

## ÍNDICE

<b>9.2 – AVARIAS E DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE PARA PROCESSOS DE USINAGEM .....</b>	<b>2</b>
8.1 - TIPOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE USINAGEM .....	4
8.2 MECANISMOS DE DESGASTE .....	8
8.3 – FATORES QUE INFLUENCIAM NA VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE.....	10
8.4 – CURVAS DE VIDA DE UMA FERRAMENTA DE CORTE .....	12

## **8 – AVARIAS E DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE PARA PROCESSOS DE USINAGEM**

Os principais objetivos almejados na fabricação de produtos usinados são a qualidade dos mesmos, acabamento superficial e precisão dimensional que atendam tolerâncias pré-estabelecidas e expectativas dos clientes, e a alta produtividade com baixo custo. Porém, tais exigências são dependentes da fenomenologia presente no processo de usinagem. A formação de cavacos se dá por intensivo cisalhamento e deslizamento sobre a ferramenta, produzindo altas tensões e temperaturas elevadas. Quando a velocidade de corte é aumentada, há um conseqüente crescimento na temperatura e mudanças no fenômeno tribológico do escorregamento para a aderência na interface cavaco-ferramenta. Temperaturas relativamente altas geradas na interface aumentam a atividade atômica e isto favorece o fenômeno da aderência entre os materiais do cavaco e da ferramenta. Pode constituir uma fase sólida soldada entre as ligações atômicas das superfícies metálicas.

Todo esse processo dá origem a uma série de fenômenos que culminam com o desgaste da aresta (ou gume) de corte. Embora seja um fato inevitável, seu estudo pode levar a entender os fenômenos envolvidos e, conseqüentemente a um maior controle sobre o desgaste, uma vez que está diretamente ligado ao desempenho do processo de usinagem como um todo. O desgaste acelerado leva a interrupções para troca de aresta, além de aumentar o custo pelo maior consumo de ferramentas. Portanto, o desgaste das ferramentas deve, sempre que possível, ser controlado para um bom planejamento e alta produtividade do processo.

Em muitos casos a ferramenta não se desgasta, mas antes sofre avarias, as quais demandam a sua substituição imediata. Nestes casos, o controle não é possível, uma vez que uma avaria é algo evitável e cujo aparecimento é imprevisível. Como avarias tem-se:

- Fratura de toda, ou parte, da aresta de corte (Figura 8.1);
- Trincas de origem térmica ou mecânica (Figura 8.2);
- Deformação plástica da aresta (Figura 8.3).

Essas avarias se originam de práticas inadequadas e devem ser eliminadas antes de se estudar o desgaste das ferramentas.

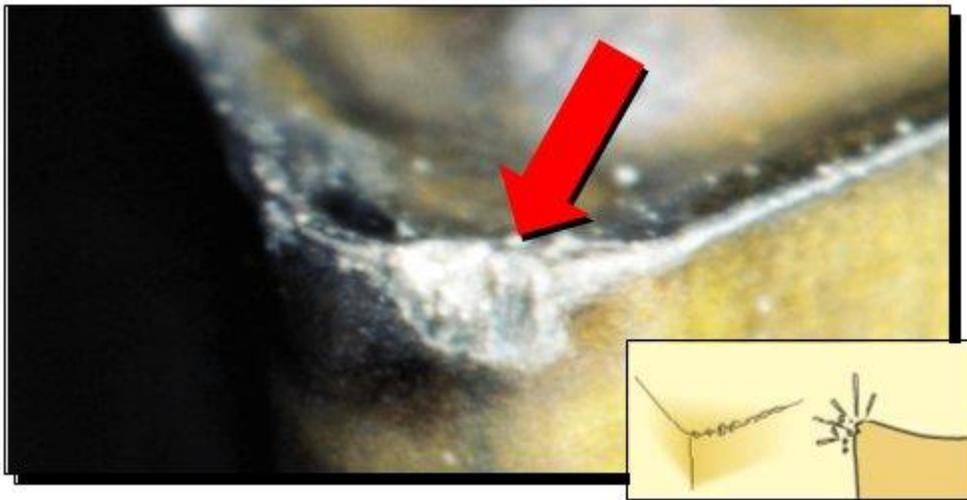


Figura 8.1 – Exemplo de fratura da aresta de corte.

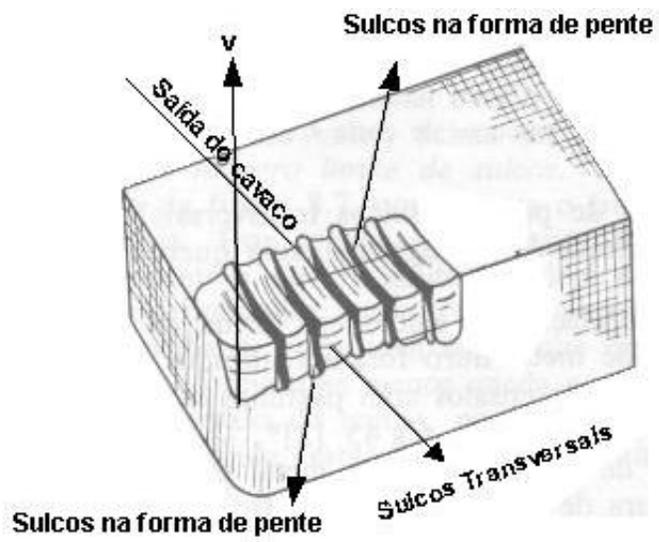


Figura 8.2 – Ilustração de trincas de origem térmica ou mecânica.

