

Parte 1

Operação de Fresamento

1 – Operação de fresamento

1.1 – Introdução

O levantamento histórico indica que a operação de fresamento surgiu em 1918. A fresadora, ou máquina de fresar, é a máquina cuja ferramenta possui movimento de rotação e que permite movimentar a peça em um, dois, três ou mais eixos (lineares ou giratórios). Sendo assim tem-se uma máquina elaborada para execução facilitada de peças *prismáticas*, ao contrário do torno que executa principalmente peças *rotacionais* (perfil de revolução).

1.2 – Tipos de fresadoras

Pode-se classificar as fresadoras de diversas formas, sendo as principais classificações as que levam em consideração o tipo de avanço, a estrutura, a posição do eixo-árvore em relação a mesa de trabalho e a sua aplicação. Tem-se:

Quanto ao avanço:

- Manual;
- Automático (hidráulico ou elétrico).

Quanto à estrutura:

- De oficina, também chamada de ferramenteira (maior flexibilidade);
- De produção (maior produtividade);

Quanto a posição do eixo-árvore:

- Vertical (eixo árvore perpendicular a mesa);
- Horizontal (eixo árvore paralelo a mesa);
- Universal (pode ser configurada para vertical ou horizontal);
- Omniversal (universal com a mesa que pode ser inclinada);
- Duplex (dois eixos-árvore simultâneos);
- Triplex;
- Multiplex;
- Especiais.

Quanto a aplicação:

- Convencional;
- Pantográfica (fresadora gravadora);
- Chaveteira (específica para fazer chavetas internas e/ou externas);
- Dentadora (específica para usinar engrenagens);
- Copiadora (o apalpador toca um modelo e a ferramenta o reproduz na peça);

A **figura 1.1** ilustra de forma esquemática uma fresadora horizontal, uma fresadora vertical e uma fresadora duplex (com os dois eixos-árvore horizontais). Pode-se destacar que na configuração duplex poder-se-ia ter um eixo horizontal e outro vertical, ou ainda os dois eixos na vertical.

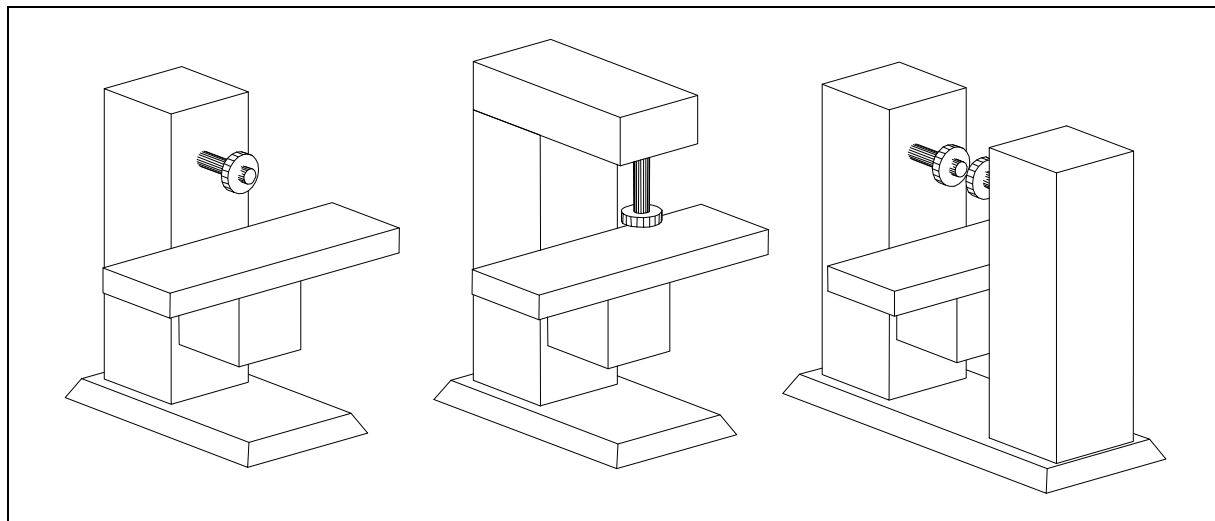


Figura 1.1 – Fresadora horizontal, fresadora vertical, fresadora duplex.

1.3 – Operações básicas

As fresadoras são capazes de executar diversos tipos de operações dependendo de sua configuração, acessórios e ferramentas. Pode-se citar:

- Superfícies planas, planas inclinadas, curvas e irregulares (**figura 1.2**);
- Canais simples, em T, cauda de andorinha (**figura 1.3**);
- Eixos com seção regular (**figura 1.4**);
- Furos (**figura 1.5**);
- Cavidades poligonais e circulares (**figura 1.6**);
- Rasgos de chaveta (**figura 1.7**);
- Engrenagens e cremalheiras (**figura 1.8**);

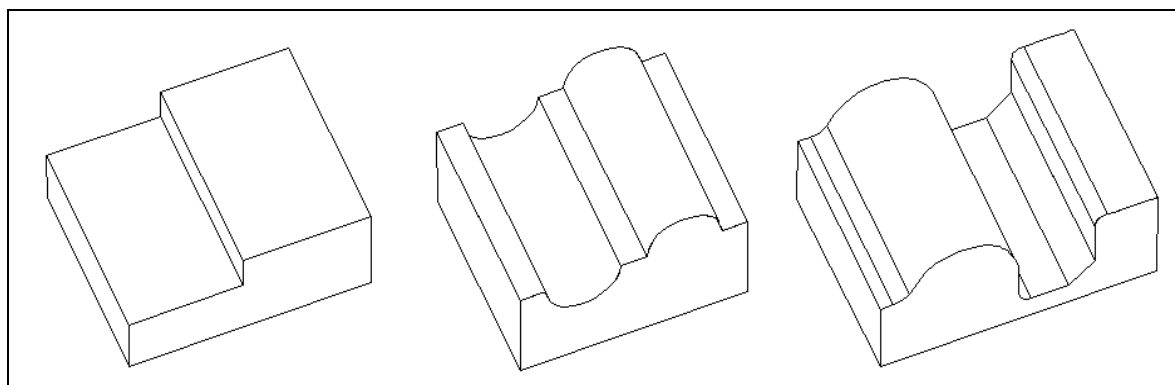


Figura 1.2 – Superfícies plana, curva (convexa e côncava) e complexa.

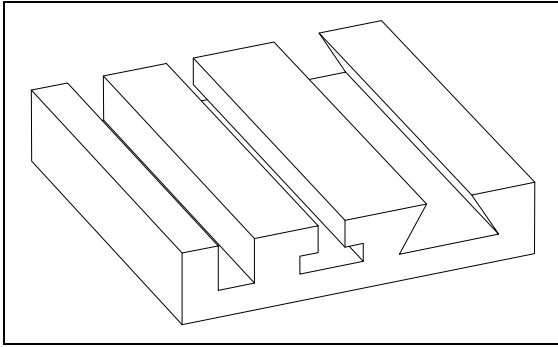


Figura 1.3 – Canais.

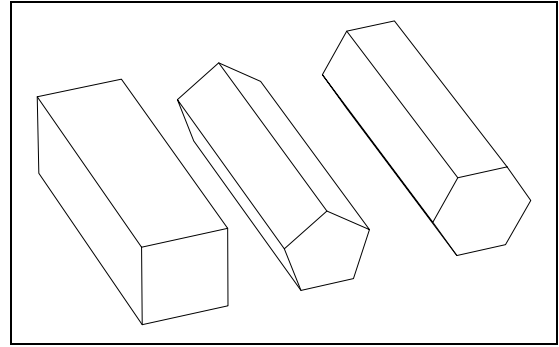


Figura 1.4 – Eixos.

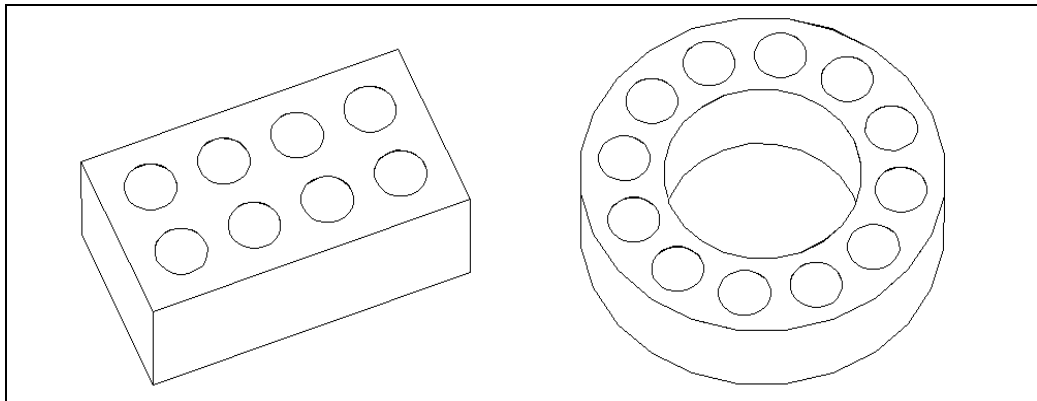


Figura 1.5 – Furação.

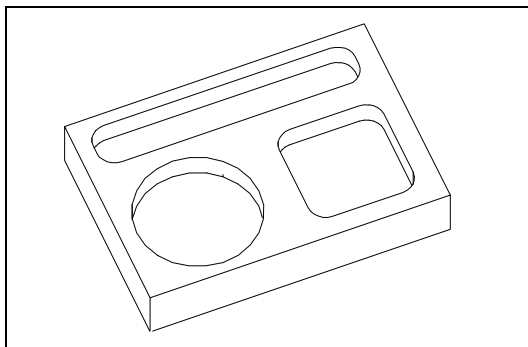


Figura 1.6 – Cavidades (bolsões).

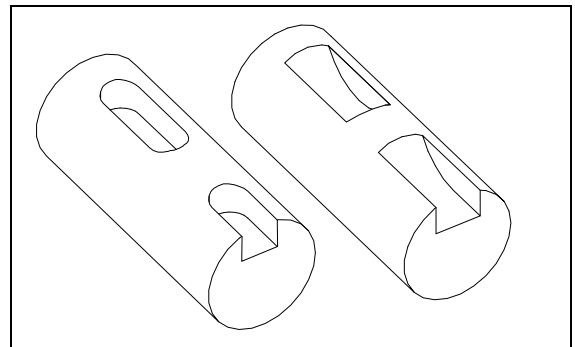


Figura 1.7 – Rasgos de chaveta.

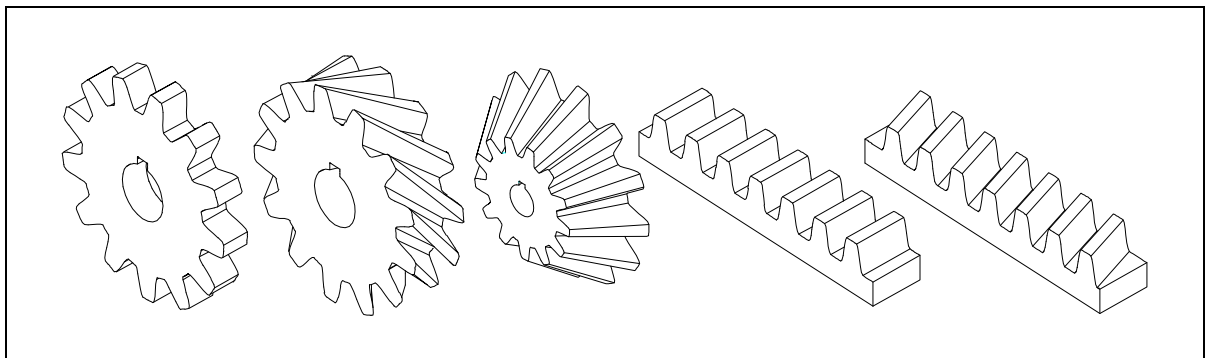


Figura 1.8 – Engrenagens e cremalheiras.

1.4 – Principais partes

Por existirem diversos modelos de fresadoras, as partes principais de uma destas máquinas podem variar de uma configuração para outra. Desta forma, serão detalhadas os principais componentes de uma fresadora omniversal de produção, que pode ser observada na *figura 1.9*.

Base: É o componente responsável por suportar toda a máquina e, muitas vezes, funciona também como reservatório de fluido refrigerante. Normalmente os apoios possuem ajustes para nivelamento da máquina no piso.

Coluna: É a estrutura principal da máquina. Costuma ser o alojamento do sistema de acionamento e também dos motores. Possui as guias (barramento) do movimento vertical.

Console: Desliza pelas guias da coluna, realizando o movimento vertical da peça. Aloja os mecanismos de acionamento da sela e da mesa. Possui as guias do movimento horizontal transversal.

Sela: Na omniversal divide-se em duas partes denominadas sela inferior e sela superior. A sela inferior desliza pelas guias do console, realizando o movimento horizontal transversal. A sela superior gira em um plano horizontal em relação a sela inferior, permitindo-se inclinar a peça. A sela superior possui as guias do movimento horizontal longitudinal.

Mesa: Desliza pelas guias da sela superior realizando o movimento horizontal longitudinal. Possui rasgos em T para fixação das peças e acessórios e canalizar o fluxo de fluido refrigerante de volta ao reservatório.

Torpedo: É a estrutura montada sobre a coluna. Sua finalidade é a de receber o suporte do mandril, quando a fresadora estiver na configuração horizontal e com ferramenta longa. Quando utiliza-se a configuração vertical o torpedo é deslizado para trás.

Cabeçote vertical: Dispositivo que fixa-se na coluna da fresadora e conecta-se ao eixo-árvore, alterando a configuração de horizontal para vertical.

Árvore: É o eixo que recebe a potência do motor e fornece o movimento de giro para a ferramenta. Pode ser acionada através de correia e/ou engrenagens, que permitem o ajuste de algumas velocidades de rotação. Pode girar nos dois sentidos. Normalmente, em sua extremidade, há um cone (ISO ou Morse) para fixação direta de ferramentas ou de mandril porta ferramentas.

