

Esse manual foi desenvolvido com o objetivo de ensinar e explicar os principais conceitos da **operação de fresamento em Fresadoras e Routers CNC**, e procedimento básico que deve ser adotado para cálculo dos parâmetros de **corte e usinagem** de **forma rápida** para qualquer material.

Os 4 parâmetros principais das operações de fresamento (em fresadoras e Routers CNC) são:

#1: RPM

#2: Feed-Rate

#3: Ap

#4: Ae

Abaixo uma breve descrição de cada um:

#1: Rotação ou RPM

*Vale lembrar que rotações **excessivamente elevadas** aquecem a fresa de forma **demasiada** e podem **cegar** a fresa em **poucos segundos de operação**. À partir daí a fresa cega deixa de cortar o material e pode **quebrar** ou deixar um **acabamento ruim** na peça.*

#2: Feed-Rate ou Avanço

O **Feed-Rate ou Velocidade de Avanço** é a velocidade que a **fresa se movimenta em direção ao material** que está sendo usinado. Esse parâmetro de corte basicamente refere-se à quanto de material **cada faca** da fresa está cortando ou removendo da peça.

Feed-Rate's **elevados demais sobrecarregam** a fresa, que tenta remover mais material do que é suportado vindo a quebrar a ferramenta. Já Feed-Rate's **baixos demais** fazem a fresa **não penetrar** no material para **cortá-lo** e sim ficar "lambendo" a peça, causando **desgaste precoce** por atrito.

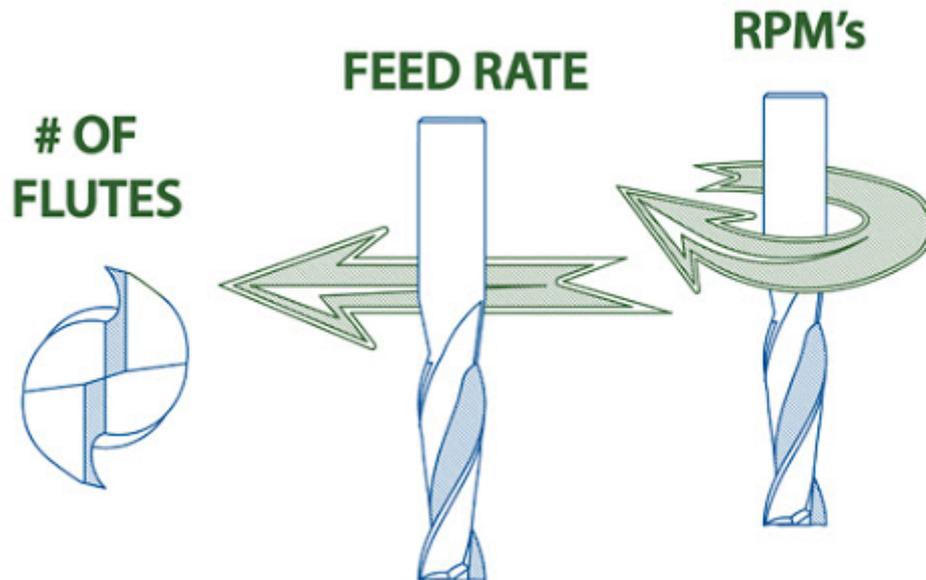


Fig 1.0 - figura esquemática mostrando o número de facas, movimento de **Feed-Rate**, e movimento de **RPM** da ferramenta.

#3: “Ap” ou Passo Vertical

O passo vertical é a **profundidade** do corte que a fresa está fazendo. Vale lembrar que ao fazer um corte de 30,0 mm de profundidade com uma fresa de 6,0 mm, devemos fazer esse corte em 3 passes de 10,0 mm cada um. O passo vertical “Ap” nesse caso é de 10,0 mm. *Lembrando que esses valores são meros exemplos.*

#4: “Ae” ou Passo Lateral ou Passo Horizontal

O passo lateral é quanto de material a fresa está removendo em relação ao diâmetro. Aqui vale os termos “passo-em-cheio” quando se está fresando um canal de exatamente o diâmetro da fresa (nesse caso o passo lateral é 100% o diâmetro da fresa), ou quando estamos fazendo uma operação de “Raster” ou “Offset” ou “Varredura” na peça, onde a ferramenta vai-e-vem diversas vezes à fim de cobrir uma área maior que seu diâmetro.

