UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA - NUMA

PROCESSO DE FURAÇÃO

Prof. Dr. REGINALDO T. COELHO
Prof. Dr. ERALDO JANONNE DA SILVA

Março 2018

ÍNDICE

Contents

1 - PROCESSO DE FURAÇÃO 3
2. – BROCAS HELICOIDAIS 3
2.1 - Afiação das brocas helicoidais 12
3 – FORÇA DE CORTE E POTÊNCA NA FURAÇÃO 25
3.1 – Cálculo de força de corte para a furação em cheio 29
3.2 - Cálculo de força de corte para a furação com pré-furação 34
4 – FORÇA DE AVANÇO NA FURAÇÃO 37
4.1 – Cálculo de força de avanço para a furação em cheio 37
4.1 – Cálculo de força de avanço para a furação com pré-furação 38
5. SELEÇÃO DE VELOCIDADE DE CORTE E DE AVANÇO EM FURAÇÃO 39

1 - PROCESSO DE FURAÇÃO

A ferramenta mais empregada pra a produção de furos cilíndricos é a broca helicoidal. Dada à importância do processo na indústria, o emprego racional das brocas helicoidais é indispensável. Desde o seu aparecimento por volta de 1820 até os nossos dias, a sua forma sofreu poucas alterações. Os aperfeiçoamentos das brocas helicoidais não se comparam ao aperfeiçoamento de outras ferramentas de usinagem. Enquanto que as ferramentas de torno, a introdução sucessiva do aço rápido, do metal duro e da cerâmica permitiu aumento considerável do rendimento das operações, nas brocas helicoidais somente os aços rápidos constituíram um progresso real. O emprego de brocas com pastilha de metal duro é limitado e a cerâmica ainda não pode ser usada com sucesso em muitos casos. Recentemente procurou-se estender os limites impostos pelo aço rápido, mediante tratamentos especiais, tais como os revestimentos, a fim de aumentar a resistência ao desgaste.

Apesar de todos os esforços no sentido de aumentar o rendimento na operação de furação, as brocas helicoidais constituem atualmente o gargalo de muitas sequencias de usinagem. Uma das possibilidades que se oferece para melhorar o rendimento de uma operação de furação é a modificação da geometria da broca, assunto este que será abordado à frente.

2. – BROCAS HELICOIDAIS

A terminologia e as características encontram-se na norma editada pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas e as partes mais importantes estão na Figgura 2.1.

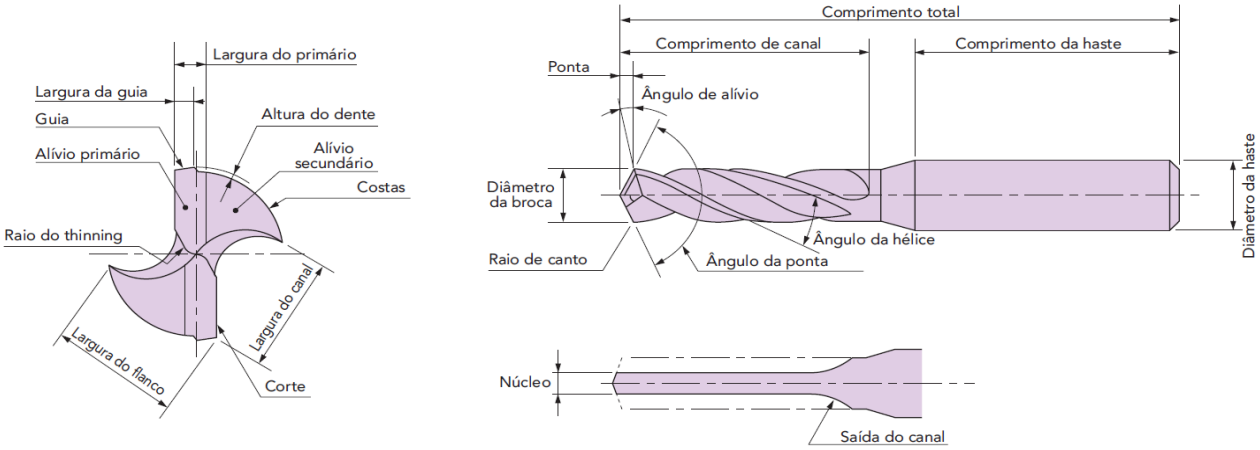
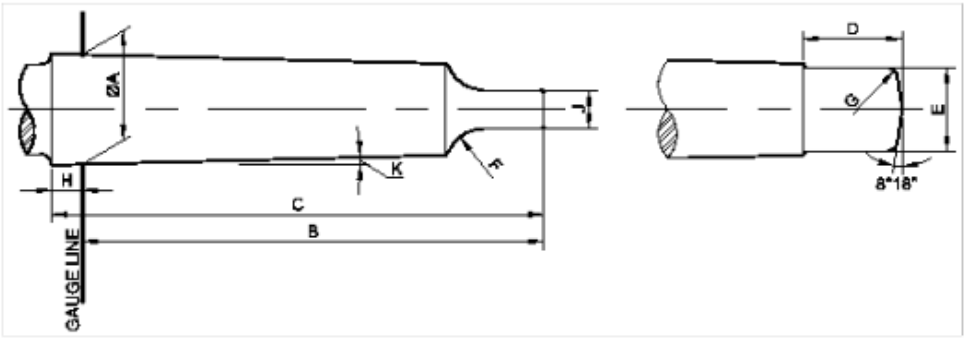


Figura 2.1 – Principais termos usados para brocas helicoidais

A haste destina-se a fixação da broca na máquina e a cilíndrica é preferida para brocas de pequeno diâmetro. As brocas de haste cilíndricas são normalizadas até ϕ = 20mm. No entanto, para brocas com diâmetros superiores a ϕ=15mm, prefere-se a haste cônica, que permite uma fixação mais segura da broca. As brocas com haste cônica são normalizadas a partir do diâmetro ϕ = 30mm até ϕ = 100mm. As hastes cônicas são construídas em 6 tamanhos, conforme a Tabela 2.1, a qual também contém o tamanho do cone Morse, associado a cada diâmetro da broca.

Tabela 2.1 – Dimensões para Cones Morse em mm



Cone Morse	Taper	A	B (max)	C (max)	D (max)	E(max)	F	G	H	J	K
0	19.212:1	9.045	56.5	59.5	10.5	6.0	4	1	3	3.9	1°29'27"
1	20.047:1	12.065	62	65.5	13.5	8.7	5	1.2	3.5	5.2	1°25'43"
2	20.020:1	17.780	75	80	16.0	13.5	6	1.6	5	6.3	1°25'50"
3	19.922:1	23.825	94	99	20.0	18.5	7	2	5	7.9	1°26'16"
4	19.254:1	31.267	117.5	124	24.0	24.5	8	2.5	6.5	11.9	1°29'15"
5	19.002:1	44.399	149.5	156	29.0	35.7	10	3	6.5	15.9	1°30'26"
6	19.180:1	63.348	210	218	40.0	51.0	13	4	8	19	1°29'36"
7	19.231:1	83.058	285.75	294.1	34.9	-	-	19.05	-	19	1°29'22"

Os eixos árvores das furadeiras geralmente apresentam um cone Morse 3 ou 4. Para fixar as brocas de diferentes diâmetros à furadeira, empregam-se as buchas de redução. Assim tem-se buchas de redução para cone Morse 4: 3, 4: 2, 3:2 etc.

O diâmetro ***D*** da broca é medido entre as duas guias, sendo a tolerância de fabricação ***h8***. O diâmetro do núcleo, ou alma da broca, é da ordem de ***0,16D*** e confere a rigidez necessária a broca. Em casos especiais empregam-se brocas com núcleo reforçado. As guias têm a função de guiar a broca no furo, sendo sua largura é. No Brasil são fabricadas brocas com diâmetros em milímetros e polegadas. As brocas com canais de lubrificação destinam-se especialmente a furação profunda, onde a remoção do cavaco é problemática. Essas brocas possuem dois canais internos de lubrificação, que começam junto a haste e desembocam nas duas superfícies de folga da broca. Desta forma garante-se a chegada do fluido à ponta da broca, injetando-o sob pressão nos canais da broca. O fluido retorna pelos canais helicoidais, arrastando o cavaco. Quando a broca permanece parada e a peça gira, como

acontece na furação em tornos, a alimentação do fluido pode ser feita de maneira indicada na Figura 2.2.

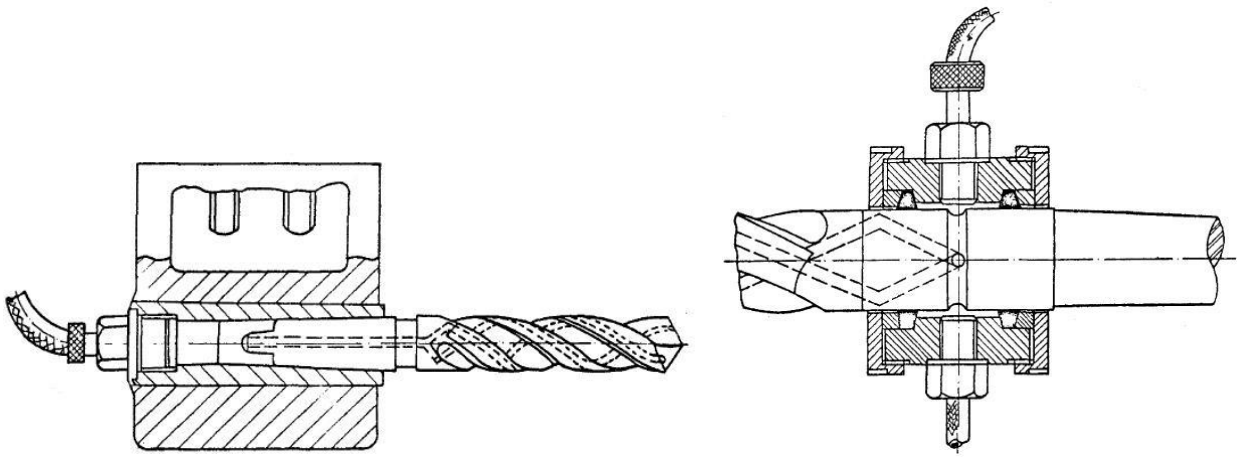


Figura 2.2 – Exemplos de brocas helicoidais com canais internos de refrigeração.

Na produção seriada empregam-se com vantagens as brocas escalonadas, conforme mostrado na Figura 2.3.

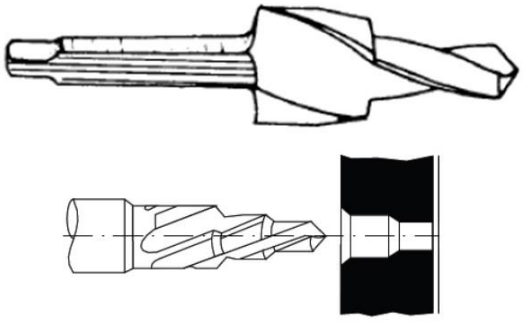


Figura 2.3 – Exemplo de broca helicoidal escalonada.

Dependendo do número de degraus, da relação entre os diâmetros e do comprimento de cada degrau, empregam-se diferentes tipos de construções. A construção mais simples é a broca escalonada com dois canais helicoidais, semelhante à broca helicoidal. Pode apresentar um ou mais degraus. O diâmetro do núcleo do degrau próximo a ponta deve ser menor que o menos diâmetro a ser furado. Por outro lado, o diâmetro do núcleo deve ser suficiente para garantir a resistência da broca, conforme ilustrado na Figura 2.4, em uma seção de uma broca helicoidal.

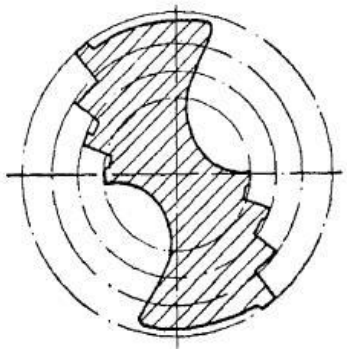


Figura 2.4 – Exemplo de uma seção transversal de uma broca helicoidal.

A grande maioria das brocas é feita de aço rápido, especialmente o tipo 18-4-1(18%W, 4%Cr e 1%V), ou ainda de VWM 2 (2%V, 6%W, 5%Mo, 4%Cr). As brocas com insertos e corpo de aço carbono, usam geralmente Metal Duro classes K10 e K20, ou P20 e P30 para furação em aço. Além desses materiais emprega-se ainda aços ferramenta com alto teor de carbono, para aplicações em madeira.

Fresamento é o processo mais antigo e ainda muito difundido para fabricação de brocas helicoidais, especialmente em brocas de grande diâmetro, fresando os canais helicoidais com fresas de forma. A ponta e as guias são afiadas com rebolos após o tratamento térmico, assim como o diâmetro externo da broca. Retificação é o processo geralmente mais empregado para a fabricação de brocas de pequeno diâmetro abrindo-se inclusive os canais helicoidais com rebolos além da afiação. Laminação também pode ser usada para a fabricação em série de brocas de pequeno diâmetro. Os tarugos são aquecidos por indução e, em seguida, são forçados através de um laminador especial que confere ao tarugo forma dos canais helicoidais da broca.

A broca como qualquer ferramenta de usinagem, apresenta os ângulos bem e de particular importância são os ângulos medidos no plano de trabalho e no plano de medida. Nas brocas helicoidais o plano de trabalho é tangente a superfície cilíndrica da broca e passa pela extremidade da aresta cortante (ponto de referência). Neste plano medem-se os seguintes ângulos:

α_x = ângulo lateral de folga

β_x = ângulo lateral de cunha

γ_x = ângulo lateral de saída

O ângulo α_x coincide com o ângulo de hélice ϕ medido na superfície da broca.

Além desses ângulos interessam os ângulos laterais efetivos (Figuras 2.5 e 2.6).

