420) e nenhum (P20) TS: PVD		
	Corrosão	Aço: P20 ou ABNT 420 (ESR) TT: Têmpera a vácuo (420) e nenhum (P20) TS: PVD		
	Baixa	Aço: P20 ou ABNT 420 (ESR)		
	Deformação	TT: Têmpera a vácuo (420) e nenhum (P20) TS: PVD		
TT = Tratamento Térmico TS = Tratamento de Superfície				

Fonte: Adaptado Harada, 2004, p. 202.

4.2 Rugosidade

Na usinagem de uma peça com geometrias complexas em geral, apresentam irregularidades macrogeométricas, ou seja, desvios de forma, dimensão e orientação e irregularidades microgeométricas que seria a rugosidade em si. (MACHADO et al., 2011)

Oliveira (2006) afirma que a rugosidade sobrepõe as ondulações, ou seja, os erros macrogeométricos e se caracteriza pelo perfil de textura superficial da peça.

Sua medida é anotada de uma junção de diversos fatores que influem diretamente em seu valor durante o processo de usinagem, tendo dentre os parâmetros principais a vibração, tipo de máquina-ferramenta, a estratégia e o tipo de usinagem, o avanço, a formação de aresta postiça, desgaste da ferramenta, o material da peça, geometria e material da ferramenta, entre outros.

A medida da rugosidade pode ser realizada através de dois sistemas básicos: o sistema da linha média ou o sistema da envolvente. A ABNT utiliza o sistema de linha média onde todos os parâmetros de rugosidade, que são relacionados a uma linha imaginária ao longo do seu comprimento, paralela ao perfil (OLIVEIRA, 2006).

Quadro 5: Parâmetros de rugosidade.

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
R_z^*	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior profundidade dos valores no comprimento de amostragem.
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil (skewness)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.

Fonte: Machado et al., 2011, p. 302.

Dentre os parâmetros descritos no Quadro 5, o R_a é o mais empregado nas indústrias para o controle de um processo, onde sua variação indica erro durante o processo, como o desgaste da aresta de corte. Os parâmetros R_t e R_z são também utilizados em medições específicas, quando se deseja obter o valor máximo da altura da rugosidade por irregularidades na superfície.

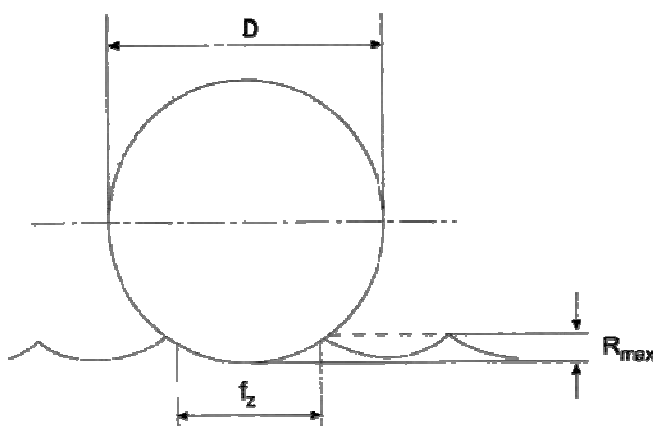
Outros parâmetros para avaliação podem ser empregados dependendo somente da aplicação da peça (MACHADO et al., 2011).

4.2.1 Rugosidade em superfícies fresadas

Para o fresamento o valor da rugosidade, expressada em [μm] na equação 8, é diretamente influenciado pelos fatores citados acima, mas o avanço da fresa por dente e o seu diâmetro formam a equação da qual é possível se obter o valor teórico da rugosidade máxima, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008):

$$R_t = \frac{f_z^2}{4D} \quad (8)$$

Figura 10: Rugosidade em superfícies fresadas.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 2008, p. 236.

Ainda segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008) algumas ações podem ser realizadas para diminuir a vibração e melhorar o acabamento, como a aplicação do

fresamento concordante, o uso adequado de fluidos de corte, diminuição da profundidade de corte lateral (a_e) e diversos outros parâmetros que se bem empregados ajudam durante o processo de corte.

No fresamento frontal, como o faceamento, por exemplo, a utilização de pastilhas alisadoras em ferramentas com arestas intercambiáveis, melhora o acabamento da superfície e abaixa a rugosidade, pois tem uma aresta secundária plana com um comprimento de corte (b_s) bem maior que as demais, sobrepondo os passes anteriores. (MACHADO et al., 2011)

4.3 Polimento

A perda de qualidade e precisão nos moldes é efeito do desgaste por este sofrido em produções de larga escala. Ressaltando que o seu valor agregado é muito elevado, o desgaste e a corrosão dos mecanismos e superfícies complexas prejudicam o acabamento, dificultam a desmoldagem dos produtos e assim reduz consideravelmente a vida produtiva do molde, podendo causar a parada de máquinas. (HARADA, 2004)

Considerando então que o acabamento do produto deve ser uma condição estável, permanecendo constante, de peça para peça, durante o processo de injeção, o polimento é um fator fundamental na produção do molde tanto na questão de visual do produto final quanto na sua desmoldagem após o resfriamento dentro da cavidade. (OLIVEIRA, 2006)

Seguindo o conceito de Oliveira (2006), na indústria de manufatura de moldes o lixamento e o polimento são tratados como um único processo, ambos referem-se como um tipo de usinagem com grãos abrasivos de geometrias irregulares, mas a diferença básica entre eles é que no primeiro os grãos são presos a algum suporte ou substrato, já o segundo os grãos abrasivos estão envoltos em uma pasta.

O lixamento é utilizado para baixar a rugosidade deixando a superfície de uma cor opaca, já o polimento para arredondar os picos deixados no lixamento fazendo com que reflitam a luz em linhas paralelas espelhadas.

De acordo com Domingues Junior (2009) as superfícies espelhadas podem ser avaliadas com instrumentos ópticos, que indicam riscos nas superfícies, onde visualmente são aceitáveis.

Como a qualidade do polimento depende da experiência do polidor, por se tratar de um trabalho manual, o excesso do polimento pode gerar um aumento da rugosidade da superfície piorando o acabamento conforme o tempo de polimento aplicado.

Ainda segundo Domingues Junior (2009), para se ter um bom polimento, quatro fatores devem ser levados em consideração: as técnicas de polimento, que dependem das habilidades do polidor; as características do aço a ser polido; se há tratamento térmico na peça ou superfície e por fim, regiões soldadas, que interferem na estrutura do material provocando variações devido às diferenças de composição química.

5 FERRAMENTAS UTILIZADAS NA USINAGEM DE MOLDE E MATRIZES

Machado et al. (2011) define que para a remoção de material no processo de usinagem utiliza-se como ferramenta um material mais duro e mais resistente mecanicamente do que a peça.

Na seleção do material da ferramenta a ser utilizado no processo, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), devem ser levados em consideração alguns fatores, tais como: material a ser usinado, tipo de processo de usinagem, condições da máquina operatriz, e as características da ferramenta.

Os principais requisitos ou propriedades observados para a escolha do material da ferramenta podem ser listados abaixo. Todas essas propriedades não se reúnem em um único material, mas sim são priorizadas e reunidas algumas delas de acordo com o tipo de aplicação e o material a ser usinado, assim Machado et al. (2011, p. 195) define:

- Alta dureza.
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura.
- Alta resistência ao desgaste abrasivo.
- Alta resistência à compressão.
- Alta resistência ao cisalhamento.
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas.
- Alta resistência ao choque térmico.
- Alta resistência ao impacto.
- Ser inerte quimicamente.

Dentro da ampla quantidade de materiais de ferramentas de acordo com suas características químicas e propriedades mecânicas, elas podem ser agrupadas de acordo com uma classificação geral, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008):

- Aços-rápidos;
- Aços-rápidos com cobertura;
- Metal duro;
- Metal duro com cobertura;
- Material cerâmico;
- Nitreto de boro cúbico;

- Diamante.

Como citado acima, diversos são os tipos de materiais das ferramentas de corte, mas a que desempenha melhores condições em altos avanços e é amplamente empregada na usinagem de moldes e matrizes é o Metal duro com ou sem cobertura, dependendo da aplicação. (PIVETTA, 2005)

5.1 Metal Duro

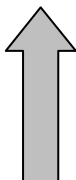
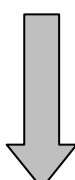
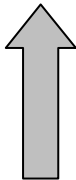
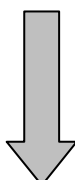
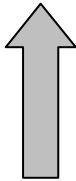
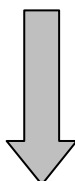
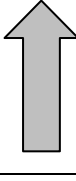

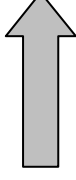
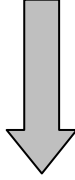
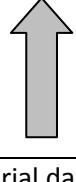
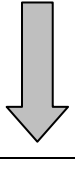
Dentro da metalurgia do pó surge o metal duro através de um produto da sinterização do carboneto de tungstênio (WC) com outros metais aglomerantes, mas principalmente com o cobalto, trazendo para o mercado um grupo revolucionário de materiais de ferramentas de corte, o que pôde obter-se com o tempo um aumento da ordem de 10 vezes a velocidade de corte antes limitada pelas ferramentas de aço-rápido. (MACHADO et al., 2011)

Inicialmente denominada “*widia*” (do alemão **wie** **diamond** = como diamante) devido às propriedades desse material comparadas ao diamante, a mistura de carboneto de tungstênio com cobalto mostrou-se muito eficiente na usinagem de ferros fundidos cinzentos, mas com baixa resistência ao desgaste na usinagem dos aços, o que gerava a craterização (desgaste de cratera).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), a combinação dos carbonetos de tungstênio com outros elementos como o titânio, o tântalo e o nióbio, garantem ao produto a elevada resistência ao desgaste, a resistência á compressão e a tenacidade. Essas partículas de elementos aglomerados ocupam de 60 a 95 % do material sinterizado com tamanhos entre 1 a 10 μm .

Inicialmente padronizados em três grupos de classe de materiais de ferramentas distinguidos por cores: classe K (vermelho) aplicada na usinagem de ferros fundidos, classe P (azul) empregado na usinagem de aços que produzem cavacos longos, e classe M (amarelo) utilizada na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos.

Quadro 6: Classificação do metal duro segundo norma ISO 513 (2004).

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros			
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01	P05		b 
			P10	P15		
			P20	P25		
			P30	P35		
			P40	P45		
			P50			
M	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01			b 
			M10	M05		
			M20	M15		
			M30	M25		
			M40	M35		
K	Vermelho	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01			b 
			K10	K05		
			K20	K15		
			K30	K25		
			K40	K35		
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01			b 
			N10	N05		
			N20	N15		
			N30	N25		
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01			b 
			S10	S05		
			S20	S15		
			S30	S25		
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferro fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01			b 
			H10	H05		
			H20	H15		
			H30	H25		

a - Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.
b - Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.

Fonte: Adaptado Machado et al. (2011, p. 214).

Atualmente a norma ISO 513 (2004, apud MACHADO et al., 2011, p. 213), acrescentou mais três grupos nas classes materiais de ferramentas, tirando as exclusividades dos metais duros e abrangendo também as cerâmicas e os materiais ultraduros, são eles: a classe N (verde) aplicável a materiais não ferrosos, a classe S (marrom) empregada na usinagem de ligas de titânio e super ligas e a classe H (cinza) utilizada na usinagem de materiais endurecidos.

Dentro de cada grupo as letras são acompanhadas por um número que representam a resistência ao desgaste e a tenacidade da ferramenta, que são subdivididas de acordo com a composição química do material e o tamanho dos grãos de carboneto, conforme Quadro 6:

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008) quanto maior for o fator de empacotamento dos grãos, á medida que diminui o tamanho do grão de metal duro pode-se obter um aumento na dureza, na resistência ao desgaste e tenacidade do material.

E quanto maior for a dureza do metal duro, de acordo com Neves, D. (2002), ele suporta maiores temperaturas e velocidades de corte elevadas.

5.2 Coberturas

A aplicação de revestimentos nas ferramentas de metal duro é amplamente utilizada na indústria, pois com ele pode-se garantir um alto desempenho se comparado as ferramentas de metal duro sem cobertura em relação à vida da ferramenta e aos esforços de corte. (MACHADO et al., 2011)

As camadas de cobertura que revestem as ferramentas de metal duro são finas, em geral variam entre 2 a 12 μm , aumentando a dureza da superfície externa mantendo o núcleo com a tenacidade característica do metal duro simples.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2008) os principais revestimentos, entre eles, nitreto de titânio (TiN), carboneto de titânio (TiC), carbonitreto de titânio (TiCN), óxido de alumínio (Al_2O_3), são aplicadas pelo processo de deposição química ou física a vapor (CVD) ou (PVD), conforme Quadro 7:

Quadro 7: Comparação entre as ferramentas revestidas pelo processo de CVD e PVD.

	CVD - Deposição Química de vapor	PVD - Deposição física de vapor
Temperatura de revestimento	Aproximadamente 1.000 °C	Aproximadamente 500 °C
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Aresta de corte	Arredondamento requerido	Pode ser quina viva
Espessura do revestimento	Até 12 µm	Até 4 um
Camadas	Multicamadas TiC - TiN, TiN - TiCN - TiN, TiC - Al ₂ C ₃	TiN, TiCN, TiAl
Principais aplicações	Torneamento e mandrilamento	Fresamento, roscamento e furação
Vantagens	<p>Maior resistência ao desgaste.</p> <p>Maior resistência à craterização.</p> <p>Grande vida da ferramenta</p>	<p>Substitui ferramentas sem revestimento: com mesma tenacidade, mesma configuração de aresta e mesma precisão.</p> <p>Reduz APC</p> <p>Maior vida na ferramenta</p>

Fonte: Machado et al. (2011, p. 221).

Cada tipo de material utilizado na camada tem sua característica própria, podendo ser empregado de acordo com o tipo de aplicação específica, por exemplo, a resistência a abrasão (TiC e TiCN), a estabilidade térmica e resistência a ataques químicos e oxidação (Al₂O₃), menor coeficiente de atrito (TiN).

A aplicação de multicamadas nos revestimentos com materiais diferentes tornou possível a associação ou melhora de algumas propriedades podendo oferecer todas as vantagens possíveis a uma única ferramenta durante o processo de corte. (MACHADO et al., 2011)

Segundo Neves, D., (2002) as camadas de TiAlN e AlTiN (nitreto de titânio-alumínio e nitreto de alumínio-titânio, respectivamente) são as melhores opções de revestimentos para ferramentas no corte a seco (sem fluidos de corte), pois garantem o isolamento térmico, conferindo um relevante aumento na vida útil tornando-a apta para altas velocidades de corte.

No corte interrompido, como o fresamento, a camada protetora de óxido de alumínio (Al₂O₃) formada na superfície pelo revestimento de TiAlN é de fundamenta

importância na resistência ao desgaste de entalhe da aresta de corte, sendo altamente vantajosa nas operações que combinam altas temperaturas e cargas mecânicas no material da ferramenta. (NEVES, D. 2002)

Tanto em ferramentas inteiriças ou em insertos, a aplicação de revestimentos representa cerca de 95 % de todo metal duro utilizado na indústria, com constante desenvolvimentos e inovações. (MACHADO et al., 2011)

5.3 Geometrias das arestas de corte

Nos processos de desbaste e semi-acabamento de moldes e matrizes é comum a utilização de fresas com insertos intercambiáveis, representado na Figura 11, devido à alta taxa de material removido e o custo envolvido na operação que é mais econômico visto que as ferramentas de metal duro inteiriças com diâmetros maiores que 15 mm inviabilizam sua utilização. (PIVETTA, 2005)

Costa, A. (2003) descreve que as ferramentas utilizadas na abertura de cavidades precisam atender a resistências exigidas pelos esforços de corte, a versatilidade para usinagem de superfícies complexas onde os insertos redondos, octogonais ou toroidais são amplamente utilizados, pois atendem bem as condições impostas pela usinagem, onde uma grande vantagem é o menor sobremetal deixado na superfície se comparado a ferramentas de topo reto.

Figura 11: Cabeçotes com insertos intercambiáveis.



Fonte: ISCAR, New Products Catalog, 2010, p. 167

Nas cavidades de moldes as concordâncias de raios e a geometria dos produtos limitam determinadas regiões onde somente ferramentas de diâmetros menores conseguem alcançar. A Figura 12 demonstra as ferramentas de metal duro inteiriço que são aplicadas em operações de acabamentos, onde 80 a 90 % são de topo esférico ou de topo reto, além de permitir erros menores de batimentos radiais e menores deflexões, resultando em uma rugosidade baixa priorizando a qualidade da superfície e o dimensional. (PIVETTA, 2005)

Figura 12: Ferramentas de metal duro inteiriço com coberturas.



Fonte: Adaptado MITSUBISHI, Catálogo Geral, 2011-2012, p. PR3

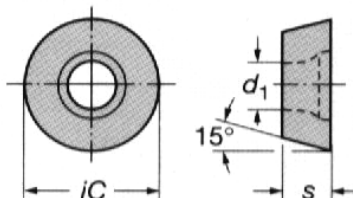
5.3.1 Macro-geometria dos insertos

Os ângulos da parte de corte da ferramenta são definidas pelo conjunto do porta-ferramenta com a macro-geometria do inserto. (COSTA, A., 2003)

Segundo Pivetta (2005) na usinagem de moldes e matrizes, onde na abertura de cavidades geram grandes esforços de corte sobre a aresta, esta deve possuir um ângulo de saída baixo ou mesmo negativo para que a cunha cortante seja mais robusta suportando as solicitações mecânicas durante o processo. Já o ângulo de folga deve ser grande o bastante para que a ferramenta possa realizar o movimento de entrada no sentido axial sem que haja interferência entre a superfície de folga e a face usinada, mas que também não comprometa a resistência da aresta de corte.

A Figura 13 ilustra a definição de macro-geometria dos insertos, segundo o catalogo do fabricante de acordo com as aplicações.

Figura 13: Macro geometria do inserto: iC – diâmetro do inserto; d_1 – diâmetro do furo de fixação; s – espessura do inserto.



Fonte: Sandvik (1999 apud COSTA, 2003, p. 37)

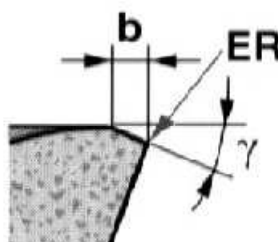
5.3.2 Micro-geometria da aresta

A micro geometria da aresta define se esta é arredondada, chanfrada ou uma combinação destas possibilidades além do ângulo do corte em situações específicas bem como a posição do quebra-cavaco e sua forma. (COSTA, A., 2003)

O tipo de arredondamento ou chanframento da aresta de corte pode aumentar os esforços de corte ou a temperatura durante o processo, mas é fundamental em operações de desbaste, pois aumenta a resistência da aresta podendo compensar tais desvantagens.

As especificações de forma e valor da geometria da aresta seguem especificações do fabricante, conforme Figura 14, que demonstra a micro-geometria da aresta.

Figura 14: Micro geometria da aresta de corte: b – largura do chanfro da aresta; γ – ângulo do chanfro da aresta; ER – raio de arredondamento da aresta.



Fonte: Sandvik (1999 apud COSTA, 2003, p. 38)

6 DESGASTE DAS FERRAMENTAS

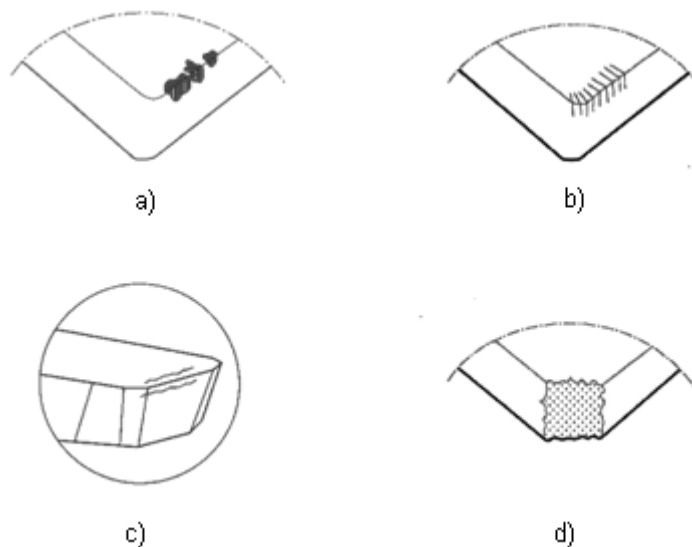
A vida útil da ferramenta dentro do processo de usinagem depende de muitos fatores dentre eles a combinação do material da peça e da ferramenta, dos parâmetros de corte envolvidos, da aplicação ou não de fluidos de corte ou refrigerante, a temperatura da aresta no momento do corte, entre outros. (NEVES, D., 2002)

Segundo Machado et al. (2011) compreender a causa dos desgastes das arestas na ferramenta é de fundamental importância para agir preventivamente ou corretivamente, diminuindo os custos na produção tanto das ferramentas quanto dos tempos de paradas de máquinas mantendo a produtividade.

