

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP**

**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA - NUMA**

**PRÁTICAS EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO**

**PRÁTICA 3 – FABRICAÇÃO EM CENTROS DE USINAGEM**

Prof. Tit. REGINALDO T. COELHO

Prof. Tit.. JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA

Prof. Dr. ERALDO JANONNE DA SILVA

Fevereiro 2015

## ÍNDICE

<b>3.1 - A MÁQUINA .....</b>	<b>3</b>
<b>3.2 - DISPOSITIVOS DE ALIMENTAÇÃO E FIXAÇÃO DA PEÇA .....</b>	<b>8</b>
<b>3.3 - AS FERRAMENTAS .....</b>	<b>9</b>
<b>3.4 - PROGRAMAÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>3.5 - INTEGRAÇÃO CAD-CAM .....</b>	<b>16</b>
5.1 - SISTEMAS CAD .....	20
5.2 - SISTEMAS CAM .....	21
5.3 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A OPERAÇÃO DE DESBASTE NA USINAGEM COM CAM .....	27
5.4 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A OPERAÇÃO DE ACABAMENTO NA USINAGEM USANDO CAM .....	28
<b>3.6 QUESTÕES.....</b>	<b>30</b>
<b>ANEXO 1 - COMANDOS CNC PARA CENTRO DE USINAGEM .....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXO 2 - EXEMPLO DE PROGRAMA CNC PARA CENTRO DE USINAGEM .....</b>	<b>33</b>
<b>ANEXO 3 - RECOMENDAÇÕES PARA VELOCIDADE DE CORTE (M/MIN) .....</b>	<b>34</b>
<b>ANEXO 4 - VALORES DE ORIENTAÇÃO PARA RUGOSIDADE.....</b>	<b>35</b>

### **3.1 - A MÁQUINA**

A descrição apresentada no texto da Prática 1 mostra bem as características mecânicas de uma fresadora convencional e de uma furadeira. Essas máquinas evoluíram ao longo das décadas, até que ao final dos anos 60, quando se iniciou a produção das fresadoras de comando numérico. A sigla CNC surgiu nos anos 70/80, com o advento do controle ser efetuado por computador e mais tarde conectado a uma rede local. Com o passar do tempo as fresadoras passaram a realizar também operações de furação, mandrilamento e interpolações complexas e passaram a ser chamadas de Centros de Usinagem CNC

Atualmente, as principais características desse tipo de máquina são:

- a) Eixos de deslocamento da ferramenta, bem como seu eixo árvore, são acionados por servo motores,
- b) Estrutura desenhada de forma a auxiliar a saída dos cavacos da área de corte,
- c) Sistema de fluido de usinagem dispõe de dispositivos especiais de forma a garantir, para cada sub-operação, que a ponta ativa da ferramenta seja atingida, há sistemas de injeção de fluido por dentro das ferramentas,
- d) As ferramentas são montadas em um sistema de magazine que permite a troca rápida e
- e) As operações são realizadas por meio de programas elaborados em linguagem G normalizada.

A Figura 3.1 mostra imagens de centros de usinagem CNC fabricados no Brasil e a Figura 3.2 o sistema de coordenadas padronizado:



Figura 3.1 – Exemplos de centros de usinagem

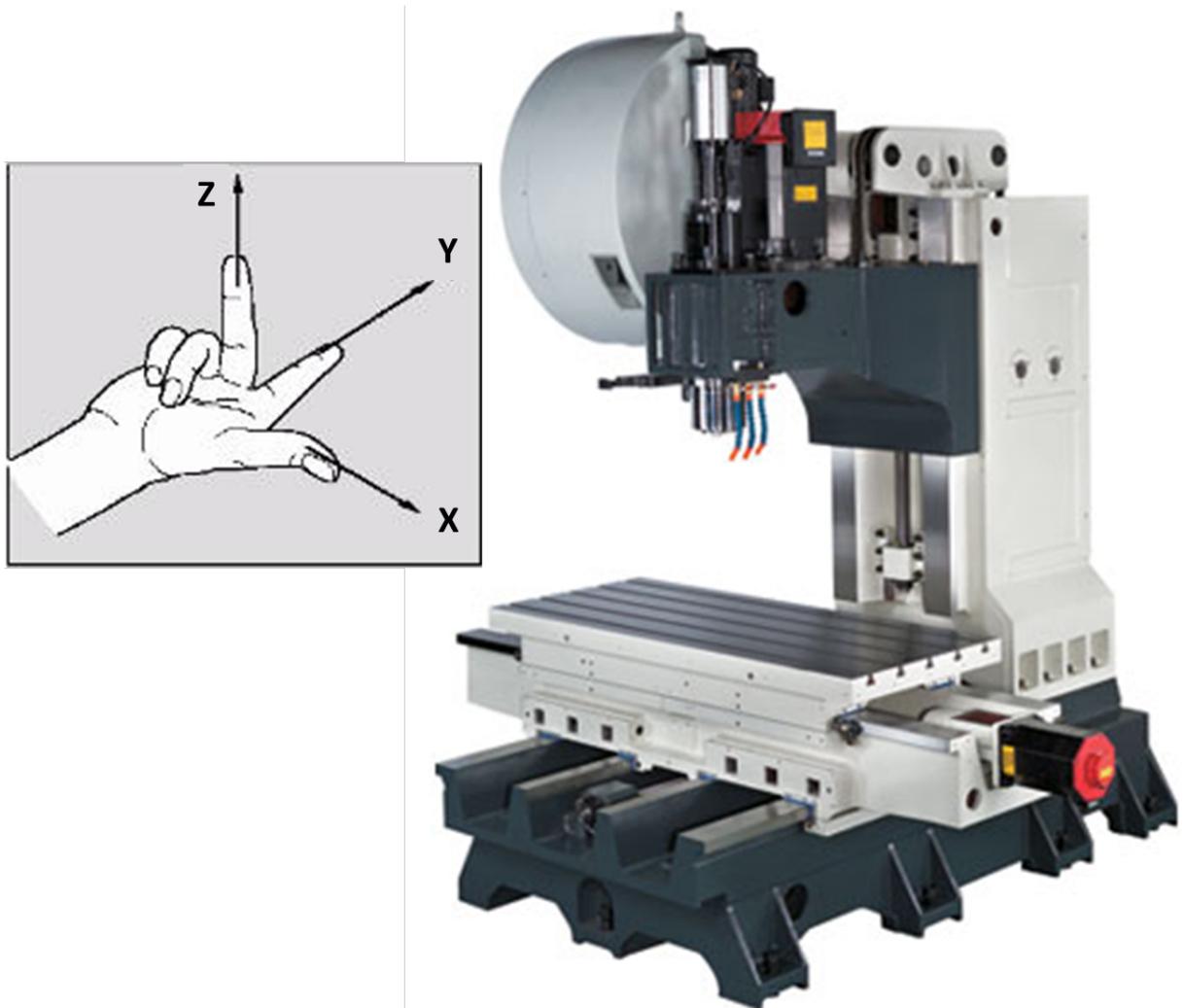


Figura 3.2 – Sistema de coordenadas de um Centro de Usinagem CNC de 3 eixos

As configurações dos centros de usinagem CNC podem variar, mas basicamente tem-se máquinas com eixo-árvore horizontal ou vertical, com 3, 4 ou 5 eixos acionados. A Figura 3.3 mostra centros de usinagem com eixo-árvore vertical e horizontal.

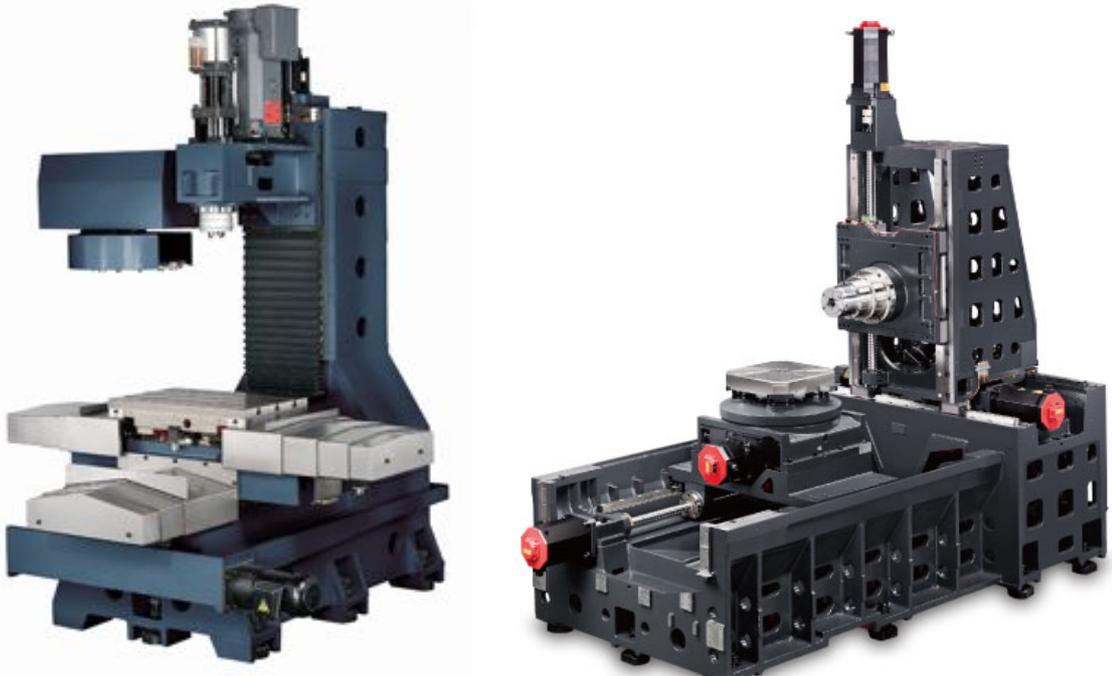


Figura 3.3 – Exemplos de centros de usinagem com eixo-árvore vertical e horizontal.

Em geral, há vantagens e desvantagens nas duas configurações: centros verticais tendem a ser dinamicamente mais estáveis em serviço e centros horizontais são mais versáteis para automação e remoção de cavacos. A disposição dos 3 eixos também é objeto de variações nos centros de usinagem ofertados ao mercado. Os arranjos mais comuns foram apresentados até aqui, mas a Figura 3.4 mostra variações importantes.