α_{xe} = ângulo lateral de folga efetivo

γ_{xe} = ângulo lateral de saída efetivo

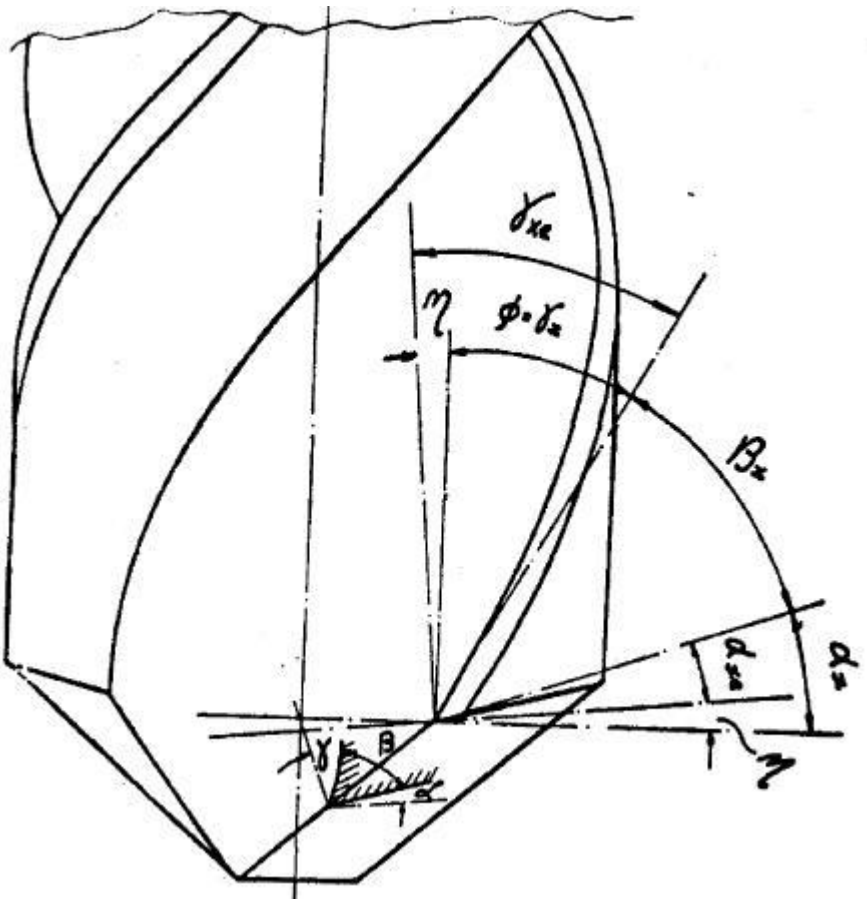


Figura 2.5 – Ângulos medidos no plano de trabalho da broca helicoidal.

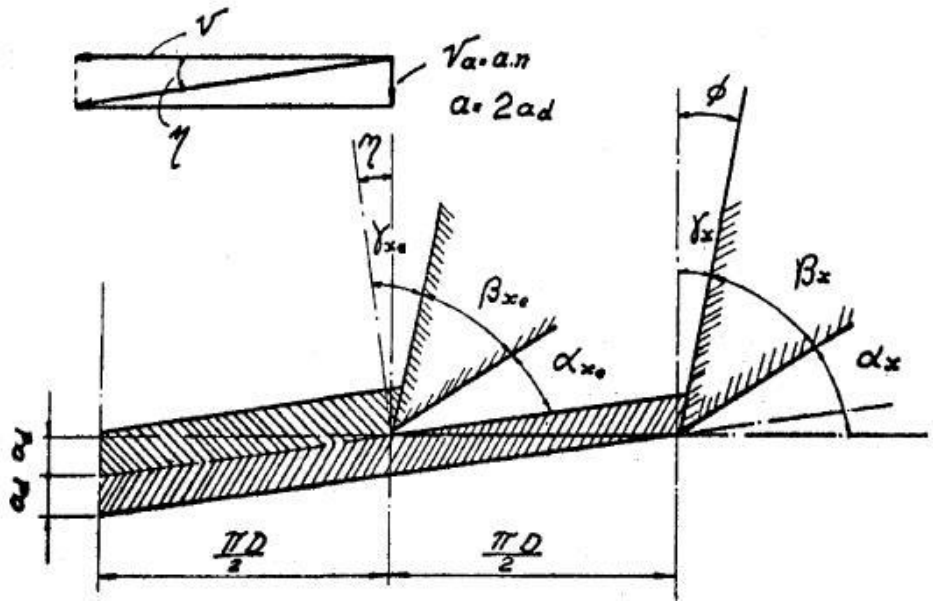


Figura 2.6 – Planificação da superfície cilíndrica periférica da broca helicoidal

A Figura 2.6 mostra a planificação da superfície cilíndrica periférica da broca. Tem-se:

$$\alpha_x = \alpha_{xe} + \eta$$

$$\gamma_x = \gamma_{xe} + \eta$$

onde η é o ângulo de direção efetiva do corte.

$$tg\eta = \frac{f}{D}$$

Os ângulos importantes medidos no plano de medida são:

α = ângulo de folga

β = ângulo de cunha

γ = ângulo de saída

Como a ponta das brocas helicoidais possui uma geometria complexa, os ângulos de saída e de forlga variam constantemente ao longo do raio desde o diâmetro externo até o núcleo. As Tabelas 2.2 e 2.3 mostram esses valores experimentais medidos em brocas reais e a Figura 2.7 mostra esquematicamente como a cunha cortante varia em função do raio da broca.

Tabela 2.2 – Valores de ângulo de saída para brocas helicoidais em função do raio, do ângulo da ponta e do ângulo de hélice.

d/D	Ângulo de ponta σ = 118° Ângulo de hélice φ		
	13°	30°	40°
1,000	10,536	30,609	41,925
0,727	4,512	20,549	30,898
0,571	0,051	13,195	22,338
0,470	- 3,760	7,280	15,319
0,400	- 7,342	2,110	9,204
0,348	-10, 45	- 2,740	3,551
0,308	-14,757	- 7,579	- 1,981
0,276	-18,957	-12,665	- 7,688
0,250	-23,741	-18,255	-13,863
0,228	-29,340	-24,636	-20,827
0,210	-36,041	-32,141	-28,953
0,195	-44,187	-41,154	-38,658

d/D	Ângulo de ponta σ = 130° Ângulo de hélice φ		
	13°	30°	40°
1,000	10,542	29,652	40,655
0,727	5,076	20,210	30,076
0,571	1,101	13,459	22,078
0,470	- 2,253	8,118	15,649
0,400	- 5,386	3,502	10,130
0,348	- 8,540	- 0,805	5,073
0,308	-11,902	- 5,103	0,139
0,276	-15,659	- 9,659	- 4,972
0,250	-20,033	-14,751	-10,578
0,228	-25,308	-20,721	-17,058
0,210	-31,876	-28,017	-24,904
0,195	-40,258	-37,220	-34,749

d/D	Ângulo de ponta σ = 140° Ângulo de hélice φ		
	13°	30°	40°
1,000	10,757	29,217	39,971
0,727	5,731	20,270	29,791
0,571	2,158	14,005	22,263
0,470	0,801	9,137	16,326
0,4000	- 3,531	4,994	11,312
0,348	- 6,260	1,176	6,782
0,308	- 9,170	- 2,607	2,404
0,276	-12,445	- 6,617	- 2,114
0,250	-16,315	- 11,136	- 7,094
0,228	-21,100	- 16,540	-12,943
0,210	-27,279	- 23,367	-20,249
0,195	-35,579	- 32,426	-29,888

Tabela 2.3 – Valores de ângulo de folga para brocas helicoidais em função do raio e do ângulo de ponta.

d/D	Ângulo de ponta σ = 118°							
	Ângulo de folga lateral α_o							
	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°
1,000	5,169	6,915	8,674	10,447	12,236	14,042	15,866	17,708
0,727	6,945	8,677	10,423	12,182	13,958	15,751	17,562	19,392
0,571	8,730	10,444	12,171	13,914	15,673	17,450	19,245	21,061
0,470	10,527	12,219	13,926	15,648	17,387	19,145	20,923	22,722
0,400	12,344	14,011	15,694	17,393	19,110	20,848	22,606	24,387
0,348	14,191	15,831	17,487	19,162	20,856	22,572	24,310	26,074
0,308	16,085	17,695	19,324	20,973	22,644	24,338	26,058	27,805
0,276	18,048	19,630	21,232	22,856	24,505	26,180	27,884	29,617
0,250	20,123	21,677	23,255	24,858	26,489	28,150	29,842	31,569
0,228	22,377	23,910	25,469	27,059	28,680	30,336	32,028	33,760
0,210	24,939	26,462	28,017	29,607	31,235	32,904	34,616	36,375
0,195	28,078	29,616	31,195	32,817	34,486	36,204	37,976	39,805

d/D	Ângulo de ponta σ = 130°							
	Ângulo de folga lateral α_o							
	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°
1,000	5,464	7,306	9,158	11,023	12,900	14,790	16,694	18,613
0,727	6,908	8,732	10,568	12,417	14,278	16,154	18,043	19,948
0,571	8,352	10,155	11,970	13,797	15,639	17,495	19,367	21,254
0,470	9,800	11,576	13,365	15,168	16,986	18,819	20,669	22,537
0,400	11,256	13,001	14,761	16,535	18,326	20,133	21,959	23,804
0,348	12,726	14,437	16,163	17,906	19,666	21,445	23,245	25,067
0,308	14,221	15,894	17,584	19,292	21,020	22,770	24,543	26,340
0,276	15,757	17,389	19,041	20,713	22,409	24,129	25,875	27,649
0,250	17,361	18,951	20,564	22,201	23,865	25,557	27,280	29,034
0,228	19,079	20,629	22,205	23,811	25,447	27,117	28,823	30,566
0,210	21,001	22,517	24,065	25,648	27,268	28,929	30,632	32,381
0,195	23,324	24,824	26,365	27,949	29,579	31,260	32,994	34,786

d/D	Ângulo de ponta σ = 140°							
	Ângulo de folga lateral α_o							
	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°
1,000	5,663	7,567	9,480	11,403	13,336	15,279	17,233	19,197
0,727	6,816	8,702	10,597	12,502	14,417	16,343	18,281	20,230
0,571	7,964	9,825	11,696	13,578	15,471	17,376	19,293	21,223
0,470	9,109	10,940	12,782	14,635	16,501	18,379	20,272	22,179
0,400	10,252	12,048	13,855	15,675	17,509	19,358	21,222	23,102
0,348	11,398	13,153	14,921	16,703	18,501	20,316	22,148	23,999
0,308	12,553	14,261	15,985	17,725	19,483	21,261	23,059	24,878
0,276	13,725	15,382	17,057	18,752	20,467	22,205	23,966	25,753
0,250	14,930	16,532	18,156	19,801	21,472	23,168	24,892	26,646
0,228	16,196	17,741	19,310	20,906	22,531	24,186	25,875	27,599
0,210	17,580	19,067	20,583	22,131	23,714	25,334	26,994	28,698
0,195	19,207	20,642	22,115	23,627	25,182	26,784	28,436	30,142

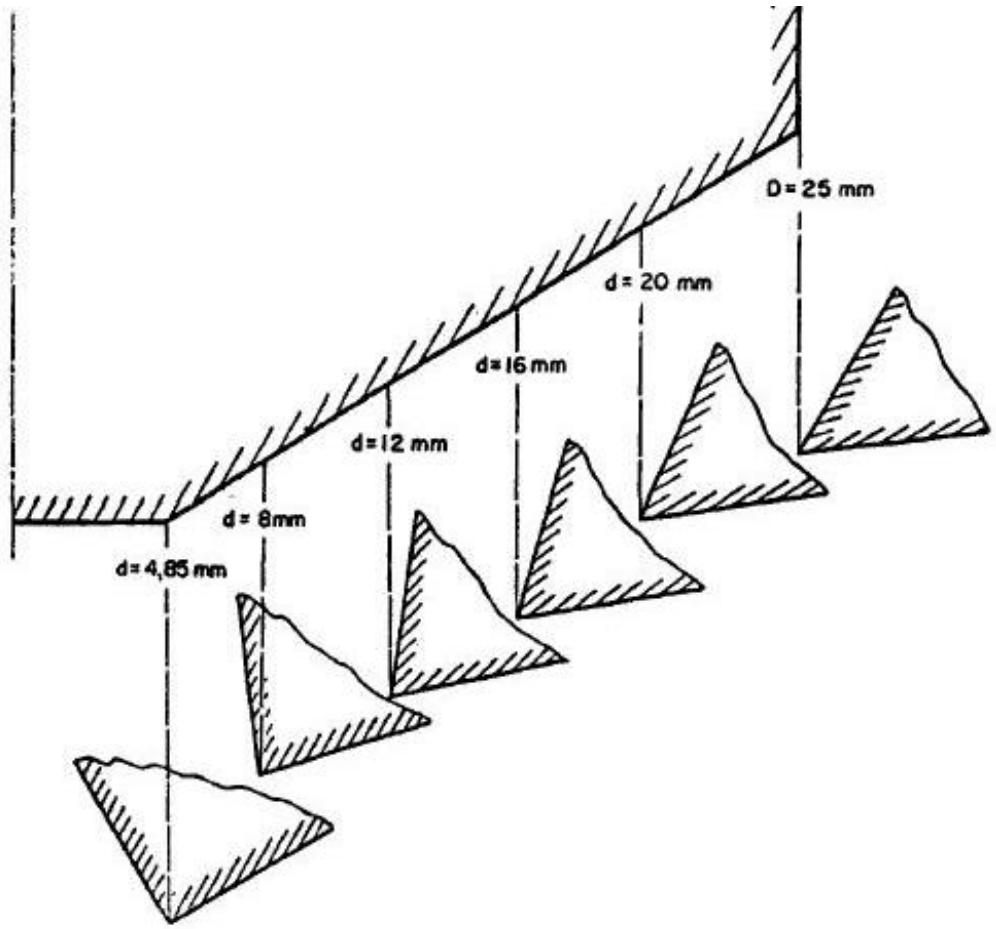


Figura 2.8 – Variação esquemática da cunha cortante ao longo do raio de uma broca ***D = 25 mm***, α = 118°, ϕ = 30° e α_0 = 8°.

O ângulo de hélice ϕ_d para diferentes diâmetros, pode ser determinado, como mostra a Figura 2.8.