Assim a troca de uma ferramenta, por final de vida, durante o processo de usinagem pode se enquadrar em duas causas principais:

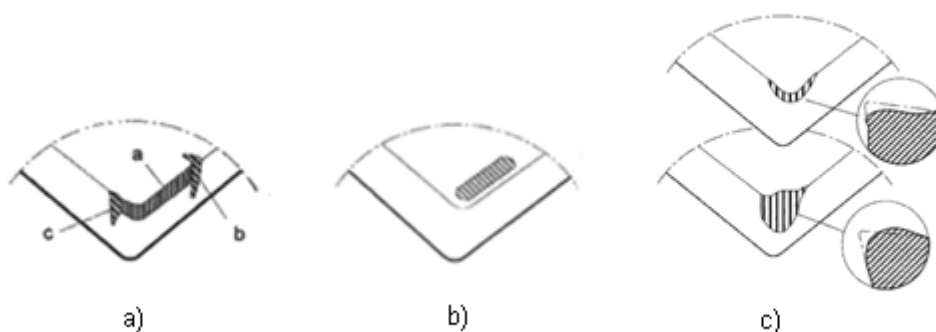
- avaria: representada por trincas, lascamentos, quebras, conforme Figura 15, que acontece devido aos choques térmicos e mecânicos, freqüentes no processo de fresamento onde o corte interrompido é comum em quase todas as operações. Do contrario, em cortes contínuos esses tipos de avarias são raros de serem observados, exceto por condições de corte acima da máxima determinada ou a ferramenta apresente uma geometria imprópria para o processo.
- desgaste ou deformação: desgaste de cratera, desgaste de flanco, desgaste de entalhe ilustrados na Figura 16, são os principais e mais comuns nos processos de usinagem, apresentados nas superfícies de saída e de folga das ferramentas, tanto em usinagens de corte contínuos ou interrompidos.

Figura 15: Tipos de avarias nas arestas de corte: a) Lascamento, b) Trinca de origem térmica, c) Trinca de origem mecânica e d) Quebra.



Fonte: Adaptado Diniz, Marcondes e Coppini, 2008, p. 108.

Figura 16: Tipos de desgastes nas superfícies das ferramentas de corte: a) Desgaste de flanco e de entalhe; b) Desgaste de cratera; c) Deformação plástica da aresta de corte.



Fonte: Adaptado Diniz, Marcondes e Coppini, 2008, p. 106.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2008) os tipos de desgastes e avarias podem ser diferenciados e descritos abaixo, seguindo o conceito do qual o desgastes é proveniente da perda gradativa e microscópica de material da ferramenta devido aos esforços de corte:

- desgaste frontal (ou de flanco): praticamente todo processo de usinagem gera desgaste frontal de ferramenta, é o mais comum, ocorre na superfície de folga da ferramenta. A velocidade de corte elevada incentiva esse tipo de desgaste que

deteriora o acabamento da peça interferindo também em seu dimensional. Representado pela indicação *a* na Figura 16.

- desgaste de cratera: gerado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco atinge principalmente a superfície de saída da peça. O crescimento desse tipo de desgaste acaba por promover a quebra da ferramenta. A utilização de ferramentas revestidas de óxido de alumínio (Al_2O_3) pode diminuir o desgaste por cratera.

- desgaste de entalhe: geralmente acarretada pela oxidação, e elevada velocidade de corte, ocorre tão frequentemente quanto o desgaste frontal, diferenciando-se apenas pelas superfícies de folga atingida da ferramenta, indicadas pelas letras *c* e *b* na Figura 16.

- deformação plástica da aresta de corte: tipo de avaria em que a elevada temperatura de corte, somada a pressão aplicada na ponta da ferramenta gera sua deformação, tomando forma bastante característica, prejudicando o acabamento, aumentando os esforços de corte e perdendo o controle dimensional.

- lascamento: é um tipo de avaria que ao contrário do desgaste, que remove aos poucos e continuamente porções do material da aresta de corte, retira partículas maiores de uma única vez. Arestas de corte pouco reforçadas e ferramentas de material frágil são as mais comuns de serem afetadas por esse tipo de efeito.

- trincas: são avarias provocadas pelas variações bruscas de temperatura na zona de corte e os elevados esforços de corte. O fresamento é um dos processos que a trinca aparece mais comumente nas ferramentas de corte, devido aos esforços mecânicos (corte interrompido), altas temperaturas, fluido de corte ineficiente, variação da espessura de corte, entre outros fatores.

Assim a quebra das arestas, representada pela letra *d* da Figura 15, esta relacionada com o tempo de corte onde os desgastes ou avarias citados podem ser tão grandes que provocam não somente a perda de toda a pastilha, mas também prejudica o porta-ferramentas ou a própria peça.

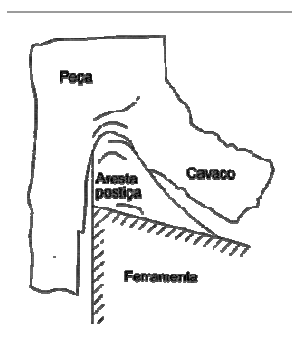
6.1 Mecanismos de desgastes

Os desgastes das ferramentas é uma combinação de processos físicos e químicos que durante o processo de usinagem removem gradativamente pequenas partes de material da aresta cortante. (NEVES, D., 2002)

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2008) dentre os principais mecanismos causadores de desgaste, podem se destacar:

- aresta postiça de corte: durante o processo de corte o cavaco adere a aresta de corte, soldando-se a ferramenta, prejudicando o acabamento e variando os esforços de corte, além de gerar desgaste frontal na ferramenta.

Figura 17: Formação de aresta postiça de corte (APC).



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 2008, p. 111

- abrasão mecânica: o atrito gerado entre a peça e as superfícies da ferramenta que formam a aresta de corte provoca o desgaste, o que também é incentivado pela temperatura de corte que reduz a sua vida útil e a presença de partículas com dureza maior no material da peça.

- aderência: o corte interrompido (fresamento), a profundidade de corte irregular ou falta de rigidez, influenciam o fluxo de cavaco irregular facilitando a sua aderência sobre a aresta de corte. Este processo está muito associado à aresta postiça de corte, embora também haja casos desse fenômeno sem a presença da aresta postiça, onde no contato entre as duas superfícies metálicas, estas são ligadas por um extrato que ao interromper o corte, uma porção de material de um

metal fica unido a superfície do outro. A utilização de fluidos de corte adequados podem diminuir esse efeito.

- difusão: refere-se a um fenômeno químico ativado pela temperatura elevada da zona de corte, ou seja, a transferência de átomos de um metal a outro. Para que esta reação aconteça, a temperatura, o tempo de contato e a afinidade físico-química entre os dois materiais devem existir. Esse mecanismo de desgaste pode ser diminuído com a utilização de ferramentas revestidas com óxido de alumínio, onde este melhora consideravelmente a estabilidade química da superfície de saída da ferramenta de corte.

- oxidação: esse mecanismo ocorre na maioria dos metais em reações químicas com presença de água e ar e em altas temperaturas. O desgaste atinge principalmente as extremidades de contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar na região.

7 CAD / CAM / CNC

Neste capítulo serão abordados os conceitos básicos dos softwares CAD e CAM utilizados no modelamento matemático e programação dos moldes e matrizes, bem como as máquinas CNC's, seu funcionamento e componentes.

7.1 Softwares CAD

No desenvolvimento de um novo produto, de um projeto ou mesmo de um modelo virtual que represente a forma geométrica desejada para a manufatura, os sistemas CAD (Computer Aided Design/Drafting) são empregados para o auxílio no desenho e modelamento na interface usuário/computador. (SOUZA; ULBRICH, 2009)

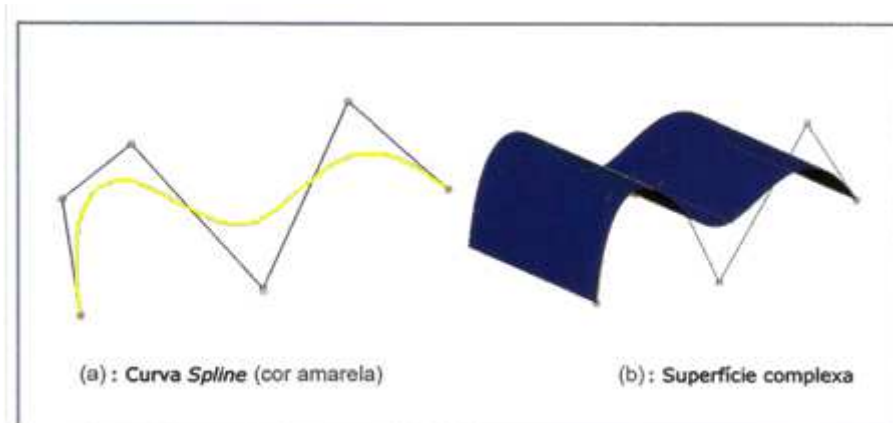
Segundo Souza (2004) a aplicação da tecnologia CAD é cada vez mais decisiva na indústria atual, cujo mercado competitivo exige um aprimoramento na qualidade, elevada velocidade de manufatura e inserção de novos produtos com significativa redução dos custos.

Seguindo o conceito esses softwares propiciam a confecção de produtos com superfícies geometricamente complexas em três dimensões com elevado grau de precisão, concordância e suavidade.

A complexibilidade de uma geometria geralmente está ligada a sua representação matemática, ou seja, a construção de modelos baseados em equações matemáticas para a representação nos sistemas computacionais. (SOUZA; ULBRICH, 2009)

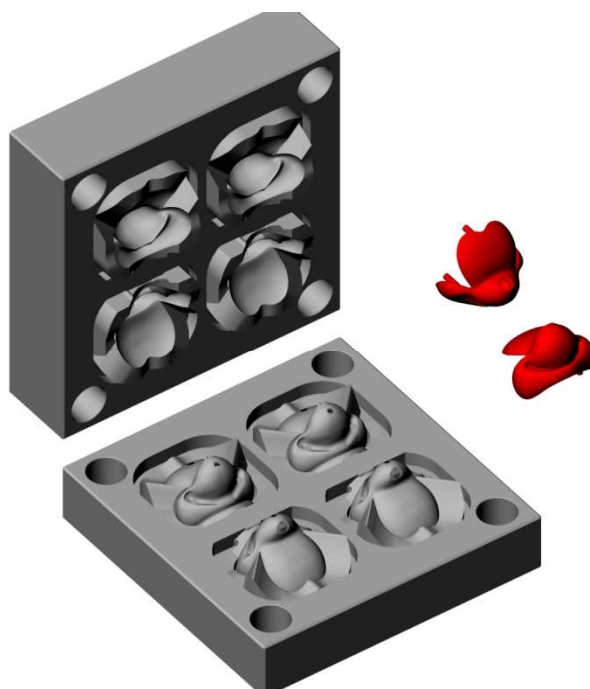
Conforme Souza e Ulbrich (2009) a *spline* representada na Figura 18, é um termo utilizado para denominar a metodologia computacional matemática empregada para a representação de curvas e superfícies complexas, criada pelos engenheiros franceses Pierre Bézier e Lagrange em 1970, é uma das ferramentas mais empregadas em sistemas CAD na manufatura de produtos e modelamento de cavidade de moldes e matrizes com geometrias complexas, representado na Figura 19.

Figura 18: Curva Spline.



Fonte: Souza e Ulbrich, 2009, p. 60.

Figura 19: Modelo matemático de cavidade e produto com geometrias complexas.



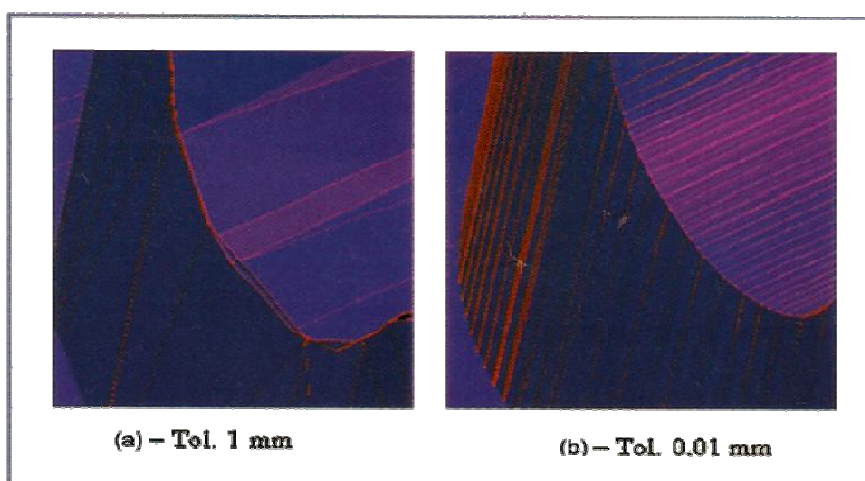
7.2 Softwares CAM

De acordo com Souza e Ulbrich (2009) o software CAM (Computer Aided Manufacturing) é empregado no processo de manufatura.

A utilização de sistemas CAM melhorou significativamente o processo de manufatura de moldes e matrizes. A interface CAD/CAM ocorre através do modelo matemático que após ser criado no sistema CAD são transferidos para o software CAM que transforma esses dados geométricos em malhas triangulares com uma tolerância de variação (Figura 20), geralmente definida pelo usuário, e que serão utilizadas para a criação dos programas NC (comandos numéricos). (SOUZA, 2004).

O cálculo da trajetória da ferramenta no processo de usinagem, a simulação e verificação além de gerar os programas para a máquina CNC são realizados pelos softwares CAM, cujos recursos disponíveis atualmente estão num patamar evolutivo alcançando o ápice, ganhando força nas indústrias.

Figura 20: Tolerância de malha triangular.

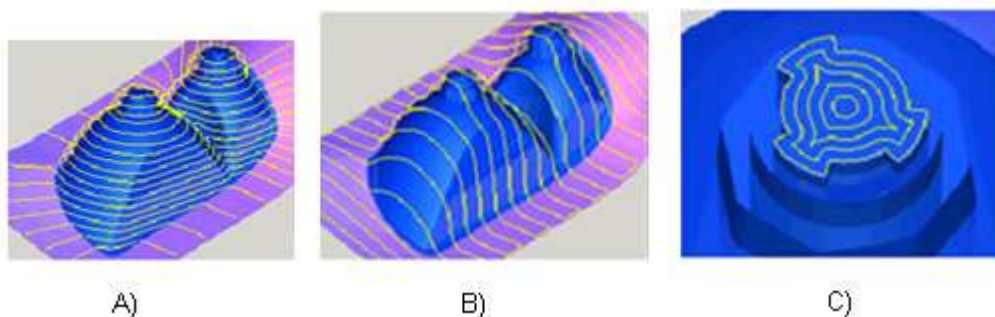


Fonte: Souza e Ulbrich, 2009, p. 262.

Segundo Souza (2004) várias estratégias de usinagem estão sendo desenvolvidas e aprimoradas nos softwares CAM, possibilitando uma gama variada de trajetórias para as ferramentas de corte de acordo com os diferentes tipos de aplicação.

Dentre as principais estratégias de corte para acabamento pode-se destacar três tipos mais empregados e contidos nos sistemas CAM: passes verticais paralelos, passes horizontais paralelos e passes em offset seguindo um perfil, conforme está representado na Figura 21.

Figura 21: Estratégias de fresamento em operações de acabamento: A) passes verticais paralelos; B) passes horizontais paralelos e C) passes em offset seguindo um perfil.



Fonte: Delcam, Software Powermill

Na estratégia de passes verticais paralelos a trajetória criada acompanha o perfil do modelo mantendo constante o passo vertical adotado. O raster, como é denominado a estratégia de passes horizontais paralelos, é semelhante a trajetória anterior alterando apenas o sentido de usinagem que passa a ser horizontal. Geralmente utilizado em acabamentos de planos, o software gera passes paralelos horizontais, obedecendo ao passo radial informado, que são projetados sobre a superfície que será acabada.

Já na estratégia de offset o contorno da geometria ou da fronteira é que determina o percurso que a ferramenta irá percorrer, mantendo passes constantes previamente determinados, mesmo em geometrias complexas.

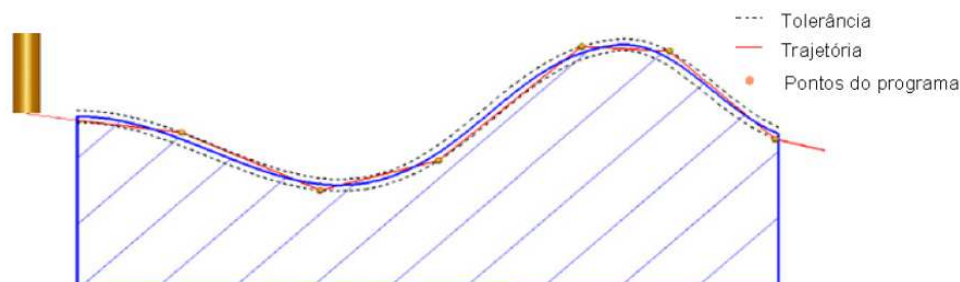
7.2.1 Tolerância de trajetórias em softwares CAM

Segundo Souza e Ulbrich (2009) a tolerância definida pelo usuário de um sistema CAM para o cálculo de uma estratégia de usinagem deve ser considerada como a principal função e de extrema importância, pois implica diretamente na operação de fabricação, na qualidade da trajetória e por consequência da superfície usinada, erros dimensionais e tempos de cálculo e processo.

No cálculo do percurso o software ajusta a ferramenta dentro de uma faixa de tolerância definida pelo usuário, denominada de *chord error*, funcionando como um limite de variação, ou seja, um desvio máximo permitido da trajetória para dentro e para fora da geometria. Quanto mais apertada a faixa de tolerância menos a

ferramenta desvia do percurso original e mais próximo do modelamento matemático se mantém.

Figura 22: Tolerância de cálculo nos programas NC.



Fonte: Souza, A.F e Coelho, R.T (2003, apud SOUZA, 2004, p. 42).

De acordo com Souza (2004) para descrever a trajetória da ferramenta em superfícies complexas e curvas o software realiza uma discretização em segmentos de retas, ou seja, o percurso é dividido em pequenos segmentos de retas que estão relacionados com a tolerância adotada pelo usuário do sistema CAM, tornando-se possível a usinagem da geometria por movimentos lineares (G01). Muitas vezes a associação com interpolações lineares e circulares (G02 e G03) são realizadas, porém na maioria dos comandos numéricos a interpolação circular ocorre apenas em um plano de trabalho, dificultando ou muitas vezes tornando impossível a usinagem de superfícies complexas utilizando-se mais que 2 eixos simultaneamente.

Outra forma de calcular o percurso da ferramenta se dá através da função polinomial tipo *Spline*, conforme citado anteriormente, utilizando-se de modelos matemáticos em CAD para a representação de curvas complexas, onde no programa NC gerado, não haverá mais comandos tradicionais de movimentos lineares e circulares (G01, G02 e G03) e sim uma síntese que representará a trajetória complexa.

Por Souza (2004) a definição de tolerâncias menores melhora-se a exatidão do contorno reproduzido, embora implique num aumento de tamanho dos programas NC (comandos numéricos) gerados, pois aumenta a quantidade de linhas que compõem o programa devido a diminuição dos segmentos de retas criados.

7.3 Máquinas CNC

O acionamento de uma ação ou movimento de equipamentos e máquinas por comandos numéricos utilizando-se basicamente como unidade quantitativa o sistemas de coordenadas cartesianas, define simplificadaamente, as máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) (SOUZA; ULBRICH, 2009).

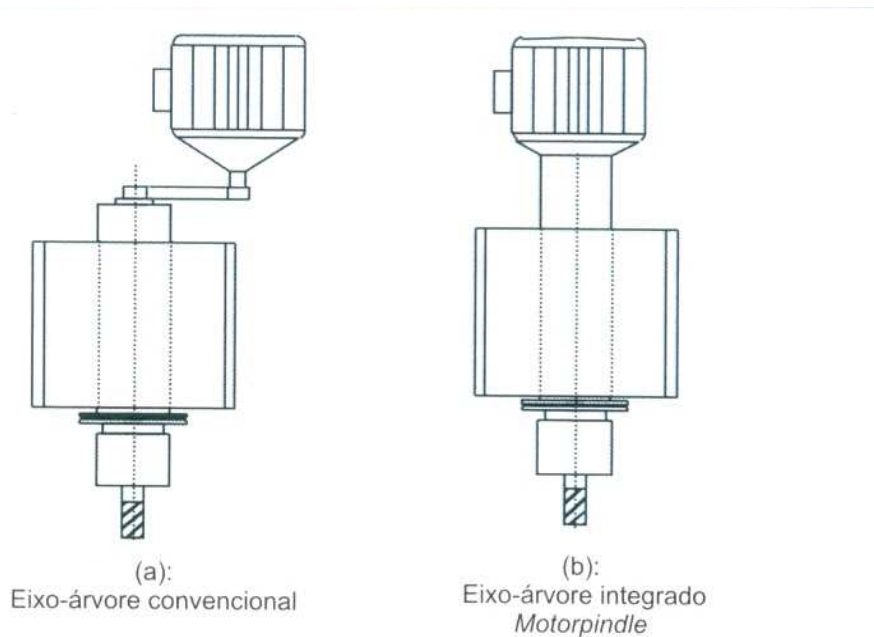
A capacidade de armazenamento, gerenciamento e de transdução dos comandos numéricos gerados manualmente ou com o auxílio de softwares CAM, permitiram a evolução não só das máquinas-ferramentas, mas também de equipamentos de medição, máquinas para montagem, soldagem, corte a laser ou a jato d'água, e outras gamas de aplicações desde simples movimentações lineares bem como em fresamento utilizando-se cinco eixos de movimentação simultânea.