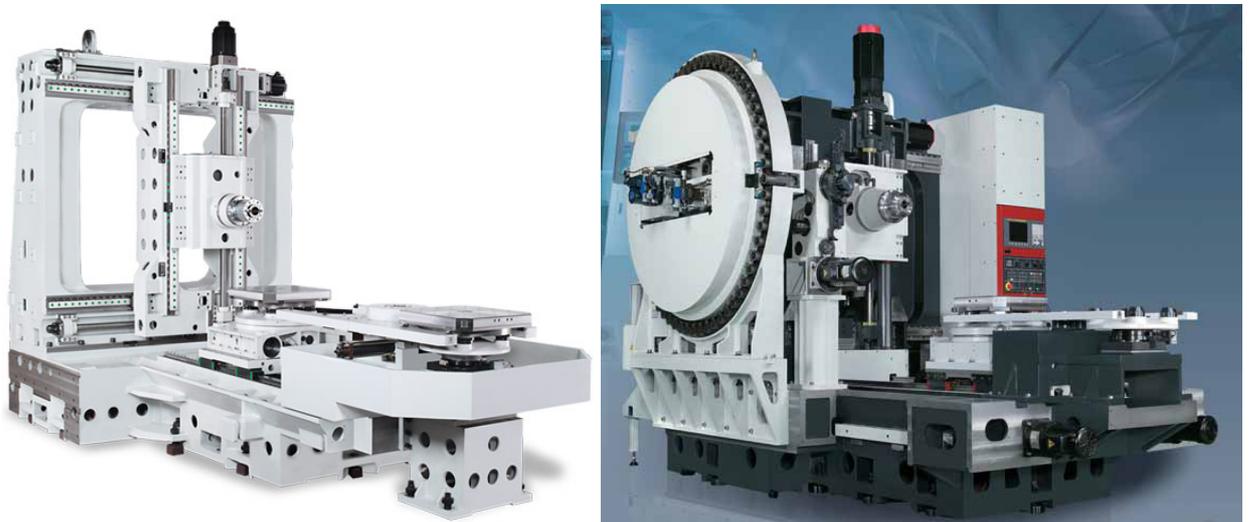
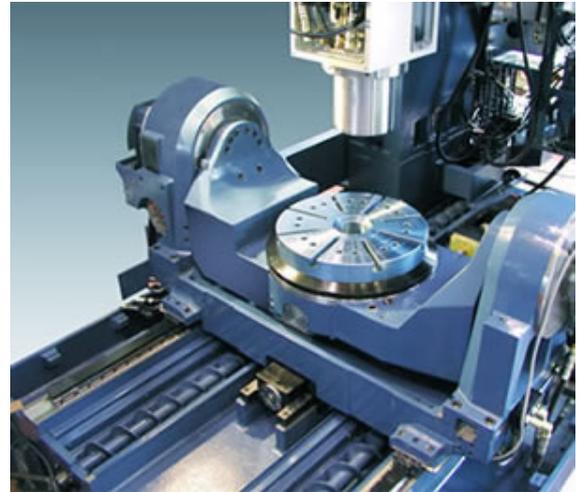


Figura 3.4 – Exemplos de variações na configuração estrutural de centros de usinagem de 3 eixos.

Até este ponto somente configurações de 3 eixos foram apresentadas, mas a Figura 3.5 mostra exemplos de centros com 4 e 5 eixos acionados.



(a) Centro de usinagem com 4 eixos



(b) Centro de usinagem com 5 eixos

Figura 3.5 – Exemplos de centros de usinagem com 4 e 5 eixos acionados.

Na Figura 3.5a observa-se que o quarto eixo acionado é composto por um cabeçote com placa de 3 castanhas e contraponto. O cabeçote é capaz de girar e se o CNC permitir, pode ser acionado simultaneamente aos outros 3 eixos coordenados. Certas máquinas possuem 3 $\frac{1}{2}$  eixos, devido ao fato do 4º eixo não permitir interpolações simultâneas com os outros 3. Na Figura 3.5b observa-se um exemplo de um centro com 5 eixos, sendo o 4º eixo uma estrutura do tipo berço que oscila no plano Z-Y e o 5º eixo compreende uma mesa giratória no centro do berço. Esta é uma configuração estrutural possível, mas não a única possível. O objetivo com as variações na configuração estrutural de centros de usinagem é alcançar uma rigidez estática e dinâmica aceitável para as operações de usinagem possíveis em um centro de usinagem, aliada a uma precisão de posicionamento máxima, ao mesmo tempo que permita acesso a todas as 5 faces da peça presa na mesa. A Figura 3.6 exemplifica outras configurações possíveis em um centro de usinagem com 5 eixos.

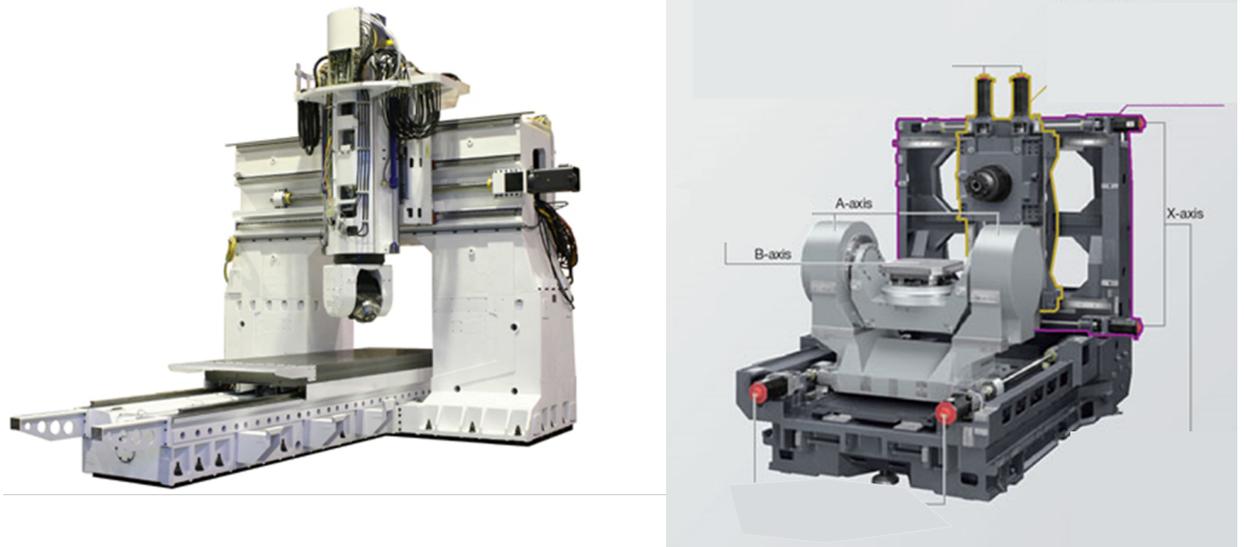


Figura 3.6 – Exemplos de centros de usinagem com 5 eixos de diferentes configurações.

Há máquinas cujos deslocamentos X e Y são realizados pela mesa da máquina e o movimento em Z pelo eixo-árvore, como na Figura 3.2. No entanto, essa configuração pode variar muito de acordo com as necessidades e conveniências dos fabricantes em função adequação ao mercado a que se destina o produto. A Figura 3.7 mostra outras configurações possíveis para centros de usinagem de 3 eixos.

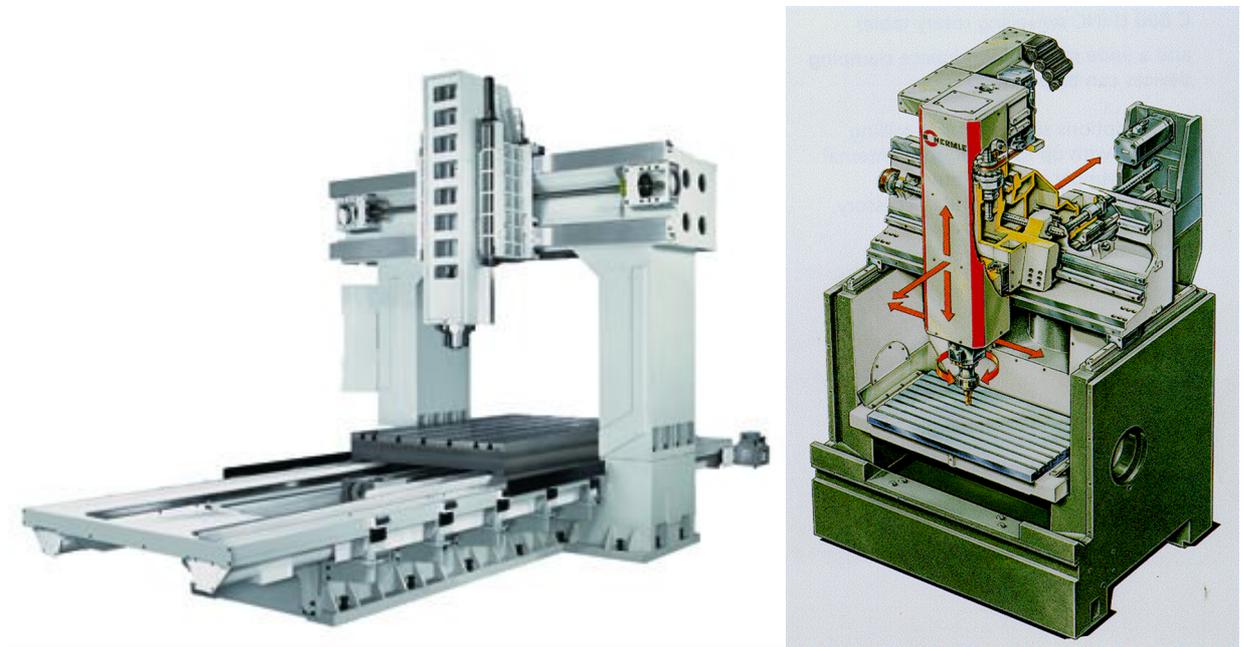


Figura 3.7 – outras duas possíveis configurações de eixos para centros de usinagem.

Mais configurações são possíveis, mas todas têm em comum as demandas e necessidades dos mercados a que as máquinas se destinam.