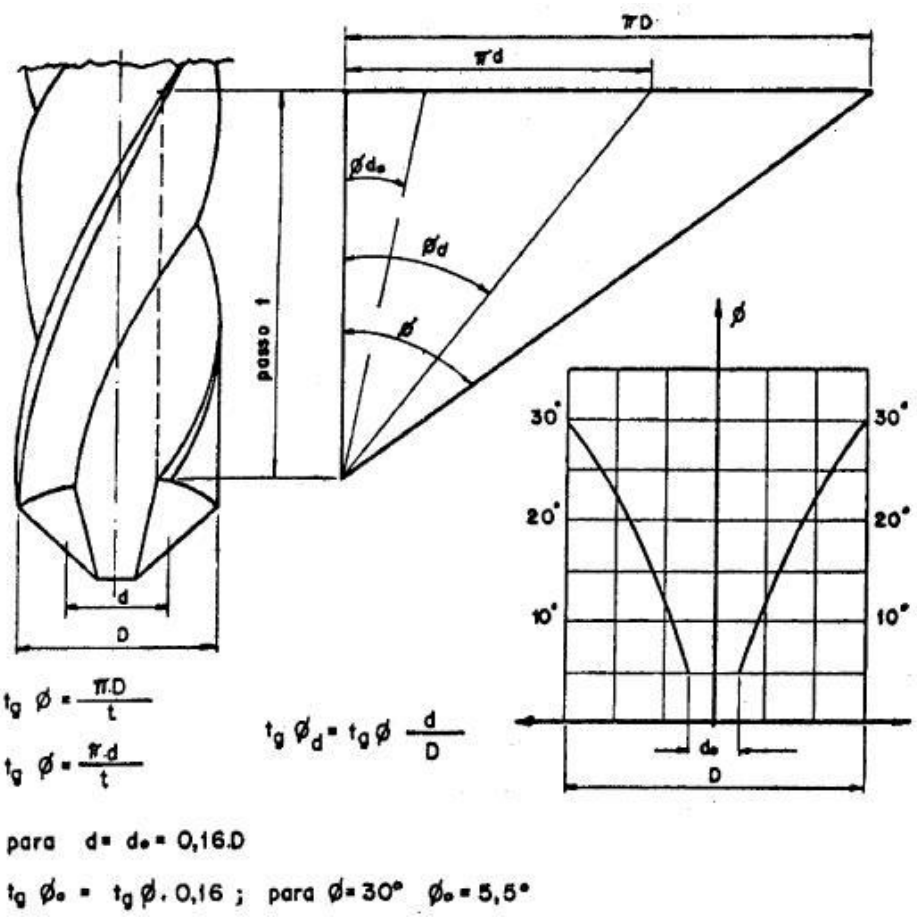


Figura 2.8 – Variação do ângulo de hélice de uma broca em função do diâmetro

2.1 - Afiação das brocas helicoidais

Para que o cavaco removido pela broca helicoidal não seja "esmagado" pela superfície principal de folga, é necessário que o ângulo lateral efetivo de folga α_{xe} seja tanto quanto possível positivo, para qualquer diâmetro da broca. Este ângulo é dado pela relação: $\boldsymbol{\alpha_{xe} = \alpha_x - \eta}$. Logo o ângulo lateral de folga deverá ser sempre positivo e satisfazer a condição: $\boldsymbol{\alpha_x = \alpha_{xe} + \eta}$. Verifica-se porém que o ângulo da direção efetiva de corte $\boldsymbol{\eta}$ varia conforme o diâmetro da broca. Durante a furação, todos os pontos A, B, C, ... da aresta principal de corte (Figura 2.9) descrevem hélices de mesmo passo $\boldsymbol{a}$. O ângulo $\boldsymbol{\eta}$ correspondente aos pontos A, B, C.... calculado pelas relações (Figura 2.9):

$$\boldsymbol{tg\,\eta_a = \frac{a}{\pi.D}} \qquad \boldsymbol{tg\,\eta_b = \frac{a}{\pi.d_b}} \qquad \boldsymbol{tg\,\eta_c = \frac{a}{\pi.d_c}}$$

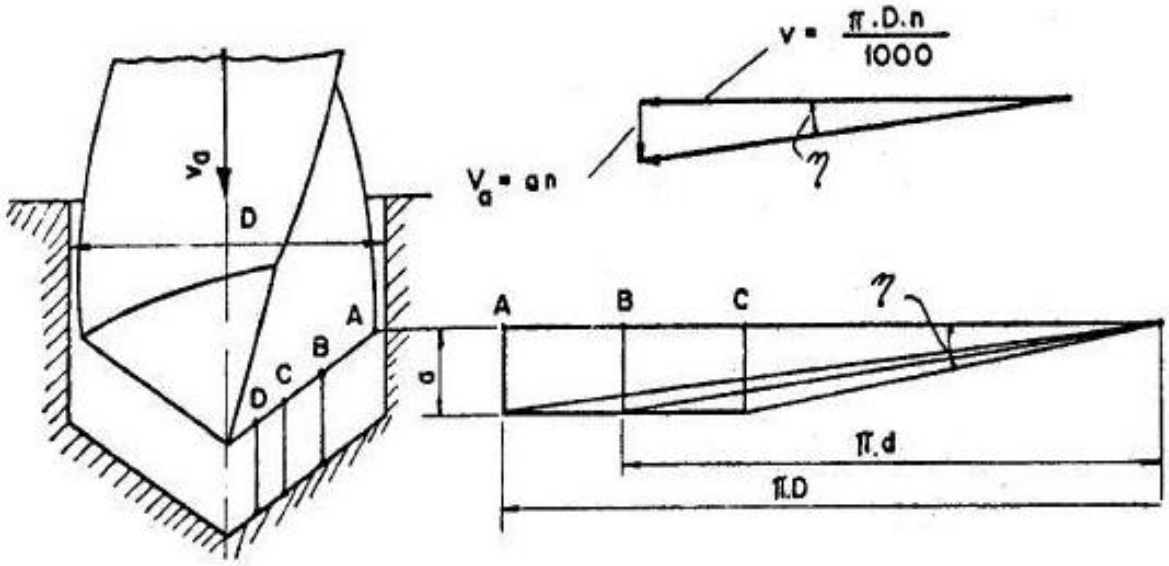


Figura 2.9 – Variação do ângulo da direção efetiva de corte em função do diâmetro.

Logo, com a diminuição do diâmetro ***D***, tem-se um aumento do valor do ângulo η. Na parte central, o ângulo η será bem maior que na periferia da broca. Consequentemente, o ângulo lateral de folga α_x deverá ser bem maior na parte central, a fim de que α_{xe} seja positivo.

Como existe uma relação bem definida entre o ângulo lateral de folga α_x e o ângulo de folga α medido no plano de medida, a afiação das brocas helicoidais deve ser tal, que permita um ângulo de folga cada vez maior a medida que o diâmetro ***D*** diminui. O tipo de afiação mais antigo e ainda mais difundido é a afiação em cone de revolução ou simplesmente afiação cônica, cujo princípio está indicado na Figura 2.10.

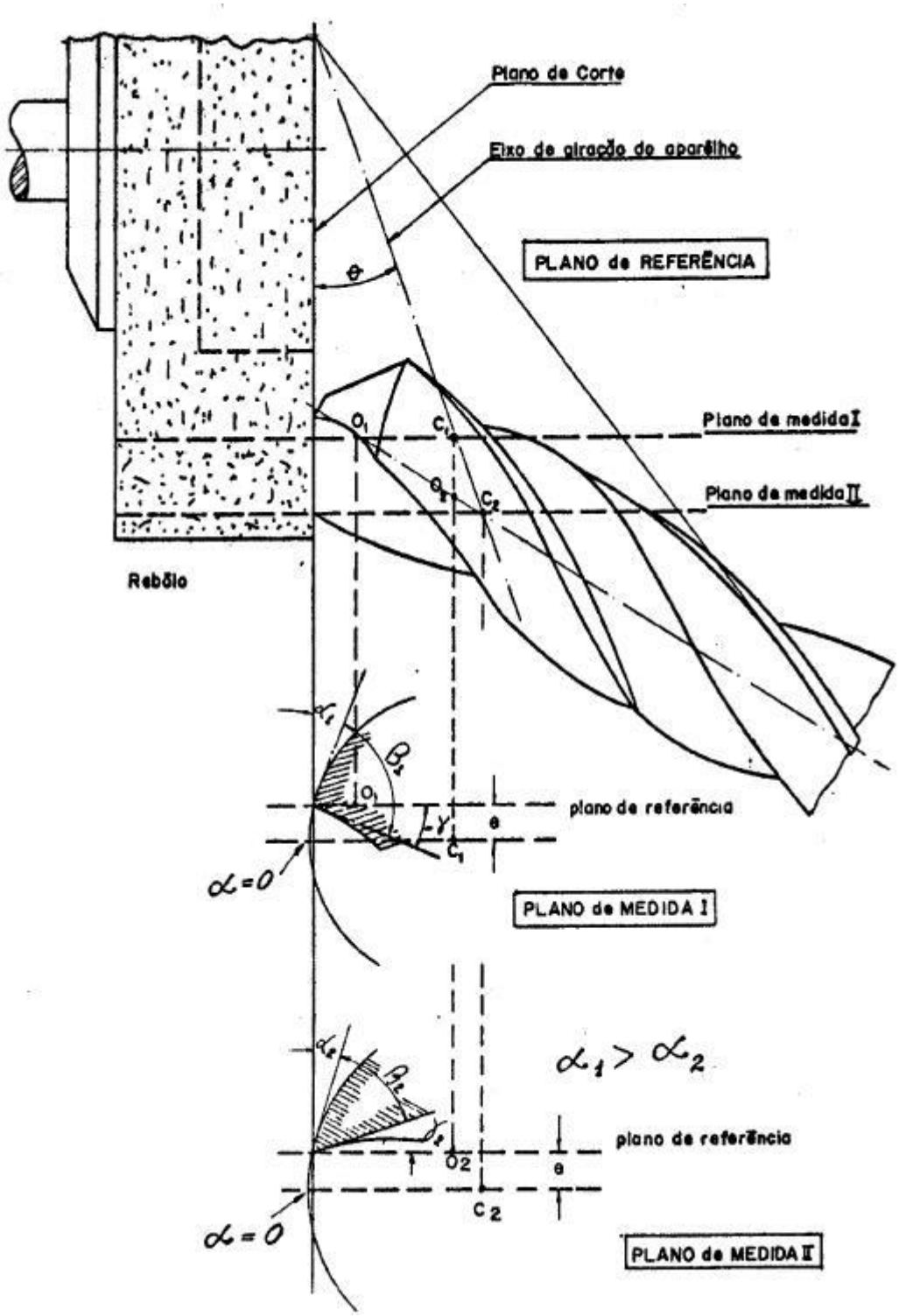


Figura 2.10 – Princípio de afiação de brocas helicoidais por cone de revolução.

A afiação das brocas é, geralmente, feita com um rebolo de copo. As brocas devem ser afiadas com auxílio de dispositivos, ou quando a quantidade de brocas a ser afiada periodicamente for suficientemente grande, devem ser adquiridas máquinas especiais de afiação. Na afiação cônica a broca é colocada frente ao rebolo de maneira que seu eixo geométrico forme um ângulo igual a metade do ângulo de ponta desejado com a face do rebolo. Uma vez encostada uma das arestas cortantes da

broca na face do rebolo a broca é girada em torno de um eixo, denominado “eixo de rotação do dispositivo”. Para que o ângulo de folga α seja positivo em qualquer diâmetro da broca, é necessário que este eixo de rotação do aparelho não seja coplanar com o eixo da broca (Figura 2.10). Caso contrário $\alpha = 0$, pois a curva obtida no plano de medida, pela interseção da superfície de folga (obtida nesta afiação) com este plano, seria uma circunferência cujo centro estaria no eixo da broca. É necessário, portanto que exista uma distância “e” entre o plano que contém o eixo da broca e o plano que contém o eixo de giro do dispositivo. Esta distância aparece em verdadeira grandeza no plano de medida. A Figura 2.10 mostra os ângulos α, β e γ da broca medidos em duas posições (plano de medida I e plano de medida II) correspondentes a dois diâmetros da broca. Quanto maior for o valor de e, maior será o ângulo α. As máquinas de afiação cônica têm geralmente um excêntrico no eixo de rotação, que permite variar a distância e. Para a furação em lotes grandes foi desenvolvida uma variedade de afiações especiais que se aplicam com vantagem somente em alguns casos particulares.

A remoção do cavaco formado durante a furação com uma broca helicoidal com afiação cônica é eficiente para furos de pequena profundidade, da ordem de 2D. Quando a profundidade dos furos aumenta, o momento de torção e a força de avanço também aumentam. De tempo em tempo, a broca deve ser retirada do furo para permitir a remoção do cavaco pelo refrigerante de corte. A remoção do cavaco é tanto mais simples quanto menor for o cavaco produzido, o que depende em grande parte do material sendo furado.

Os quebra cavacos indicados na Figura 2.11 são sulcos afiados nas superfícies de folga ou de saída da broca.

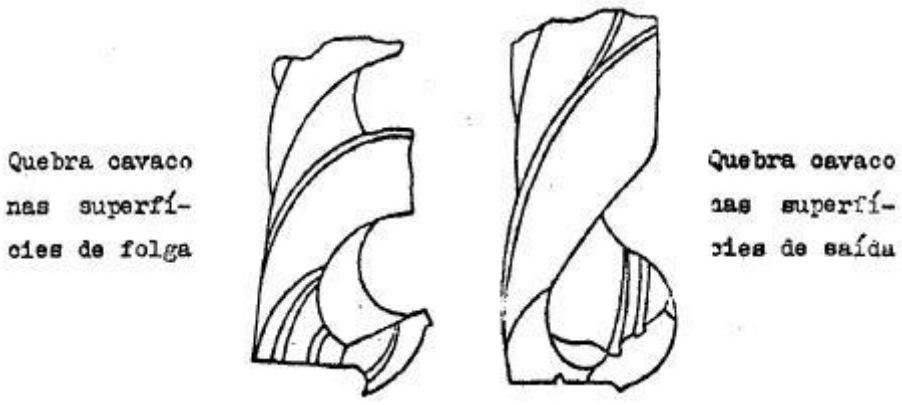


Figura 2.11 – Exemplos de quebra cavacos em brocas helicoidais.

Os quebra cavacos da superfície de folga devem ser renovados em cada afiação da broca. Um aperfeiçoamento em brocas helicoidais especiais, que atuam como quebra cavacos é mostrado na Figura 2.12. A vantagem principal é a simplicidade de afiação, a qual não passa de afiação cônica comum.



Figura 2.12 – Exemplo de uma broca com canais helicoidais especiais que atuam como quebra cavacos.

Como será visto à frente, aproximadamente 50% da força de avanço de uma broca com afiação cônica é devida à aresta transversal de corte. O chanframento da aresta transversal de corte visa reduzir a força de avanço da broca, ao diminuir o comprimento da aresta transversal de corte, conforme ilustrado na Figura 2.13.

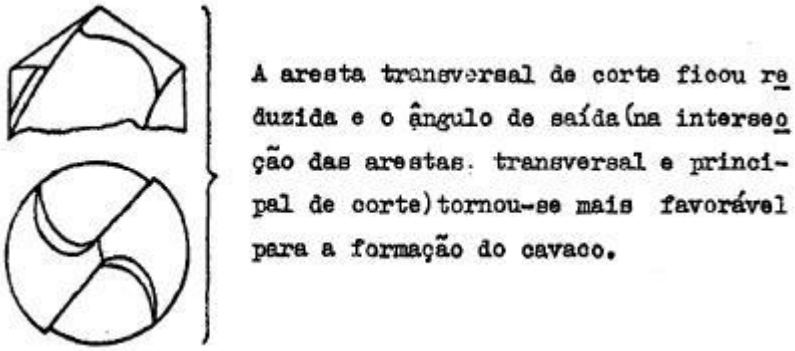


Figura 2.13 – Chanfro da aresta transversal de corte.

O chanframento da aresta transversal pode ser combinado com uma correção do ângulo de saída das arestas principais, próximo ao centro da broca, conforme a Figura 2.14.