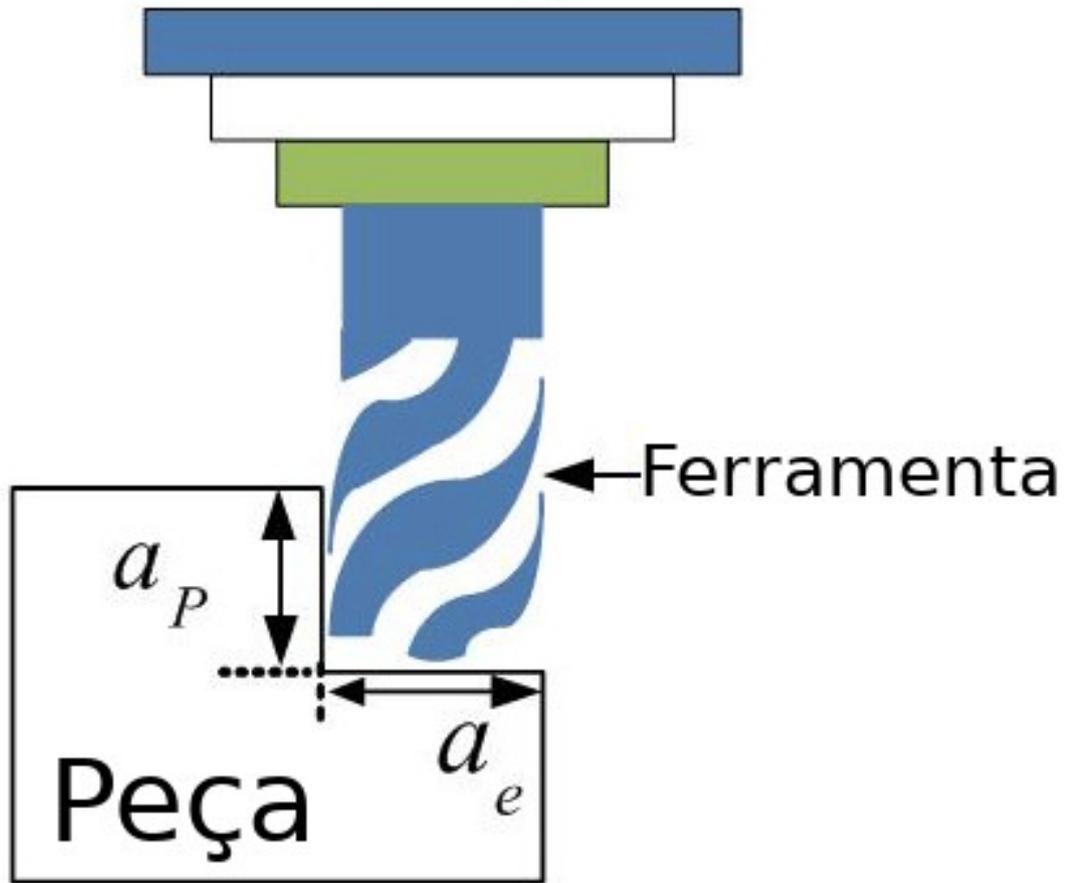


Fig 2.0 - figura mostrando os parâmetros **Ap** e **Ae** em relação a peça e ferramenta.

Para calcular esses parâmetros devemos levar em consideração as fórmulas abaixo. Lembrando **sempre** que esses parâmetros são apenas uma **referência inicial** de cálculo, ou seja, um ponto de partida para obter bons resultados.

O processo de Corte e Usinagem depende também de **outros fatores** além dos mencionados aqui como:

- * **máquina que está sendo utilizada**
- * **potência do motor principal**
- * **velocidades de avanço máximas nos eixos X, Y, Z**
- * **meios de fixação da peça na máquina**
- * **fluidos de corte que está sendo utilizado**
- * **comprimento da fresa**
- * **forma de fixação da fresa**
- * **revestimento da ferramenta**
- * **tipos de materiais...**

O mesmo alumínio ou aço ou madeira vendida pelo fornecedor A é diferente do fornecedor B e vice-versa. Existe uma variação **enorme** de aço para aço, de alumínio para alumínio, de madeira para madeira, e etc. **(com exceção dos materiais normalizados claro!)**

#1 - Rotação ou RPM

A rotação da ferramenta deve ser calculada em função da “**V_c**” que significa **Velocidade de Corte**.

Essa **Velocidade de Corte** é calculada considerando o **diâmetro da ferramenta** e portanto a velocidade **tangencial** da ferramenta em contato com o material que está sendo usinado.

Fórmula:

$$\text{rpm} = [V_c] / [D_f] * 3,14$$

onde:

* **rpm** é a rotação da ferramenta em **rotações por minuto**

* **V_c** é a **Velocidade de Corte** da ferramenta. Sempre em função do material que está trabalhando.

