

## ÍNDICE

3.1 - VELOCIDADES .....	3
3.2 - PERCURSO DA FERRAMENTA SOBRE A PEÇA .....	4
3.3 - CONCEITO AUXILIARES .....	5
3.3.1 - <i>Ângulo da direção de avanço</i> .....	5
3.3.2 - <i>Ângulo da direção efetiva</i> .....	5
3.3.3 - <i>Plano de trabalho</i> .....	6
3.4 - GRANDEZAS DE AVANÇO .....	6
3.5 - GRANDEZAS DE PENETRAÇÃO .....	7
3.5.2 - <i>Profundidade ou largura de usinagem</i> .....	7
3.5.3 - <i>Penetração de trabalho</i> .....	7
3.6 - GRANDEZAS DE CORTE, NUM CÁLCULO SIMPLIFICADO .....	8
3.6.1 - <i>Seção transversal de corte</i> .....	8
3.6.2 - <i>Largura de corte</i> .....	9
3.6.3 - <i>Espessura de corte</i> .....	9
3.7 - GEOMETRIA DA CUNHA CORTANTE .....	10
3.8 - SISTEMAS DE REFERÊNCIA .....	12
3.8.1 - <i>Sistema de referência da ferramenta</i> .....	12
3.8.2 - <i>Sistema efetivo de referência</i> .....	15
3.9 - ÂNGULOS DA PARTE DE CORTE DA FERRAMENTA .....	18

### 3 – CINEMÁTICA DOS PROCESSOS DE USINAGEM

Para o melhor entendimento da cinemática envolvida nos processos de usinagem, inicia-se pelo estudo dos movimentos relativos entre ferramenta e peça sendo usinada, passando-se então aos ângulos da cunha cortante (ou gume), chegando-se aos parâmetros que determinam as condições de usinagem. Neste capítulo, tratam-se exclusivamente com parâmetros normalizados pelas normas ABNT NBR 6162, e NB-205, utilizando-se sua terminologia. Somente os aspectos mais importantes e relevantes a este texto serão mostrados, deixando os detalhes para consulta às próprias normas, caso o leitor tenha interesse maior.

Os movimentos nos processos de usinagem são movimentos relativos entre a peça e a cunha cortante. Estes sempre se referem à peça, considerada o sistema de referência para as velocidades, não importando se os movimentos são retilíneos, circulares ou outros quaisquer. Os modelos geométricos adotados utilizam pequenos deslocamentos locais, produzindo a remoção de material na forma de cavacos. Estes se formam como resultado do *movimento efetivo de corte*, resultante da combinação vetorial dos *movimentos de corte e de avanço*. Um exemplo desses movimentos está na Figura 3.1.

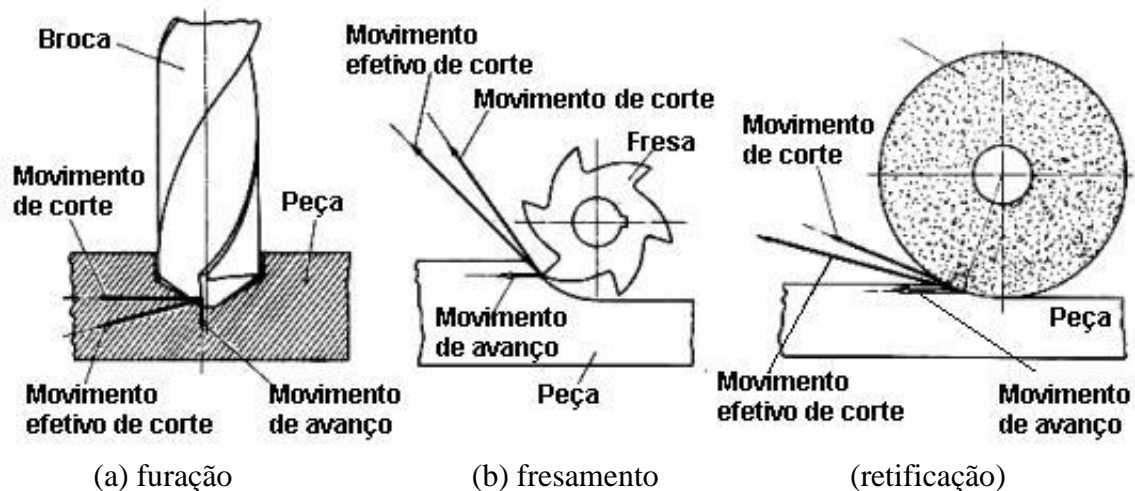


Figura 3.1 - Exemplos de movimentos de corte, avanço e efetivo em processos de furação, fresamento e retificação.

Aos movimentos de corte estão associadas às direções dos movimentos correspondentes (*direção efetiva, de corte e de avanço*), as velocidades correspondentes, com os mesmos nomes, cujos vetores partem do ponto de corte escolhido, em cada instante considerado.

### 3.1 - Velocidades

A *velocidade efetiva* ( $v_e$ ) é a velocidade instantânea do movimento efetivo, no ponto de corte escolhido. A *velocidade de corte* ( $v_c$ ) segue a mesma definição exceto por ser na direção do movimento, segundo a direção e sentido do corte, assim como a *velocidade de avanço* ( $v_f$ ) é aquela na direção do movimento de avanço. A Figura 3.2 mostra essas velocidades para o processo de torneamento.

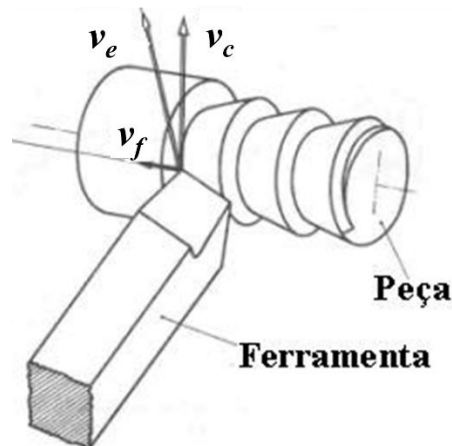


Figura 3.2 - Esquema das velocidades no processo de torneamento.