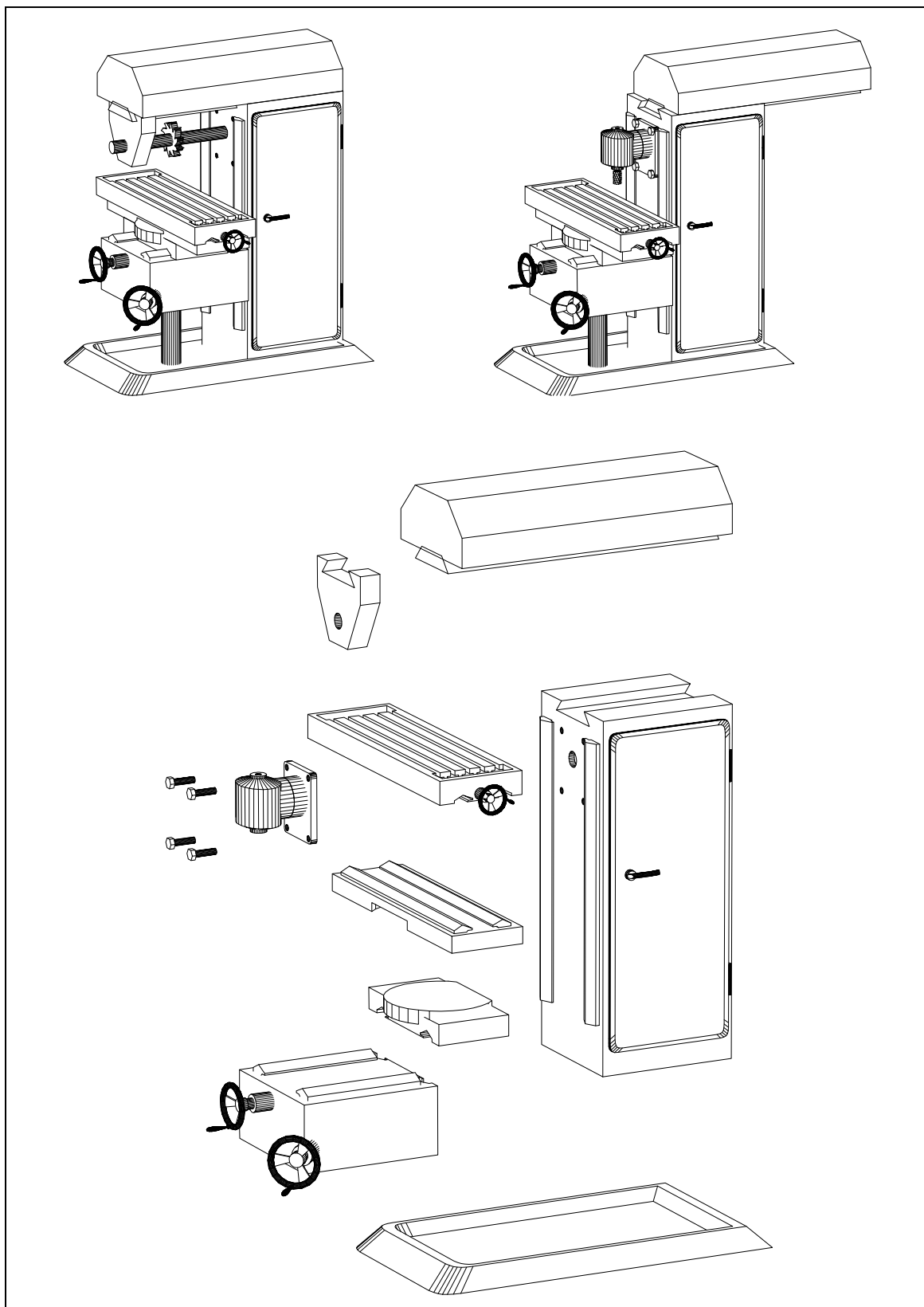


Figura 1.9 – Configurações e principais componentes de uma fresadora omniversal.

Na fresadora ferramenteira, normalmente de configuração vertical, não costuma haver o console pois o movimento vertical é realizado pelo próprio eixo árvore.

1.5 – Principais acessórios

Os principais acessórios utilizados em operações de fresamento relacionam-se à fixação da peça na mesa de trabalho. São eles:

- Parafusos e grampos de fixação (*figura 1.10*);
- Calços (*figura 1.11*);
- Cantoneiras de ângulo fixo ou ajustável (*figura 1.12*);
- Morsas (*figura 1.13*);
- Mesa divisora (*figura 1.14*);
- Divisor universal e contraponto (*figura 1.15*).

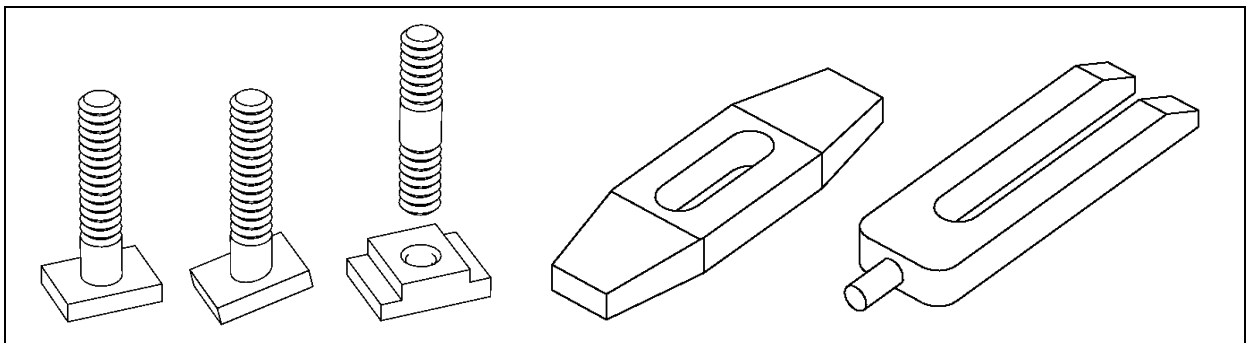


Figura 1.10 – Parafusos e grampos de fixação.

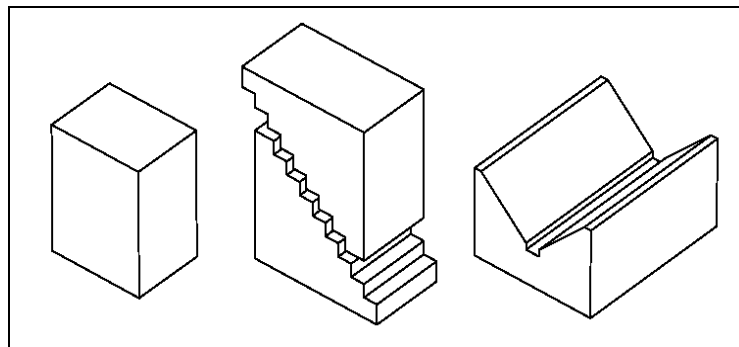


Figura 1.11 – Calços.

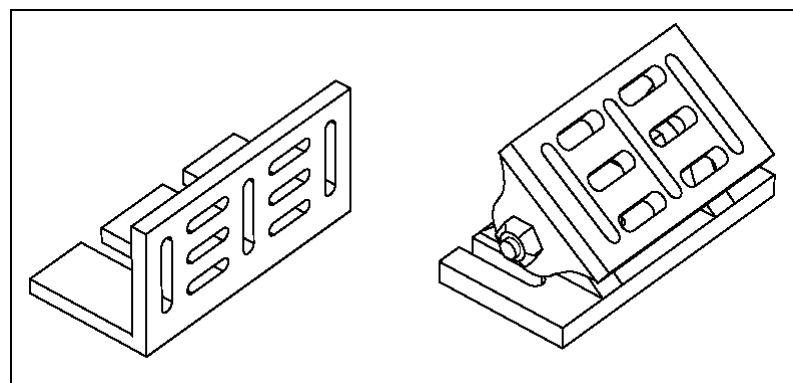


Figura 1.12 – Cantoneiras (de ângulo fixo e ajustável).

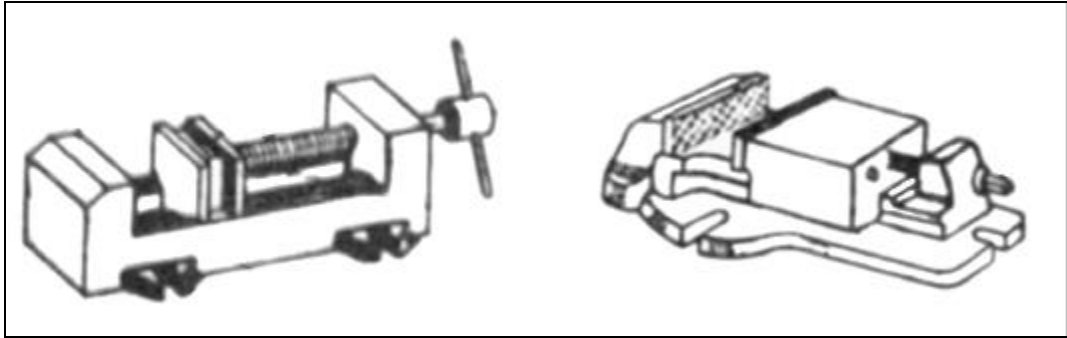


Figura 1.13 – Morsas.

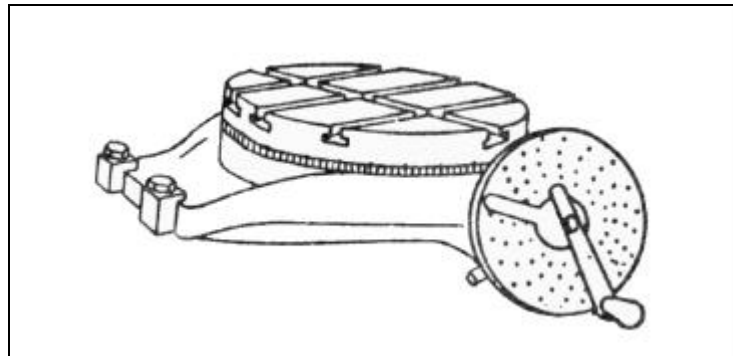


Figura 1.14 – Mesa divisora.

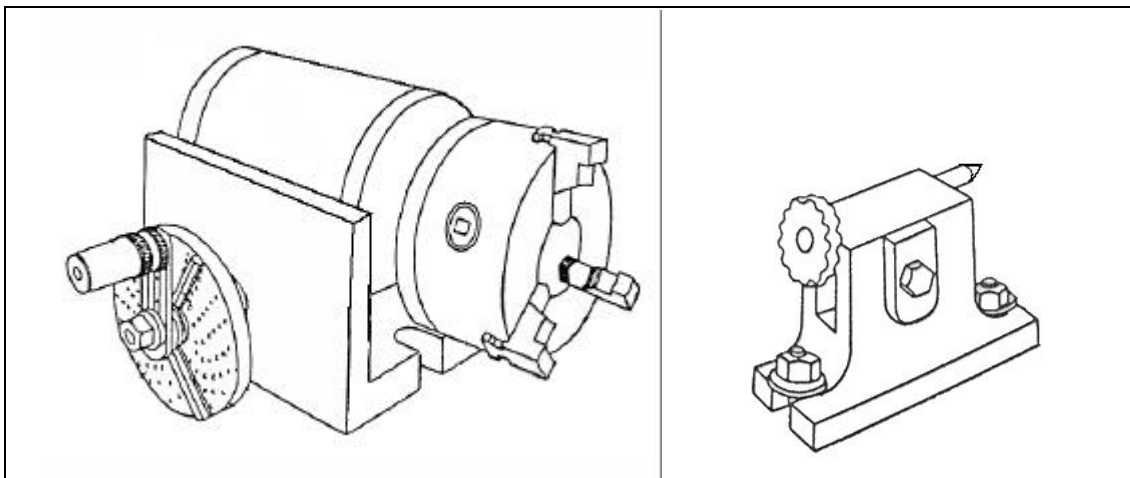


Figura 1.15 – Divisor universal e contraponto.

É muito importante ressaltar que a instalação de alguns acessórios, na mesa de trabalho da fresadora, devem ser realizadas com muita atenção para evitar erros dimensionais na usinagem. O exemplo clássico é a instalação de uma morsa. Após sua fixação na mesa deve-se fazer o seu alinhamento, com o auxílio de um relógio comparador, apalpando o seu mordente fixo que deverá ficar paralelo ao movimento da mesa. Também é necessário verificar se não há cavacos que mantenham a morsa ligeiramente inclinada no plano paralelo ao chão.

Um outro conjunto de acessórios de grande importância está relacionado com a fixação das ferramentas. Como já foi mencionado, o eixo árvore possui em sua extremidade um cone e chavetas. Neste cone pode-se fixar um mandril ou uma ferramenta de haste cônica. Para garantir a fixação utiliza-se uma haste roscada que atravessa a árvore. As chavetas evitam o deslizamento.

Há ferramentas de haste cônica que podem ser fixadas diretamente no cone de fixação do eixo-árvore, que pode ser Morse (menor esforço) ou Iso (maior fixação). Normalmente se trata de ferramentas relativamente grandes. Para fixar-se ferramentas menores, que possuem outra dimensão de cone, utiliza-se um mandril adaptador, como mostrado pela **figura 1.16**. Nesta mesma figura pode-se observar na ponta do mandril a rosca onde fixa-se a haste roscada.

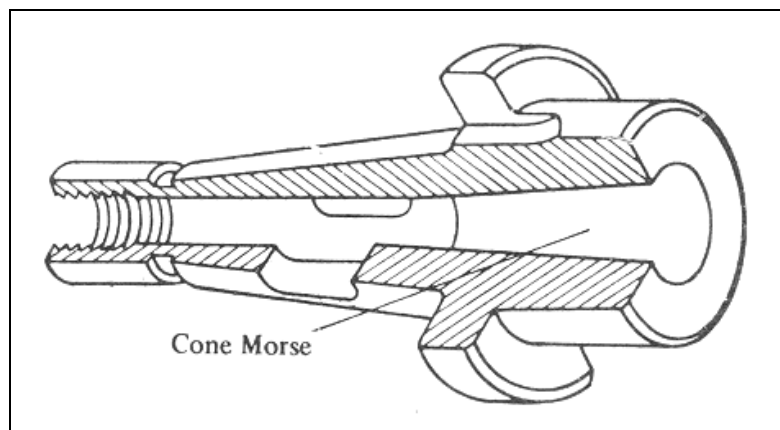


Figura 1.16 – Mandril adaptador para ferramentas de haste cônica.

Com relação ao mandril, pode-se ter três tipos: universal (Jacobs), porta-pinça e porta-ferramenta. O mandril universal é muito utilizado em furadeiras manuais, mas também pode ser utilizado em fresadoras, mas com ressalvas. Só podem ser fixadas ferramentas de haste cilíndrica e cujo esforço não seja elevado, pois a pressão de fixação não será suficiente. A **figura 1.17** apresenta um mandril Jacobs.

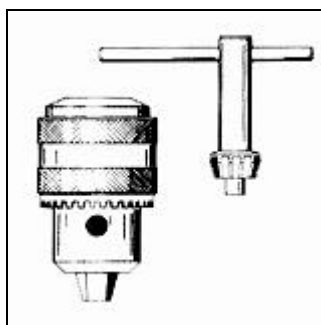


Figura 1.17 – Mandril universal tipo Jacobs.

O mandril porta-pinça possui modo de trabalho similar ao Jacobs, mas permite uma força de fixação maior. Também é indicado para ferramentas de haste cilíndrica. A pinça é uma peça única com um furo central no diâmetro da haste a ser fixada e com diversos cortes longitudinais que lhe dão uma flexibilidade de *fechar* este furo em alguns décimos de milímetro. Este mandril é composto de duas partes. A primeira, que é o mandril propriamente dito, possui uma cavidade que receberá a pinça. Esta cavidade possui uma superfície cônica de igual formato da pinça. A segunda parte é denominada de porca, e é rosqueada no mandril. A **figura 1.18** ilustra um mandril porta-pinça e dois modelos de pinça. Durante o rosqueamento a porca força a pinça a entrar na cavidade do mandril, e devido a forma cônica, obriga a pinça a se fechar e fixar a ferramenta.