### 3.2 - DISPOSITIVOS DE ALIMENTAÇÃO E FIXAÇÃO DA PEÇA

Nos Centros de Usinagem as peças são, em geral, fixadas à mesa da máquina. É possível fixá-las em morsas ou diretamente com o uso de parafusos e dispositivos encaixados nos rasgos em forma de T disponíveis nas mesas. A Figura 3.8 mostra exemplos de fixação por meio de morsas

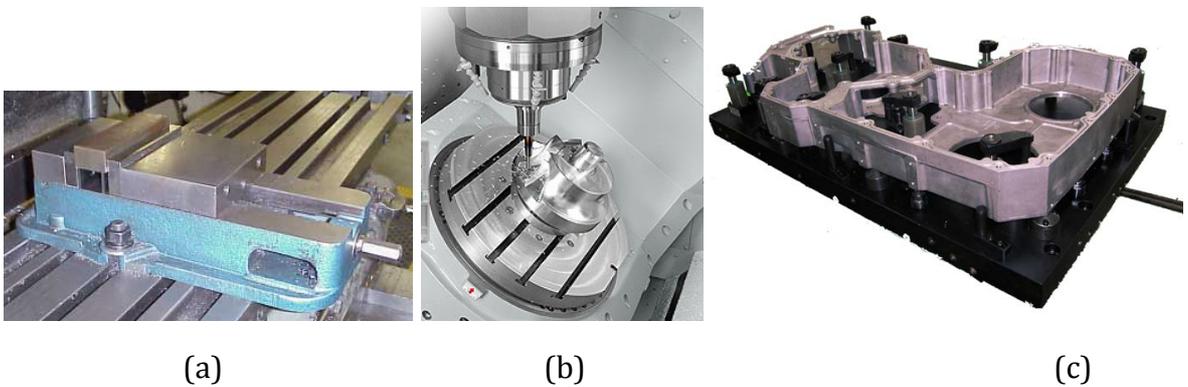
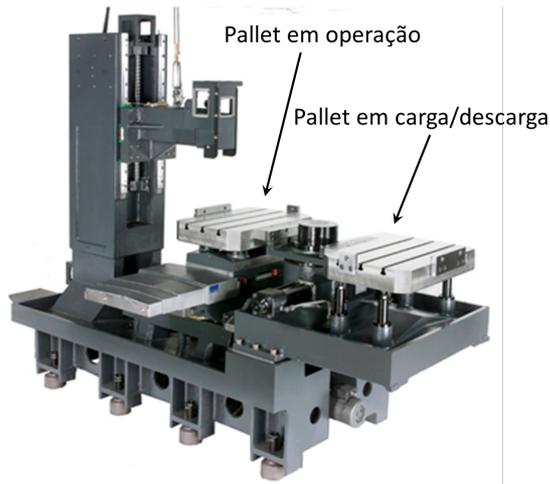


Figura 3.8 – Fixação de peças (a) por meio de morsa; (b) por rasgos T ; (c) com dispositivos especiais para usinar em centro de usinagem

Como as máquinas CNC são especialmente empregadas para a fabricação de grandes lotes de peças em mercados bastante concorridos, há também a possibilidade de utilizar dispositivos automatizados, ou robôs, para a carga e descarga de peças no centro de usinagem. Para facilitar a carga/descarga e a localização precisa das peças, usam-se também *pallets* especialmente projetados para cada família de produtos. Com o uso de dois *pallets*, por exemplo, as peças podem ser fixadas em conjuntos pelo operador em um deles, enquanto o outro está inserido no campo de trabalho com suas peças em usinagem. A Figura 3.9 mostra um exemplo de fixação por meio de *pallets*.



(a)



(b)

Figura 3.9 – Exemplo de uso de *pallets* para aumento da produtividade. (a) dois pallets; (b) Múltiplos pallets.

Outros tipos de fixação mais complexos também podem ser usados, conforme as necessidades e especificações dos produtos, sempre com vistas a aumentar a produtividade.

### 3.3 - AS FERRAMENTAS

Um centro de usinagem pode utilizar fresas, brocas, cabeçotes de mandrilamento, ferramentas especiais, etc., para sua operação. Da mesma forma que no torneamento CNC, as ferramentas utilizadas em centros de usinagem têm características especiais. Utilizam-se materiais para as ferramentas com maior resistência ao desgaste, como o carbeto de tungstênio (WC) ou as cerâmicas, com o objetivo de minimizar a frequência de substituição das ferramentas desgastadas. A Figura 3.10 mostra alguns exemplos típicos de ferramentas usadas em centros de usinagem.

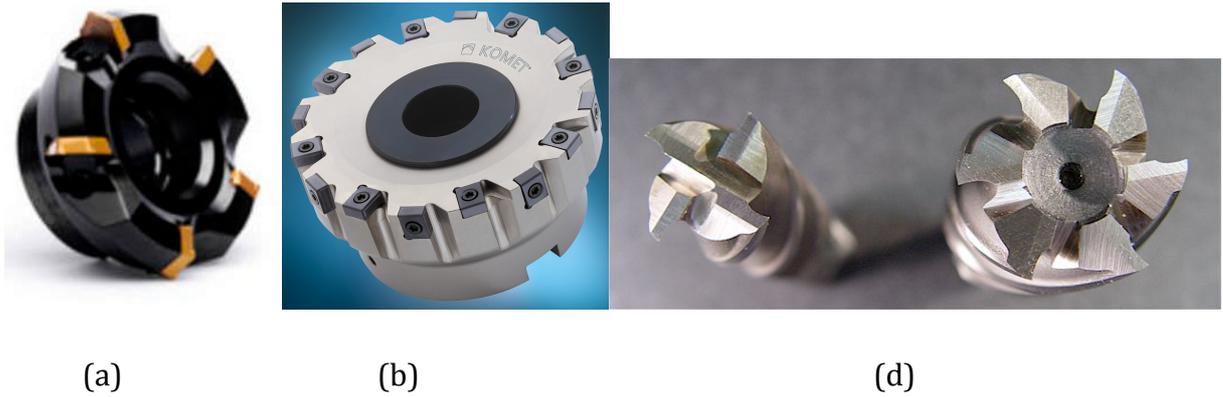


Figura 3.10 – Exemplos típicos de ferramentas usadas em centros de usinagem. (a) Cortador em 4 insertos de WC; (b) Cortador com vários insertos; (c) Fresas de topo maciças

Em geral, ferramentas de fresamento para centros de usinagem empregam cortadores com insertos indexados, ou fresas maciças de WC, sendo estas últimas com diâmetro máximo em torno de 25 mm, devido aos seus altos custos. Os cortadores devem ser montados em mandris que se fixam ao eixo-árvore dos centros de usinagem e as possibilidades dessa fixação cortadores-mandris são muito variadas. A Figura 3.11 mostra um exemplo dessas possibilidades.



Figura 3.11 – Exemplos de sistemas de fixação para cortadores.

Para as fresas maciças os sistemas de fixação são mais específicos. O sistema mais comum de se fixar fresas de topo maciças é a pinça. Trata-se de uma “luva cônica flexível” com seu diâmetro interno paralelo ligeiramente maior do que a fresa a ser fixada e diâmetro externo cônico. Ao ser pressionada axialmente contra o mandril contendo um cone ajustado ao da pinça esta contrai o diâmetro interno, fixando a fresa maciça. A Figura 3.12 mostra um exemplo desse sistema.



Figura 3.12 – Sistema de pinça para fixação de fresas.

O sistema de pinça exige um conjunto dessas peças, em geral a cada 1 mm de diâmetro, desde 3 a 15 mm, devido ao seu curto curso de contração. É bastante versátil e rápido sendo por essa razão muito popular. No entanto, os desvios de batimento da fresa montada não atingem valores menores do que alguns milésimos de milímetros. Quando tal precisão de giro é necessária, outros sistemas devem ser empregados. Dois deles são os mais comuns: o hidráulico e o de contração térmica. O sistema hidráulico usa uma pinça com paredes mais finas (da ordem de 1 mm) e são precisamente ajustadas no mandril e na fresa. Não há cones, mas uma camisa envolvida por óleo, o qual é pressionado contra a camisa, a qual, por sua vez pressiona a fresa e a prende. O sistema de contração térmica se utiliza da expansão térmica dos metais. O mandril contém um furo com alguns milésimos de milímetro maior do que o diâmetro da fresa. Este é aquecido até que a fresa possa caber no

furo. A ser resfriado contrai e fixa fresa. Este último se mostra como o melhor em termos de desvios de batimento. No entanto, devido aos curtíssimos cursos de atuação desses dois sistemas de fixação, eles demandam um conjunto muito maior de luvas, ou de mandris, para abranger toda a gama de ferramentas de diferentes diâmetros. Em geral, os sistemas de contração térmica demandam um mandril para cada ferramenta e seu reuso é bastante limitado, sendo usado somente onde as necessidades de baixíssimos desvios de batimento são necessárias. Microfresamento, por exemplo, é uma das mais comuns aplicações para o sistema de contração térmica. A Figura 3.13 mostra exemplos desses dois tipos de fixação para fresas.

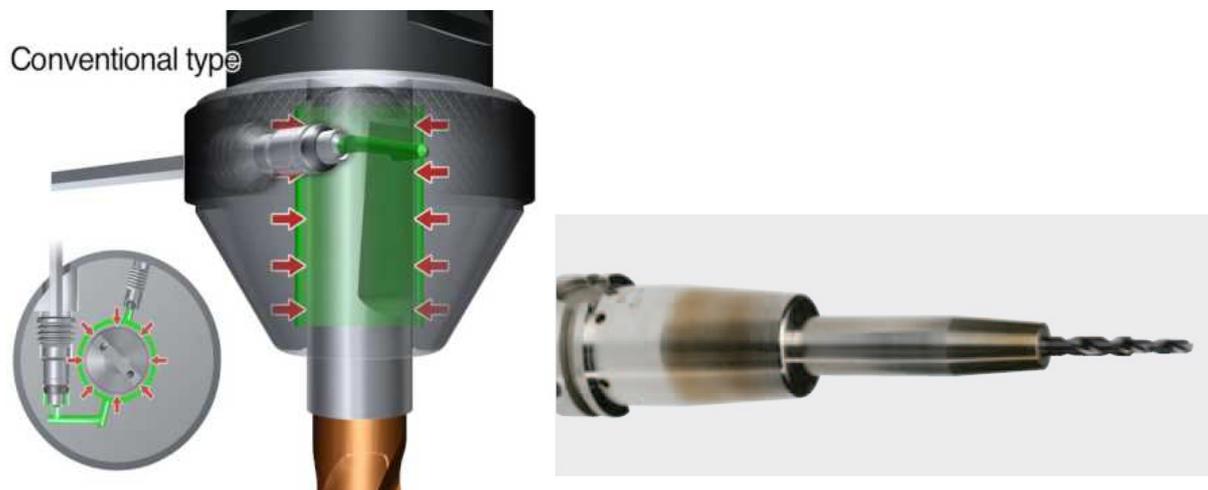


Figura 3.13 – Exemplos de sistemas de fixação hidráulica e por contração térmica.

A fixação das ferramentas no eixo-árvore deve ser por meio de dispositivos específicos com cones para minimizar os erros de batimento. Dois são os tipos de fixação mais comuns para centros de usinagem: O tipo cone ISO, ou BT, e o tipo HSK. O cone do tipo ISO é o mais antigo e mais popular entre os fabricantes de máquinas-ferramentas. Tem uma boa precisão e segurança, mas quando a rotação do eixo-árvore passa de cerca de 25.000 rpm, a “força centrífuga” começa a deformar os metais na interface entre o cone do mandril e a luva do eixo-árvore. Isso pode afetar a segurança desse tipo de fixação, além de afetar desvio de batimento. Para solucionar esse problema surgiu o sistema HSK, cuja extensão de contato é menor e tem uma flexibilidade maior, permitindo maiores deformações elásticas sem perda de contato na interface. A Figura 3.14 mostra esses dois tipos de fixação no eixo-árvore.



(a) Cone tipo ISO

(b) Cone tipo HSK

Figura 3.14 – Exemplos de sistema de fixação no eixo-árvore. (a) ISO e (b) HSK.

