


UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO PROCESSO DE FURAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

040/85

Este exemplar corresponde a
revisão final da Tese elaborada
por Alexandre Eduardo D'Amaz
e aprovada pela Comissão Julga-
dora em 04/06/85


PROF. NIVALDO LEMOS CUPINI
DEZ - FÍS. - UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Anselmo Eduardo Diniz

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Campinas - UNICAMP,
como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Prof. Dr. NIVALDO LEMOS CUPINI
Orientador

- CAMPINAS -

1985

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

À minha esposa, Célia
Companheira de todas as horas
À meus pais e irmãos
Eternos auxiliadores
À Deus
Responsável por tudo.

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus agradecimentos:

- Ao Prof. Dr. NIVALDO LEMOS CUPINI, pela orientação, apoio e amizade de sempre.
- Aos colegas da UNICAMP - Sergio Botton, Paulão - que puderam me ajudar com o incentivo, críticas e comentários, tão importantes na elaboração do trabalho.
- Aos funcionários Aristides, Jaime, Mara, Taka, Carlos, por tudo que fizeram.
- À FINEP, Siderúrgica Nossa Senhora Aparecida e à SKF - Fábrica Paulista de Brocas pelo apoio na obtenção dos equipamentos, materiais e ferramentas necessários.
- Finalmente, aos amigos do peito - Ricardo, Jorge, Marcão, Jussara, Iberê, Sr. Abelardo - agradeço a compreensão, o incentivo, o papo amigo e na hora certa que sempre me dispensaram.

O autor.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMO	
ABSTRACT	
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	
AÇO INOXIDÁVEL	3
2.1. AÇOS INOXIDÁVEIS TRABALHADOS	3
2.1.1. Aços Inoxidáveis Austeníticos	5
2.2. USINAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS	7
2.2.1. Usinagem dos Aços Inoxidáveis Austeníticos.	10
2.3. AÇOS INOXIDÁVEIS COM USINABILIDADE MELHORADA (USI- NAGEM FÁCIL)	16
2.3.1. Aditivos para Usinagem Fácil	19
2.3.2. O Enxofre como Aditivo de Usinagem Fácil ..	20
2.3.3. Resistência à Corrosão dos Aços Inoxidáveis com Enxofre	26
BIBLIOGRAFIA	29
CAPÍTULO 3	
ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE FURAÇÃO	32
3.1. FORMAS CONSTRUTIVAS E GEOMETRIAS DAS BROCAS HELI- COIDAIS	33
3.2. A FORÇA DE AVANÇO NA FURAÇÃO	38
BIBLIOGRAFIA	42

CAPÍTULO 4

USINABILIDADE - O ENSAIO DA FORÇA DE AVANÇO CONSTANTE NA FURAÇÃO	43
BIBLIOGRAFIA	47

CAPÍTULO 5

MÉTODOS EXPERIMENTAIS	48
5.1. MATERIAL	48
5.2. FERRAMENTAS	50
5.3. ENSAIOS DE FURAÇÃO	55
BIBLIOGRAFIA	63

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
6.1. ENSAIOS REALIZADOS COM BROCAS TIPO N COM AFIAÇÃO CÔNICA NORMAL - INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO NO AVANÇO .	64
6.2. ENSAIOS REALIZADOS COM BROCAS TIPO N COM AFIAÇÃO CRUZADA - INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO NO AVANÇO	78
6.3. ENSAIOS REALIZADOS COM BROCA HD-100 - INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO NO AVANÇO	79
6.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NA FURAÇÃO COM AS TRÊS GEOMETRIAS DE BROCAS, PARA AÇO 316 ..	80
6.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NA FURAÇÃO COM AS TRÊS GEOMETRIAS DE BROCAS, PARA AÇO 303 ..	82
6.6. RESULTADOS OBTIDOS PARA O ÍNDICE DE USINABILIDADE	83
BIBLIOGRAFIA	86

	Pág.
CAPÍTULO 7	
CONCLUSÕES	87
CAPÍTULO 8	
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
APÊNDICE 1	
RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FURAÇÃO - TEMPO DE CORTE (s).	91
APÊNDICE 2	
PROCEDIMENTO PARA CÁLCULO POR AMOSTRAGEM DA MÉDIA E DO DESVIO PADRÃO DE UMA POPULAÇÃO CONTÍNUA	99

A B S T R A C T

The effect of the drill rotation and geometry on the drilling process of the free machining ABNT303 and the ABNT316 austenitic stainless steels has been studied. Thus, once the feed force and the drill diameter are kept constant, it can be observed how the feed values vary as the drill rotation and geometry are changed in the drilling process with or without a previous hole. Also, the machinability rating variation of the 316 steel relative to the 303 steel was detected.

The low efficiency of the process can be traced to the high deformation caused by the transversal cutting edge if low rotations are concerned. As the rotation was increased and/or the transversal cutting edge action was partially or completely avoided by the drill sharpening or the previous hole execution, the feed values increased, what implies a higher process efficiency. This can be associated with lower values of the deformation degree.

The 316 steel machinability rating increase associated with a higher process efficiency makes clear that the 316 steel process efficiency improvement was greater than that for the 303 steel.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A perda de peças metálicas por ação da corrosão tem preocupado engenheiros e metalurgistas que procuram constantemente não só aperfeiçoar ou desenvolver novos métodos de proteção, como também aperfeiçoar ou criar novas ligas que apresentem a característica de resistência à corrosão. Assim, os aços inoxidáveis têm sido bastante utilizados em diversas aplicações.

Dentre os diversos tipos de aços inoxidáveis, talvez o tipo que encontra maior aplicação é o aço inoxidável austenítico, que é o mais resistente à corrosão nos diversos meios, dentre todos eles. Os aços inoxidáveis austeníticos utilizados no presente trabalho foram: o aço ABNT316 - muito utilizado para equipamentos da indústria química e da indústria de papel - e o aço ABNT303, de usinagem fácil - utilizado para peças que sofrem muita usinagem como eixos, parafusos, porcas, peças de carburador, etc.

Esse tipo de aço porém, devido à certas características que serão discutidas no decorrer do trabalho, apresentam problemas sérios quando submetido à usinagem, particularmente quando submetido à furação. Por outro lado, ao se adicionar nestes aços elementos que facilitem a sua usinagem, tem-se na maioria das vezes um relativo comprometimento da resistência à corrosão e de outras propriedades mecânicas, freqüentemente motivos da seleção dos mesmos.

Das razões acima expostas, nasceu a idéia de se realizar este trabalho, cujo objetivo primeiro é o de procurar as melhores condições de usinagem (rotação da broca, geometria da ferramenta, existência ou não do pré-furo) para a furação do aço ABNT316 comparando o seu desempenho com o do aço ABNT306, mantendo constante os esforços de avanço e o diâmetro da broca.

Para isso foi utilizado o ensaio de usinabilidade segundo o critério da força de avanço constante na furação, usando me-

todologia citada na literatura. Com isso surge um segundo objetivo: como foi usado um ensaio de usinabilidade variando-se as condições do ensaio, pode-se então verificar a intercambialidade do índice de usinabilidade retirado do ensaio, com as diversas condições de usinagem. Assim, pode-se chegar à constatação da necessidade ou não da padronização do ensaio de usinabilidade segundo o critério da força de avanço constante na furação.

Este trabalho apresenta-se dividido em capítulos, quais sejam:

Capítulo 1 - Introdução - área de aplicação do trabalho, sua importância e seus objetivos.

Capítulo 2 - O Aço Inoxidável - revisão bibliográfica sobre características mecânicas e de usinagem dos aços inoxidáveis e em particular do aço inoxidável austenítico.

Capítulo 3 - Algumas Considerações sobre o Processo de Furação.

Capítulo 4 - Usinabilidade - O Ensaio de Força de Avanço Constante na Furação.

Capítulo 5 - Métodos Experimentais - detalhes sobre as ferramentas, materiais e metodologia utilizados nos ensaios.

Capítulo 6 - Resultados e Discussões.

Capítulo 7 - Conclusões.

Capítulo 8 - Sugestões para Trabalhos Futuros.

CAPÍTULO 2

AÇO INOXIDÁVEL

2.1. AÇOS INOXIDÁVEIS TRABALHADOS

Aços inoxidáveis são ligas ferrosas que possuem um mínimo de 12% de cromo com a finalidade de resistir à corrosão. Outros elementos de liga também elevam a resistência à corrosão, como o níquel, o cobre, o alumínio, o silício e o molibdênio. Os aços inoxidáveis podem também conter estes outros elementos em menores teores; o teor de níquel pode atingir 8% [1]. A resistên-cia à corrosão de ligas à base de Fe + Cr está associada ao fenômeno de passivação, isto é, a formação de uma camada de óxidos mistos (de ferro, cromo e outros elementos de liga) e a dissolução desta no meio corrosivo. A formação ou não desta camada, sua impermeabilidade e sua taxa de dissolução no meio corrosivo, controlarão a resistência à corrosão do material, no meio corrosivo em questão [2].

Os aços inoxidáveis são divididos em aços inoxidáveis ferríticos, martensíticos, austeníticos e endurecíveis por precipitação, divisão essa baseada na composição, na microestrutura e na possibilidade de endurecimento por tratamento térmico [1].

Um aço inoxidável é basicamente um sistema ferro-cromo. Consideraremos então, primeiramente, o diagrama de equilíbrio da liga Fe-Cr, isenta de qualquer quantidade de carbono. Os principais pontos a notar no referido diagrama, mostrado na Figura 2.1, são os seguintes:

- presença da chamada "lupa austenítica", a qual indica que todas as ligas de composição à direita da lupa, com teores de cromo acima de aproximadamente de 12 ou 13% em peso, solidificam na forma de ferrita e como tal permanecem até a temperatura ambiente;
- a presença de uma fase Fe-Cr, denominada "fase sigma" entre 42 e 48% de cromo. À esquerda do campo em que está presente somente a fase sigma, nota-se um campo em que estão presentes duas fases: ferrita ou ferro alfa e sigma. Assim sendo, os aços inoxidáveis ferríticos com teor de cromo acima de cerca de 23% (como

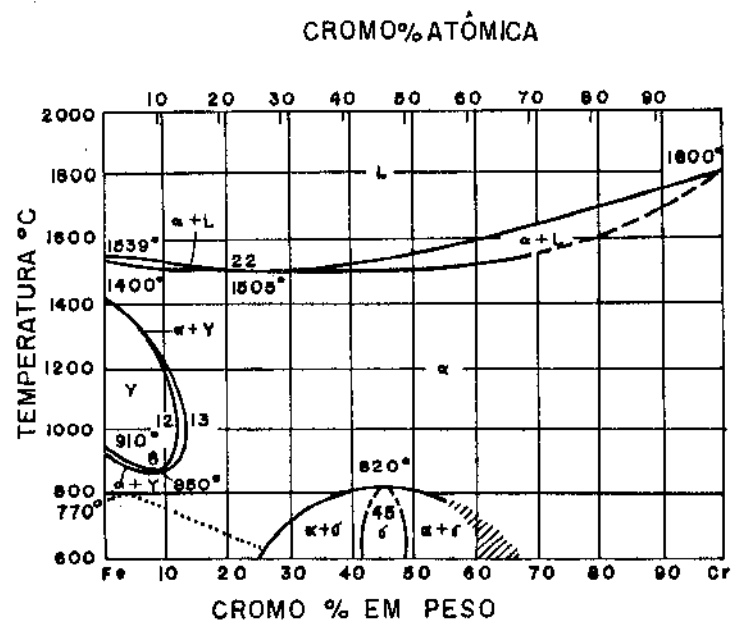


Figura 2.1 - Diagrama de equilíbrio ferro-cromo. [1]

o ABNT 446) já podem apresentar essa fase quebradiça.

O sistema Fe-Cr torna-se bem complexo quando o carbono estiver presente, mas seu estudo é simplificado pela observação do que ocorre no diagrama ferro-carbono quando se introduz cromo em teores crescentes. O efeito mais importante é verificado na zona austenítica (Figura 2.2) que diminui, até praticamente desaparecer para cerca de 20% de cromo. Esse fato leva à conclusão que à medida que o teor de cromo cresce, a composição das ligas Fe-Cr-C, que permitirá a obtenção de endurecimento total por t \hat{e} mpera, fica reduzida a limites cada vez mais estreitos [3].

2.1.1. Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são formados pela adição de um elemento que tenha estrutura cúbica de face centrada, tal como o níquel ou o manganês, ao sistema Fe-Cr. A região de fase gama (austenita) é expandida em virtude da adição deste elemento de liga e, quando o níquel ou manganês é adicionado em quantidade de suficiente, é suprimida a formação de ferrita alfa.

Assim, é possível ligar os aços Fe-Cr com um mínimo de 8% de níquel para se obter uma estrutura austenítica estável à temperatura ambiente [1].

A figura 2.3 mostra a influência aproximada do níquel quando adicionado a uma liga Fe-Cr com 18% de cromo e a influência do cromo quando adicionado a uma liga Fe-Ni com 8% de níquel. A figura mostra que a liga 18-8 (18% de cromo e 8% de níquel) seria, em princípio, ferrítica à temperatura ambiente, no estado de equilíbrio. Entretanto, as condições de sua fabricação são tais, que o equilíbrio não é geralmente alcançado, de modo que a liga, na realidade, é austenítica nas temperaturas de serviço [3].

Estes aços não são magnéticos ao contrário dos ferríticos e martensíticos. As ligas austeníticas mais comuns são aços com ferro-cromo-níquel e são conhecidas como a série 300 (classificação ABNT). Por causa de sua alta porcentagem de cromo e níquel, são os mais resistentes à corrosão do grupo de aços inoxidáveis.

Eles não sofrem nenhuma transformação durante o tratamento térmico, mas podem ser significativamente endurecidos por trabalho a frio; o limite de escoamento de um aço 301 pode ser aumentado de 228 a 1379 MPa com um encruamento de 45%. Este aço chega a esta resistência por causa da transformação martensítica que

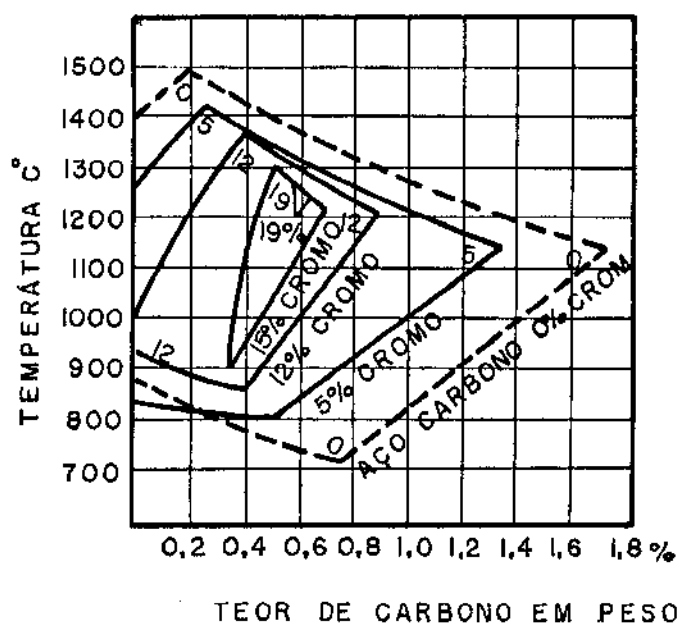


Figura 2.2 - Efeito do teor de cromo sobre o campo austenítico. [3]

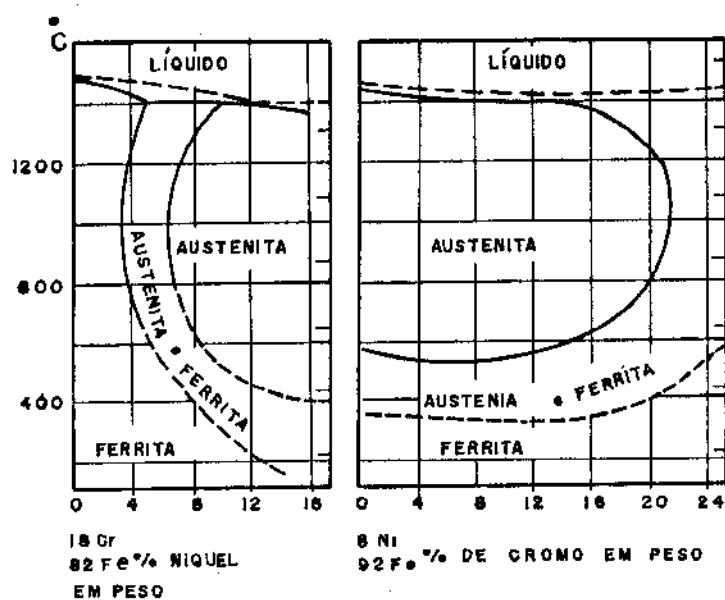


Figura 2.3 - Efeito do Ni (à esquerda) sobre a constituição de uma liga com 18% de Cr e do Cr (à direita) sobre uma liga com 8% de Ni. [3]

ocorre durante um severo trabalho a frio, que também restitui ligeiramente a magneticidade da liga.