A velocidade de corte é um dos parâmetros mais importantes dos processos de usinagem sendo, efetivamente, a velocidade relativa entre a aresta de corte e a peça, uma a velocidade de avanço é relativamente muito menor que a de corte. Neste caso, a velocidade de corte e a efetiva têm, aproximadamente, os mesmos valores. A velocidade de corte pode ser calculada, como a velocidade periférica de uma ferramenta rotativa:

$$v = \omega r \quad (3.1)$$

onde  $v$  é a velocidade periférica,  $\omega$  é velocidade angular e  $r$  é o raio da ferramenta rotativa. A Equação (3.1) fornece a velocidade de corte em  $m/s$ , usando-se a velocidade angular em  $rad/s$  e o raio em  $m$ . Nos processos de usinagem as unidades mais usuais não são as utilizadas pelo Sistema Internacional (SI), uma vez que os valores usuais seriam muito dispares. Sendo assim, a velocidade de corte (periférica) é expressa em  $m/min$ , o raio da ferramenta, assim como a maioria das dimensões em usinagem e em Engenharia Mecânica, são expressas em  $mm$  e a velocidade angular em  $rpm$  - *rotações por minuto*. Desta forma, com as devidas adaptações de unidades a velocidade de corte é dada por:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (3.2)$$

onde:

$v_c$  = velocidade de corte em m/min;

$d$  = diâmetro da ferramenta (ou peça) em mm;

$n$  = rotação da ferramenta (ou peça) em rpm;

A Equação (3.2) calcula a velocidade de corte em ferramentas rotativas, tais como fresas, brocas, alargadores, rebolos, etc., assim como em operações de torneamento, usando-se os parâmetros relativos à peça.

### **3.2 - Percurso da ferramenta sobre a peça**

A precisa definição dos diferentes percursos da aresta de corte, descritos sobre a superfície da peça, são muito importantes para a perfeita descrição dos processos de usinagem. Distinguem-se três percursos diferentes, cujas definições se aplicam a todos os processos e operações de usinagem, a saber:

- *Percurso efetivo ( $l_e$ )*: é a soma dos elementos de percurso descrito pelo ponto de corte escolhido, segundo o movimento efetivo.
- *Percurso de corte ( $l_c$ )*: é a soma dos elementos de percurso descrito pelo ponto de corte escolhido, segundo o movimento de corte.
- *Percurso de avanço ( $l_f$ )*: é a soma dos elementos de percurso descrito pelo ponto de corte escolhido, segundo o movimento de avanço.

A Figura 3.3 mostra esses percursos para uma operação de fresamento tangencial.

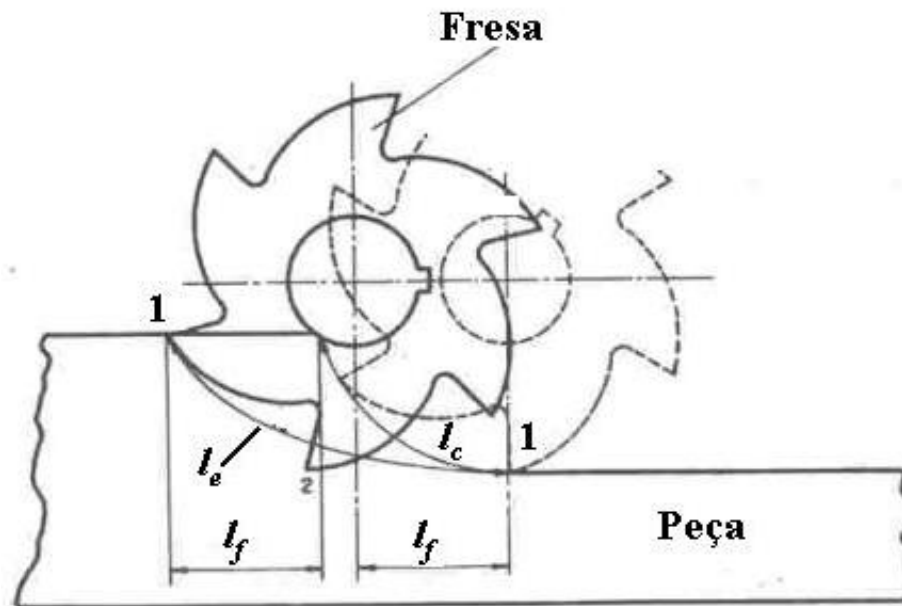


Figura 3.3 - Exemplos dos percursos efetivos, de corte e de avanço para a operação de fresamento tangencial.

### 3.3 - Conceito auxiliares

Para a uniformidade dos conceitos relativos aos diferentes processo de usinagem é necessária a introdução de alguns conceitos auxiliares.

#### 3.3.1 - Ângulo da direção de avanço

O *ângulo da direção de avanço* ( $\phi$ ) é aquele formado entre a direção de avanço e a direção de corte, Figura 3.4(a). Pode ser constante, como no torneamento ou variável continuamente, como no fresamento.

#### 3.3.2 - Ângulo da direção efetiva

O ângulo da direção efetiva ( $\eta$ ) é aquele formado entre a direção de efetiva e a de corte, Figura 3.4(a).

### 3.3.3 - Plano de trabalho

O plano de trabalho ( $P_{fe}$ ) é aquele contendo as direções (vetores das velocidades) de corte e avanço, passando pelo ponto de corte escolhido, Figura 3.4(a). Neste se realizam os movimentos que tomam parte na formação de cavaco. Existe sempre um único plano instantâneo de trabalho, mesmo quando o avanço tem componentes, pois instantaneamente só há uma única direção de avanço.

## 3.4 - Grandezas de avanço

O avanço ( $f$ ) é o percurso de avanço correspondente a uma rotação da ferramenta (ou peça) expresso em  $mm/r$  (milímetros por rotação) medido no plano de trabalho. O avanço por dente ( $f_z$ ) é o percurso de avanço por dente, ou aresta de corte, medido da mesma forma. A figura 3.4 mostra exemplos dessas grandezas.

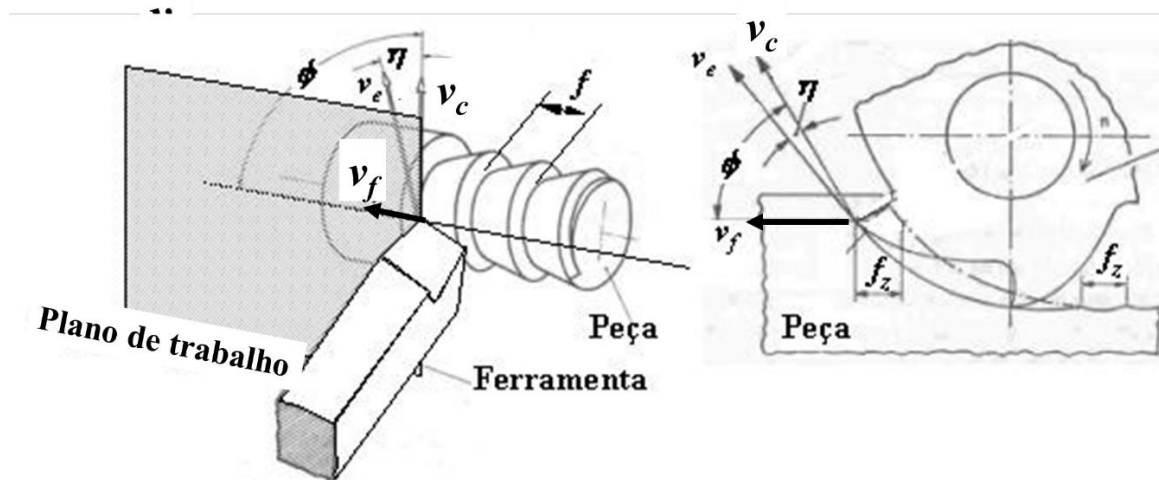


Figura 3.4 - Grandezas de avanço - exemplos.