Segundo Souza e Ulbrich (2009) definem como os principais componentes: a mesa de trabalho, o eixo-árvore, os motores de acionamento e controles característicos de uma máquina CNC. Além da estrutura rígida do sistema, precisão da movimentação, capacidade de amortecimento de vibrações, altas velocidades de trabalho, acelerações e desacelerações, área de trabalho e facilidade de acesso, são fatores que devem constar como diferenciais em máquinas-ferramentas para fresamento como os centros de usinagem atuais.

7.3.1 Acionamentos

Nos centros de usinagem e demais máquinas-ferramentas para fresamento o movimento de rotação da ferramenta de corte é realizado pelo eixo-árvore (*spindle*), acionado geralmente por correia dentada ligada a um servomotor, ou diretamente integrado a este (*motorpindle*), conforme Figura 23, de corrente contínua, permitindo assim as alterações das faixas de rotação sem a utilização de engrenagens ou redutores. A potência também gerada pelo eixo-árvore é inversamente proporcional à rotação, o que faz com que as máquinas com alta capacidade de rotação desenvolvam uma potência reduzida (SOUZA; ULBRICH, 2009).

Figura 23: Eixo árvore convencional (a) e integrado (b).

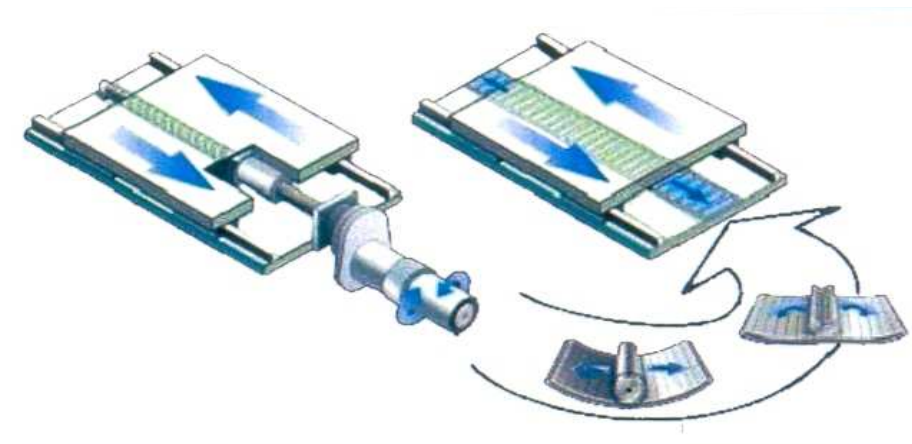


Fonte: Souza e Ulbrich, 2009, p.209.

Para a movimentação dos eixos a maioria das máquinas CNC utilizam-se de servomotores conectados a um fuso de esferas recirculantes, onde o movimento rotacional do eixo é transformado em movimento linear da parte móvel da máquina (mesa). A precisão encontrada no fuso de esferas pela área de contato das mesmas minimiza as folgas entre o fuso e a porca, mas segundo Souza (2004) também é considerada um fator limitante nos quesitos velocidade, rigidez sobre carga, distância de deslocamento e dinâmica, afetando a resposta do sistema.

Conforme Souza (2004) a aplicação de motores lineares, representado na Figura 24, evita a transformação dos movimentos (angular em linear) e se difere totalmente dos sistemas mais empregados, pois utiliza uma bobina na parte móvel e placa magnética fixa, obtendo-se assim maior velocidade de aceleração e desaceleração, exatidão e rigidez, curso ilimitado, operação silenciosa e menor quantidade de peças, porém a alta atração magnética pelo fato de ser uma estrutura aberta e o custo elevado são suas principais desvantagens.

Figura 24: Aplicação dos motores angulares e lineares.



Fonte: Souza e Ulbrich, 2009, p.216

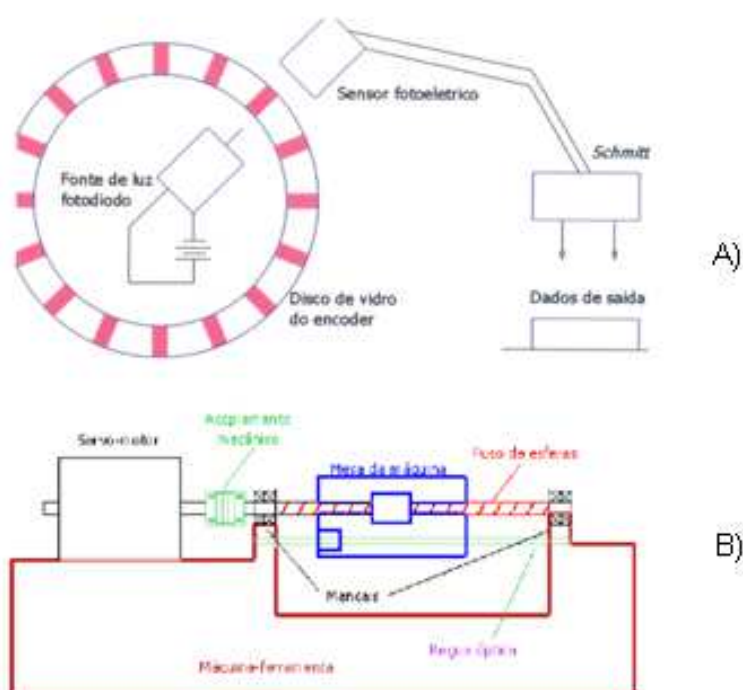
7.3.2 Transdutores

O controle e a resposta (*feedback*) de posicionamento e rotação a cada instante é de extrema importância em máquinas que exigem precisão em altas velocidades o que é garantido pelos transdutores, dispositivos capazes de transformar fenômenos físicos (SOUZA; ULBRICH, 2009).

No posicionamento os *encoders* angular e linear são os mais utilizados em máquinas CNC. O *encoder* angular consiste em uma fonte de luz, um sensor fotoelétrico em um disco de vidro com faixas pintadas em distâncias intercaladas medindo a posição do ângulo de rotação do fuso ligado ao servo motor da máquina, com isto definido a posição da mesa da máquina.

Já o *encoder* linear utilizado na maioria das máquinas ferramentas é constituído basicamente por uma régua óptica fixa na parte estática da máquina e um dispositivo de luz na parte móvel, podendo assim obter uma maior precisão de posicionamento e correção pelo CNC das impressões provenientes pelo fuso de esferas. (SOUZA, 2004)

Figura 25: Componentes de um encoder angular (a). Representação de montagem da régua óptica (b).



Fonte: Souza e Ulbrich, 2009, p. 218 e 219.

7.3.3 Parâmetros de Suavização em Máquinas CNC

Na usinagem de moldes e matrizes, compostos em sua maioria de superfícies complexas, a tolerância de usinagem geralmente é baixa para melhor precisão e qualidade final da superfície, fazendo com que as interpolações lineares e circulares entre as posições sejam muito pequenas e constantes, criando um grande número de linhas do comando NC pós-processado.

Deste modo o tempo de processamento de bloco (TPB), que corresponde ao tempo necessário à máquina CNC interpretar cada linha do programa NC e converte-la em acionamento dos eixos, é uma característica importante da máquina que esta a executar a usinagem, podendo acarretar em grandes variações de tempo do programa NC calculado pelo software CAM com o real usinado (SOUZA, 2004).

Além do TPB o tempo de resposta da malha de controle da máquina/CNC (feedback) também deve ser levado em consideração, pois pode influenciar o tempo

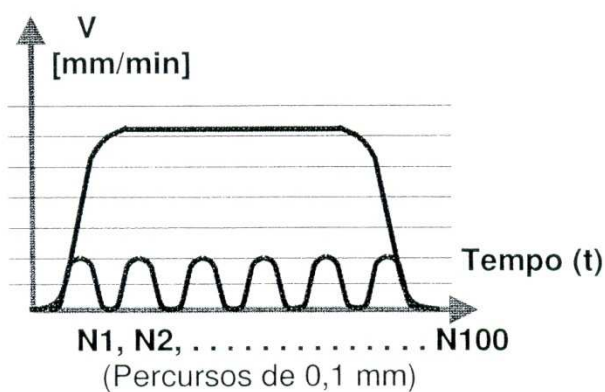
de avanço nas máquinas, devido ao grande volume de informações contidas nos programas pelas as interpolações geradas.

Assim seguindo o conceito da usinagem em *High Speed Machining* (HSM), onde somente se consegue alcançar altas velocidades de avanço em pequenos espaços, com acelerações e recursos adequados de software e hardware, nas máquinas modernas estão sendo implantados novos recursos para que se possa adquirir eficiência e maiores velocidades de avanço na usinagem de superfícies complexas, melhor controle de precisão dos eixos garantindo movimentos suaves.

Para isso um comando especial é adicionado geralmente no início dos programas NC, neste caso para o comando SIEMENS 810D, o “CYCLE 832”, que contém dentre suas principais funções especiais as seguintes bases de comandos:

- Aceleração e Desaceleração (Bell-Shape): normalmente em pequenos percursos, na ordem de 0,001 a 0,5 mm, não se consegue obter altas velocidades de avanço resultando em movimentos mais bruscos. Esse recurso é utilizado para deixar os movimentos mais suaves durante a aceleração/desaceleração da máquina conforme Figura 26:

Figura 26: Representação do comportamento da máquina com o recurso ativo.



Fonte: Manual de Programação e Operação – SIEMENS 810D, p. 196.

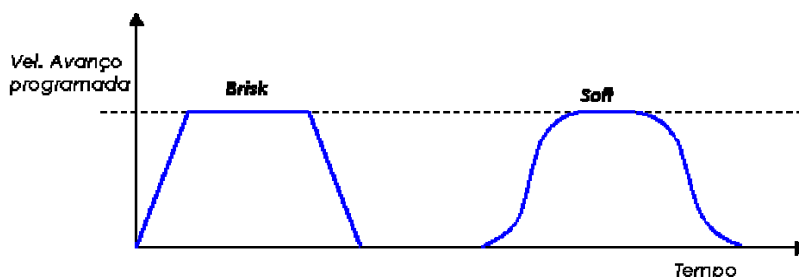
- Look ahead: recurso utilizado para o pré-processamento de blocos do programa NC, antes da sua execução, podendo analisar previamente o caminho da ferramenta, mapeando o contorno e gerando um novo caminho com os

posicionamentos corretos dos eixos para as acelerações e desacelerações com altas taxas de avanço.

- Feed Forward: quando se trabalha em alta velocidade este comando reduz as imprecisões causadas pelo deslocamento dos eixos e suas acelerações.

- Soft/Brisk: este comando define a forma de aceleração da máquina: suave ou brusca, conforme Figura 27. O modo Brisk devido ao fato de realizar movimentos mais bruscos, o tempo de usinagem real apresenta pouca diferença do programado pelo software CAM, mas pode comprometer os mecanismos de acionamento da máquina ferramenta.

Figura 27: Formas de aceleração da máquina CNC.

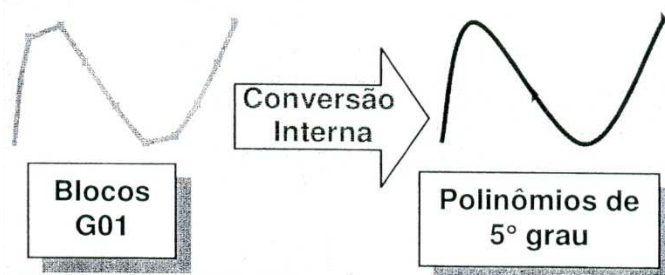


Fonte: Souza, 2004, p. 28.

- Transição de blocos em cantos retos: com a leitura de blocos adiantes (look ahead) torna-se possível a transformação de interpolações lineares em movimentos arredondados, principalmente nos cantos e áreas de paradas bruscas e desacelerações instantâneas. Com uma tolerância previamente programada a máquina ajusta em tempo real as linhas com pequenos raios ou chanfros de conexão suavizando os movimentos.

- Conversão Interna em polinômios spline: Este comando une varias linhas programadas com interpolações lineares (G01) em uma função de polinômio de 5º grau, Spline, como citado anteriormente. O valor da tolerância programado é utilizado para ajustar a função de acordo com as linhas programadas, evitando a programação desse tipo de função pelos Softwares CAM, mas pode aumentar o tempo de processamento de bloco (TPB).

Figura 28: Conversão interna de interpolações para polinômios de 5º grau (Spline).



Fonte: Manual de Programação e Operação – SIEMENS 810D, p. 199

Assim aplicando diferentes estratégias pode-se ajustar a execução do programa CAM com o auxílio do “CYCLE 832”, para a usinagem de superfícies complexas em altas velocidades de avanço, com a precisão e qualidade de superfícies desejada.

No Apêndice B estão contidos os tipos de programação do CYCLE 832, para estratégias de Desbaste, Semi-Acabamento e Acabamento, utilizados no experimento realizado.

8 ESTUDO DE CASO

O objetivo desse estudo é mostrar a diferença das três principais estratégias de usinagem para o acabamento de moldes e matrizes com ferramentas de metal duro, aplicando os parâmetros utilizados pela empresa na usinagem de aço liga especial para cavidades. O controle dimensional e o acabamento superficial foram priorizados, pois se tratando de moldes termoplásticos, onde a fluidez do material injetado é geralmente alta, exige-se um bom acabamento e uma boa precisão dimensional. O primeiro para facilitar o escoamento do polímero e a fácil extração da peça de dentro da cavidade, já o segundo para evitar o vazamento de material ou rebarbas indesejáveis no produto final, fazendo com que as tolerâncias de encaixes, posicionamentos e fechamentos sejam baixas.

O estudo não só comparou o tempo programado e o tempo real usinado, devido as acelerações/desacelerações da máquina, entradas, saídas e ligações geradas pelo software CAM em cada estratégia, como também foram observados o consumo médio de energia em cada processo, pela potência consumida em determinado tempo e o desgaste da ferramenta envolvidos nos processos.

O ensaio de usinagem para a realização do estudo de caso foi realizado na empresa Mecânica Ranaq Ltda., situada em Laranjal Paulista, interior de São Paulo. A empresa atua principalmente nos ramos de manufatura e manutenção de moldes termoplásticos e de sopro, presta serviços de usinagem, manutenção e reparo de equipamentos em geral.

A “Ranaq” começou as suas atividades no comércio local em 1º de novembro de 1986 e atualmente conta com 22 funcionários, instalada em uma área de 9000m² total, sendo 1300 m² de parque de máquinas.

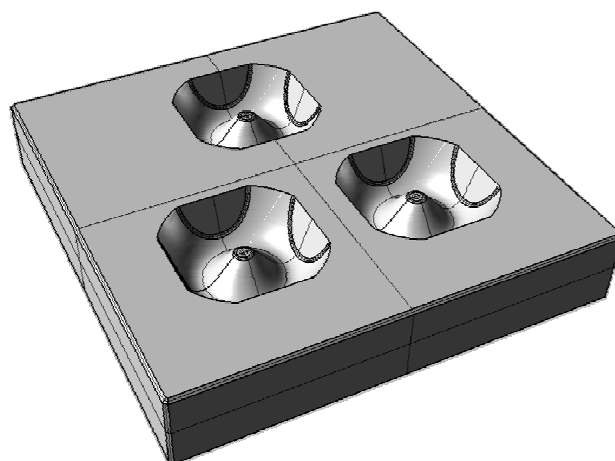
Para a obtenção dos resultados pretendidos, as etapas iniciais de preparação do material e fixação da ferramenta também foram controladas, pois podem influenciar no processo e serão melhor explicitas nos tópicos a seguir.

8.1 Metodologia

Um produto criado especialmente para o ensaio de usinagem desse estudo, foi distribuído em uma placa de Aço P20, com as suas propriedades descritas no capítulo 3 por Chiaverini (1990) e conforme Anexo A. Utilizou-se então as três principais estratégias de fresamento, para acabamento, mais empregadas nas indústrias de moldes e matrizes, ainda enraizadas no sistema convencional, onde a maioria das máquinas-ferramentas são dotadas de apenas três eixos, o que dificulta a aplicação de muitas estratégias existentes nos softwares CAM.

A máquina utilizada para a confecção do corpo de prova foi um centro de usinagem ROMI D1000, com guias lineares e fuso de esferas recirculantes, composto de um eixo-árvore (spindle) com a rotação na faixa de 0 a 10.000 rpm. Operado a partir do comando Siemens 810D, com um módulo de suavização denominado “Moldes e Matrizes”, conforme comentado no capítulo 7.

Figura 29: Modelamento do corpo de prova.



O corpo de prova tem dimensão de 200 x 200 x 35 mm, ilustrado na Figura 29, contendo três cavidades do produto criado, onde foram fresados com ferramentas específicas para cada operação: desbaste, redesbaste, semi-acabamento e acabamento, todas seguindo os parâmetros de corte segundo dados nos Quadros 8; 9; 10 e 11.

8.1.1 Procedimentos

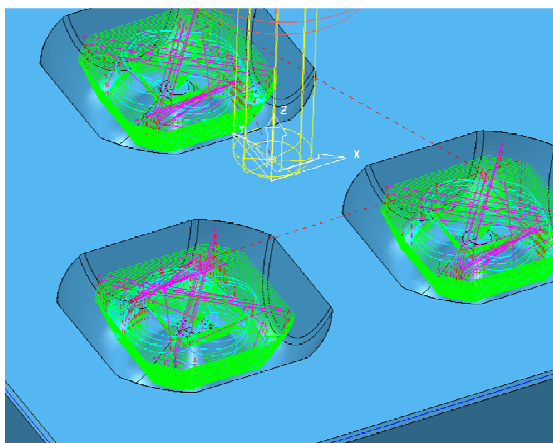
No processo de desbaste foi utilizada a estratégia de “*offset de modelo*”, empregando uma ferramenta toroidal com pastilhas intercambiáveis, fixada em cone BT40 tipo *weldon*, de acordo com Anexo C. Nessa estratégia os principais dados de entrada para a geração do percurso pelo software CAM são basicamente: a tolerância adotada, os sobremetais (radial e axial), o valor do passo vertical (ap), e para o passo lateral (ae) a utilização de 60% do diâmetro da ferramenta adotada. Os tipos de entradas, saídas e ligações podem ser corrigidos após o processamento da estratégia, mas para este percurso foi adotada a entrada em rampa por hélice, com um ângulo de inclinação de 2°, para que não ocorra o problema de colisão com o centro do suporte ou corte com o lado interno do inserto, conforme demonstrado na Figura 6 do capítulo 2.

Quadro 8: Parâmetros de corte para a operação de desbaste.

ESTRATÉGIA DE USINAGEM	FERRAMENTA	CÓDIGO / CLASSE FERRAMENTAS	DADOS DE CORTE	Nº DENTES (z)	VC (m/min)	VELOCIDADE PROGRAMADA
Desbaste (Offset do Modelo)	Toroidal Ø20_r2,5	AJX08R202SA20S JOMT080320ZZSR-JM Classe: VP15TF	ap = 0,4 mm	2	130 m/min	N = 2069 rpm
			ae = 12 mm			F = 3310 m/min
			fz = 0,8 mm/z			

A Figura 30 demonstra o tipo de estratégia abordado e os percursos gerados pelo CAM, os dados de corte introduzidos foram descritos no Quadro 8.

Figura 30: Estratégia de Desbaste por Offset.



Para os processos de redesbaste, semi-acabamento e acabamento foram empregados ferramentas de metal duro inteiriço com cobertura, seguindo as características expostas no capítulo 5 por Pivetta (2005) e conforme Anexo D. Todas as ferramentas foram fixadas em cones ISO BT40 com pinças ER40 e passaram por verificação de batimento radial, através de um relógio apalpador, conforme representado pela Figura 31:

Figura 31: Medição de batimento radial, ferramentas de metal duro inteiriço.



O redesbaste segue a mesma estratégia do desbaste, onde o software reconhece as áreas usinadas pela primeira ferramenta limitando-se apenas nas regiões onde esta não foi capaz de remover todo o material, deixando um excesso maior que o sobremetal especificado para o semiacabamento.

Utilizando-se de uma ferramenta inteiriça toroidal realizou-se o redesbaste com entrada em rampa e em hélice, passo lateral de 4,8 mm e vertical de 0,2 mm e mantendo o mesmo sobremetal do primeiro desbaste.