Alguns aços da série 300 contêm alta porcentagem de elementos de liga, com cromo até 26% e níquel até 22%. Alguns aços contêm molibdênio que melhora a resistência à corrosão por pites em solução de cloretos.

O carbono é adicionado em teores mínimos, e assim mesmo, deve ser estabilizado na estrutura com elementos formadores de carbonetos, como titânio e nióbio, pois caso contrário pode provocar corrosão intergranular e perda de tenacidade devido à precipitação de carbonetos de cromo em contornos de grãos quando aquecidos entre 454 e 565°C. Isto faz com que as regiões circunvizinhas aos carbonetos de cromo precipitados fiquem pobres em cromo e assim mais suscetíveis à corrosão. O níquel pode ser substituído parcialmente pelo manganês. Quando isto acontece, estas ligas são classificadas na série 200.

Estas ligas não são endurecíveis por tratamento térmico, mas como a série 300, podem ser grandemente encruados. A substituição do níquel pelo manganês, e em alguns casos pelo nitrogênio, traz algumas vantagens econômicas, com mínimo sacrifício da resistência à corrosão.

As Tabelas 2.1 e 2.2 [1][4] mostram as composições químicas e propriedades mecânicas dos principais aços inoxidáveis.

2.2. USINAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Certas condições devem ser satisfeitas nas operações de usinagem em geral, e na usinagem dos aços inoxidáveis em particular, tais como:

- Uso de máquinas ferramentas que sejam rígidas e potentes
- Fixação rígida da peça e da ferramenta
- Manutenção de todas as ferramentas afiadas por todo o tempo
- Aplicação de fluidos de corte convenientes. Isto é particularmente importante quando se realiza cortes pesados com avanços relativamente baixos
- Uso de geometrias positivas. Esta prática é recomendável para se minimizar o encruamento e a deposição do

TABELA 2.1 - AÇOS AUSTENÍTICOS - TIPO 300 AISI [1]

Cúbica de Face Centrada, Não Magnético,
Não Endurecível Termicamente.

AISI Tipo nº	COMPOSIÇÃO NOMINAL %				
	C	Mn	Cr	Ni	Outros
301	0,15max	2,0	16-18	6,0-6,8	
302	0,15max	2,0	17-19	2,0-10,0	
304	0,08max	2,0	18-20	8,0-12	
304L	0,03max	2,0	18-20	8,0-12	
309	0,20max	2,0	22-24	12-15	
310	0,25max	2,0	24-26	19-22	
316	0,08max	2,0	16-18	10-14	2-3 Mo
316L	0,03max	2,0	16-18	10-14	2-3 Mo
321	0,08max	2,0	17-19	9-12	(5x%C) Ti Min
347	0,08max	2,0	17-19	9-13	(10x%C) Nb-Ta min.

TABELA 2.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS PADRÕES [4]

TIPO	CONDIÇÃO	LIMITE DE RUPTURA	LIMITE DE ESCOAMENTO	ALONGAMENTO EM (50,mm)	ESTRICCÃO	DUREZA	
		MPa	(0,2%) MPa	%		%	ROCWELL
201	recozido totalmente endurecido	793	379	55	-	B90	-
		1275,6 (c)	965 (c)	4 (c)	-	C41	-
202	recozido	724	379	55	-	D90	-
301	recozido totalmente endurecido	758,5	276	60	-	B85	165
		1275,6 (c)	965 (c)	8 (c)	-	C41	-
302	recozido	620,5	255	55	65	B82	155
304	recozido	586	241	55	65	B80	150
304L	recozido	551,6	207	55	65	B76	140
309	recozido	620,5	276	45	65	B85	165
310	recozido	655	276	45	65	B87	170
316	recozido	586	241	55	70	B80	150
316L	recozido	538	207	55	65	B76	145
321	recozido	600	241	55	65	B80	150
347	recozido	634	241	50	65	B84	160
403,410	recozido	517	276	30	65	B82	155
416,416	temperado(a)	-	-	-	-	C43	410
(Se)	revenido a:						
	204,5°C	1310	1000	15	55	C41	390
	426,5°C	1344,5	1035	17	55	C41	390
	760°C	620,5	414	30	70	B89	180
420	recozido	655	345	25	55	B92	195
	temperado(b)	-	-	-	-	C54	540
431	revenido a:						
	315,5°C	1586	1344,5	8	25	C50	500
431	recozido	862	655	20	60	C24	260
	temperado(b)	-	-	-	-	C24	260
	revenido a:						
	204,5°C	1413,5	1069	15	55	C43	415
	426,5°C	1413,5	1069	15	60	C43	415
	649°C	862	655	20	60	C24	260
440A	recozido	724	414	20	45	B95	215
	temperado(b)	-	-	-	-	C56	570
	revenido a:						
	315,5°C	1793	1655	5	20	C51	510
430	recozido	517	310	30	60	B82	155
430F 430F	(Se)recozido	552	379	25	60	B86	170
446	recozido	552	345	23	50	B86	170

a) Temperatura de austenitização para tempera - 982°C em barras de 25,4mm diâmetro

b) Temperatura de tempera - 1037°C em barras de 25,4mm de diâmetro

c) Mínimo.

material da peça sobre a ferramenta especialmente nos aços austeníticos que são muito suscetíveis ao encruamento [5].

Os aços inoxidáveis apresentam características de usinagem que variam para cada tipo de aço. Assim, enquanto os aços austeníticos têm tendência a causar um "empastamento" do cavaco na superfície de saída da ferramenta, podendo resultar na formação de aresta postiça de corte, os aços inoxidáveis martensíticos com altos teores de carbono são difíceis de usinar por causa da alta dureza que exige um maior esforço de corte e por causa da presença de partículas duras e abrasivas de carboneto de cromo [6].

Na furação dos aços inoxidáveis, que é a operação de usinagem estudada no presente trabalho, brocas helicoidais de aço rápido convenientemente afiadas, apresentam boa performance de usinagem. Como em qualquer material, brocas mal afiadas causam rejeições de peças, pouca precisão, acabamento superficial ruim, quebra de ferramentas, etc. Para melhores resultados, são recomendados ângulos de ponta de 118 a 140° e ângulos de folga de 6 a 15°, dependendo do tipo de aço inoxidável. O ângulo de folga deve ser suficientemente positivo para prevenir atrito excessivo ou encruamento no fundo do furo. Contudo, ele não pode ser muito grande para não enfraquecer as cunhas cortantes da ferramenta. A Tabela 2.3 mostra as velocidades de corte e os avanços recomendados para a furação de vários tipos de aços inoxidáveis [5].

2.2.1. Usinagem dos Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem um campo plástico (diferença entre as tensões de ruptura e de escoamento) grande [6] e uma alta taxa de encruamento [1], [7], [8], fazendo com que estes aços apresentem cavacos contínuos que empastam sobre a ferramenta, e, ao sofrerem a deformação inerente ao processo de usinagem, encruem, podendo formar a aresta postiça de corte.

A aresta postiça de corte altera as relações geométricas da formação do cavaco, desempenhando a função da aresta cortante, protegendo a superfície de saída da ferramenta e incentivando o desgaste na superfície de folga [9], diminuindo assim a vida da ferramenta. Além disso, causa um péssimo acabamento superficial da peça usinada e aumenta a força de usinagem que é um outro fator que influi na diminuição da vida da ferramenta [10]. Por outro la

TABELA 2.3 - VELOCIDADES DE CORTE E AVANÇOS RECOMENDADOS PARA A FURAÇÃO DE DIVERSOS AÇOS INOXIDÁVEIS [5].

DIÂMETRO (mm)	18-2 FM		416		430 F 430 Fse		420 F 420 Fse		414, 420 431, 440 A		440 B 440 C	
	v	a	v	a	v	a	v	a	v	a	v	a
3,2	50,3	0,102	33,5	0,076	30,5	0,069	15,2	0,063	13,7	0,051	13,7	0,051
6,4	50,3	0,107	33,5	0,094	30,5	0,089	16,8	0,081	14,6	0,074	14,6	0,069
9,5	50,3	0,114	33,5	0,102	30,5	0,102	16,8	0,089	14,6	0,076	14,6	0,076
12,7	50,3	0,119	33,5	0,107	30,5	0,107	16,8	0,094	14,6	0,081	14,6	0,081
19,0	51,8	0,140	35,1	0,127	32,0	0,127	18,3	0,107	15,8	0,097	15,8	0,097
25,4	51,8	0,152	35,1	0,145	32,0	0,140	18,3	0,127	15,8	0,107	15,8	0,107
31,8	53,3	0,178	36,7	0,170	33,5	0,163	19,8	0,140	16,5	0,114	16,5	0,114

v = m/min

a = mm/volta

do a deformação plástica provocada pelo processo de usinagem pode causar a transformação da austenita em martensita, o que contribui para o endurecimento local da peça e, dependendo do nível de dureza alcançado, prejudicar a usinagem [11].

Para combater o encruamento do material no processo de usinagem, alguns procedimentos são empregados. Um dos procedimentos é adicionar elementos de liga que formam inclusões frágeis, reduzindo a ductilidade e promovendo a quebra do cavaco. Um outro procedimento, é empregar o aço austenítico que tenha sido levemente encruado por trefilação ou por algum outro processo de deformação a frio anterior à usinagem [12]. Uma terceira maneira de se evitar o problema de encruamento é mudar as condições do processo de usinagem (avanço, velocidade de corte, geometria da ferramenta, etc) a fim de se minimizar a deformação plástica, diminuindo as condições para haver encruamento.

Outras características que prejudicam a usinagem destes aços são:

- a) baixa condutibilidade térmica que dificulta a extração de calor da região de corte;
- b) alto coeficiente de atrito que tem, como consequência, o aumento do esforço de corte e do calor gerado;
- c) alto coeficiente de dilatação térmica, o que torna difícil a manutenção de tolerâncias apertadas [10].

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem coeficiente de dilatação térmica cerca de 50% mais alto que os aços carbono. Além disso, todos conduzem calor a taxas que em média são 50% mais baixas que as dos aços carbono [12].

Nas Tabelas 2.4 e 2.5 [8] estão mostradas as velocidades, avanços, ângulos e material de ferramentas recomendados para o torneamento do aço inoxidável austenítico com pastilhas de metal duro. Nota-se a necessidade do uso de ângulos positivos para minimizar o recalque do cavaco e assim, dificultar seu encruamento. Elas contêm ainda condições de corte para outros aços inox.

A Figura 2.4 [13] mostra curvas de vida para a furação do aço austenítico tipo 304 para 2 tipos de brocas, tendo uma delas ângulo de hélice 28° e a outra 40° . A segunda broca é recomendada para materiais de cavacos longos. De acordo com a figura, para a velocidade de corte de 15m/min, a broca normal (ângulo de hélice $\phi = 28^{\circ}$) teve uma vida de 500mm e a segunda broca, com ângulo de hélice $\phi = 40^{\circ}$, núcleo reforçado e afiação cruzada, uma

TABELA 2.4 - VELOCIDADES DE CORTE E AVANÇOS PARA
O TORNEAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS
COM METAL DURO [8]

TIPO	DESBASTE		ACABAMENTO	
	Velocidade m/min	Avanço mm/volta	Velocidade m/min	Avanço mm/min
FERRÍTICO				
405	99-122	0,254-0,559	137-155	0,102-0,229
430-F	128-152	0,254-0,406	148-183	0,076-0,203
442	84- 99	0,305-0,432	107-125	0,076-0,203
MARTENSÍTICO				
410	99-122	0,254-0,559	128-155	0,076-0,152
403	99-122	0,254-0,457	122-149	0,076-0,152
416-F	122-152	0,254-0,508	158-183	0,076-0,229
416-Tratado térmicamente Rc 32/36	61- 70	0,229-0,356	81- 88	0,102-0,178
418	76- 98	0,254-0,457	110-125	0,076-0,178
414	76-107	0,305-0,508	110-125	0,076-0,178
420	91-116	0,254-0,432	110-130	0,103-0,229
420-Tratado térmicamente Rc 38/42	50- 56	0,229-0,330	53- 61	0,102-0,229
440C	67- 87	0,203-0,406	84- 99	0,076-0,178
AUSTENÍTICO				
302	84-100	0,178-0,381	110-125	0,102-0,229
303-F	107-130	0,229-0,406	134-152	0,102-0,229
304	91-114	0,178-0,356	113-131	0,076-0,178
316	68- 91	0,279-0,381	100-119	0,102-0,229
347	84-100	0,178-0,356	110-125	0,102-0,229
310	61- 81	0,279-0,356	87-104	0,076-0,178
ENDURECÍVEIS POR PRECIPITAÇÃO				
350-recozido	76- 95	0,254-0,406		
350-envelhe- cido - Rc42	30- 43	0,152-0,305	38- 53	0,152-0,229
17-7-Envelhe- cido Rc 32	36- 49	0,229-0,306	43- 61	0,102-0,229

TABELA 2.5 - TIPOS DE METAIS DUROS E ÂNGULOS DE FERRAMENTA RECOMENDADOS PARA A USINAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS [8]

MATERIAL	ÂNGULO DE SAÍDA (Y)	ÂNGULO DE INCLINAÇÃO (λ)	TIPO		OBSERVAÇÕES
			DESBASTE	ACABAMENTO	
FERRÍTICO	5°	5°	P05 - P45	P05 - P15	A medida que se aumenta p usa-se metal duro de classes mais próximas ao P45.
MARTENSÍTICO	5	0	P05 - P45	P05 - P15	
AUSTENÍTICO	-5	-5	P20 - P45	P05 - P15	
ENDURECÍVEIS POR PRECIPITAÇÃO	5	5	P25	P20	

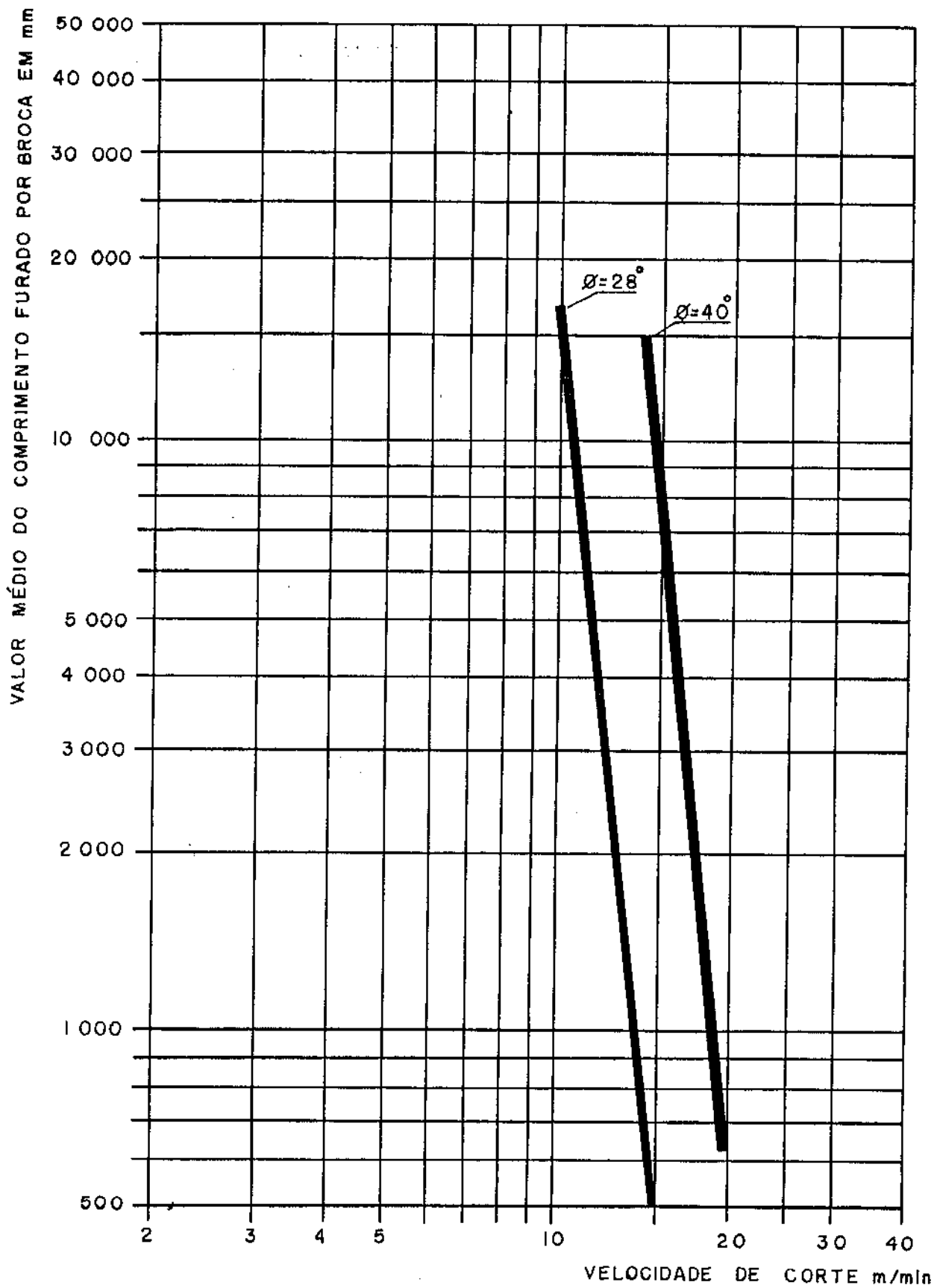


Figura 2.4 - Curva de vida da ferramenta para a furação do aço ABNT304. [13]

vida de 8000mm, ou seja, a vida desta segunda broca foi de 16 vezes maior que a primeira. Alguns anos antes de serem realizados os testes apresentados na figura, foi efetuado um ensaio semelhante para brocas de 6,0 mm de diâmetro, onde o resultado de 10 brocas utilizadas foi, em média, de 6 furos para as brocas normais e de 68 furos para as brocas especiais, ou seja, as brocas especiais tiveram um rendimento 12 vezes maior que as normais [13].