O avanço por dente pode ser dado por:

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (3.3)$$

onde  $z$  é o número de dentes (arestas de corte) da ferramenta.

### **3.5 - Grandezas de penetração**

#### **3.5.2 - Profundidade ou largura de usinagem**

A *profundidade, ou largura, de usinagem* ( $a_p$ ) é penetração da ferramenta, em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No torneamento cilíndrico e de faceamento, fresamento e retificação frontal,  $a_p$  é denominada *profundidade de usinagem*. No torneamento de mergulho, brochamento, fresamento e retificação tangencial,  $a_p$  é denominada *largura de usinagem*. Na furação  $a_p$  corresponde à metade do diâmetro da broca. Exemplos estão na Figura 3.5.

#### **3.5.3 - Penetração de trabalho**

A *penetração de trabalho*, ( $a_e$ ) é a penetração da ferramenta, em relação à peça, medida no plano de trabalho e perpendicularmente à direção do avanço. A penetração de trabalho  $a_e$  tem importância predominante na retificação. Na retificação cilíndrica convencionam-se a penetração de trabalho  $a_e$  à metade da variação de diâmetro da peça numa volta. Para retificação cilíndrica com avanço radial do rebolo (de mergulho)  $a_e$  corresponde ao avanço radial; a largura de usinagem  $a_p$  corresponde à espessura de retificação da peça  $b_w$ . Na retificação cilíndrica com avanço longitudinal da peça,  $a_p$  corresponde ao avanço  $f$ . A Figura 3.5 mostra exemplos dessa grandeza.

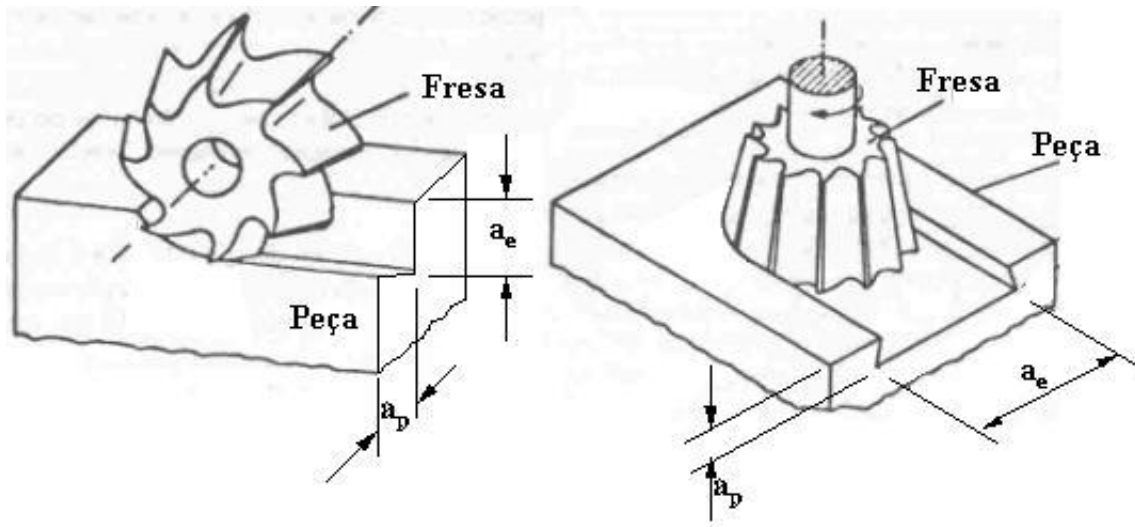


Figura 3.5 - Exemplos de profundidade de usinagem e de penetração de trabalho.

### 3.6 - Grandezas de corte, num cálculo simplificado.

Para o cálculo simplificado das grandezas de corte a seguir, adotam-se as simplificações:

- aresta de corte retilínea;
- raio da ponta da ferramenta nulo (canto vivo);
- ângulo de inclinação  $\lambda_s = 0^\circ$  (Figura 3.6);
- ângulo de posição da ferramenta, da aresta secundária  $\chi_r = 0^\circ$  (Figura 3.6).

#### 3.6.1 - Seção transversal de corte

A seção transversal de corte ( $A$ ) é calculada de um cavaco a ser removido, medida perpendicularmente à direção de corte, satisfazendo as condições do cálculo simplificado, Figura 3.6. Neste caso é válida a relação:

$$A = a_p \cdot f = b \cdot h \quad (3.4)$$

onde  $b$  é a largura de corte e  $h$  a espessura de corte, definidas a seguir.



### 3.6.2 - Largura de corte

A *largura de corte* ( $b$ ) é calculada na seção transversal de corte e é idêntica ao comprimento da aresta de corte ativa, conforme Figura 3.6, pode ser calculada da seguinte forma:

$$b = \frac{a_p}{\text{sen } \chi_r} \quad (3.5)$$

### 3.6.3 - Espessura de corte

A *espessura de corte* ( $h$ ) é calculada na seção transversal de corte, conforme Figura 3.6, e pode ser calculada por:

$$h = f \cdot \text{sen } \chi_r = \frac{A}{b} \quad (3.6)$$

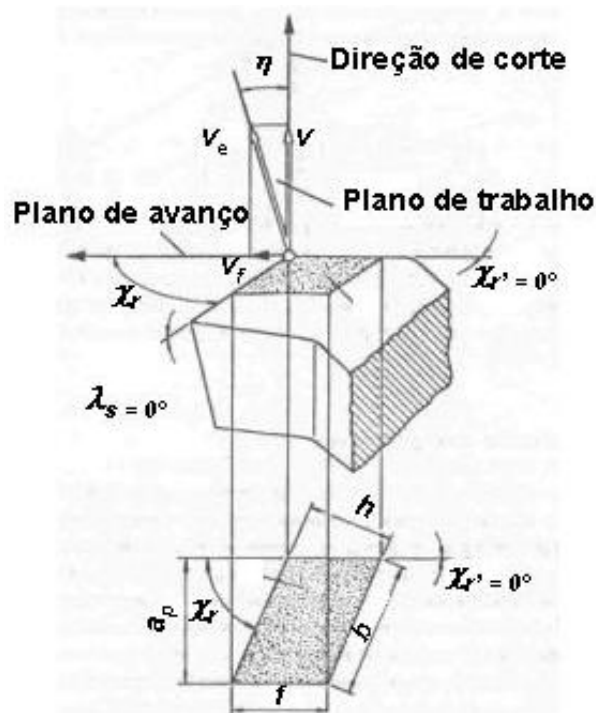


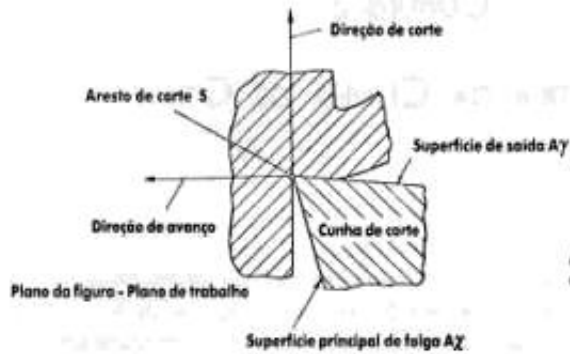
Figura 3.6 - Grandezas de corte para arestas retilíneas. Exemplo de torneamento cilíndrico com ferramenta  $\lambda_s = 0^\circ$  e o ponto de corte escolhido é a ponta da ferramenta de raio nulo.

### 3.7 - Geometria da cunha cortante

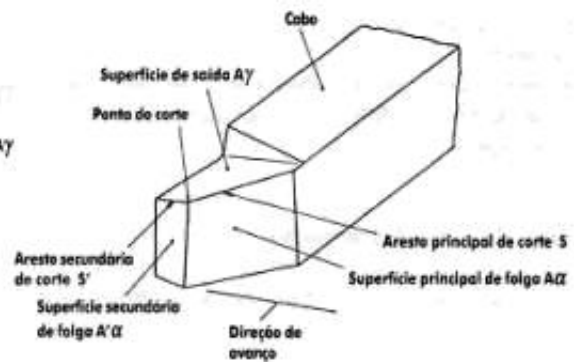
A descrição e terminologia completa da cunha cortante estão na norma ABNT NB-205. Neste texto somente os conceitos mais relevantes serão apresentados como base para os estudos em usinagem aqui desenvolvidos. As ferramentas de usinagem apresentam os seguintes elementos construtivos:

- *Parte de corte*: é a parte ativa da ferramenta constituída pelas suas cunhas de corte. A parte ativa da ferramenta é construída ou fixada sobre um suporte, ou cabo da ferramenta, através do qual é possível fixar a ferramenta para construção, afiação, reparo, controle e trabalho. Portanto, pode-se ter uma superfície de apoio da ferramenta, ou a ferramenta poderá ser fixada pelo seu eixo, Figura 3.7.
- *Cunha de corte*: é a cunha da ferramenta, formada pela interseção das superfícies de saída e de folga, Figura 3.7.
- *Superfície de sarda ( $A_\gamma$ )*: é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco escoar durante sua saída da região do trabalho de usinagem, Figuras 3.7.
- *Superfície principal de folga ( $A_\alpha$ )*: é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta principal de corte e que defronta com a superfície em usinagem principal, Figura 3.7.
- *Superfície secundária de folga ( $A_a'$ )*: é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta de corte secundária e que defronta com a superfície em usinagem secundária, Figura 3.7.
- *Aresta principal de corte ( $S$ )*: é a aresta da cunha de corte formada pela interseção das superfícies de saída e de folga principal. Gera na peça a superfície em usinagem principal, Figura 3.7.
- *Aresta secundária de corte ( $S'$ )*: é a aresta da cunha de corte formada pela interseção das superfícies de saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície em usinagem secundária, Figura 3.7.

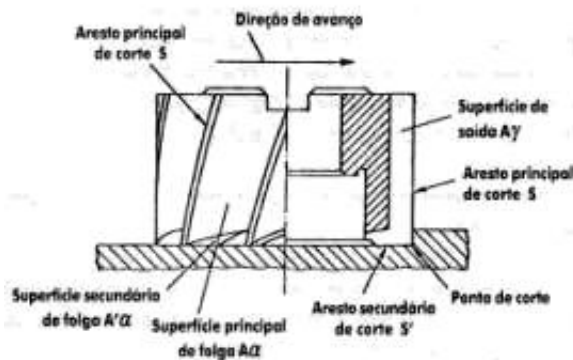
- *Ponta de corte:* é a parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte, Figura 3.7. A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas, ou a concordância das duas arestas através de um arredondamento, ou o encontro das duas arestas através de um chanfro.



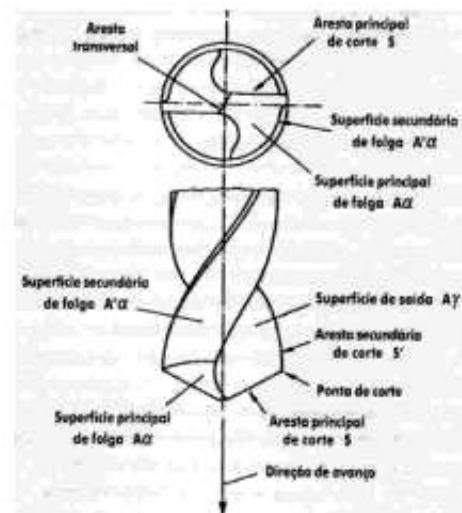
(a) cunha de corte e uma ferramenta



(b) Aresta de corte e superfícies da parte de corte de uma ferramenta de corte



(c) Aresta de corte e superfícies das partes de corte de uma fresa frontal



(d) Aresta de corte e superfícies das partes de corte de uma broca helicoidal

Figura 3.7 - Geometria da cunha cortante e sua terminologia

### **3.8 - Sistemas de referência.**

Para a definição inequívoca e a descrição dos ângulos da parte de corte são necessários um *sistema de referência da ferramenta* e um *sistema de referencia efetivo*. Estes sistemas de referência são constituídos por três planos ortogonais cada um, passando pelo ponto de referência da aresta de corte. O sistema de referencia da ferramenta é necessário para a determinação da geometria da parte de corte durante o projeto, execução, afiação, reparo e controle da mesma, considerada, neste instante, dissociada da máquina-ferramenta que irá utilizá-la.