Após a montagem da fresa no mandril o conjunto todo deve ser montado no eixo-árvore. Antes de se iniciar qualquer operação de usinagem, as dimensões da ferramenta devem ser informadas ao CNC. Esta operação, em geral, é chamada de “set up da ferramenta”, e pode ser resumida como a informação das duas dimensões que definem a ferramenta para o CNC: seu diâmetro e comprimento. Esta operação pode ser realizada de forma manual, ou automática. De forma manual deve-se medir o diâmetro de trabalho da ferramenta e o comprimento do conjunto, desde a face de encosto no eixo-árvore (nariz da máquina) até a ponta mais distante. Estas duas dimensões podem ser digitadas diretamente no CNC, na área apropriada. De forma automática é realizada quando a máquina possui um sistema automático de “set up de ferramentas”. Para isso instala-se um sensor na mesa da máquina, cuja posição é conhecida. Aproxima-se a ferramenta desse sensor e usando-se uma rotina própria da máquina executa-se a medição. A rotina aproxima a ferramenta do sensor até que o toque, ou receba um sinal elétrico de que localizou o diâmetro, ou comprimento. Para maior exatidão na dimensão esse procedimento pode ser realizado com a ferramenta girando. Neste caso não é necessária a digitação dos valores de diâmetro e comprimento, uma vez que a própria rotina transfere as dimensões para a memória do CNC. A Figura 3.15 mostra um exemplo da ferramenta sendo medida.



Figura 3.15 – Exemplo de medição automática da ferramenta em um centro de usinagem.

A medição das dimensões da ferramenta pode ser realizada com precisão 1 a 20 mm, dependendo do sistema de medição e das necessidades da operação.

A usinagem de uma única peça em um centro de usinagem na maioria das vezes envolve o uso de diversas ferramentas. Assim, uma das principais distinções desta máquina em relação a uma fresadora é a possibilidade de se trocar de ferramentas automaticamente, sem a intervenção do operador da máquina. Para isso o centro de usinagem é equipado com um sistema de troca automática e um magazine de ferramentas. Durante programação pode-se selecionar diversas ferramentas para que a usinagem seja completada sem intervenção do operador, com um mínimo de tempo, de forma mais produtiva. A figura 3.16 mostra exemplos de magazines de troca de ferramentas para centros de usinagem.

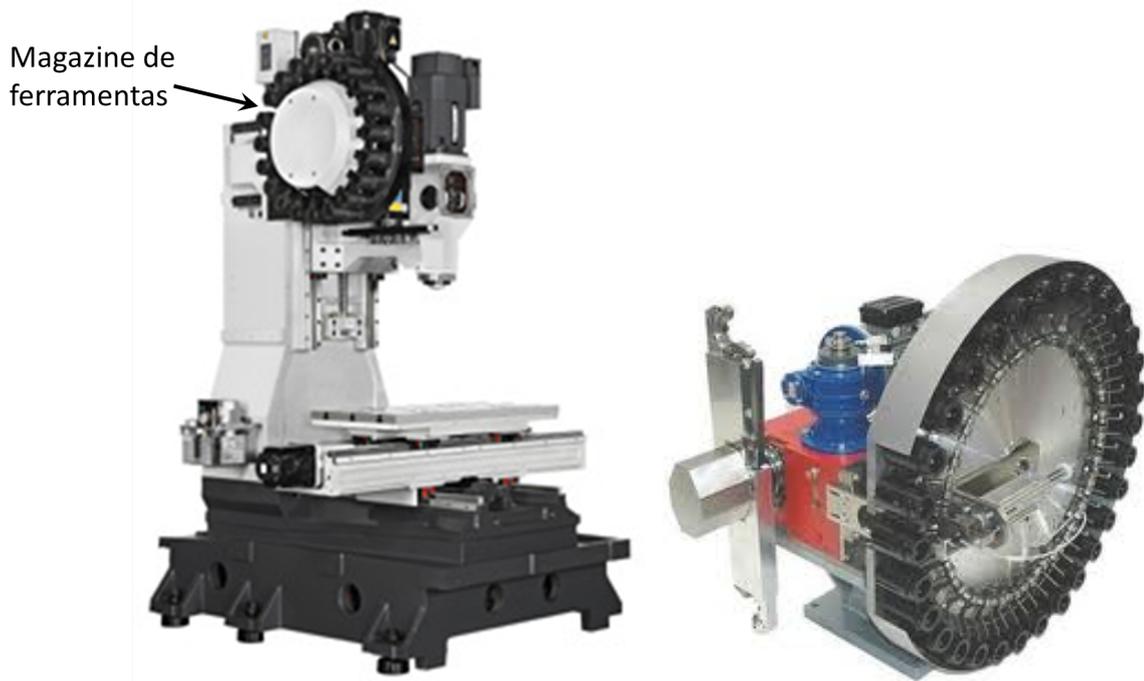


Figura 3.16 – Exemplo de magazine de ferramentas em um centro de usinagem.

### **3.4 – PROGRAMAÇÃO**

Da mesma forma como ocorre no torneamento CNC, nos centros de usinagem é essencial que o processo seja totalmente planejado antes do início da produção. Para isso, inicia-se especificando-se as ferramentas a serem utilizadas, medindo-as e as montando na máquina. O programa CNC pode então ser realizado considerando a posição de cada ferramenta no magazine. O programa é normalmente feito por meio de um sistema CAM, ou manualmente, se for a usinagem for de baixa complexidade.

O Anexo 1 mostra uma lista de comando usados em programas. Em um programa cada bloco (linha de comando) inicia-se com um número sequencial. Em seguida podem ser adicionados comandos do tipo G (Funções preparatórias destinadas a movimentar os sistemas da máquina, ligar sistemas auxiliares ou definir unidades e coordenadas absolutas ou relativas), do tipo T (destinados às trocas de ferramentas), do tipo M (funções miscelânea para definição de sentido de rotações, fim de programas, parâmetros) e parâmetros do tipo F (velocidade de avanço), S (velocidades de rotação), etc. O anexo 2 traz um exemplo de programa CNC para centros de usinagem.

Para programar, o usuário deve idealizar uma sequência de passos que possa ser representada pelo programa. A partir daí escreve-se a sequência de blocos de forma a cumprir todas as etapas do processo. O programa precisa então ser testado e posteriormente transferido para a máquina para sua execução.

### **3.5 – INTEGRAÇÃO CAD-CAM**

As primeiras aplicações de computadores para auxiliar as etapas de engenharia tiveram início na década de 50, quando o Instituto Tecnológico de *Massachusetts* (MIT) iniciou a discussão sobre a tecnologia CAD/CAM. Os sistemas CAD desta geração se limitavam à descrição de entidades geométricas em duas dimensões, à criação e manipulação de desenhos em terminais gráficos monocromáticos BÉZIER (1993). Contudo, nesta época estes sistemas CAD já propiciavam várias vantagens, tais como:

- possibilidade de manipulação de desenhos por meios eletrônicos;
- melhor gerenciamento dos desenhos;
- precisão do dimensionamento;
- maior rapidez na recuperação, modificação ou atualização de desenhos.

A utilização de sistemas CAD/CAM foi, por anos, limitada a aplicação em grandes empresas, como aeroespacial e automobilística. Isto ocorria, direta ou indiretamente, pelos custos envolvidos, desde software/hardware até a qualificação da mão de obra, requerendo usuários com maior grau de instrução.

Ao final da década de 90, com o desenvolvimento de um sistema operacional robusto para aplicação em PCs (Windows NT), houve uma migração das empresas que desenvolviam seus sistemas CAD/CAM baseados em sistema operacional UNIX. Este fato, além de reduzir o custo de Hardware, reduziu também a necessidade de usuários extremamente especializados (KONG et al, 2003). A interface padrão Windows é bastante interativa, tornando mais intuitiva a utilização destes sistemas.

Por sua vez, os custos relacionados diretamente aos softwares CAD/CAM também estão bastante acessíveis atualmente, tornando sua utilização viável mesmo para pequenas empresas.

A década de 70 marcou uma nova geração dos sistemas CAD: o desenvolvimento de técnicas computacionais para a representação de objetos tridimensionais. Os sistemas CAD atuais não se restringem apenas à geração e manipulação de desenhos em duas dimensões. Este recurso é considerado somente uma funcionalidade destes sistemas e representa apenas uma pequena parcela dos possíveis benefícios a serem obtidos com a utilização desta tecnologia.

Hoje, um software CAD pode representar uma potente e indispensável ferramenta para a indústria moderna, permitindo, além da geração de desenhos 2D:

- modelar produtos tridimensionais com formas complexas;
- realizar análise de forma geométrica para auxiliar a manufatura;
- realizar análise de interferências entre peças e conjuntos-montado;
- definir volume e centro de massa do produto;
- comunicação com outros softwares, através de interfaces padronizadas.

As primeiras empresas fabricantes de moldes a utilizarem sistemas CAD/CAM no início da década de 80 não obtiveram bons resultados pois; a comunicação entre diferentes sistemas CAD/CAM era ineficiente, e estes sistemas não permitiam a geração de programas NC eficientes (VOLPATO, 1995).

Atualmente, a tecnologia CAD/CAM está exercendo uma influência cada vez mais decisiva na competição industrial, propiciando um aprimoramento na qualidade dos produtos, aumento de produtividade, rapidez na introdução de novos produtos e diminuição considerável de custos.

Um ponto importante a ser destacado, é que com o desenvolvimento desta tecnologia, tornou-se viável a fabricação de produtos contendo formas geométricas complexas. Anteriormente, estes tipos de geometrias eram apenas utilizados em casos especiais.

Para este tipo de fabricação, o sistema CAM necessita de um modelo geométrico tridimensional da superfície a ser usinada. O modelo geométrico do produto a ser fabricado deve ser criado em um sistema CAD que seja capaz de representar objetos em três dimensões, através de um modelo sólido ou de superfícies.

Este modelo é utilizado para os cálculos das trajetórias de ferramenta. A representação em duas dimensões, como era utilizado no passado, não serve como base

geométrica para cálculos de programas NC utilizando um sistema CAM, para a fabricação de formas complexas (SOUZA, 2001).

A partir da década de 80, outros sistemas computacionais tiveram ênfase e foram desenvolvidos para suprir as necessidades de engenharia, com o objetivo de integrar o processo de manufatura por sistemas computacionais (*Computer Integrated Manufacturing - CIM*) (ROZENFELD, 1996). Entretanto, algumas limitações restringiam a utilização prática destes sistemas, como a integração entre eles, custo, gerenciamento e implementação em um ambiente real de trabalho.

Atualmente, com o decorrido desenvolvimento de software e hardware, esta integração se tem de forma mais efetiva. Figura 3.17 ilustra, de forma genérica, alguns softwares de auxílio às etapas de planejamento, manufatura, cálculo e inspeção. Observa-se que o CAD é responsável pela integração desta cadeia.