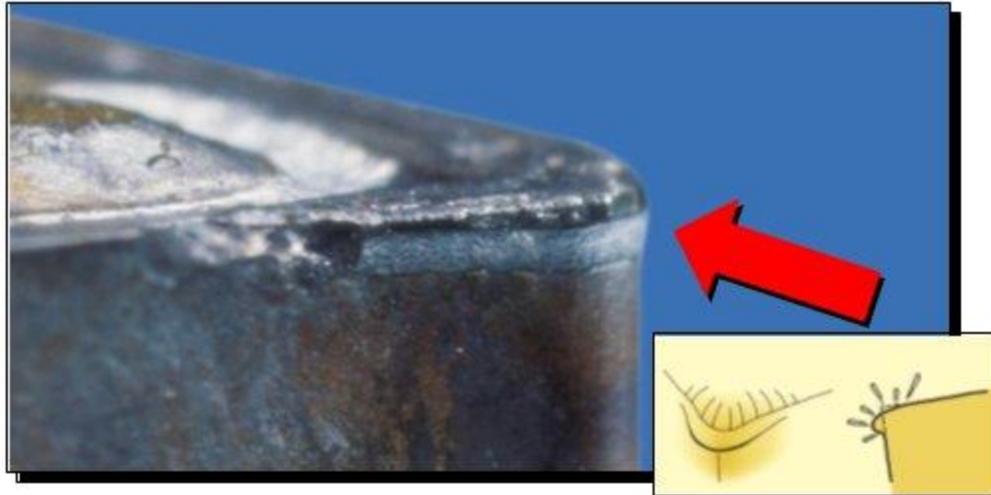


Figura 8.3 – Exemplo de deformação plástica na aresta de corte.

### **8.1 - Tipos de desgaste em ferramentas de usinagem**

Os desgastes da ferramenta de corte são basicamente de três tipos: desgaste de flanco; desgaste de cratera; e desgaste de entalhe. A Figura 8.4 mostra um exemplo de desgaste de flanco.

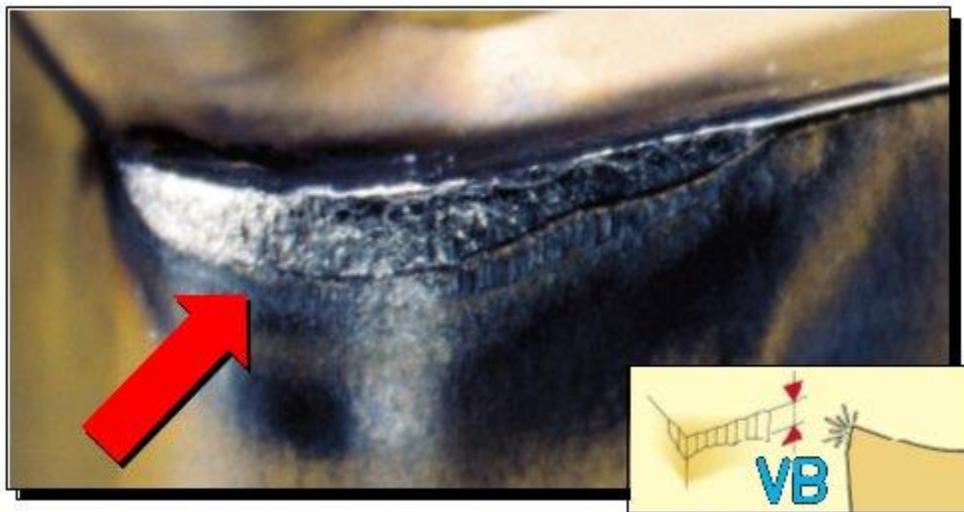


Figura 8.4 – Exemplo de desgaste de flanco (SANDVIK, 2000).

Da mesma forma a Figura 8.5 mostra um exemplo e desgaste de cratera.



Figura 8.5 – Exemplo de desgaste de cratera (SANDVIK, 2000).

A Figura 8.6 mostra um exemplo de desgaste de sulco.

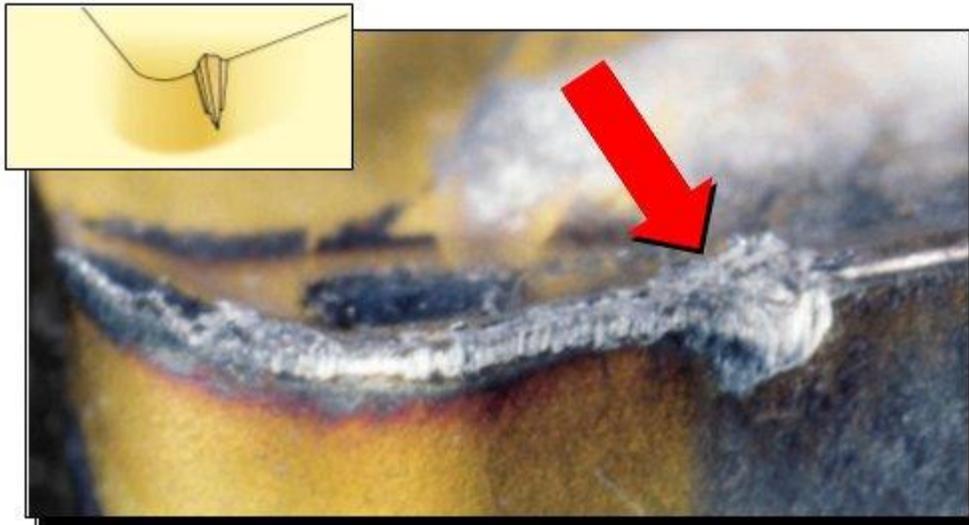


Figura 8.6 – Exemplo de desgaste de sulco (SANDVIK, 2000).

O fenômeno da aresta postiça de corte (APC) pode também ser classificado como um tipo de desgaste, quando está associado a uma aderência contínua de material à aresta de corte. Com essa aderência a geometria da aresta de corte se modifica, geralmente aumentando o ângulo de saída. Uma vez que essa aresta postiça é obtida pela adesão de

camadas muito recalçadas de material da peça sobre a aresta de corte, sua dureza e aderência são muito grandes. Conforme essa nova geometria se pronuncia torna-se também instável e há sua ruptura, provocando um “arrancamento” de partículas da superfície da aresta. Este fenômeno se repete ciclicamente e conduz a um desgaste acelerado na ferramenta. A APC é observada somente em velocidades muito baixas, ou quando se usinam materiais de baixo ponto de fusão com ferramentas de diamante em cortes contínuos. A Figura 8.7 mostra um exemplo de APC observada em ferramentas de torneamento.



Figura 8.7 – Exemplo de Aresta Postiça de Corte - APC

Para melhor caracterizar o desgaste de uma aresta de corte pode-se medir esses desgastes segundo uma convenção normalizada, a qual é mostrada esquematicamente na Figura 8.8.