O sistema de referencia efetivo é necessário para a determinação da geometria da parte de corte durante a ocorrência do processo de usinagem, ou seja, com a ferramenta em trabalho fixada na respectiva máquina-ferramenta e com todas as condições operacionais definidas.

Durante o projeto da parte de corte, utiliza-se o sistema de referencia efetivo, o qual leva em conta a ferramenta na máquina, fixando-se também as velocidades de corte e de avanço. Por transferência de sistemas de referencia, determina-se a geometria da ferramenta no sistema de referencia da ferramenta. Este deverá ser utilizado na construção, afiação, reparo e controle da ferramenta. Muitas ferramentas, no entanto, são adquiridas prontas e outras ainda não são re-afiadas, casos em que os dois sistemas de referência podem ser úteis para o controle de recebimento (sistema da ferramenta) e de utilização e desempenho em serviço (sistema efetivo).

#### **3.8.1 - Sistema de referência da ferramenta**

O sistema de referência da ferramenta constitui-se de três planos ortogonais cujo ponto de interseção se localiza no ponto de corte escolhido. Orienta-se com base na *direção admitida de corte*, escolhida de modo que o plano de referência seja paralelo, ou perpendicular, a uma superfície, ou eixo, da ferramenta (Figura 3.8) e, na *direção admitida de avanço*, escolhida da mesma forma. Os planos identificam-se como:

- *Plano de referência ( $P_r$ )*: Plano perpendicular à direção admitida de corte

- *Plano admitido de trabalho ( $P_f$ )*: Plano perpendicular ao plano de referência e paralelo à direção admitida de avanço.
- *Plano dorsal da ferramenta ( $P_p$ )*: plano perpendicular aos planos de referência e admitido de trabalho.
- *Plano normal à aresta de corte ( $P_n$ )*: Plano perpendicular à aresta de corte  $S$ . É idêntico a  $P_{ne}$ .
- *Plano de corte da ferramenta ( $P_s$ )*: é plano tangente à aresta de corte  $S$  e perpendicular ao plano de referência. Quando o plano de corte se refere à aresta principal, denomina-se *plano principal de corte*, quando se refere à aresta secundária, Figura 7(b), *plano secundário de corte  $P_s'$* .
- *Plano ortogonal e corte ( $P_o$ )*: é o plano perpendicular aos planos de referência e de corte.

A Figura 3.8 mostra um esquema desses planos para uma ferramenta de torneamento.

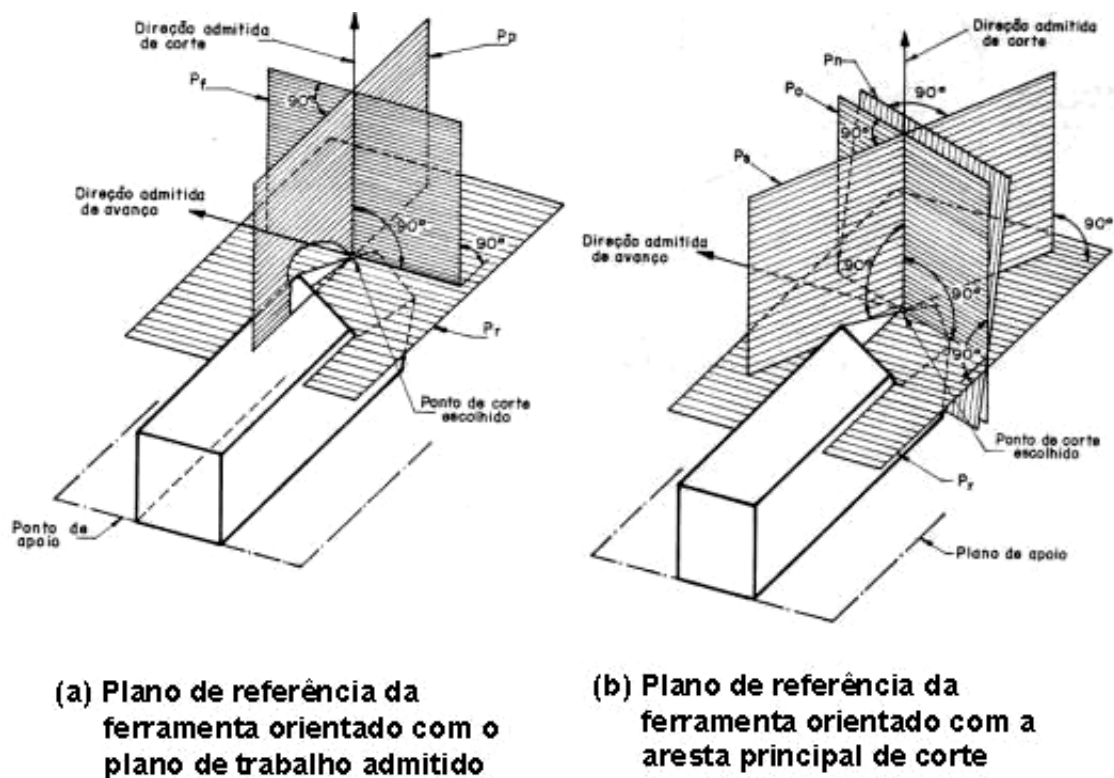


Figura 3.8 - Planos do sistema de referência da ferramenta.

Na Figura 3.9 mostram-se estes planos em projeção ortogonal, para melhor orientação na definição dos mesmos.