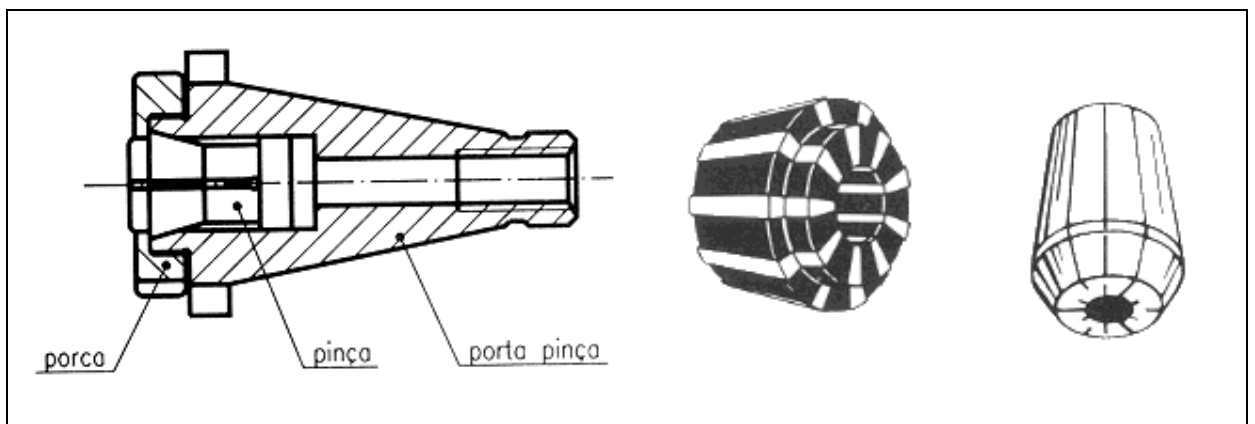


Figura 1.18 – Mandril porta pinça e dois modelos de pinças.

Para ferramentas de maior porte, e consequentemente, maiores esforços de usinagem, é necessário uma maior garantia de que não haja um deslizamento entre o mandril e a própria ferramenta. Nestes casos o mandril possui chavetas, que podem ser transversais (quando o mandril é curto) ou longitudinais. A **figura 1.19** apresenta alguns modelos de mandril.

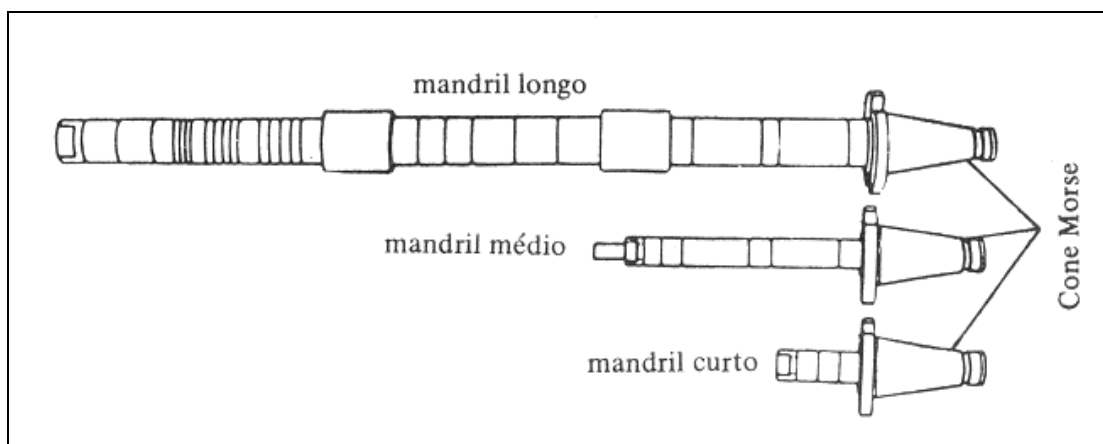


Figura 1.19 – Alguns modelos de mandril.

A **figura 2.20** apresenta um mandril curto com chaveta longitudinal. A **figura 1.21** ilustra o mandril curto com chaveta transversal. A **figura 1.22** apresenta um mandril porta-fresa longo com chaveta longitudinal, também denominado de eixo porta-fresa de haste longa.

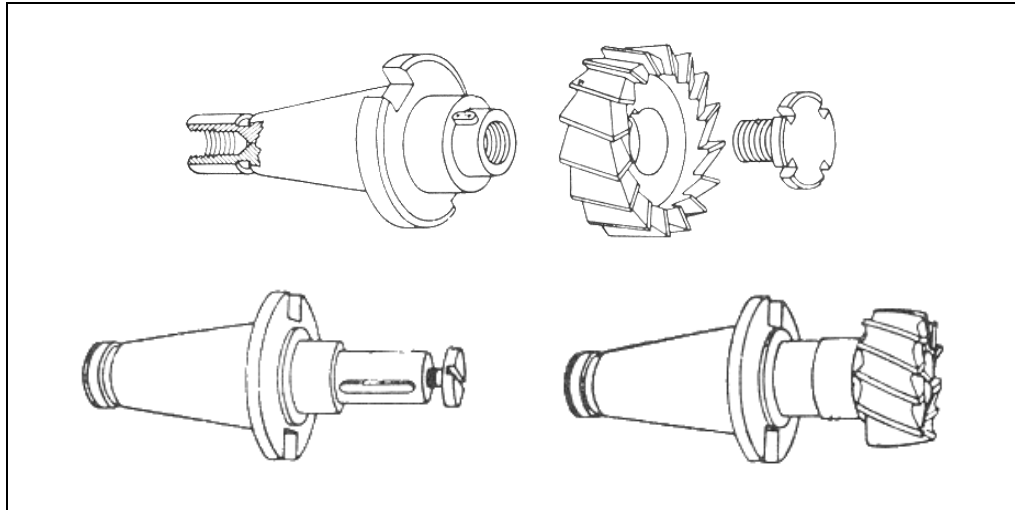


Figura 1.20 – Mandril porta-fresa curto com chaveta longitudinal.

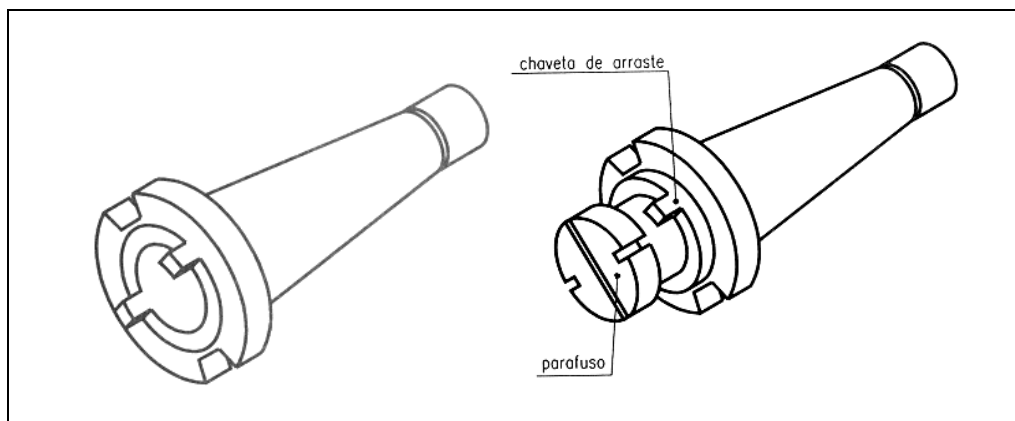


Figura 1.21 – Mandril porta-fresa curto com chaveta transversal.

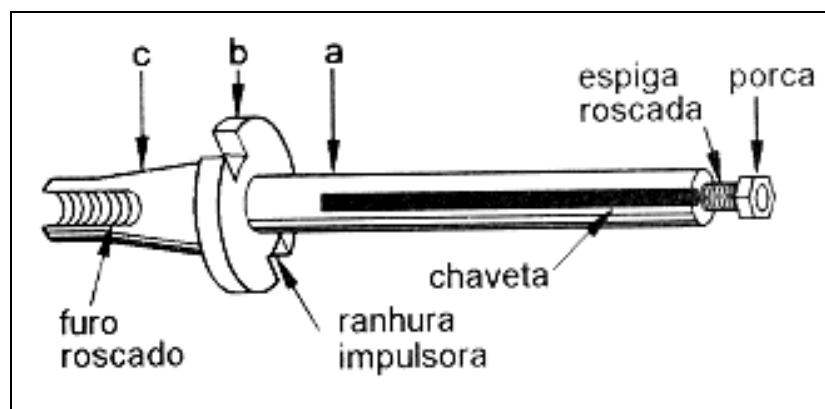


Figura 1.22 – Mandril porta-fresa longo com chaveta longitudinal.

1.6 - Fresas

São ferramentas rotativas providas de múltiplos gumes de corte dispostos simetricamente ao redor de um eixo, removendo intermitentemente material da peça. Esta característica oferece uma grande vantagem das fresas sobre outras ferramentas: o menor desgaste. Quando os dentes não estão realizando o corte eles estão sendo refrigerados, e isto permite que mantenham sua dureza.

Em muitos casos utilizam-se fresas com apenas um gume de corte, denominadas popularmente de *bailarina*. Em situações específicas também pode ser necessário o uso de uma disposição não simétrica dos gumes de corte para evitar ressonância.

As fresas podem ser classificadas de várias maneiras. A primeira delas seria quanto a forma geral. As fresas podem ser cilíndricas, cônicas ou ainda *de forma*. A **figura 1.23** apresenta fresas cilíndricas. As ferramentas mais estreitas são também chamadas de fresas de disco, enquanto as ferramentas que possuem haste própria são denominadas de fresas de haste ou fresas de topo (lado direito da figura).

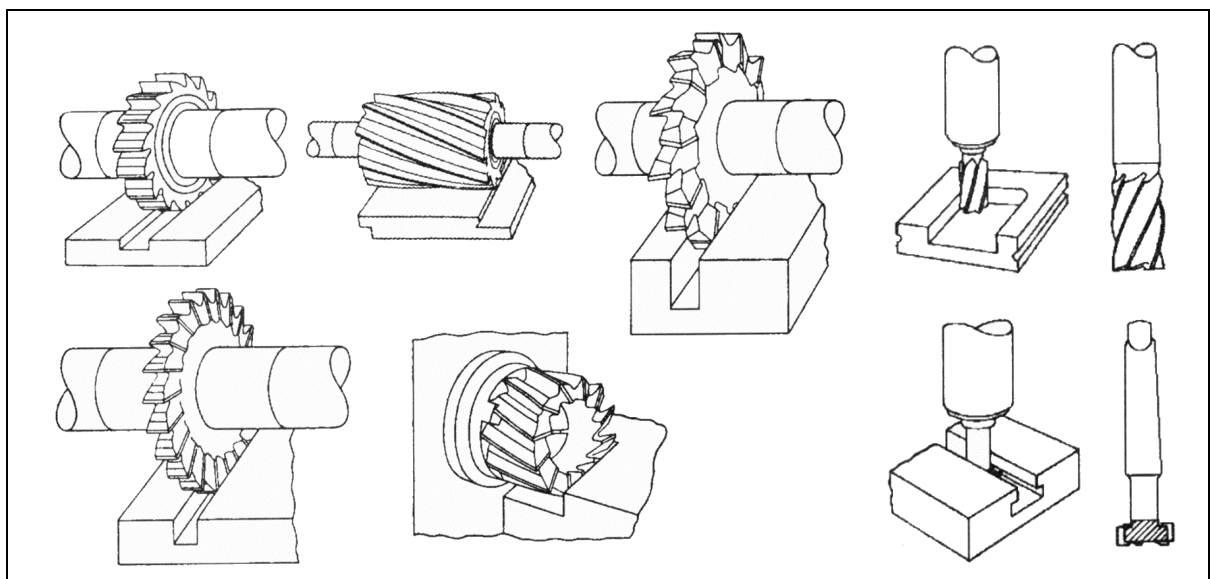


Figura 1.23 – Fresas cilíndricas.

As fresas cônicas ou angulares podem possuir apenas um ângulo, como as fresas para encaixes tipo cauda-de-andorinha, ou possuir dois ângulos. Neste segundo caso podem ser classificadas como simétricas (ângulos iguais) ou biangulares (ângulos diferentes). Normalmente as fresas para cauda de andorinha possuem haste incorporada, enquanto as biangulares não. A **figura 1.24** ilustra estas ferramentas.

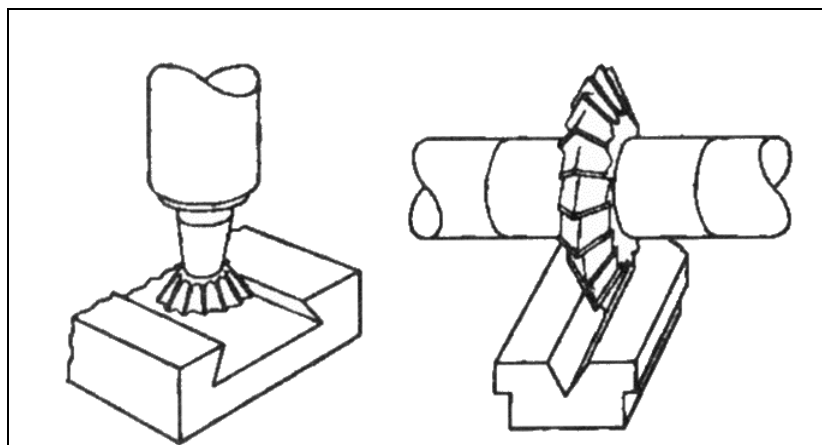


Figura 1.24 – Fresa cauda-de-andorinha e fresa biangular simétrica.

As fresas de forma possuem o perfil de seus dentes afiados para gerar superfícies especiais tais como dentes de engrenagem (fresa módulo), superfícies côncavas ou convexas, raios de concordância e outras formas específicas de cada caso, e são denominadas fresas especiais. Alguns autores classificam as fresas cônicas como fresas de forma. As fresas especiais normalmente são fabricadas pela própria empresa que as utiliza, no setor denominado de *ferramentaria*, ou são encomendadas em empresas especializadas em ferramentas. A **figura 1.25** ilustra algumas fresas de forma.

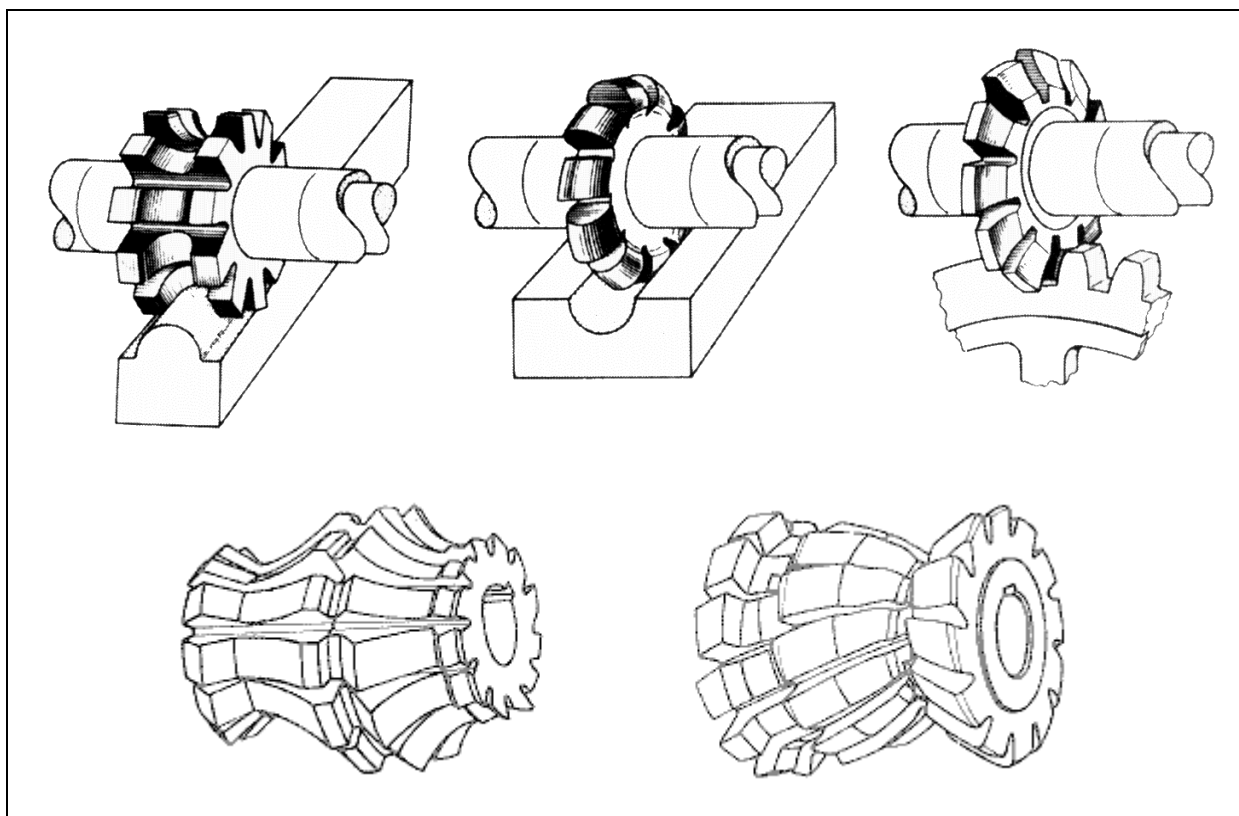


Figura 1.25 – Fresa para perfil convexo, côncavo, dentes de engrenagem e especiais.