Quadro 9: Parâmetros de corte para a operação de redesbaste.

ESTRATÉGIA DE USINAGEM	FERRAMENTA	CÓDIGO / CLASSE FERRAMENTAS	DADOS DE CORTE	Nº DENTES (z)	VC (m/min)	VELOCIDADE PROGRAMADA
Redesbaste (Offset do Modelo)	Toroidal Ø8_r1	CMR 0810 Cobertura TiAlN	ap = 0,2 mm ae = 4,8 mm fz = 0,09 mm/z	4	180 m/min	N = 7161 rpm F = 2577 m/min

Para o semiacabamento realizado igualmente para as três cavidades onde o objetivo é diminuir o sobremetal e degraus gerados no desbaste deixando o modelo

usinado mais próximo do modelo matemático criado no CAD. A estratégia “3D offset” (Figura 35) foi empregada nessa etapa, uma das três que serão observadas no acabamento. Basicamente essa estratégia consiste na usinagem do corpo de prova de fora para dentro, copiando o primeiro perfil do modelo que será usinado ou fronteira utilizada para limite de percurso, gerando realmente um offset do modelo 3D através do passo lateral de corte especificado. O termino do percurso calculado no CAM geralmente fica no centro da figura ou fronteira determinada para a usinagem.

Quadro 10: Parâmetros de corte para a operação de semiacabamento.

ESTRATÉGIA DE USINAGEM	FERRAMENTA	CÓDIGO / CLASSE FERRAMENTAS	DADOS DE CORTE	Nº DENTES (z)	VC (m/min)	VELOCIDADE PROGRAMADA
Semiabamento (3D_Offset)	Esférica Ø8	CLB 0802 Cobertura TiAlN	ap = 0,2 mm ae = 0,25 mm fz = 0,12 mm/z	2	145 m/min	N = 5769 rpm F = 1384 m/min

Com uma ferramenta de metal duro inteiriço de ponta esférica, o passo lateral utilizado nesse percurso para as três cavidades foi de 0,25 mm deixando um sobremetal de 0,2 mm por parede para o acabamento.

Finalizando as operações de usinagem a fase de acabamento foi realizada com passo lateral de 0,08 mm e eliminando qualquer sobremetal deixado nas operações anteriores.

Quadro 11: Parâmetros de corte para as operações de acabamento.

ESTRATÉGIA DE USINAGEM	FERRAMENTA	CÓDIGO / CLASSE FERRAMENTAS	DADOS DE CORTE	Nº DENTES (z)	VC (m/min)	VELOCIDADE PROGRAMADA
Acabamento_C1 (Raster)	Esférica Ø6	CMB 0602 Cobertura TiAlN	ap = 0,1 mm	2	180 m/min	N = 9549 rpm F = 1527 m/min
Acabamento_C2 (Zconst_Otimizado)			ae = 0,1 mm			
Acabamento_C3 (3D_Offset)			fz = 0,08 mm/z			

As cavidades foram numeradas para a realização do ensaio e obtenção dos dados envolvidos, conforme Figura 32.

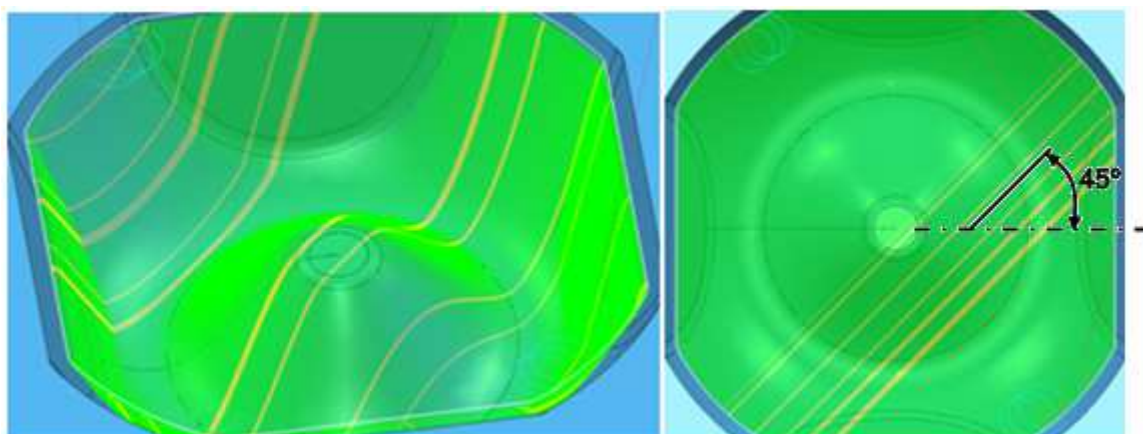
Figura 32: Foto da placa com a representação de cada cavidade (C1 C2 e C3).



8.1.2 Delineamento do estudo

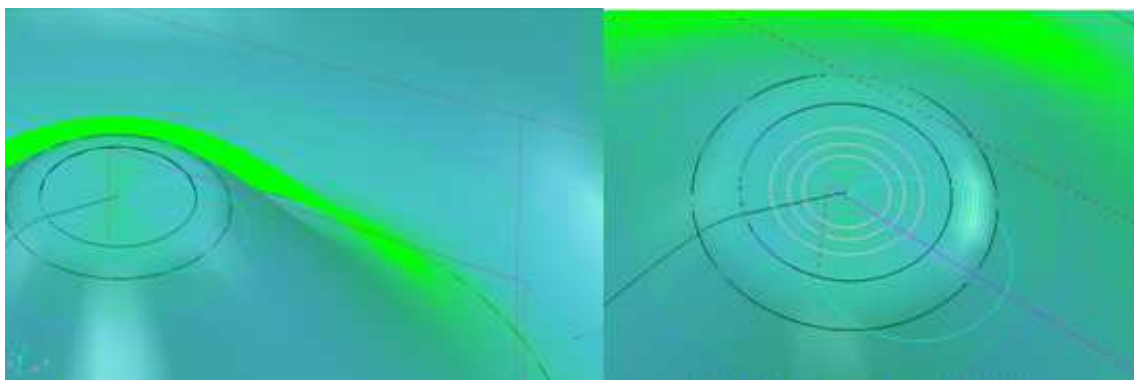
Na 1ª cavidade a estratégia utilizada foi o “raster”, pela qual o processo de usinagem segue percursos paralelos de deslocamentos determinados pelo passo lateral de corte adotado. Com uma inclinação de 45° para o deslocamento, a usinagem ocorre sempre na mesma direção, mas em sentidos opostos a cada incremento do passo lateral, acompanhando as variações do eixo Z. A Figura 33 demonstra o percurso gerado e o ângulo de inclinação adotado.

Figura 33: Representação do Raster e o ângulo de direção de corte.



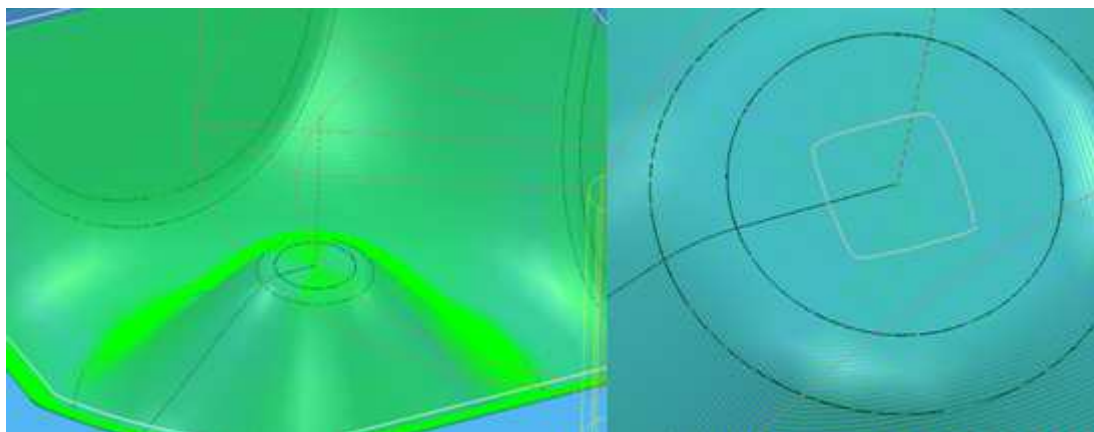
A estratégia aplicada na cavidade 2 foi o “Z constante otimizado”, Figura 34, que consiste em usinagens por níveis de profundidade de corte, assim como o passo lateral utilizado nas estratégias acima. O percurso gera o caminho para o acabamento da superfície em determinada altura e em seguida desloca-se novamente no eixo z (ap) realizando o acabamento do próximo nível. Nessa estratégia pode-se optar pela usinagem de forma espiral, na qual o percurso une as camadas geradas no sentido vertical, seguindo a profundidade de corte, diminuindo as entradas, saídas e ligações do meio do programa, os quais podem gerar marcas e vibrações indesejáveis.

Figura 34: Representação do Zconstante_Otimizado e linha de percurso gerada.



Na última cavidade (3) foi empregado o acabamento por “3D offset”, conforme descrito anteriormente no processo de semiacabamento e demonstrado na Figura 35, apenas alterando os parâmetros para os determinados, no acabamento.

Figura 35: Representação do 3D offset e linha de percurso gerada.



Os tempos de todas as operações de usinagem foram anotados, com o objetivo de comparar o tempo teórico determinado pelo software CAM e o experimental realizado. Paralelamente um multímetro foi instalado na entrada da energia no painel traseiro da máquina, conforme ilustrado pela Figura 36, com o auxílio de um sistema de gravação pode-se anotar a variação da corrente exigida pela máquina conforme o esforço realizado e estimar o consumo de energia envolvido no processo.

Figura 36: Medição de corrente com o multímetro no painel traseiro.



Embora a medição realizada tenha sido apenas na fase de maior variação do sistema trifásico, sendo o único sistema disponível e válido para determinar as diferenças entre os processos. O ideal seria a medição das três fases simultaneamente ou com um dispositivo mais aperfeiçoado ou específico como é o caso do sistema de medição por um osciloscópio digital, que tem várias entradas independentes e gera um gráfico instantâneo do que está sendo analisado, conforme demonstrado na Figura 37.

Figura 37: Osciloscópio Digital Portátil, com 2 ou 4 entradas.



Fonte: Produtos Fluke, disponível no site da empresa.

Após a usinagem de todas as cavidades a verificação dimensional foi realizada, podendo determinar para cada estratégia, se a variação observada está dentro da tolerância adotada e manteve-se a as dimensões exigidas.

As medições dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz foram realizadas nas superfícies planas inclinadas, conforme desenho RNQ/PE/01 incluso no Apêndice A, observando as texturas superficiais criadas em cada estratégia, devido aos tipos de movimentos e o mecanismo de corte variado, ou seja, movimentos ascendentes, descendentes e deslocamentos lineares diferentes em cada estratégia.

As ferramentas utilizadas em cada estratégia foram analisadas indicando se houve um possível desgaste nas arestas de corte.

As superfícies côncavas e convexas foram analisadas visualmente de forma empírica, assim como se dá na maioria das indústrias de moldes e matrizes, pois não há meios de se medir com o rugosímetro nessas regiões internas e curvilíneas.

8.2 Análise dos resultados

8.2.1 Tempo de usinagem

Aplicando os parâmetros de corte descritos nos quadros acima para cada estratégia, pode-se notar uma variação do tempo real usinado com o estimado pelo software CAM, utilizado para a geração do programa NC do corpo de prova. Os dados estão apresentados no Quadro 12 e observa-se que os tempos envolvidos nos programas de desbaste e redesbaste apresentaram uma diferença muito maior comparados aos programas de semiacabamento e acabamentos, onde a ferramenta mantém o contato entre a aresta de corte e a superfície a ser usinada por muito mais tempo, ou seja, sem cortes interrompidos, com poucas entradas, saídas e ligações de um ponto a outro.

A alta diferença, acima do estimado, encontrada nos programas de desbaste (31,88%) e redesbaste (59%) é resultado das acelerações e desacelerações realizadas pela máquina, com o ciclo de suavização (CYCLE 832), juntamente com a velocidade de leitura e interpretação dos comandos contidos nos programas NCs.

O número de subidas encontradas no programa, demonstra a quantidade de entradas e saídas geradas, o que pode-se considerar proporcional ao aumento do tempo, podendo ser ainda maior quando se tem entradas em rampas lineares ou circulares com movimentos de avanço programado. As altas velocidades de corte e consequentes avanços, utilizados na programação no modo “high speed”, com profundidades de corte baixas e altas taxas de remoção de material por aresta cortante não se mantiveram constantes, sofrendo variações em movimento lineares e circulares gerados pelo software. A velocidade de avanço só atingiu a sua máxima programada em movimentos lineares, cuja distância percorrida, permitiu que o tempo de aceleração e desaceleração fosse completo, em geral, a velocidade de avanço variou na faixa de 50% a 60% do valor nominal programado.

Quadro 12: Dados obtidos pelo processo em cada estratégia.

ESTRATÉGIA DE USINAGEM	FERRAMENTA	FORNECEDOR / CÓDIGO FERRAMENTAS	CAVIDADE USINADA	TEMPO PROGR. (h:min:s)	TEMPO REAL (h:min:s)	DIF. (%)
Desbaste (Offset do Modelo)	Toroidal Ø20_r2,5	Mitsubishi: Cabeçote AJAX08R202SA20S; Inserto JOMT080320ZZSR-JM	C1/C2/C3	0:09:12	0:12:08	31,88%
Redesbaste (Offset do Modelo)	Toroidal Ø8_r1	Alltech Tools: Metal Duro Inteiriço CMR 0810 Cobertura TiAIN	C1/C2/C3	0:24:16	0:38:35	59,00%
Semiacabamento (3D_Offset)	Esférica Ø8	Alltech Tools: Metal Duro Inteiriço CLB 0802 Cobertura TiAIN	C1/C2/C3	0:42:04	0:45:51	8,99%
Acabamento_C1 (Raster)	Esférica Ø6	Alltech Tools: Metal Duro Inteiriço CMB 0602 Cobertura TiAIN	C1/C2/C3	0:29:10	0:33:06	13,49%
Acabamento_C2 (Zconstante_Otimizado)	Esférica Ø6	Alltech Tools: Metal Duro Inteiriço CMB 0602 Cobertura TiAIN	C1/C2/C3	0:31:00	0:34:35	11,56%
Acabamento_C3 (3D_Offset)	Esférica Ø6	Alltech Tools: Metal Duro Inteiriço CMB 0602 Cobertura TiAIN	C1/C2/C3	0:34:48	0:38:51	11,64%

Observando o tempo do quadro acima a operação de semiacabamento foi realizada de forma que reduzisse rapidamente o material excessivo deixado pelos desbastes do corpo de prova, aproximando a geometria da superfície usinada ao modelo matemático, diminuindo os riscos e degraus deixados nas primeiras operações. Assim como Ventura (2010) e Souza (2004) definem no capítulo 2,

dentre as principais ferramentas utilizadas no fresamento de cavidades, as toroidais e de ponta esférica são as que geram menor volume de material remanescente.

Conforme descrito anteriormente a mesma estratégia (3D offset) foi empregada para as três cavidades, com uma ferramenta de metal duro inteiriço e cobertura de TiAlN, apresentando uma variação de 9% maior que o tempo programado.

Os programas de acabamento realizados nas cavidades apresentaram uma diferença na faixa de 11% a 14% maiores, ficando próximos aos tempos reais programados, conforme as informações contidas no Quadro 12. Os valores específicos para cada estratégia foram de 13,49%; 11,56% e 11,64% para as estratégias Raster, Zconstante otimizado e 3D offset, respectivamente.

Todas as estratégias de acabamento foram programadas com os mesmos parâmetros de corte, conforme especificados no Quadro 11, e com a tolerância programada na faixa de 0,01 mm de variação. Nas estratégias escolhidas para o acabamento o número de subidas durante o percurso foi baixo (7 subidas no Raster ,2 no Zconstante_otimizado e 0 no 3D offset) mantendo o corte contínuo e suavizado por mais tempo, sem ligações e entradas no meio da operação.

Dentre as operações a estratégia que apresentou o melhor desempenho foi o Zconstante_otimizado, devido a geometria do produto se adequar ao tipo de percurso espiral criado e com poucas ligações, onde o caminho gerado pelo software é o mais curto possível.

O 3D offset empregado na cavidade C3, foi o segundo melhor em diferença de tempo (11,64%), mesmo sendo o único percurso que manteve o contato da ferramenta com a superfície a ser usinada durante todo o tempo, o caminho gerado pelo software foi o maior, pois a estratégia acompanha o perfil do modelo ou da fronteira gerada para o limite do acabamento, assim pela Figura 35 pode-se ver que o termino da estratégia, no centro do produto, acompanha o perfil do modelo, mesmo este apresentando uma circunferência perfeita.

Por fim o Raster apresentou a maior diferença de tempo (13,49%), mas não pode ser considerado o pior, pelo contrário, é um dos mais empregados e difundidos na produção de moldes em larga escala. Mas a o que diferenciou as três estratégias e principalmente o Raster, foi a geometria do produto em forma de cavidade circular. O Raster atinge velocidade máxima em percursos lineares, empregados em superfícies planas ou com pouca inclinação, em superfícies com curvas envolventes

e raios de cantos, onde aumenta a variação do eixo Z e a quantidade de linhas geradas pelo software CAM, para manter o percurso da ferramenta na faixa de tolerância especificada, é maior, conseqüentemente exigindo maior velocidade de leitura e interpretação pelo módulo de suavização e dos *encoders* da máquina.

8.2.2 Dimensional e Rugosidade

O zeramento de referência do corpo de prova foi realizado no centro do material bruto, onde o mesmo serviu de base para a medição dimensional e de rugosidade da peça de acordo com desenho RNQ/PE/01 contido no Apêndice A.

O corpo de prova foi enviado a um laboratório de calibração acreditado pela Cgcre/Inmetro que gerou o relatório de medição dimensional N°29389-102 e o relatório de medição da rugosidade N°29392-102 com rastreabilidade CAL – 0157, apresentados no Anexo E e Anexo F, respectivamente.

Os valores médios obtidos para cada cavidade foram descritos nos Quadros 13, 14 e 15, onde foi possível fazer a verificação de variação em cada tipo de estratégia. A tolerância máxima permitida foi estabelecida na faixa de $\pm 0,02$ mm, pois acima disso a possibilidade de apresentação de rebarbas e desencontros nos produtos é alta.

Quadro 13: Valores médios obtidos para a cavidade C1 – Raster.

Valor Nominal da Cota	Nº Referência	Valor Médio Obtido	Fator de Abrangência k	Incerteza U	Referência da Cota
Ø 70,00 mm	24	Ø 69,996 mm	2,01	0,003	Diâmetro
10,00 mm	17	10,009 mm	2,01	0,003	Eixo X (-)
72,00 mm	19	71,994 mm	2,01	0,003	Eixo X (-)
5,00 mm	22	4,995 mm	2,01	0,003	Eixo Y (-)
67,00 mm	20	66,992 mm	2,01	0,003	Eixo Y (-)
41,00 mm	18	40,995 mm	2,01	0,003	Centro X (-)
36,00 mm	21	35,983 mm	2,01	0,003	Centro Y (-)
6,50 mm	23	6,489 mm	2,01	0,003	Profundidade

Fonte: adaptado de Relatório de medição N°29389-102, Aferitec Metrologia.

Quadro 14: Valores médios obtidos para a cavidade C2 – Zconstante_otimizado.

Valor Nominal da Cota	Nº Referência	Valor Médio Obtido	Fator de Abrangência k	Incerteza U	Referência da Cota
Ø 70,00 mm	16	Ø 69,982 mm	2,01	0,003	Diâmetro
10,00 mm	14	10,010 mm	2,01	0,003	Eixo X (+)
72,00 mm	12	71,986 mm	2,01	0,003	Eixo X (+)
5,00 mm	9	5,003 mm	2,01	0,003	Eixo Y (-)
67,00 mm	11	66,980mm	2,01	0,003	Eixo Y (-)
41,00 mm	13	41,015 mm	2,01	0,003	Centro X (+)
36,00 mm	10	35,995 mm	2,01	0,003	Centro Y (-)
6,50 mm	15	6,486 mm	2,01	0,003	Profundidade

Fonte: adaptado de Relatório de medição N°29389-102, Aferitec Metrologia.

Quadro 15: Valores médios obtidos para a cavidade C3 – 3D Offset.

Valor Nominal da Cota	Nº Referência	Valor Médio Obtido	Fator de Abrangência k	Incerteza U	Referência da Cota
Ø 70,00 mm	8	Ø 69,985 mm	2,01	0,003	Diâmetro
31,00 mm	1	30,982 mm	2,01	0,003	Eixo X (-)
31,00 mm	3	30,986 mm	2,01	0,003	Eixo X (+)
81,90 mm	4	81,891 mm	2,01	0,003	Eixo Y (+)
19,90 mm	6	19,903mm	2,01	0,003	Eixo Y (+)
0,00 mm	2	0,00 mm	2,01	0,003	Centro X (0)
50,90 mm	5	50,887 mm	2,01	0,003	Centro Y (+)
6,50 mm	7	6,490 mm	2,01	0,003	Profundidade

Fonte: adaptado de Relatório de medição N°29389-102, Aferitec Metrologia.

