

ÍNDICE

3.1 - VELOCIDADES	3
3.2 - PERCURSO DA FERRAMENTA SOBRE A PEÇA	4
3.3 - CONCEITOS 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>	16
3.9 - ÂNGULOS DA PARTE DE CORTE DA FERRAMENTA	19

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.

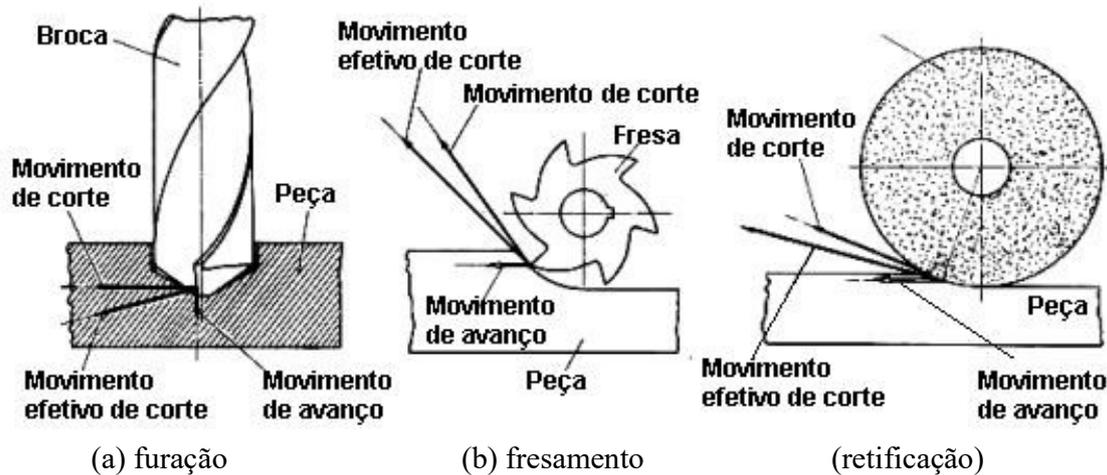


Figura 3.1 - Exemplos de movimentos de corte, avanço e efetivo em processos de furação, fresamento e retificação.

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) 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.

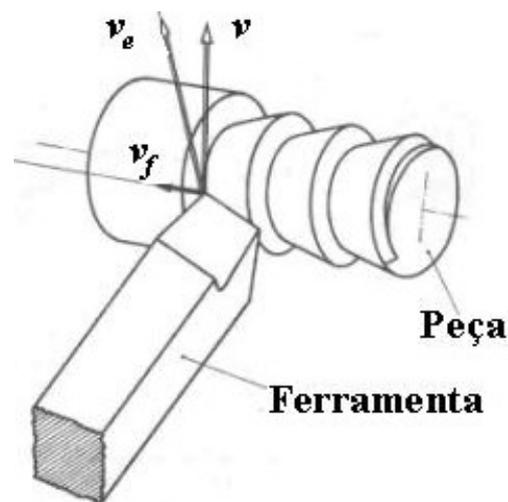


Figura 3.2 - Esquema das velocidades no processo de torneamento.

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, ω 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:

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

onde:

v = 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 (I_e):* é a soma dos elementos de percurso descrito pelo ponto de corte escolhido, segundo o movimento efetivo.
- *Percurso de corte (I_c):* é a soma dos elementos de percurso descrito pelo ponto de corte escolhido, segundo o movimento de corte.
- *Percurso de avanço (I_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.