Quanto ao sentido de corte a classificação é simples, pois trata do sentido de giro da ferramenta, observado do lado do acionamento (de cima para baixo). Tem-se as fresas de corte à direita (horário) e as fresas de corte à esquerda (anti-horário). Obviamente esta classificação só se emprega em fresas de haste fixa. As fresas que não possuem haste podem, normalmente, ser fixadas tanto em um sentido como em outro.

Quanto aos dentes estes podem ser retos, helicoidais ou bihelicoidais, como mostra a **figura 1.26**. Os dentes helicoidais tem como vantagem uma menor vibração durante a usinagem, ou seja, o corte é mais suave pois o dente não atinge a peça de uma só vez como acontece com os dentes retos. Os dentes helicoidais geram uma força axial, e para compensar esta força pode-se recorrer a uma fresa bihelicoidal, ou seja, uma ferramenta que possui um dente afiado em um sentido e o dente seguinte afiado no sentido inverso.

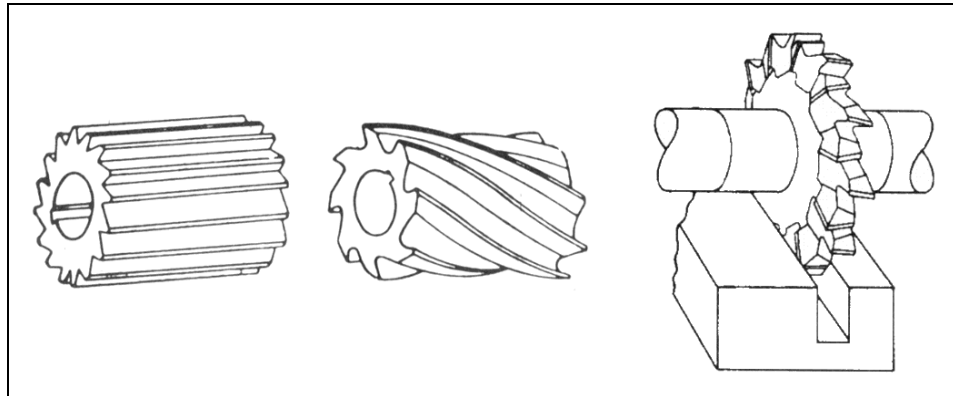


Figura 1.26 – Fresas de dentes retos, helicoidal e bihelicoidal.

Mas fresas bihelicoidais só são possíveis em espessuras relativamente pequenas e com ângulos reduzidos de hélice. Para possibilitar usinagem de grandes superfícies sem o efeito da força axial deve-se recorrer a uma montagem de duas fresas de mesmo diâmetro e número de dentes, mas com hélices invertidas, como na **figura 1.27**.

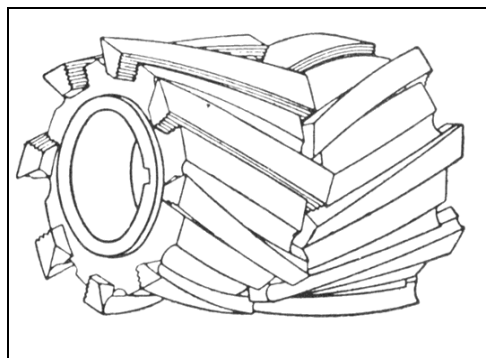


Figura 1.27 – Montagem bihelicoidal.

Quanto à construção pode-se classificar as fresas como inteiriças, onde toda a ferramenta é construída de um mesmo material. As mais comuns são as de aço rápido e metal duro. Há também a fresa calçada onde o corpo da ferramenta é de um material mais simples e os gumes de corte, soldados ao corpo, são de um material mais nobre, como aço rápido ou metal duro. Finalmente há as fresas com dentes postiços que são similares as fresas calçadas. A diferença é que os dentes de aço rápido, metal duro, diamante ou cerâmicos podem ser trocados em caso de quebra ou desgaste. A **figura 1.28** apresenta exemplos destas fresas.

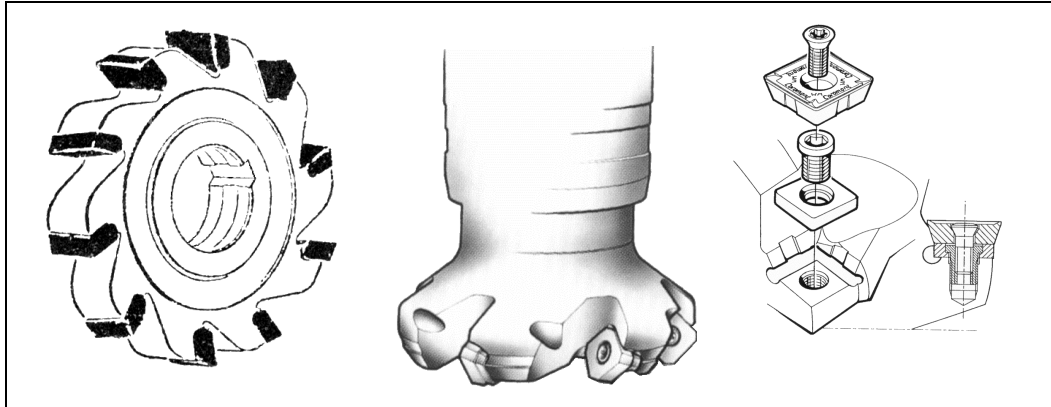


Figura 1.28 – Fresa calçada, fresa de dentes postiços e detalhe da fixação da pastilha.

As fresas também podem ser classificadas quanto às faces de corte (o número de superfícies com afiação) e que definem em que direção a ferramenta pode avançar, ou seja, se poderá executar uma fresagem tangencial (eixo paralelo à peça) e/ou uma fresagem frontal (eixo perpendicular à peça). Tem-se fresas de um, dois e três cortes. A fresa de um corte possui afiação, normalmente, apenas em sua superfície cilíndrica. A fresa de dois cortes possui afiação em uma de suas faces e em sua superfície cilíndrica. Uma fresa de três cortes possui afiação nas duas faces e também na superfície cilíndrica. A **figura 1.29** ilustra uma fresa de dois cortes.

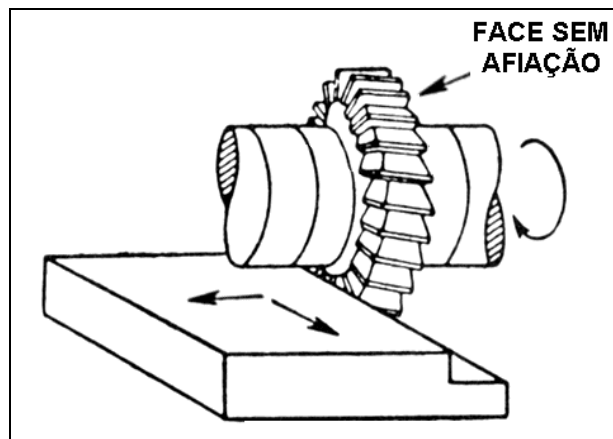


Figura 1.29 – Fresa de dois cortes e os sentidos em que pode usar.

Quanto a aplicação as fresas são classificadas em tipo W ($\alpha=8^\circ$, $\beta=57^\circ$ e $\gamma=25^\circ$) indicada para materiais de baixa dureza como alumínio, bronze e plásticos. O tipo N ($\alpha=7^\circ$, $\beta=73^\circ$ e $\gamma=10^\circ$) é indicada para materiais de média dureza, como os aços até 700N/mm^2 . As fresas do tipo H ($\alpha=4^\circ$, $\beta=81^\circ$ e $\gamma=4^\circ$) são indicadas para materiais duros, como os aços acima de 700N/mm^2 . A *figura 1.30* apresenta uma comparação entre estas fresas.

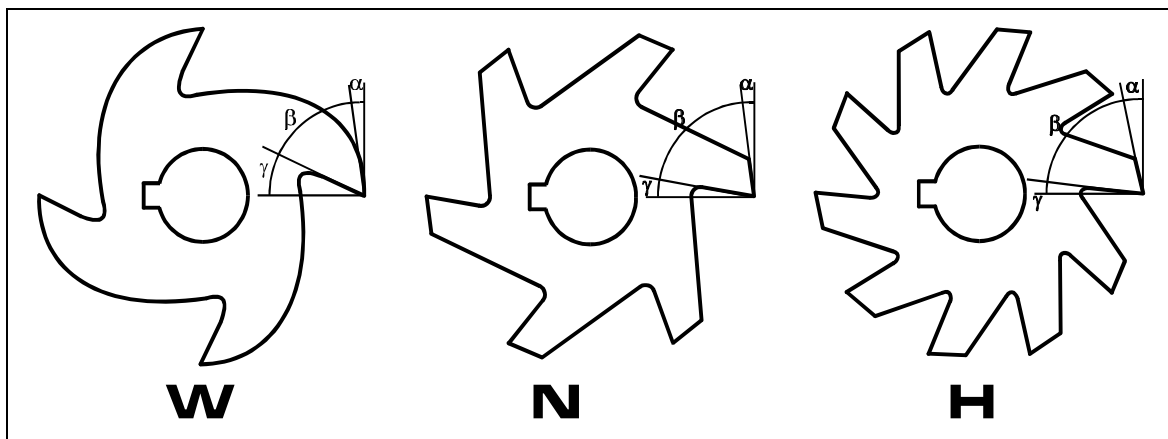


Figura 1.30 – Tipos de fresas.

Observa-se que fresas para materiais mais macios podem ter dentes menos resistentes, o que significa possuir um ângulo de cunha menor. Isto permite colocar menos dentes na ferramenta, deixando maior espaço para transportar o cavaco, que será removido em grandes quantidades. Em uma fresa para materiais de alta dureza cada dente remove pouco material. Desta forma é necessário que a fresa possua muitos dentes para que, em uma volta, remova uma quantidade significativa de material. Além disto os dentes deverão ter um ângulo de cunha maior para lhes conferir maior resistência.

Quanto a fixação pode-se fresas de haste cilíndrica ou cônica e fresas para mandril com chaveta longitudinal ou transversal. A *figura 1.31* apresenta algumas delas.

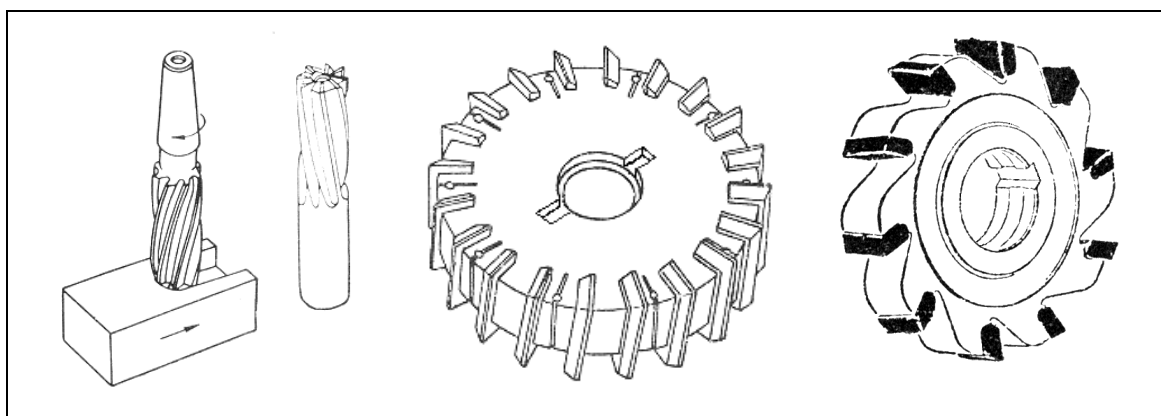


Figura 1.31 – Fresas de haste (cônica e cilíndrica) e de chaveta (transversal e longitudinal).

1.7 – Métodos de fresagem

Os métodos de fresagem se referem ao movimento relativo entre a peça e a ferramenta. Pode-se ter fresagem discordante, concordante ou combinada.

Fresamento concordante

O sentido de rotação da fresa é o mesmo do avanço da peça no ponto de contato. O corte inicia-se com a espessura máxima do cavaco e a força de corte tende a apertar a peça contra a mesa. É a forma menos indicada de fresamento, e está apresentada na **figura 1.32**.

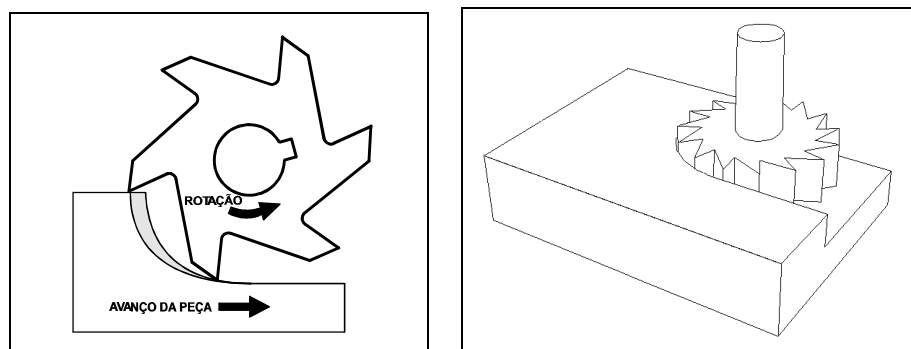


Figura 1.32 – Fresamento concordante.

A maioria das fresadoras trabalha com o avanço da mesa baseado em porca/parafuso, que com o tempo e desgaste apresentam uma folga. No movimento concordante esta folga é empurrada pelo esforço de corte. Desta forma a mesa pode executar movimentos irregulares que poderão prejudicar o acabamento da peça e até mesmo quebrar os dentes da fresa.

Fresamento discordante

Nesta situação o sentido de rotação da fresa é contrário ao sentido de avanço da peças, no ponto de contato. Isto faz com que o corte do cavaco se inicie com a espessura mínima. A força de corte tende a levantar a peça da mesa. Se a peça for longa e estiver presa pelas extremidades poderá gerar vibrações indesejadas. A **figura 1.33** ilustra este método de fresamento.