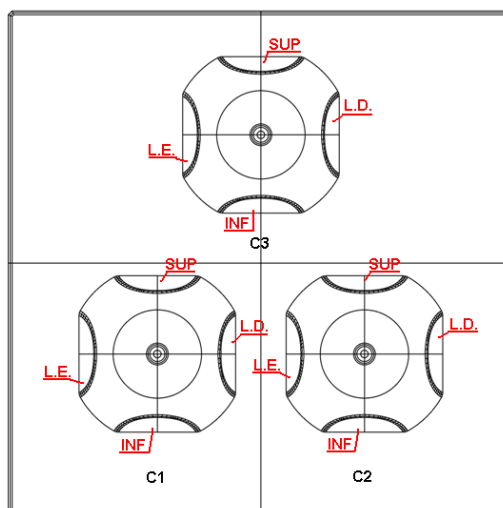
Conforme a tolerância máxima especificada para todas as estratégias a variação dimensional ficou dentro da faixa desejada, onde o erro pode ser proveniente do sistema de fixação da ferramenta, batimento radial, vibrações e erro de posicionamento devido às suavizações e tolerância adotada na programação do software CAM.

Segundo Souza (2004) a parcela do erro dimensional na peça pela usinagem em máquinas CNC refere-se a sua rigidez, ao acionamento dos eixos, à malha de controle dos posicionamentos, e ao tipo de algoritmo utilizado na interpolação dos percursos gerados.

A medição das rugosidades foi realizada em todas as superfícies inclinadas conforme desenho RNQ/PE/01 no sentido transversal à direção de corte realizada na usinagem, somente na estratégia Raster a medição foi realizada com uma

inclinação de 45°, devido ao ângulo de direção da usinagem. A Figura 38 representa a denominação de cada face para a anotação dos valores obtidos.

Figura 38: Representação de referência para medição de rugosidade.



Com um Cut-off padrão de 0,8 mm para todas as medições, os parâmetros Ra (média aritmética) e Rz (média dos valores absolutos de maior afastamento) foram obtidos conforme relatório N°29392-102, no Anexo F, e separados nos quadros abaixo de acordo com cada estratégia.

Quadro 16: Média de rugosidade para cavidade C1 – Raster.

SUPERFÍCIE	RUGOSIDADE Ra			RUGOSIDADE Rz		
	Valor Médio Obtido (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza U	Valor Médio Obtido (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza U
Lateral Esquerda	0,610	2,43	0,04	3,833	2,05	0,293
Inferior	0,642	3,31	0,077	3,727	2,04	0,292
Lateral Direita	0,634	2,18	0,031	3,987	2,01	0,27
Superior	0,606	2,02	0,025	3,887	2,15	0,339

Fonte: adaptado de Relatório N°29392-102, Aferitec Metrologia

Quadro 17: Média de rugosidade para cavidade C2 – Zconstante_Otimizado.

SUPERFÍCIE	RUGOSIDADE Ra			RUGOSIDADE Rz		
	Valor Médio Obtido (μm)	Fator de Abrangência k	Incerteza U	Valor Médio Obtido (μm)	Fator de Abrangência k	Incerteza U
Lateral Esquerda	0,649	2,37	0,038	3,547	2,10	0,318
Inferior	0,589	2,65	0,046	3,803	2,03	0,281
Lateral Direita	0,621	2,09	0,028	3,617	2,08	0,31
Superior	0,604	2,10	0,028	3,863	2,02	0,274

Fonte: adaptado de Relatório N°29392-102, Aferitec Metrologia

Quadro 18: Média de rugosidade para cavidade C3 – 3D_Offset.

SUPERFÍCIE	RUGOSIDADE Ra			RUGOSIDADE Rz		
	Valor Médio Obtido (μm)	Fator de Abrangência k	Incerteza U	Valor Médio Obtido (μm)	Fator de Abrangência k	Incerteza U
Lateral Esquerda	0,562	4,53	0,123	3,267	2,14	0,337
Inferior	0,608	4,53	0,153	3,720	2,18	0,357
Lateral Direita	0,572	2,65	0,048	3,590	2,15	0,341
Superior	0,602	4,53	0,205	3,533	2,87	0,646

Fonte: adaptado de Relatório N°29392-102, Aferitec Metrologia

Assim como Machado et.al. (2011) define o parâmetro Ra sendo o mais utilizado no controle de processos, uma vez que sua variação pode apresentar alterações no mesmo, como o desgaste da ferramenta, por exemplo, e pelas informações descritas nos quadros acima, pode-se ver que todas as estratégias apresentaram um bom resultado.

Para a definição de defeito ou qualquer irregularidade na superfície plana, o parâmetro Rz foi analisado, obtendo a média da soma dos 5 valores de maior afastamentos em relação a linha média, representando o ponto de pico e vale dentro do comprimento de amostragem. Os valores encontrados na faixa de 3,5 a 4,0 μm representam serem baixos, os quais não interferem em uma possível complicação na extração do produto injetado do interior da cavidade. Além da diminuição do tempo de ajustes de fechamentos e polimentos realizados nos moldes e matrizes.

Realizando a média dos valores de todas as faces por cavidade, nos dois parâmetros analisados (Ra e Rz) a estratégia de 3D_Offset apresentou valores menores, seguida pelo Zconstante_Otimizado e por fim o Raster.

Figura 39: Acabamento_C3, estratégia 3D_offset.



Figura 40: Acabamento_C2, estratégia Zconstante_Otimizado.



O fato da ferramenta utilizada para o acabamento ter um perfil esférico a velocidade de corte variou de acordo com o diâmetro efetivo no ponto de contato da aresta cortante com a face plana onde foi realizada a medição e que está demonstrado pela Figura 41, onde um corte transversal representa um ponto de contato qualquer a uma determinada altura, idêntico a todas as estratégias, mudando apenas a direção de corte e o sentido (concordante/discordante) no caso do Raster.

Para este, sendo a estratégia que apresentou piores valores para a maioria das faces analisadas, pode ser justificada pelo sentido de corte ser, em alguns momentos, descendente e ter gerado tais valores, onde a possibilidade do mecanismo de corte em alguns pontos não ter ocorrido de maneira ideal, pois o centro da ferramenta apresenta velocidade de corte nula, realizando o esmagamento do material. Além da remoção do sobremetal deixado pelo semiacabamento (0,2 mm) no corte descendente do Raster, faz com que a ferramenta aumente seus esforços de usinagem, e assim gerando possíveis vibrações e deflexões da

ferramenta. Tais situações corroboram com o observado por Souza (2004) no final do capítulo 2, sobre o sentido de corte das ferramentas de perfil esférico.

Figura 41: Ponto de contato aresta/peça.

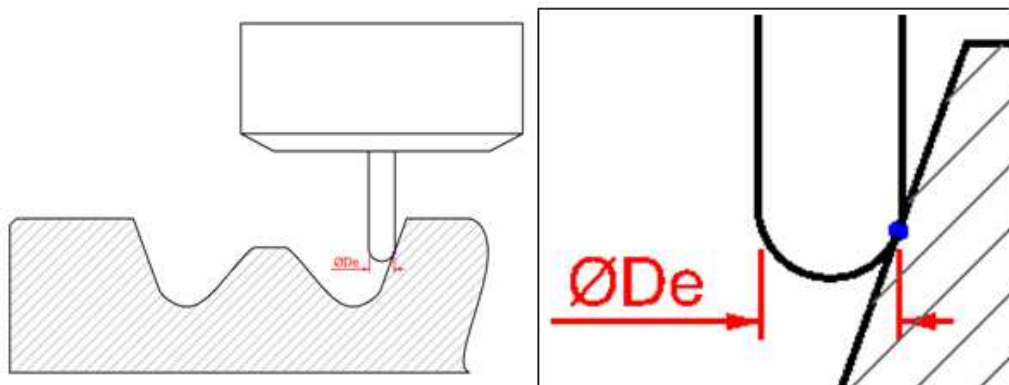


Figura 42: Acabamento_C1, estratégia Raster.



Na Figura 42 pode-se destacar a vibração gerada pela estratégia nos cantos de raios menores, bem como a marca de usinagem devido ao passo lateral constante em paredes de grande inclinação.

Em relação ao polimento, conforme abordado no capítulo 4, quanto menor a rugosidade menor o tempo de polimento que a cavidade ou o molde deverá ser submetido. Assim corroborando ao descrito por Domingues Junior (2009), sendo o polimento uma usinagem por grãos abrasivos que dependem de 04 fatores básicos, onde dentre eles destaca-se a técnica ou experiência do polidor, o trabalho manual e o tempo de processo pode variar de acordo com a habilidade do mesmo.

8.2.3 Desgaste das ferramentas

Conforme a aplicação dos parâmetros de corte expostos anteriormente as ferramentas utilizadas nos processos, em sua maioria, não apresentaram um tipo de desgaste visível, exceto para a operação de Redesbaste, onde algumas observações foram realizadas.

Devido ao baixo tempo dos processos e otimizações pela suavização da usinagem nas entradas e ligações, evitando os trancos e esforços nos cantos e raios menores, as arestas de corte das ferramentas mantiveram-se razoavelmente boas.

Figura 43: Inserto JOMT080320, classe VP15TF utilizado no desbaste.



Na figura acima pode-se observar o inserto utilizado para a estratégia de desbaste, onde apenas 1 das 3 arestas do inserto, a qual não esta destacada na imagem, foi utilizada. A geometria destes insertos de alto avanço, denominados de “*High Feed*”, próprios para a usinagem de cavidades e variados perfis, com alta taxa de remoção de material e menor vibração devido à direção favorável dos esforços de corte possibilitam a redução do tempo de usinagem com maior vida útil da aresta cortante.

Para a ferramenta empregada no processo de redesbaste um pequeno desgaste foi percebido nos raios de ponta da ferramenta, onde praticamente houve toda a concentração de esforços na remoção de material remanescente e diminuição dos degraus e raio de canto, deixados pelo passo vertical e raio da ferramenta anterior.

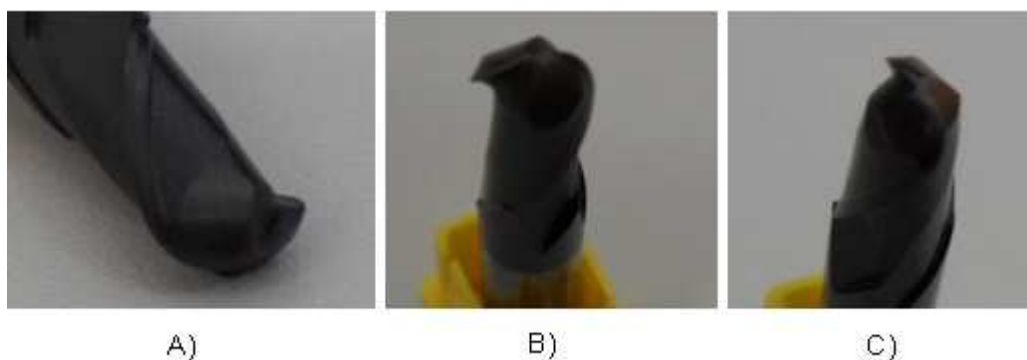
Figura 44: Ferramenta Metal Duro Inteiro: A) Toroidal_Ø8_R1 (CMR0810) utilizada no Redesbaste; B) Esférica_Ø8 (CLB 0802) utilizada no Semiacabamento.



O tipo de desgaste evidente condiz com os tipos descritos por Diniz, Marcondes e Coppini (2008) no capítulo 6, onde o desgaste de flanco ou uma típica deformação plástica pode ser apresentada pelo corte interrompido, elevada temperatura de corte e pressão aplicada na ponta da ferramenta.

Para a ferramenta empregada na operação e Semiacabamento nenhum tipo de avaria ou desgaste foi observado, devido à usinagem se manter constante durante todo o processo.

Figura 45: Ferramentas de Metal Duro inteiro Esférica_Ø6 (CMB 0602) utilizadas nos acabamentos : A) aplicada na cavidade C1 (Raster); B) aplicada na cavidade C2 (Zconstante_Otimizado); C) aplicada na cavidade C3 (3D_Offset).



As ferramentas de metal duro inteiro, utilizadas nas operações de acabamento, mantiveram sua forma original, ou seja, sem danos na sua aresta cortante ou algum tipo de desgaste visível. O tempo de usinagem para a cada estratégia foi pequeno e em condições estáveis, sem esforços excessivos.

8.2.4 Potência Média Consumida

Para cada processo a variação da corrente, exigida pela máquina durante o tempo da usinagem, foi anotado em um intervalo padrão de 10 segundos, definido para todas as operações.

Com a anotação dos dados obtidos pode-se encontrar a Potência Instantânea em Watts, que corresponde ao produto da corrente em Ampéres, em cada instante, pela tensão de entrada na máquina, considerada a medida nominal de 220 Volts, seguindo a formula abaixo:

$$P = I \cdot U \quad (9)$$

Sendo a potência elétrica um trabalho realizado pela corrente em um determinado intervalo de tempo, foi encontrada a potência média consumida em cada processo realizando uma analogia á força de corte envolvida na usinagem.

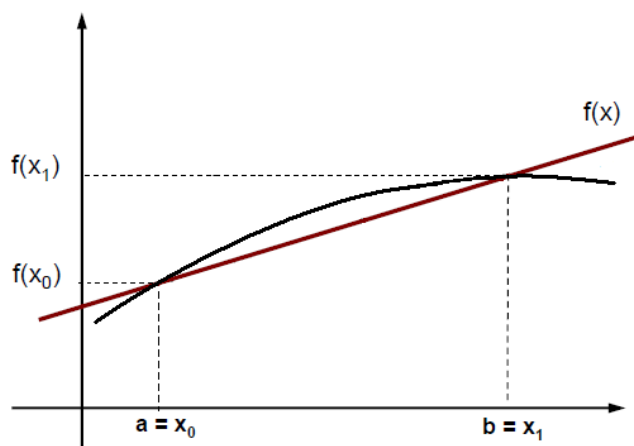
Consciente que o tipo de medição anota todo o consumo realizado pela máquina e não somente para a potência de usinagem, o experimento foi realizado com a intenção de mostrar as diferenças de uma estratégia para outra e o tipo de usinagem envolvida. Nesse estudo foi considerado que o consumo dos periféricos na máquina foi igual para todas as estratégias, alterando-se apenas o acionamento dos eixos e a velocidade de rotação do *spindle*, para as diferentes forças de usinagem necessárias.

Para o cálculo do consumo médio de cada processo uma integral poderia ser utilizada para encontrar a área do gráfico, mas como os diversos pontos ficaram dispersos na plotagem do mesmo, não houve a possibilidade de encontrar uma curva de ajuste com uma função definida para cada processo. Assim a Regra do Trapézio foi utilizada como aproximação dessa integral, realizando a somatória em um intervalo de tempo definido, conforme fórmula abaixo:

$$I = \int_a^b f(x) dx \cong \sum_{i=1}^n w_i \cdot f(x_i) \cdot \Delta x \quad (10)$$

onde $f(x_i)$ representa os valores da função $f(x)$, os intervalos da função expressos por Δx , ou seja, $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ e w_i corresponde a um valor médio de ponderação ou peso, mas utilizaremos Δx constante ($t = 10s$).

Gráfico 1: Aproximação entre um intervalo definido de uma curva qualquer, pela Regra dos Trapézios Simples.



Pela Regra dos Trapézios Simples tem-se $\Delta x = b - a = h$, assim para intervalos de $[a, b]$ pequenos, o valor da aproximação da integral é aceitável.

$$I = \int_a^b f(x) dx \cong \frac{h}{2} [f(x_0) + f(x_1)] \quad (11)$$

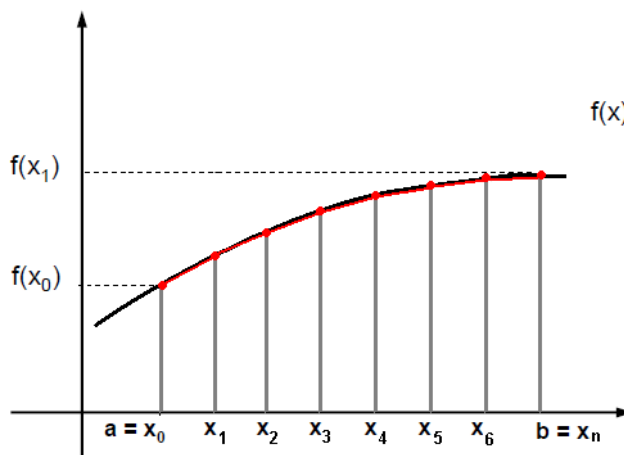
Porém como os dados obtidos ficaram muito dispersos e com grande amplitude, em intervalos longos optou-se pela Regra dos Trapézios Composta para melhor aproximação, seguindo a fórmula abaixo:

$$I = \int_{x_0}^{x_n} f(x) dx \cong \frac{h}{2} [f(x_0) + f(x_1)] + \frac{h}{2} [f(x_1) + f(x_2)] + \dots + \frac{h}{2} [f(x_{n-1}) + f(x_n)] \quad (12)$$

Assim, não repetindo apenas os termos de $f(x_0)$ e $f(x_n)$ a simplificação da fórmula usada está descrita na equação 13 e representada pelo Gráfico 2:

$$I = \int_{x_0}^{x_n} f(x) dx \cong \frac{h}{2} \{f(x_0) + 2[f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_{n-1})] + f(x_n)\} \quad (13)$$

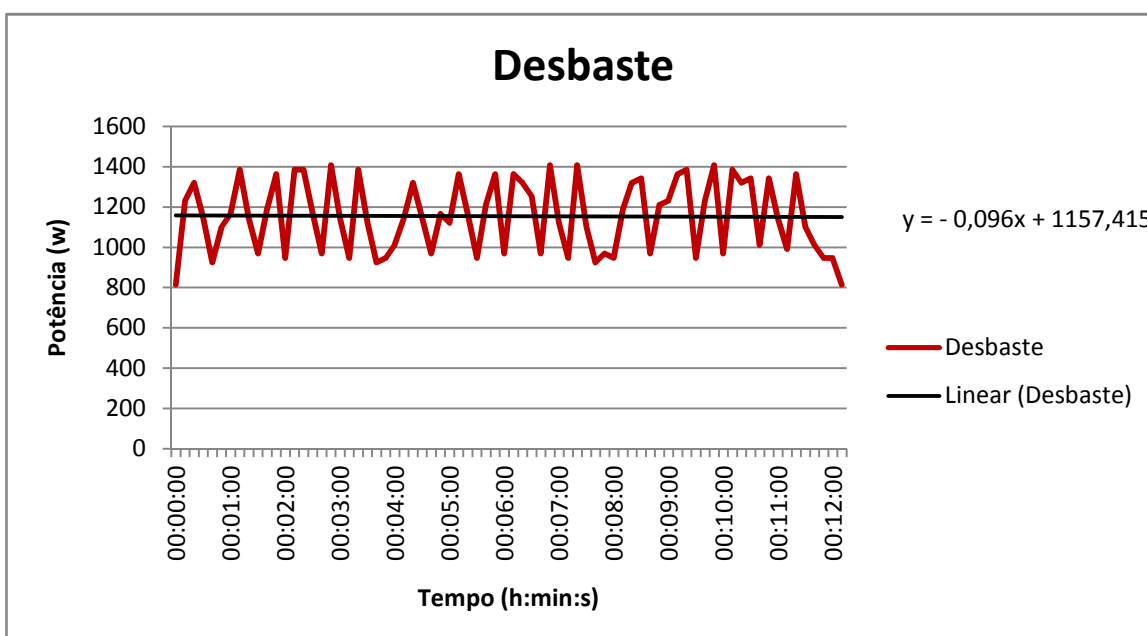
Gráfico 2: Aproximação entre um intervalo definido de uma curva qualquer, pela Regra dos Trapézios Composta.



Os gráficos dos processos abaixo demonstram a variação da potência calculada durante o tempo de usinagem para essa operação, onde foi encontrada a linha média dos pontos dispersos e sua equação característica, através da qual se tornou possível a comparação dos resultados analisando, simplesmente, a área do trapézio formada pela linha média, comparando as duas formas de aproximação.

Para o processo de Desbaste realizando a aproximação pela somatória demonstrada na equação 9, o consumo médio obtido para o processo foi de 0,235 kWh.