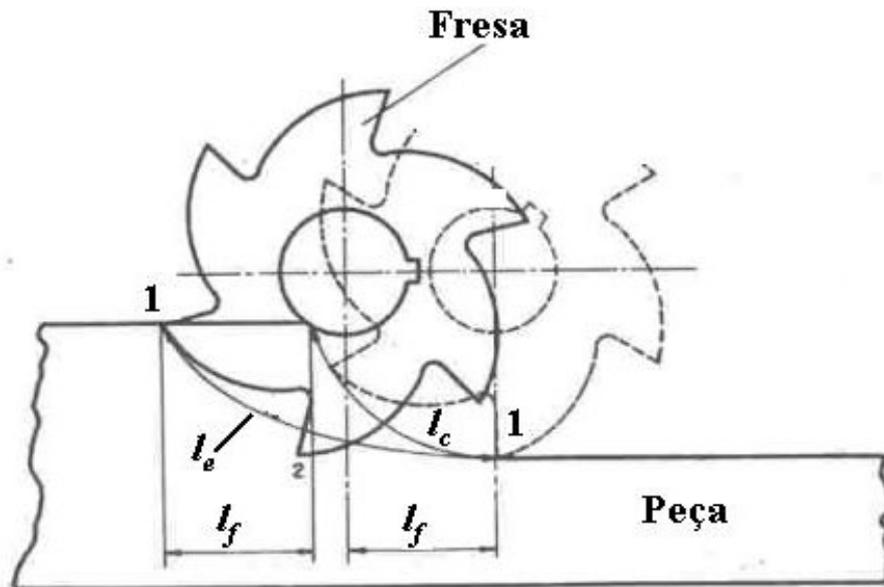


Figura 3.3 - Exemplos dos percursos efetivos, de corte e de avanço para a operação de fresamento tangencial.

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* (ϕ) 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 (η) 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.

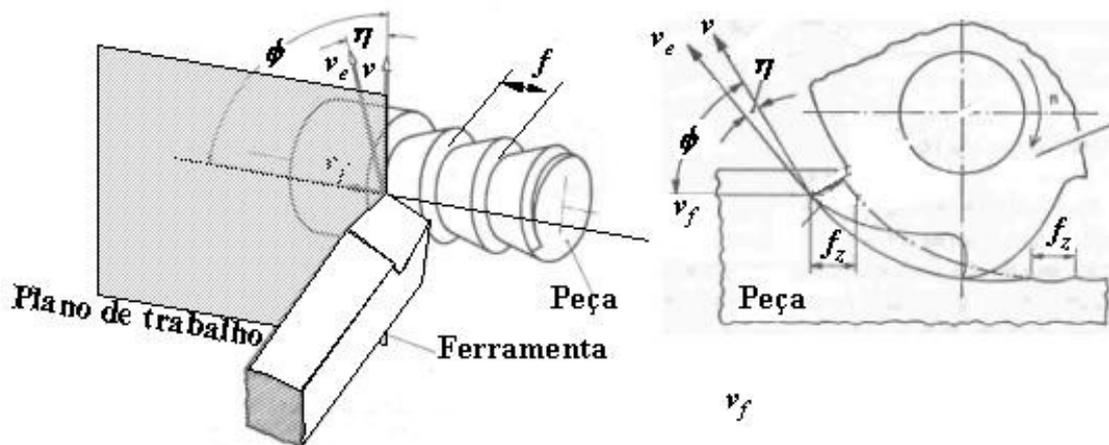


Figura 3.4 - Grandezas de avanço - exemplos.

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 convencionou-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.

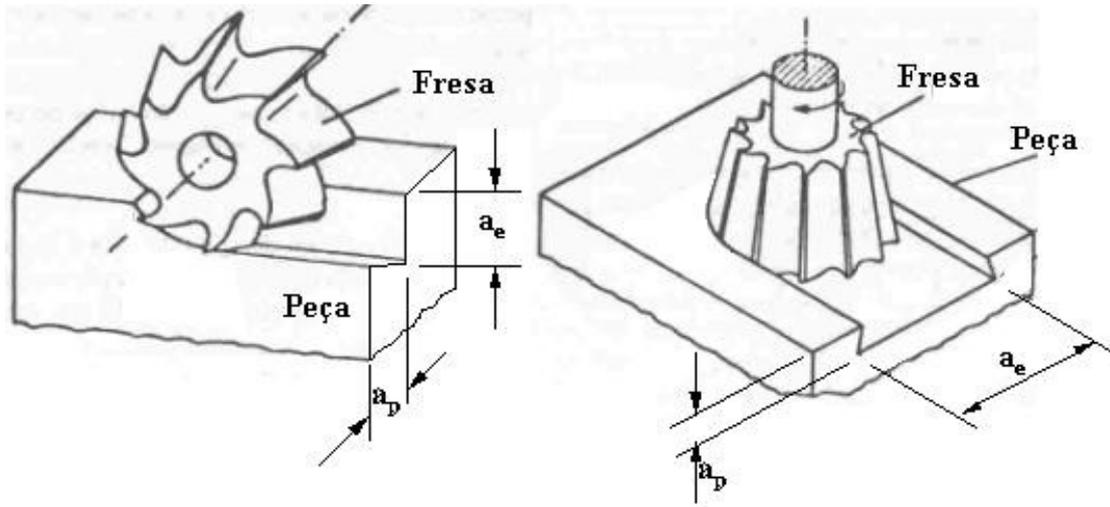


Figura 3.5 - Exemplos de profundidade de usinagem e de penetração de trabalho.