* **D_f** é o **Diâmetro da Ferramenta**. Considerar o diâmetro da parte que está cortando o material.

* **3,14** é o número “PI” da relação matemática entre Diâmetro e Perímetro da circunferência.

Exemplo:

Como calcular a rotação de uma fresa de 3,0mm de diâmetro usinando Ferro Fundido. Onde desejamos uma rotação que a Velocidade de Corte da ferramenta seja de 30m/min?

$$\text{rpm} = 30\ 000 / (3,0 * 3,14)$$

$$\text{rpm} = 3\ 184\ \text{rpm}$$

*(não esqueça que a **Velocidade de Corte** de 30 m/min é 30 metros por minuto!*

É necessário converter metros em milímetros na fórmula para obter o valor correto!

1 m = 1000 mm)

Valores V_c de referência:

Aço: 12 até 25 m/min ||||| Alumínio e Metais Leves: 80 até 300 m/min

Madeira Maciça: 70 até 100 m/min ||||| MDF Compensado: 80 até 140m/min

Plásticos e Resinas: 40 até 160 m/min

#2 - Feed-Rate ou Avanço

O Feed-Rate deve ser calculado em função do “Fz” que significa basicamente quanto de material cada faca da fresa está cortando.

Esse fator é calculado considerando a rotação da ferramenta e o número de facas da fresa.

Fórmula:

$$\text{feed-rate} = [\text{rpm}] * [N_{\text{facas}}] * F_z$$

onde:

* **feed-rate** é a velocidade de avanço em **[mm/min] (milímetros por minuto)**

* **rpm** é a rotação da ferramenta em **rotações por minuto**

* **N_f** é a quantidade de facas que a fresa possui

* **F_z** é a o avanço de cada faca da ferramenta sobre o material a ser usinado, em: **[mm/dente] (milímetros por faca)**

Exemplo:

Como calcular o avanço feed-rate de uma fresa de 3,0mm de diâmetro com 4 facas usinando Ferro Fundido à 3184 RPM. Onde desejamos que cada faca remova 0,02mm?

$$\text{feed-rate} = 3184 * 4 * 0,02$$

$$\text{feed-rate} = \underline{255 \text{ mm/min}}$$

Valores F_z de referência:

de 0,02 até 0,1 mm/dente >> p/ fresas até 6,0 mm

de 0,04 até 0,15 mm/dente >> p/ fresas até 12,0 mm

À partir desse ponto já podemos definir a Rotação RPM e o Avanço Feed-Rate da Ferramenta.