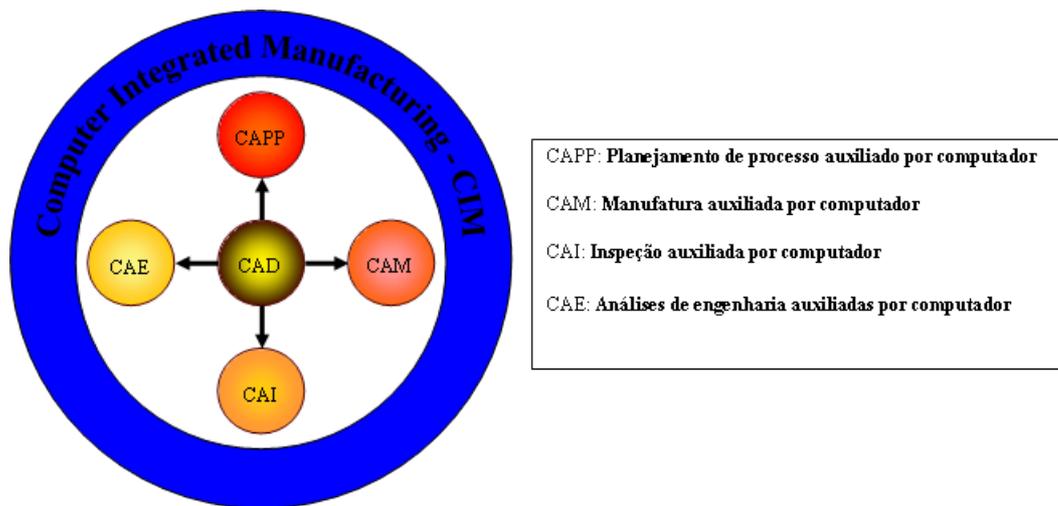


Figura 3.17: Comunicação entre sistemas de auxílio às etapas produtivas

Conforme apresentado por SOUZA e COELHO (2003), para a indústria de moldes e matrizes, atualmente alguns sistemas computacionais podem ser integrados de forma eficiente para auxiliar esta manufatura, como ilustra a Figura 3.18. No início do desenvolvimento de um produto, os sistemas CAD podem ser utilizados para o modelamento de sua forma geométrica, realizado pela equipe de *Design*. Posteriormente, o CAD ainda é empregado para a construção geométrica do molde ou matriz, necessários para a fabricação do produto; em geral, esta etapa é realizada pela engenharia da empresa.

No passo seguinte, a geometria do ferramental definida no CAD poderá ser transferida para um sistema CAE (*Computer Aided Engineering*) para a realização de

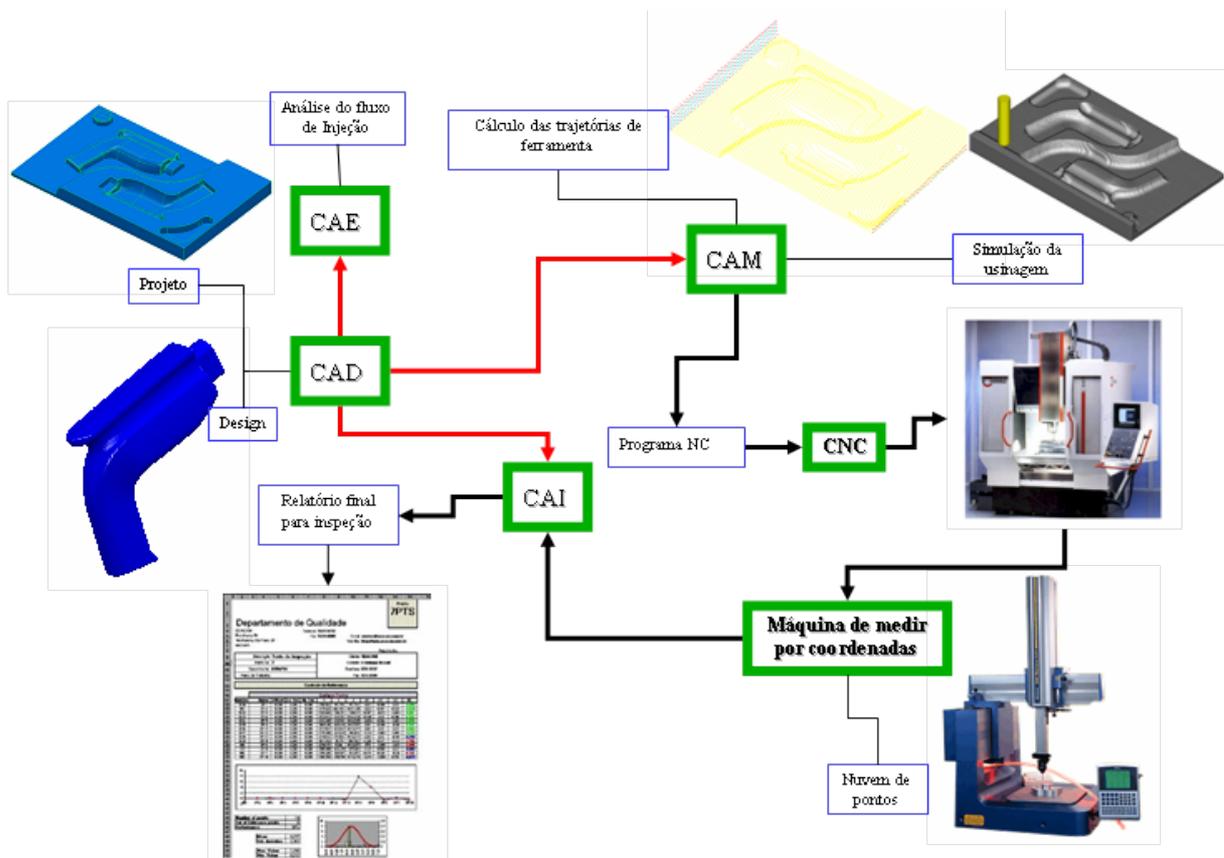
análises mecânicas de funcionamento, como a definição dos pontos de injeção do plástico; refrigeração do molde; linhas de fechamento; análises de estampo; entre outras. Após as análises realizadas pelo CAE, a geometria do ferramental poderá ser transferida para o sistema CAM, com a finalidade de se gerar os programas NC para a usinagem. O ferramental usinado poderá ser inspecionado em uma máquina de medir por coordenadas (MMC), que irá gerar uma nuvem de pontos cartesianos no espaço. Como etapa final deste processo, um sistema CAI (*Computer Aided Inspection*) é utilizado para verificar as imprecisões geométricas entre o modelo projetado no CAD, e a peça final, utilizando a nuvem de pontos gerados na MMC. São documentadas as variações dimensionais entre o projeto e a peça final.

Embora este ciclo de fabricação de moldes e matrizes apresente elevada eficiência, em termos de qualidade e tempos de fabricação, a integração destes sistemas envolve tecnologias recentes, e isto representa um custo inicial elevado.

As geometrias construídas com o software CAD representam um elo de ligação entre os outros sistemas computacionais de auxílio a engenharia. São as informações geométricas provenientes do CAD que estes sistemas utilizam como base de cálculo. Portanto, a correta escolha do software CAD, a ser implantado em um ambiente de trabalho, tem uma importância significativa, não apenas para as etapas de desenho e projeto, mas também para as etapas que se sucedem.

Existe atualmente uma grande variedade de softwares CAD disponíveis no comércio. Cada sistema CAD pode ser mais conveniente para determinada aplicação, o que torna importante o conhecimento desta tecnologia antes de definir um investimento.

Figura 3.18 Integração de sistemas de apoio à fabricação de moldes e matrizes



## 5.1 - Sistemas CAD

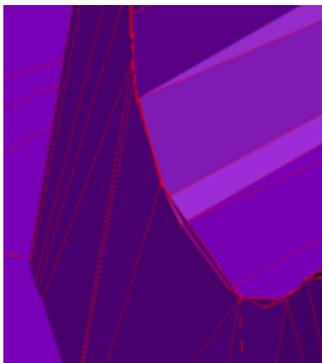
Entre os sistemas CAD capazes de construir objetos tridimensionais, há diferentes métodos empregados para representação gráfica de objetos. A forma de representar objetos está relacionada com o modelador geométrico (*Kernel*), que é o núcleo do software. Este núcleo pode ser caracterizado como softwares CAD modeladores de Sólidos ou Superfícies, com características distintas entre eles, como descrito a seguir. As geometrias tridimensionais criadas com um sistema CAD modelador de sólidos são entidades sólidas, contendo informações volumétricas, superficiais e físicas, como por exemplo, massa, centro de gravidade e inércia (HENRIQUES, 1999).

O softwares modeladores de superfície, por sua vez, fazem uso de formulações matemáticas tipo *Spline*. Esta metodologia permite o modelamento tridimensional de formas geométricas complexas, que é a característica principal desta classe de sistemas CAD (CHANG, 1998).

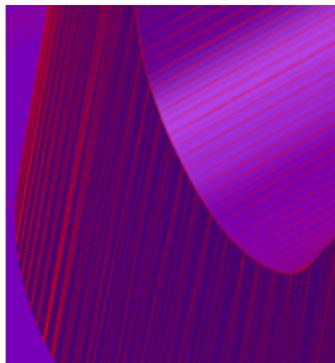
## 5.2 - Sistemas CAM

A utilização de sistemas computacionais para auxílio à manufatura (CAM) associados aos sistemas computacionais de auxílio a projetos (CAD) propiciou uma melhora significativa no processo de fabricação de moldes e matrizes contendo formas geométricas complexas. Para o cálculo dos programas NC em um software CAM, inicialmente é necessário um modelo CAD. Para esta transferência de dados geométricos do CAD para o CAM em softwares desenvolvidos pela mesma empresa, a maioria dos sistemas utiliza-se de uma malha de triângulos gerada sobre a geometria original gerada no CAD, e é esta malha que será utilizada como modelo geométrico para a geração de programas NC (SCHÜTZER e SOUZA, 1999). Este processo que triangulariza a superfície ocorre na maioria dos sistemas, embora em alguns, isto não fique transparente ao usuário (DÜRR e SCHÜNEMMAN, 2000; KNOPPERS e GUNNINK, 2000).

Esta malha de triângulos se aproxima da representação geométrica modelada no CAD através de um valor de tolerância definido pelo usuário, como mostra a Figura 3.19



**Fig a:** Tolerância 1 mm



**Fig b:** Tolerância 0.1 mm

*Figura 3.19: Malha gerada com diferentes tolerâncias*

O inconveniente deste processo está na conversão de uma geometria gerada por um modelo matemático, capaz de representar precisamente qualquer forma geométrica, em segmentos de retas. Desta maneira, é introduzida a primeira tolerância no processo de fabricação.

Quanto menor a tolerância para a triangularização, melhor descrita será a geometria, mas proporcionalmente, aumenta-se o tamanho dos arquivos de transferência, podendo causar inconveniências durante as etapas de geração dos programas NC e fabricação.