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:

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

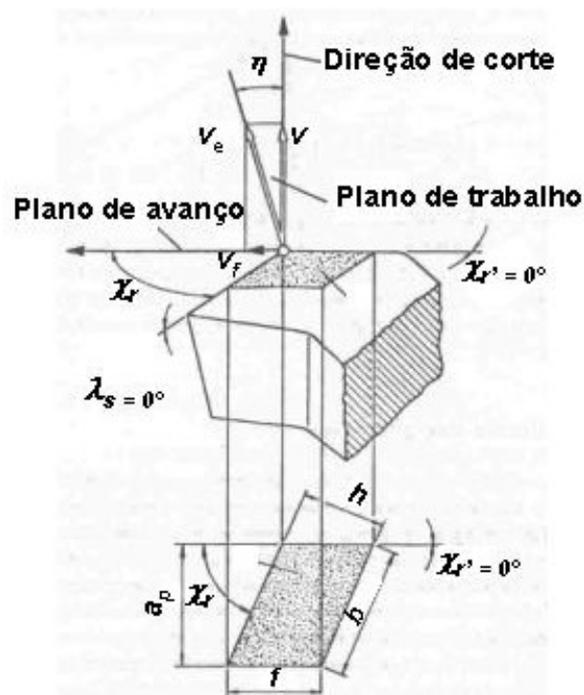


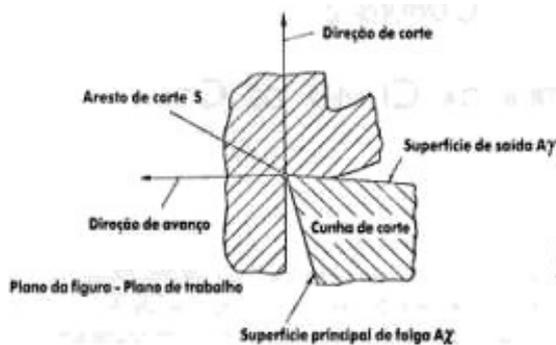
Figura 3.6 - Grandezas de corte para arestas retilíneas. Exemplo de torneamento cilíndrico com ferramenta $\lambda_s = 0^\circ$ e o ponto de corte escolhido é a ponta da ferramenta de raio nulo.

3.7 - Geometria da cunha cortante

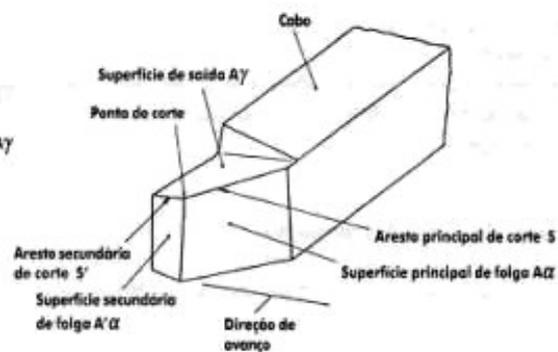
A descrição e terminologia completa da cunha cortante estão na norma ABNT NB-205. Neste texto somente os conceitos mais relevantes serão apresentados como base para os estudos em usinagem aqui desenvolvidos. As ferramentas de usinagem apresentam os seguintes elementos construtivos:

- *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_γ)*: é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco escoá durante sua saída da região do trabalho de usinagem, Figuras 3.7.
- *Superfície principal de folga (A_α)*: é a superfície do 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 ($A_{\alpha'}$)*: 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.