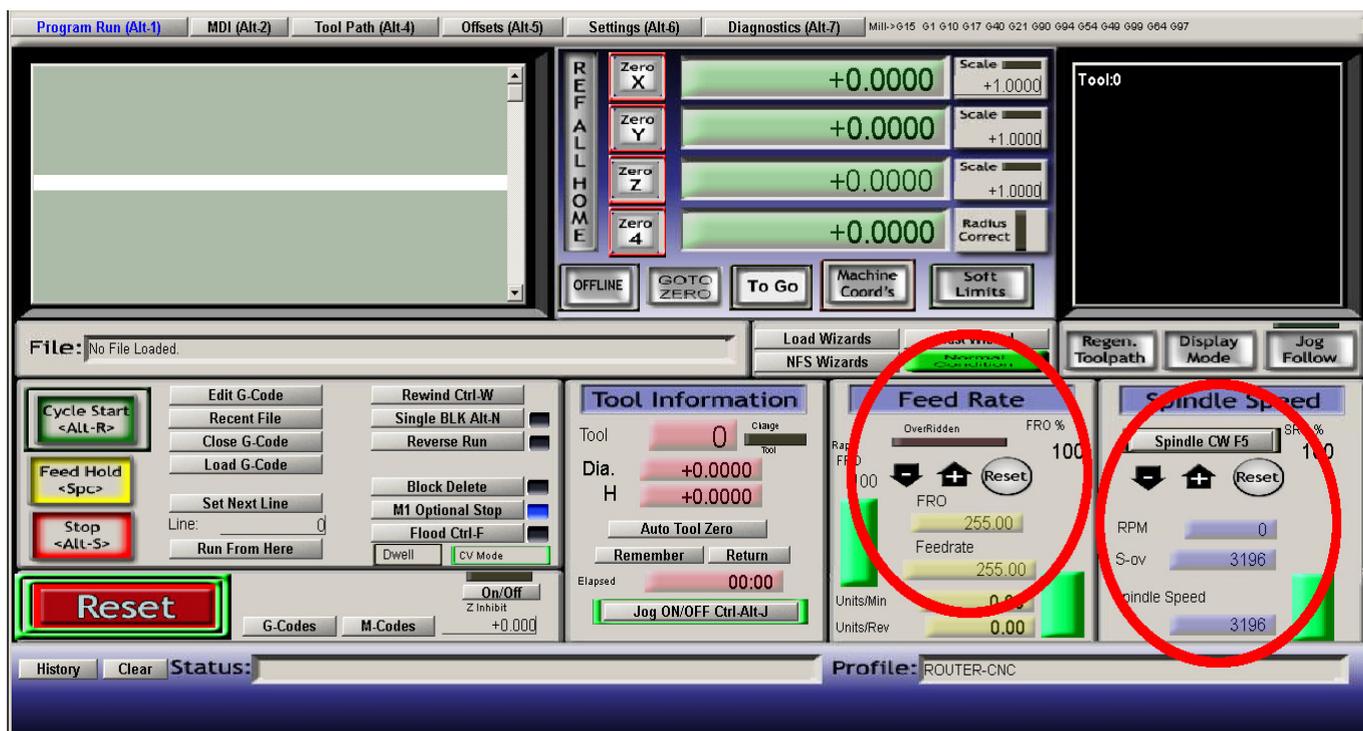


Fig 3.0 – Tela do software Mach3 com os parâmetros Feed-Rate e Spindle Speed (RPM) definidos.

#3 e #4 - Passo Vertical A_p e Passo Lateral A_e

Os parâmetros de **Passo Vertical A_p** e **Passo Lateral A_e** devem ser calculados juntos de modo à equilibrar o esforço na ferramenta. Fazer uma usinagem com os 2 parâmetros sobrecarregados, ou seja, com valores altos resultará em muito esforço e a ferramenta provavelmente vai quebrar.