Quando for necessária a comunicação entre sistemas CAD/CAM de fornecedores diferentes, foi desenvolvida no início da década de 80, um padrão de comunicação denominado IGES (*Initial Graphics Exchange Specifications*) que permite esta transferência de dados. Outros padrões foram desenvolvidos, como o VDA-FS criado pela indústria alemã e o padrão STEP. Entretanto, estes padrões ainda apresentam vários problemas de comunicação.

Atualmente, com o desenvolvimento dos softwares CAM, diferentes possibilidades de trajetórias de ferramenta (principalmente para operações de acabamento), vêm sendo implementadas. Isto permite flexibilidade ao usuário para definir a estratégia de corte mais adequada para determinada aplicação. O trabalho realizado por CAVALHEIROS (1998) detalha as diferentes possibilidades de trajetória calculadas por um software CAM.

Entretanto, com as diversas atividades de usinagem realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, verificou-se que embora as estratégias de corte estejam bastante evoluídas, algumas melhorias deveriam ser implementadas para aprimorar a usinagem de formas complexas.

O primeiro fato relevante observado foram marcas de usinagem deixadas pela ferramenta na transição entre os passes de trajetórias em *offset*, que segue um perfil tridimensional, Figura 7.4a. Uma trajetória otimizada, de forma espiral, evitaria a transição entre passes, Figura 7.4b.

Os sistemas CAM atuais são capazes de calcular trajetórias em espiral apenas para perfis circulares, como mostra a Figura 3.20.

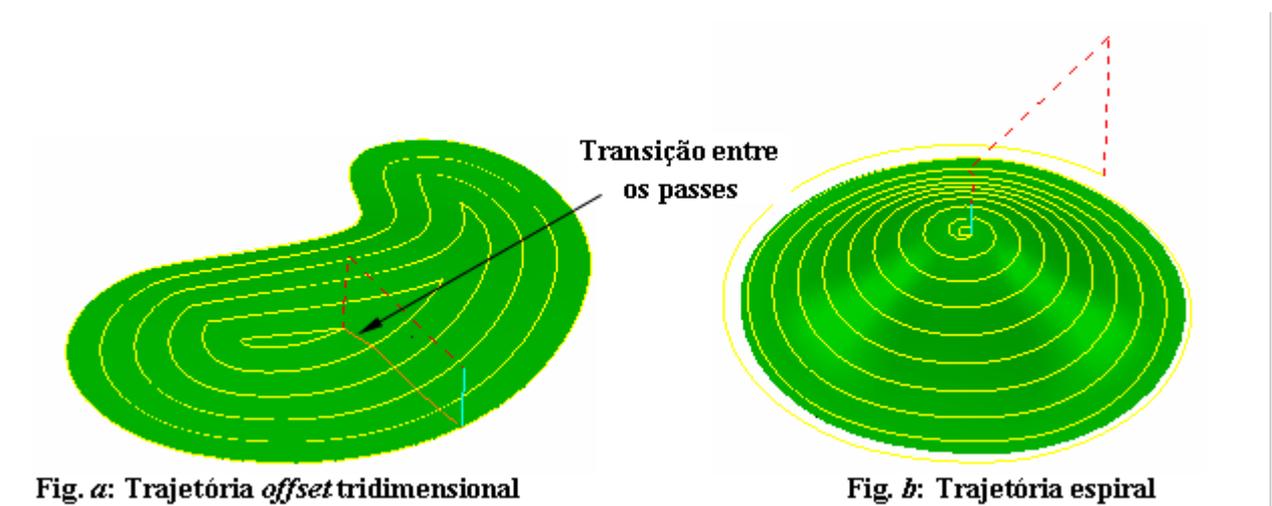


Figura 3.20: Transição entre passes de trajetórias em *offset*

Constatou-se também, que em algumas situações o software CAM pode calcular desvios indesejáveis da trajetória da ferramenta, como ilustra a Figura 7.5. Este fato pode ocorrer, de forma imprevisível, em função da relação entre os parâmetros de processo, tais como a forma geométrica, tolerância de cálculo e geometria da ferramenta.

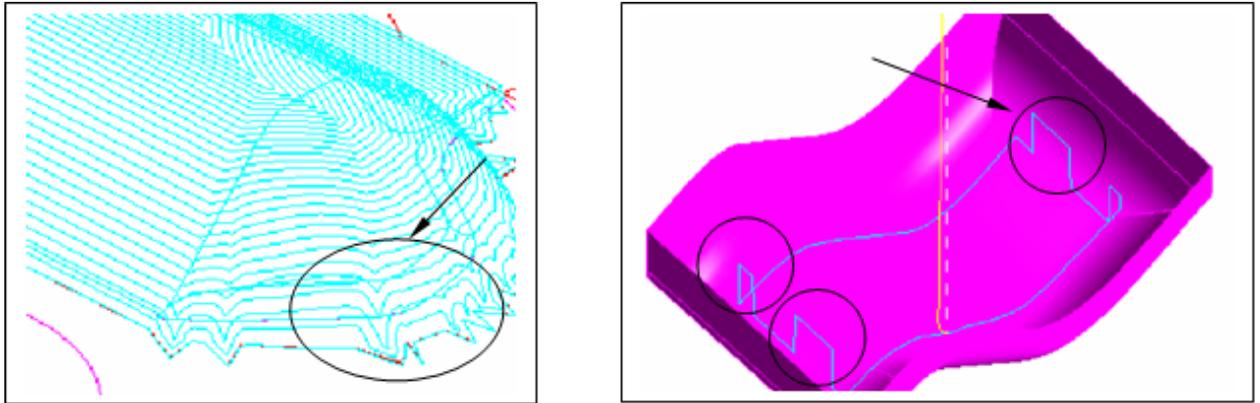
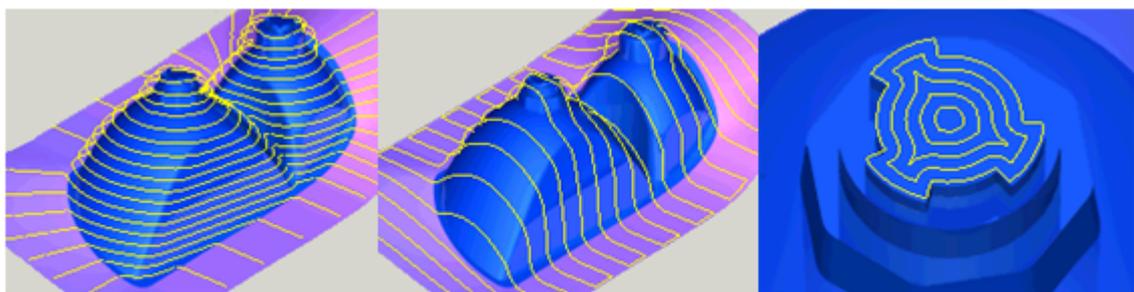


Figura 3.21: Desvios indesejados de trajetória calculados pelo CAM

Dentre as principais trajetórias de usinagem para acabamento disponíveis em sistemas CAM pode-se citar: trajetórias em passes verticais paralelos; trajetórias em passes horizontais paralelos e trajetórias em *Offset* seguindo um perfil, como mostra a Figura 3.22.



**Fig a:** Passes verticais

**Fig b:** Passes horizontais

**Fig c:** Passes em *offset*

Figura 3.22: Principais trajetórias de ferramenta

Usuários com bons conhecimentos ainda são necessários para realizar um processo eficiente. Cada estratégia de usinagem pode ser mais adequada para uma específica geometria (como áreas planas, inclinadas, côncavas e convexas). A escolha dentre as diferentes trajetórias de ferramenta pode representar uma grande influência sobre o tempo necessário para a usinagem, desgaste de ferramentas de corte e qualidade superficial (WEINERT e GUNTERMANN, 2000).

Isto se agrava na usinagem de superfícies complexas, onde a qualidade do processo não é influenciada apenas pelo par ferramenta/peça, como é o caso do fresamento comum, mas depende fortemente da utilização adequada da estratégia de corte para um determinado grau de curvatura da superfície e a sua associação com as superfícies adjacentes.

Um estudo realizado por SILVA FILHO (2000) sugere, como alternativa para otimizar a usinagem de moldes e matrizes, utilizar diferentes estratégias de corte em função da região a ser usinada.

A pesquisa realizada por WEINERT e GUNTERMANN (2000) constatou uma grande diferença nos resultados obtidos por dois processos de usinagem, que se distinguiam apenas pelas estratégias de corte utilizadas para o acabamento de uma matriz de estampo, ilustrada na Figura 7.7

Para a usinagem da primeira matriz, foram utilizadas trajetórias de fresamento em passes paralelos, conhecidas como *Raster*. No segundo caso, utilizou-se uma estratégia otimizada, composta por fresamento em curvas de nível nos setores mais íngremes e usinagem em *offset* nos setores planos. O tempo de usinagem necessário para o primeiro caso foi de 33,28 minutos, enquanto que o segundo caso foram necessários 26,61 minutos. Embora tenha ocorrido redução do tempo de usinagem, a maior vantagem da estratégia otimizada é a baixa rugosidade superficial obtida.

<b>Fig a)</b> Fresamento convencional	<b>Fig b)</b> Estratégias otimizadas
$R_{z1} = 9,30\mu\text{m}$	$R_{z1} = 2,14\mu\text{m}$
$R_{a1} = 2,01\mu\text{m}$	$R_{a1} = 0,48\mu\text{m}$
$R_{z2} = 5,88\mu\text{m}$	$R_{z2} = 3,67\mu\text{m}$
$R_{a2} = 1,00\mu\text{m}$	$R_{a2} = 0,58\mu\text{m}$
Tempo: 33,28 min	Tempo: 26,41 min

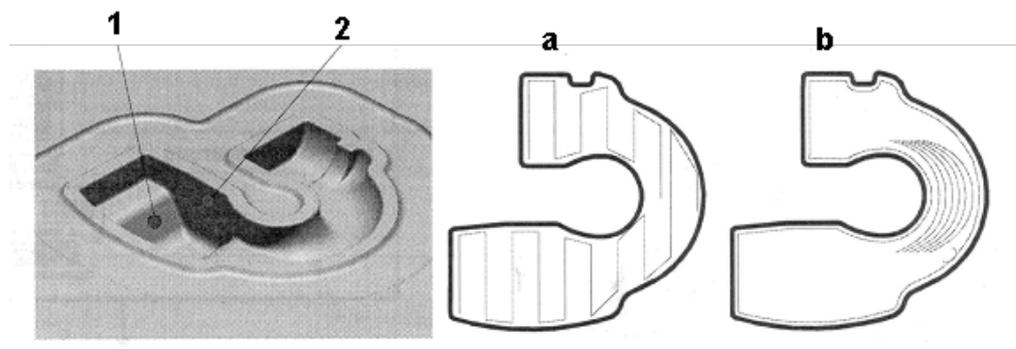


Figura 3.23: Comparação entre estratégias de corte

Fonte: G. Weinert e untermann (2000). Modificada

O projeto de pesquisa denominado HIDAM (*High Speed Milling in Die and Mould Making*) realizado no Instituto *Für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen* (PTW), da Universidade Técnica de Darmstadt, Alemanha, teve a finalidade de avaliar a metodologia de usinagem de moldes e matrizes entre empresas européias. Constataram-se grandes divergências em seus processos produtivos (SHÜTZER, SOUZA e STANIK, 2000).