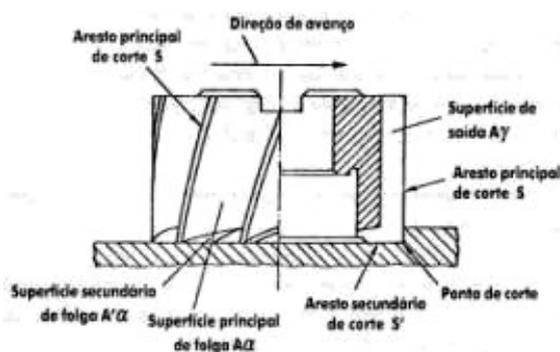
- *Aresta secundária de corte: (S'):* é a aresta da cunha de corte formada pela interseção das superfícies de saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície em usinagem secundária, Figura 3.7.
- *Ponta de corte:* é a parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária 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.



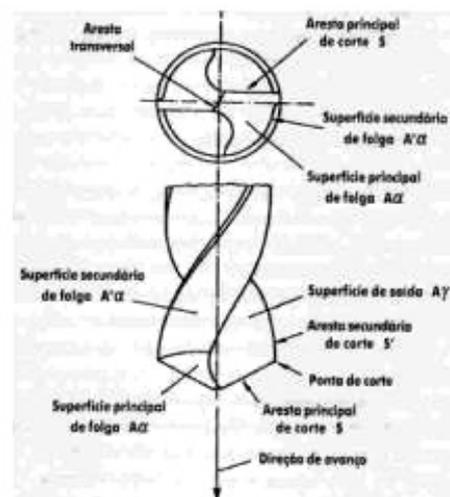
(a) cunha de corte de uma ferramenta



(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 referência 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 referência 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 referência 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 referência 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 referência, determina-se a geometria da ferramenta no sistema de referência 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.

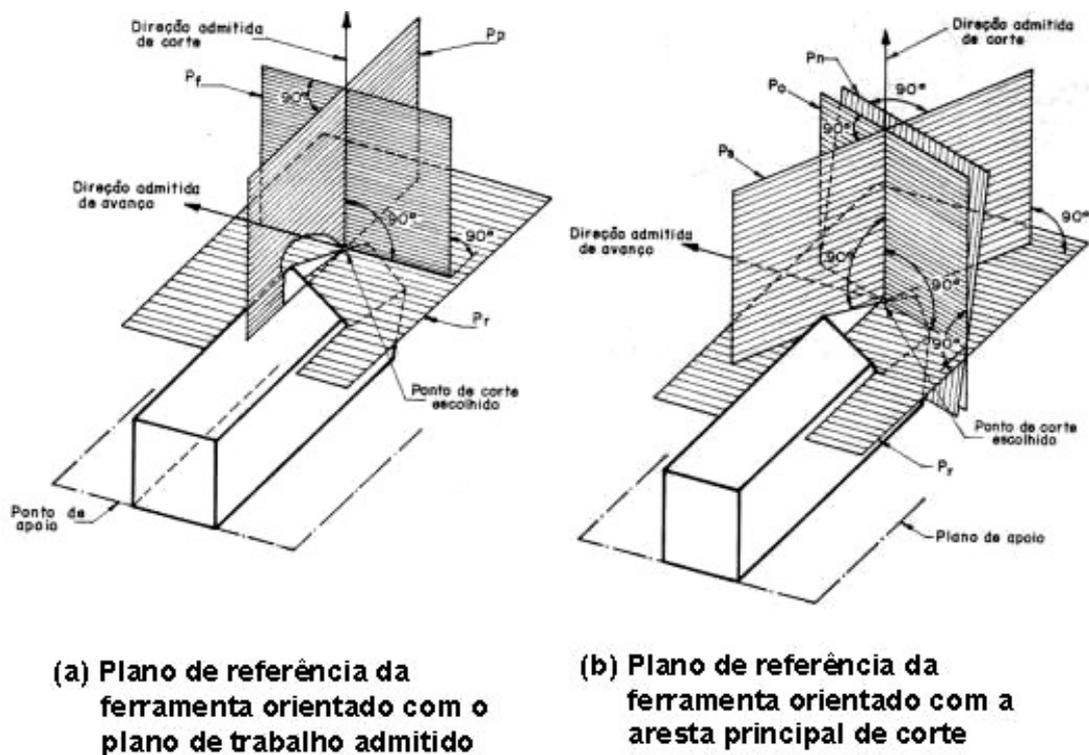


Figura 3.8 - Planos do sistema de referência da ferramenta.