As Tabelas 2.6 e 2.7 mostram as condições de usinagem recomendadas para a furação dos aços inoxidáveis austeníticos [14].

2.3. AÇOS INOXIDÁVEIS COM USINABILIDADE MELHORADA (USINAGEM FÁCIL)

Para facilitar a usinagem de um aço inoxidável, melhorando assim a sua usinabilidade, pode-se:

- a) mudar a composição química dos aços - a adição de elementos como enxofre, selênio, telúrio, chumbo, etc, originam inclusões que por sua forma, tamanho e distribuição facilitam a ruptura do cavaco e funcionam como elemento lubrificante entre o cavaco e a ferramenta [7], [15], [16].
- b) modificar sua estrutura - em aços martensíticos temperados e revenidos, uma certa quantidade de ferrita modifica as características do cavaco e melhora o acabamento superficial [7], [16].
- c) quantidade de deformação a frio - os aços austeníticos, como já mencionado anteriormente, são muito dúteis, e por isso tem tendência à formação da aresta postiça de corte. Se, por intermédio da deformação a frio, provoca-se um encruamento nestes aços antes da usinagem, aumenta-se sua dureza e dificulta-se a formação da aresta postiça de corte. Porém, se a dureza da peça for elevada excessivamente há um desgaste excessivo da ferramenta e um acréscimo na potência necessária [7], [10], [16]. Por isso, deve haver um nível ótimo de deformação a frio para a usinagem de aços inoxidáveis austeníticos.

TABELA 2.6 - VELOCIDADES DE CORTES E AVANÇOS RECOMENDADOS PARA A FURAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS [14]

MATERIAL	DUREZA BHN	CONDIÇÃO	VELOCIDADE (m/min)	AVANÇO - mm/volta							
				DIÂMETRO DO FURO - mm							
				1,6	3,2	6,4	12,7	19,0	25,4	38,1	50,8
Aços inoxidáveis austeníticos de usinagem fácil 203 EZ, 303 303 Se, 303 MA 303 Pb, 303 Cu 303 Plus X	135 a 185	recozido	36,6	0,025	0,076	0,152	0,254	0,356	0,432	0,533	0,635
	225 a 275	trabalhado a frio	30,5	0,025	0,076	0,152	0,254	0,356	0,432	0,533	0,635
201, 304 321, 202 304L, 347 301, 305 348, 302, 308	135 a 185	recozido	16,8	0,025	0,051	0,102	0,178	0,254	0,305	0,381	0,457
	225 a 275	trabalhado a frio	15,2	0,025	0,051	0,102	0,178	0,254	0,305	0,381	0,457
302B, 314 309, 316 309S, 316L 310, 317 310S, 330	135 a 185	recozido	15,2	0,025	0,051	0,102	0,178	0,254	0,305	0,381	0,457

TABELA 2.7 - ÂNGULOS DE CORTE RECOMENDADOS PARA A FURAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS [14].

MATERIAL	DUREZA (BHN)	ÂNGULO DE PONTA (graus)	ÂNGULO DE FOLGA (graus)	ÂNGULO DA ARESTA TRANSVERSAL DE CORTE (graus)	ÂNGULO DE HÉLICE (graus)
Aço inoxidável de usinagem fácil	135-125	118	10 a 12	45 a 55	24 a 32
Aço inoxidável austenítico	200-325	118	7 a 10	45 a 55	24 a 32

A presença de partículas duras e abrasivas nos aços, tais como os óxidos de cromo e de alumínio, prejudicam a vida da ferramenta [7], [17].

2.3.1. Aditivos para Usinagem Fácil

O primeiro aditivo usado para melhorar a usinabilidade de aços inoxidáveis foi o selênio. A formação de selenetos, à semelhança dos sulfetos, tem efeito de lubrificação, reduzindo o atrito e provocando uma maior facilidade de quebra do cavaco, o que faz com que seja diminuído o calor gerado e a força de usinagem, levando a um acréscimo da vida da ferramenta.

As desvantagens do uso do selênio são sua toxicidade e seu alto custo. Além disso os aços inoxidáveis com enxofre têm substituído plenamente os aços com selênio, no que diz respeito à usinabilidade. Usa-se o aço inoxidável com selênio, quando além da usinabilidade necessita-se de ductilidade a frio. Outra vantagem destes aços é que eles apresentam um melhor acabamento superficial do que os aços com enxofre, após a usinagem.

Os aços inoxidáveis com telúrio têm sua usinabilidade melhorada, mas são muito difíceis de serem laminados por sua grande fragilidade a quente, o que pode limitar sua utilização.

Os aços inoxidáveis com chumbo apresentam um melhor acabamento superficial das peças usinadas e melhores características de deformação a frio quando comparados com aços ao enxofre. Porém não são muito usados porque não apresentaram vantagens com respeito a custos de usinagem, apresentam problemas de contaminação pelos gases de chumbo e tem efeito prejudicial na deformação a quente de diversos aços [7].

Outros elementos de adição para aumento de usinabilidade são fósforo, o alumínio e o cobre. Rieu, Rieux, Odin e Forest [18] concluíram, após realizarem testes de usinabilidade, ensaios de corte interrompido e de cisalhamento e após um estudo analítico da formação do cavaco, que os ganhos na usinabilidade ao adicionar-se 3% de cobre ao aço, são da mesma ordem de grandeza que aqueles que resultaram de uma adição de 0,15% de enxofre.

2.3.2. O Enxofre Como Aditivo de Usinagem Fácil

O enxofre é atualmente o elemento mais usado para a melhoria da usinabilidade de aços inoxidáveis. Esta melhoria é possível por causa da formação de sulfetos que o enxofre possibilita.

O papel benéfico do enxofre se manifesta por duas maneiras:

- a) o efeito de lubrificação sobre a aresta de corte que permite aumentar a velocidade de corte e/ou a vida da ferramenta;
- b) A fragmentação do cavaco é muito mais regular. Este resultado é muito importante no caso de aços austeníticos [19].

A forma, o tamanho e a distribuição dos sulfetos tem um papel importante na usinabilidade, mas o fator que mais influencia esta propriedade do material é a composição dos sulfetos. Ferro, manganês e cromo são três elementos que estão contidos nos aços inoxidáveis e que são fortes formadores de sulfetos. Dos três, o manganês é o que tem maior tendência à formação dos sulfetos e o ferro é o de menor tendência [7].

Kovach e Moskowitz [16] após experiências com micro-sonda e raios-X concluíram que a composição do sulfeto (Tabela 2.8) e sua estrutura cristalina variam com o teor de manganês presente no aço. Quando o teor de manganês é baixo (abaixo de 0,4%), duas fases distintas de sulfetos aparecem, quais sejam: sulfeto de cromo com estrutura cristalina hexagonal e sulfeto de manganês rico em cromo com estrutura cristalina cúbica. Em aços com teor de manganês intermediário (0,4 a 1,8%) somente a estrutura cristalina cúbica está presente e temos somente os sulfetos mistos de manganês e cromo. E quando o teor de manganês é alto (acima de 1,8% em peso), as inclusões consistem de sulfetos de manganês relativamente puro. Assim, por exemplo, nos aços martensíticos tipo 416 onde o teor de ferro e cromo permanece relativamente constante, a razão manganês/enxofre determina que fases estarão presentes.

A dureza de todos estes tipos de inclusões tem sido estudada em diferentes aços inoxidáveis comparando-a com a relação manganês/enxofre (Figura 2.5) [7]. Com valores altos dessa relação a dureza varia ao redor de 150HB, que vem a ser a dureza do sulfeto de manganês. Se o valor dessa relação é diminuído, a

TABELA 2.8 - Características das inclusões de sulfeto nos aços tipo 316.

FASE	COMPOSIÇÃO DOS SULFETOS % em peso				DUREZA BRINELL
	Mn	Cr	Fe	S	
Cr S*	5	54	2	37	300-450
(MnCr) S*	32	28	4	36	280
(MnCr) S+	32	28	4	36	280
Mn S++	56	4	4	36	150

Composição do aço: * 0,30 Mn, 0,30 S \rightarrow Mn/S = 1,0
 + 0,55 Mn, 0,30 S \rightarrow Mn/S = 1,8
 ++2,0 Mn, 0,30 S \rightarrow Mn/S = 6,7

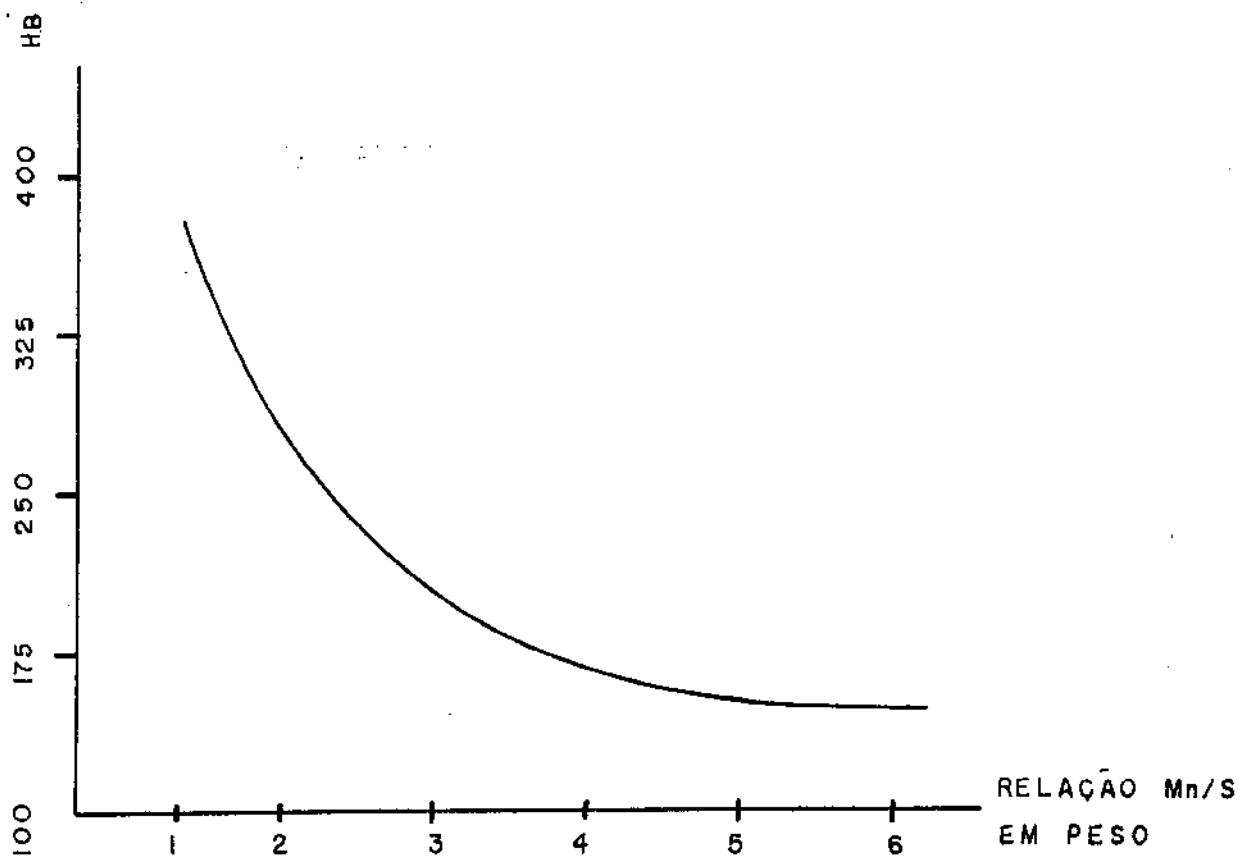


Figura 2.5 - Dureza das inclusões de sulfeto com diferentes relações manganês/enxofre [7].

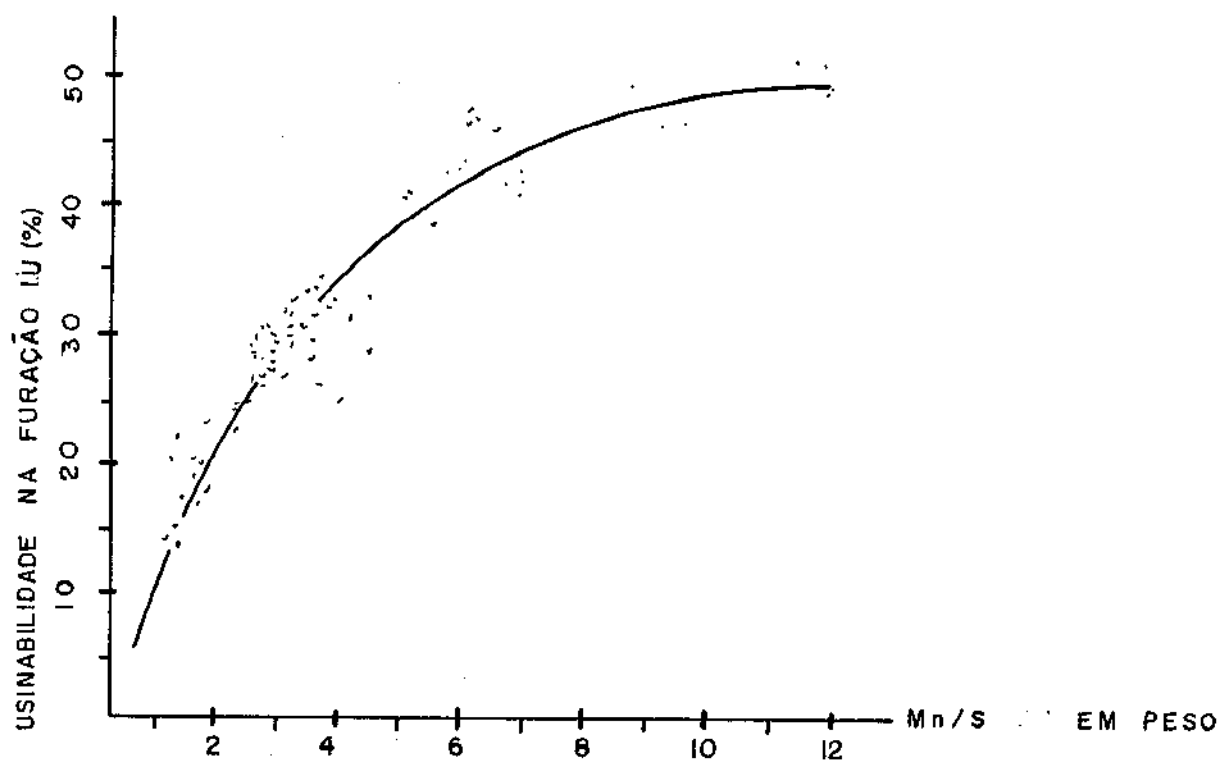


Figura 2.6 - Influência da relação Mn/S na usinabilidade de aços martensíticos [20].

dureza aumenta.