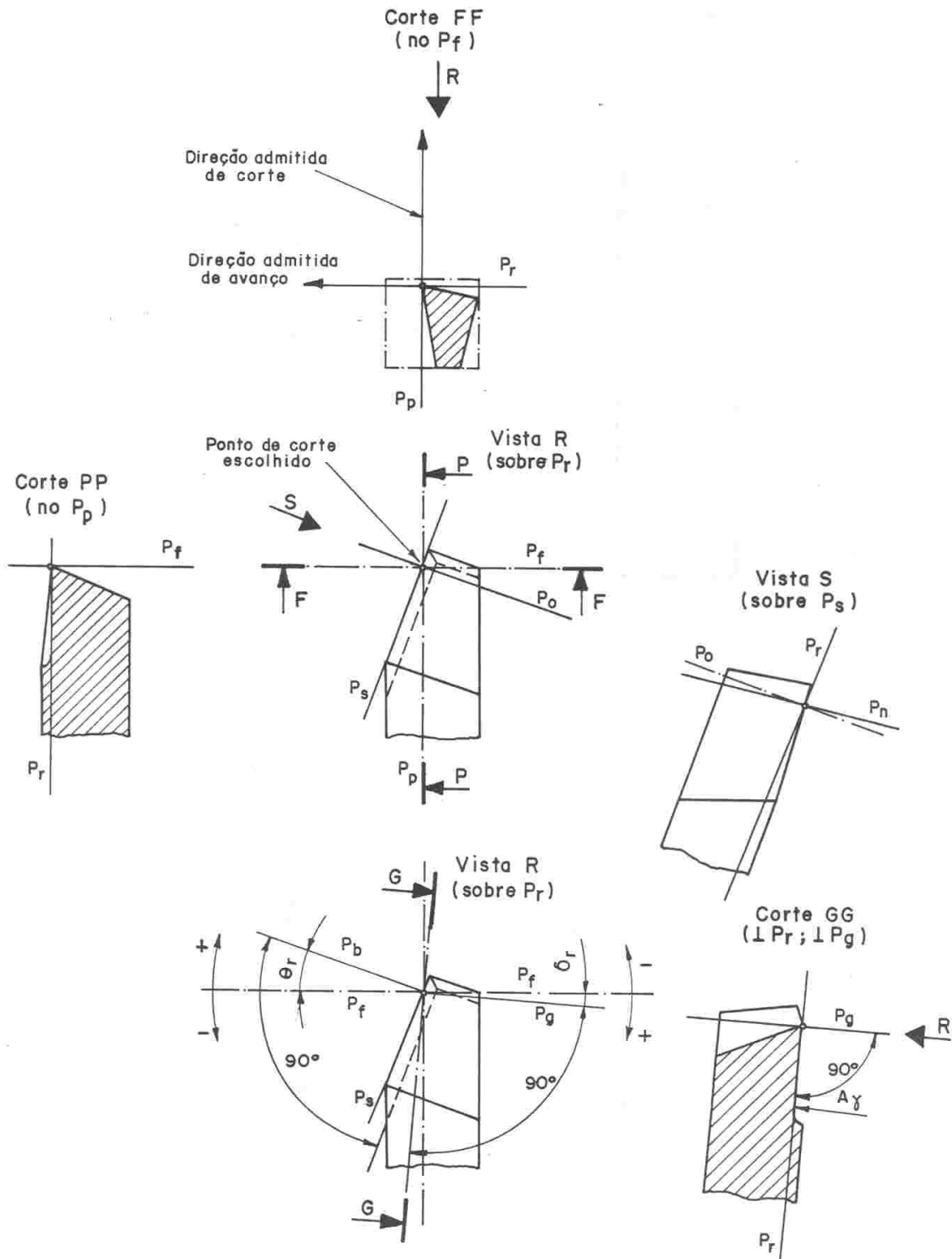


Figura 3.9- Planos do sistema de referência da ferramenta para uma de torneamento.

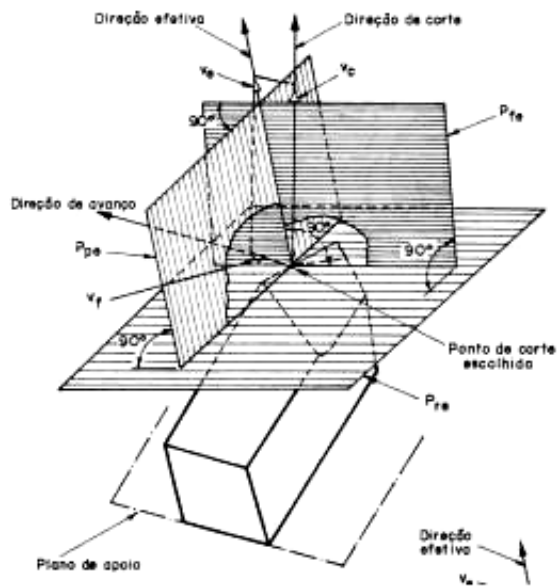
Os mesmos planos podem ser definidos para outras ferramentas, sendo que a Norma ABNT NB-205 mostra, ainda, para fresas e brocas.

### 3.8.2 - Sistema efetivo de referência

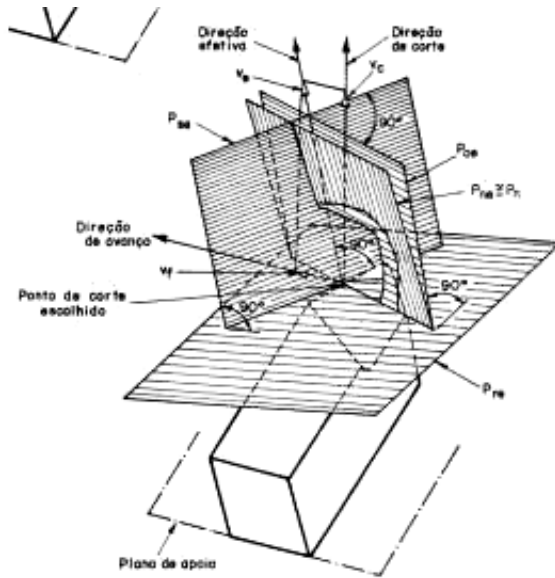
O sistema efetivo de referência da ferramenta constitui-se de três planos ortogonais cujo ponto de interseção se localiza no ponto de corte escolhido. Orienta-se com base na *direção efetiva de corte*, e no plano de trabalho, formado pelos vetores da velocidade de corte e de avanço. (Figura 3.10). Os planos identificam-se como:

- *Plano de referência efetivo ( $P_{re}$ )*: Plano perpendicular à direção efetiva de corte
- *Plano trabalho ( $P_{fe}$ )*: Plano contendo os vetores da velocidade de corte e de avanço.
- *Plano dorsal efetivo ( $P_{pe}$ )*: Plano perpendicular aos planos de referência efetivo e de trabalho.
- *Plano efetivo normal à aresta de corte ( $P_{ne}$ )*: Plano perpendicular à aresta de corte  $S$ . É idêntico a  $P_n$ .
- *Plano de corte efetivo ( $P_{se}$ )*: Plano tangente à aresta de corte  $S$  e perpendicular ao plano de referência efetivo. Quando o plano de corte se refere à aresta principal, denomina-se *plano principal de corte efetivo*, quando se refere à aresta secundária, Figura 7(b), *plano secundário de corte efetivo  $P_{se}'$* .
- *Plano ortogonal e corte ( $P_{oe}$ )*: é o plano perpendicular aos planos de referência efetivo e de corte efetivo.

A Figura 3.10 mostra um esquema desses planos para uma ferramenta de torneamento.