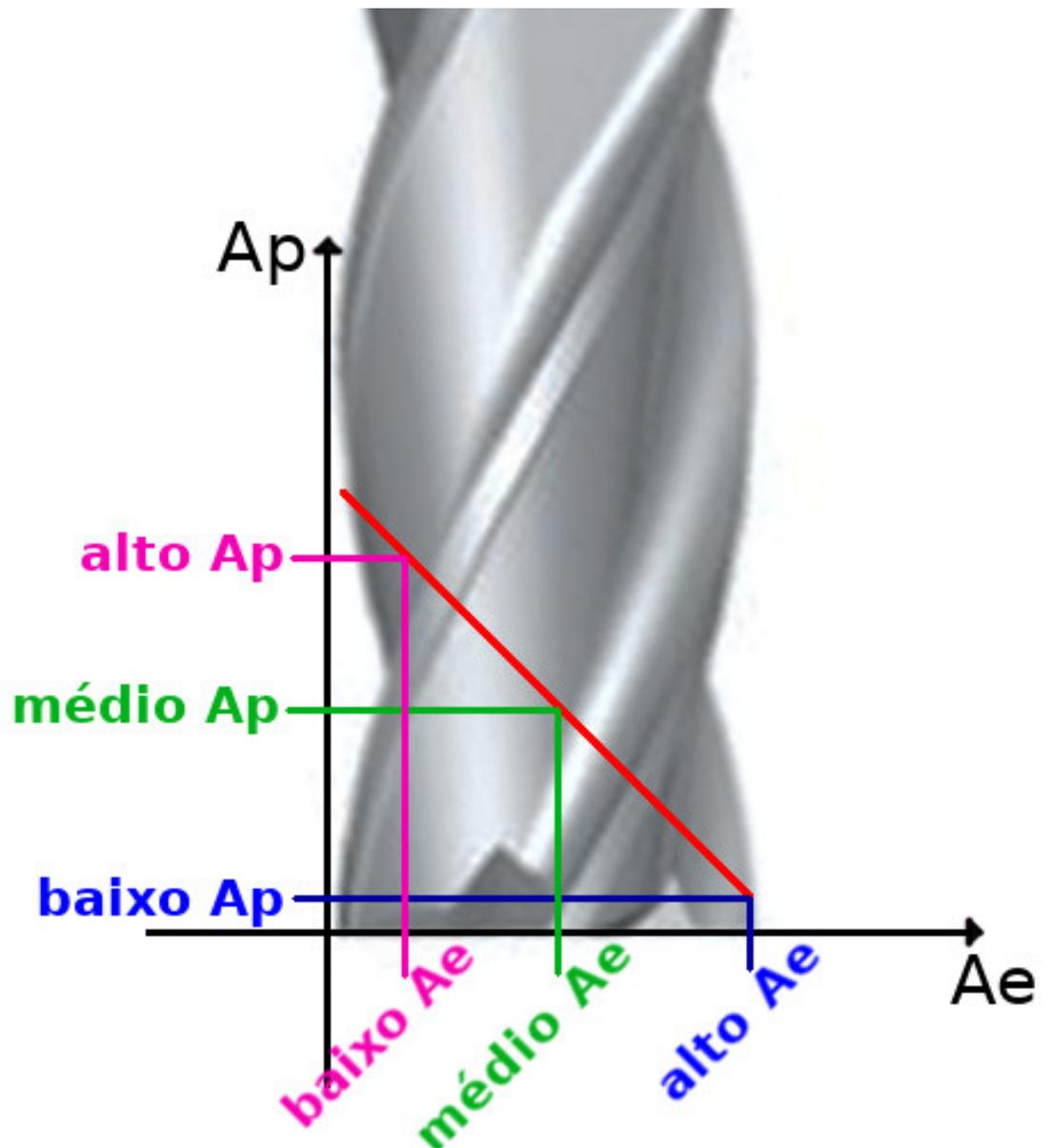


Fig 4.0 - Desenho esquemático da combinação dos parâmetros de corte, mostrando a relação entre **A_p** e **A_e** .

Para calcular os parâmetros, devemos escolher um dos parâmetros: **Ap** ou **Ae** para iniciar os cálculos e então partimos para calcular o segundo.

Caso #1:

Para **usinagens rasas (menor que 5% diâmetro da ferramenta)**, podemos adotar por exemplo:

$A_p = 5\%$ diâmetro da ferramenta

$A_e =$ até 50% diâmetro da ferramenta (**caso ÓTIMO**)

ou

$A_p = 5\%$ diâmetro da ferramenta

$A_e =$ entre 50% e 100% diâmetro da ferramenta (**caso SUB-ÓTIMO**)

Caso #2:

Para **usinagens profundas (maior que 5% diâmetro da ferramenta)**, quando possível devemos adotar um **Passo Lateral A_e máximo** de **50% o diâmetro da ferramenta**.

Dessa forma, utilizando uma ferramenta de 8,0 mm de diâmetro por exemplo:

A) Para desbaste de uma grande área com 2,0 mm de profundidade, podemos adotar:

$A_e = 50\%$ diâmetro da ferramenta (4,0 mm)

$A_p =$ entre 25% e 50% diâmetro da ferramenta (2,0 mm)

esses valores são uma boa referência inicial. A operação seria feita num único passe em Z com passes laterais de 4,0 mm.

B) Para desbaste de uma grande área com 6,0 mm de profundidade, podemos adotar:

$A_e =$ entre 12,5% diâmetro da ferramenta (1,0 mm)

$A_p = 75\%$ diâmetro da ferramenta (6,0 mm)

esses valores são uma boa referência inicial. A operação seria feita num único passe em Z com passes laterais de 1,0 mm.

C) Para desbaste de uma grande área com 8,0 mm de profundidade, podemos adotar:

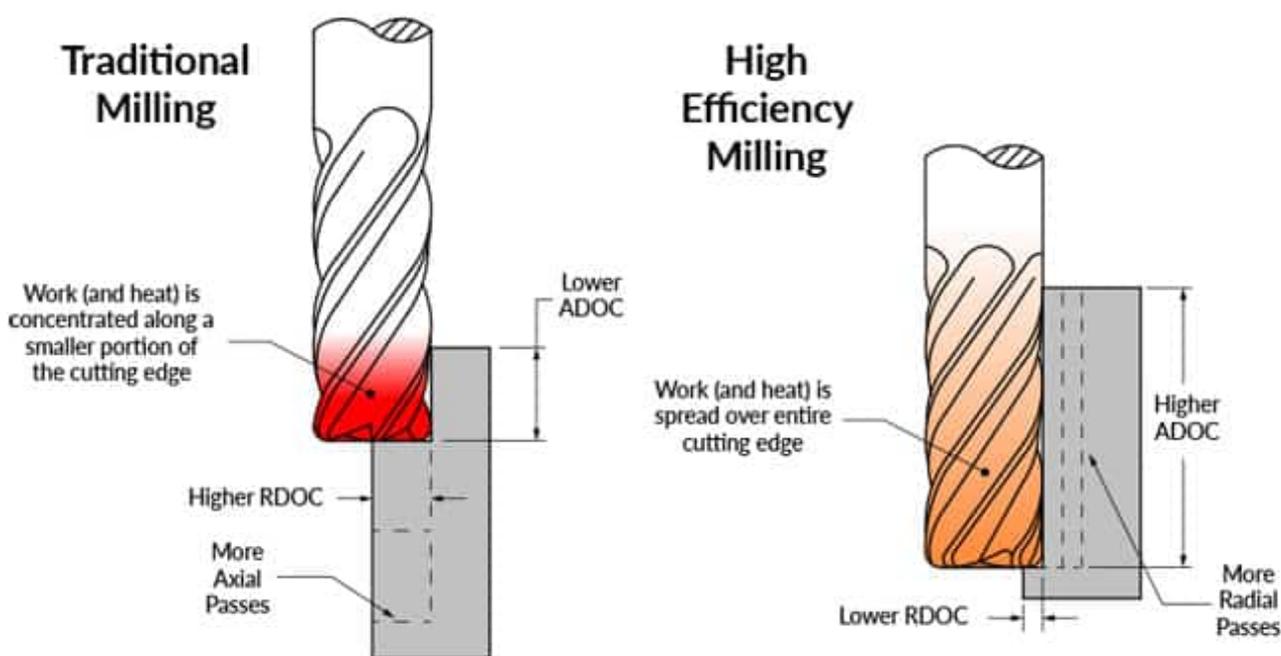
$A_e = 5\%$ diâmetro da ferramenta (0,4 mm) (**Usinagem Trocoidal**)