Os sulfetos ricos em cromo não se deformam, e por sua dureza tendem a ser abrasivos, não trazendo benefícios à usinabilidade. Também os sulfetos mistos de manganês e cromo ajudam pouco a usinabilidade.

O sulfeto de manganês puro que aparece em aços com relação Mn/S alta é muito mais mole que a matriz do aço. Esta fase, com sua estrutura cúbica de corpo centrado, é apreciavelmente dútil. A sua atuação na usinabilidade se dá no sentido de minimizar a ação abrasiva e a tensão de cisalhamento e servir como elemento lubrificante.

Em outra publicação Kovach e Moskowitz [20] concluíram que para os aços martensíticos a usinabilidade cresce rapidamente com relação Mn/S até que essa relação atinja sete, conforme mostra a Figura 2.6, e a partir daí este crescimento não é tão acentuado. Assim, pode-se manter o teor de enxofre - que prejudica outras propriedades como a resistência à corrosão - em um nível baixo e elevar o teor de manganês até um valor cerca de sete vezes maior que o teor de enxofre.

Deste modo desenvolveu-se novos aços inoxidáveis com a relação Mn/S alta, conforme mostra a Tabela 2.9 [7], [16].

Os teores de enxofre que se tem adicionado aos aços inoxidáveis variam na faixa de 0,15 a 0,35% [19] chegando até um máximo de 0,5%. Acima deste nível considera-se que a melhoria de usinabilidade, sobretudo no que se refere à vida da ferramenta, não compensa a perda de conformabilidade a quente e ductilidade à temperatura ambiente, assim como a diminuição da resistência à corrosão e os piores acabamentos superficiais causados pela presença do enxofre [7]. A deterioração do acabamento superficial da peça usinada em consequência da presença do enxofre é mais crítico nos aços austeníticos.

Ao aumentar-se o tamanho das inclusões de sulfeto, diminui-se o desgaste da ferramenta (Figura 2.7); por outro lado, no caso de sulfetos muito grandes diminui a possibilidade de se dar às superfícies usinadas o melhor acabamento superficial (Figura 2.8). Para se conseguir que o material possa ser trabalhado a quente, dever-se-á obter uma distribuição homogênea e uma forma adequada dos sulfetos [17].

Lefevre, Tricot e Guessier [21] constataram que a forma dos sulfetos está associada ao teor de oxigênio presente no aço. Para um aço fracamente desoxidado, os sulfetos são do

TABELA 2.9 - Composição química dos aços inoxidáveis com relação Mn/S alta [7,16]

TIPO DE AÇO	COMPOSIÇÃO %									
	C max	Mn max	S	P max	Si max	Cr	Ni	Mo ou Zr	Mn/S	
MARTENSÍTICO										
416 Plus	0,15	1,25	0,30-0,40	0,06	1,0	12,0-13,0	-	-	3,0	
416 Plus X	0,15	2,50	0,30-0,40	0,06	1,0	12,0-14,0	-	-	6	
416 FPlus X	0,12	2,60	0,35 min	0,06	1,0	15,0-16,0	-	-	7	
FERRÍTICO										
430 FPlus	0,12	2,5	0,15 min	0,06	1,0	16-18	-	0,60 max	7	
AUSTENÍTICO										
	0,15	3,0-4,0	0,30-0,40	-	1,0	11-19	6,5-10,0	0,60 max	10	

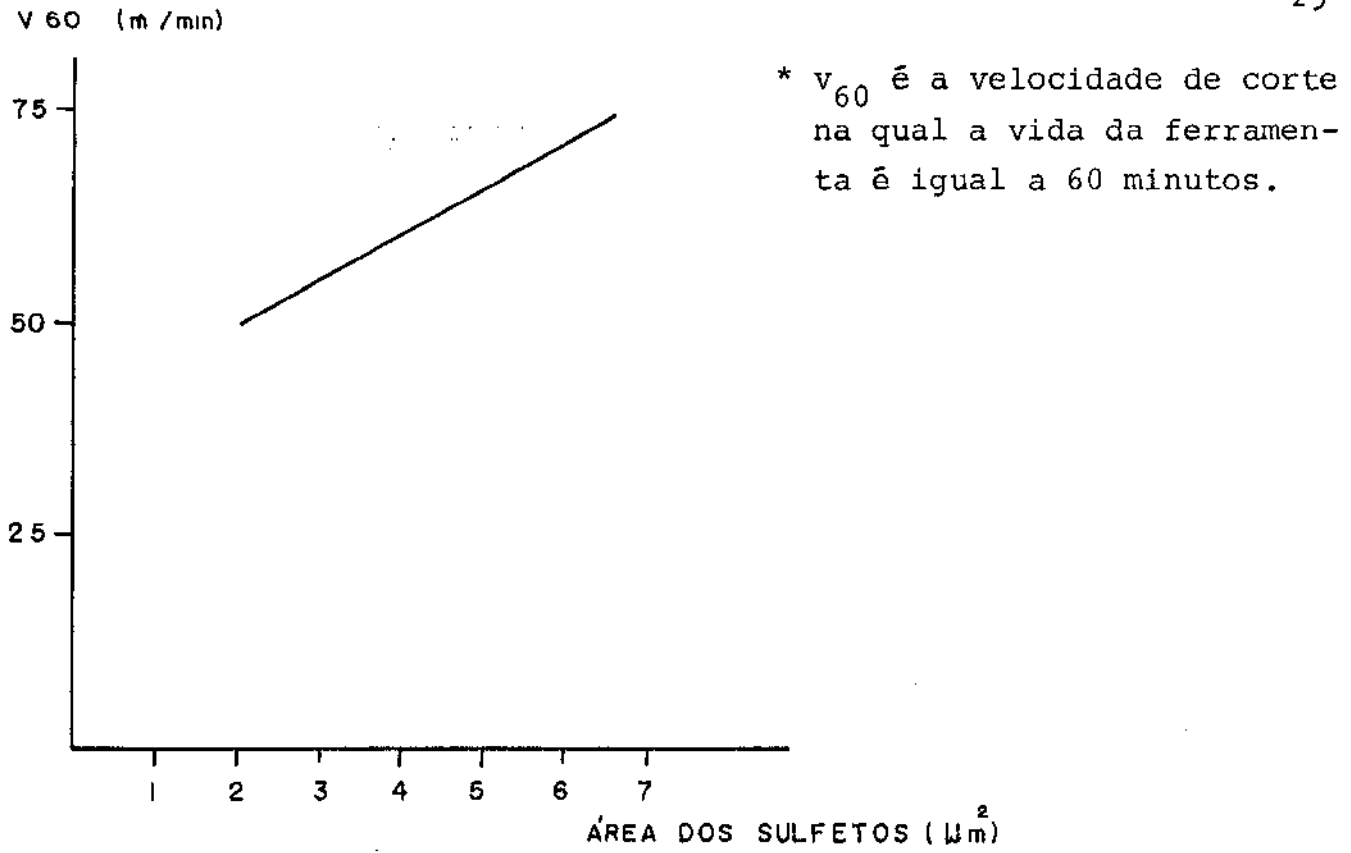


FIG. 2.7

Figura 2.7 - Influência do tamanho dos sulfetos sobre a velocidade de corte. [17]

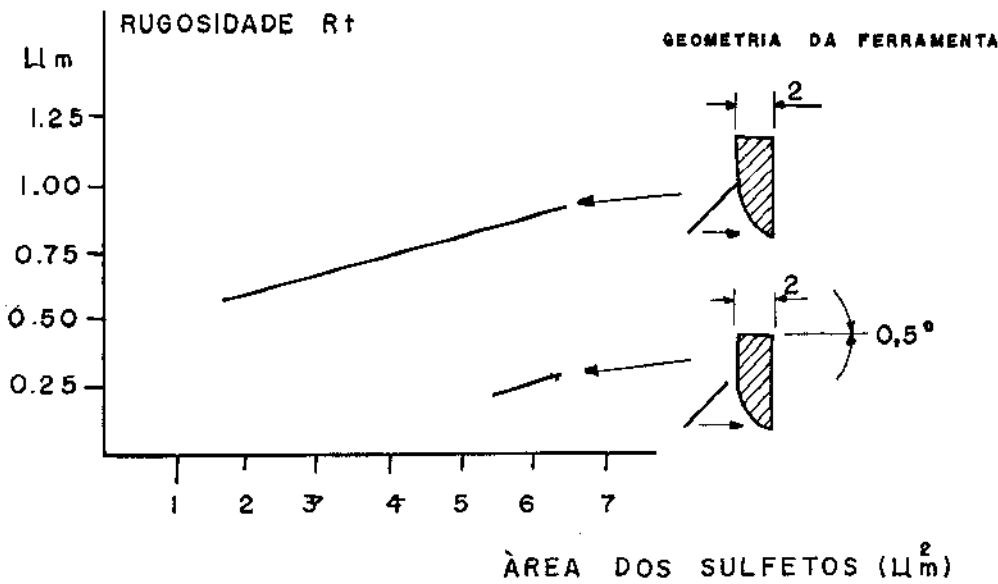


FIG. 2.8

Figura 2.8 - Influência do tamanho dos sulfetos na rugosidade superficial da peça após usinagem. [17]

tipo globular; para um aço fortemente desoxidado, os sulfetos apresentam-se mais finos e alongados. Vê-se que a usinabilidade é também afetada pela desoxidação, pois observa-se uma melhoria da aptidão ao torneamento e à furação quando a cristalização dos sulfetos é do tipo alongado.

Nos aços comuns isto não acontece, isto é, nestes aços uma cristalização globular aumenta a usinabilidade. Esta diferença de comportamento se deve fundamentalmente à intervenção do elemento cromo dentro da composição dos sulfetos nos aços inoxidáveis. Um baixo teor de oxigênio favorece a formação de sulfetos contendo menos cromo, o que, como já vimos anteriormente, favorece a usinabilidade por serem inclusões menos abrasivas do que os sulfetos com maiores teores de cromo.

2.3.3. Resistência à Corrosão dos Aços Inoxidáveis com Enxofre.

O objetivo principal da confecção e do uso dos aços inoxidáveis é a resistência à corrosão. Sabe-se, porém, que a adição de enxofre, que é benéfica à usinabilidade do aço, é prejudicial à resistência à corrosão na maioria dos meios.

Entende-se por corrosão a deterioração dos materiais pela ação do meio em que são usados [22]. Assim, não tem sentido falar-se em melhoria ou queda da resistência à corrosão de um determinado material sem se especificar o meio em que isto acontece.

Henthorne [23] depois de vários tipos de testes com aços inoxidáveis com 0,3% de enxofre, 13%, 17% e 18% de cromo, 9% de níquel e o manganês variando na faixa de 0,3 a 2,4% (em peso), concluiu:

- a) Sulfetos ricos em cromo são resistentes à diluição em ácidos oxidantes, alta umidade e ao ensaio de corrosão por borrifio salino. Sulfetos de manganês são rapidamente atacados nestes meios e os produtos de sua dissolução estimulam o processo de corrosão anódica no aço;
- b) Os sulfetos de cromo em aços com baixo teor de manganês dão a estes materiais resistência à corrosão comparável aos tipos com enxofre residual em meio brando.

- c) O comportamento em ácido nítrico e soluções passivantes é também relacionado com a composição dos sulfetos. Quanto mais baixo o teor de cromo nos sulfetos, mais oxidante deve ser a solução passivante para prevenir o ataque químico e o descolorimento do aço. Isto é particularmente verdade para secções transversais de barras usinadas com sulfetos alongados na direção do trabalho a quente.
- d) A passivação de peças usinadas é geralmente benéfica porque remove sulfetos da superfície. Isto é particularmente verdade para aços com alto manganês contendo sulfetos ricos em manganês. Passivação, em linhas gerais, é o fenômeno da formação de uma fina película de óxido sobre uma superfície metálica que fica, assim, protegida contra a corrosão [22] , [2]. O termo passivação é usado por Henthorne para denotar um tratamento de curta duração (usualmente menos que uma hora) em uma solução oxidante tal como 20% de ácido nítrico. O propósito deste tratamento é limpar a superfície do aço pela remoção de inclusões superficiais, partículas de ferro embutidas, etc, através da formação da película de óxidos.

Como se vê pelas conclusões de Henthorne os sulfetos que são prejudiciais à usinabilidade, como os sulfetos ricos em cromo, são bem resistentes à corrosão, enquanto os sulfetos que melhoram a usinabilidade, como os sulfetos de manganês, têm baixa resistência à corrosão. Seraphin [24] afirma que a adição de enxofre piora as propriedades de resistência à corrosão tanto em meio ácido, quanto em meio neutro. No primeiro caso, a produção de H_2S aumenta consideravelmente as velocidades de corrosão e no segundo caso, sabe-se que a resulfuração reduz fortemente a resistência à corrosão por pites. Pelo que foi exposto, parece haver uma incompatibilidade entre as propriedades de usinabilidade e resistência à corrosão.

Além dos elementos já tradicionalmente usados para combater a corrosão como o cromo e o níquel, tem sido também usado para este fim o molibdênio, em aços inoxidáveis em geral e em aços resulfurados em particular [1].

Com o fim de conseguir um aço inoxidável que alie resistência à corrosão e usinabilidade, a empresa CARPENTER TECHNOLOGY

CORPORATION [25] desenvolveu uma liga ferrítica de usinagem fácil que possui 18% de cromo e 2% de molibdênio. Segundo a empresa esta liga possui a usinabilidade do aço martensítico de usinagem fácil tipo 416 e a resistência à corrosão do aço austenítico de usinagem fácil tipo 303.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PECNER, D. & BERNSTEIN, I.N., Handbook of Stainless Steels. Nova York, Mc-Graw Hill, 1977.
- [2] MEI, P.R. & SILVA, A.L.C., Tecnologia dos Aços Sumaré, SP, Eletrometal, UNICAMP, 1981.
- [3] CHIAVERINI, V., Aços e Ferros Fundidos. 4 ed São Paulo, Associação Brasileira de Metais, 1981.
- [4] Wrought Stainless Steels In: American Society for Metals, Ohio, v.1: 408-31, 1961.
- [5] BLOTT, D.M., How to cut the standard grades, Metal Progress, p. 337-43, Fev. 1968.
- [6] Machining of Stainless Steel and Heat-Resisting Alloys In: American Society for Metals, Ohio, v.3: 375-432, 1967.
- [7] AKSOY, A.M.; URIA, H.A.; PALÁCIOS, I.M., Aceros inoxidables de facil maquinabilidad, Rev. Metal CENIM, v.5: 639-48, 1969.
- [8] MONARCH, Speeds and feeds for better turning, Sidney, Ohio, 69 p.
- [9] FERRARESI, D., Fundamentos da usinagem dos metais São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1970.
- [10] MOSTACCHI, A., Usinabilité des aciers inoxydables, Influence des conditions de parachèvement, Aciers Speciaux, n.46, p. 9-16, 1979.
- [11] DAGALLIER, B. & MAROY, M., Usinage et usinabilité des aciers inoxydables. In: Manual Technique des aciers inoxydables, Paris, Chambre Syndicale des Producteurs d'Aciers Fin et Spéciaux, 1977. cap. 5.3, p. 159-77.

- [12] ALLEGHENY LUDLUM STEEL CORPORATION, Stainless Steel Fabrication, Pittsburgh, 1959.
- [13] FPB - FÁBRICA PAULISTA DE BROCAS, Brocas e furações, São Paulo, 60 p., 1983.
- [14] MACHINABILITY DATA CENTER, Machining Data Handbook 2 ed. Cincinnati, 1972.
- [15] DELORME, J.F. et al, Un nouvel acier inoxydable à haute usinabilité, Revue de Metallurgie, 74(2): 79-90, 1977.
- [16] KOVACH, C.W. & MOSKOWITZ, A., How to upgrade free-machining properties, Metal Progress, p. 173-84, agosto 1967.
- [17] SPARRE, C., Acero Inoxydable de facil mecanización, Alambre, p. 53-57, abril 1972.
- [18] RIEU, J. et al, Influence des teneurs en carbone, azote, nickel et cuivre sur l'usinabilité d'aciers inoxydables austenitiques et leur comportement dans un essai de cisaillement avec compression normale au plain cisailé, Revue de Metallurgie, 72(12): 959-75, 1975.
- [19] LEFÈVRE, M., Usinabilité des aciers inoxydables, La Metallurgie, v. 102: 520-24, 1970.
- [20] KOVACH, C.W. & MOSKOWITZ, A., Effects of manganese and sulfur on the machinability of martensitic stainless steels, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, v.245: 2157-64, 1969.
- [21] LEFÈVRE, J., TRICOT, R., GUEUSSIER, A., Usinabilité des aciers inoxydables resulfures, Revue de Metallurgie, v. 68(4): 259-73, 1971.
- [22] GALVELE, J.R., Corrosion, Washington Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos, 1979.