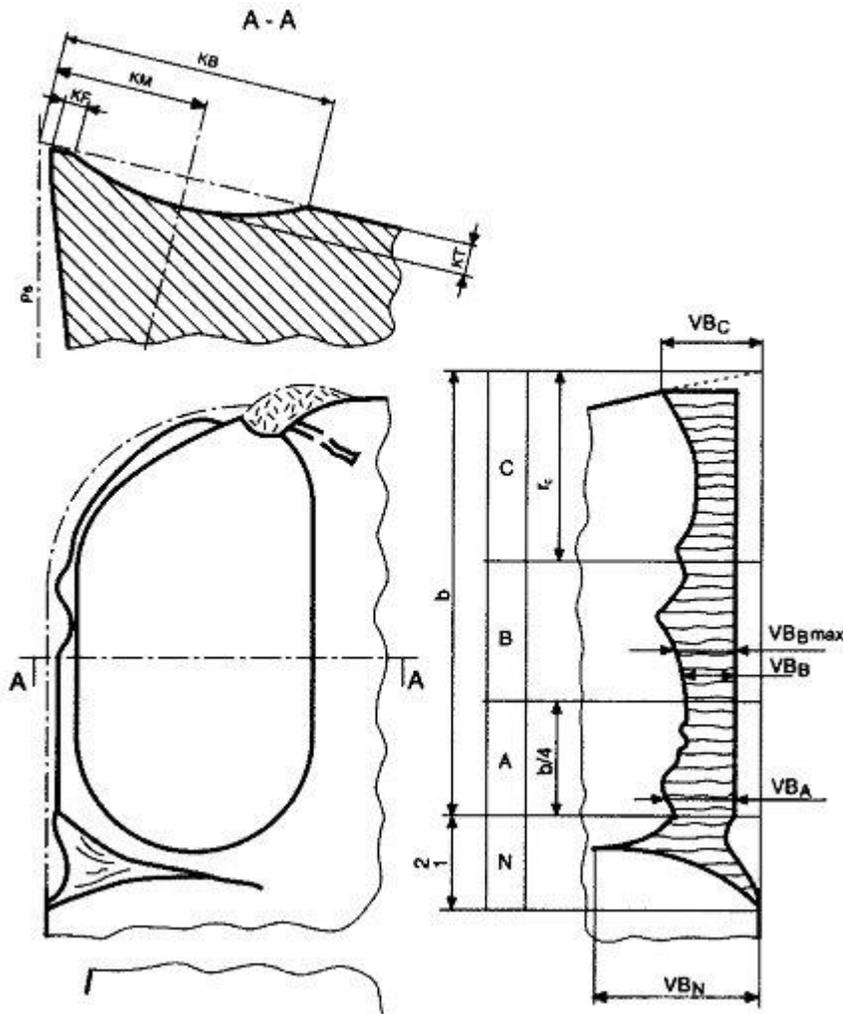


Figura 8.8 – Esquemas de medição de desgastes na aresta de corte de uma ferramenta (ISO, 1993).

Convencionou-se medir os desgastes no plano de corte da ferramenta. Na superfície de saída têm-se os desgastes: profundidade de cratera (KT), largura da cratera (KB) e distância do centro da cratera à aresta de corte (KM). Na superfície de folga mede-se a largura do desgaste de flanco ( $VB_B$ ), que é um valor médio do desgaste na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco ( $V_{Bmax}$ ). Mede-se ainda o valor dos desgastes gerados na superfície de folga pelos entalhes ( $VB_N$  e  $VB_C$ ). Antes que um desses desgastes atinja grandes proporções, de maneira a colocar a estabilidade do processo de corte em risco, a ferramenta deverá ser re-afiada ou a aresta substituída, no

caso de insertos intercambiáveis. Tais desgastes se desenvolvem através de vários mecanismos de desgaste, descritos a seguir.

## **8.2 Mecanismos de desgaste**

Não existe um consenso da literatura em relação à classificação dos mecanismos de desgaste. Segundo alguns autores, existem pelo menos seis diferentes processos de desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte: deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas; deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão; desgaste difusivo; desgaste por aderência e arrastamento; desgaste abrasivo; e desgaste de entalhe. Este último não é propriamente um mecanismo, mas sim um tipo de desgaste conforme mencionado anteriormente. Isto porque não se sabe com exatidão o mecanismo que o provoca. Portanto, é comum tratar este tipo de desgaste como um mecanismo (ISO, 1993; MACHADO e SILVA, 1999). Diniz et al. (1999), no entanto, citam como fenômenos causadores dos desgastes da ferramenta: a aresta postiça de corte (APC); a abrasão mecânica; a aderência; a difusão; e a oxidação. Apresentam-se a seguir vários mecanismos destacados pela literatura na seguinte ordem: difusão, aderência, abrasão, oxidação e fadiga.

- **Difusão:** É um mecanismo que envolve a transferência de átomos de um material para outro. É fortemente dependente da temperatura, da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de cisalhamento secundária e da duração de contato. Em usinagem, as velocidades relativas entre ferramenta-peça ou ferramenta-cavaco são altas e o tempo de contato entre esses materiais é muito pequeno, a difusão torna-se praticamente desprezível. Este mecanismo de desgaste poderá atuar tanto na superfície de saída como na superfície de folga. A taxa de desgaste aumenta com o aumento da velocidade de corte e do avanço. Segundo alguns autores, a difusão é responsável principalmente pelo desgaste de cratera (Figura 8.5) em altas velocidades de corte, pois é na superfície de saída da ferramenta que se tem as condições necessárias para a difusão, isto é, alta temperatura, devido às altas velocidades e à zona de aderência, e tempo de contato cavaco-ferramenta, devido a velocidade de saída do cavaco ser zero na zona de aderência.