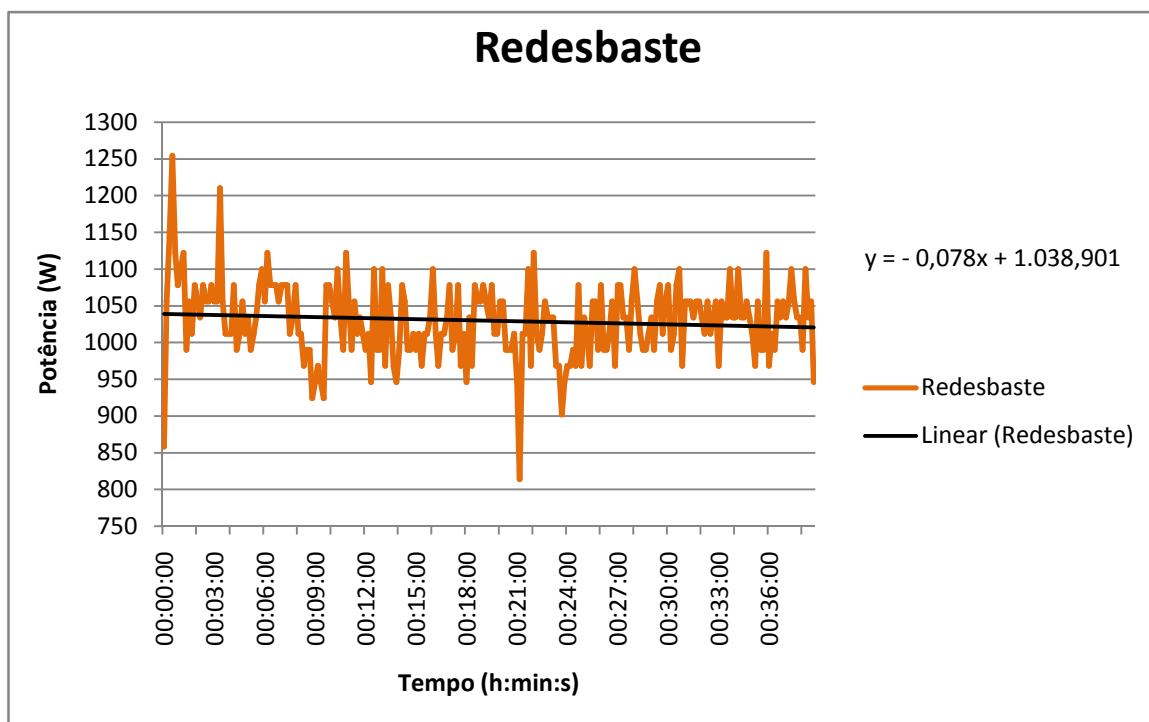
Gráfico 3: Potência Instantânea x Tempo, para o processo de Desbaste.



Realizando o cálculo da área do trapézio formado pela linha média, cuja equação está contida no gráfico, onde a base maior (B) corresponde ao valor em que a linha média cruza a ordenada (1157,415 W), a base menor (b) ao valor da potência no último ponto da usinagem (1150,31 W) e a altura (H) representa o tempo total do processo em horas (0,20222 h), o valor encontrado de 0,233 kWh para o consumo médio representa uma aproximação com 0,67% de diferença pelo cálculo da Regra dos trapézios.

Para a operação de Redesbaste no tempo de 38 min e 35 s, equivalente a aproximadamente 0,643 horas, a potência média consumida foi de 0,664 kWh calculada pela regra dos trapézios. A área do triângulo apresentou uma diferença muito pequena com o resultado obtido, na faixa de 0,26% menor.

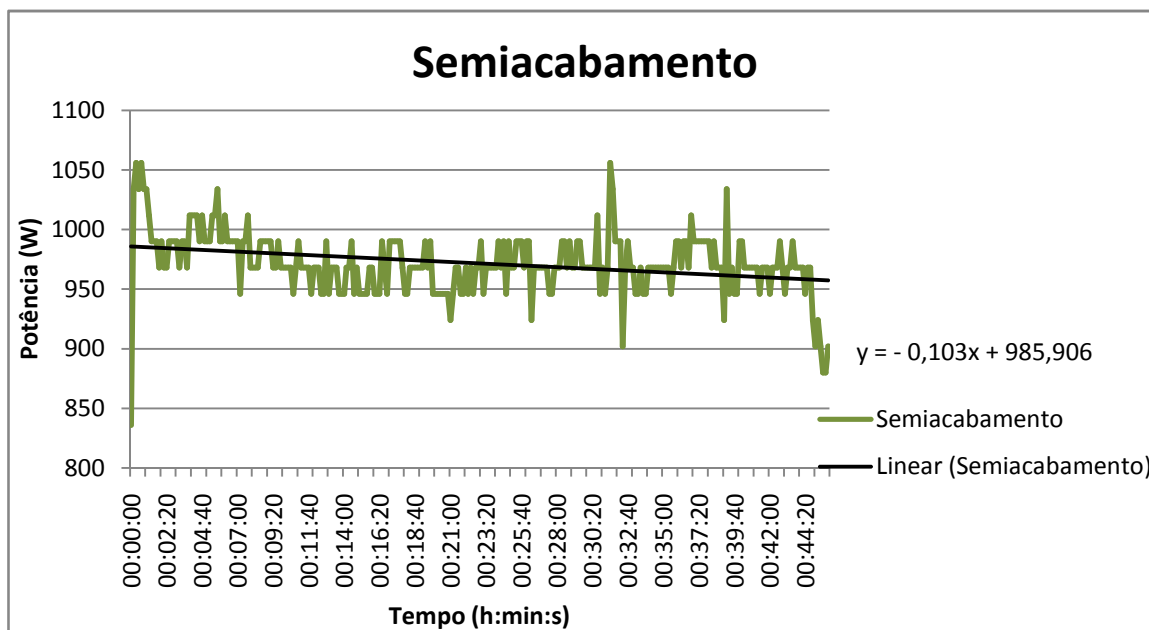
Gráfico 4: Potência Instantânea x Tempo, para a operação de Redesbaste.



Neste processo conforme descrito anteriormente, a elevada quantidade de subidas (1162) que representam no geral, as entradas, saídas e ligações durante a usinagem, afetou a potência consumida, devido ao fato da máquina exigir maior movimentação dos eixos independente ou simultaneamente gerando a remoção dos materiais somente nos pontos onde a primeira ferramenta não atingiu, ou deixou um raio maior que o modelo original.

O semiacabamento por se tratar da usinagem com maior tempo, usinando as três cavidades no mesmo processo, apresentou 0,742 kWh de consumo médio pela regra dos trapézios.

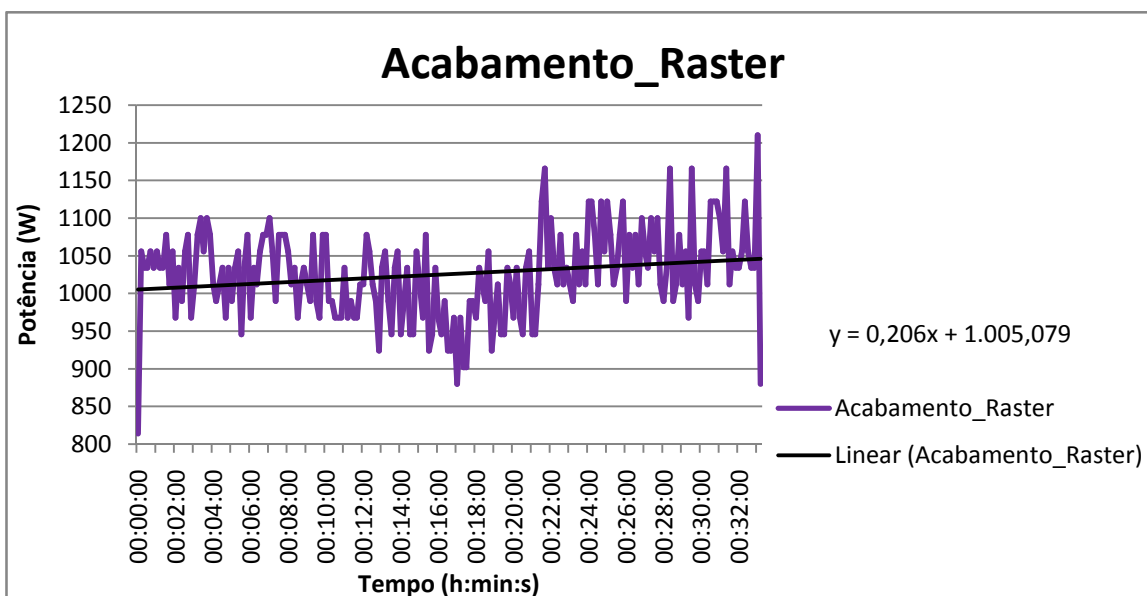
Gráfico 5: Potência Instantânea x Tempo, para a operação de Semiabamento.



Pela equação da linha média contida no gráfico desta estratégia (3D offset), o valor calculado pela área do trapézio foi praticamente igual à aproximação da integral, com variação de 0,01% maior.

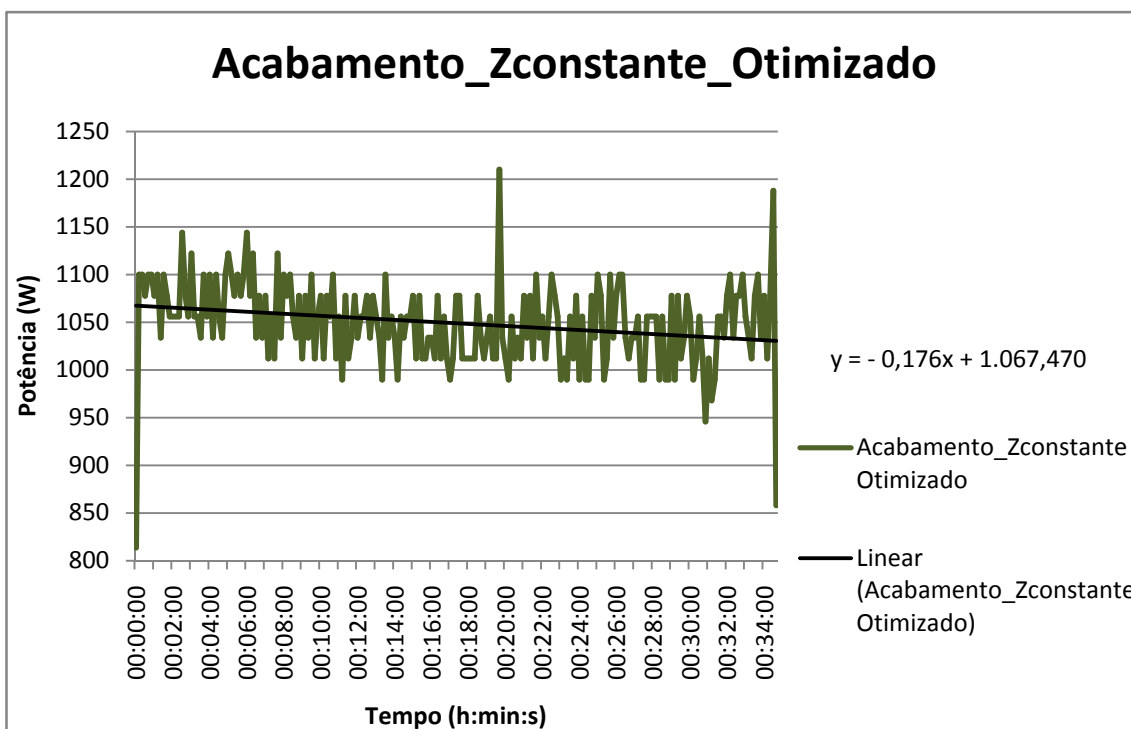
O acabamento da cavidade C1, onde foi utilizada a estratégia Raster, cujo tempo foi o menor entre os acabamentos, consumiu 0,568kWh no intervalo de tempo de 33 min. Pela área do trapézio formado pela linha médio, o consumo calculado teve uma diferença de 0,30% menor à somatória utilizada para a aproximação.

Gráfico 6: Potência Instantânea x Tempo, para o acabamento Raster.



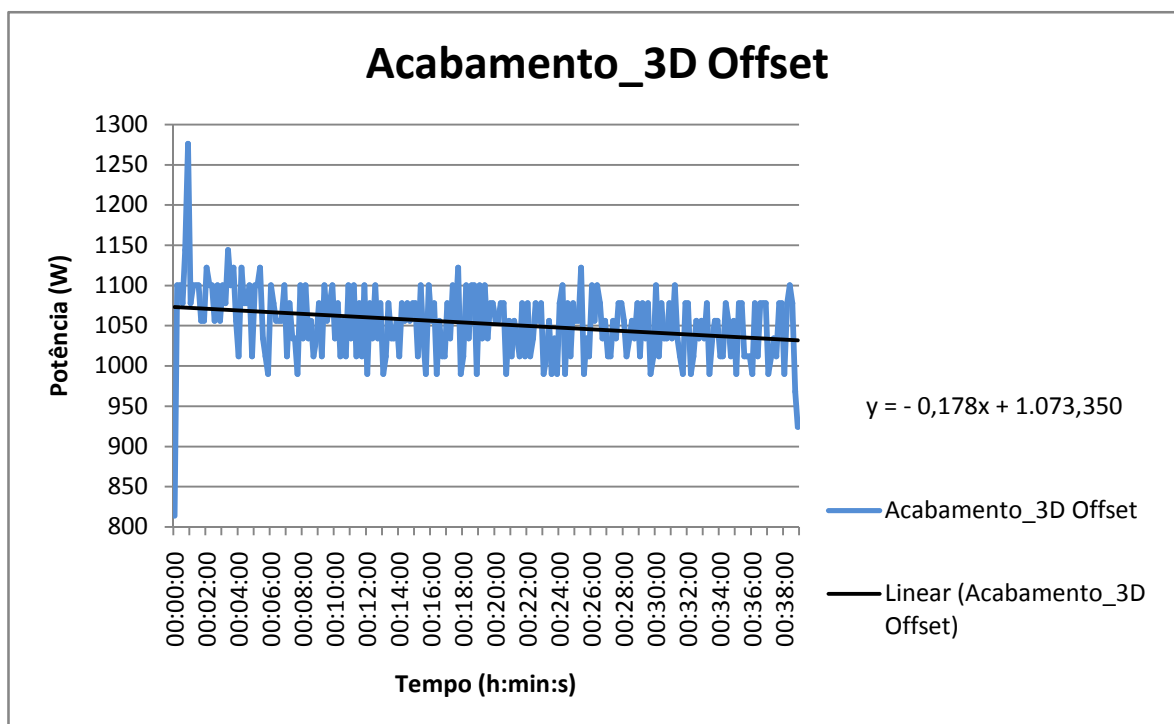
Na cavidade C2 empregada a estratégia Zconstante_Otimizado, conforme parâmetros descritos anteriormente, teve um consumo médio de 0,607kWh para 34,5 minutos de usinagem total do processo. Calculado pela Regra dos Trapézios o valor encontrado é 0,33% maior à área do trapézio criada pela linha média.

Gráfico 7: Potência Instantânea x Tempo, para o acabamento Zconstante Otimizado.



Enfim, a estratégia de 3D Offset aplicada na cavidade C3, consumiu uma média de 0,682 kWh, calculada pela aproximação da equação 9, onde a diferença para a área do trapézio gerada pela linha média dos pontos, foi praticamente nula (0,02%).

Gráfico 8: Potência Instantânea x Tempo, para o acabamento 3D Offset.



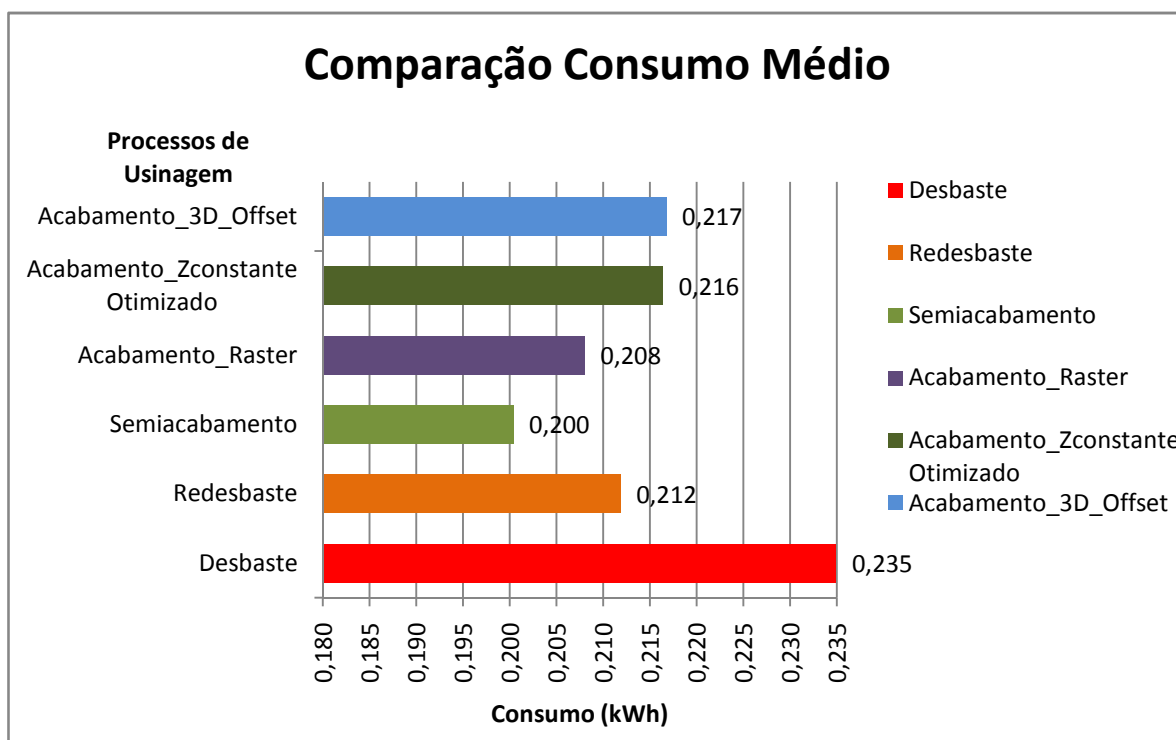
No geral os dois métodos utilizados aproximam o valor do consumo médio, mesmo os gráficos não apresentando uma curva característica. Para verificar os resultados obtidos da linha média entre a dispersão, a Regra dos Trapézios Composta foi empregada, mostrando a eficiência dos métodos.

Conforme demonstrado no processo de Semi-acabamento, para essa mesma estratégia (3D Offset), a variação entre os cálculos do consumo médio foi muito pequena, mostrando a garantia da aproximação entre os dois métodos utilizados, tanto pela Regra dos Trapézios Composta, quanto pela equação característica de cada estratégia demonstrada nos gráficos.

O processo de Desbaste foi adotado como base para a análise e comparação dos resultados obtidos com o cálculo de aproximação do consumo médio em cada operação.

Pelo fato do Desbaste ser a estratégia com maiores esforços de usinagem para a remoção de material, pode-se apresentar a relação deste com os outros processos, que estão apresentados no Gráfico 9:

Gráfico 9: Comparação de consumo entre as operações de usinagem, no mesmo intervalo de tempo.



Como demonstrado acima, para todas as outras operações a aproximação do consumo médio foi reduzida para o mesmo tempo feito para o Desbaste (12min e 08 s), podendo comparar o consumo de cada processo, mantendo seus parâmetros particulares, demonstrando quanto seria o consumo nesse mesmo intervalo de tempo.

Baseado na equação 5, descrita no capítulo 2, a potência de corte (P_c) tem duas variáveis possíveis de influência em seu valor, a Força de Corte (F_c) e a Velocidade de Corte (v_c).

A força de corte, porém, é determinada teoricamente pelo produto da pressão específica de corte (K_s) pela área da seção de corte (A), ou área da seção do cavaco removido, segundo equação 14:

$$F_c = K_s \cdot A \quad (14)$$

A área da seção de corte, ou área do cavaco, para o Desbaste foi muito maior do que as outras operações, porém as demais estratégias demonstraram um consumo muito próximo ao desenvolvido no processo de Desbaste, na faixa de 8 a 17%. Por dedução essa diferença deveria ser maior, já que o volume de material removido e os esforços na estrutura da máquina e elementos são maiores para o Desbaste.

Contudo o que variou na força de corte entre as estratégias, fazendo com que apresentassem uma pequena diferença no mesmo intervalo de tempo, foi a pressão específica de corte (K_s) que sofre influência de diversos fatores.

De acordo com Machado et al. (2011) a velocidade de corte (v_c), uma das variáveis no cálculo da potência de corte, faz-se contra a suposição da equação 5, que o v_c seja diretamente proporcional á potência, já que em velocidades de corte onde não ocorre a formação de APC, os valores de K_s tendem a diminuir com o aumento do v_c , devido a diminuição da deformação, dureza e coeficiente de atrito com o cavaco removido. Portanto o aumento da velocidade de corte, causa o decréscimo da força de corte, pelo K_s baixo.

Dentre os fatores que influenciam o valor de K_s a própria seção de corte (A) pode servir de base para explicar as pequenas diferenças do consumo entre as operações. Diniz, Marcondes e Coppini (2008) descrevem que o valor de K_s diminui com a área da seção de corte e essa diminuição acontece principalmente pelo aumento do avanço (F), pois durante o processo de formação do cavaco, parte do volume do material removido da peça escorrega entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, não se transformando em cavaco, gerando o fluxo lateral de cavaco.