- [23] HENTHORNE, M., Corrosion of resulfurized free-machining stainless steels, Corrosion-Nace, 26(12):5-11-28, 1970.
- [24] SERAPHIN, M.L., Properties d'emploi des aciers inoxydables ferritiques et martensitiques à haute usinabilité, Aciers Speciaux, n. 37: 7-17, 1977.
- [25] Free-machining stainless. Manufacturing Engineering, 75(4): 44-45, 1975.

CAPÍTULO 3

ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE FURAÇÃO

O processo de furação ocupa um lugar de destaque dentre os demais processos de usinagem, por ser largamente utilizado em toda a indústria manufatureira; a grande maioria das peças que recebem usinagem possuem furos, o que justifica um estudo detalhado sobre este processo, pois a furação é geralmente o método mais eficiente e econômico de se obter furos em um metal sólido [1]. Outros processos de obtenção de furos tais como a fundição, o forjamento ou a metalurgia do pó, têm a desvantagem de não conseguir boa precisão ou de não ser aplicado em todos os tipos de peças e furos. Na maioria dos casos, furos realizados por fundição ou por forjamento precisam ser repassados em uma operação subsequente de furação e quando necessário de alargamento, mandrilamento ou brochamento.

A ferramenta mais empregada para a produção de furos cilíndricos é a broca helicoidal. O material mais utilizado na fabricação destas brocas é o aço rápido, enquanto que o metal duro não é utilizado em larga escala. A furação com broca helicoidal é uma operação que resulta em tolerâncias dimensionais entre IT11 a IT14, não tendo portanto boa precisão de medida, nem precisão de forma e de posição [2].

Outras ferramentas de furação são broca canhão, broca BTA, broca espada, broca de trepanação, etc. A furação com estas brocas é uma operação mais precisa que com brocas helicoidais, mas elas não são largamente utilizadas pois são específicas para furos profundos (L/D grande) e necessitam de máquinas especiais para a execução dos furos [3]. Algumas brocas não helicoidais especiais foram desenvolvidas para a realização de furos curtos (L/D até 2) com pastilhas de metal duro, que possibilitam altas velocidades de corte e assim índices de remoção de cavaco na unidade de tempo muito superiores aos das brocas helicoidais [4]. Alguns fabricantes de ferramentas já possuem brocas desse tipo disponí

veis no mercado.

Mesmo com todos esses desenvolvimentos a broca helicoidal continua sendo a ferramenta mais utilizada em furação, razão pela qual esta ferramenta foi escolhida no presente estudo.

3.1. FORMAS CONSTRUTIVAS E GEOMETRIAS DAS BROCAS HELICOIDAIS

A terminologia das diversas partes da broca helicoidal é regulada pelas normas ABNT TB-111 e NB-205, as quais se baseiam nas normas DIN 1412 e DIN 6581. A figura 3.1 [5] mostra e identifica as partes de uma broca helicoidal. É importante atentar nesta figura o que são as arestas principais e a aresta transversal de corte, pois elas serão bastante citadas adiante.

A broca helicoidal, como qualquer outra ferramenta de usinagem, tem seus ângulos definidos pela norma ABNT NB-205 [6]. A figura 3.2 mostra os ângulos de uma broca helicoidal. Note-se os ângulos medidos no plano de medida – ângulo de saída (γ), ângulo de cunha (β) e ângulo de folga (α) – e seus correspondentes medidos no plano de trabalho – ângulo lateral de saída (γ_x), lateral de cunha (β_x) e lateral de folga (α_x).

Outros ângulos de importância para este trabalho são: o ângulo entre as duas arestas principais de corte, chamado de ângulo de ponta (σ), ângulo entre a aresta principal e a aresta transversal chamado ângulo da aresta transversal (ψ) e o ângulo entre a aresta lateral e a direção do eixo da broca, chamado de ângulo de hélice (ϕ).

Numa broca helicoidal tanto o ângulo de saída (γ), quanto o ângulo de folga (α) variam a medida que se percorre o diâmetro da broca e variam também com o ângulo de ponta (σ). O ângulo de saída (γ) se altera também com o ângulo de hélice (ϕ). As figuras 3.3 e 3.4 [2] mostram estas variações.

É objetivo do presente trabalho estudar, dentre algumas, a melhor geometria da broca para a furação de aços inoxidáveis austeníticos. Isto se faz necessário, pois conforme a geometria da ferramenta, a deformação do cavaco e do fundo do furo é

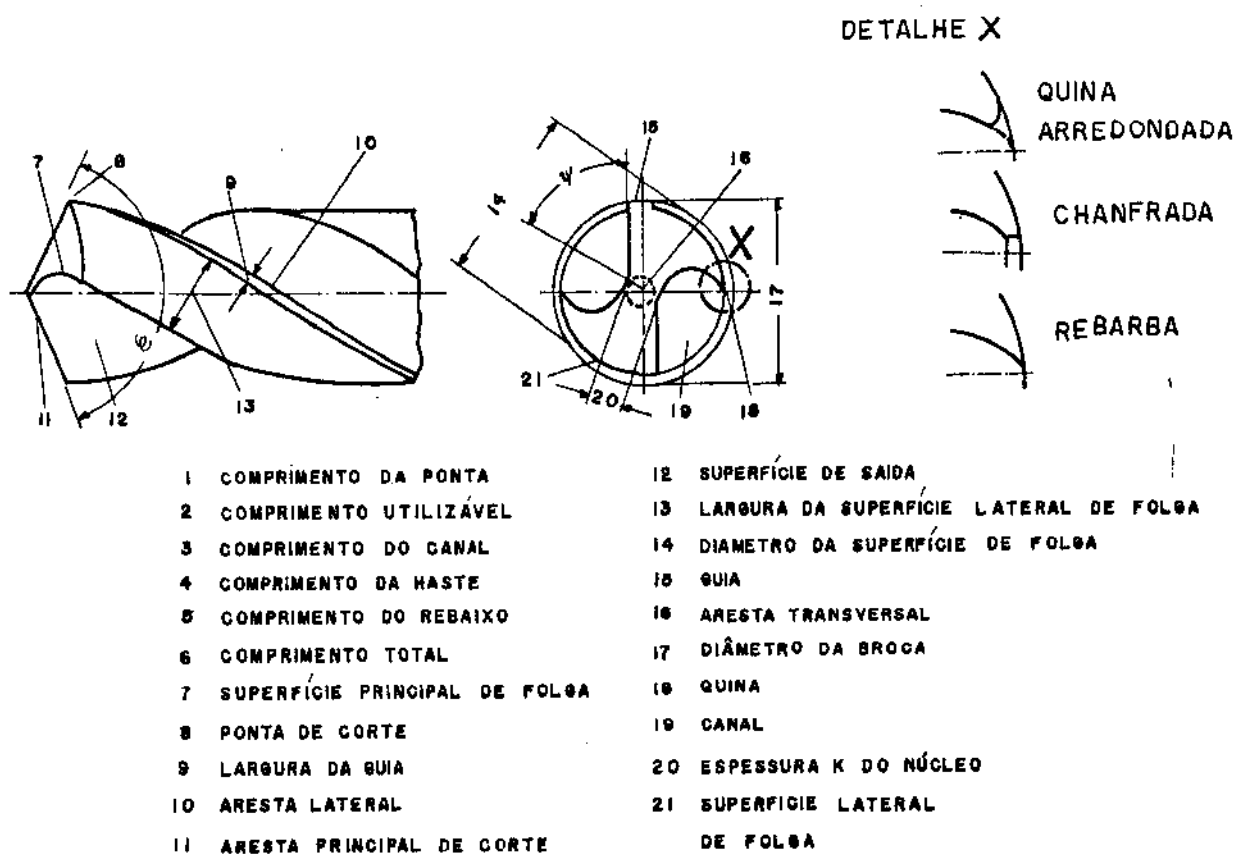


Figura 3.1 - Parte de corte de uma broca helicoidal. [5]

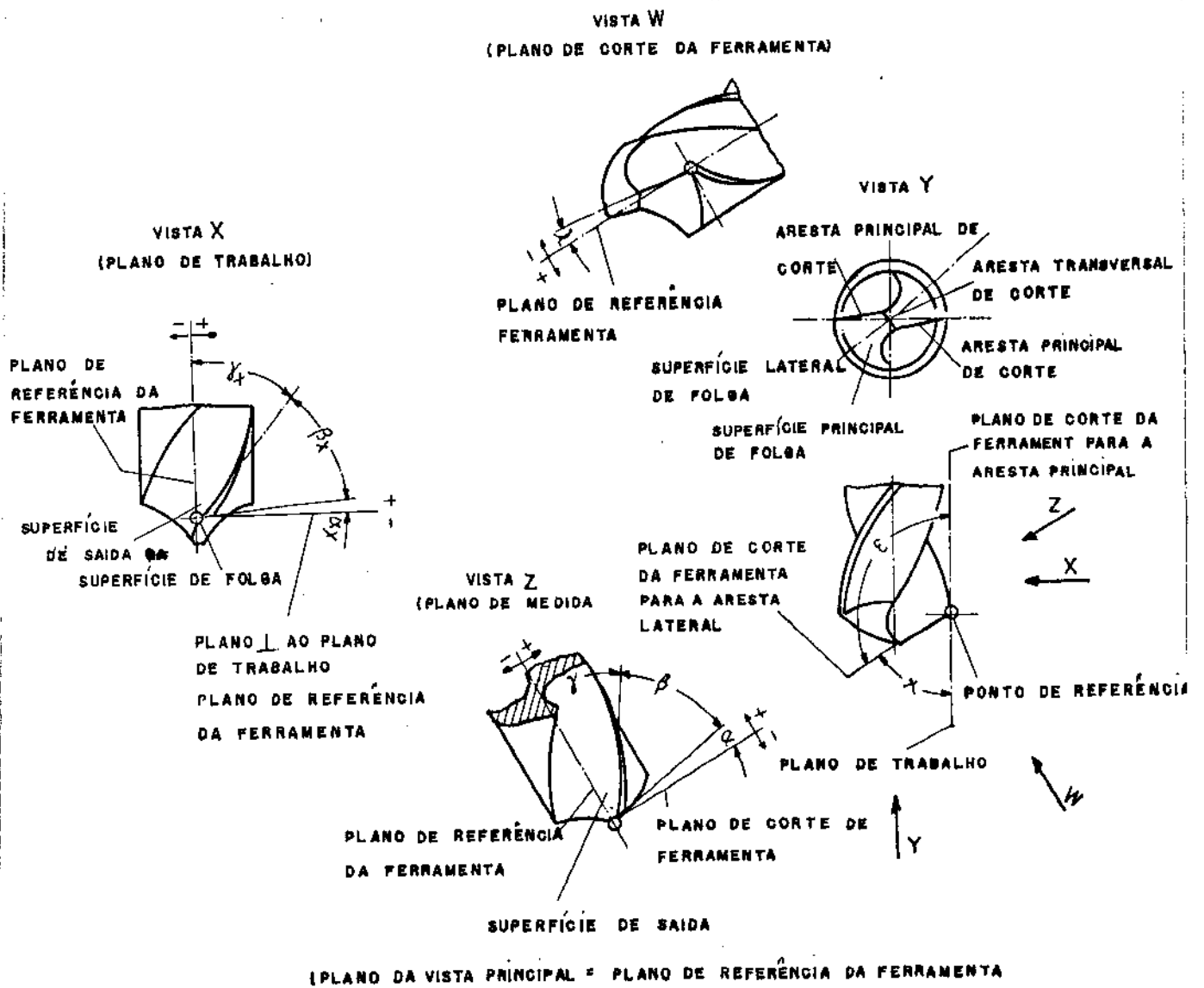


Figura 3.2 - Ângulos da ferramenta em uma broca helicoidal. [6]

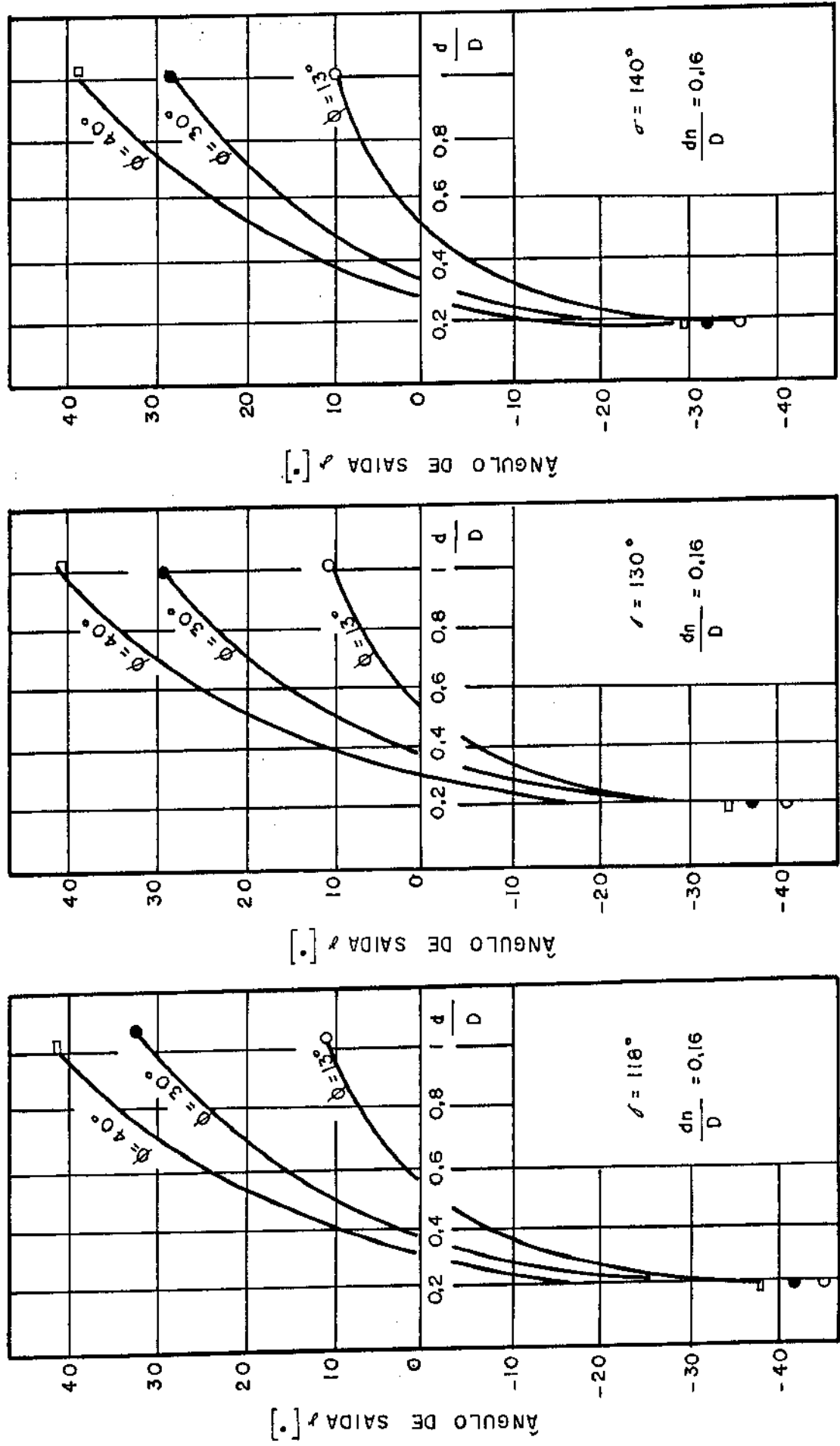


Figura 3.3 - Variação do ângulo de saída γ , definido pela norma P-NB 225 ao longo de uma aresta principal de corte, para diferentes valores do ângulo de ponta σ e do ângulo de hélice ϕ . [2]