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

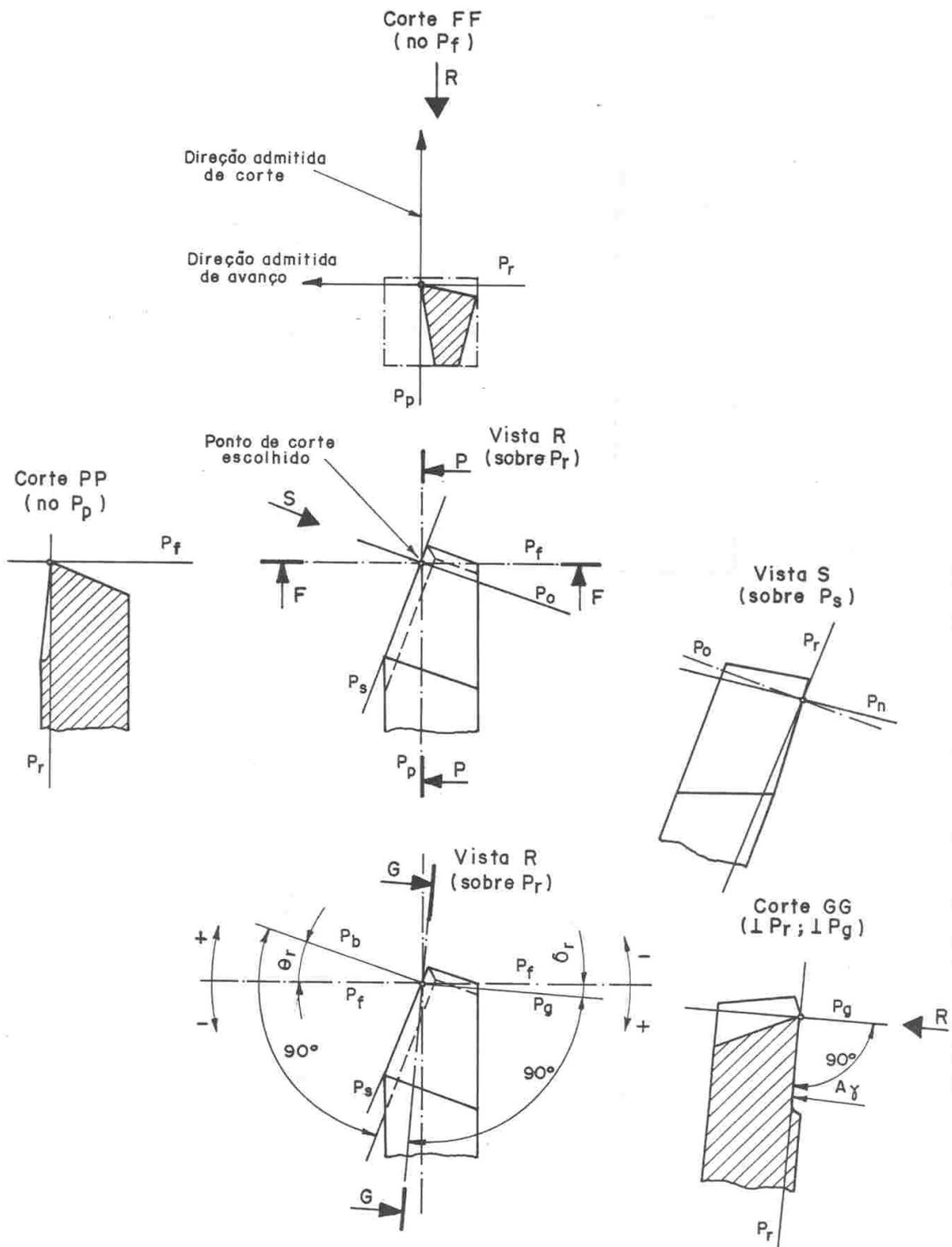


Figura 3.9- Planos do sistema de referência da ferramenta para uma de torneamento.