- **Aderência:** Este mecanismo ocorre, geralmente, a baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. A APC (Figura 8.7) pode aparecer, e o contato com a ferramenta se torna menos contínuo. Sob estas condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface. Em geral, a zona de escorregamento, o corte interrompido, a profundidade de usinagem irregular ou a falta de rigidez promovem o fluxo irregular de material e, portanto, o mecanismo de desgaste por aderência. No microscópio, as áreas desgastadas por aderência têm uma aparência áspera. Portanto, a utilização adequada de fluido de corte, principalmente com efeito lubrificante, e o recobrimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito, como o nitreto de titânio, tem grande influência na diminuição deste tipo de desgaste.
- **Abrasão:** Este mecanismo envolve a perda de material por microsulcamento ou microcorte, causado por partículas de elevada dureza relativa e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta. Assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior sua resistência ao mecanismo de desgaste por abrasão. Estas partículas, carbonetos e carbonitretos, podem estar contidas no material da peça ou, principalmente, ser partículas da própria ferramenta que são arrancadas pelo mecanismo de desgaste por aderência, por exemplo. Este mecanismo de desgaste é muito importante na usinagem com pastilhas revestidas, cerâmicas puras e cerâmicas mistas. Tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém ela se faz mais proeminente no desgaste de flanco (Figura 8.4), já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido que é a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com um elemento flexível que é o cavaco.
- **Oxidação:** Altas temperaturas e a presença de ar e água, contida nos fluidos de corte, geram oxidação para a maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto, durante o corte, formam filmes de óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente levados embora pelo atrito, gerando desgaste. Porém, alguns óxidos como o óxido de alumínio, são mais duros e resistentes. Assim, alguns materiais de ferramenta, que

não contém óxido de alumínio, desgastam-se mais facilmente por oxidação. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe, ou sulco, Figura 8.6.

- **Fadiga:** A Fadiga ocorre principalmente no corte interrompido, como no fresamento, onde várias trincas pequenas podem ser observadas na ferramenta. Estas trincas são causadas pela alternância da expansão e da contração das camadas superficiais da ferramenta, quando estão aquecidas durante o corte e refrigeradas pela condução para dentro do corpo da ferramenta durante os intervalos entre os cortes. As trincas são normalmente iniciadas na posição mais quente sobre a superfície de saída, a alguma distância da aresta, então se propaga através da aresta e desce no flanco. Dentes de fresa de carboneto freqüentemente mostram várias trincas após o uso, mas elas parecem fazer relativamente pouca diferença à vida da ferramenta na maioria dos casos. Se as trincas tornarem-se muito numerosas, elas podem se juntar e causar quebras de pequenos fragmentos da aresta de corte. Elas podem agir também como elevadores de tensão através da qual a fratura pode ser iniciada de outras causas. É comum em ferramentas de metal duro.

### ***8.3 – Fatores que influenciam na vida da ferramenta de corte***

O tempo em que uma aresta de corte trabalha efetivamente antes de ser re-afiada ou substituída é denominado de “vida da ferramenta de corte”, simbolizada por  $T$ . Um critério deve ser usado então para determinar o fim de vida da ferramenta, de maneira a manter o processo produtivo dentro de condições econômicas adequadas. Este pode ser o desgaste máximo, um valor limite para o acabamento superficial, uma dimensão da peça usinada, etc. A ferramenta é então mantida na máquina até que este valor limite seja atingido, sendo substituída. Um critério universal para estabelecimento de fim de vida de ferramentas em processos de usinagem é ainda um assunto muito discutido, porém, sem uma aparente definição a curto e médio prazo. Para o caso de um desgaste máximo, a

ISSO o *International Standard Organization*, sugeriu um padrão medição do desgaste da ferramenta na ISO 3685 de 1977, cuja segunda edição foi publicada em 1993.

Sabe-se que quando a temperatura aumenta, a vida da ferramenta diminui; a relação da vida da ferramenta e temperatura é a seguinte:

$$\theta \cdot T^n = C_3 \quad (8.1)$$

onde  $\theta$  é a temperatura de corte;  $n$  e  $C_3$  são constantes para a combinação ferramenta-peça. Tipicamente, o expoente  $n$  nesta relação está entre 0,05 e 0,1.

Uma diminuição do ângulo de posição ( $\chi_r$ ) para mesmo avanço e mesma profundidade de usinagem, acarreta uma diminuição da espessura de corte ( $h$ ) segundo a relação:

$$h = f \cdot \text{sen } \chi_r \quad (8.2),$$

e ao mesmo tempo um aumento da largura de corte ( $b$ ), uma vez que:

$$b = \frac{a_p}{\text{sen } \chi_r} \quad (8.3).$$

Esta variação de  $\chi_r$  permite maior vida da ferramenta, pois resulta numa melhor distribuição da temperatura de corte num trecho da ferramenta.

Quanto maior o ângulo de saída ( $\gamma$ ), menor a deformação do cavaco e menor a temperatura, a pressão específica de corte e o desgaste da ferramenta. Na usinagem de materiais com cavacos curtos, onde a influência do ângulo de saída na temperatura e na pressão específica de corte é pequena, é recomendável o uso de ângulos de saída negativos. Mesmo no corte de materiais que formam cavacos longos, onde a obtenção de baixa força de corte não é prioritária, recomenda-se a utilização de ferramentas com geometrias negativas para fortalecer a aresta de corte, já que a influência do ângulo de saída na vida da ferramenta não é muito pronunciada. Somente em operações que formam cavacos longos e onde se necessita baixas forças de corte, como operações em máquinas de baixa potência, torneamento interno ou quando a peça não é muito rígida é que se recomenda a utilização de ferramentas com ângulos de saída positivos.

O crescimento do ângulo de folga ( $\alpha$ ) diminui o desgaste de flanco, porque reduz a área de atrito entre a ferramenta e a peça. Por outro lado, seu crescimento também enfraquece a cunha de corte.

Dentre os parâmetros de corte o que mais influencia o desgaste é velocidade de corte seguida pelo avanço e pela profundidade de usinagem. A velocidade de corte é a principal responsável pela temperatura na região de formação de cavacos. Isso se deve ao fato de aumentar diretamente a potência de corte, a velocidade de cisalhamento, além de aumentar a velocidade relativa na interface cavaco-ferramenta. Esses fatores culminam com um acentuado aumento na temperatura. O aumento do avanço produz efeitos semelhantes, porém em proporções menores, da mesma forma que a profundidade de usinagem. Por essas razões, a velocidade de corte é principal responsável pela ocorrência e modificações nos mecanismos de desgaste. A Figura 8.9 mostra, esquematicamente, como os mecanismos de desgaste atuam, em função da velocidade de corte no processo.