**(a) Plano efetivo de referência da ferramenta orientado com o plano de trabalho**



**(b) Plano efetivo de referência da ferramenta orientado com a aresta principal de corte**

Figura 3.10 - Planos do sistema efetivo de referência da ferramenta.

Na Figura 3.11 mostram-se estes planos em projeção ortogonal, para melhor orientação na definição dos mesmos.



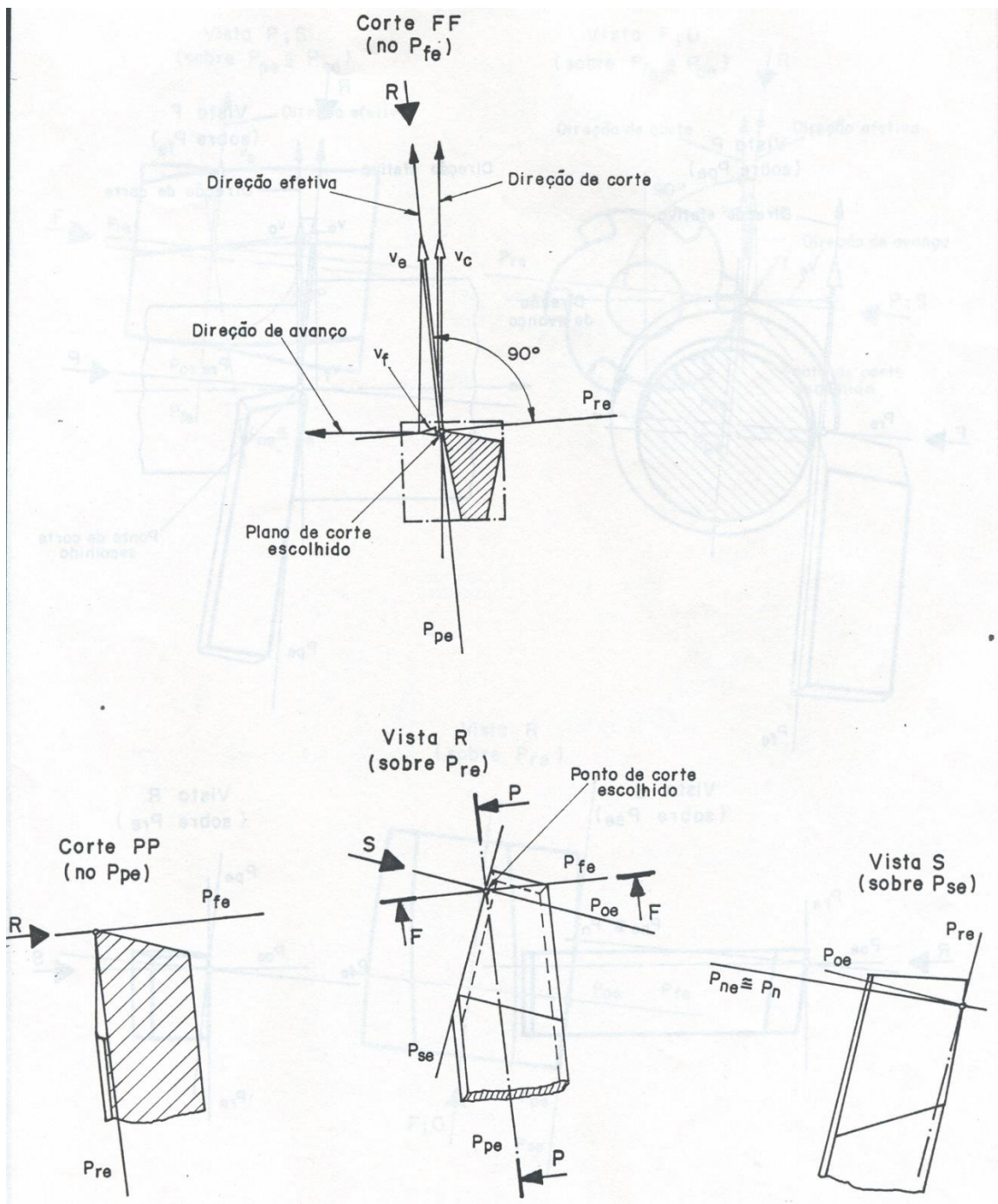


Figura 3.11- Planos do sistema efetivo de referência da ferramenta para uma de torneamento.

Os mesmos planos podem ser definidos para outras ferramentas, sendo que a Norma ABNT NB-205 mostra, ainda, para fresas e brocas.

### 3.9 - Ângulos da parte de corte da ferramenta

Os ângulos da parte de corte são importantes para a determinação da posição e da forma da cunha cortante. Para a definição dos ângulos da ferramenta, será utilizado o *sistema efetivo de referência* orientado segundo o *plano de trabalho*, de acordo com a Figura 3.10(b). Todos os ângulos são designados por letras gregas e recebem um sub-índice de duas letras para o plano a que se referem e o sistema de referência sobre o qual são medidos. Para a aresta secundária de corte o apóstrofo (') é acrescentado ao símbolo. Os ângulos e suas definições são:

- *Ângulo de posição efetivo* ( $\chi_{re}$ ): ângulo entre o plano de corte efetivo ( $P_{se}$ ) e o plano de trabalho ( $P_{fe}$ ), medido no plano de referência efetivo ( $P_{re}$ ). Dois ângulos podem ser obtidos, que juntos formam  $180^\circ$ . O ângulo,  $\chi_r$ , ou  $\chi_{re}$ , corresponde à parte que fica fora da cunha de corte e é sempre positivo.
- *Ângulo de posição complementar efetivo* ( $\psi_{re}$ ): ângulo entre o plano de corte efetivo ( $P_{se}$ ) e o plano dorsal efetivo ( $P_{pe}$ ) medido no plano de referência efetivo ( $P_{re}$ ).
- *Ângulo de inclinação efetivo* ( $\lambda_{se}$ ): Ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência efetivo ( $P_{re}$ ), medido no plano de corte ( $P_{se}$ ).
- *Ângulo de saída ortogonal efetivo* ( $\gamma_{oe}$ ): ângulo entre a superfície de saída ( $A_\gamma$ ) e o plano de referência efetivo ( $P_{re}$ ) medido no plano ortogonal ( $P_{oe}$ ).
- *Ângulo de saída lateral efetivo* ( $\gamma_{fe}$ ): ângulo entre a superfície de saída ( $A_\gamma$ ) e o plano de referência efetivo ( $P_{re}$ ) medido no plano de trabalho ( $P_{fe}$ ).
- *Ângulo de saída dorsal efetivo* ( $\gamma_{pe}$ ): ângulo entre a superfície de saída ( $A_\gamma$ ) e o plano de referência efetivo ( $P_{re}$ ) medido no plano dorsal efetivo ( $P_{pe}$ ).
- *Ângulo de saída normal efetivo* ( $\gamma_{ne}$ ): ângulo entre a superfície de saída ( $A_\gamma$ ) e o plano de referência efetivo ( $P_{re}$ ) medido no plano efetivo normal à aresta de corte ( $P_{ne}$ ).
- *Ângulo de cunha ortogonal efetivo* ( $\beta_{oe}$ ): Ângulo entre as superfícies de saída ( $A_\gamma$ ) e de folga ( $A_\alpha$ ), medido no plano ortogonal efetivo ( $P_{oe}$ ).