Assim o volume de material que se transforma em cavaco não é muito maior que o volume que flui lateralmente, assim quando se tem um avanço ou a espessura de corte pequeno a energia consumida por esse fenômeno é relativamente grande. Conforme o avanço (F) ou a espessura de corte (h) aumentam, praticamente todo o volume de material removido é na forma de cavaco, diminuindo a pressão de corte específica. Conseqüentemente com o aumento do avanço, a velocidade de avanço é maior, diminuindo o coeficiente de atrito, tornando o corte mais dinâmico, reduzindo o valor de K_s .

No cálculo dos parâmetros de corte, a velocidade de corte, de acordo com o diâmetro da ferramenta, influência na rotação (N) utilizada. Essa por sua vez, é aplicada na determinação do avanço, juntamente com o número de arestas (Z) da

ferramenta e o avanço por dente (F_z) aplicado ao tipo de ferramenta e operação. Praticamente o que determinou o aumento do avanço no programa de Desbaste foi o F_z utilizado para a operação (0,8 mm/z), onde a quantidade de cavaco removido por aresta é alta, ou seja, a espessura do cavaco (h) é maior, juntamente com o avanço elevado diminuiu o valor de K_s . Para os programas onde as ferramentas de metal duro inteiriço foram empregadas, o avanço por aresta utilizado foi pequeno (0,08 a 0,12 mm/z), diminuindo por consequência o avanço e a espessura de corte no processo aumentando a força de consumo para realizar o corte.

Dentre os fatores de influência de K_s , o material da peça, a geometria e material da ferramenta, condição de lubrificação e refrigeração e por fim o estado de afiação da ferramenta, nesse estudo foi considerado que somente a lubrificação e refrigeração podem ter afetado o valor de K_s , pois em velocidades de corte elevadas a penetração do fluido de corte é dificultada modificando o coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta, diminuindo a eficiência do fluido, aumentando o valor de K_s . Os demais podem assumir uma relação com a pressão específica de corte, mas não abordados, pois o material foi constante para as operações, a geometria e o material da ferramenta juntamente com seu estado de afiação, deduz-se que foram projetadas e desenvolvidas para os tipos de estratégias utilizadas, bem como os ângulos da ferramenta e as determinações dos parâmetros de corte permitidos, pelo fornecedor.

Por fim uma comparação entre os resultados obtidos para cada acabamento foi apresentada pelo Quadro 19, onde determinou por meio de símbolos as estratégias que melhor ou pior responderam aos parâmetros analisados.

Na classificação o critério adotado foi por valores obtidos, como no caso do menor tempo a estratégia Raster desempenhou melhor resultado, embora na diferença percentual de tempo programado por tempo real ela foi a estratégia de pior diferença, conforme demonstrado e explicado após o Quadro 12.

No consumo médio foi observado o resultado do Gráfico 9, para o mesmo tempo, entre as estratégias, a qual tinha apresentado menor valor foi o Raster, seguido pelo Zconstante_Otimizado e 3D_Offset, respectivamente.

Para o dimensional foi analisado a estratégia que apresentou uma quantidade menor de diferença entre as medidas, assim como para a rugosidade em que se realizou uma média das médias dos parâmetros R_a e R_z , entre todas as faces, verificando qual apresentou o melhor valor.

O Desgaste foi desconsiderado, já que as ferramentas de acabamento não apresentaram modificações em sua forma original.

A análise visual do acabamento foi realizada de uma forma empírica e pode ser visto nas Figuras 39, 40 e 42, onde as marcas das ferramentas e vibrações nos cantos e raios pequenos foram levadas em consideração, assim como o reflexo e o brilho em cada cavidade.

Quadro 19: Comparativo entre as estratégias de acabamento.

ESTRATÉGIAS DE ACABAMENTO	RESULTADOS ANALISADOS						
	Menor Tempo	Consumo Médio	Dimensional	Rugosidade	Desgaste	Análise Visual do Acabamento	Menor Diferença Percentual de Tempo PROG / REAL
Acabamento_C1 (Raster)	✓	✓	✓	x	-	x	x
Acabamento_C2 (Zconstante_Otimizado)	o	o	x	o	-	✓	✓
Acabamento_C3 (3D_Offset)	x	x	✓	✓	-	✓	o

Legenda:
 ✓ = Melhor o = Médio x = Pior

Pelo quadro acima fica certo que as estratégias se alternam entre os resultados obtidos, mas por quantidade, a que melhor se apresentou diante da comparação foi a estratégia 3D_Offset, seguida pelo Raster e por fim o Zconstante_Otimizado.

Embora esse tipo de comparação possa ter favorecido algumas estratégias analisadas independentemente, onde um fator pode ser mais importante que o outro, ou priorizado durante a programação de uma peça.

9 CONCLUSÃO

A necessidade de redução do processo na manufatura de moldes e matrizes evidencia a constante busca de aprimoramentos e novas aplicações por parte das ferramentarias, sejam elas atuantes em qualquer segmento na indústria do plástico, engajando a uma elevada produção industrial. Porém os tempos de ajustes e polimentos manuais retêm boa parte do processo, devido às variações dimensionais e qualidades de superfícies envolvidas nas operações de usinagem.

Desta forma a realização da usinagem do corpo de prova, na forma de cavidade, aplicando as principais estratégias utilizadas nas ferramentarias, teve como objetivo demonstrar os aspectos envolvidos, analisando suas características e comparando os resultados obtidos.

Abrangendo os parâmetros de corte e os tipos de percurso determinados para cada operação, a variação dos tempos de cada processo foi explorada demonstrando as possíveis causas da diferença pelo que foi estimado no software CAM, destacando dentre as estratégias de acabamento a que teve melhor desempenho em função do tipo de percurso gerado e a geometria da cavidade.

Para os mesmos acabamentos a qualidade da superfície foi abordada através das análises dos parâmetros de rugosidade, obtidos para cada estratégia, determinando as diferenças geradas em cada cavidade, relacionando com o movimento e o sentido de corte, específicos em cada acabamento. Assim como a menor rugosidade obtida, por consideração, reduz o tempo de polimento que a cavidade poderá ser submetida, sendo este processo de usinagem realizado de forma manual e dependente da habilidade e da técnica pessoal do polidor, o tempo de polimento para cada cavidade e sua relação com a medida da rugosidade obtida não pode ser quantificado.

O erro dimensional também foi medido e verificado se estava dentro das tolerâncias adotadas na programação e especificadas em desenho, corroborando as causas da variação com os fatores que possam ter influenciado na medida final do corpo de prova.

O desgaste das ferramentas foi averiguado para cada processo, sendo notório apenas na operação de Redesbaste, onde o volume de material removido foi maior com uma ferramenta de metal duro inteiriço. As demais ferramentas não

demonstraram variação do seu estado original, durante o tempo efetivo de corte, já que as dimensões do corpo de prova são consideradas pequenas para a estrutura de moldes e matrizes.

Em todos os processos de usinagem a corrente elétrica exigida pela máquina foi anotada em um intervalo de tempo determinado, obtendo a potência instantânea do seu produto com a tensão de entrada, considerada constante. Assim uma relação foi realizada com o consumo médio da máquina para cada processo, comparando-os por fim ao Desbaste, cujos esforços de corte foram maiores, analisando as causas da influência na força de corte (F_c) pela pressão de corte específica (K_s) e a área da seção do cavaco (A) nos processos distintos.

Enfim uma comparação foi realizada entre os acabamentos aplicados e seus resultados, podendo classificar para esse tipo de geometria e parâmetros adotados a estratégia que obteve maior quantidade de resultados positivos, o 3D_Offset, seguindo pelo Raster e Zconstante_Otimizado, respectivamente.

Para trabalhos futuros o estudo de novas estratégias de usinagem pode ser realizado, como é o caso da usinagem de Desbaste Trocoidal e por Mergulho (sentido axial). A primeira muito utilizada na usinagem de materiais com elevada dureza e a segunda em cavidades ou peças com grande profundidade de desbaste.

REFERÊNCIAS

AREDA, Murilo. **Projeto de molde para injeção de uma caixa termoplástica**. 2008. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de Piracicaba, Piracicaba, 2008.

BONETTI, Ivandro. **Contribuições para desenvolver o conhecimento das operações de desbaste de moldes e matrizes com ênfase em fresamento no sentido axial**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Sociedade Educacional de Santa Catarina - Instituto Superior Tupy, Joinville, 2008.

BRANDÃO, Lincoln Cardoso et al. Estratégias de fresamento de moldes e matrizes. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 540, p.34-55, 1 jan. 2011. Mensal.

CAVALCANTI, Jorge. **Integração Numérica**. Disponível em: <http://www.univasf.edu.br/~jorge.cavalcanti/8CN_integracao.pdf>. Acesso em: 15 out. 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1990. 576 p.

COSTA, Alex Ribeiro. **Otimização do Processo de Fresamento de Cavidades com Fresas de Inserto Intercambiáveis**. 2003. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

COSTA, Hamilton Nunes da. **Polimento em Moldes de Injeção**. Disponível em: <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/polimento_aplicado.asp>. Acesso em: 13 de maio de 2012.

De BLASIO, Carlos Anibal. **Solução de Defeitos na Moldagem por Injeção de Termoplásticos**. 2007. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 6ª ed. São Paulo: Artliber, 2008.

DOMINGUES JUNIOR, Gilberto. **Polibilidade de aços para moldes de plásticos**. 2009. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

FERRARESI, Dino. **Fundamento da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1970.

HARADA, Júlio. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. São Paulo: Artliber, 2004.

FLUKE, Produtos. Disponível em:
<<http://www.fluke.com/fluke/brpt/osciloscopios-portateis/fluke-190-series-ii-scopemeter-test-tool.htm?PID=70366>>. Acesso em: 01 de dezembro de 2012.

HELLENO, André Luís; SCHÜTZER, Klaus. Fatores que influenciam a usinagem de moldes e matrizes com altas velocidades. **Ciência e Tecnologia**, v. 12, n. 23, p.7-14, jan/jun 2004. Semestral. Disponível em:
<<http://www.unimep.br/phpg/editora/revistaspdf/rct23art01.pdf>>. Acesso em: 30 de abril de 2012.

INTEGRAÇÃO Numérica. Disponível em:
<<http://www.alunos.eel.usp.br/numerico/notasDeAula/integracao.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2012.

ISCAR, Member IMC Group. **ISCAR's Quick Reference Guide for Die and Mold Making**. 2ª ed. [S.l.]: [s.n.], 2012. Catálogo.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MICHAELI, Walter et al. **Tecnologia dos plásticos: livro texto e de exercícios**. São Paulo: Edgard Blucher, 2000. 205 p.

MITSUBISHI, Mitsubishi Materials Corporation. **Catálogo Geral**. [S.l.]: [s.n.], 2011-2012. Catálogo.

NEVES, Davi. **Uma Contribuição ao Fresamento de Matrizes com Fresa de Topo Esférico**. 2002. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

NEVES, Frederico Ozanan et al. De que forma a qualidade é afetada pelo fluido e pela velocidade de corte. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 550, p.32-43, nov. 2011. Mensal.

OLIVEIRA, Juliano Marcon. **Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas Para a Produção de Moldes e Matrizes**. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

Os fabricantes de moldes e matrizes para a indústria de plástico. **Plástico Industrial**, São Paulo, n. 161, p.42-45, jan. 2012. Mensal.

PIVETTA, Carlos Sergio. **Uma contribuição ao estudo do fresamento de aço endurecido com fresa de topo esférico**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

PROVENZA, Francesco. **Moldes para plásticos**. São Paulo: F. Provenza, 1991.

RIGATTI, Aldo Marcel Yoshida. **Avaliação da Força de Usinagem e Energia Específica de Corte no Fresamento com Alta Velocidade de Corte**. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista - Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2010.

SANTANA, Herto de Alencar. **Moldes de Injeção**. 2002. 67 f. Apostila Tecnológica - Sociedade Educacional De Santa Catarina, Paraná, 2002. Disponível em: <http://www.torresnetworking.com/Sociesc/Apostila_Moldes.pdf>. Acesso em: 01 de abril de 2012.

SILVA, Flávia Cristina Souza e et al. Usinabilidade de três aços para moldes considerando as forças de corte. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 551, p.90-105, dez. 2011. Mensal.

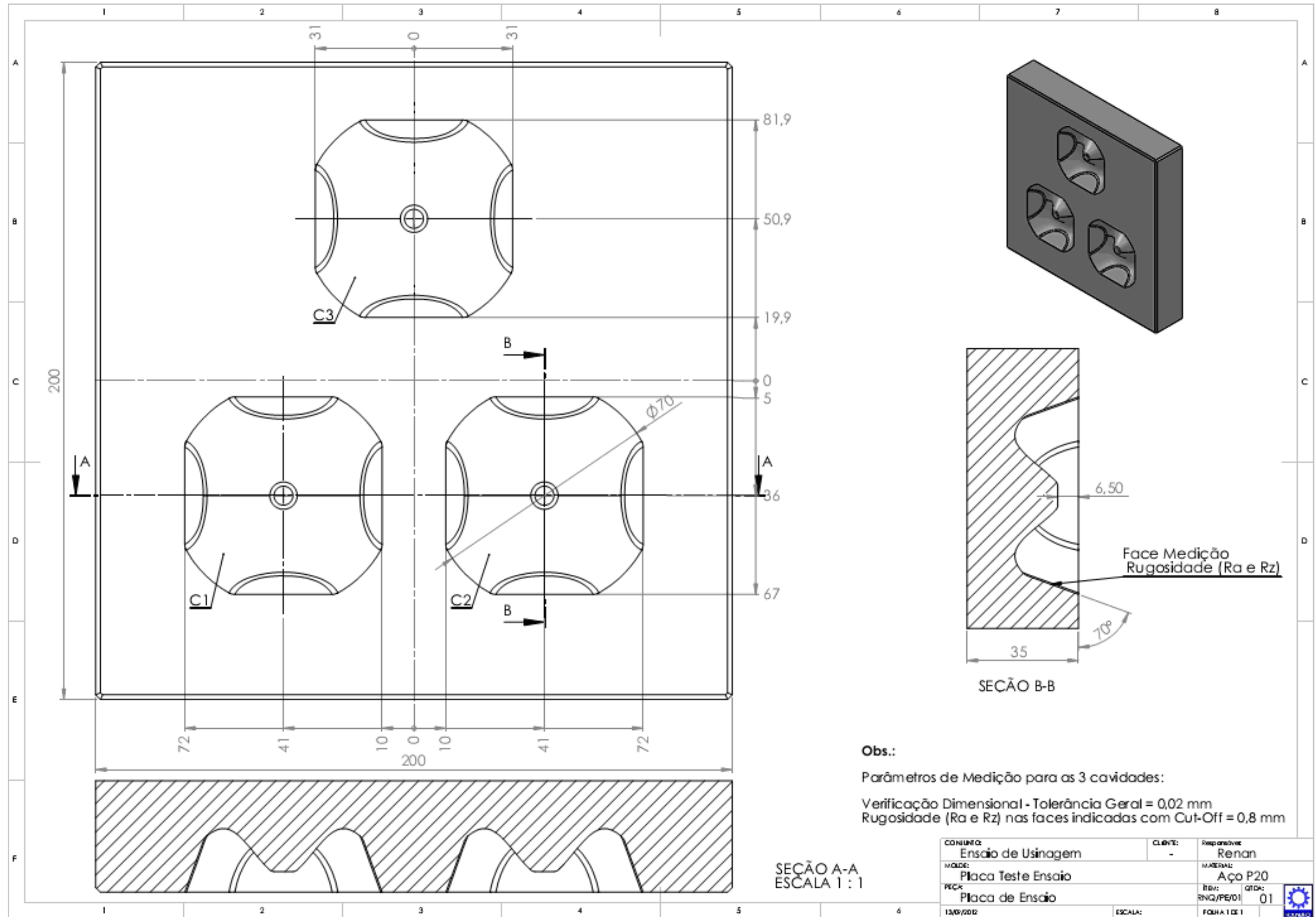
SOUZA, Adriano Fagali de. **Contribuições ao Fresamento de Geometrias Complexas Aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidades**. 2004. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.

SOUZA, Adriano Fagali de; ULBRICH, Cristiane Brasil Lima. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC - princípios e aplicações**. São Paulo: Artliber, 2009.

VAZ, Daniel Rocha. **Análise do processo de fabricação e manutenção de moldes para injeção de termoplásticos: um estudo de caso da utilização do processo de soldagem TIG.** 2010. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de Piracicaba, Piracicaba, 2010.

VENTURA, Carlos Eiji Hirata. **Estudo dos esforços de corte no processo HSM aplicado à abertura de cavidades.**2010. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

APÊNDICE A: Desenho Corpo de Prova. Sem Escala.



Obs.:

Parâmetros de Medição para as 3 cavidades:

Verificação Dimensional - Tolerância Geral = 0,02 mm
Rugosidade (Ra e Rz) nas faces indicadas com Cut-Off = 0,8 mm

SECÃO A-A
ESCALA 1 : 1

CONSUMO: Ensaio de Usinagem	CLIENTE: -	Preparativo: Renan
MODELO: Placa Teste Ensaio	MATERIAL: Aço P20	
PROJETO: Placa de Ensaio	REVIZÃO: RNG/PE/D1	QUANTIDADE: 01
13/01/2012	ESCALA: -	FOLHA 1 DE 1

APÊNDICE B: Programação dos parâmetros de suavização, "CYCLE 832", para comando Siemens 810D:

Programas de Desbaste e Redesbaste:

```
;SIEMENS 810D  
N10G17 G64 G71 G90 G94  
N20G53 G0 Z-110 D0 M5  
N30T1  
N40M6  
N50G54D1  
N60S2069M3  
N70CYCLE832(0.08,112003)  
N80G0X0Y0Z7.S2069M3  
...
```

Programa de Semiacabamento:

```
;SIEMENS 810D  
N10G17 G64 G71 G90 G94  
N20G53 G0 Z-110 D0 M5  
N30T1  
N40M6  
N50G54D1  
N60S7161M3  
N70CYCLE832(0.05,112001)  
N80G0X0Y0Z7.S7161M3  
...
```

Programas de Acabamento:



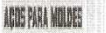
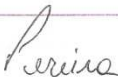
```
;SIEMENS 810D  
N10G17 G64 G71 G90 G94  
N20G53 G0 Z-110 D0 M5  
N30T1  
N40M6  
N50G54D1  
N60S9549M3  
N70CYCLE832(0.01,112001)  
N80G0X0Y0Z7.S9549M3  
...
```

ANEXO A: Classificação dos aços utilizados na usinagem de moldes.

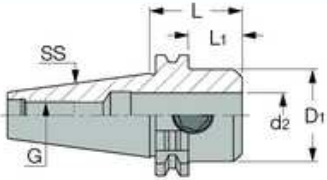






Aços-ferramenta para moldes														
Tipo	AISI	Composição Química nominal, %								Características gerais				
		C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Mo	Al	Profundidade de endurecimento	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Usinabilidade
Para Cavidades usinadas														
380	P20	0,35	0,75	0,45	1,70	...	...	0,40	...	média	8	1 (a)	2 (a)	8
381	...	0,47	0,90	0,30	1,15	...	0,15	0,40	...	média	7	1 (a)	2 (a)	7
382	...	0,35	0,50	0,30	1,60	3,50	...	0,25	...	média	8	1 (a)	3 (a)	6
383	P21	0,20	0,30	0,30	0,25	4,00	0,20	...	1,20	grande	8	1	4	5
384	...	0,12	0,40	0,25	13,00	...	...	...	...	média	8	2	5	4
385	...	0,35	0,40	0,25	13,25	...	...	...	...	média	6	3	6	4
386	...	0,65	0,30	0,30	17,00	...	...	...	...	média	5	5	6	4
(a) depois da cementação														

Fonte: adaptado Chiaverini, 1990, p. 313.

ANEXO B: Certificado de Qualidade do material do corpo de prova.

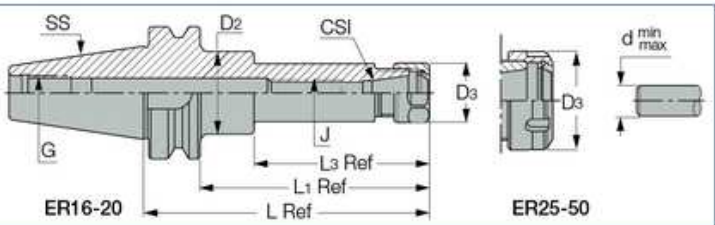







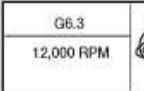
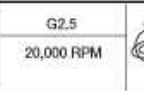
  		CERTIFICADO QUALIDADE 18797 Data : 12/09/2012						
Cliente : MECANICA RANAQ LTDA Ped. Cliente : VERBAL/		Nro Nota : 99996 21953						
Pedido Interno 078143 Descricao do Produto P20 CH 38.00 x 205.00 x 205.00 Dureza		Procedencia ACOESPECIAL Pedido Item Corrida LE-2446						
		Ultra_som APROVADO CONF NORMA ASTM A388 Exames Metalograficos						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0.398	0.293	1.469	0.018	0.021	1.951	0.252	0.984	0.010
W	Cu	Al	Sn	Co	Ti	Nb	N2	N
0.000	0.118	0.001	0.000	0.000	0.002	0.005		0.000
Observações :								
 _____ Depto de Qualidade								

ANEXO C: Cones de Fixação: Tipo Weldon, BT40 e pinças ER40, respectivamente.