$A_p = 100\%$ diâmetro da ferramenta (8,0 mm)

esses valores são uma boa referência inicial. A operação seria feita num único passe em Z com passes laterais de 0,4 mm.

Nesse último caso “**C**”, utilizando a técnica de **Usinagem Trocoidal**; conseguimos utilizar **maior aresta de corte** da ferramenta **aumentando sua vida útil**, ao invés de utilizar somente a pontinha da ferramenta. Além de **diminuir o esforço de corte** na ponta da ferramenta que tende a **fletir e vibrar menos**.

Quando possível podemos utilizar as técnicas da **Usinagem Trocoidal**, que junto das técnicas de **HSM (High Speed Machining)** permite remover até **30% mais material** no mesmo tempo, e ainda tirando 100% de proveito das ferramentas de corte.



© Harvey Performance Company, LLC.

Fig 5.0 - Figura esquemática mostrando os benefícios da usinagem **Trocoidal**:

Alto A_p x Baixo A_e --- em relação a usinagem inversa.

*Os valores acima (**Caso #2: A, B e C**) são meramente simbólicos, mas exemplificam que quando aumentamos um dos parâmetros, devemos obrigatoriamente **reduzir o outro**. Quando vamos usinar um canal, se possível utilizamos uma fresa com diâmetro igual à 50% ou menos a largura do canal. Assim podemos usinar o canal tirando proveito máximo do processo e vida útil da ferramenta.*

Caso #3:

Para **operações de corte**, quando utilizamos uma ferramenta com exatamente o diâmetro do canal que vamos usinar, chamamos de **usinagem-em-cheio (Ae = 100% o diâmetro da ferramenta)**. Esse tipo de usinagem consiste por exemplo quando usinamos um canal de 6,0 mm com uma ferramenta de exatamente 6,0 mm, sem passos laterais.

Caso esse canal de 6,0 mm fosse raso, seria ainda possível fazer ele de forma mais econômica utilizando uma fresa de 3,0 ou 4,0 mm com passos laterais. Caso esse canal de 6,0 mm fosse mais profundo, a solução seria fazer **usinagem-em-cheio** mesmo com uma fresa de 6,0 mm.

Apesar desse não ser o melhor processo economicamente falando, é a única solução quando fazemos **cortes de peças**.

O procedimento de cálculo dos parâmetros **Ap** e **Ae** deve ser de forma empírica. Você deve definir um dos parâmetros primeiro, e em seguida ir aumentando o outro de forma gradual até **estabilizar o corte**. Esse procedimento pode ser feito utilizando análise visual e auditiva, por exemplo barulho da ferramenta, vibração da máquina, acabamento na peça, etc.

Durante o procedimento de ajuste de parâmetros é normal ocorrer quebra da ferramenta quando se procura extrair o máximo de performance.

Por este motivo é importante fazer uma tabela com os parâmetros de corte utilizados em cada operação, com objetivo de criar uma base de dados à fim extrair informações para futuras programações da máquina, ou mesmo analisar **quebras de ferramenta** obtendo os pontos críticos e limites da mesma.

A usinagem ideal e econômica é quando encontramos o equilíbrio entre:

* **Diminuir o tempo de operação na máquina**

e

* **Aumentar a vida útil da ferramenta**

repare que esses dois parâmetros tendem a ir em **sentidos opostos!** Aumentar a velocidade da operação **tende** a diminuir a vida útil da ferramenta e vice-versa. Deve ser encontrado o **equilíbrio** entre esses dois parâmetros e até mesmo alterado **hora ou outra** à fim de ganhar em um lado e claro, perder um pouco no outro.