- *Ângulo de cunha lateral efetivo* ( $\beta_{fe}$ ): Ângulo entre as superfícies de saída ( $A_\gamma$ ) e de folga ( $A_\alpha$ ), medido no plano de trabalho ( $P_{fe}$ ).
- *Ângulo de cunha dorsal efetivo* ( $\beta_{pe}$ ): Ângulo entre as superfícies de saída ( $A_\gamma$ ) e de folga ( $A_\alpha$ ), medido no plano dorsal efetivo ( $P_{pe}$ ).
- *Ângulo de cunha normal efetivo* ( $\beta_{ne}$ ): Ângulo entre as superfícies de saída ( $A_\gamma$ ) e de folga ( $A_\alpha$ ), medido no plano normal à aresta de corte ( $P_{ne}$ ).
- *Ângulo de folga ortogonal efetivo* ( $\alpha_{oe}$ ): Ângulo entre as superfícies de saída ( $A_\alpha$ ) e o plano de corte efetivo, medido no plano efetivo ortogonal ( $P_{oe}$ ).
- *Ângulo de folga lateral efetivo* ( $\alpha_{fe}$ ): Ângulo entre as superfícies de saída ( $A_\alpha$ ) e o plano de corte efetivo ( $P_{se}$ ), medido no plano de trabalho ( $P_{fe}$ ).
- *Ângulo de folga dorsal efetivo* ( $\alpha_{pe}$ ): Ângulo entre as superfícies de saída ( $A_\alpha$ ) e o plano de corte efetivo ( $P_{se}$ ), medido no plano dorsal efetivo ( $P_{pe}$ ).
- *Ângulo de folga normal efetivo* ( $\alpha_{ne}$ ): Ângulo entre as superfícies de saída ( $A_\alpha$ ) e o plano de corte efetivo ( $P_{se}$ ), medido no plano normal à aresta de corte ( $P_{ne}$ ).

A Figura 3.12 mostra estes ângulos para uma ferramenta de torneamento.

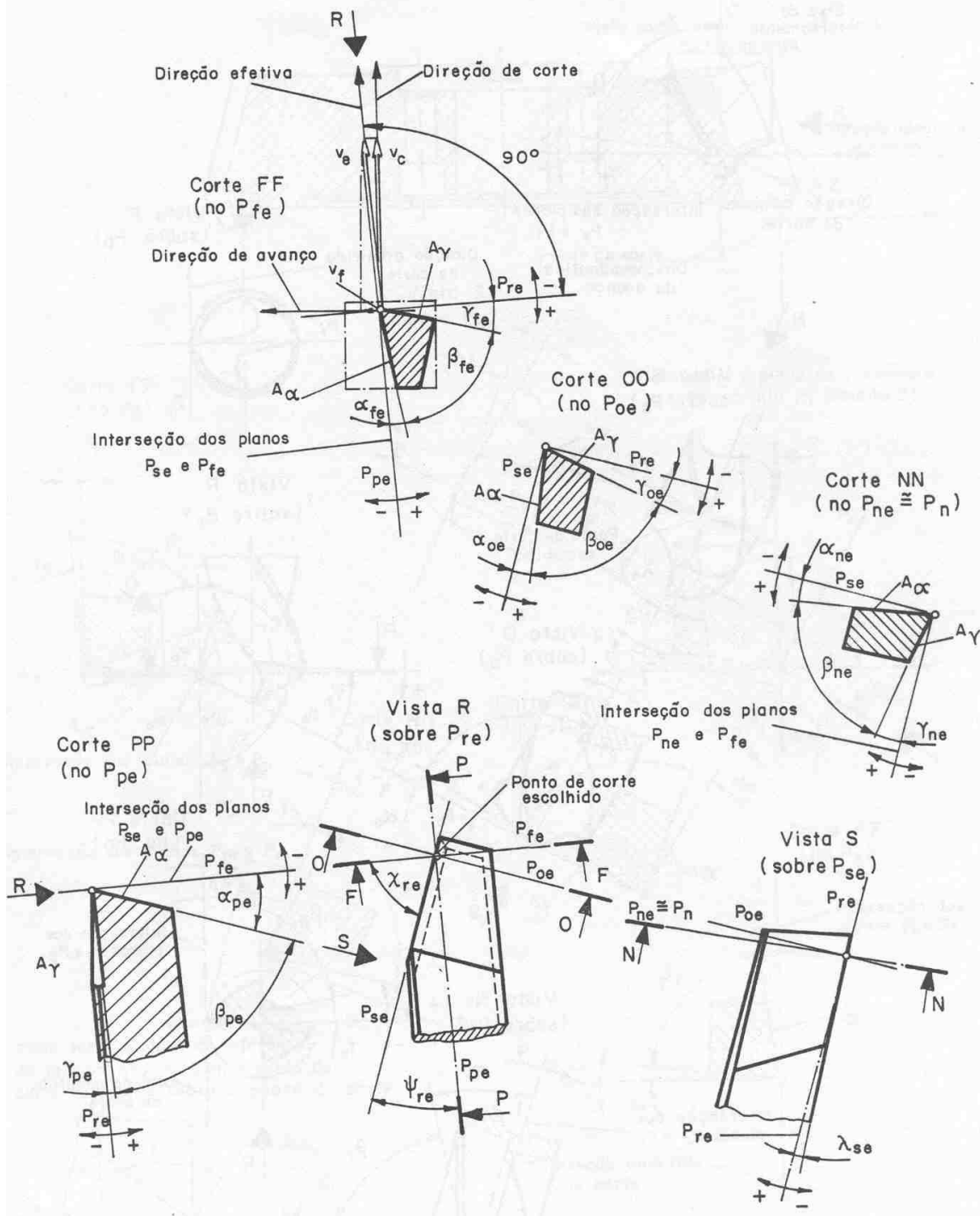


Figura 3.12 - Ângulos efetivos numa ferramenta de torneamento.