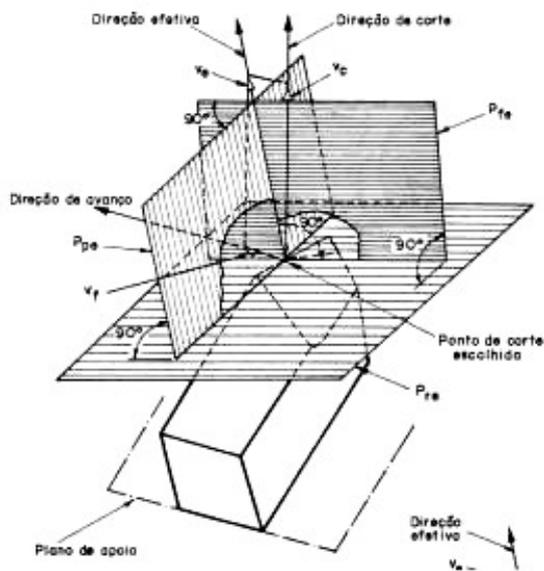
Os mesmos planos podem ser definidos para outras ferramentas, sendo que a Norma ABNT NB-205 mostra, ainda, para fresas e brocas.

3.8.2 - Sistema efetivo de referência

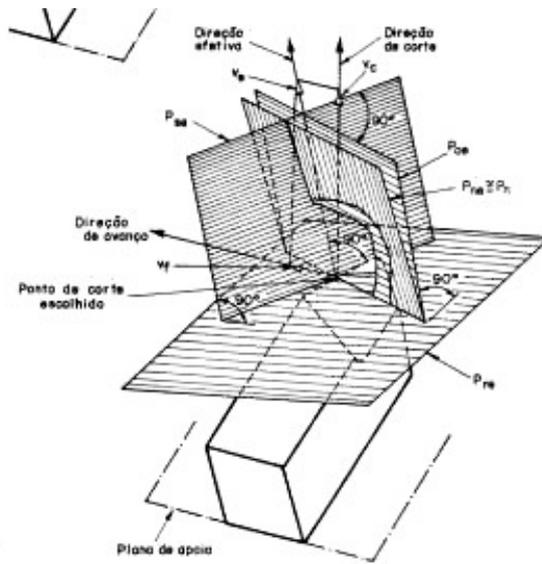
O sistema efetivo de referência da ferramenta constitui-se de três planos ortogonais cujo ponto de interseção se localiza no ponto de corte escolhido. Orienta-se com base na *direção efetiva de corte*, e no plano de trabalho, formado pelos vetores da velocidade de corte e de avanço. (Figura 3.10). Os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