						
						
						
						
SS	d2	D1	L	L1	G	Kg
40	20.00	49.0	45.00	25.9	M16	1.00
No de Catalogue	Primary View File (2D)	Model (3D) Light	Model (3D) Detail			
4535028	DXF	STP	Not Available 3D Required			

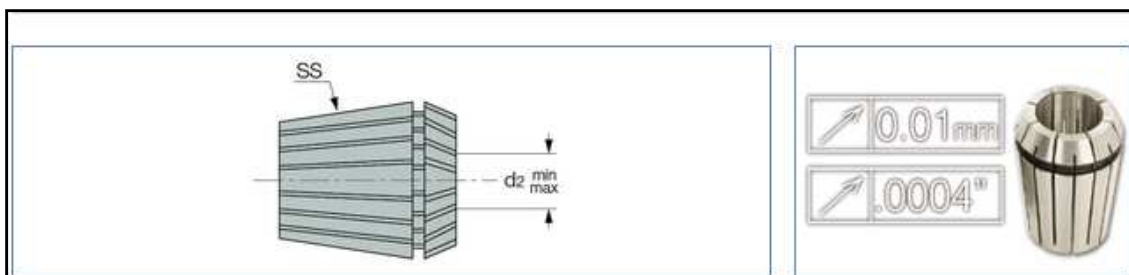
Fonte: Catalogo Eletrônico, ISCAR. Disponível em:

<<http://www.iscar.com/Ecat/item.asp?app=89&mapp=IT&num=1212&GFSTYP=M&tool=H&cat=4535028&lang=FR>>. Acesso em: 23 de out. de 2012.

											
											
											
											
											
SS	CSI	d min	d max	L	L1	L3	D3	D2	J	G	Kg
40	ER40	3.0	26.0	80.00	53.0	-	63.00	-	M28X1,5	M16	1.10
No de Catalogue	Primary View File (2D)	Model (3D) Light	Model (3D) Detail								
4509005	DXF	STP	Not Available 3D Required								
Balanced to G2.5/20,000 RPM.											

Fonte: Catalogo Eletrônico, ISCAR. Disponível em:

<<http://www.iscar.com/Ecat/familyHDR.asp?num=1234&app=91&mapp=IT&GFSTYP=M&type=1&lang=FR>>. Acesso em: 23 de out. de 2012.



SS	d2 min	d2 max
ER40	7.00	8.00

No de Catalogue	Primary View File (2D)	Model (3D) Light	Model (3D) Detail
4500156	DXF	STP	Not Available 3D Required

Fonte: Catalogo Eletrônico, ISCAR. Disponível em:

<<http://www.iscar.com/Ecat/item.asp?app=106&mapp=IT&fnum=1273&GFSTYP=M&tool=H&cat=4500156&lang=FR>>. Acesso em: 23 de out. de 2012.

ANEXO D: Catálogo Suporte e ferramentas: Mitsubishi, Alltech, respectivamente.


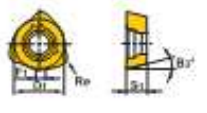

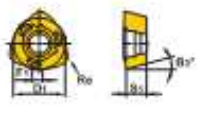

FRESAMENTO																	
TIPO HASTE																	
Tipo	Referência para Pedido	Estoque Nº de Peças	Dimensões (mm)										Sómente ferramentas corte à direita				
			R	D1	D4	Dc	L1	L2	ap	Az	B2*	Parafuso de Fixação	Barra de Fixação	Paraf. de Centro de Fixação	Mola	Chave	Inserto
Curto	AJX06R162SA16SS	*	2	16	16	8.9	70	20	1.0	0.3	3'30"	TS25	-	-	-	TKY08F	JOM 06T215 ZSR
	172SA16SS	*	2	17	16	9.9	70	20	1.0	0.3	-	TS25	-	-	-	TKY08F	ZSR
	AJX06R162SA16S	*	2	16	16	8.9	110	30	1.0	0.3	2'15"	TS25	-	-	-	TKY08F	JOM 06T215 ZSR
	172SA16S	*	2	17	16	9.9	110	20	1.0	0.3	-	TS25	-	-	-	TKY08F	ZSR
	203SA20S	*	3	20	20	12.9	130	50	1.0	0.3	1'18"	TS25	-	-	-	TKY08F	ZSR
	223SA20S	*	3	22	20	14.9	130	30	1.0	0.3	-	TS25	-	-	-	TKY08F	ZSR
Standard	AJX08R202SA20S	*	2	20	20	11.4	130	50	1.5	0.5	1'18"	TS33	-	-	-	TKY08D	JOM 08T220 ZSR
	222SA20S	*	2	22	20	13.4	130	30	1.5	0.5	-	TS33	-	-	-	TKY08D	JOM 08T220 ZSR
	253SA25S	*	3	25	25	16.4	140	80	1.5	0.5	1'00"	TS33	-	-	-	TKY08D	ZSR
	283SA25S	*	3	28	25	19.4	140	40	1.5	0.5	-	TS33	-	-	-	TKY08D	ZSR
	AJX09R252SA25S	*	2	25	25	14.9	140	60	2.0	1.0	1'00"	TS351	AMS3	AJS3010T10	ASS2	TKY100	JOM 09T330 ZSR
	282SA25S	*	2	28	25	17.9	140	40	2.0	1.0	-	TS351	AMS3	AJS3010T10	ASS2	TKY100	ZSR
	303SA32S	*	3	30	32	20.0	150	70	2.0	1.0	1'48"	TS351	AMS3	AJS3010T10	ASS2	TKY100	ZSR
	323SA32S	*	3	32	32	21.9	150	70	2.0	1.0	0'56"	TS351	AMS3	AJS3010T10	ASS2	TKY100	ZSR
	353SA32S	*	3	35	32	24.9	150	50	2.0	1.0	-	TS351	AMS3	AJS3010T10	ASS2	TKY100	ZSR
	404SA32S	*	4	40	32	29.9	150	50	2.0	1.0	-	TS351	AMS3	AJS3010T10	ASS2	TKY100	ZSR
Standard	404SA42S	*	4	40	42	29.9	150	70	2.0	1.0	1'48"	TS351	AMS3	AJS3010T10	ASS2	TKY100	ZSR
	AJX12R302SA32S	*	2	30	32	18.3	150	70	2.0	1.5	1'48"	TS407	AMS4	AJS4012T15	ASS2	TKY150	JOM 120425 ZSR
	322SA32S	*	2	32	32	20.3	150	70	2.0	1.5	1"	TS43	AMS4	AJS4012T15	ASS2	TKY150	ZSR
	352SA32S	*	2	35	32	23.3	150	50	2.0	1.5	-	TS43	AMS4	AJS4012T15	ASS2	TKY150	ZSR
	403SA32S	*	3	40	32	28.3	150	50	2.0	1.5	-	TS43	AMS4	AJS4012T15	ASS2	TKY150	ZSR
	403SA42S	*	3	40	42	28.3	150	70	2.0	1.5	1'48"	TS43	AMS4	AJS4012T15	ASS2	TKY150	ZSR
Standard	AJX14R503SA42S	*	3	50	42	38.2	150	50	2.0	2.0	-	TS54	AMS5	AJS5014T25	ASS3	TKY250	JOM 140520 ZSR
	634SA42S	*	4	63	42	51.1	150	50	2.0	2.0	-	TS54	AMS5	AJS5014T25	ASS3	TKY250	ZSR

* Torque de Fixação (N · m) : TS25=1.0, TS33=1.0, TS351=2.5, TS407=3.5, TS43=3.5, TS54=7.5, AJS3010T10=2.5, AJS4012T15=3.5, AJS5014T25=7.5

● : Estoque mantido no Japão. * : Estoque mantido.

L086

Fonte: adaptado Catálogo Geral, MITSUBISHI, 2011-2012, p. 1050.

INSERTOS											
Formato	Referência para Pedido	Tolerância	C/ Cobertura			Dimensões (mm)					Geometria
			FP7020	VP15TF	VP30RT	B ₃ ^o	D ₁	S ₁	F ₁	Re	
	JOMW06T215ZZSR-FT	M	*	*	*	13°	6.35	2.78	1.2	1.5	
	080320ZZSR-FT	M	*	*	*	13°	8	3.18	1.4	2	
	JOMW09T320ZDSR-FT	M	*	*	*	15°	9.525	3.97	1.8	2	
	120420ZDSR-FT	M	*	*	*	15°	12	4.76	2.5	2	
	140520ZDSR-FT	M	*	*	*	15°	14	5.56	2.8	2	
	JDMT120420ZDSR-ST	M	*	*	*	15°	12	4.76	2.5	2	
	140520ZDSR-ST	M	*	*	*	15°	14	5.56	2.8	2	
	JOMT06T215ZZSR-JM	M	*	*	*	13°	6.35	2.78	1.2	1.5	
	080320ZZSR-JM	M	*	*	*	13°	8	3.18	1.4	2	
	JDMT09T320ZDSR-JM	M	*	*	*	15°	9.525	3.97	1.8	2	
	120420ZDSR-JM	M	*	*	*	15°	12	4.76	2.5	2	
	140520ZDSR-JM	M	*	*	*	15°	14	5.56	2.8	2	

(Nota) A altura da montagem para o quebra-cavaco ST é totalmente diferente da altura para os outros quebra-cavacos.
Se você utilizar quebra-cavaco ST, verifique a altura da montagem.

FRESAMENTO

ADAPTADORES PARA CABEÇAS ROSCADAS > L147
 ACESSÓRIOS > P001
 INFORMAÇÕES TÉCNICAS > Q001

L089

Fonte: adaptado Catalogo Geral, MITSUBISHI, 2011-2012, p.1053.

FRESAS DE METAL DURO SPEEDOTECH

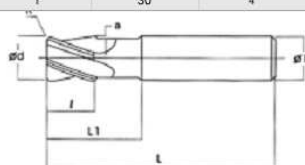
Speedotech Carbide End Mills Line



CMR - FRESA DE METAL DURO TOROIDAL

CMR - Corner Radius End Mill

Código Code	d	l	D	L	Raio Radius	L1	Nº de cortes Flute Numbers	
CMR-0205	2	4	4	50	0.5	8	4	●
CMR-0305	3	6	4	50	0.5	10	4	●
CMR-0405	4	8	4	50	0.5	12	4	●
CMR-0410	4	8	4	50	1	12	4	●
CMR-0505	5	8	6	50	0.5	12	4	●
CMR-0605	6	8	6	50	0.5	12	4	●
CMR-0610	6	8	6	50	1	12	4	●
CMR-0805	8	10	8	60	0.5	15	4	●
CMR-0810	8	10	8	60	1	15	4	●
CMR-1005	10	12	10	75	0.5	20	4	●
CMR-1010	10	12	10	75	1	20	4	●
CMR-1205	12	15	12	75	0.5	30	4	●
CMR-1210	12	15	12	75	1	30	4	●



Fonte: Adaptado Catalogo Alltech Tools, 2012, p. 29.

CLB - FRESA DE METAL DURO TOPO ESFÉRICO LONGA

CLB - Long Shank Ball Nose End Mill

Código Code	d	l	D	L	Raio Radius	Nº de cortes Flute Numbers	
CLB-0102	1	2	4	75	0.5	2	●
CLB-0152	1.5	3	4	75	0.75	2	●
CLB-0202	2	4	4	75	1	2	●
CLB-02042	2	4	4	100	1	2	●
CLB-0252	2.5	5	4	75	1.25	2	●
CLB-03042	3	6	4	100	1.5	2	●
CLB-0302	3	6	6	75	1.5	2	●
CLB-0402	4	8	6	75	2	2	●
CLB-04042	4	8	4	100	2	2	●
CLB-0502	5	10	5	75	2.5	2	●
CLB-05052	5	10	5	100	2.5	2	●
CLB-0602	6	12	6	75	3	2	●
CLB-06062	6	12	6	100	3	2	●
CLB-0802	8	16	8	75	4	2	●
CLB-08062	8	16	8	100	4	2	●
CLB-1002	10	20	10	100	5	2	●
CLB-10062	10	20	10	150	5	2	●
CLB-1202	12	24	12	100	6	2	●
CLB-12062	12	24	12	150	6	2	●



26



● EM ESTOQUE / Stock Items
○ CONSULTAR / Consult

Fonte: Adaptado Catalogo Alltech Tools, 2012, p. 26.

FRESAS DE METAL DURO SPEEDOTECH

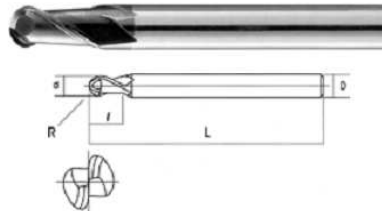
Speedotech Carbide End Mills Line



CMB - FRESA DE METAL DURO TOPO ESFÉRICO

CMB - Ball Nose End Mill

Código Code	d	l	D	L	Raio Radius	Nº de cortes Flute Numbers	
CMB-0102	1	2	4	50	0,5	2	●
CMB-0152	1,5	3	4	50	0,75	2	●
CMB-0202	2	4	4	50	1	2	●
CMB-0252	2,5	5	4	50	1,25	2	●
CMB-0302	3	6	4	50	1,5	2	●
CMB-0402	4	8	4	50	2	2	●
CMB-0502	5	10	5	50	2,5	2	●
CMB-0602	6	12	6	50	3	2	●
CMB-0802	8	16	8	60	4	2	●
CMB-1002	10	20	10	75	5	2	●
CMB-1202	12	24	12	75	6	2	●



Fonte: Adaptado Catalogo Alltech Tools, 2012, p. 26.

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre/Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob o n° 157

Resultados (Conf. Cota)

Resultados

Cota	Valor Nominal	Unidade	Valor Médio Obtido	k	U
1	31,00 ± 0,02 (C3)	mm	30,982	2,01	0,003
2	0,00 ± 0,02 (C3)	mm	0,000	2,01	0,003
3	31,00 ± 0,02 (C3)	mm	30,986	2,01	0,003
4	81,90 ± 0,02 (C3)	mm	81,891	2,01	0,003
5	50,90 ± 0,02 (C3)	mm	50,887	2,01	0,003
6	19,90 ± 0,02 (C3)	mm	19,903	2,01	0,003
7	6,50 ± 0,02 (C3)	mm	6,490	2,01	0,003
8	∅ 70,00 ± 0,02 (C3)	mm	69,985	2,01	0,003
9	5,00 ± 0,02 (C2)	mm	5,003	2,01	0,003
10	36,00 ± 0,02 (C2)	mm	35,995	2,01	0,003
11	67,00 ± 0,02 (C2)	mm	66,980	2,01	0,003
12	72,00 ± 0,02 (C2)	mm	71,986	2,01	0,003
13	41,00 ± 0,02 (C2)	mm	41,015	2,01	0,003
14	10,00 ± 0,02 (C2)	mm	10,010	2,01	0,003
15	6,50 ± 0,02 (C2)	mm	6,486	2,01	0,003
16	∅ 70,00 ± 0,02 (C2)	mm	69,982	2,01	0,003
17	10,00 ± 0,02 (C1)	mm	10,009	2,01	0,003
18	41,00 ± 0,02 (C1)	mm	40,995	2,01	0,003
19	72,00 ± 0,02 (C1)	mm	71,994	2,01	0,003
20	67,00 ± 0,02 (C1)	mm	66,992	2,01	0,003
21	36,00 ± 0,02 (C1)	mm	35,983	2,09	0,003
22	5,00 ± 0,02 (C1)	mm	4,995	2,01	0,003
23	6,50 ± 0,02 (C1)	mm	6,489	2,01	0,003
24	∅ 70,00 ± 0,02 (C1)	mm	69,996	2,01	0,003
25	200,00 ± 0,02 (Comp.)	mm	199,990	2,01	0,003
26	200,00 ± 0,02 (Larg.)	mm	200,006	2,01	0,003
27	35,00 ± 0,02 (Esp.)	mm	35,010	2,01	0,003

Página 2 de 2.

As informações apresentadas neste documento referem-se ao objeto dele caracterizado, não sendo extensivas a quaisquer outros itens. Este documento somente pode ser reproduzido em sua forma integral, reprodução parcial deve ser previamente autorizada pela Aferitec. A incerteza expandida de medição U relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, e qual possui uma distribuição com graus de liberdade efetivos ν_{eff} correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-402. Os valores de k e ν_{eff} são apresentados na tabela de resultados.

ANEXO F: Relatório de Medição de Rugosidade, N°. 29392-102.



RELATÓRIO DE MEDIÇÃO N° 29392-102

Laboratório de Medidas Dimensionais**Contratante***Contracting*

Nome : Mecânica Ranaq Ltda - ME

Name

Endereço : Estrada Vicinal Vereador Giovani Costa, 717 - Laranjal Paulista - SP - CEP 18.500-000

*Address***Objeto da Medição***Mensuration's Object***Descrição** : Placa de Ensaio*Description***Valor de uma divisão** : N.A*Scale interval***Unidade** : Conf. Cota*Unit***Identificação** : RNQ-PE-01*Identification***Protocolo** : 3238-12*Protocol***N° de Série** : RNQ-PE-01*Serial number***Fabricante** : RANAQ*Manufacturer***Usuário** : -*User***Padrões de referência***Reference standard*

Rugosímetro; PD-038; Cert. nº 5033/11; Val. set/2013; Rastreabilidade - CAL 0034

Termômetro de Líquido em Vidro; PT-016; Cert. nº 357-12; Val. set/2016; Rastreabilidade - CAL 0157

Procedimento de Medição*Mensuration's Procedure*

A medição foi realizada conforme requisitos estabelecidos em desenho técnico ou norma. A medição foi realizada conforme nosso procedimento de calibração PC-124 revisão 008.

Data da medição: 26/09/2012*Date of mensuration***Data da emissão:** 28/09/2012*Date of emission***Condições Ambientais***Environmental conditions*

Temperatura : (20,0 ± 1,0) °C

Notas*Notes*

Os resultados apresentados neste documento foram obtidos sem a realização de ajuste do objeto calibrado.

As medições foram realizadas conforme desenho nº RNQ/PE/01

Executante: Maurício Roberto Oliveira Franco

Laboratório de Medidas Dimensionais

Resultados (Conf. Cota)

Result

Cota	Valor Nominal	Unidade	Valor Médio Obtido	k	U
1	Ra - LE - (C3)	µm	0,562	4,53	0,123
2	Rz - LE - (C3)	µm	3,267	2,14	0,337
3	Ra - LD - (C3)	µm	0,572	2,65	0,048
4	Rz - LD - (C3)	µm	3,590	2,15	0,341
5	Ra - SUP. - (C3)	µm	0,602	4,53	0,205
6	Rz - SUP. - (C3)	µm	3,533	2,87	0,646
7	Ra - INF. - (C3)	µm	0,608	4,53	0,153
8	Rz - INF. - (C3)	µm	3,720	2,18	0,352
9	Ra - LE - (C1)	µm	0,610	2,43	0,040
10	Rz - LE - (C1)	µm	3,833	2,05	0,293
11	Ra - LD - (C1)	µm	0,634	2,18	0,031
12	Rz - LD - (C1)	µm	3,987	2,01	0,270
13	Ra - SUP. - (C1)	µm	0,606	2,02	0,025
14	Rz - SUP. - (C1)	µm	3,887	2,15	0,339
15	Ra - INF. - (C1)	µm	0,642	3,31	0,077
16	Rz - INF. - (C1)	µm	3,727	2,04	0,292
17	Ra - LE - (C2)	µm	0,649	2,37	0,038
18	Rz - LE - (C2)	µm	3,547	2,10	0,318
19	Ra - LD - (C2)	µm	0,621	2,09	0,028
20	Rz - LD - (C2)	µm	3,817	2,08	0,310
21	Ra - SUP. - (C2)	µm	0,604	2,10	0,028
22	Rz - SUP. - (C2)	µm	3,863	2,02	0,274
23	Ra - INF. - (C2)	µm	0,589	2,65	0,046
24	Rz - INF. - (C2)	µm	3,803	2,03	0,281

Página 2 de 2:

As informações apresentadas neste documento referem-se ao objeto nele caracterizado, não sendo extensivas a quaisquer outros itens. Este documento somente pode ser reproduzido em sua forma integral, reprodução parcial deve ser previamente autorizada pela Aferitec. A incerteza expandida de medição U relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos ν_{eff} corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 99%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-402. Os valores de k e ν_{eff} são apresentados na tabela de resultados.