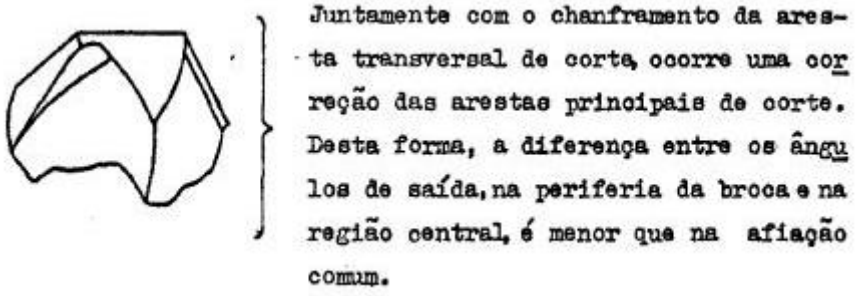
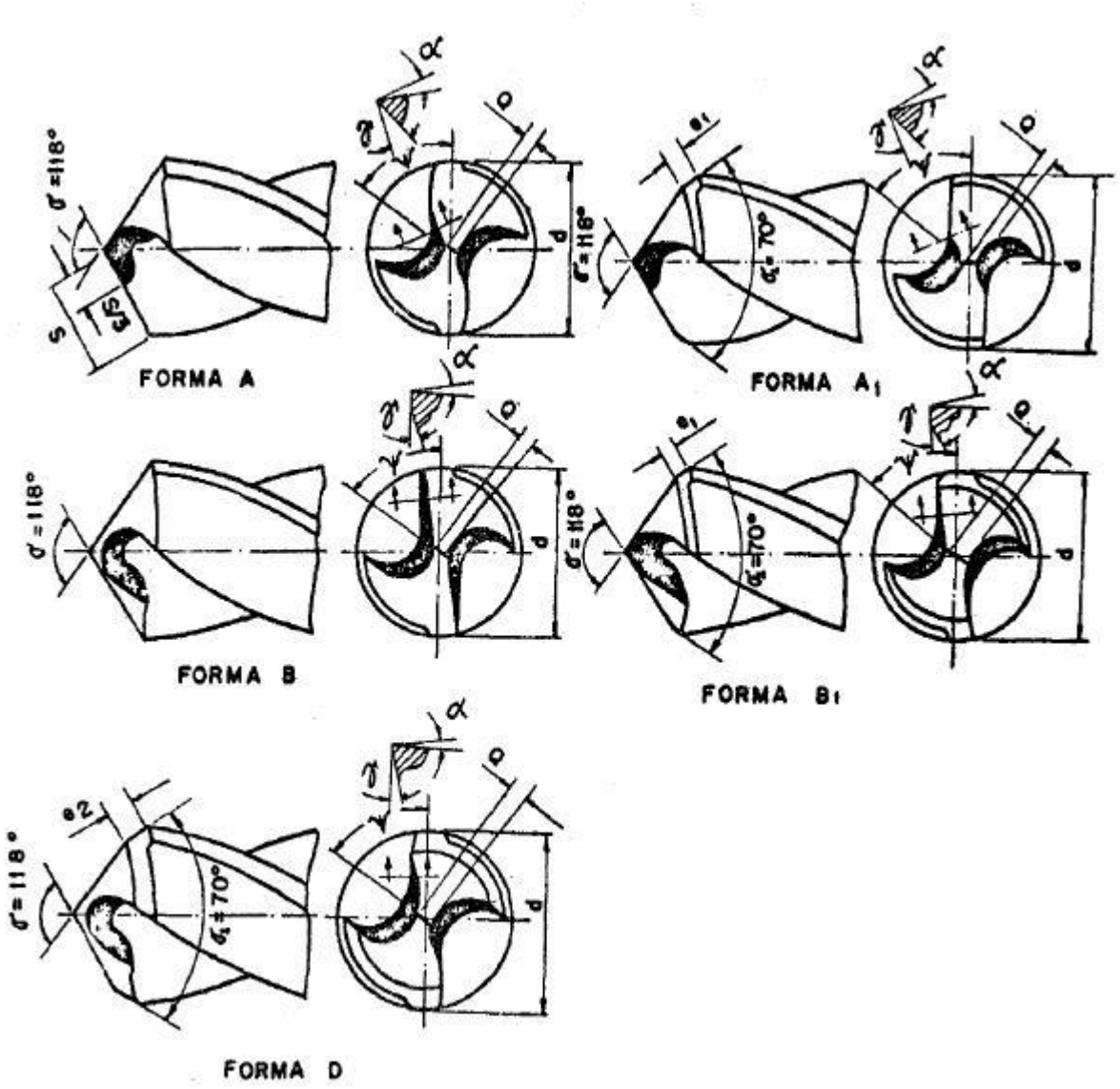


Figura 2.14 – Chanfro na aresta transversal de corte, combinado com uma correção no ângulo de saída das arestas principais.

Como visto anteriormente, o ângulo de saída possui valores negativos nas imediações da aresta transversal. O chanframento da aresta transversal deve ser feito em máquina especial. As máquinas afiadoras de brocas podem apresentar um dispositivo de chanframento. Este é feito com rebolo de disco. O comprimento da aresta transversal de corte fica reduzido a 1/10 do valor inicial.
Normas internacionais recomendam cinco tipos de afiação especiais, denominadas formas A, B,C,D,E. A Figura 2.15 apresenta as formas A, B e D com variantes A_1 e B_1



Forma A: Chanframento da aresta transversal de corte.
Forma A_1: O ângulo σ_1 = 70º aumenta a vida da broca.
Forma B: Chanframento da aresta transversal de corte com correção de ângulo de saída da aresta principal de corte.
Forma B_1: O ângulo σ_1 = 70º aumenta a vida da broca.
Forma D: Chanframento para a furação de Ferri fundido cinzento.

Figura 2.15 – Exemplos de formas de chanfros aplicados em brocas helicoidais.

Na afiação com 4 superfícies de folga, cada superfície cônica de folga da broca é substituída por duas superfícies planas, as quais permitem maior produção em alguns casos e aumento da vida da broca, vide Figura 2.16.

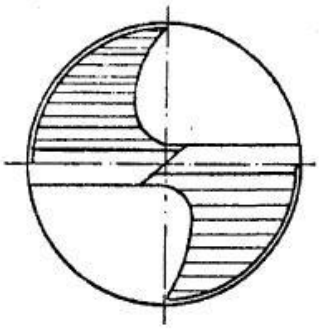


Figura 20 - Afiação com 4 superfícies de folga

Figura 2.16 – Afiação de brocas helicoidais com 4 superfícies de folga.

A "afiação com duplo ângulo de ponta" é empregada especialmente na furação de ferro fundido cinzento, vide Figura 2.15 - forma D. O objetivo é aumentar o comprimento das arestas principais de corte na região onde a velocidade de corte é máxima, isto é, próximo à periferia da broca, diminuído o desgaste e aumentando a vida. A "afiação de com ponta de centragem" oferece vantagem na furação de chapas, não devendo ser empregada na furação com grandes profundidades, Figura 2.17.

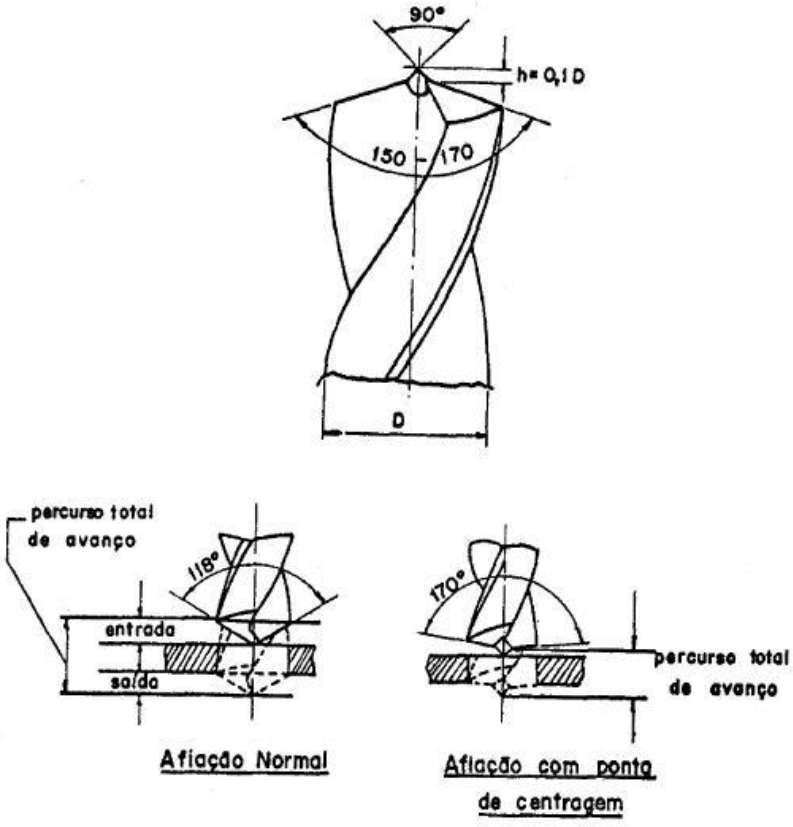


Figura 2.17 – Afiação com ponta de centragem.

Encontra aplicação nas industrias de calderaria e de construção naval. As vantagens deste tipo de afiação são:

1) Comprimentos de entrada e saída da ferramenta pequenos, reduzindo o tempo de furação, Figura 2.17.

2) Vantagens na furação de chapas finas, com pouca ou nenhuma rebarba.

3) Maior precisão na localização do centro do furo.

4) Melhor acabamento superficial da parede do furo.

5) Permite a furação em cheio com brocas de diâmetros até 7mm

6) Aumento de 8 – 10% da capacidade de corte.

Estas vantagens se verificam somente com uma afiação cuidadosa da ponta. O ângulo de ponta pode ser aumentado até 180º, permitindo a execução de ângulos cegos e escalonados com fundo plano. Como desvantagem cita-se o maior desgaste junto à periferia, recomendando-se o emprego de um segundo ângulo de ponta de 90º. Também a correção do ângulo de saída das arestas principais de corte oferece vantagens.

Na “afiação cruzada” a aresta transversal de corte pode ser totalmente eliminada, Figura 2.18.

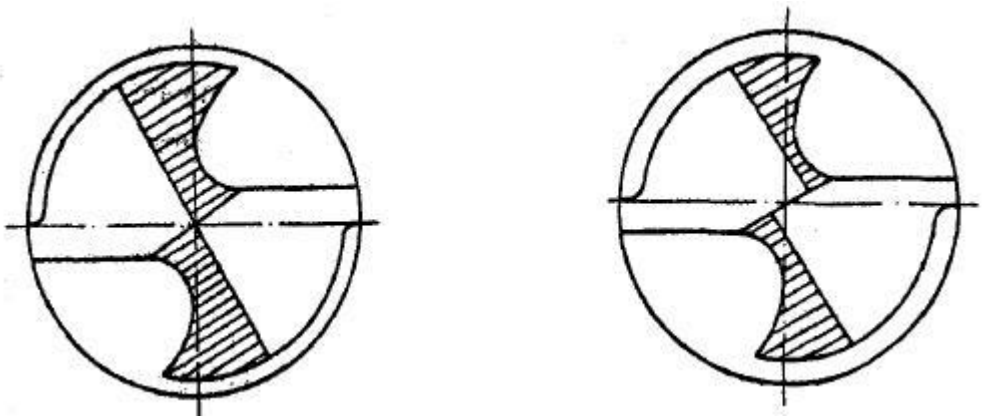


Figura 2.18 – Afiação cruzada na qual a aresta transversal de corte pode ser total, ou parcialmente, eliminada.

Este tipo de afiação oferece vantagens na execução de furos profundos e na furação de materiais duros, com resistência superior a 80 kg/mm^2 . A redução da força de avanço é considerável, conforme mostrado na Figura 2.19.

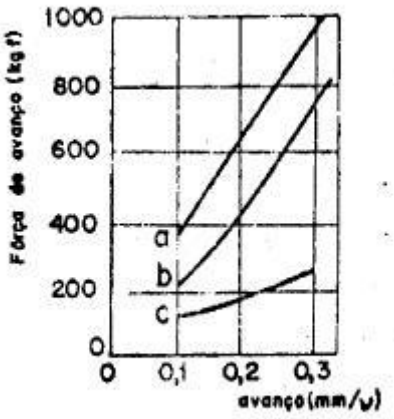


Figura 2.19 – Variação da força de avanço para 3 afiações diferentes, furando um aço com 70 kg/mm^2, com broca ***D = 20 mm*** e v_c ***= 22 m/min***. (a) afiação normal, (b) afiação cônica com chanfro de aresta transversal de corte e (c) afiação cruzada.

Este tipo de afiação exige máquina especial para garantir a simetria.

A "afiação Oliver", mostrada na Figura 2.20, permite reduções consideráveis tanto no momento de torção como da força de avanço. A superfície de folga recebe uma afiação em máquina especial, formando uma ponta de centragem.

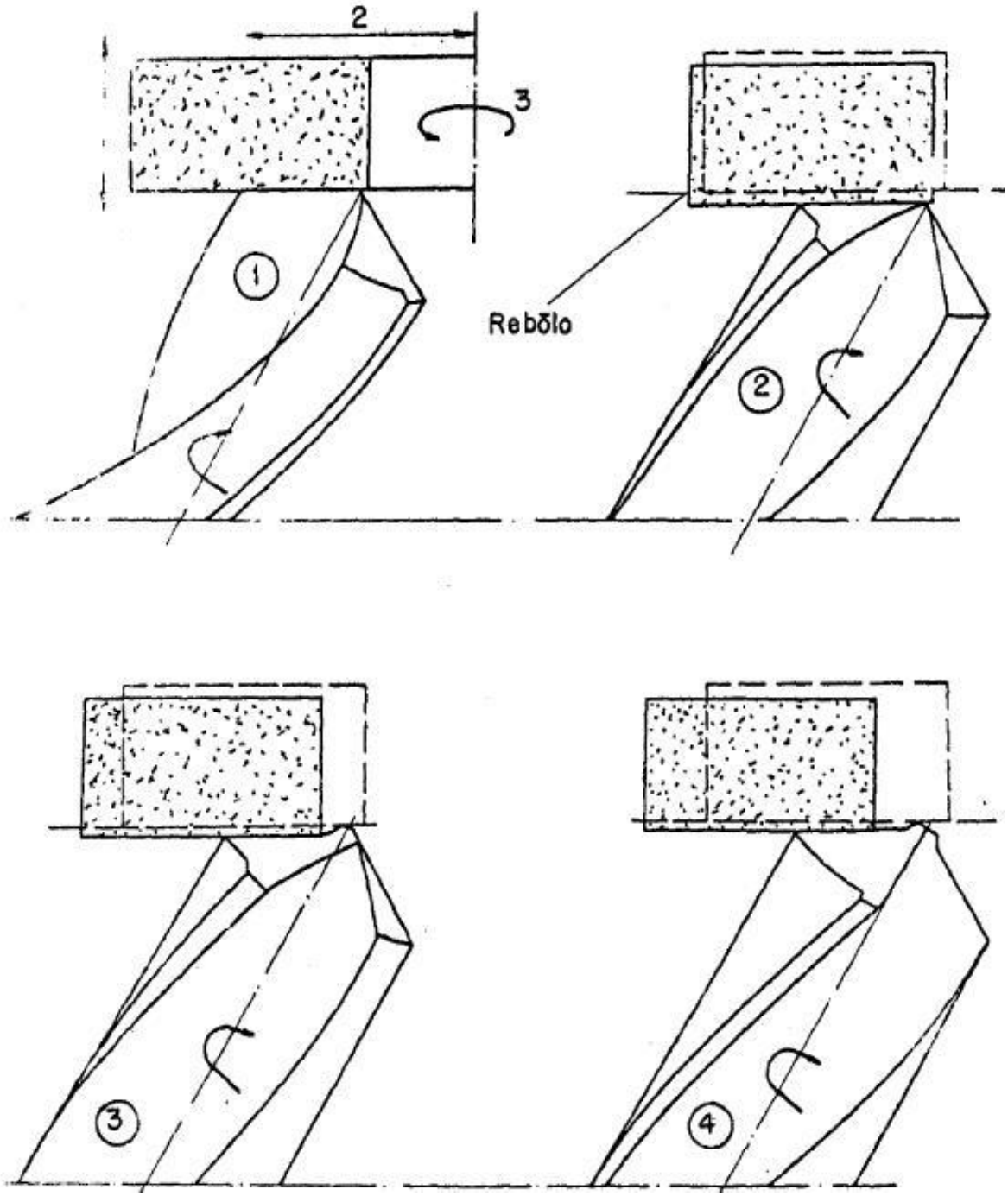


Figura 2.20 – Esquema de “afiação Oliver”. (1) Rebolo oscila no sentido do eixo; (2) Rebolo oscila normal ao eixo; (3) Rebolo rotaciona e (4) A broca rotaciona. Todos os movimentos são coordenados sincronizados.