Para este projeto foi desenvolvido um modelo geométrico contendo formas geométricas complexas para o processo de usinagem. Este modelo foi utilizado como corpo de prova neste estudo e fabricado por várias empresas. Cada empresa fez uso de seus conhecimentos práticos para definir as estratégias de usinagem. Observaram-se grandes diferenças entre as metodologias de trabalho empregadas por cada empresa, influenciando diretamente nos resultados finais.

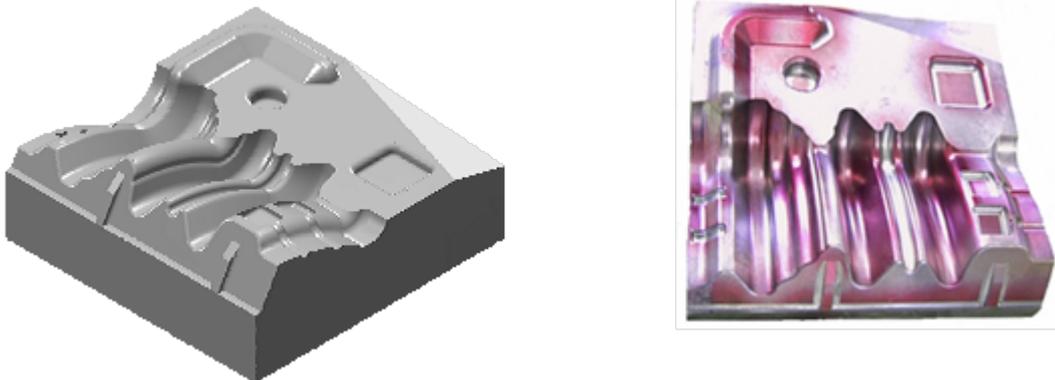


Figura 3.24: Corpo de prova desenvolvido durante o projeto HIDAM

Para demonstrar este fato, a Tabela 7.1 apresenta os principais parâmetros de processo utilizados por duas empresas envolvidas. Observa-se uma drástica diferença dos tempos de fabricação e das ferramentas utilizadas para usinagem dos corpos de prova.

Tabela 7.1: Resultados obtidos com a usinagem do corpo de prova

Empresa A			Empresa B			
	Diâmetro da Ferramenta	Profundidade corte	Tempo de usinagem [h]	Diâmetro da Ferramenta	Profundidade corte	Tempo de usinagem [h]
<b>Pré acabamento</b>	25	2	0:36	16	3	2:16
	12	1	0:26	5	2	1:23
<b>Acabamento</b>	12	0,4	3:02	16	1	16:56
	6	0,3	0:45	5	1	4:48
	4	0,15	0:04	-	-	-
<b>Tempo Total</b>			4:53	<b>Tempo Total</b>		25:20

Neste caso, mesmo a empresa A tendo consumido menor tempo de usinagem, a qualidade superficial obtida foi superior ao corpo usinado pela empresa B. A empresa A realizou as operações de acabamento executando passes perpendiculares à ondulação. A empresa B realizou passes no sentido das ondulações. Visualmente, observa-se um acabamento superficial melhor, realizado pela empresa A. Os passes paralelos realizados pela empresa B, deixaram marcas superficiais na parte inferior das ondas.

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

Após o cálculo do percurso da ferramenta realizado pelo software CAM, este deverá ser codificado em comandos, os quais possam ser interpretados e transformados pelo CNC da máquina em movimentações e acionamentos (ZELINSKI, 2001).

Entretanto, cada sistema máquina/CNC possui características distintas, baseadas nas configurações da estrutura da máquina-ferramenta, envolvendo diferentes possibilidades para movimentações de seus eixos, troca de ferramentas, entre outras.

O cálculo inicial no sistema CAM gera um arquivo genérico, sem estas especificações. Este arquivo é conhecido como *Cutter Location Data File* (CLF). Após esta etapa, o programa genérico deverá ser formatado de acordo com as características específicas do equipamento a ser utilizado. O pós-processador é o software que realiza esta conversão,

transformando o arquivo CLF em um programa NC específico para uma dada combinação máquina/CNC (SCHULTZ, 1999).

Portanto, dois elementos são necessários para o pós-processamento (UG/POST MANUAL, 2001):

trajetória de ferramenta calculada pelo CAM em formato computacional (CLF);

pós-processador – programa computacional que lê e converte o arquivo CLF em um programa que possa ser executado em uma dada combinação máquina/CNC.

Desta forma, o pós-processador possibilita a utilização de qualquer arquivo CLF para qualquer configuração de equipamento máquina/CNC, desde que a configuração dos eixos da máquina e do arquivo CLF seja compatível. Figura 3.25 demonstra um fluxograma da criação de um pós-processador específico para geração de programas NC.

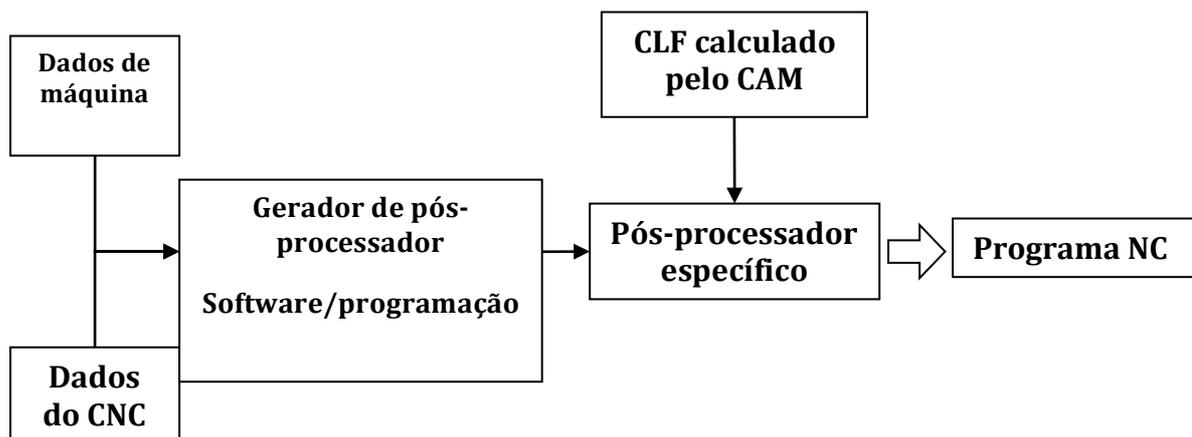


Figura 3.25: Etapas para pós-processamento de programas NC

Para os trabalhos experimentais, houve a necessidade de criar um com pós-processador adequado para a geração de programas NC que contenham trajetórias de ferramenta descritas por equações polinomiais tipo *Spline*, e possíveis de serem executados pelo comando Siemens 840D, que equipa o centro de usinagem HSC utilizado

### 5.3 - Considerações sobre a operação de desbaste na usinagem com CAM

Para realizar uma análise sobre as operações de fresamento de formas complexas, é conveniente estudar as condições de contato ferramenta-peça e as implicações, dificuldades e aproximações realizadas, para se modelar este processo de usinagem.

Para a usinagem de formas complexas, ferramentas de ponta esférica são utilizadas com maior ênfase, mesmo para operações de desbaste, pois permite a remoção de uma maior quantidade de material, devido sua geometria (SOUZA, 2001); (ELBESTAWI et al, 1997).

A Figura 3.26(a) demonstra o contorno de uma peça não planar, com diferentes graus de curvatura, e o bloco prismático de matéria-prima, para sua confecção. A Figura 3.26(b) ilustra o material restante da operação de desbaste utilizando uma fresa de topo plana, segundo uma estratégia de desbaste com incremento vertical constante. A Figura 3.26(c), o desbaste nas mesmas condições de usinagem, utilizando-se de uma ferramenta de ponta esférica, com a mesma estratégia.

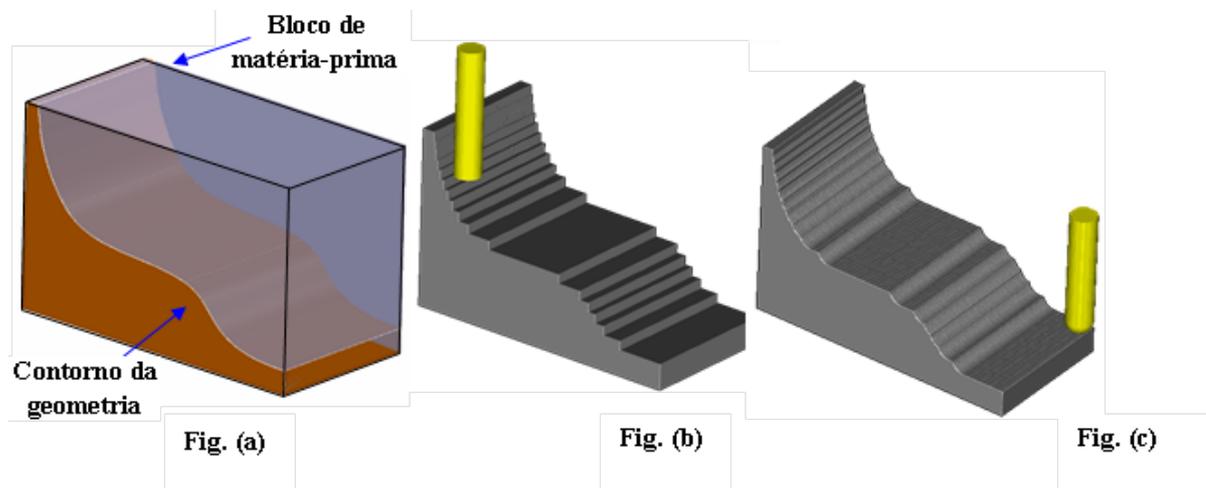


Figura 3.26: Desbaste por ferramentas de topo plana e esférica

Observa-se que a ferramenta esférica permite se aproximar mais da geometria final da peça, deixando um sobre-metal mais uniforme para o acabamento.

Segundo SCHULZ e FINZER (1999); BEARD (2001); GOMES (2003), esta quantidade não uniforme de material para ser removida na operação de acabamento é prejudicial ao processo, principalmente quando se aplica a usinagem em alta velocidade. Grandes alterações no volume de material a ser removido durante a usinagem, em virtude destas transições topográficas, podem acarretar em instabilidades no processo. Segundo FRIEDHOFF (2002), as velocidades de avanço nestas circunstâncias deverão ser reduzidas para não reduzir a vida útil da ferramenta de corte.