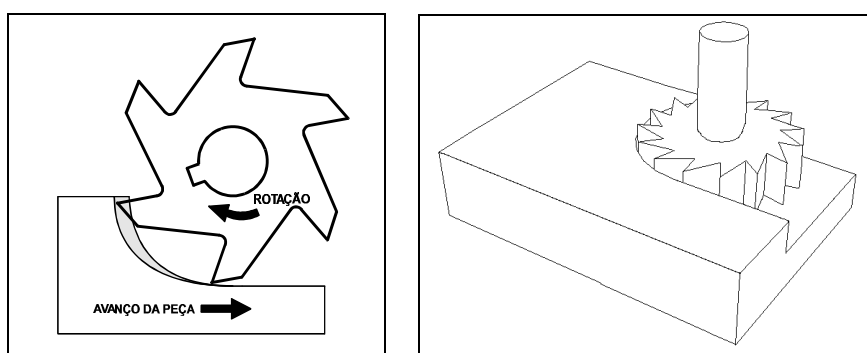


Figura 1.33 – Fresamento discordante.

Este tipo de fresamento costuma desgastar um pouco mais a ferramenta. Como o corte inicia-se com pouca espessura, o início do corte é difícil. Na realidade o gume de corte começa encruando o material a ser cortado, até que sejam superadas as deformações elásticas e realmente inicie-se o cisalhamento do material. Este encruamento eleva localmente a dureza, fazendo com que o desgaste seja um pouco mais elevado. Neste método de fresamento não há influência da folga entre porca/parafuso, fazendo com que o movimento da mesa seja mais uniforme, gerando melhor acabamento.

Fresamento combinado

Ocorre quando a fresa tem seu eixo dentro do campo de corte da peça. Desta forma parte do corte ocorre através da fresagem concordante e parte através da discordante. A **figura 1.34** apresenta este método de fresamento.

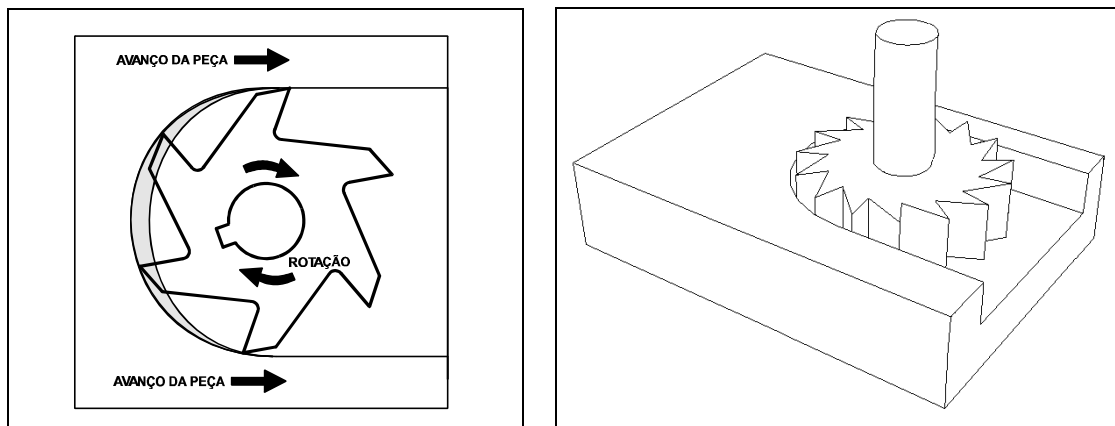


Figura 1.34 – Fresamento combinado.

1.8 – Fluidos de corte

As finalidades dos fluidos de corte ou fluidos refrigerantes são basicamente quatro: refrigeração, lubrificação, proteção e limpeza. Como *refrigerante* o fluido de corte atua sobre a peça para evitar sua dilatação e com isto permitir a obtenção da precisão dimensional. Na ferramenta a refrigeração é importante para manter as características de resistência e dureza.

Como *lubrificante* o fluido de corte facilita o deslizamento do cavaco sobre a ferramenta e diminui o atrito entre a peça e a ferramenta. Evita o aparecimento da aresta postiça, reduz o coeficiente de atrito na região ferramenta-cavaco e diminui a solitação dinâmica da máquina. Sua ação como *protetor contra oxidação* é também de grande importância. O fluido de corte protege a tanto peça como a ferramenta dos efeitos da oxidação. A própria máquina terá as suas partes em contato com o fluido de corte protegidas destes efeitos.

A ação de *limpeza* refere-se à remoção do cavaco quando o fluido de corte é aplicado em forma de jato. Isto evita danos na superfície já usinada, que poderia ficar com seu acabamento comprometido com um constante atrito. Também pode evitar a quebra dos dentes da fresa.

Tipos de fluidos de corte

Apesar de genericamente designados como *fluidos* de corte, os materiais que podem cumprir as funções descritas podem ser sólidos, líquidos e gasosos. A preferência pelos líquidos está no fato de executarem todas as tarefas citadas enquanto os sólidos só reduzem o atrito e os gases apenas refrigeram e removem o cavaco.

Como exemplos de gases pode-se citar a utilização de ar comprimido refrigerado, dióxido de carbono (CO₂ ou gelo-seco) e nitrogênio. Os materiais sólidos mais utilizados são o grafite e o bissulfeto de molibdênio.

O grande grupo dos fluidos de corte líquidos é dividido em três categorias: óleos de corte integrais, óleos emulsionáveis e sintéticos. Os *integrais* (não são misturados com água) são formados por óleos minerais (derivados do petróleo), óleos graxos (de origem animal ou vegetal), óleos compostos (mineral + graxos), óleos sulfurados (com enxofre) e clorados (com cloro na forma de parafina clorada).

Os óleos *emulsionáveis* ou *solúveis* são formados por óleos minerais solúveis em água e óleos solúveis de extrema pressão (EP). Para se conseguir a mistura de água e óleo utiliza-se agentes emulsificadores (sabões e detergentes) que ajudam a formar as gotículas de óleo que ficam dispersas na água. Quanto menor estas gotículas de óleo, melhor a emulsão.

Os fluidos de corte *químicos* ou *sintéticos* são compostos por misturas de água com agentes químicos como aminas, nitritos, fosfatos, boratos, sabões, glicóis, germicidas e agentes umectantes.

Os óleos minerais são a base da maioria dos fluidos de corte. A ele são acrescentados *aditivos* para melhorar as suas características em determinadas situações. Os mais utilizados são os antioxidantes (impedem que o óleo se deteriore quando em contato com o oxigênio do ar) e os agentes EP (evitam o rompimento da fina película de óleo entre a peça e a ferramenta). Outros aditivos que devem ser citados são antiespumantes, biocidas e anticorrosivos biodegradáveis.

1.9 – Parâmetros de usinagem

São diversos os parâmetros de usinagem que deve-se conhecer na operação de fresamento. Tem-se:

Velocidade de corte - V_c [m/min]

A velocidade de corte depende do material a ser usinado e do material da ferramenta. Este valor normalmente é tabelado pelos fabricantes de ferramentas.

Rotação da ferramenta – n [rpm]

A rotação da ferramenta é responsável pela velocidade de corte, e depende também do seu diâmetro (**d**). Tem-se a seguinte relação:

$$n \text{ [rpm]} = \frac{V_c \text{ [m/min]} * 1000}{\pi * d \text{ [mm]}} \quad (1.1)$$

Velocidade de avanço – v_a [mm/min]

Depende da: área de material removido (**A**), resistência específica do material da peça (**r_e**), potência de usinagem (**P_u**), capacidade de remoção de material de cada aresta cortante (**a_z**), o número de arestas de corte (**Z**) e também da rotação da ferramenta (**n**).

Tendo como referência a potência disponível para a usinagem pode-se calcular a velocidade de avanço máxima suportada pela máquina. Este valor é obtido pela seguinte relação:

$$v_a \text{ [mm / min]} = \frac{P_u \text{ [CV]} * 75 * 1000 * 60}{A \text{ [mm}^2\text{]} * r_e \text{ [kg / mm}^2\text{]}} \quad (1.2)$$

A velocidade de avanço pode ser obtida através de uma outra característica da ferramenta, que é o *avanço por dente* (**a_z**), que mostra qual a quantidade máxima de material que pode ser removida por uma aresta de corte. Por meio deste valor e do número de arestas cortantes da ferramenta (**Z**) torna-se possível calcular o *avanço por volta*.

$$a_v \text{ [mm / volta]} = a_z \text{ [mm / dente]} * Z \quad (1.3)$$

Com o valor do avanço por volta, obtido anteriormente, e o valor da rotação da ferramenta pode-se calcular a velocidade de avanço máxima permitida pela ferramenta, tomando como referência a capacidade de remoção do cavaco.

$$v_a [\text{mm} / \text{min}] = a_v [\text{mm} / \text{volta}] * n [\text{rpm}] \quad (1.4)$$

Resistência de corte do material – r_e [kg/mm²]

Esta variável também é chamada de pressão específica de corte. Depende da resistência à tração do material, que pode ser facilmente obtida pelo fabricante/fornecedor (tabelas). A relação utilizada para obter este valor é:

$$r_e [\text{kg/mm}^2] = (3 \text{ a } 4) * \sigma_r [\text{kg/mm}^2] \quad (1.5)$$

Potência de usinagem – P_u [CV]

É uma porcentagem da potência do motor de acionamento (P_m). Depende do rendimento do sistema de transmissão da máquina, que por sua vez depende do tipo de transmissão, que pode ser por correia ou por engrenagens. O próprio rendimento do motor também influi no resultado. Tem-se:

$$P_u [\text{CV}] = P_m [\text{CV}] * \eta_{\text{motor}} * \eta_{\text{correia}} * \eta_{\text{maquina}} \quad (1.6)$$

Para o caso de uma máquina que não utiliza correia, utilizar a relação acima sem sua respectiva componente. Além disto deve-se verificar com atenção as unidades em questão. A relação que permite realizar a conversão de unidades é:

$$P [\text{CV}] = P [\text{kW}] * 1,36 \quad (1.7)$$

Volume de cavaco removido – V [cm³/min]

Em grandes produções torna-se importante planejar a frequência com que se deve retirar os cavacos da máquina para que não cause acidentes e atrasos na fabricação. Para isto deve-se calcular a quantidade de material removida na operação, o que pode ser realizado pela relação:

$$V [\text{cm}^3 / \text{min}] = \frac{p [\text{mm}] * b [\text{mm}] * v_a [\text{mm} / \text{min}]}{1000} \quad (1.8)$$

Força de corte – F_c [Kgf]

A força de corte depende da potência de usinagem (P_u) e da velocidade de corte (V_c). Pode ser calculada pela relação:

$$F_c [\text{kgf}] = \frac{P_u [\text{CV}] * 75 * 60}{V_c [\text{m} / \text{min}]} \quad (1.9)$$

Momento torçor – M_t [kgf.mm]

O cálculo do momento torçor envolve a força de corte e o diâmetro da ferramenta através da seguinte relação:

$$M_t [\text{kgf} \cdot \text{mm}] = \frac{F_c [\text{kgf}] * d [\text{mm}]}{2} \quad (1.10)$$

Resistência ao avanço – R [kgf]

A resistência ao avanço pode ser calculada por:

$$R [\text{kgf}] = 1,4 * F_c [\text{kgf}] \quad (1.11)$$

Tempo de corte – T_c [min]

O tempo de corte é um dos principais parâmetros analisados quando o objetivo é a otimização do processo. De forma geral tem-se a seguinte relação:

$$T_c [\text{min/peça}] = \frac{\text{espaço} [\text{mm}]}{v_a [\text{mm/min}]} \quad (1.12)$$

A variável *espaço* deve ser analisada em cada situação. A **figura 1.35** apresenta um esquema geral para a usinagem de um canal que atravessa a peça. Pode-se considerar que o espaço é a soma do comprimento da peça mais o diâmetro da ferramenta, desconsiderando-se as folgas inicial e final. Se o canal não atravessasse todo o comprimento da peça então o espaço seria o próprio comprimento do canal.

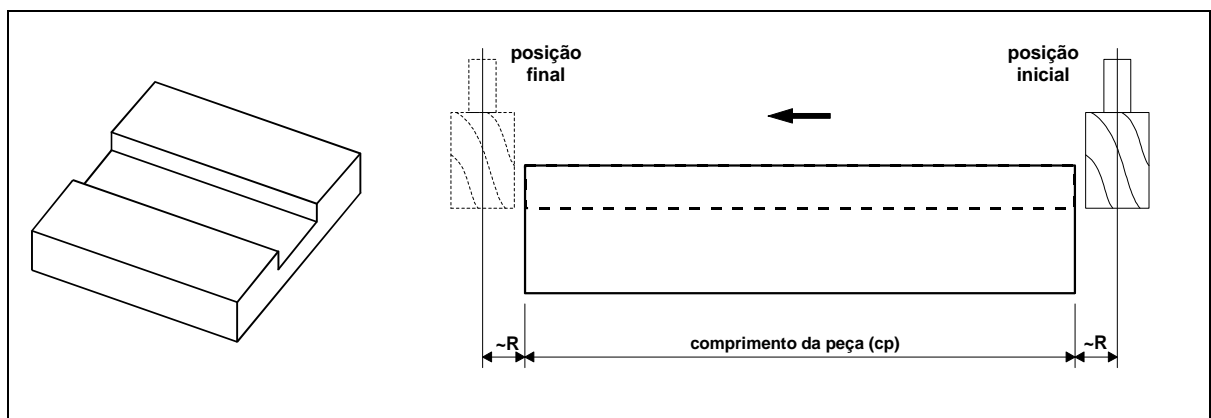


Figura 1.35 – Espaço para um canal.

É comum também ter situações onde a usinagem da peça envolva diferentes velocidades de corte em diferentes etapas. Neste caso será necessário calcular o tempo de corte de cada uma destas etapas e soma-las.

Tempo unitário – T_1 [min/peça]

É o tempo total gasto por uma peça. Calcula-se por meio da soma do tempo de corte (T_c) com o tempo de preparação da peça (T_p), como mostra a seguinte relação:

$$T_1 [\text{min}] = T_c [\text{min}] + T_p [\text{min}] \quad (1.13)$$

Produtividade – Pr [peças/min]

A produtividade, definida como peças/minuto (ou outra unidade de tempo) também é utilizada como parâmetro na otimização do processo, facilitando a comparação entre máquinas. É simplesmente o inverso do tempo de corte.