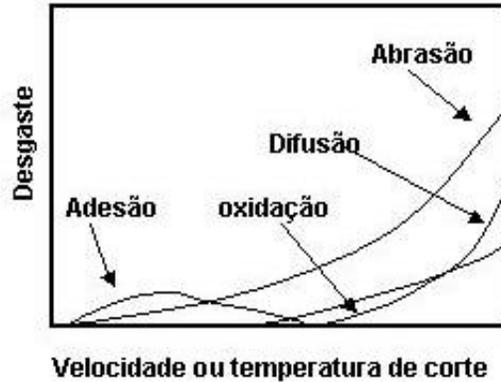


Figura 8.9 – Esquema de como a velocidade de corte afeta os mecanismos principais de desgaste em uma ferramenta.

#### **8.4 – Curvas de vida de uma ferramenta de corte**

Dentre os diversos parâmetros de usinagem que afetam o desgaste de uma ferramenta e, conseqüentemente, sua vida todos podem ser otimizados para que a operação propicie o máximo rendimento possível. As melhores e mais modernas máquinas-ferramentas e ferramentas de corte devem ser usadas, para obter-se a maior produtividade possível. Quando esses fatores já são otimizados, surge então a necessidade de se otimizar as condições de corte, através dos parâmetros velocidade de corte,  $v$ , avanço,  $f$ , e profundidade de usinagem,  $a_p$ . Para os processos de torneamento

esses são suficientes, mas para o caso de fresamento há ainda a largura de usinagem  $a_e$  e nos casos de retificação as complicações são ainda maiores. Felizmente, nem todos esses parâmetros podem ser modificados, ou alguns deles nem são tão importantes. Há casos, por exemplo, em que a profundidade de usinagem é o sobremetal deixado para a operação de acabamento e, portanto, não se pode modificá-lo, para uma eventual otimização da vida da ferramenta. O avanço, por outro lado está intimamente ligado ao acabamento superficial, uma vez que é o principal responsável pela textura deixada na superfície usinada. A Figura 8.10 mostra duas situações onde o avanço é modificado, para uma mesma ferramenta.

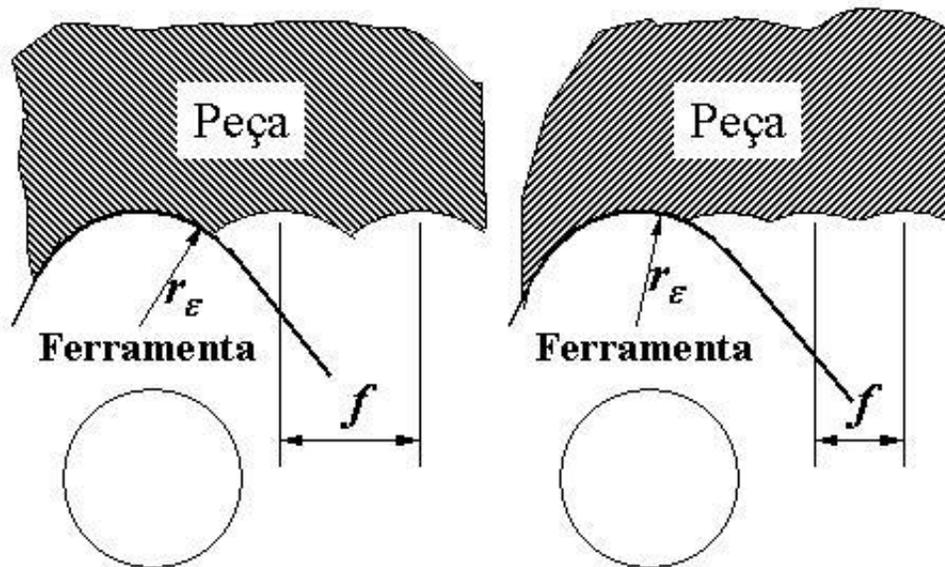


Figura 8.10 – Efeito da modificação do avanço no acabamento superficial da peça.

Nota-se que avanços maiores os picos deixados pela ferramenta são altos, levando a uma superfície mais rugosa. Há parâmetros de rugosidade que avaliam essas diferenças numericamente, os quais não serão aqui abordados. Um desses parâmetros, no entanto é altura dos picos, a qual pode ser teoricamente calculada. Esse parâmetro é chamado de rugosidade  $R_{max}$  e, seu valor teórico é dado pela equação:

$$R_{max} = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (8.4)$$

onde  $r_\epsilon$  é o raio da ponta da ferramenta. Sendo assim, o avanço é diretamente responsável pelo acabamento superficial e, em operações de acabamento não há muito espaço para modificá-lo. Quando houver, estes devem ser maximizados para que o volume removido seja máximo no menor tempo de usinagem possível. O limitante para estes casos, geralmente em operações de desbaste, deverá ser a potência da máquina, diretamente proporcional a ambos e, ainda a resistência mecânica da aresta de corte.

No processo de maximização do avanço e da profundidade de usinagem, não se nota modificação significativa na vida da ferramenta. A Figura 8.11 mostra três experiências onde se modificaram a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem, avaliando-se a influência de cada um no desgaste da aresta de corte.

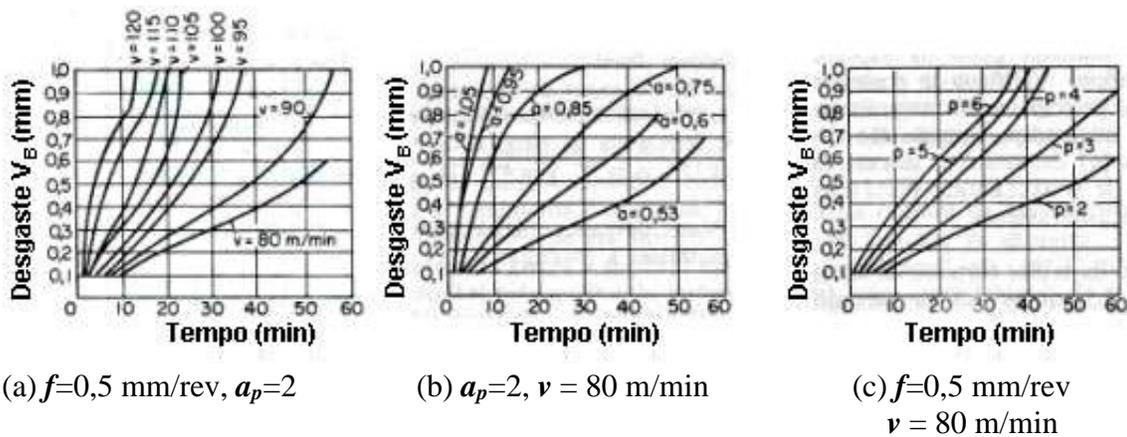


Figura 8.11 – Influência da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de usinagem no desgaste de uma ferramenta torneando aço ABNT 1045. Ferramenta P30,  $\gamma=5^\circ$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $\chi=45^\circ$ ,  $r_\epsilon=0,5$ .