O fato desta afiação requerer máquina especial, constitui uma grande desvantagem.

A “afiação em ponta espiral” (*Spiralpoint*) foi publicada em 1957, anunciada como sendo aperfeiçoamento mais importante das brocas nos últimos 100 anos. Algumas vantagens são:

1) Melhor centragem na broca, principalmente no início do furo.

2) A precisão dimensional dos furos é maior, Figura 2.23.

3) A precisão geométrica (circularidade e cilidricidade) é maior.

4) Redução da força de avanço até 34% em relação à afiação cônica comum.

5) Evita a extrusão do material pela aresta transversal de corte.

6) Frequentemente dispensa a operação posterior de alargamento.

7) Os furos executados em chapas finas são circulares e sem rebarbas.

8) O desgaste da broca é menor, por causa do menor desenvolvimento de calor.

9) A broca é afiada em uma única fixação na máquina.

A forma de afiação em ponta espiral está representada na figura 2.21

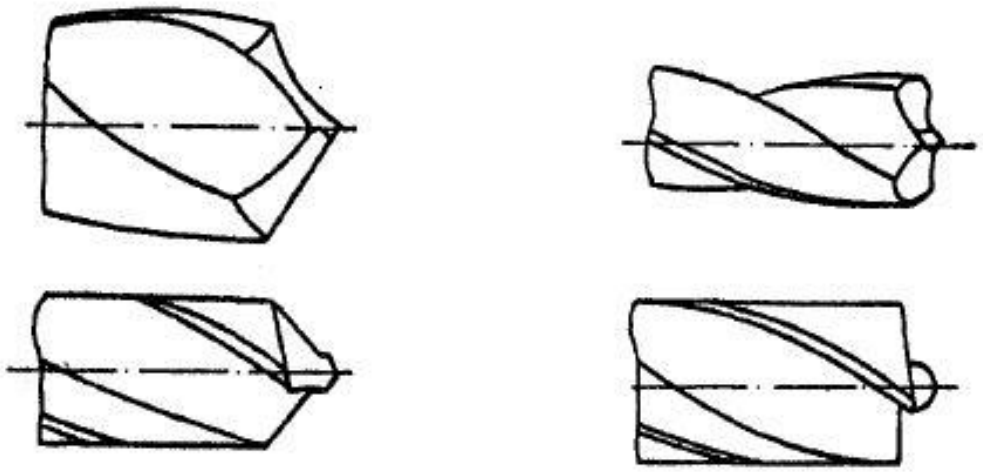


Figura 2.21 – Exemplo de afiação e ponta espiral

O ângulo de ponta pode variar de 118º a 180º. Ângulos usuais são 118º, 135º e 180º. A aresta transversal de corte – a ponta espiral – tem forma de “S”.

A geometria de corte da ponta espiral é mais vantajosa que a de afiação cônica comum, como ilustra a Figura 2.22, com as hipóteses de formação de cavacos em diversas regiões da ponta da broca.

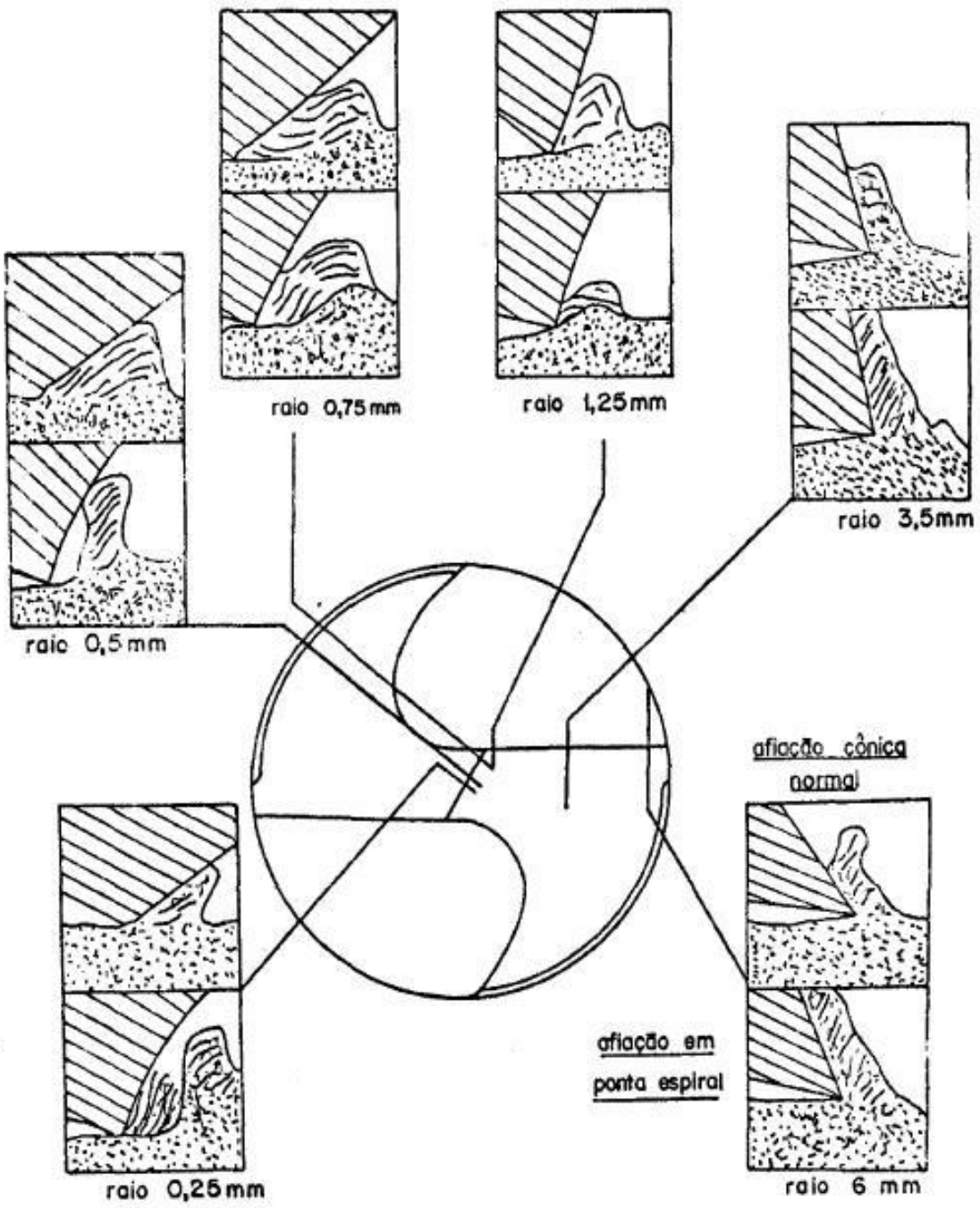


Figura 2.26 – Comparação das geometrias de corte em brocas com afiação em "ponta espiral" e brocas com afiação normal. A broca tem D = ½" (12.7 mm), os quadros inferiores ilustram a situação numa broca afiada em ponta espiral e os quadros superiores representam a situação numa broca em afiação cônica, em posições correspondentes.

A Figura 2.23 representa o aumento do furo, i.e., a diferença entre os diâmetros do furo e da broca, comparando a afiação em ponta espiral com a afiação cônica comum.

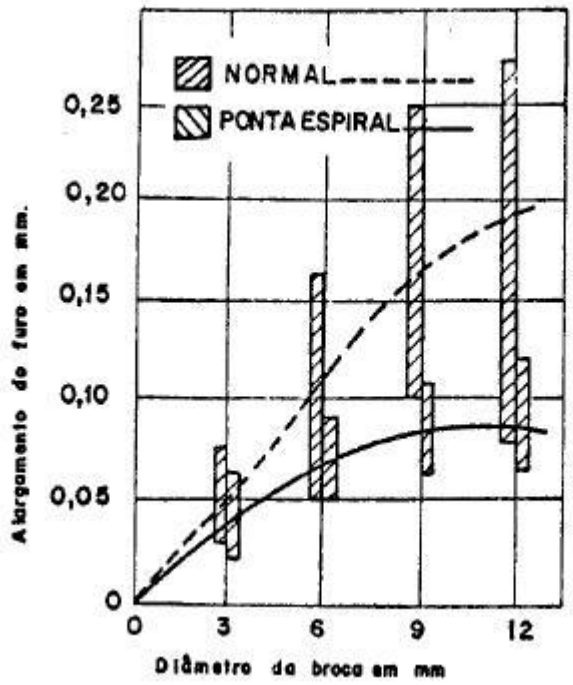


Figura 2.23 – Aumento no diâmetro do furo , devido às diferentes afiações.

A vida das brocas com ponta espiral é mais longa que a aquela das brocas com afiação cônica, quando se trata de furação de materiais duros com resistências superiores a 70 kg/mm^2. A maior desvantagem desse tipo de afiação reside na necessidade de uma máquina afiadora especial.

A "afiação Shirov", ilustrada na Figura 2.24 é uma variante da afiação cruzada, desaparecendo por completo a aresta transversal de corte.

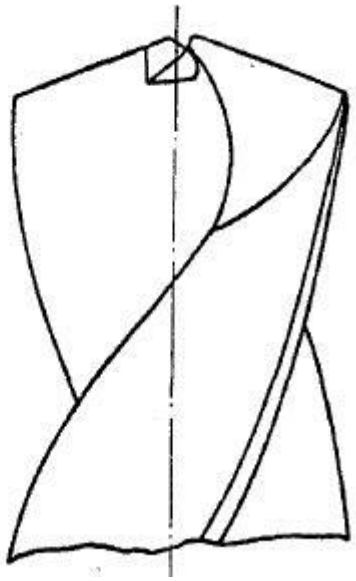


Figura 2.24 – Exemplo de "afiação Shirov".

Este tipo de afiação é indicado para a afiação do ferro fundido cinzento e do aço com resistência inferior a 70 kg/mm^2. A "afiação Shirov" deve ser executada em máquina afiadora. De início, faz-se a afiação cônica normal das superfícies de folga e, em seguida, é afiado um rasgo no

núcleo da broca que elimina a aresta transversal de corte, gerando duas novas arestas. Em alguns casos consegue-se um aumento de 100% do avanço.

3 – FORÇA DE CORTE E POTÊNCA NA FURAÇÃO

Em qualquer trabalho de furação, para vencer o momento de torção e a força de avanço, deve-se vencer:

a) Resistência devido ao corte do material, nas duas arestas principais de corte.
b) Resistência devido ao corte e a extrusão (esmagamento) do material, na aresta transversal de corte.
c) Atrito nas guias e atrito entre a superfície de saída da broca e o cavaco.

A Figura 3.1 apresenta a participação percentual destas grandezas ara um caso particular.

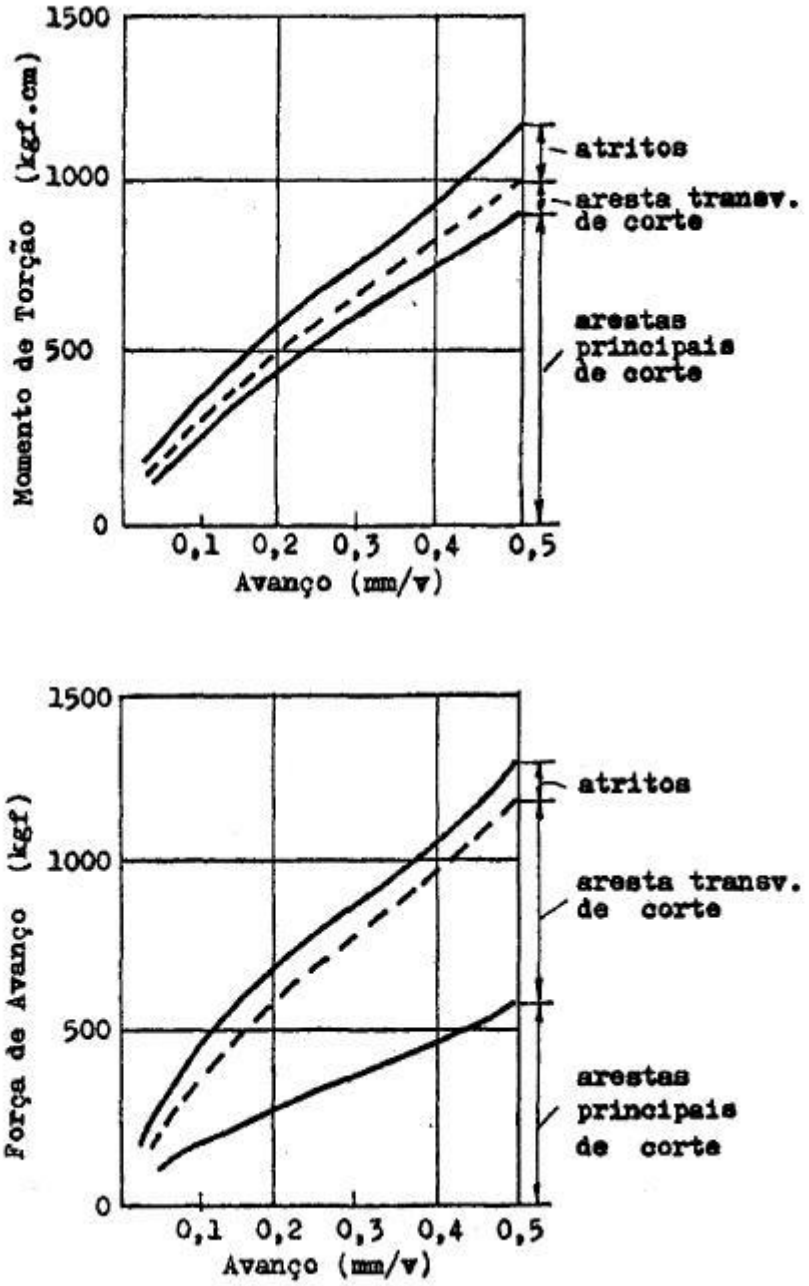


Figura 3.1 – Participação das arestas de corte, da aresta transversal e do atrito no momento total e na força de avanço em uma furação com broca helicoidal. ***D = 20 mm***, ***L = 50 mm***, aço carbono com 60 kgf/mm^2 de resistência à tração.