A usinagem **INCORRETA** é quando **não** encontramos o **equilíbrio** mencionado acima. Por exemplo uma operação com RPM altíssimo. A fresa cegaria em poucos segundos e quebraria... consequentemente teríamos:

*** Aumento no tempo de operação na máquina. (a operação não seria concluída)**

e

*** Baixa vida útil da ferramenta. (Além da quebra da ferramenta, nesse caso Prejuízo)**

Exemplo:

Fresa Reta 90º para madeira 6x32mm (diâmetro de 32mm) com rotação de 24.000 RPM. Operação de faceamento em madeira maciça.

*24000 = Vc * 32,0 * 3,14 (fórmula da **Rotação RPM** ver página 4)*

Vc = 238 m/min. Rotação estupidamente alta! A fresa cegaria em poucos segundos!!!

A rotação deve ser re-calculada com base numa Velocidade de Corte menor!!!

Após calcular os 4 parâmetros principais de corte mencionados acima (**RPM // Feed-Rate // Ap // Ae**), você pode calcular a “TRM” que significa: Taxa de Remoção de Material.

$$\text{TRM} = \text{Ap} \times \text{Ae} \times [\text{Feed-Rate}]$$

Esse valor **TRM** quantifica quanto material determinada ferramenta está removendo. É útil calcular a **TRM** quando você deseja comparar 2 operações com parâmetros de corte distintos que vem se desenvolvendo bem, à fim de comparar qual é mais eficiente.

Exemplo:

Fresa de 3,0 mm.

Rotação: 3184 rpm. Feed-Rate: 255 mm/min. Ap: 0,65 mm. Ae: 3,0 mm.

*TRM = 3,0 * 0,65 * 255*

TRM = 497 mm³/min

Essa ferramenta está removendo aproximadamente 500 mm cúbicos de material por minuto.

Capítulo 2:

Fatores que mais influenciam no desgaste e vida útil da ferramenta:

#1 - Velocidade de Corte [Vc] ou Rotação

Rotação excessiva. Cega e queima a fresa logo nos primeiros segundos, quebrando a mesma. Ferramentas cegas geralmente possuem marcas de desgaste precoce na aresta de corte, **cor diferenciada**, e pontas deformadas.

Na usinagem de metais, principalmente os ferrosos (aço e ferro); após cegar a aresta de corte a fresa tende a quebrar.

Na usinagem de materiais plásticos (*poliacetal, nylon, Polietileno, acrílico, etc*) o calor gerado durante o corte derrete o material na ferramenta. O material derretido adere na superfície da fresa entupindo a saída de cavaco e quebrando a mesma. Nesse caso apesar da ferramenta não apresentar marcas de desgaste precoce, nem queima da faca, vai ser constatado o material derretido na ponta.

Na usinagem de madeiras em geral, a rotação excessiva vai causar marcas de desgaste precoce na aresta de corte e coloração diferenciada, antes de apresentar quebra da fresa. Fresas de Metal Duro aguentam mais e apresentam a coloração escura quando estão operando em altas rotações. Já fresas de HSS são mais frágeis e além da coloração escura perdem o fio de corte e até mesmo pedaços da fresa.

*Aqui vale um comentário interessante. Se a fresa apresentar esses indícios de desgaste como: coloração escura, marcas de desgaste, partes deformadas ou até mesmo quebra logo nos primeiros segundos de usinagem **com certeza** os parâmetros de usinagem estão incorretos. Porém, se a fresa apresentar esses indícios após longos ciclos de trabalho, é normal de acontecer, pois com o próprio uso da ferramenta ocorre um desgaste natural no fio de corte que conseqüentemente faz ocorrer o sobreaquecimento e efeitos indesejados. Nesse último caso você pode interromper o ciclo de trabalho da fresa e fazer uma afiação poupando uma quantia considerável de dinheiro.*

Vale ainda lembrar que os fabricantes de ferramentas de usinagem para metais por exemplo @**Sandvik**, considera a vida útil da ferramenta 15 minutos. Considerando o tempo da ferramenta em contato efetivamente o material. No caso do torneamento é fácil contar esse tempo, já no caso do fresamento deve ser considerado apenas o tempo da faca em contato com o material. Portanto para a ferramenta durar muito mais, os parâmetros como rotação devem ser consideravelmente moderados para obter bons resultados.

#2 - Vibração

Ferramentas longas, ferramentas muito finas, ferramentas com haste fina, ferramentas má fixadas, podem cegar precocemente. Ferramentas cegas geralmente possuem marcas de desgaste precoce na aresta de corte, e ponta deformada, etc.