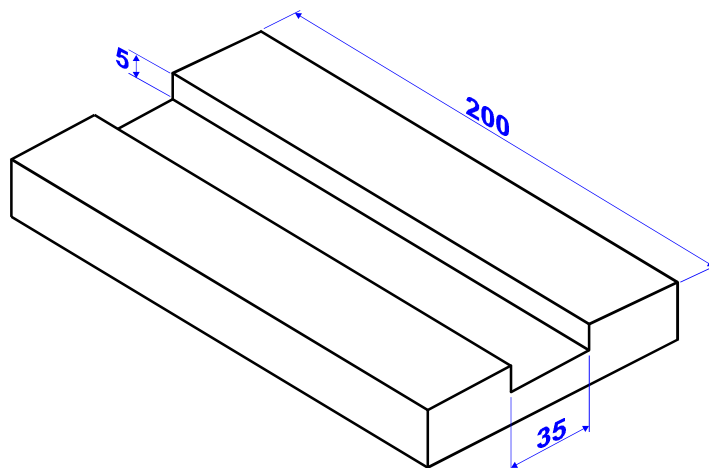
$$Pr [\text{peça} / \text{min}] = \frac{1}{T_c [\text{min} / \text{peça}]} \quad (1.14)$$

Tempo do lote – T_L [hs]

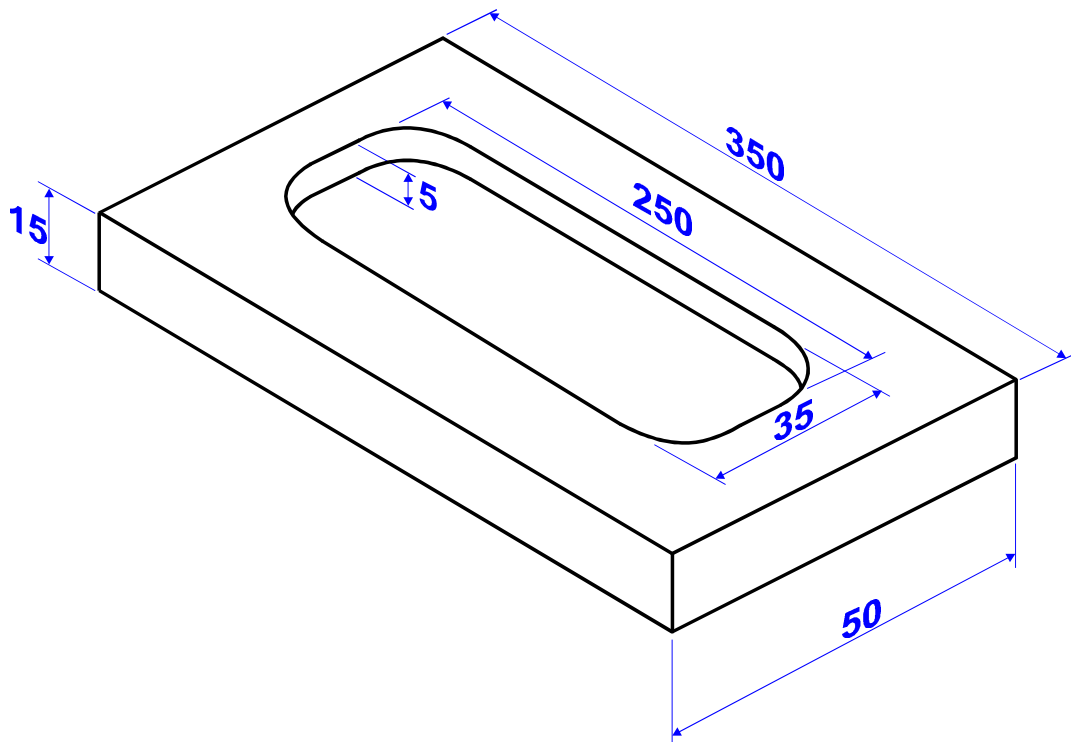
É o tempo gasto para se usinar um lote de peças. Depende do tempo unitário (T_1), da quantidade de peças do lote (Q) e do número de máquinas que processarão o lote (n_{maq}).

$$T_L [\text{hs}] = \frac{T_1 [\text{min}] * Q}{n_{maq} * 60} \quad (1.15)$$

Exercício 1: Com uma fresa disco deseja-se usinar um canal de 5 mm de profundidade em uma peça de 200 mm de comprimento e de material 65 kgf/mm². A velocidade de corte recomendada pelo fabricante da ferramenta é 14 m/min. Será utilizada uma fresadora horizontal com motor de 3 kW (95% de rendimento). Estima-se o rendimento da máquina em 95%. As características da fresa são: 150 mm de diâmetro, 35 mm de largura, 24 arestas cortantes e 0,54 mm de avanço por dente. Calcule a velocidade de avanço e o tempo de corte. Pode-se realizar alguma melhoria?

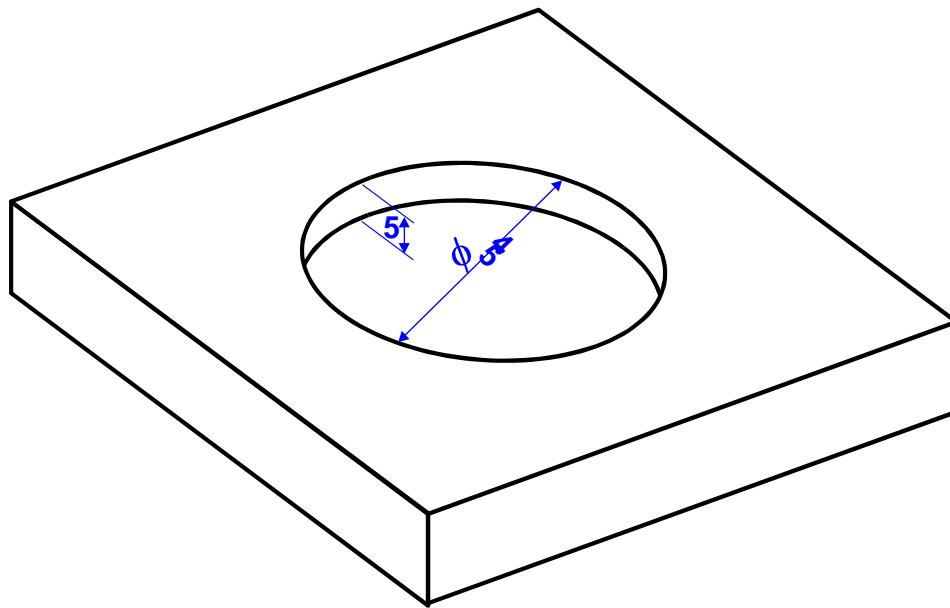


Exercício 2: Deseja-se fresar um lote de 7500 peças de aço cuja resistência específica de corte é de 280 kg/mm^2 com 350 mm de comprimento, 15 mm de altura e 50 mm de largura. A operação consiste de um bolsão centrado na face superior da peça com largura de 35 mm, 250 mm de comprimento e profundidade de 5 mm. As fresas compradas para esta operação são de topo, com 4 pastilhas de metal duro, diâmetro de 25 mm, velocidade de corte de 70 m/min e avanço por dente de 0.13 mm. Estão disponíveis três fresadoras verticais para esta usinagem, sendo a fresadora Fr1 com potência de 1 kw, Fr2 com 3 kw e Fr3 com 5 kw. A decisão do processista é sempre realizar a abertura do bolsão em apenas uma passada e na maior velocidade de avanço possível para não perder tempo. Qual o tempo de usinagem (horas e minutos) do lote, considerando o tempo de setup entre peças de 40 segundos em média. Obs: A peça já possui um furo inicial em um dos cantos do bolsão.



Exercício 3: Deseja-se fresar um lote de 500 peças de aço de resistência específica de corte de 250 kg/mm^2 com 100 mm de comprimento, 100 mm de largura e 45 mm de altura. A operação consiste na abertura de um bolsão circular centrado na face maior da peça com diâmetro de 54 mm e profundidade de 5 mm. As fresas compradas para esta operação são de topo, inteiriças de metal duro, com 2 gumes de corte, diâmetro de 14 mm, velocidade de corte de 40 m/min e avanço por dente de 0.10 mm. Serão utilizadas duas fresadoras verticais para a usinagem do lote, ambas com potência útil de 0,3 CV. De acordo com o processo de fabricação elaborado a posição inicial da ferramenta será no centro da peça a 1 mm da face. O material do bolsão será

removido em duas etapas de 2.5 mm de profundidade. A velocidade de avanço de aprofundamento será de 1/4 da velocidade de avanço normal. A abertura do diâmetro do bolsão será executada em dois passes de igual tamanho. Deverá ser utilizada a maior velocidade de avanço possível. A velocidade de retorno para o centro do bolsão e a velocidade de subida da ferramenta serão ajustadas para 300 mm/min. Observe que as posições inicial e final da ferramenta são as mesmas. Qual o tempo de usinagem (horas e minutos) do lote, considerando o tempo de setup entre peças de 29 segundos em média.



Exercício 4: Deve-se fresar, em 32 horas (4 dias de 8 horas), um lote de 3000 peças de aço de resistência específica de corte de 390 kg/mm^2 . A operação consiste de um bolsão circular com diâmetro de 75 mm e profundidade de 12 mm. As fresas são de topo, interiças de metal duro, com 2 gumes de corte, diâmetro de 30 mm, velocidade de corte de 80 m/min e avanço por dente de 0.15 mm. De acordo com o processo de fabricação elaborado a posição inicial da ferramenta será no centro da peça a 1 mm da face. O material do bolsão será removido em etapas de 4 mm de profundidade. A velocidade de avanço de aprofundamento será de 1/3 da velocidade de avanço normal. Deverá ser utilizada a maior velocidade de avanço possível. A velocidade de retorno para o centro do bolsão após cada etapa e a velocidade de subida da ferramenta será ajustada para 500 mm/min. Observe que as posições inicial e final da ferramenta são as mesmas. Considerando que o tempo de troca de peças está estimado em 40 segundos, planejar que máquinas serão utilizadas (potência e quantidade).

1.10 – Divisor universal

O divisor universal, também conhecido como cabeçote divisor, é um dos principais acessórios da fresadora. Sua finalidade é a de dividir uma circunferência em n partes iguais. Sendo assim pode-se usinar peças com seções na forma de polígonos regulares (quadrados, hexágonos, etc.), executar sulcos regularmente espaçados (canais de lubrificação, dentes de engrenagem, etc.), usinar cavidades circulares, etc. Os modos de divisão são três: divisão direta, divisão indireta e divisão diferencial.

1.10.1 – Divisão direta

Esta forma de divisão recebe este nome pois é executada diretamente no eixo onde está fixada a peça. É a forma mais simples e limitada. A **figura 1.36** ilustra este divisor. Utiliza um disco perfurado denominado *disco divisor* que possui o número de furos necessários para girar a peça e executar a divisão desejada.

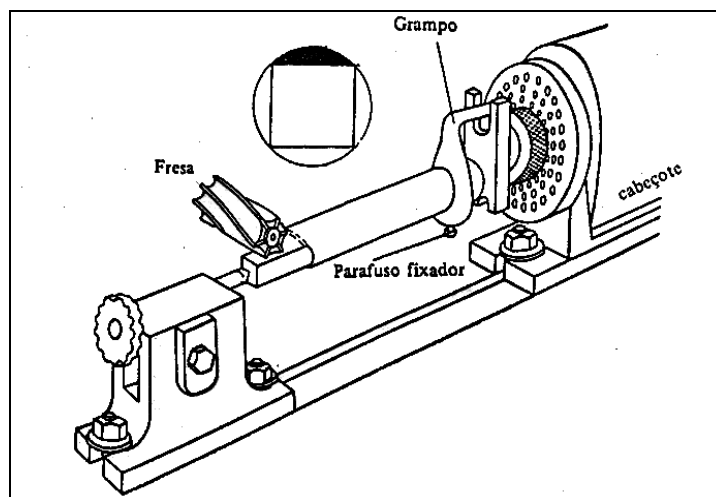


Figura 1.36 – Divisor universal para divisão direta.

O disco divisor pode conter mais de uma carreira de furos e furos em ambas as faces, de modo a ter maior flexibilidade, pois só é permitida a divisão em números que sejam submúltiplos do número de furos de cada carreira. Por exemplo, supondo um disco que tenha uma carreira de 24 furos pode-se executar as seguintes divisões: 2, 3, 4, 6, 8, 12 e 24.

Exemplo: deseja-se usinar na ponta de um eixo cilíndrico de diâmetro 50 mm um quadrado centrado de 25 mm de lado. Será utilizado um divisor universal de divisão direta com disco de 24 furos. A fresadora é vertical e deverá ser utilizada uma fresa de topo de 30 mm de diâmetro. Escreva um roteiro de execução da peça.

1.10.2 – Divisão indireta

A divisão indireta faz uso de uma relação de transmissão por meio de parafuso sem-fim e coroa, como mostra a **figura 1.37**. Como a divisão não ocorre diretamente no eixo onde a peça é fixada esta divisão recebeu o nome de *indireta*.

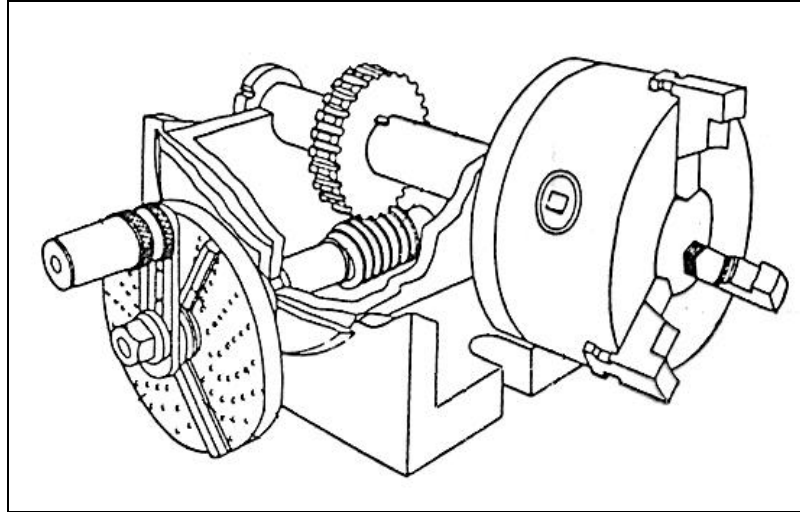


Figura 1.37 – Detalhe da transmissão do divisor universal.

Este sistema permite obter uma maior série de divisões com o mesmo disco divisor. Pode-se tomar, como exemplo de disco divisor, um que possui as seguintes carreiras de furos: face A (15, 18, 20, 23, 27, 31, 37, 41 e 47) e face B (16, 17, 19, 21, 29, 33, 39, 43 e 49).

O parafuso sem-fim é comandado por uma manivela, ou manípulo, que contém um pino que ajusta-se aos furos do disco divisor. Por sua vez o sem-fim comanda uma coroa que está ligada diretamente à árvore onde fixa-se a peça.

A relação de transmissão (i) depende do número de entradas do parafuso sem-fim (e_{sf}) e do número de dentes da coroa (d_c) através da seguinte relação:

$$i = \frac{e_{sf}}{d_c} \quad (1.16)$$

É comum encontrar esta relação como sendo $1/40$, e na prática fala-se que a constante (K) do divisor é 40. Ou seja, são necessárias 40 voltas da manivela para que a árvore execute uma volta. Portanto, para calcular o giro da manivela (G) para se executar o número de divisões desejadas (n) utiliza-se a seguinte relação:

$$G = \frac{K}{n} \quad (1.17)$$

O giro da manivela indica o número de voltas que deverão ser dadas e também a carreira de furos a ser utilizada. Quando mais de uma carreira de furos possibilitar a divisão deve-se optar pela maior (mais externa ao disco, que fornece maior precisão).

Exemplos: Calcule o giro da manivela para 8, 20, 5, 80, 3, 12, 6, 51, 67.

1.10.3 – Divisão diferencial

Quando não há maneira de utilizar a divisão indireta deve-se optar pela divisão diferencial. Nesta divisão realiza-se o cálculo para um número de divisões aproximado (n') do número desejado (n). Devido a esta diferença de valores a divisão recebeu o nome *diferencial*.

$$G = \frac{K}{n'} \quad (1.18)$$

Para corrigir esta diferença é necessário calcular um trem (ou grade) de engrenagens que faça uma compensação. Este trem de engrenagens é conectado entre a árvore e o disco divisor, como mostra a **figura 1.38**. Este trem de engrenagens é conhecido como *trem diferencial*.