Desta forma, pode-se escrever para o momento de torção e força de avanço da broca respectivamente:

$$M_t = M_{ta} + M_{tb} + M_{tc} \quad (3.1)$$

$$P_a = P_{aa} + P_{ab} + P_{ac} \quad (3.2)$$

onde os segundos índices ***a***, ***b*** e ***c*** se referem as "arestas principais", à "aresta transversal" e às "guias de atrito com o cavaco", respectivamente. Cumpre fixar que os valores da Figura 3.1 são apenas válidos para as condições indicadas, dependendo ainda do fluido de corte empregado e de outros

fatores. As percentagens devem oscilar entre os seguintes valores, para brocas com afiação normal, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Valores indicativos das contribuições percentuais de cada uma das parcelas, para o momento total em furação com brocas helicoidais

	Arestas Principais	Arestas Transversais	Atritos
Momento M_t	77- 90%	3 – 10%	3 – 13%
Força de avanço P_a	39 – 59%	40 – 58%	2- 5%

Observa-se a participação grande da aresta transversal de corte na força de avanço.

Denomina-se força de usinagem, a força total que atua na cunha cortante de uma ferramenta, durante a usinagem. No caso da broca helicoidal, tem-se para cada aresta principal de corte, as forças de usinagem $\boldsymbol{F_{u1}}$ e $\boldsymbol{F_{u2}}$. (Para simplificar o estudo nas brocas helicoidais, considera-se a mesma constituída por duas cunhas de corte – cunhas principais de corte. Cada cunha contém a aresta principal e transversal de corte. A Figura 3.2 apresenta a decomposição da força de usinagem, para cada aresta principal.

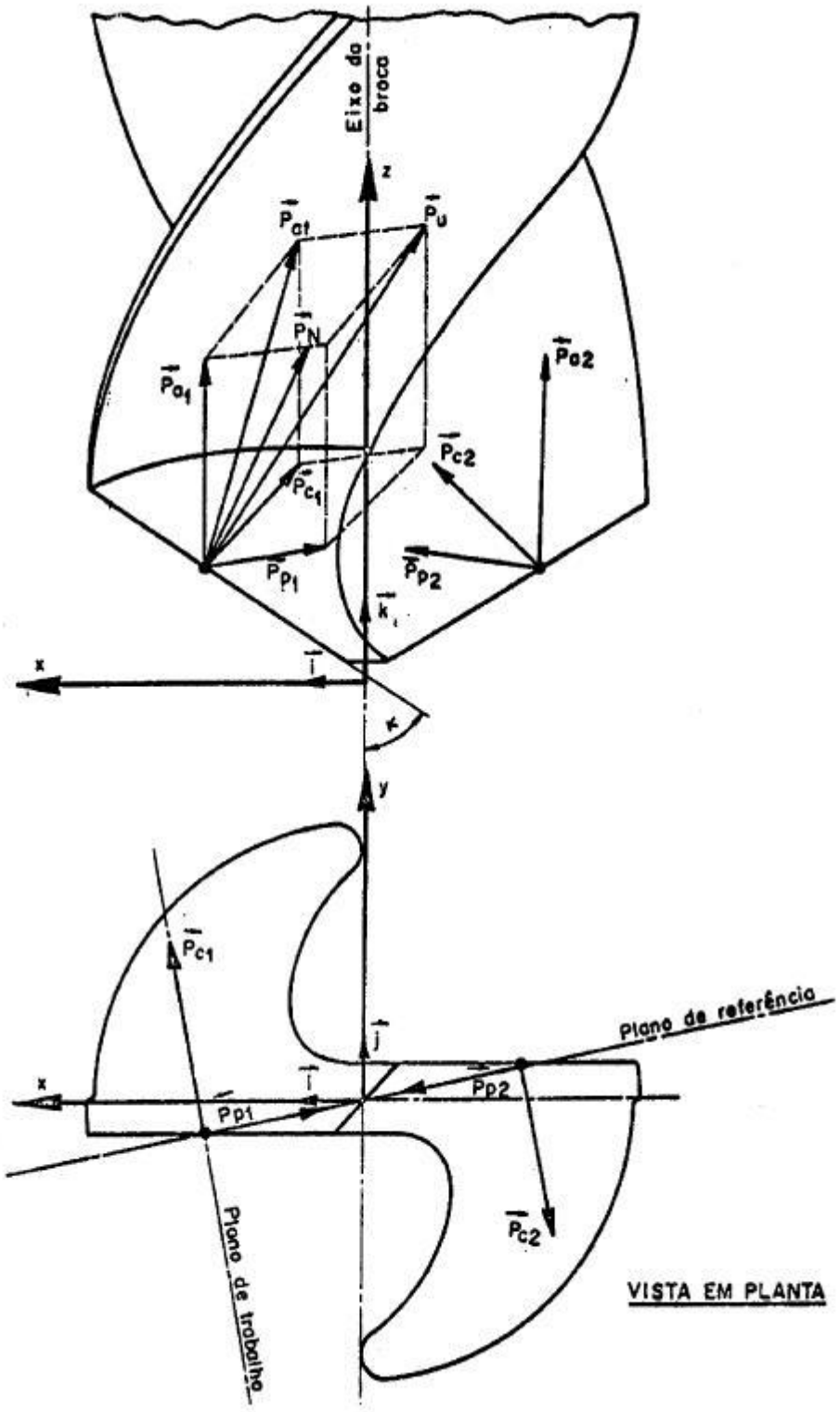


Figura 3.2 – Componentes da força de usinagem, atuando sobre um ponto da aresta principal de corte em uma broca helicoidal.

Particular interesse tem as componentes da força de usinagem no plano de trabalho, que passa pelo ponto considerado. Neste plano tem-se as componentes:

- Força de corte $\boldsymbol{F_c}$: É a projeção de $\boldsymbol{F_u}$ sobre a direção de corte. Para cada cunha principal de corte, tem-se as componentes $\boldsymbol{F_{c1}}$ e $\boldsymbol{F_{c2}}$. No caso das cunhas cortantes iguais, tem-se:

$$\boldsymbol{F_{c1} = F_{c2}} \tag{3.3}$$

- Força de avanço $\boldsymbol{F_f}$: É a projeção de $\boldsymbol{F_u}$ sobre a direção de avanço. Para cada cunha principal de corte tem-se as componentes $\boldsymbol{F_{f1}}$ e $\boldsymbol{F_{f2}}$. A força de avanço resultante numa broca helicoidal será:

$$\boldsymbol{F_f = F_{f1} + F_{f2}} \tag{3.4}$$

No caso das cunhas cortantes serem perfeitamente iguais, tem-se:

$$\boldsymbol{F_{f1} = F_{f2}} \quad \text{assim} \quad \boldsymbol{F_f = 2F_{f1}} \tag{3.5}$$

Outra componente da força de usinagem $\boldsymbol{F_u}$, que interessa para o estudo das brocas helicoidais, é a força passiva $\boldsymbol{F_p}$, no plano de referência. Esta força é a projeção da força de usinagem na direção normal ao plano de trabalho. Como tem a direção radial da broca, é chamada de componente radial ($\boldsymbol{F}_p$ ou $\boldsymbol{F}_r$). Para o caso de cunhas cortantes perfeitamente iguais, tem-se:

$$\boldsymbol{F_{p1} = F_{p2}} \tag{3.6}$$

No caso de serem diferentes, o que acontece frequentemente, a broca estará sujeita também ao momento fletor proveniente da força $\boldsymbol{F}_{p1} - \boldsymbol{F}_{p2}$. O estudo das forças e momentos nas brocas helicoidais é bastante complexo, porque a geometria da cunha cortante (e em particular os ângulos α, β, γ e χ) varia de ponto para ponto. Há diversos estudos teóricos para o cálculo das componentes das força de usinagem, especialmente as componentes de corte e de avanço. No entanto, o princípio proposto por Kienzle ainda é o mais apropriado.

3.1 – Cálculo de força de corte para a furação em cheio

A formulação a seguir leva em conta 3 fatores principais: diâmetro da broca, avanço e material sendo furado. Além desses, há outros fatores secundários, tais como ângulo de ponta, ângulo de hélice, o estado de afiação, o fluído de corte, o material da broca. Os fatores secundários são incluídos nas

fórmulas de maneira implícita, realizando os ensaios de furação em condições que se aproximam o máximo à condições práticas de trabalho das brocas de aço rápido, com ângulo de ponta de 118º, ângulo de hélice 30º e trabalha-se com fluído de corte. O estado de afiação da broca exerce uma influência apreciável somente quando se trabalha com uma broca recém afiada, na qual o momento de torção será inferior ao momento de "regime", que é alcançado rapidamente após alguns furos iniciais. Experimentalmente comprova-se que a influência da velocidade de corte da broca sobre o momento de torção é muito pequena, podendo ser desprezada em primeira aproximação.
Kienzle propôs a seguinte expressão que permite calcular a força principal de corte:

$$\boldsymbol{F}c = \boldsymbol{k}_{s1} \bullet b \bullet h^{1-z} \qquad (3.7)$$

$\boldsymbol{k}_{s1}$ e $\boldsymbol{z}$" são constantes características do material sendo furado, determinadas por ensaios experimentais. Constatou-se que, dentro de limites razoáveis de precisão, a formula proposta por Kienzle conserva uma validez satisfatória. A partir do momento de torção, obtido em ensaio, pode-se calcular a força principal de corte, que atua numa broca helicoidal:

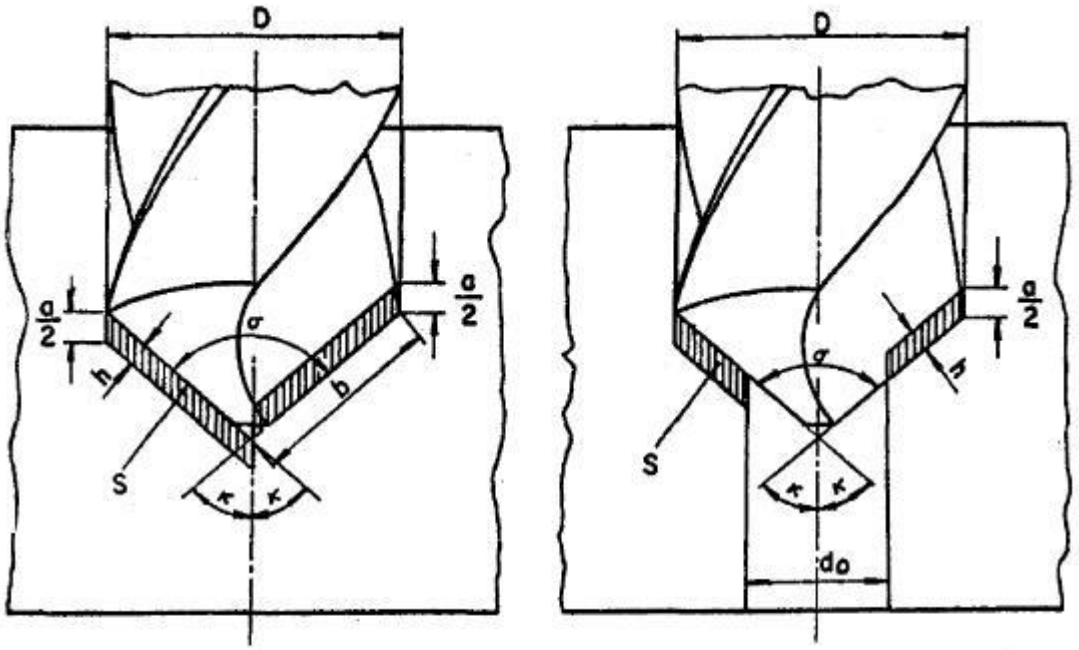
$$\boldsymbol{F}_c = \frac{M_t \bullet 2}{D} \qquad (3.8)$$

A Equação (3.7) pode ser escrita sob forma:

$$\frac{\boldsymbol{F_c}}{\boldsymbol{b}} = \boldsymbol{k_{s1}}.\boldsymbol{h^{1-z}} \qquad (3.9)$$

onde, de acordo com a Figura 3.3:

$$\boldsymbol{b} = \frac{\boldsymbol{D}}{\boldsymbol{2}.\boldsymbol{sen\chi}} \; ; \qquad \boldsymbol{h} = \frac{\boldsymbol{f}}{\boldsymbol{2}}.\boldsymbol{sen\chi} \qquad (3.10)$$



Furação em cheio

$$p = \frac{D}{2}$$

$$b \simeq \frac{D}{2 \cdot \operatorname{sen}\kappa}$$

$$h = \frac{a}{2} \operatorname{sen}\kappa$$

$$S = \frac{D \cdot a}{4}$$

Furação com prefuração

$$p = \frac{D - d_p}{2}$$

$$b = \frac{D - d_o}{2 \cdot \operatorname{sen}\kappa}$$

$$h = \frac{a}{2} \operatorname{sen}\kappa$$

$$S = \frac{(D - d_o) \cdot a}{4}$$

Figura 3.3 – Grandezas de corte no Processo de Furação, sendo, a_p = profundidade de usinagem, ***b*** = largura de usinagem, ***h*** = espessura de usinagem, ***f*** = avanço (por volta) e ***f/2*** = f_z = avanço por aresta ***D*** = diâmetro da borca e ***S*** = área da seção de corte.

Construindo um diagrama dilogarítmico, com ordenadas F_c/b e abcissas "***h***", obter-se-á uma reta, cujo coeficiente angular será ***(1-z)***. A ordenada correspondente à abscissa ***h = 1*** será o valor da coordenada k_{s1}, conforme mostra as Figuras 3.4 e 3.5.