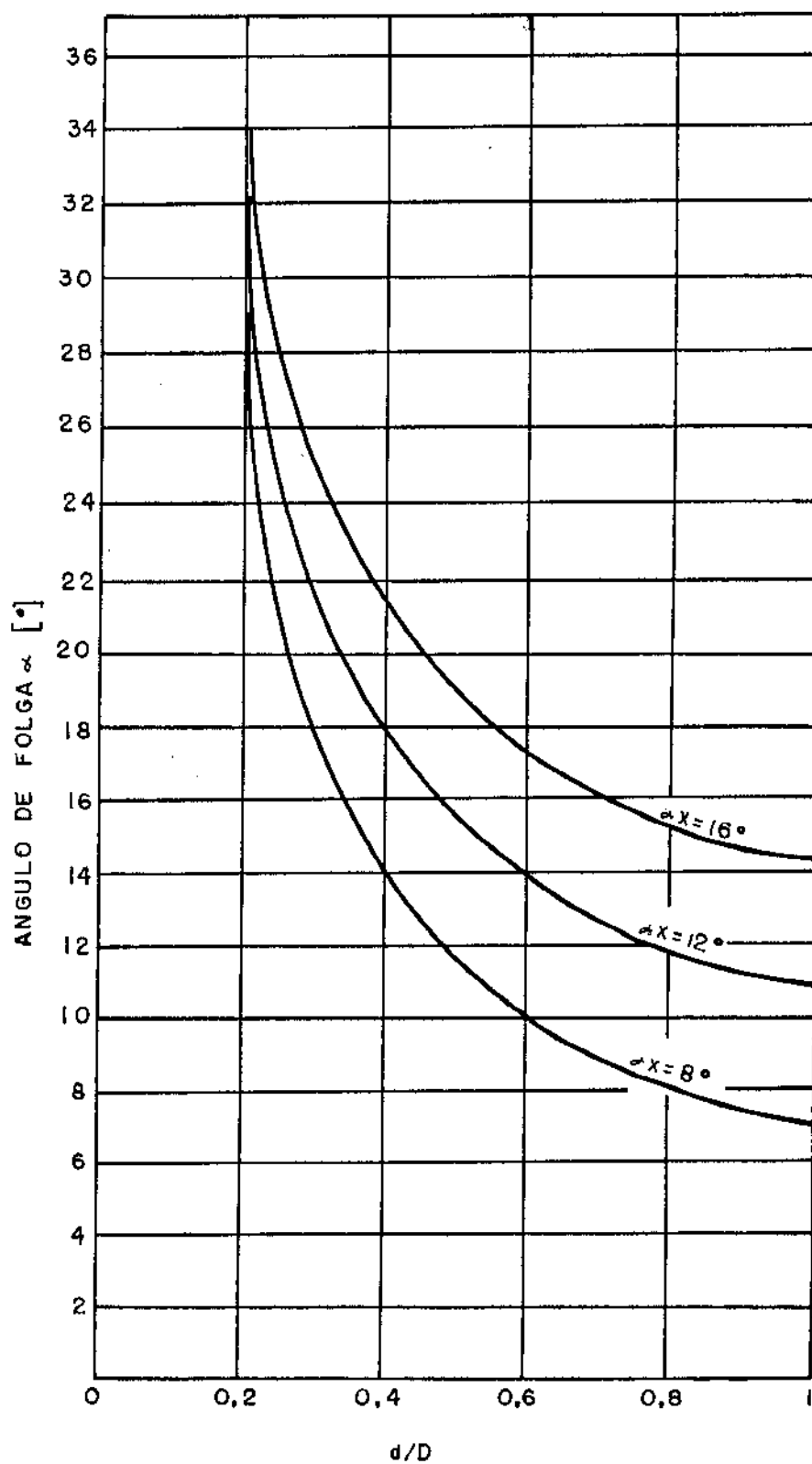


Figura 3.4 - Variação do ângulo de folga α , definido pela norma P-NB 225, ao longo de uma aresta principal de corte. Ângulo de ponta $\chi = 118^\circ$. [2]

maior ou menor. A deformação plástica do aço inoxidável austenítico na usinagem é crítica, pois causa um grau de recalque do cavaco muito grande, aumentando assim os esforços de corte.

Neste aspecto, a aresta transversal de corte é muito danosa para a furação destes aços, pois, devido à sua geometria, ela tem uma ação mais de esmagar o fundo do furo e o cavaco que propriamente cortar. Para se eliminar total ou parcialmente os efeitos da aresta transversal de corte pode-se proceder à pré-furação ou realizar-se uma afiação que diminua a dimensão desta aresta. Dentre estas afiações pode-se citar a afiação cônica com chanframento da aresta transversal de corte, a afiação Shirov, a afiação em ponta espiral e a afiação cruzada que foi usada no presente trabalho. A figura 3.5 [7] mostra em detalhes a geometria da broca quando submetida a afiação cruzada.

3.2. A FORÇA DE AVANÇO NA FURAÇÃO

A força total de avanço P_a que se origina em determinadas condições de furação pode ser considerada composta de três parcelas:

$$P_a = P_{pr} + P_{es} + P_{tr} \quad (1)$$

onde:

P_{pr} é a força de avanço necessária para a remoção contínua do cavaco junto às duas arestas principais de corte da broca.

P_{es} é a força de avanço necessária para vencer as forças de atrito entre as guias e as paredes do furo

P_{tr} é a força de avanço necessária para vencer as resistências opostas à penetração da broca junto à aresta transversal de corte.

No caso da furação com pré-furação existirão apenas as parcelas P_{pr} e P_{es} .

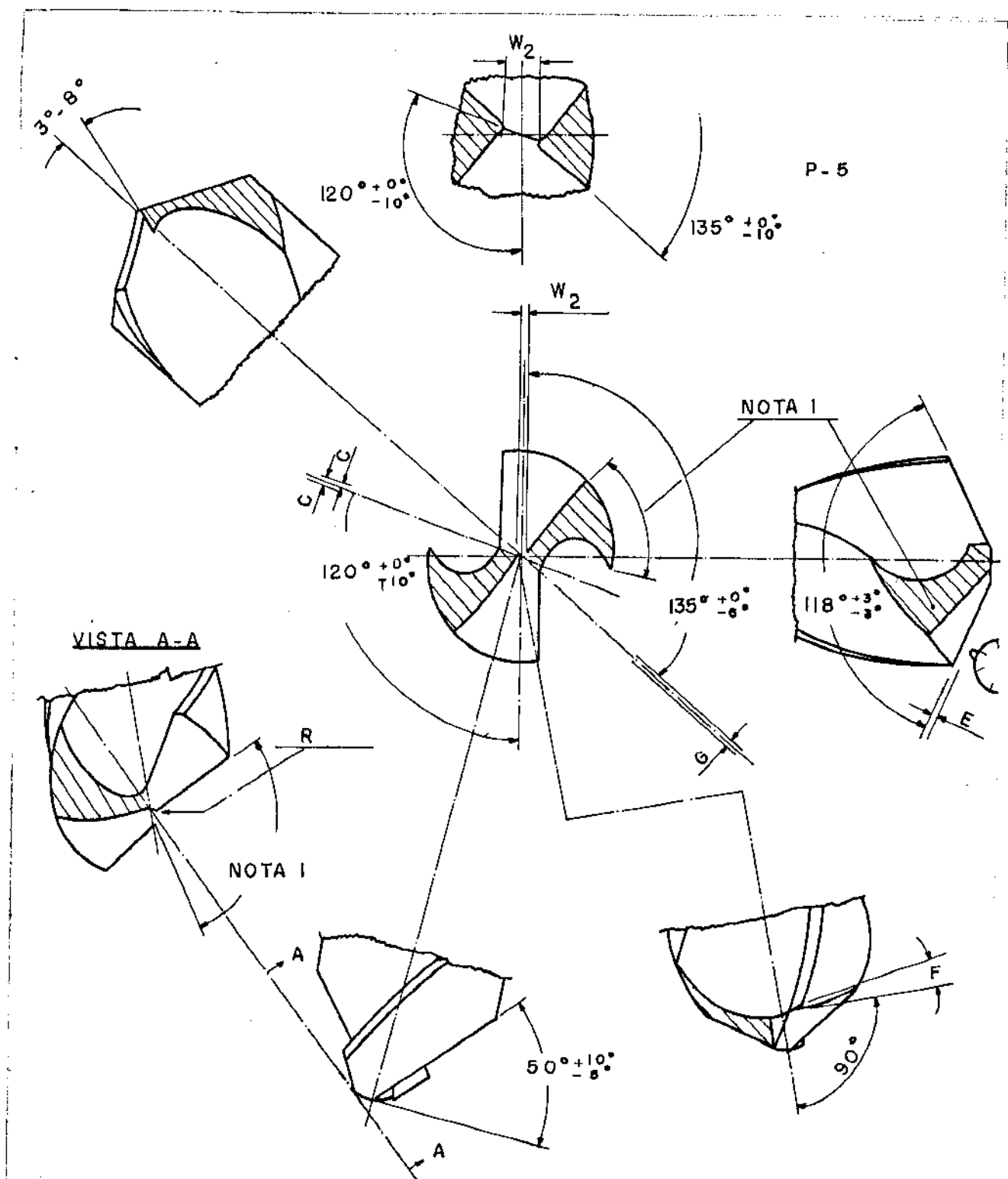


Figura 3.5 - Norma para brocas com afiação cruzada. [7]

A participação percentual de cada parcela na força de avanço total é variável, dependendo do material furado, do avanço, da afiação da broca, da profundidade do furo, do refrigerante, etc. Estes valores variam dentro de limites amplos, quais sejam

$$P_{pr} = (0,37 \text{ a } 0,60) P_a \quad (2)$$

$$P_{es} = (0 \text{ a } 0,05) P_a \quad (3)$$

$$P_{tr} = (0,40 \text{ a } 0,63) P_a \quad |8| \quad (4)$$

Existem diversas fórmulas experimentais para o cálculo da força de avanço na furação com e sem pré-furação. Todas essas fórmulas levam em conta três fatores principais:

- o diâmetro da broca
- o avanço
- o material furado

Outros fatores secundários tais como a geometria da broca, o estado de afiação, o refrigerante de corte, o material da broca, etc., estão incluídos nas fórmulas de maneira implícita, pois os ensaios realizados para determinação dos coeficientes foram feitos em condições que se aproximam ao máximo das condições práticas de trabalho das brocas.

Um dos objetivos do presente trabalho é verificar a influência da rotação e da geometria da broca na força de avanço para a furação de aços inoxidáveis austeníticos.

As principais fórmulas são:

- Furação sem pré-furação

$$P_a = C_4 \cdot D^x \cdot a^y \quad (5)$$

onde:

P_a = força de avanço

D = diâmetro da broca (mm)

a = avanço por volta (mm/volta)

C_4 = constante do material
 x, y = expoentes experimentais

- Furação com pré-furação

$$P_a = B_o \cdot a^{1-\gamma_o} \cdot D^{1-\omega_o} (D^{\omega_o} - d_o^{\omega_o}) \quad [8] \quad (6)$$

onde:

B_o, γ_o, ω_o = constantes do material furado

d_o = diâmetro do pré-furo (mm)

Segundo Daar [8] a influência da velocidade de corte sobre a força de avanço é pequena, podendo ser desprezada em primeira aproximação.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Machining of Stainless Steels and Heat-Resisting Alloys In: American Society for Metals, Ohio, v. 3: 375-432, 1967.
- [2] FERRARESI, D., Usinagem dos Metais 4 ed. São Paulo, Associação Brasileira dos Metais, 1972.
- [3] SANDVIK COROMANT. Ferramentas para furação, Suécia, 64 p. 1979. (Catálogo Pt-8400:2).
- [4] SANDVIK COROMANT, Brocas T-MAXU com construção em duas peças, Suécia, 11 p. 1978. (Catálogo Pt-8455).
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Brocas helicoidais TB-111, Rio de Janeiro, 1977.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Ferramentas de usinagem - geometria da cunha cortante. NB-205, Rio de Janeiro, 1978.
- [7] FPB - FÁBRICA PAULISTA DE BROCAS, Normas para brocas com afiação em cruz. São Paulo, 1978. (Desenho MP 334-A - folha 1/5)
- [8] DAAR, H.L.A., Uma contribuição ao conhecimento do processo de furação dos aços com brocas helicoidais. Tese de doutoramento, São Carlos, 1967.

CAPÍTULO 4

USINABILIDADE - O ENSAIO DA FORÇA DE AVANÇO CONSTANTE NA FURAÇÃO

O termo usinabilidade é definido como a capacidade que um metal possui de ser usinado com maior ou menor facilidade [1]. Ele expressa, por meio de um valor numérico comparativo (chamado índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um metal em relação a outro tomado como padrão. Entende-se como propriedades de usinagem de um metal, aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem dos metais, tais como a vida da ferramenta, a força de usinagem, a temperatura de corte, a produtividade, as características do cavaco. A usinabilidade não é, portanto, uma grandeza específica de um determinado material, tal como a resistência a tração, o módulo de elasticidade, etc. [2].

Dentre os diversos ensaios para se medir o índice de usinabilidade dentro do critério baseado na força de usinagem, um dos mais aceitos pelos estudiosos do assunto é o ensaio da força de avanço constante na furação que foi objeto do presente estudo. Este ensaio não leva em conta o desgaste e a vida da ferramenta que são medidos dentro de um outro critério específico de usinabilidade. Inclusive, dentro do ensaio utilizado neste trabalho, tenta-se, através da limitação do número de furos realizado por uma broca, evitar a influência do desgaste da ferramenta nos esforços de corte.

Neste estudo o ensaio de usinabilidade baseado na força de avanço constante na furação foi utilizado para uma avaliação do processo de furação dos aços inoxidáveis austeníticos quando se varia a rotação e a geometria da broca, a fim de se determinar as condições de usinagem que exigem menores forças de avanço e não como comumente é usado, quando se compara a performance em usinagem de um material em relação a outro. Esse procedimento possibilita, além do objetivo citado acima, uma crítica à intercambialidade do índice de usinabilidade quando se varia as condições de usinagem.

Para este ensaio pode-se manter a força de avanço constante e medir-se o avanço através da determinação do tempo de corte, ou pode-se ter uma variação do método onde se mantém o avanço constante e medir-se as variações da força de avanço durante a furação.

O ensaio da força de avanço constante na furação é de rápida realização, onde o material a ser ensaiado é furado por uma broca helicoidal de aço rápido sob a ação de uma força de avanço constante [3]. Necessita-se para isso de um simples dispositivo que aplique a força de avanço constante à broca, conforme esquematizado na figura 4.1 e de um cronômetro para a determinação do tempo de corte. Com o tempo de corte pode-se determinar o avanço:

$$a = \frac{l_a \cdot 60}{t_c \cdot n} \quad (7)$$

onde: a = avanço (mm/volta)

t_c = tempo de corte (s)

l_a = percurso de avanço (mm)

n = rotação (RPM)

Assim, o material que necessitar de uma maior força de avanço para ser furado, ou, em outras palavras, o material que tiver menor usinabilidade segundo o critério da força de avanço, vai apresentar um avanço menor e vice-versa.

Kovach e Moskowitz [6] quando do estudo dos efeitos do manganês e do enxofre na usinabilidade do aço inoxidável martensítico definiram uma metodologia para a realização deste ensaio, qual seja: furos de 1/4" de diâmetro e 0,4" de profundidade foram feitos alternadamente na barra do material testado e na barra do material padrão num total de quatro furos em cada barra. Esta sequência foi repetida três vezes, utilizando em cada vez uma broca recém-afiada. O tempo médio requerido para se fazer um furo na barra do material testado foi comparado com aquele requerido para a furação da barra de material padrão. O índice de usinabilidade

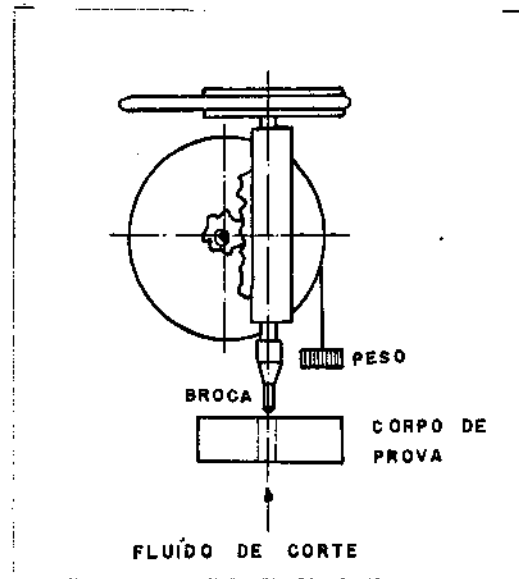


Figura 4.1 - Esquema do ensaio de usinabilidade baseada no método da força de avanço constante na furação.