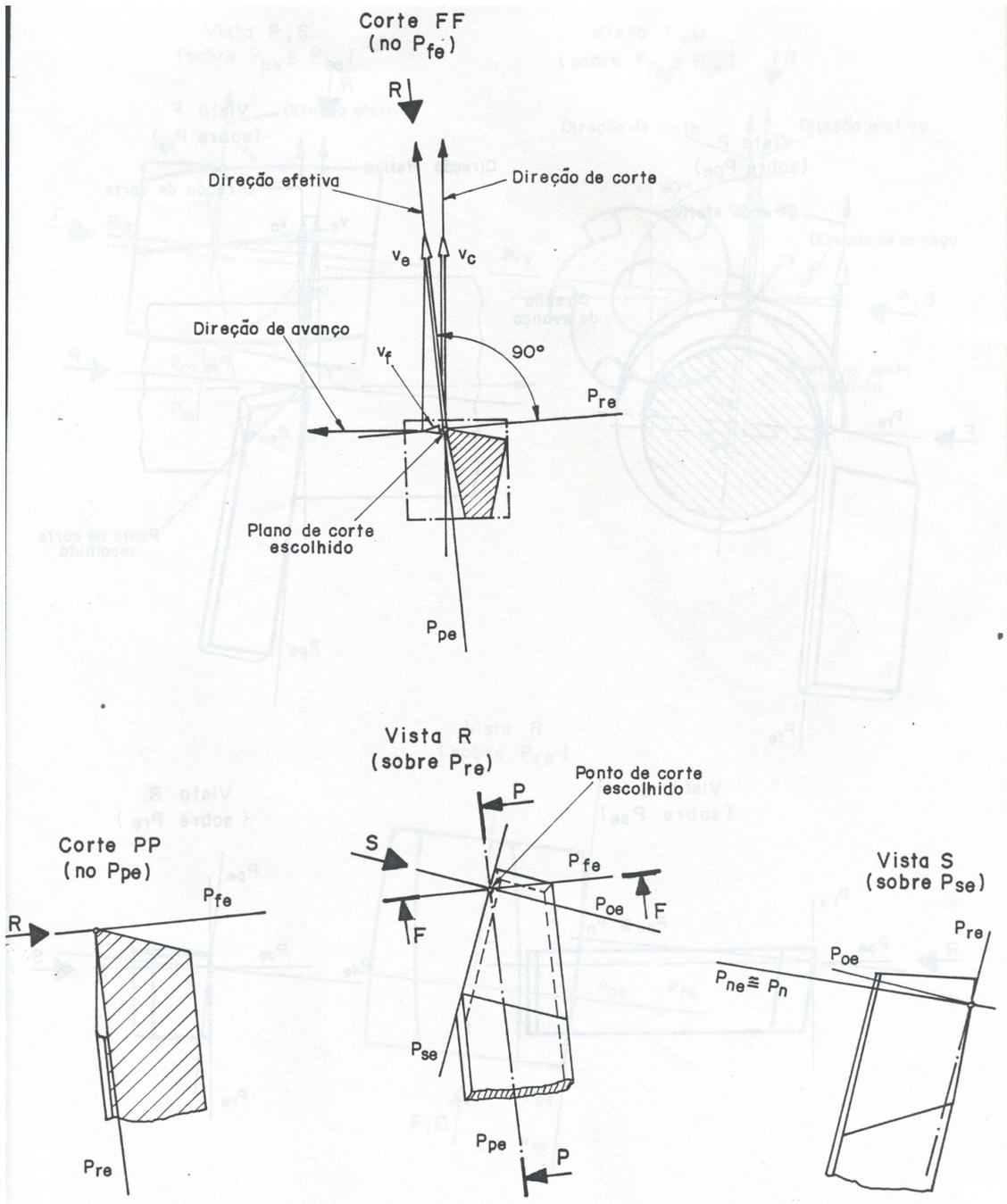


Figura 3.11- Planos do sistema efetivo de referência da ferramenta para uma de torneamento.

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* (χ_{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° . O ângulo, χ_r , ou χ_{re} , corresponde à parte que fica fora da cunha de corte e é sempre positivo.
- *Ângulo de posição complementar efetivo* (ψ_{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* (λ_{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* (γ_{oe}): ângulo entre a superfície de saída (A_γ) e o plano de referência efetivo (P_{re}) medido no plano ortogonal (P_{oe}).
- *Ângulo de saída lateral efetivo* (γ_{fe}): ângulo entre a superfície de saída (A_γ) e o plano de referência efetivo (P_{re}) medido no plano de trabalho (P_{fe}).
- *Ângulo de saída dorsal efetivo* (γ_{pe}): ângulo entre a superfície de saída (A_γ) e o plano de referência efetivo (P_{re}) medido no plano dorsal efetivo (P_{pe}).
- *Ângulo de saída normal efetivo* (γ_{ne}): ângulo entre a superfície de saída (A_γ) e o plano de referência efetivo (P_{re}) medido no plano efetivo normal à aresta de corte (P_{ne}).
- *Ângulo de cunha ortogonal efetivo* (β_{oe}): Ângulo entre as superfícies de saída (A_γ) e de folga (A_α), medido no plano ortogonal efetivo (P_{oe}).

- *Ângulo de cunha lateral efetivo (β_{fe})*: Ângulo entre as superfícies de saída (A_γ) e de folga (A_α), medido no plano de trabalho (P_{fe}).
- *Ângulo de cunha dorsal efetivo (β_{pe})*: Ângulo entre as superfícies de saída (A_γ) e de folga (A_α), medido no plano dorsal efetivo (P_{pe}).
- *Ângulo de cunha normal efetivo (β_{ne})*: Ângulo entre as superfícies de saída (A_γ) e de folga (A_α), medido no plano normal à aresta de corte (P_{ne}).
- *Ângulo de folga ortogonal efetivo (α_{oe})*: Ângulo entre as superfícies de saída (A_α) e o plano de corte efetivo, medido no plano efetivo ortogonal (P_{oe}).
- *Ângulo de folga lateral efetivo (α_{fe})*: Ângulo entre as superfícies de saída (A_α) e o plano de corte efetivo (P_{se}), medido no plano de trabalho (P_{fe}).
- *Ângulo de folga dorsal efetivo (α_{pe})*: Ângulo entre as superfícies de saída (A_α) e o plano de corte efetivo (P_{se}), medido no plano dorsal efetivo (P_{pe}).
- *Ângulo de folga normal efetivo (α_{ne})*: Ângulo entre as superfícies de saída (A_α) 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.