Nota-se que o parâmetro de maior influência no desgaste da ferramenta é a velocidade de corte. Desta forma, a curva de vida de uma ferramenta é expressa em termos da velocidade de corte. Define-se a *curva de vida* de uma ferramenta como sendo o gráfico de tempo de vida em função da velocidade de corte. Foi primeiramente proposta por F.W. Taylor no início do século XX. O pesquisador observou que o tempo de vida de uma ferramenta de corte em usinagem mantém uma relação direta com a velocidade de corte. A obtenção dessa relação é experimental e depende do par ferramenta-peça com valores fixos de avanço e de profundidade de usinagem. Inicia-se a obtenção da curva

com um ensaio onde são fixados esses parâmetros, sendo a velocidade de corte a única variável. A faixa e o número de valores diferentes de  $v$  devem ser escolhidos, inicialmente, de acordo com experiências anteriores ou na tentativa-e-erro. As curvas obtidas são chamadas *curvas de desgaste* e fornecem o desgaste da ferramenta em função do tempo. O desgaste medido, segundo a normalização mostrada na Figura 8.8, deve ser o que melhor caracteriza a vida da ferramenta, segundo o critério adotado. A Figura 8.12 mostra um exemplo de uma curva de desgaste obtida para um processo de torneamento com insertos de carbetos.

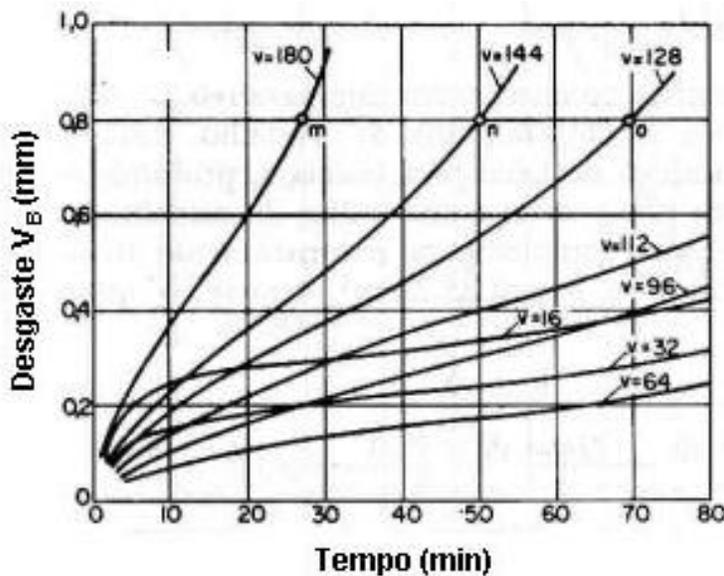


Figura 8.12 – Exemplo de curva de desgaste obtida para o torneamento de aço com ferramentas de carbetos.

Com as curvas de desgaste deve-se estabelecer um valor limite de desgaste, o qual definirá o tempo de vida da aresta de corte. Para o exemplo da Figura 8.12 adotou-se  $V_B=0,8$  mm. Com esse limite de desgaste de flanco, observa-se que o tempo de vida varia para cada velocidade de corte utilizada. Para a velocidade  $v=180$  m/min o tempo de vida foi de 28 min. (ponto *m* no gráfico da Figura 8.12). Para  $v=144$  m/min. A vida foi de 50 min (ponto *n* na Figura 8.12) e para  $v=128$  m/min a vida foi de 70 min (ponto *o* na Figura 8.12). Com esses valores constrói-se a *curva de vida da ferramenta*,  $T-v$ , com os pares

tempo de vida,  $T$  e velocidade correspondente  $v$ . A Figura 8.13 mostra a curva de vida para o exemplo acima.

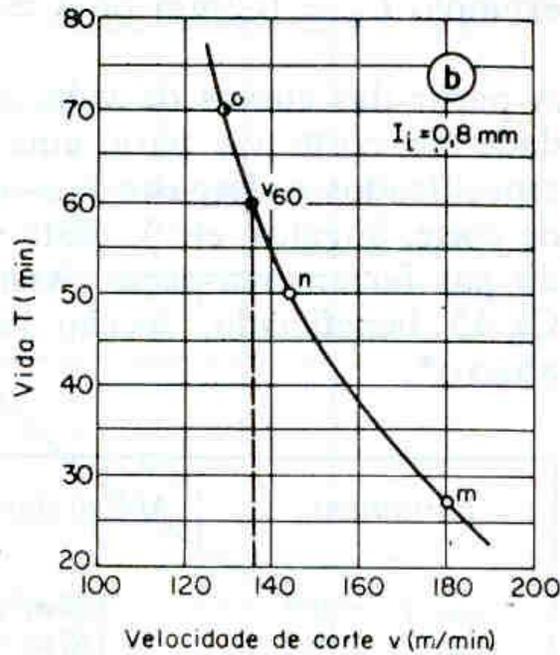


Figura 8.13 – Curva de vida para o exemplo de usinagem de aço com ferramenta de carbeto.

A curva da Figura 8.13 foi construída para o desgaste de flanco, mas curvas semelhantes podem ser usadas para qualquer outro tipo de desgaste, ou critério de fim de vida estipulado, que tenha a velocidade de corte como fator determinante. O desgaste também pode ser medido em função do percurso de corte,  $L$ , ao invés do tempo. Isso pode ser particularmente interessante para o caso de usinagem em série, onde os lotes de peças são muito grandes e o tempo de corte muito curto. A curva, neste caso  $L-v$ , aponta claramente a velocidade onde se consegue o maior número de peças. Este ponto, no entanto, não garante a maior produtividade, uma vez que o tempo de produção do lote pode ser mais importante que a duração da ferramenta. Estes pontos serão analisados no capítulo de condições econômicas de usinagem. Na Figura 8.13 também é mostrada a velocidade para um tempo de corte equivalente a 60 minutos, normalmente referida como  $v_{60}$ . Este foi durante muito tempo, um valor de referência para comparação entre desempenho de materiais, ou de ferramenta.