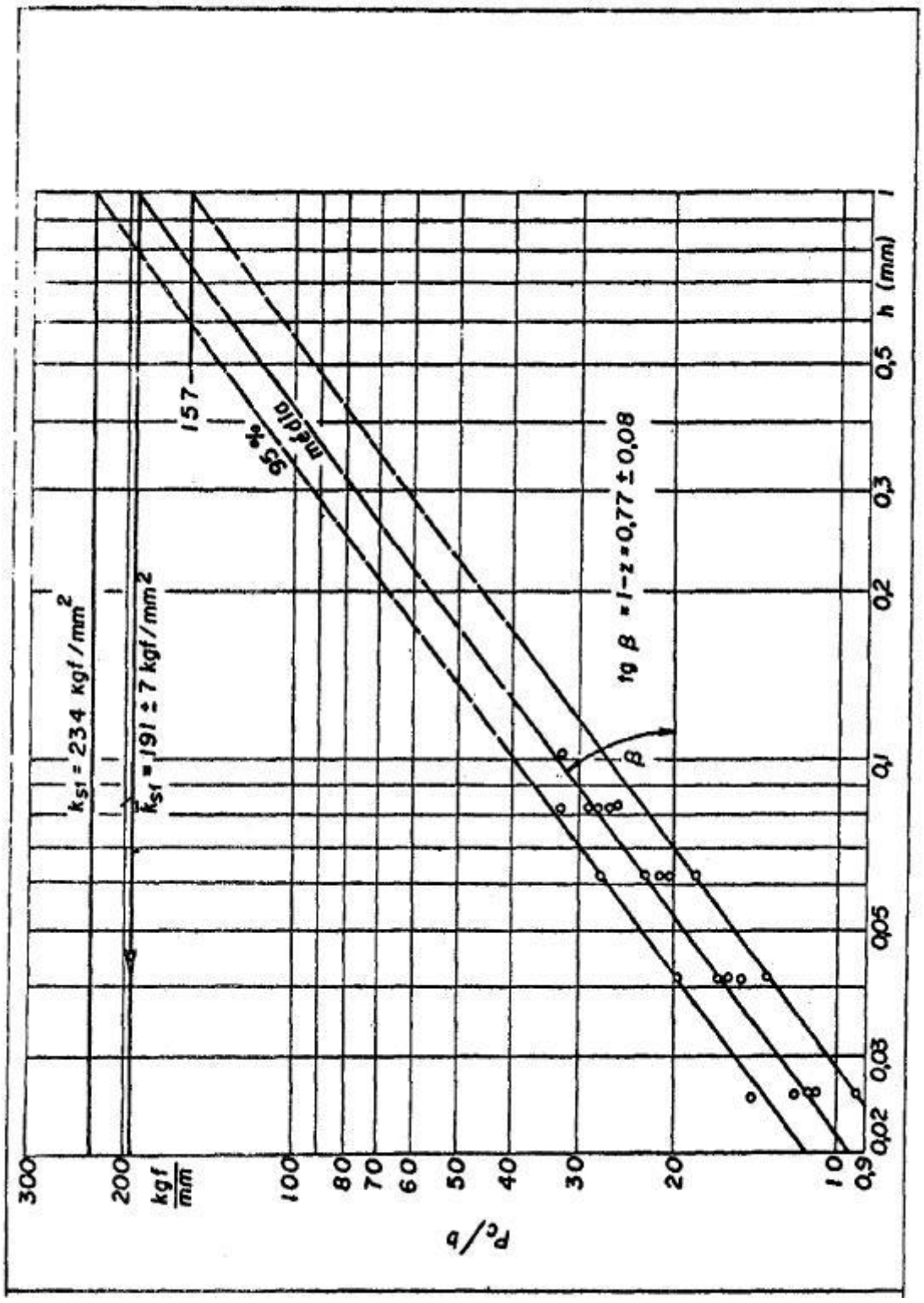


Figura 3.4 – Determinação experimental das constantes k_{s1} e $(1-z)$ da Equação de Kienzle; aço ABNT 1020

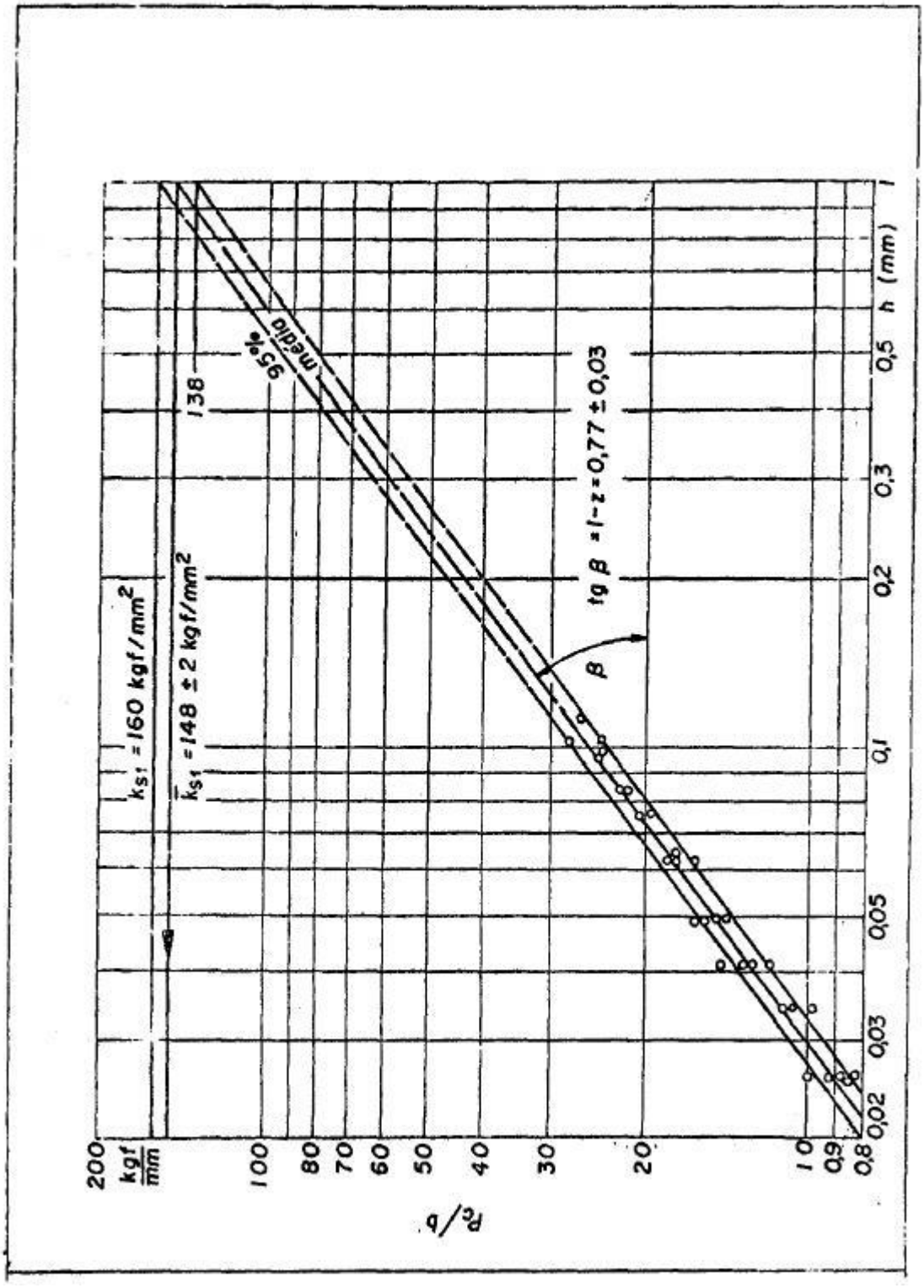


Figura 3.5 – Determinação experimental das constantes k_{s1} e $(1-z)$ da Equação de Kienzle; aço ABNT 1055

Os valores da força principal de corte F_c obtidos por ensaios experimentais apresentam uma dispersão em torno da média. Para a estimativa da reta média, isto é, a determinação das constantes A_0 e b_0, recorre-se ao método dos mínimos quadrados, ou regressão linear.

A Tabela 3.2 apresenta os resultados dos ensaios realizados por H. Daar. O momento de torção é dado por:

$$M_t = PF_c \frac{D}{2} = k_{s1} \bullet b \bullet h^{1-z} \frac{D}{2}$$

ou

$$M_t = k_{s1} . \frac{D^2}{4.sen\chi} . \left(\frac{f}{2} sen\chi\right)^{1-z} \qquad (3.11)$$

sendo $\chi = \frac{\sigma}{2} = 59^o$ de acordo com a Figura 3.3.

Tabela 3.2 – Coeficientes ks1 e (1-z) para obtenção do momento de torção na furação em cheio com brocas helicoidais para diversos aços.

Barra nº	Aço ABNT/SAE ou Villares	σ_r kgf/mm²	Pressão unitária de corte kgf/mm² média $\bar{k}_{s1}$	Lim.sup.95% k_{s1}	(1-z)
10	1085	88,5	245 ± 5	270	0,86 ± 0,04
13	1020	38,5	191 ± 7	234	0,77 ± 0,08
31	1065	83,2	200 ± 7	243	0,84 ± 0,07
32	1055	78,3	148 ± 2	160	0,77 ± 0,03
37	1025	45,0	158 ± 3	177	0,75 ± 0,04
8	52100	64,0	281 ± 6	313	0,77 ± 0,05
46	VM20	64,9	154 ± 6	186	0,72 ± 0,07
47	VND	74,4	240 ± 8	288	0,76 ± 0,08
48	VS60	96,0	154 ± 11	220	0,68 ± 0,17
49	VW 3	71,7	250 ± 8	300	0,81 ± 0,07
50	VMO	73,0	284 ± 7	326	0,87 ± 0,05
51	VCO	82,6	347 ± 8	391	0,92 ± 0,05

3.2 - Cálculo de força de corte para a furação com pré-furação

Como foi visto anteriormente (Figura 3.1), grande parte da força de avanço na furação é utilizada pela aresta transversal. Para diminuir essa influência foram estudadas afiações especiais nas brocas helicoidais. Consegue-se evitar as influências da aresta transversal executando furos em peças, onde já existe um furo inicial (pré-furação) com diâmetro maior ou igual ao diâmetro do núcleo da

broca. Desta forma, torna-se importante o estabelecimento de fórmulas experimentais, que forneçam o momento de torção e a força de avanço na furação com pré-furação.

Foi sugerido inicialmente por Schalbroch a aplicação da fórmula de Kienzle ao processo de furação com pré-furação, por analogia ao torneamento interno (Figura 3.6). A força de corte $\boldsymbol{F}_c$ para cada aresta principal de corte é segundo a fórmula de Kienzle:

$$\boldsymbol{F}_c = k_{s1} \bullet b \bullet h^{1-z} \qquad (3.12)$$

onde:

$$\boldsymbol{b} = \frac{\boldsymbol{D-d_0}}{\boldsymbol{2.sen\chi}}$$

$$\boldsymbol{h} = \frac{\boldsymbol{f}}{\boldsymbol{2}}.\boldsymbol{sen\chi}$$

$\boldsymbol{k}_{s1}$ e ***(1-z)*** = constantes do material

O momento de torção será então:

$$\boldsymbol{M_t} = \boldsymbol{F_c}.\frac{\boldsymbol{D-d_0}}{\boldsymbol{2}} \qquad (3.13)$$

$$\boldsymbol{M_t} = \boldsymbol{k_{s1}}.\frac{\boldsymbol{D^2-{d_0}^2}}{\boldsymbol{4.sen\chi}}.\left(\frac{\boldsymbol{f}}{\boldsymbol{2}}.\boldsymbol{sen\chi}\right)^{\boldsymbol{1-z}} \qquad (3.14)$$

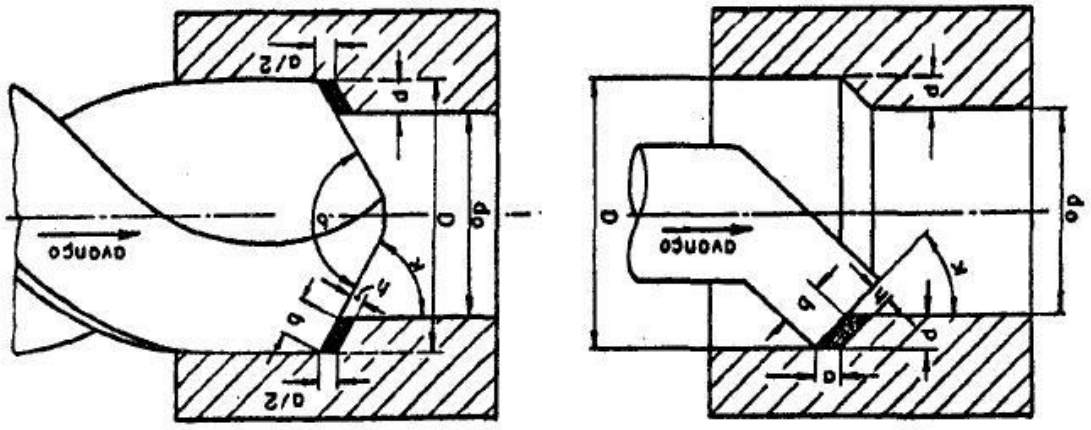


Figura 37 - Analogia entre os processos de torneamento interno e de furação com pré-furação, segundo Schallbroch.

Figura 3.6 – Analogia entre os processos de torneamento interno e de furação com pré-furação, segundo Schallbroch.

Esta solução, aparentemente simples e prática do problema, é puramente teórica e deve ser comprovada experimentalmente. No entanto, há uma boa analogia e os resultados devem ser considerados suficientemente reais, assim como aqueles aplicados ao torneamento. Analisando

cuidadosamente as condições em que foram estabelecidos os parâmetros k_{s1} e ***(1-z)*** da Equação de Kienzle, constatou-se que, apesar das diferenças apreciáveis existentes entre processos de torneamento e de furação em cheio, os valores das constantes são aproximadamente iguais em ambos os processos de usinagem. No entanto, há diferença entre as velocidades de corte de ambos os processos, assim as forças de corte do processo de furação são 5 a 8% maiores que as forças de corte do processo de torneamento. As condições de atrito nas estrias da broca, levam às forças de furação serem cerca de 8 a 10% maiores que as forças de torneamento. Há ainda a existência da aresta transversal de corte, o que leva as forças de furação serem de 3 a 5% maiores que as forças de torneamento. A diferença entre os ângulos de saída da broca helicoidal, leva as forças de corte do processo de furação da ordem de 18% menores que as forças de corte do processo de torneamento. Balanceando estes quatro fatores, vê se que pode haver uma compensação dos efeitos que contribuiriam para o aumento das forças de furação e do efeito que diminuiria esta força. De maneira geral, deve-se usar essa analogia com cuidado.