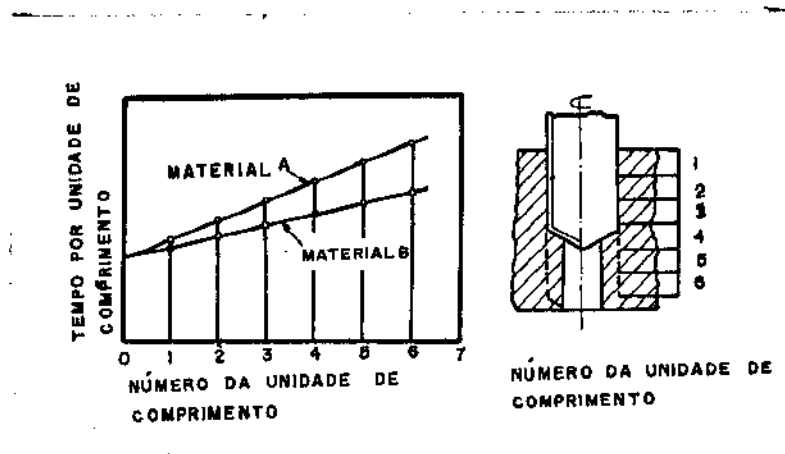


Figura 4.2 - Tempo por unidade de comprimento como uma função do número de unidades de comprimento. [5]

do material testado é obtido através da seguinte fórmula:

$$\text{I.U.furação} = \frac{t_c \text{ padrão}}{t_c \text{ teste}} \times 100\% \quad (8)$$

onde: $t_c \text{ padrão}$ = tempo médio para a furação do metal padrão

$t_c \text{ teste}$ = tempo médio para a furação do metal testado

A furação foi realizada a uma rotação de 460 RPM e uma força constante de 160 lbf. Os furos foram feitos sem lubrificação numa direção normal ao eixo da barra.

Dagnell [5,6] criou uma variação deste ensaio. Dependendo do tipo de material a ser investigado, o ensaio de furação com força de avanço constante é realizado com furos de profundidade de 5 a 500 mm. Esta distância é dividida em partes iguais de um comprimento conveniente (1-20 mm). Para cada uma destas distâncias o tempo de furação é medido automaticamente por dois cronômetros. Os cronômetros são controlados por impulsos de uma célula foto-elétrica que é conectada ao mecanismo de avanço. Uma diminuição na velocidade de avanço resulta em um acréscimo do tempo medido para cada unidade de comprimento. Este método possibilita a medição do efeito de desgaste da aresta cortante pelo registro contínuo do avanço. A furação de dois materiais A e B daria, então, o resultado mostrado na figura 4.2. O diagrama mostra que o material com a mais pronunciada tendência ao desgaste (A) causa um maior gradiente na curva de desgaste. Resumindo, este teste dá uma idéia da influência do desgaste na força de avanço na furação e a partir disso pode-se definir parâmetros que possibilitem o cálculo do índice de usinabilidade.

No presente trabalho, o ensaio foi realizado baseado na metodologia idealizada por Kovach e Moskowitz, com pequenas adaptações devido ao fato de se desejar furos mais profundos do que os realizados por estes pesquisadores, com relação comprimento/diâmetro do furo (L/D) igual a 2,5.

BIBLIOGRAFIA

- [1] DATSKO, J., Machinability - Material Properties and Manufacturing Process. Nova York, John Wiley & Sons, Inc. 1967.
- [2] FERRARESI, D., Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., 1970.
- [3] BENGT, L., Constant feed force machinability testing - further development and industrial application, Annals of the C.I.R.P., v. 28: 39-43, 1978.
- [4] KOVACH, C.W., MOSKOWITZ, A., Effects of manganese and sulfur on the machinability of martensitic stainless steels, Transactions of Metallurgical Society of AIME, v. 245: 2157-2164, 1969.
- [5] DAGNELL, J., Machinability ranking by a constant feed force method, Annals of the C.I.R.P., v. 17: 233-42, 1969.
- [6] DAGNELL, J. Machinability test by a drilling method, Annals of the C.I.R.P., v. 15:301-08, 1967.

CAPÍTULO 5

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

5.1. MATERIAL

Foram utilizados nos ensaios os aços inoxidáveis austeníticos ABNT303 e ABNT316. O aço 303 é um aço de usinagem fácil (usinabilidade melhorada) contendo por isso maiores teores de enxofre e manganês. A tabela 5.1 mostra a composição química destes aços.

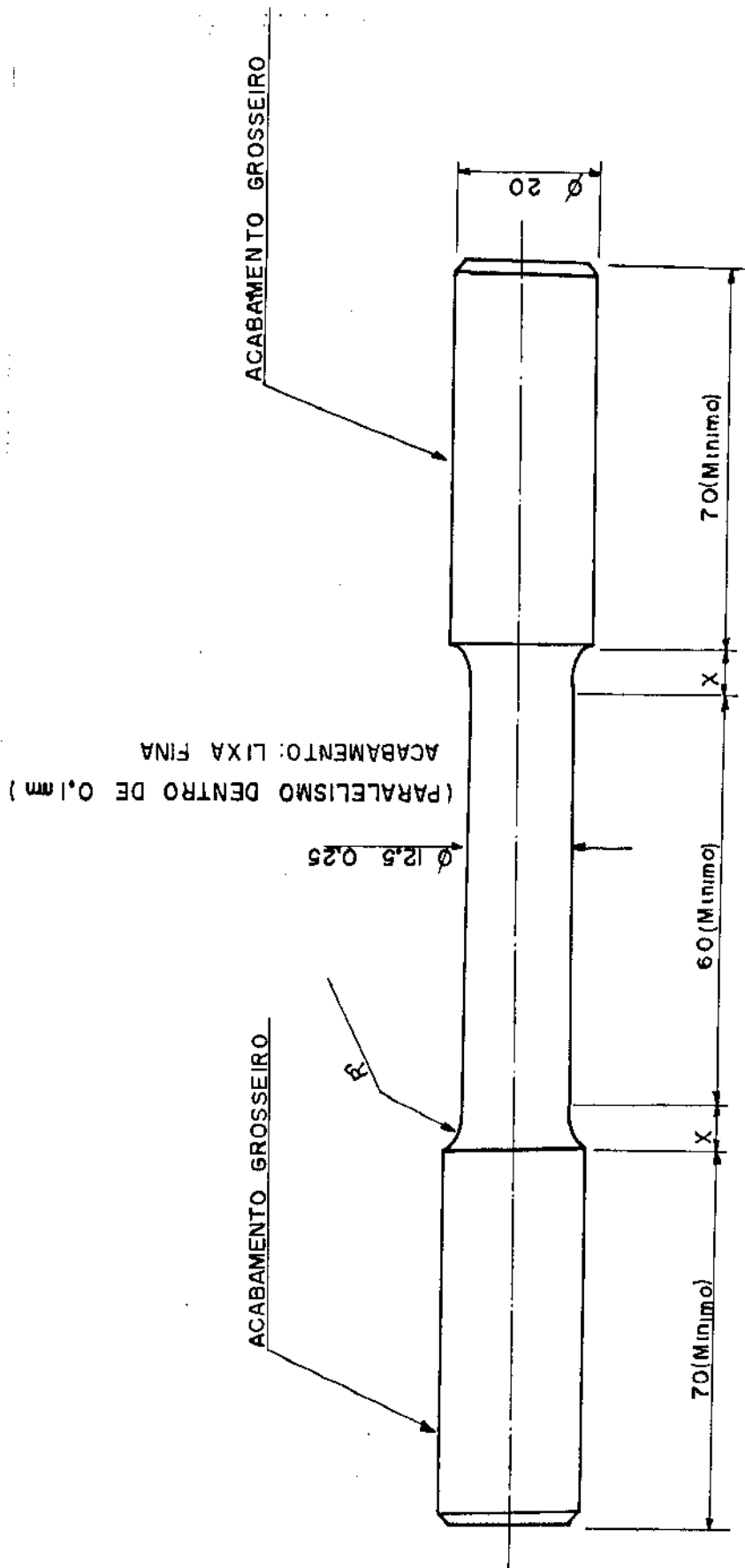
TABELA 5.1 - Composição química dos aços ABNT303 e ABNT316 utilizados nos ensaios (porcentagem em peso)

Momento Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
316	0,07	0,36	1,27	19,45	13,30	2,10	0,028	0,012
303	0,09	0,33	1,70	18,00	8,35	0,15	0,041	0,170

A dureza tanto do aço 303 quanto do aço 316 é de 79Rb. Os dados de composição química e dureza foram fornecidos pelo fabricante.

Realizou-se ensaios micrográficos e de tração para caracterização dos materiais.

As dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração estão de acordo com a norma ASTM A370 [1] e são mostradas na figura 5.1. Os resultados dos ensaios de tração estão mostrados na tabela 5.2.



- X 7,81 SE R = 10
- X 8,93 SE R = 12,5

Figura 5.1 - Corpo de prova para ensaio de tração. [1]

TABELA 5.2 - Resultados obtidos nos ensaios de tração dos aços 303 e 316

MATERIAL	LIMITE DE ESCOAMENTO A 0,2% (MPa)	LIMITE DE RESISTENCIA (MPa)	ALONGAMENTO (%)	ESTRICÇÃO (%)
303	243,3	615,1	62,0	67,7
316	258,0	585,7	57,0	70,4

As figuras 5.2 a 5.9 mostram os resultados das micrografias realizadas, tanto em um corte transversal, quanto em um corte longitudinal da barra sem ataque químico e com ataque eletrolítico. A tabela 5.3 mostra os tamanhos de grãos destes aços segundo a norma ABNT.

TABELA 5.3 - Tamanho dos grãos dos aços 303 e 316 (Norma ABNT)

Material	303	316
Sentido do corte		
Transversal	5 a 6	6 a 7
Longitudinal	5 a 6	6 a 7

Nota-se, pelo exame dessas micrografias, a presença marcante dos sulfetos de forma alongada no aço 303, o que já não acontece no aço 316.

As barras destes aços receberam tratamento de solubilização.

5.2. FERRAMENTAS

Utilizou-se brocas de aço rápido de 6,0 mm de diâmetro dos tipos N e HD-100 do fabricante SKF - Fábrica Paulista de Brocas, segundo norma DIN 1897. As brocas tipo N sofreram duas afiações diferentes: a afiação cônica comum e a afiação cruzada, con

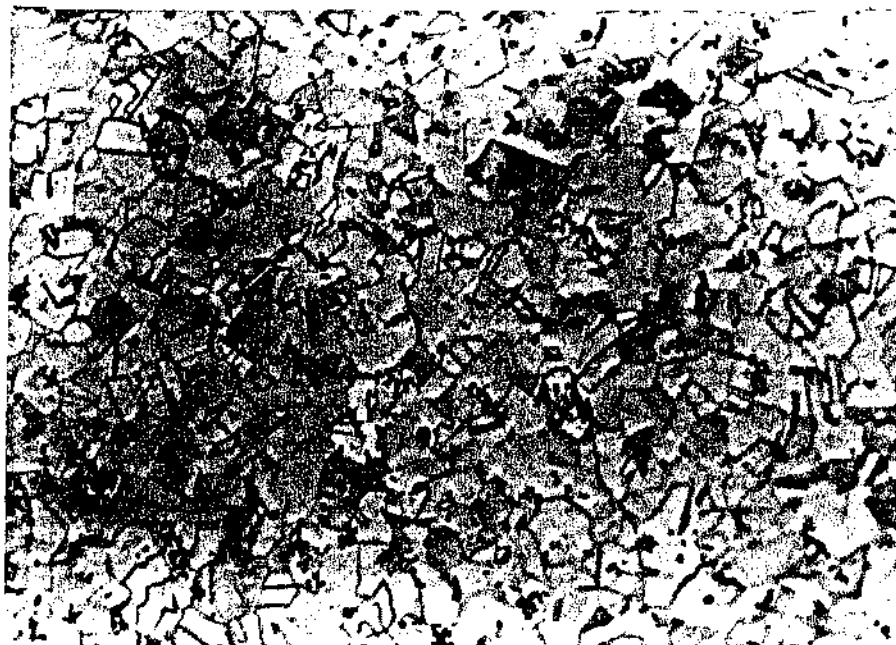


Figura 5.2 - Micrografia do aço 316 - corte transversal - ataque eletrolítico. (150X)



Figura 5.3 - Micrografia do aço 316 - corte longitudinal - ataque eletrolítico. (150X)

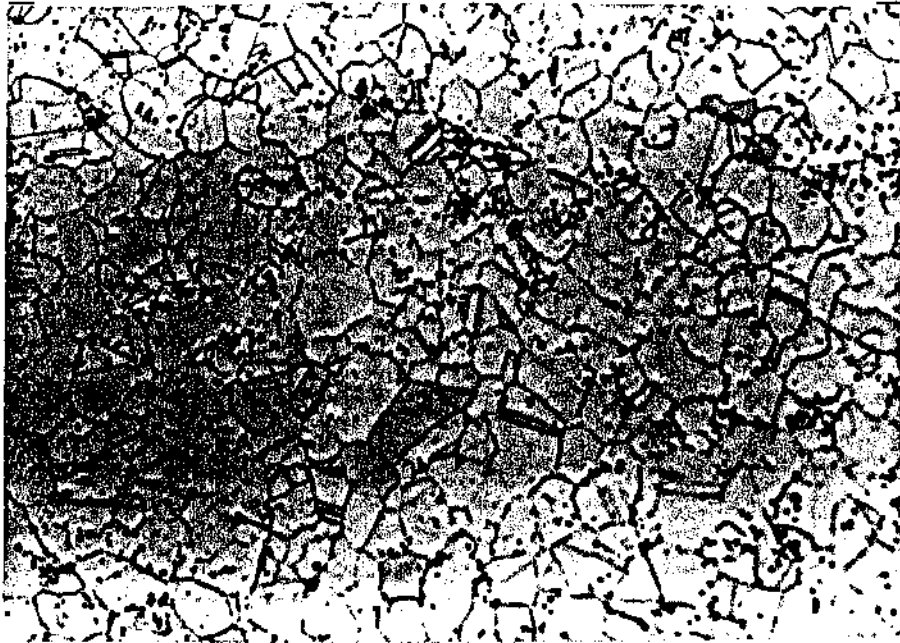


Figura 5.4 - Micrografia do aço 303 - corte transversal - ataque eletrolítico. (150X)

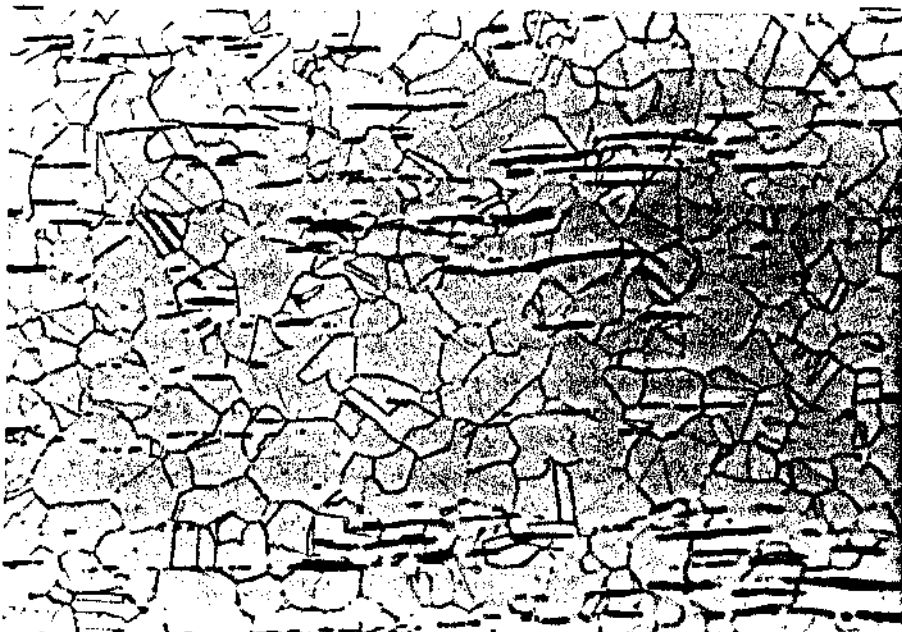


Figura 5.5 - Micrografia do aço 303 - corte longitudinal - ataque eletrolítico. (150X)