Se a curva de vida for colocada em um gráfico dilogarítmico terá uma representação muito próxima da linear, o que indica uma relação exponencial entre  $L$  e  $v$ . Este fato foi proposto inicialmente por F.W. Taylor, o qual propôs a equação com seu nome:

$$T = K.v^{-x} \quad (8.5)$$

onde o expoente  $x$  e a constante  $K$  são particulares para cada par ferramenta-peça e demais condições de corte, valores de  $f$ ,  $a_p$ , fluido de corte, etc. Muitas vezes é mais conveniente expressar-se a relação T-v na forma inversa à da Equação (8.5), como sendo:

$$v.T^y = C \quad (8.6)$$

nesta transformação pode-se chegar as seguintes relações entre as constantes das Equações (8.5) e (8.6):

$$y = \frac{1}{x} \quad e \quad C = K^{\frac{1}{x}} \quad (8.7)$$

A Tabela 8.1 mostra, como exemplo, alguns valores para as constantes C e y obtidos experimentalmente para alguns pares ferramenta-peça.

Tabela 8.1 – Exemplos de valores para as constantes C e y da equação de Taylor

Material ABNT	Composição	Ferramenta de carbetto $V_B = 0,38 \text{ mm}$ $f.a_p = 0,645 \text{ mm}^2$		Ferramenta de aço rápido $V_B = 1,5 \text{ mm}$ $f.a_p = 0,36 \text{ mm}^2$ com fluido de corte	
		C	y	C	y
B1112	10% perlita + 0,1% S	281	0,222	62	0,167
1020	10% perlita + 90% ferrita	244	0,282	58	0,152
3140	75% perlita + 25% Ferrita	111	0,324	23	0,282
	Temperado HB=300 Martensita + 0,1% S	93	0,282	32	0,032
	75% perlita+ 25% ferrita + 0,1% S	-	-	37	0,096
4140	90% perlita+10% ferrita	107	0,288	23	0,270
	90% perlita+10% ferrita +0,1% S	122	0,270	34	0,174
	Temperado HB=300 martensita	92	0,280	18	0,247
	Temperado HB=300 Martensita +0,1% S	95	0,280	25	0,072
4340	Esferoidal	146	0,242	-	-

	Temperado HB=400 Martensita	73	0,322	-	-
8640	50% perlita + 50% ferrita	119	0,278	40	0,080
	75% ferrita + 25% Ferrita	116	0,323	27,5	0,211
	Esferoidal	153	0,323	45	0,179
	Temperado HB=400 Martensita	50	0,475	15	0,169
	Temperado HB=400 Martensita + 0,51% S	-	-	30	0,044
52100	ESferoidal	107	0,345	35	0,150
<b>Médias</b>		<b>127</b>	<b>0,3</b>	<b>34</b>	<b>0,15</b>

A Tabela 8.2 mostra ainda outros exemplos das constantes  $C$  e  $y$  para FoFo com diferentes durezas e microestruturas.

Tabela 8.2 – Valores de  $C$  e  $y$  para FoFo com diferentes. Ferramenta de carbetto,  $V_B=0,76$  mm,  $f, a_p=0,645$  mm

Material	Dureza (HB)	Ductilidade (%)	$C$	$y$
FoFo nodular	170	22	210	0,232
	183	20	147	0,232
	207	17	110	0,232
	215	4	95	0,187
	216	2	65	0,232
<b>Médias</b>			<b>125</b>	<b>0,223</b>
FoFo cinzento		Estrutura	$C$	$y$
	100	Ferrítica	238	0,095
	195	Perlítica Grosseira	100	0,250
	225	Perlítica fina	80	0,275
	263	Acicular	45	0,420
<b>Médias</b>			<b>116</b>	<b>0,259</b>

A fórmula de Taylor, Equações (8.5) e (8.6), é aplicada especificamente à usinagem de um determinado par ferramenta-peça para o qual os parâmetros  $C$  e  $y$  são calculados usando-se valores fixos de  $f$  e de  $a_p$ . Mudando-se esses parâmetros os valores das constantes se modificarão e somente novos ensaios poderão determinar essas constantes novamente. No entanto, ensaios foram realizados variando-se a forma da seção de corte, com diferentes valores de  $f$  e de  $a_p$  para diversos materiais. O gráfico da

Figura 8.14 mostra o resultado dos valores de velocidade encontrados para um tempo de vida padrão de 60 minutos ( $v_{60}$ ).

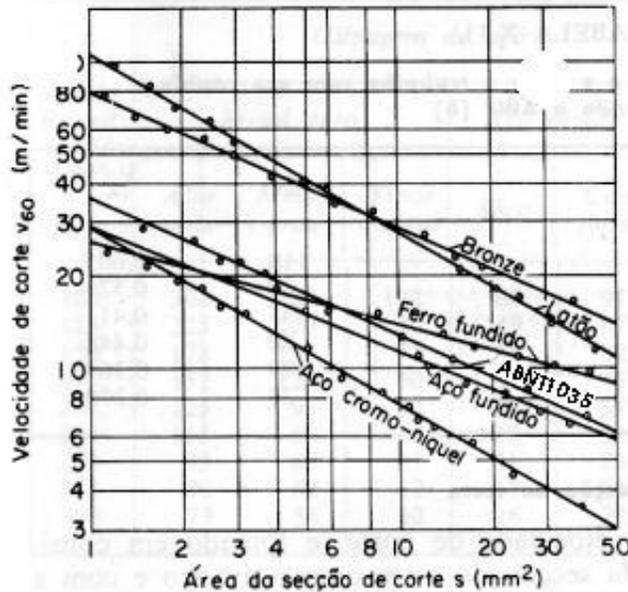


Figura 8.14 – Variação da velocidade de corte para o tempo de 60 minutos em diversos materiais, em função da seção de corte,  $f.a_p$ .