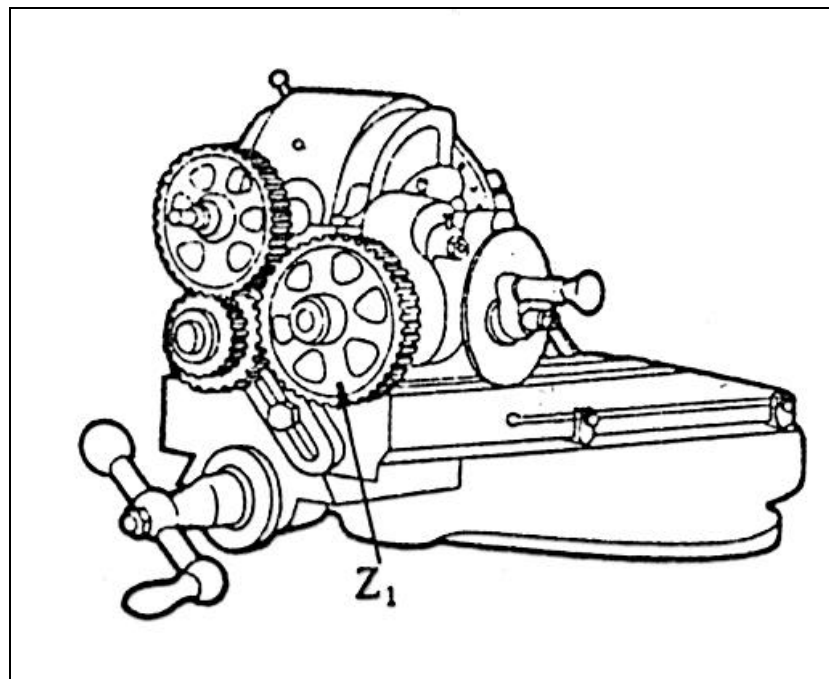


Figura 1.38 – Montagem do trem diferencial no divisor universal.

Enquanto gira-se a manivela o disco também gira, só que de forma praticamente imperceptível. Este trem de engrenagens é esquematizado pela **figura 1.39**. Do lado esquerdo tem-se o trem simples e do direito o trem composto. Pode-se calcular o trem através da relação:

$$i = \frac{K}{n'} * (n' - n) = \frac{Z_{\text{arvore}}}{Z_{\text{disco}}} = \frac{Z_{\text{arvore}} * Z_b}{Z_c * Z_{\text{disco}}} \quad (1.19)$$

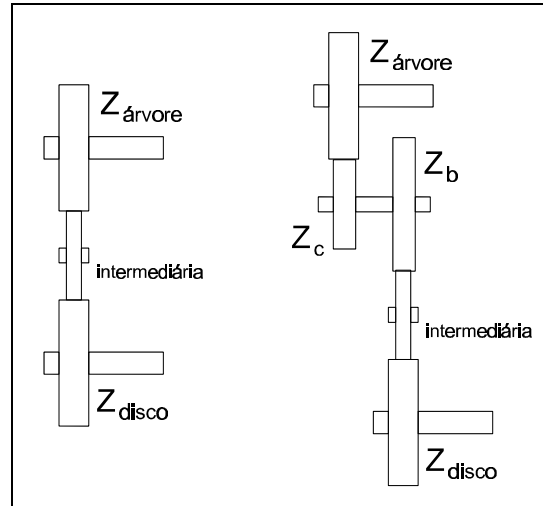


Figura 1.30 – Esquemas de montagem do trem diferencial.

A **figura 1.40** mostra em detalhes todas as engrenagens internas e o trem simples montado no divisor universal. A **figura 1.41** mostra o mesmo esquema, mas com a montagem do trem composto, em uma vista de topo.

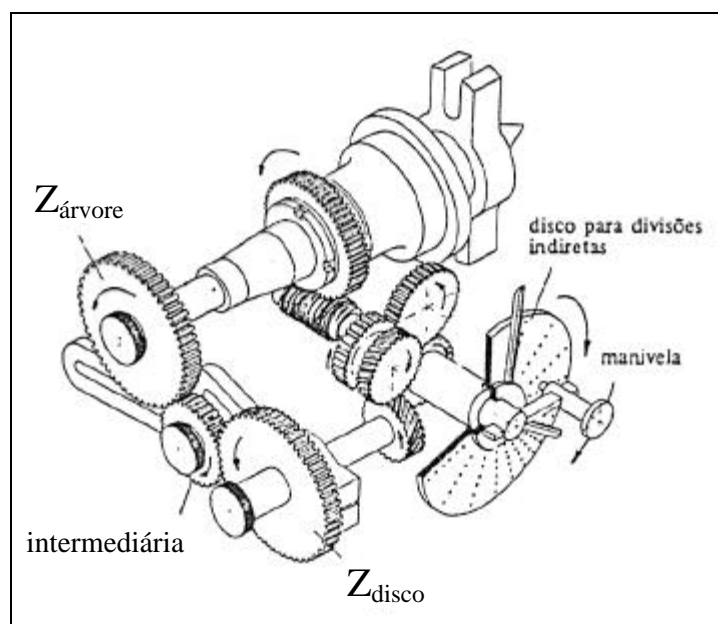


Figura 1.40 – Esquema geral com a montagem de um trem simples.

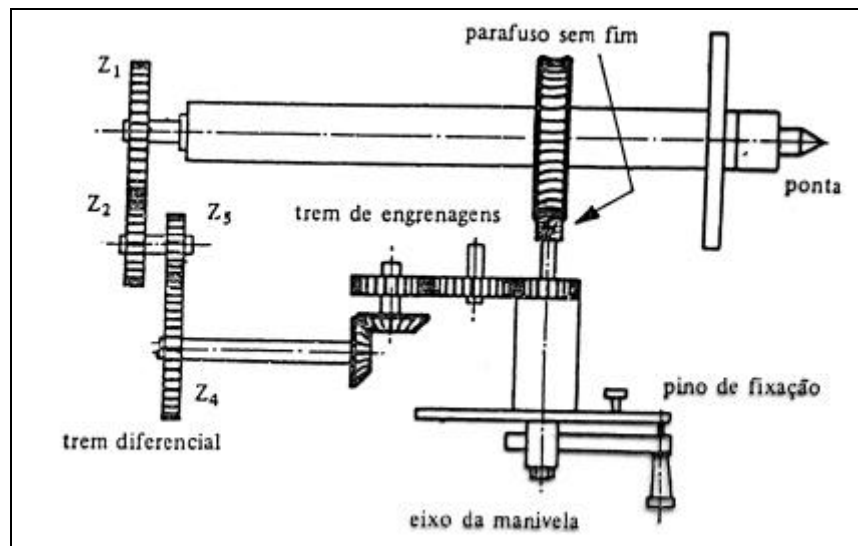


Figura 1.41 – Esquema geral com a montagem de um trem composto.

Gira-se a manivela que aciona o parafuso sem-fim que gira a coroa. O eixo da coroa gira a peça e também gira a primeira engrenagem do trem diferencial. A última engrenagem do trem diferencial irá girar o disco (através de um conjunto interno de engrenagens).

Observação importante: se $i > 0$ então o disco deverá girar no mesmo sentido da manivela. ($n' > n$). Se $n' < n$ então teremos $i < 0$ e o disco deverá girar no sentido inverso ao da manivela. Portanto, após a montagem do trem diferencial deve-se realizar uma verificação para confirmar os sentidos de giro, e se necessário, corrigi-lo através da engrenagem intermediária. A **figura 1.42** ilustra esta situação.

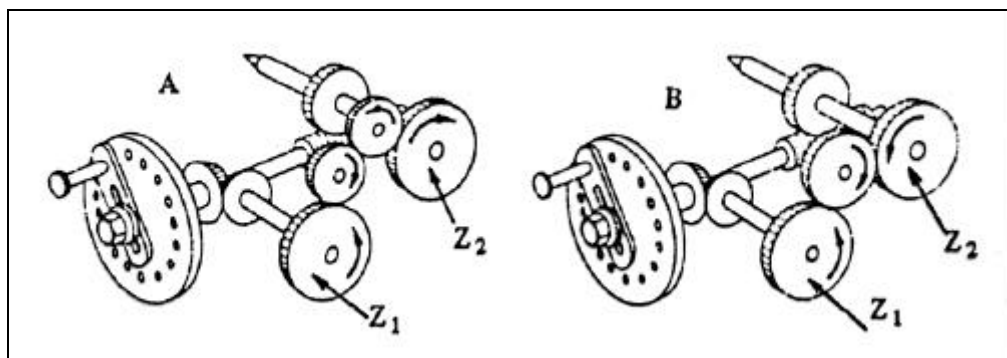


Figura 1.42 – Utilização de engrenagem intermediária.

Para a montagem do trem diferencial estão disponibilizadas engrenagens com os seguintes números de dentes: 20, 24, 28, 32, 40, 44, 48, 52, 56, 60, 64, 72, 80, 86, 100.

Exemplos: calcule os dados necessários para executar 51, 67 e 127 divisões.

1.10.4 – Execução de hélices

Outra capacidade importante do divisor universal é possibilitar a usinagem helicoidal. Para se fresar uma hélice é necessário que a ferramenta ou a mesa sejam inclinadas de um certo ângulo em relação a peça. Além disto é necessário que a peça gire enquanto ocorre o avanço.

Para que isto seja possível conecta-se o fuso da mesa ao divisor universal através de um trem de engrenagens denominado de *trem helicoidal*, que pode ser simples ou composto, como mostra a **figura 1.43**.

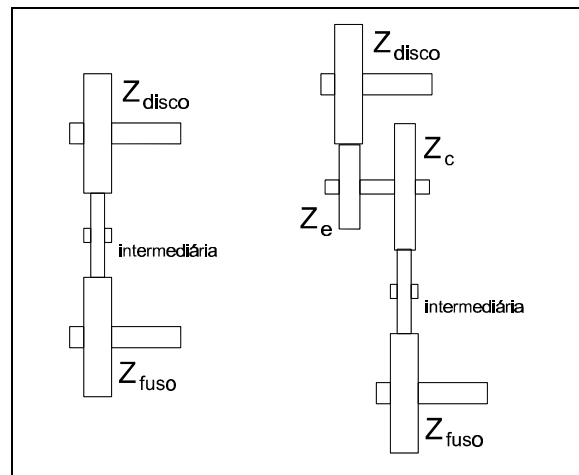


Figura 1.43 – Trem helicoidal simples e composto.

Para se executar hélices à direita deve-se girar a mesa no sentido anti-horário (ou seja, empurrar o lado direito da mesa). Para hélices à esquerda faz-se o contrário. Além disto é necessário sincronizar o movimento de giro fornecido pelo trem de engrenagens. Sendo assim, após sua montagem deve-se verificar a necessidade ou não do uso de uma engrenagem intermediária.

Para executar a usinagem de uma hélice é necessário conhecer o passo da hélice (P_h), ângulo da hélice (φ), o passo do fuso (P_f), o diâmetro externo da peça (d) e o valor da constante do divisor (K). As seguintes relações envolvem estas variáveis.

$$\text{Inclinação entre peça e ferramenta: } \boxed{\varphi} \quad (1.20)$$

$$\text{Passo da hélice: } \boxed{P_{\text{hélice}} = \frac{\pi * d}{\text{tg}(\varphi)}} \quad (1.21)$$

$$\text{Trem helicoidal: } \boxed{i = \frac{P_{\text{hélice}}}{P_{\text{fuso}} * K} = \frac{Z_{\text{disco}}}{Z_{\text{fuso}}} = \frac{Z_{\text{disco}} * Z_c}{Z_e * Z_{\text{fuso}}}} \quad (1.22)$$

A **figura 1.44** ilustra a instalação das engrenagens do trem helicoidal no divisor universal e também um esquema com as engrenagens internas. Para entender a seqüência de eventos envolvida pode-se observar a **figura 1.45**. O fuso move a mesa e aciona a primeira engrenagem do trem helicoidal. A última engrenagem do trem helicoidal irá girar o disco. A manivela gira junto com o disco pois o pino está encaixado. Como a manivela gira, a peça gira.

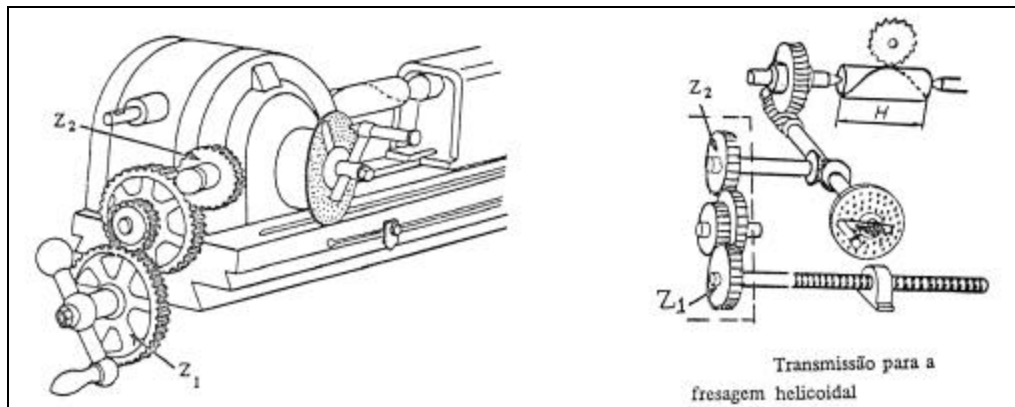


Figura 1.44 – Montagem do trem helicoidal composto.

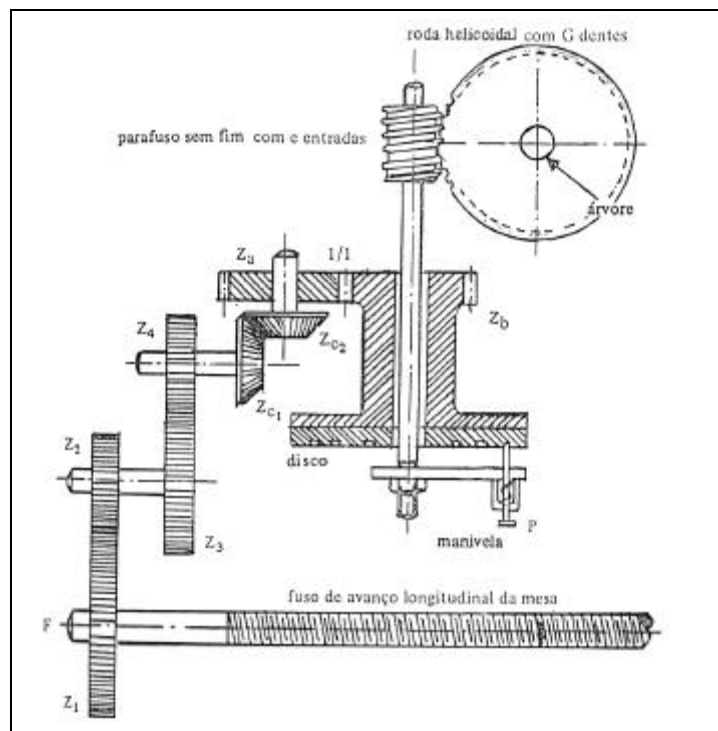


Figura 1.45 – Esquema de acionamento do trem helicoidal.

Exemplo: realize os cálculos necessários para executar três canais helicoidais à direita, de passo 400 mm. A peça é cilíndrica de 42 mm de diâmetro. A fresadora possui passo de fuso de 4 mm e divisor com constante 40. A profundidade do canal deve ser de 4 mm, bem como sua largura.

1.11 – Fresamento de engrenagens

A fabricação de engrenagens com fresa de forma só é empregada em pequenas produções e em manutenção devido ao alto tempo necessário à sua fabricação e também por não gerar um perfil perfeito, necessário em aplicações mais exigentes.

A ferramenta utilizada é a chamada *fresa módulo*. Para cada módulo existe um conjunto de fresas, onde cada fresa é responsável por uma faixa de dentes. Até módulo 10 o conjunto é formado por 8 fresas, como mostra a **tabela 1.1**. A **figura 1.46** ilustra a forma geral que o perfil das fresas módulo possuem.