#### **5.4 - Considerações sobre a operação de acabamento na usinagem usando CAM**

No acabamento, usando-se uma estratégia de corte tipo haster, por exemplo,, a forma do cavaco se altera constantemente com a variação do sentido de avanço e a posição do ponto de contato da ferramenta, com a peça. A Figura 3.27 ilustra estas variações para uma forma hipotética em uma passagem da ferramenta pela peça.

A ferramenta na posição *A* pode ter longo contato com a peça incluindo-se o centro, com velocidade de corte zero. Acompanhando o sentido de usinagem até a posição *D*, a ferramenta oscila entre sentido de corte ascendente, de *A* para *B* e sentido descendente de *B* à *D*.

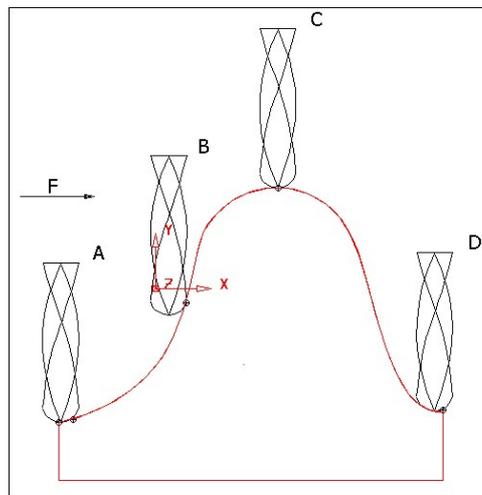


Figura 3.27: Pontos de contato ferramenta esférica

No ponto *C*, a ferramenta esta em contato com a peça apenas pelo centro, e na posição *B* a ferramenta utiliza sua periferia para o corte, com o diâmetro efetivo de usinagem sendo igual ao diâmetro nominal da ferramenta. Nesta posição, a ferramenta atinge a sua maior velocidade de corte.

A Figura 3.28 mostra, de forma ilustrativa, a área de contato da ferramenta com a secção de corte do material, caso o volume de remoção seja uniforme, numa operação de acabamento final. No sentido ascendente, a ferramenta corta com o diâmetro nominal, e no sentido descendente, utiliza a parte esférica, podendo utilizar o centro da ferramenta, com velocidade de corte zero, dependendo da relação entre o sobremetal e o raio da fresa.

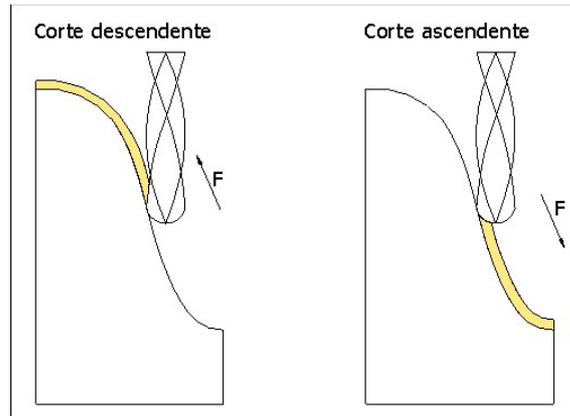


Figura 3.28 - Ponto de contato geometria/peça em função do sentido de corte

Sistemas CAD/CAM atuais geram os programas NC sem considerar estas características de contato ferramenta/peça, tendo como consequência, vibrações e deflexões da ferramenta. No ambiente industrial, os operadores das máquinas reduzem manualmente as velocidades avanço e/ou rotação da ferramenta, para evitar situações indesejadas (CHU et al, 1997).

### 3.6 QUESTÕES.

1. Quais são as principais características de um centro de usinagem CNC?
2. O que é a integração CAD-CAM?
3. Descreva as etapas/procedimentos utilizados para a geração e usinagem da peça demonstrada na atividade prática

# **ANEXO 1 – COMANDOS CNC PARA CENTRO DE USINAGEM**

## **Funções miscelânea M**

### **M00 - Parada Programada**

Este comando causa uma parada na execução do programa da peça. O fuso principal, o avanço e a refrigeração são desativados.

A porta poderá ser aberta através do modo JOG (manual) sem gerar alarme.

### **M01 - Parada Opcional Programada**

M01 funciona como M00, mais somente quando a tecla Opcional Stop estiver ativa, porém o fuso principal e a refrigeração permanecem

ligados, podendo ser desativados em modo JOG (manual) sem gerar alarme.

### **M02 - Fim de programa Principal**

Esta função indica o fim do programa na memória do comando . A sequência não é retornada ao início do programa.

### **M03 - Fuso principal ativado no sentido horário**

O fuso será ativado desde que uma velocidade de corte ou de fuso tenha sido programada. É preciso usar M03 para todas as ferramentas

de corte a direita.

### **M04 - Fuso principal ativado no Sentido anti-horário**

As mesmas condições descritas em M03 se aplicam para este comando. É preciso usar M04 para todas as ferramentas a esquerda, ou

retorno de rosca com macho.

### **M05 - Fuso principal desativado**

O Fuso principal é parado automaticamente.

### **M06 - Ativa Troca de ferramenta**

Habilita a troca de ferramenta do magazine para fuso principal

### **M08 - Refrigeração ativada**

M08 liga o fluido de corte.

### **M09 - Refrigeração desativada**

M09 desliga fluido de corte.

### **M12 - Contador de peças**

Habilita contador de peças no comando cnc e no display (Dispositivo externo)

### **M13 - Liga óleo refrigerante + Rotação do Spindle sentido horário**

Liga simultaneamente coolante + RPM

### **M14 - Liga óleo refrigerante + Rotação do Spindle sentido anti-horário**

Liga simultaneamente coolante + RPM

### **M15 - Desliga óleo refrigerante + Rotação do Spindle**

Desliga simultaneamente coolante + RPM

### **M19 - Parada orientada do Fuso**

Orientação do Spindle sempre na mesma posição, posição fixa para troca de ferramenta definida pelo fabricante

### **M30 - fim de programa**

Fim de programa com retorno ao início do mesmo

### **M98 - Chamada de subprograma**

Chamada de subprograma com endereço "P" (número do programa com 4 dígitos) poderá ser usado o comando "L" (Nº. repetições)

### **M99 - Fim de subprograma**

Finaliza a chamada de subprograma

## **Códigos G (Funções preparatórias)**

**G00** - Avanço rápido

**G01** - Interpolação linear

**G02** - Interpolação circular sentido horário

**G03** - Interpolação circular sentido anti-horário

**G04** - Tempo de espera sob endereço

**G05** - Controle do Look-ahead

**G09** - Parada exata

**G17** - Plano de trabalho X,Y

**G18** - Plano de trabalho Z,X

- G28**- Ponto de referência
- G31** - Função de salto
- G40** - Cancela compensação do raio da ferram.
- G41** - Compensação do raio da ferram. Esquerdo
- G42** - Compensação do raio da ferram. Direito
- G43** - Compensação do comprimento da ferram. +
- G44** - Compensação do comprimento da ferram. -
- G49** - Cancela compensação de comprimento
- G50** - Cancela modo de escala
- G51**- Escala habilita
- G52** - Sistema local de coordenada
- G53** - Coordenada referente à zero máquina
- G54~G59** - Coordenada referente à zero peça
- G54P1~P48** - Coordenada referente à zero peça
- G62** - Avanço automático de canto
- G64** - Modo de corte normal
- G65** - Chamada de subprograma macro
- G66** - Chamada de subprograma macro
- G68** - Rotação de coordenada
- G69** - Cancela Rotação
- G73** - Ciclo de furação
- G74** - Ciclo de rosca c/ tempo esp.
- G76**- Ciclo de mandrilar fino
- G80** - Cancela ciclo fixo
- G81** - Ciclo de furação simples
- G82** - Ciclo de furação c/ tempo esp
- G83** - Ciclo furação pica-pau
- G84** - Ciclo de rosca
- G85** - Ciclo de mandrilamento
- G90** - Coordenadas absolutas
- G91** - Coordenadas incrementais
- G92** - Limit. de rotação/Desl pt zero
- G94** - Avanço por minuto
- G95** - Avanço por rotação
- G96** - Velocidade de corte constante
- G97**- Velocidade de rotação RPM
- G98** - Retorna à ultima coordenada Z
- G99** - Retorna ao ponto R

## **ANEXO 2 – EXEMPLO DE PROGRAMA CNC PARA CENTRO DE USINAGEM**

```
N010 G90 G17 G71 G94
N020 T07;BROCA DE CENTRO
N030 M6
N040 G54 S2000 M3 D1
N050 G0 X30 Y25 Z10
N060 F400 M8 MCALL CYCLE 81 (5,0,-3,0)
N070 MCALL CYCLE 81 (5,0,-3,0)
N080 X30 Y25
N090 X90
N100 Y70
N110 X30
N120 MCALL
N130 T08; BROCA DIAMETRO 8MM
N140 M6
N150 G54 S1800 M3 D1
N160 F300 M8
N170 MCALL CYCLE 83 (5,0,2,-40,0,0,14,5,0,1,0,5,1)
N180 X30 Y70
N190 Y25
N200 X90
N210 X70
N220 MCALL
N230 G53 G0 Z-110 D0 M5 M9 (ou substituir a linha por G0 Z200 M5 M9)
N240 G53 X-115 Y0
N250 M30
```

### ANEXO 3 - RECOMENDAÇÕES PARA VELOCIDADE DE CORTE (M/MIN)

MATERIAL	END MILLING		MILLING SHELL/SIDE/FORM				DRILLING		FLY CUTTING	
	HSS	CARBIDE	HSS	CARBIDE	HSS	CARBIDE	CARBIDE	HSS	CARBIDE	
ALUMINUM	400-1000	600 & UP	400-1000	600 & UP	200-300	300-400	200-300	200-300	400-600	
BRASS	100-200	150-300	150-200	200-500	200-300	300-450	150-200	150-200	300-400	
BRONZE	30-80	45-120	25-100	50-200	200-300	300-400	30-100	30-100	60-200	
CAST IRON	30-80	45-120	25-80	500-160	100-150	150-225	50-80	50-80	100-160	
COPPER	60-80	90-120	125-175	250-350	60-70	90-105	60-80	60-80	120-160	
MACHINERY STEEL	60-80	90-120	25-150	50-100	80-100	120-150	60-80	60-80	120-160	
STEEL (HARD)	25-70	40-105	25-70	50-140	20-30	30-45	35-40	35-40	70-80	
STEEL (SOFT)	45-100	70-150	45-110	90-220	50-60	75-90	80-100	80-100	160-200	
STEEL STAINLESS	20-40	30-60	35-105	70-210	30-40	45-60	40-50	40-50	80-100	
TOOL STEEL	40-60	60-90	70-105	140-210	50-60	75-90	35-40	35-40	70-80	

## ANEXO 4 – VALORES DE ORIENTAÇÃO PARA RUGOSIDADE