Observou-se que em um dilogarítmico as curvas se ajustavam a uma reta, indicando uma relação exponencial entre a velocidade para um tempo de vida de 60 minutos,  $v_{60}$  e a seção de corte  $S$ . Esta relação foi estabelecida com:

$$v_{60} = \frac{C_v}{S^z} \quad (8.8)$$

Com essa Equação pode-se obter uma nova equação com a de Taylor, porém levando-se em conta a área da seção de corte. Usa-se para isso a Equação (8.6):

$$v.T^y = C = \left( \frac{C_v}{S^z} \right) \cdot 60^y \quad (8.9)$$

re-calculado-se  $v$ :

$$v = \frac{C_v}{s^{\frac{1}{z}} \cdot \left(\frac{T}{60}\right)^y} \quad (8.10)$$

Nesta equação, sabendo-se os valores de  $C_v$ , de  $z$  e de  $y$ , pode-se calcular a velocidade, para um determinado tempo de vida, levando-se em conta a seção de corte. A Tabela 8.3 mostra alguns exemplos dos valores desses coeficientes para vários materiais.

Tabela 8.3 – Valores de  $C_v$  e de  $z$  para diversos materiais, utilizando-se aço rápido e tempo de vida de 60 minutos

Material	$C_v$	$1/z$
Aço ABNT 1035	35	0,41
Aço Ni-Cr	29	0,57
Aço Fundido	29	0,364
FoFo	26	0,278
Bronze	80	0,448
Latão	110	0,605

Observações posteriores concluíram, no entanto, que o avanço e profundidade de corte influenciam diferentemente o desgaste, como pode ser observado na Figura 8.15.

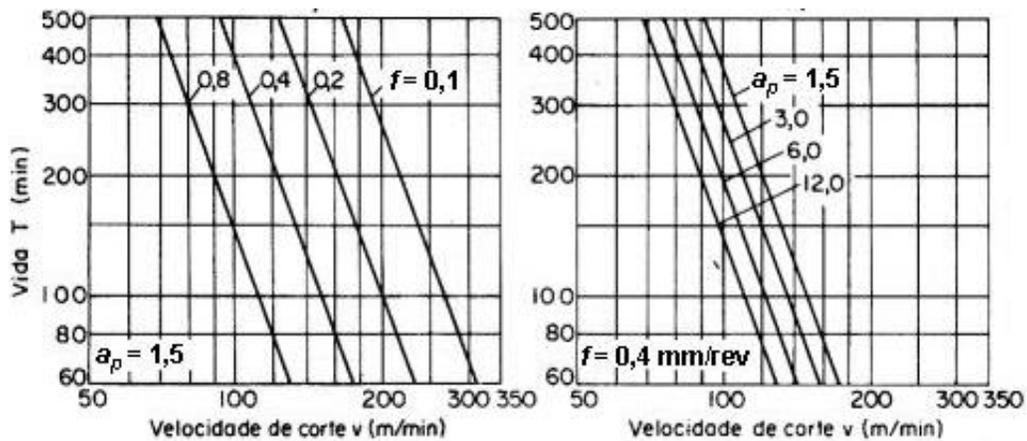


Figura 8.15 – Influência do avanço e da profundidade de usinagem no desgaste da ferramenta. Aço ANBT1020 e ferramenta aço rápido.

Sendo assim uma equação de Taylor mais completa deveria levar em conta os efeitos separados do avanço e da profundidade de corte. Admitindo-se que cada um desses fatores possui uma forma exponencial em relação ao desgaste, a equação fica:

$$v^x \cdot f^y \cdot a_p^z \cdot T = Q \quad (8.11)$$

onde as constantes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $Q$  devem ser fornecidas para materiais diversos porém o mais próximos possíveis daqueles a serem utilizados, quando se pretende uma estimativa de velocidades de corte com relação aos tempos de vida das ferramentas. As Tabelas no APÊNDICE IV mostram esses valores para materiais produzidos no mercado brasileiro e podem ser usados como um indicativo do tempo de vida em função da velocidade de corte. Valores mais precisos, no entanto, só poderão ser obtidos se ensaios específicos forem realizados, uma vez que há muitos parâmetros que podem afetar a precisão dos resultados teóricos. Há que se salientar que a vida de uma ferramenta é bastante dependente das características de seu material, havendo grandes diferenças quando se modificam fornecedores, substratos, coberturas, geometria de aresta, etc.

Para uma melhor aproximação entre os valores teóricos calculados pode-se proceder a uma correção na velocidade de corte, para um determinado tempo de vida, devido às variações de dureza entre o material a ser usinado e aquele usado para os experimentos que determinaram as constantes. A Tabela 8.4 mostra uma dessas tabelas, segundo diversos materiais.

Tabela 8.4 – Fatores de correção para a velocidade de corte em função de variações na dureza do material.

Material	Diferenças de dureza (HB)								
	-80	-60	-40	-20	0	+20	+40	+60	+80
Aços carbono sem liga	-	-	-	1,07	1	0,95	0,90	-	-
Aços carbono baixa liga	1,26	1,18	1,12	1,05	1	0,94	0,91	0,86	0,83
Aços carbono alta liga	-	-	1,21	1,10	1	0,91	0,84	0,79	-
Aços inoxidáveis	-	-	1,21	1,10	1	0,91	0,85	0,79	0,75
Aços fundidos	-	-	1,31	1,13	1	0,87	0,80	0,73	-
FoFo maleável	-	1,14	1,08	1,03	1	0,96	0,92	-	-

FoFo Cinzentos	-	-	1,25	1,10	1	0,92	0,86	0,80	-
FoFo nodulares	-	-	1,07	1,03	1	0,97	0,95	0,93	0,91
Super-ligas (ligas de Ni e Ni-Cr)	1,26	-	1,11	-	1	-	0,90	-	0,82
	Diferenças de dureza (HRc)								
			-6	-3	0	+3	+6	+9	
Aços endurecidos			1,10	1,02	1	0,96	0,93	0,90	

Por último deve-se ainda corrigir a velocidade de corte encontrada, para um determinado tempo de vida, caso o ângulo de posição da ferramenta for diferente daquele utilizado nos ensaios para obtenção das constantes. A Tabela 8.5 mostra os fatores de correção, segundo as Tabelas do APÊNDICE IV, cujos ângulos de posição usados foram todos iguais a 60°.

Tabela 8.5 – Fatores de correção para a velocidade de corte segundo variações no ângulo de posição.

Ângulo de posição	Fator de correção
90°	0,93
75°	0,96
60°	1
45°	1,08
30°	1,12