Fresa número	1	2	3	4	5	6	7	8
Dentes	12 e 13	14 à 16	17 à 20	21 à 25	26 à 34	35 à 54	55 à 134	135 à ∞

Tabela 1.1 – Conjunto de engrenagens para módulos até 10.

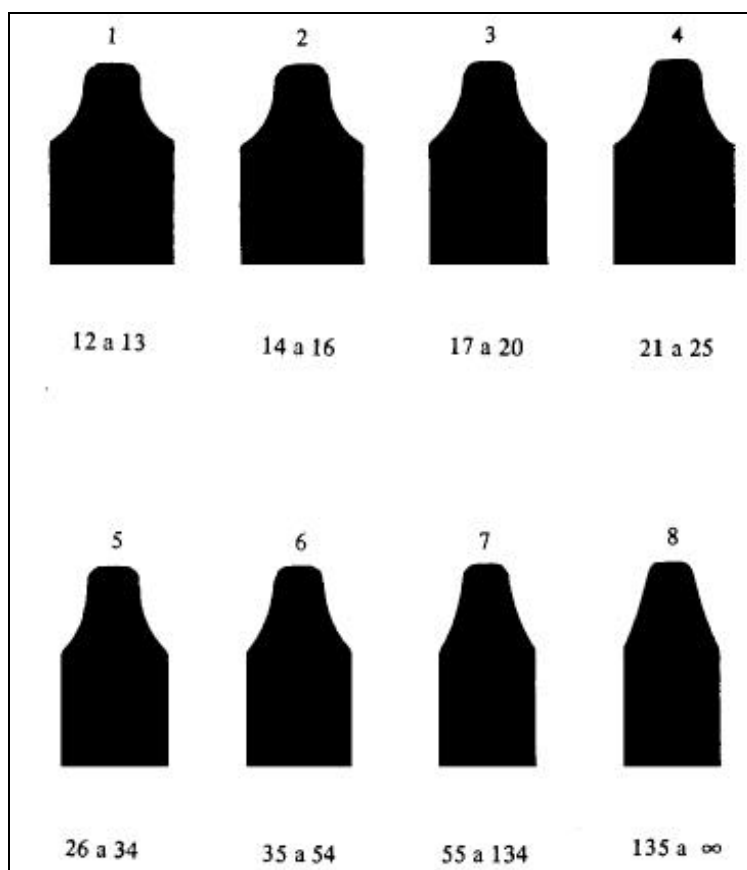


Figura 1.46 – Forma geral do perfil das fresas módulo.

Para módulos entre 11 e 20 cada conjunto possui 15 fresas, como mostrado pela **tabela 1.2**. Para módulos acima de 20 cada conjunto possui 26 fresas, **tabela 1.3**.

Fresa número	1	1 ½	2	2 ½	3	3 ½	4	4 ½
Dentes	12	13	14	15 e 16	17 e 18	19 e 20	21 e 22	23 à 25
Fresa número	5	5 ½	6	6 ½	7	7 ½	8	
Dentes	26 à 29	30 à 34	35 à 41	42 à 54	55 à 79	80 à 134	135 à ∞	

Tabela 1.2 – Conjunto de engrenagens para módulos 11 até 20.

Fresa número	1	1 ½	2	2 ¼	2 ½	3	3 ¼	3 ½	3 ¾
Dentes	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fresa número	4	4 ¼	4 ½	4 ¾	5	5 ¼	5 ½	5 ¾	6
Dentes	21	22	23	24 e 25	26 e 27	28 e 29	30 e 31	32 à 34	35 à 37
Fresa número	6 ¼	6 ½	6 ¾	7	7 ¼	7 ½	7 ¾	8	
Dentes	38 à 41	42 à 46	47 à 54	55 à 65	66 à 79	80 à 102	103 à 134	135 à ∞	

Tabela 1.3 – Conjunto de engrenagens para módulos acima de 20.

1.11.1 – Fresamento de cremalheira de dentes retos

Para o fresamento de uma cremalheira de dentes retos utiliza-se sempre a fresa número 8, (135 - ∞) do módulo desejado. Apesar de muito simples não é qualquer fresadora que é capaz de realizar esta operação pois o eixo da ferramenta deverá ser posicionado em paralelo com o eixo da mesa. O passo é dado pelo movimento da mesa (longitudinal). A **figura 1.47** ilustra os dados geométricos principais. Tem-se as seguintes relações envolvidas:

Altura do dente: $h = 2.166 * M$

Passo: $p = M * \pi$

Espessura: $b = (6 \text{ a } 10) * M$

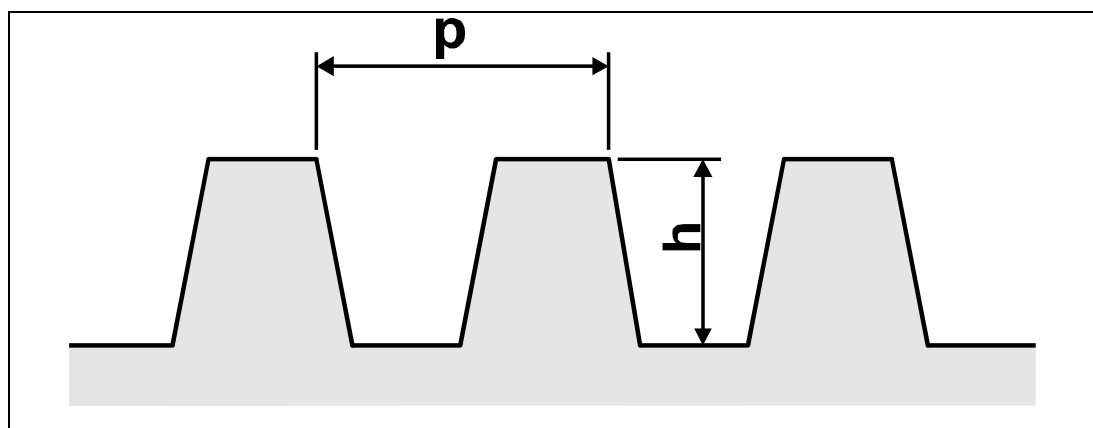


Figura 1.47 – Dados geométricos de uma cremalheira.

1.11.2 – Fresamento de cremalheira de dentes helicoidais

As diferenças entre o fresamento de cremalheiras de dentes helicoidais para dentes retos está na inclinação entre a peça e a ferramenta. As relações envolvidas são as seguintes:

$$\text{Altura do dente: } h = 2.166 * M$$

$$\text{Passo: } p = M * \pi$$

$$\text{Inclinação da mesa: } \varphi = 90 - \alpha$$

$$\text{Espessura: } b = (6 \text{ a } 10) * M$$

1.11.3 – Fresamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos

Para usinar uma engrenagem cilíndrica de dentes retos deve-se conhecer a altura do dente (h), o número de dentes (Z) e o módulo (M). As demais informações podem ser obtidas das seguintes relações:

$$\text{Altura do dente: } h = 2.166 * M$$

$$\text{Diâmetro externo: } d_{\text{ext}} = M * (Z + 2)$$

$$\text{Diâmetro primitivo: } d_p = M * Z$$

$$\text{Diâmetro interno: } d_{\text{int}} = d_{\text{ext}} - (2 * h)$$

$$\text{Espessura do dente: } b = (6 \text{ a } 10) * M$$

$$\text{Distância entre centros: } a = \frac{M * (Z_1 + Z_2)}{2}$$

Exemplo: realizar os cálculos necessários para fresar uma engrenagem de dentes retos com os seguintes dados: 53 dentes, módulo 3, espessura de 24 mm e furo de centro de 12 mm. Em seguida preencha o roteiro de execução.

Cálculo do diâmetro externo

$$d_{\text{ext}} = M * (Z + 2)$$

Cálculo da altura do dente (profundidade de usinagem)

$$H = 2.166 * M$$

Cálculo do giro da manivela

$$G = \frac{K}{n}$$

Roteiro de execução de engrenagem cilíndrica com dentes retos

- a) Preparar a matéria-prima. Em um torno usinar um disco do material solicitado com diâmetro de _____ mm, espessura de _____ mm e furo de centro de _____ mm.
- b) Preparar a fresadora na configuração horizontal com dispositivo divisor universal e contra-ponto. Instalar fresa módulo _____, número _____.
- c) Fixar a matéria-prima no eixo (acessório) e fixar o eixo na placa do divisor universal e contra-ponto.
- d) Centrar a fresa em relação à matéria-prima por meio da manivela responsável pelo movimento horizontal transversal.
- e) Ajustar a profundidade de corte do primeiro passe em _____ mm. Este processo consiste em tocar a fresa na matéria-prima e zerar o colar do movimento vertical. Afasta-se então a fresa com o movimento horizontal longitudinal e aplica-se a profundidade desejada, novamente com o movimento vertical.
- f) Selecionar a face do disco divisor que tenha uma carreira de _____ furos. Ajustar a manivela para esta carreira de furos.
- g) Ajustar o compasso do divisor universal para um intervalo de _____ furos.
- h) Instalar o trem diferencial, sendo: $Z_a = \text{_____}$, $Z_b = \text{_____}$, $Z_c = \text{_____}$ e $Z_d = \text{_____}$.
- i) Verificar se disco e manivela giram _____.
- j) Ajustar a rotação da fresa para _____ rpm e avanço automático para _____ mm/min.
- k) Ligar rotação da fresa e em seguida o avanço automático.
- l) Quando o vão estiver usinado, desligar o avanço automático e retornar manualmente a fresa para a posição inicial. Girar a manivela em _____ e retornar ao item anterior até usinar toda a engrenagem.
- m) Aplicar a próxima profundidade de usinagem e voltar ao item **i**, até que a engrenagem esteja totalmente usinada.

1.11.4 – Fresamento de engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais

A usinagem de engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais é bastante similar à usinagem de dentes retos, sendo basicamente diferente a seleção da fresa e a inclinação entre a peça e a ferramenta. As relações matemáticas envolvidas são as seguintes:

Inclinação da mesa: $\varphi = 90 - \alpha$

Altura do dente: $h = 2.166 * M$

Módulo circunferencial: $M_c = \frac{M}{\cos \varphi}$

Diâmetro externo: $d_{ext} = M * \left(\frac{Z}{\cos \varphi} + 2 \right)$

Diâmetro primitivo: $d_p = M_c * Z$

Diâmetro interno: $d_{int} = d_{ext} - (2 * h)$

Espessura do dente: $b \leq 18 * M_c$

Distância entre centros: $a = \frac{M_c * (Z_1 + Z_2)}{2}$

Número virtual de dentes: $Z' = \frac{Z}{(\cos \varphi)^3}$

O módulo circunferencial também é chamado de módulo frontal. O cálculo do passo da hélice, necessário para definir o trem helicoidal, possui duas pequenas diferenças com relação à usinagem de demais hélices. Deve-se utilizar o diâmetro primitivo ao invés do diâmetro externo e não se calcula o passo da hélice e sim uma faixa onde este valor se encontra.

Desde que as especificações da engrenagem não digam ao contrário, o ângulo do dente helicoidal pode variar de $\pm 10'$. Para demais hélices (fresas, brocas, etc.) normalmente o valor tem tolerância de $\pm 20'$. Sendo assim a equação passa a ser:

$$P_{h-} = \frac{\pi * d_p}{\text{tg}(\varphi - 10')}$$

$$P_{h+} = \frac{\pi * d_p}{\text{tg}(\varphi + 10')}$$

Passo da hélice: $\text{Inteiro}(1 + P_{h+}) \leq P_h \leq \text{Inteiro}(P_{h-})$

Exemplo: realize os cálculos necessários para a usinagem de uma engrenagem cilíndrica de dentes helicoidais à esquerda com 19 dentes, módulo 2, ângulo de 45° , 40 mm de espessura e furo central de 12 mm. Preencha em seguida o roteiro de execução.

Cálculo do ângulo φ (inclinação da mesa)

$$\varphi = 90 - \alpha$$

Cálculo do diâmetro externo

$$d_{\text{ext}} = \left(\frac{Z}{\cos \varphi} + 2 \right) * M$$

Cálculo da altura do dente (profundidade de usinagem)

$$H = 2.166 * M$$

Seleção da fresa módulo

$$Z' = \frac{Z}{(\cos \varphi)^3}$$

Cálculo do diâmetro primitivo

$$M_c = \frac{M}{\cos \varphi}$$

$$d_p = Z * M_c$$

Cálculo do giro da manivela

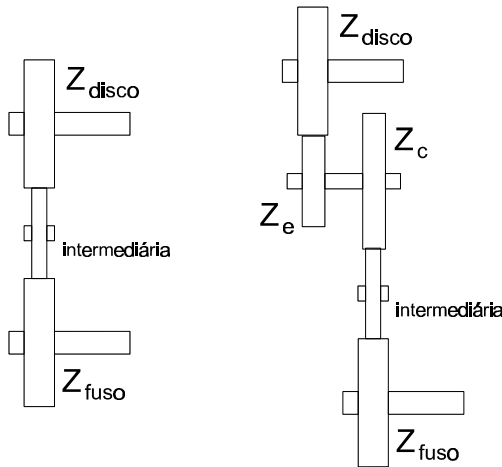
$$G = \frac{K}{n}$$

Cálculo do intervalo do passo da hélice

$$P_{\text{helice}} = \frac{\pi * d_p}{\text{tg} \varphi}$$

Cálculo do trem helicoidal

$$i = \frac{P_{\text{helice}}}{P_{\text{fuso}} * K} = \frac{Z_{\text{disco}}}{Z_{\text{fuso}}} = \frac{Z_{\text{disco}} * Z_c}{Z_e * Z_{\text{fuso}}}$$



- Preparar a matéria-prima. Em um torno usinar um disco do material solicitado com diâmetro de ____ mm, espessura de ____ mm e furo de centro de ____ mm.
- Preparar a fresadora na configuração horizontal com dispositivo divisor universal e contraponto. Instalar fresa módulo ____ , número ____.
- Fixar a matéria-prima no eixo (acessório) e fixar o eixo na placa do divisor universal e contraponto.
- Centrar a fresa em relação à matéria-prima por meio da manivela responsável pelo movimento horizontal transversal.
- Ajustar a profundidade de corte do primeiro passe em ____ mm. Este processo consiste em tocar a fresa na matéria-prima e zerar o colar do movimento vertical. Afasta-se então a fresa com o movimento horizontal longitudinal e aplica-se a profundidade desejada, novamente com o movimento vertical.
- Inclinar a mesa em ____ graus, empurrando o lado ____ da mesa.
- Selecionar a face do disco divisor que tenha uma carreira de ____ furos. Ajustar a manivela para esta carreira de furos.
- Soltar o disco divisor.
- Ajustar o compasso do divisor universal para um intervalo de ____ furos.

- j) Instalar o trem helicoidal, sendo Z_d =_____, Z_c =_____, Z_e =_____ e Z_f =_____.
Verificar se o sincronismo está correto. Se não estiver, deve-se instalar uma engrenagem intermediária.
- k) Ajustar a rotação da fresa para _____ rpm e avanço automático para _____ mm/min.
- l) Ligar rotação da fresa e em seguida o avanço automático.
- m) Quando o vão estiver usinado, desligar o avanço automático e retornar manualmente a fresa para a posição inicial. Girar a manivela em _____ e retornar ao item anterior até usinar toda a engrenagem.
- n) Aplicar a próxima profundidade de usinagem e voltar ao item **i**, até que a engrenagem esteja totalmente usinada.