H. Daar propôs uma equação experimental para a determinação do momento de torção na furação com pré-furação, como sendo:

$$\boldsymbol{M_t = C_o . f^{1-z_0} . D^{2-x_0} . (D^{x_0} - d_0{}^{x_0})} \qquad (3.15)$$

onde: M_t = momento de torção (kgf • *mm*)

C_0***; 1-***z_0***;*** x_0 = constantes do material, Tabela 3.3

D = diâmetro do furo (mm)

d_0 = diâmetro da pré-furação (mm)

f = avanço (mm/rev)

Tabela 3.3 – Valores dos coeficientes C0, (1-z0) e xo para diversos materiais, para determinação do momento torsor com pré-furação usando brocas helicoidais

Barra nº	aço ABNT/SAE ou Villares	σ_r $\frac{kgf}{mm^2}$	$\overline{C}_o$ (médio)	Co Lim. 95%	$1-z_o$	x_o
10	1085	88,5	27,6	34,2	0,71	1,9
13	1020	38,5	24,1	27,2	0,77	1,6
31	1065	83,2.	18,9	20,1	0,70	2,1
32	1055	78,3	20,2	25,1	0,66	1,7
37	1025	45,0	22,0	24,8	0,74	1,9
8	52100	64,0	34,8	41,6	0,70	2,5
46	VM 20	64,9	21,7	24,6	0,70	1,9
47	VND	74,4	37,6	41,2	0,78	1,9
48	VS 60	96,0	47,5	84,5	0,69	0,5
49	VW 3	71,7	26,6	32,0	0,75	2,1
50	VMO	73,9	31,0	35,9	0,80	1,7
51	VCO	82,6	31,0	36,4	0,81	1,8

4 – FORÇA DE AVANÇO NA FURAÇÃO

4.1 – Cálculo de força de avanço para a furação em cheio

Na furação em cheio a força de avanço pode ser determinada usando-se a Equação Spur:

$$\boldsymbol{F_f = k_{n1}.D.h^{1-y}} \quad (4.1)$$

A Tabela 4.1 traz os valores das constantes para esse caso.

Tabela 4.1 – Coeficientes k_{n1} e $(1-y)$ para cálculo da força de avanço na furação em cheio com brocas helicoidais em diversos materiais.

barra nº	Aço ABNT/SAE ou Villares	σ_r kgf/mm²	press.unit.de avanço kgf/mm²		(1-y)
			média $\bar{k}_{n1}$	Lim.sup.95% k_{n1}	
10	1085	88,5	331 ± 13	408	0,71 ± 0,09
13	1020	38,5	151 ± 6	187	0,66 ± 0,08
31	1065	83,2	101 ± 2	111	0,55 ± 0,04
32	1055	78,3	105 ± 5	131	0,61 ± 0,08
37	1025	45,0	117 ± 4	139	0,64 ± 0,07
8	52100	64,0	207 ± 10	270	0,63 ± 0,11
46	VM 20	64,9	109 ± 4	134	0,59 ± 0,08
47	VND	74,4	205 ± 9	256	0,68 ± 0,09
48	VS 60	96,0	183 ± 10	236	0,67 ± 0,10
49	VW 3	71,7	182 ± 6	219	0,66 ± 0,07
50	VMO	73,0	193 ± 7	231	0,70 ± 0,07
51	VCO	82,6	185 ± 6	221	0,69 ± 0,07

4.1 – Cálculo de força de avanço para a furação com pré-furação

Segundo H. Daar, o valor da força de avanço para a furação com pré-furação pode ser calculado por:

$$F_f = B_0 . f^{1-y_0} . D^{1-w_0} . (D^{w_0} - {d_0}^{w_0}) \quad (4.2)$$

Da qual os coeficientes são obtidas na Tabela 4.2

Tabela 4.2 – Valores dos coeficientes B0, (1-y0) e w0 de diversos materiais para a determinaçãp da força de avanço na furação com pré-furação.

Barra nº	aço ABNT/SAE ou Villares	σ_r kgf/mm²	$\bar{B}_o$ médio	B_o Lim.95%	1 - y_o	w_o
10	1085	88,5	38	45	0,51	0,9
13	1020	38,5	112	131	0,61	0,2
31	1065	83,2	27,8	32,6	0,44	0,6
32	1055	78,3	38	57,4	0,38	0,4
37	1025	45,0	41,5	53,6	0,57	0,6
8	52100	64,0	64,4	95	0,54	1,2
46	VM 20	64,9	46	50,4	0,54	0,5
47	VND	74,4	93,5	106,5	0,68	0,6
48	VS 60	96,0	- 69	115	0,40	-0,2
49	VW 3	71,7	52,2	65,5	0,61	0,7
50	VMO	73,0	-268	351	0,64	-0,1
51	VCO	82,6	74,5	88,5	0,68	0,5

5. SELEÇÃO DE VELOCIDADE DE CORTE E DE AVANÇO EM FURAÇÃO

Uma broca que fura um dado material é solicitada pelas forças de corte a torção, compressão, flambagem e flexão. A resistência da broca de um lado e a capacidade da máquina de outro lado, determinarão o avanço máximo permissível para um dado caso. O conhecimento do avanço máximo permissível é de grande interesse., já que o avanço é diretamente proporcional ao tempo de furação. A solicitação a flambagem é de importância somente para brocas normais com diâmetros inferiores a 3,5 mm ou para brocas extra-longas. Para essas brocas o avanço máximo é geralmente determinado pela condição de resistência da broca. Nas brocas de diâmetros maiores entra em jogo a questão da resistência mecânica da broca e da rigidez da máquina, obtendo-se uma segunda limitação para o avanço máximo admissível. Há diagramas que apresentam todas essas limitações de acordo com o diâmetro da broca e do material de que é fabricada. Geralmente, a capacidade de uma furadeira é especificada pelo diâmetro máximo que pode ser furado num dado material.

O desgaste de uma broca é observado principalmente em dois pontos: na ponta da aresta cortante, próximo a periferia da bronca onde a velocidade do corte é máxima; na aresta transversal de corte, sendo então indicio de um avanço exagerado. À medida que prossegue o desgaste da broca, o momento de torção e a força de avanço aumentam. O aumento da força de avanço e do momento de torção está relacionado ao desgaste progressivo das arestas cortantes próximo a periferia. Na furação é mais prático trabalhar com o comprimento total furado durante a vida da broca, do que o tempo de

furação. A definição da vida da broca é então: “o comprimento total furado, em determinadas condições de usinagem, até a força de avanço ou o momento de torção alcançarem um aumento de em relação ao valor inicial.” Em geral, adota-se o aumento do momento de torção como critério de vida. Quanto ao aumento percentual admissível, não há uniformidade nas opiniões. Valores de ordem de 30-35% tem sido sugeridos. Neste caso, poder-se-ia dizer que uma broca está gasta quando o momento de torção exceder 30% o seu valor inicial, mantendo as condições de usinagem.

Sobre a vida das brocas em função da velocidade de corte não existem informações tão completas como as encontradas para o torneamento. Dados experimentais, no entanto, indicam que é melhor trabalhar com avanço alto e velocidade de corte baixa, para prolongar a vida das brocas. Por outro lado o avanço máximo está sujeito às limitações já discutidas. Para orientação pode-se usar as Tabelas 4.3 e 4.4 como ponto de partida para operações comuns de furação.

Tabela 4.3 – Valores iniciais recomendados de velocidade de corte, v_c, e de avanço, f, para operações de furação usando brocas de aço carbono e aço rápido.

Para Brocas de	Velocidade de corte (m/min)	MATERIAL	Avanço Rotação	Diâmetro da broca, em mm										
				1	2	5	8	12	16	25	40	63		
				Avanço e Rotação										
Aço rápido	10...18	Aço carbono, até 50 kg*/mm²	mm/v	0,015	0,03	0,09	0,12	0,16	0,18	0,20	0,22	0,25		
			rpm	4000	2000	1000	630	400	315	160	100	63		
	9 ...12	Aço carbono, acima de 50 kg*/mm²	mm/v	0,015	0,03	0,08	0,11	0,14	0,16	0,16	0,20	0,22		
			rpm	3150	1600	800	500	315	250	125	80	50		
	8...14	Ferro fundido até 18 kg*/mm²	mm/v	0,025	0,06	0,12	0,18	0,22	0,25	0,30	0,35	0,40		
			rpm	3150	1600	800	500	315	250	125	80	50		
	6... 9	Ferro fundido acima de 18 kg*/mm²	mm/v	0,012	0,03	0,06	0,10	0,12	0,14	0,16	0,16	0,20		
			rpm	2000	1000	500	315	200	160	80	50	32		
	Até 80	Latão para parafuso (duro)	mm/v	0,03	0,07	0,14	0,20	0,25	0,30	0,38	0,45	0,50		
			rpm	10000	8000	4000	3150	2000	1600	800	500	315		
	18...30	Latão dutil	mm/v	0,015	0,03	0,08	0,11	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22		
			rpm	6300	3150	1250	1000	630	500	250	160	100		
	15...25	Cobre e bronze vermelho	mm/v	0,015	0,03	0,09	0,12	0,16	0,18	0,20	0,22	0,25		
			rpm	5000	2500	1000	800	500	400	200	125	80		
	Até 80	Metais leves	mm/v	0,02	0,04	0,10	0,14	0,18	0,20	0,22	0,25	0,28		
			rpm	10000	0,05	0,14	0,20	0,28	0,30	0,36	0,40	0,45		
			rpm	10000	8000	4000	3150	2000	1600	800	500	315		
	25...40	Aço carbono até 50 kg*/mm²	mm/v	0,015	0,03	0,11	0,16	0,22	0,26	0,30	0,40	0,45		
			rpm	8000	4000	2000	1600	1000	800	400	250	125		
	25...32	Aço carbono 50 ... 70 kg*/mm²	mm/v	0,015	0,03	0,10	0,14	0,18	0,22	0,30	0,40	0,45		
			rpm	8000	4000	2000	1250	800	630	315	200	125		

Para Brocas de	Velocidade de corte (m/min)	Material	Avanço / Rotação	Diâmetro da broca em mm								
				1	2	5	8	12	16	25	40	63
				Avanço e Rotação								
Aço rápido	20 28	Aço carbono, acima de 70 kg/mm²	mm/giro	0,01	0,025	0,07	0,12	0,16	0,20	0,25	0,32	0,35
			giro/min	6300	3150	1600	1000	630	500	250	160	100
	12 20	Aço liga, 70 ... 90 kg/cm²	mm/giro	0,008	0,02	0,06	0,10	0,14	0,18	0,22	0,28	0,30
			giro/min	4000	2000	1000	800	500	315	200	100	63
	8 14	Aço liga, 90 ... 110 kg/cm²	mm/giro	0,007	0,01	0,04	0,08	0,12	0,14	0,18	0,25	0,27
			giro/min	2500	1250	630	500	315	200	125	63	40
	20 35	Ferro fundido até 18 kg/cm²	mm/giro	0,025	0,06	0,16	0,25	0,30	0,35	0,45	0,50	0,56
			giro/min	6300	4000	2000	1250	800	630	315	160	100
	15 25	Ferro fundido acima de 18 kg/mm²	mm/giro	0,012	0,04	0,09	0,14	0,20	0,25	0,30	0,36	0,40
			giro/min	5000	3200	1600	1000	630	500	250	125	80
	7 12	Aço inoxidável V 2 A (AISI 304	mm/giro	0,006	0,02	0,06	0,10	0,14	0,18	0,22	0,28	0,30
			giro/min	2500	1600	800	500	315	250	125	63	40
	Até 120	Latão para parafusos (duro)	mm/giro	0,03	0,07	0,16	0,25	0,32	0,40	0,50	0,63	0,71
			giro/min	12500	10000	6300	5000	3150	2500	1250	630	400
	Até 60	Latão dúctil	mm/giro	0,02	0,04	0,10	0,14	0,18	0,22	0,30	0,40	0,45
			giro/min	8000	6300	2500	2000	1250	1000	500	315	200
	Até 70	Cobre e Bronze vermelho	mm/giro	0,02	0,04	0,12	0,16	0,22	0,25	0,30	0,40	0,45
			giro/min	8000	6300	2500	2000	1250	1000	500	315	200
	Até 120	Metais leves, dúcteis	mm/giro	0,02	0,05	0,14	0,20	0,25	0,32	0,40	0,45	0,50
			giro/min	10000	8000	6300	5000	3150	2500	1250	630	400
	Até 160	Metais leves endurecidos	mm/giro	0,02	0,06	0,16	0,25	0,32	0,40	0,50	0,63	0,71
			giro/min	12500	10000	8000	6300	4000	3150	1600	800	500
	Até 200	Ligas de magnésio	mm/giro	0,025	0,07	0,20	0,30	0,40	0,50	0,63	0,71	0,80
			giro/min	12500	10000	8000	6300	5000	4000	2000	1000	630

Tabela 4.4 – Valores iniciais recomendados de velocidade de corte, v_c, e de avanço, f, para operações de furação usando brocas de metal duro.

	Metal duro	Velocidade mínima de corte recomendada (m/min)	Velocidade econômica de corte (m/min)	Avanço (mm/v)		
				Diâmetro da broca (mm)		
				3-6	9-25	acima de 25
Aço até 75 kg*/mm^2 Aço fundido até 50 kg*/mm^2	K 10	25	40-60	0,02-0,08	0,08-0,15	0,1-0,2
Aço até 110 kg*/mm^2 Aço fundido acima de 70 kg*/mm^2	K 10- P 30	15	25-35	0,02-0,06	0,06-0,1	0,1-0,15
Aço acima de 110 kg*/mm^2 Aço até 140 kg*/mm^2	K 10	12	15-25	0,02-0,04	0,04-0,08	0,05-0,1
ferro até HB 200	K 10	12	60-75	0,04-0,1	0,1 -0,2	0,15-0,35
ferro com HB acima de 200	K 10	15	30-40	0,02-0,06	0,06-0,15	0,1 -0,2
Latão, bronze	K 10	-	80-100	0,04-0,06	0,08-0,15	0,1 -0,2
Ligas de zinco	K 10	-	80-120	0,04-0,1	0,08-0,15	0,1 -0,25
Metais leves	K 10	-	100-200	0,04-0,1	0,08-0,15	0,1 -0,25
Ligas de alumínio para pistões	K 10	-	60-80	0,04-0,08	0,08-0,1	0,1 -0,15
Materiais plásticos	K 10	-	80-100	0,04-0,08	0,08-0,15	0,08-0,2
Mármore	K 10	-	25-30			

As brocas com pastilhas de metal duro podem ser usadas com vantagem em muitos casos. Requisitos essenciais são potência e rigidez convenientes da máquina e rotações suficientemente elevadas. As propriedades características do metal duro exigem uma certa velocidade mínima, indicada na Tabela 4.3, a qual deve ser respeitada. Os avanços recomendados são sensivelmente inferiores (1/2 até 1/3) dos avanços recomendados para as brocas de aço rápido, afim de manter baixas as forças de corte. A velocidade econômica de corte depende da série de fatores citados referente aos aspectos econômicos da usinagem variando, portanto de indústria para indústria.