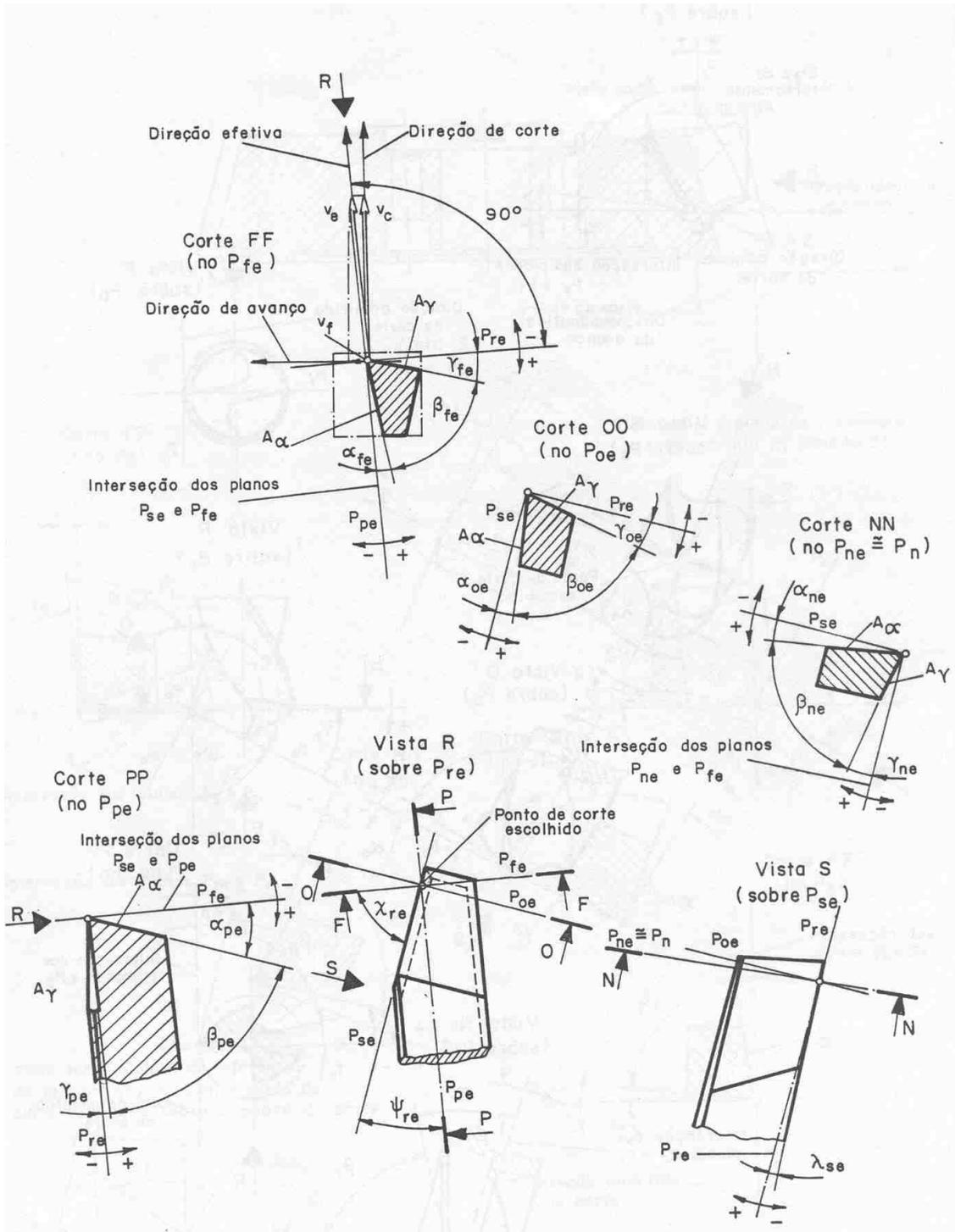


Figura 3.12 - Ângulos efetivos numa ferramenta de torneamento.