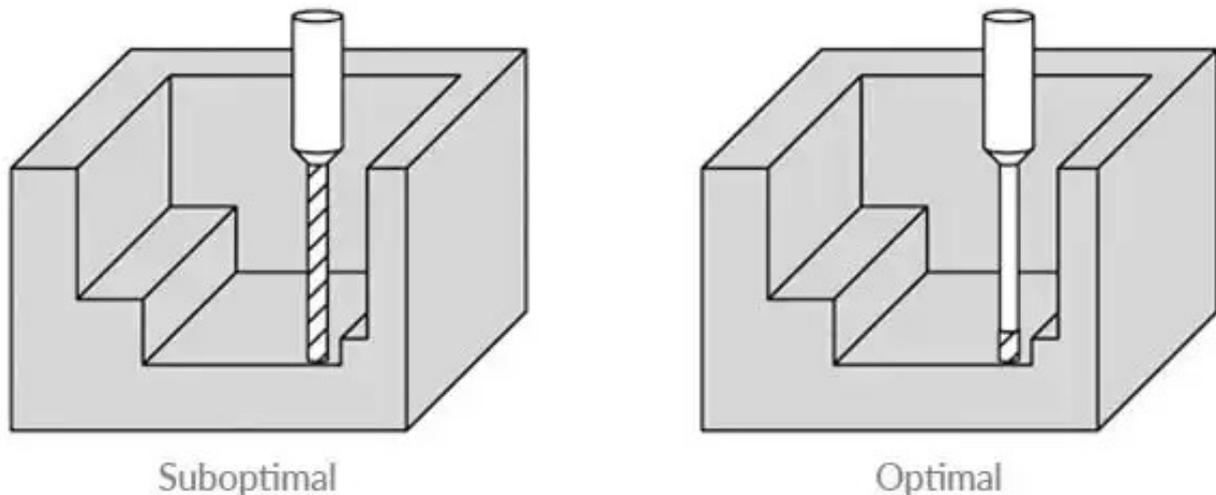


Fig 5.0 - Comparação de uma fresa com aresta de corte longa, e outra com aresta de corte mais curta. Ambas com o **mesmo comprimento**.

Sempre deixe a ferramenta o mais curta possível dentro da pinça.

* até 300% do diâmetro - **excelente**

* entre 300% e 500% do diâmetro - **bom**

* acima de 500% do diâmetro - os parâmetros de corte (**Ap e Ae**) tendem a ser **reduzidos** para **manter a estabilidade do corte**. Nesse caso, dê preferência para ferramentas de corte com a haste sólida para aumentar a rigidez mecânica.

#3 - Velocidade de Avanço Feed-Rate

Feed-Rate altos tendem a sobrecarregar os dentes ou faca da fresa e quebrá-la.

Já Feed-Rate's baixos demais (menores que $Fz=0,005$) tendem a queimar e apresentar vibração já que a fresa não penetra no material.

#4 - Flúidos de Refrigeração

Flúidos de corte devem ser utilizados sempre que possível quando o material permitir. Na usinagem de madeira por exemplo não é possível utilizar fluído, apesar de ser possível usar ar comprimido trazendo alguns benefícios.

O objetivo do fluído de corte é **Refrigerar** e **Lubrificar** a ferramenta, além de trazer benefícios como remover os cavacos e evitar a usinagem do próprio cavaco e também baixar a temperatura da peça como um todo.

Flúidos de Refrigeração tem objetivo de retirar calor durante a usinagem. Indicado para usinagem de metais e materiais de alta dureza que geram muito calor durante o corte. Normalmente é utilizado água com óleo solúvel numa proporção adequada. Usinagem nessa condição permite usar rotações mais alta comparado à usinagem sem refrigeração, além de aumentar a vida útil da ferramenta. (Mesmo a ferramenta não esquentando como um todo, o calor gerado na aresta de corte pode ser demasiadamente alto).

Flúidos de Lubrificação tem o objetivo de lubrificar a ferramenta durante a usinagem. Indicado para usinagem de materiais “dúcteis”, ou seja, materiais que se deformam bastante antes de quebrar, como o alumínio. Esse tipo de material tende a sair em forma de cavaco que atrita sobre a superfície da ferramenta esquentando demais. Normalmente é utilizado água com óleo solúvel em alta proporção, ou mesmo óleo puro. O óleo além de ajudar dissipar o calor da ferramenta, ainda diminui consideravelmente o atrito do cavaco.

Diminuindo o calor e o atrito, o óleo ainda evita que o material adere na superfície da fresa entupindo a saída de cavaco e quebrando a mesma.