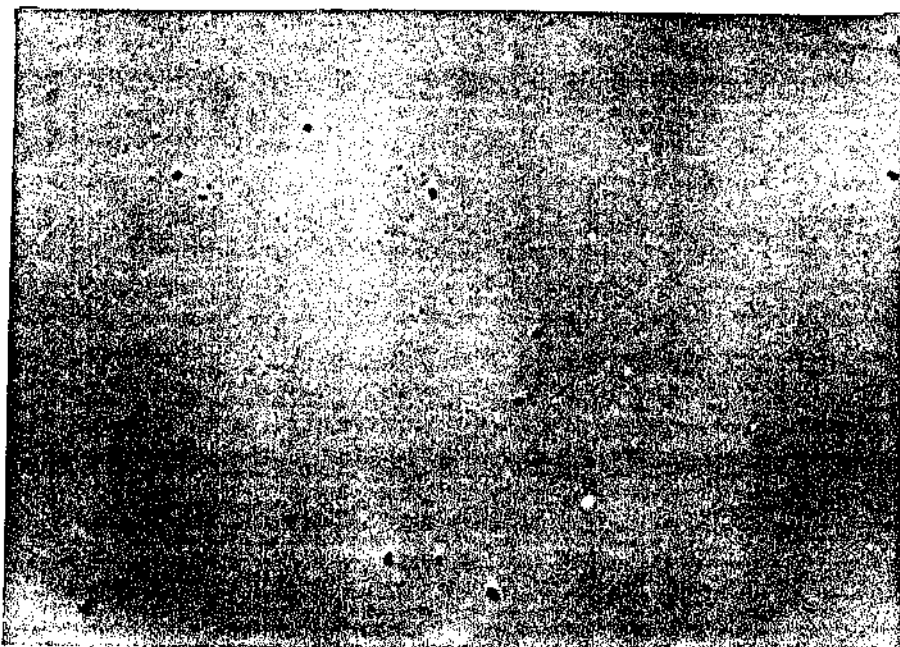


Figura 5.6 - Micrografia do aço 316 - corte transversal - sem ataque. (150X)



Figura 5.7 - Micrografia do aço 316 - corte longitudinal - sem ataque. (150X)

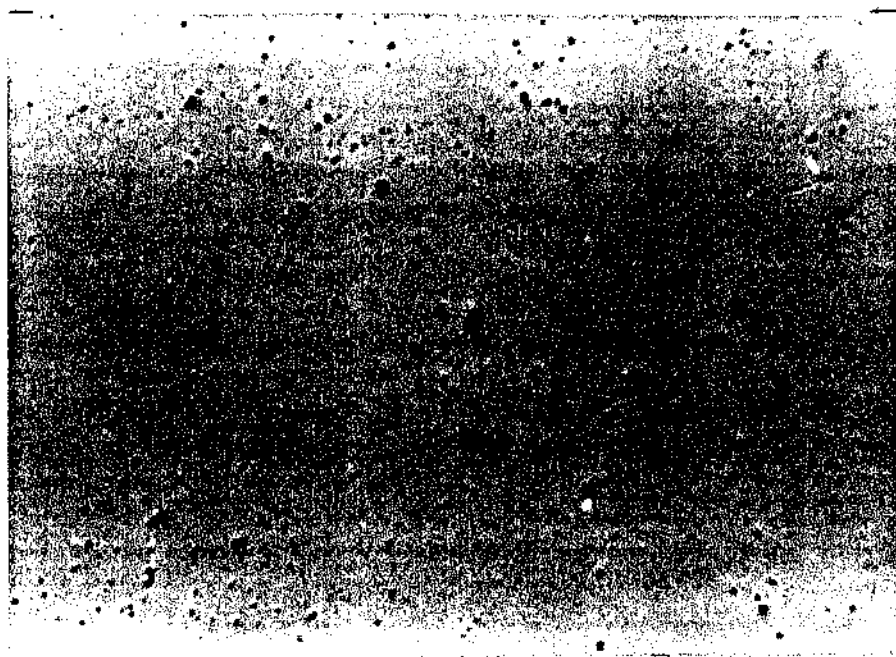


Figura 5.8 - Micrografia do aço 303 - corte transversal - sem ataque. (150X)

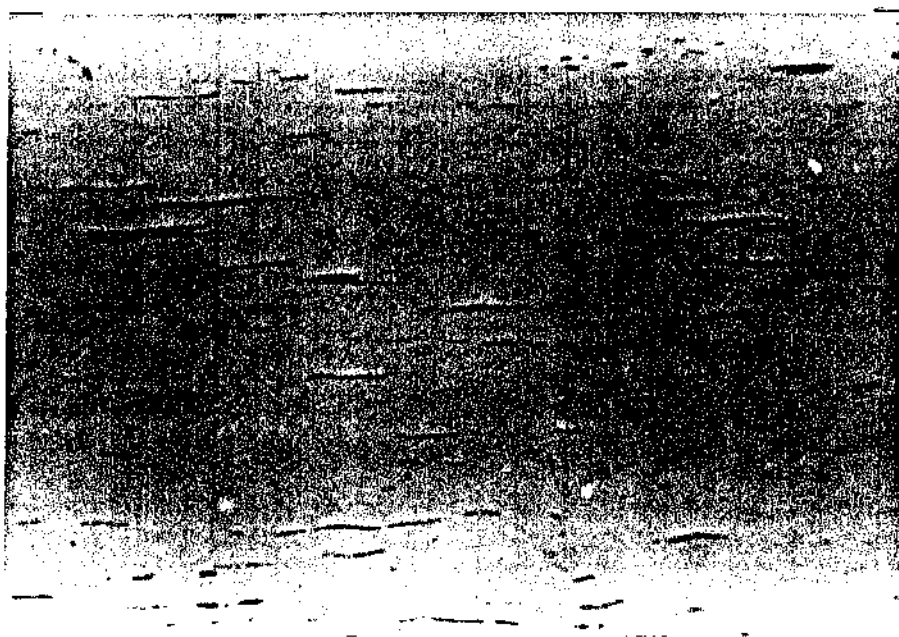


Figura 5.9 - Micrografia do aço 303 - corte longitudinal - sem ataque. (150X)

forme a figura 5.10 [2]. A afiação da broca HD-100 está mostrada na figura 5.11 [3]. A tabela 5.4 mostra os ângulos utilizados nas brocas.

TABELA 5.4 - Ângulos das brocas utilizadas.

Ângulo \ Broca	N	HD-100
Ângulo lateral de folga (α_x)	8°	10 a 14
Ângulo de hélice (ϕ)	30°	40°
Ângulo de aresta transversal (ϕ)	55°	
Ângulo de ponta (σ)	118°	130°

As brocas tipo N tanto com afiação cônica, quanto com afiação cruzada, à medida que eram utilizadas nos ensaios eram reafiadas para posterior utilização. As brocas HD-100 só foram utilizadas com a afiação vinda de fábrica, devido à dificuldade de afiação deste tipo de geometria.

5.3. ENSAIOS DE FURAÇÃO

Nos testes de furação foi utilizado o ensaio de usinabilidade baseado na força de avanço constante na furação. Com isso consegue-se, além de se estabelecer uma correlação entre o avanço e a rotação, determinar-se o índice de usinabilidade do aço 316 em relação ao aço 303 tomado como padrão.

Os corpos de prova para estes ensaios foram retirados de barras redondas de 2" (50,8 mm) de diâmetro tendo 15 mm de espessura. Suas superfícies foram usinadas em operação de faceamento, com cuidados para garantir-se um bom acabamento superficial e uma tolerância dimensional da ordem de $\pm 0,1$ mm. A espessura de 15 mm

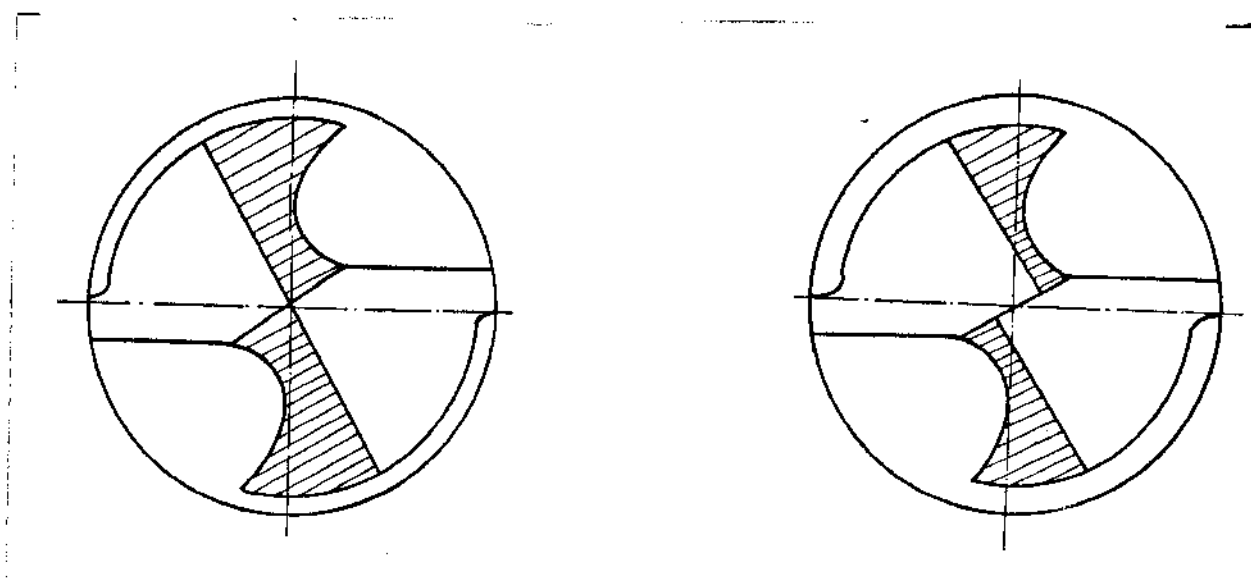


Figura 5.10 - Afiação cruzada. [2]

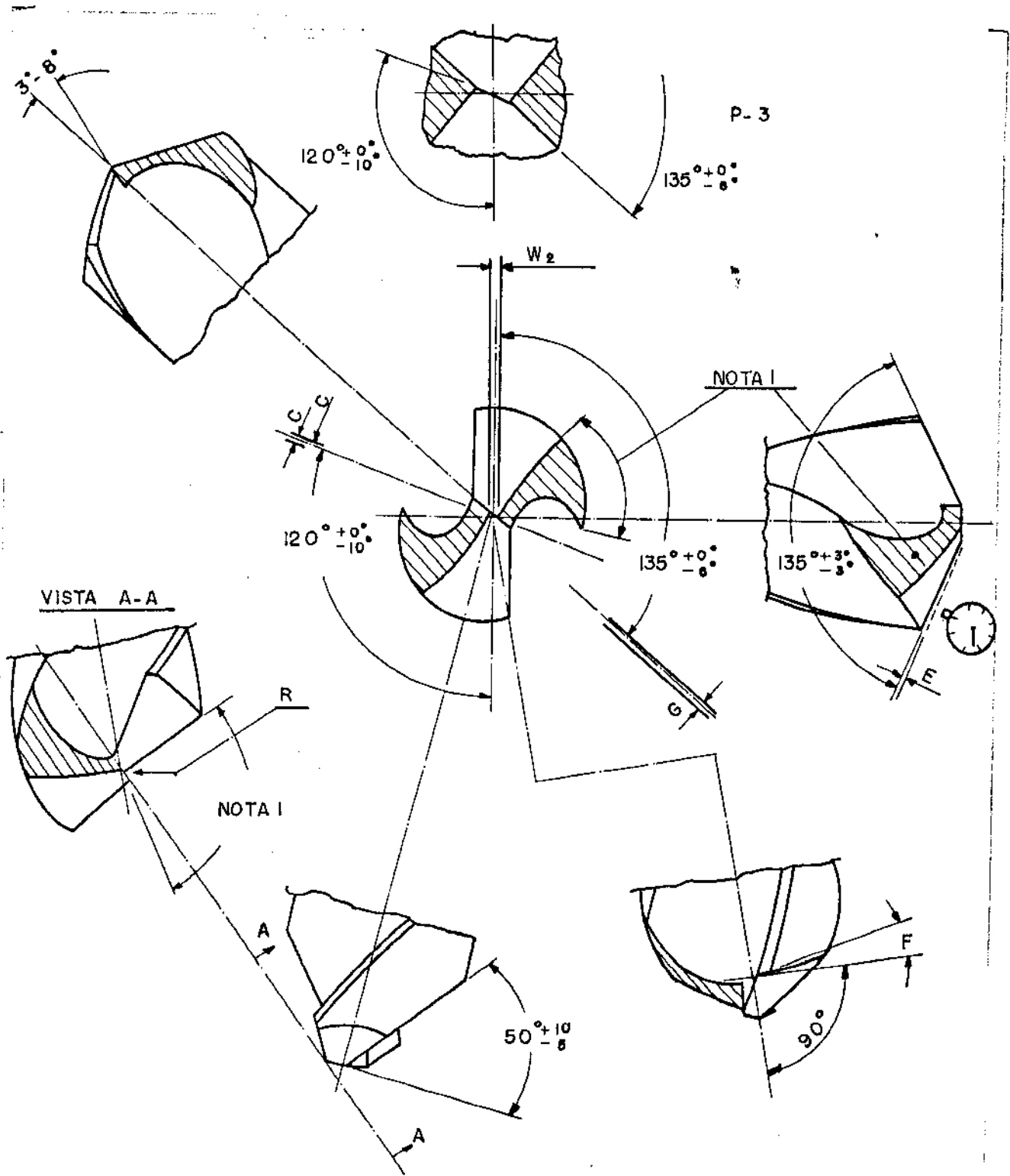


Figura 5.11 - Afiação da broca HD-100. [3]

foi tomada a fim de se conseguir uma relação comprimento/diâmetro do furo (L/D) igual a 2,5. Os furos foram realizados em um diâmetro constante da barra (~ 30 mm) a fim de se evitar a influência da mudança da estrutura que pode ocorrer quando se percorre a barra do centro para a periferia. A figura 5.12 mostra o corpo de prova com seus respectivos furos.

Os ensaios foram realizados em um torno ROMI S-20 com 3,0 C.V. de potência, dotado de dispositivos auxiliares para fixação do corpo de prova e para aplicação da força de avanço constante, conforme a figura 5.13.

Nas rotações 400, 630 e 1000 RPM foram realizados ensaios com as brocas tipo HD-100 sem pré-furação, tipo N com afiação cônica e com afiação cruzada com e sem pré-furação. Nas rotações 500 e 800 RPM foram realizados ensaios com brocas tipo N com afiação cônica e afiação cruzada sem pré-furação. Nos ensaios com pré-furação o diâmetro do furo prévio foi de 1,5 mm.

Adotou-se uma força fixa de avanço igual a 750 N. Para se tentar evitar a influência do desgaste da ferramenta sobre os resultados do ensaio, a cada 6 furos - 3 furos no aço 303 e 3 furos no aço 316 realizados alternadamente - a broca já usada era trocada por uma recém-afiada.

O tempo de furação foi cronometrado a fim de se poder calcular o avanço, que é feito através da expressão (7), citada no capítulo 4, tendo $l_a = 15$ mm.

O índice de usinabilidade do aço 316 foi calculado com base na expressão (8) mencionada no capítulo 4, tendo-se o aço 303 como padrão.

Para a obtenção dos tempos de furação foi utilizado um cronômetro de marca ILONA de resolução 0,2s. Em cada ensaio foram cronometrados nove furos de cada material, alternadamente, e os tempos usados no cálculo do índice de usinabilidade e do avanço são referentes à média aritmética desses nove furos.

Através de um procedimento estatístico baseado no desvio padrão dos valores obtidos em cada furação [4] foi calculado o número de experimentos que deveriam ser feitos para se ter 90%

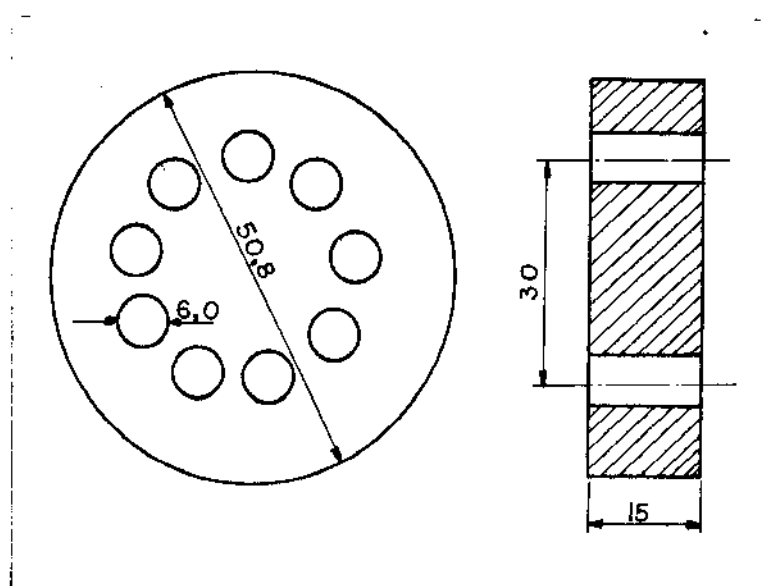


Figura 5.12 - Corpo de prova para os ensaios de furação.

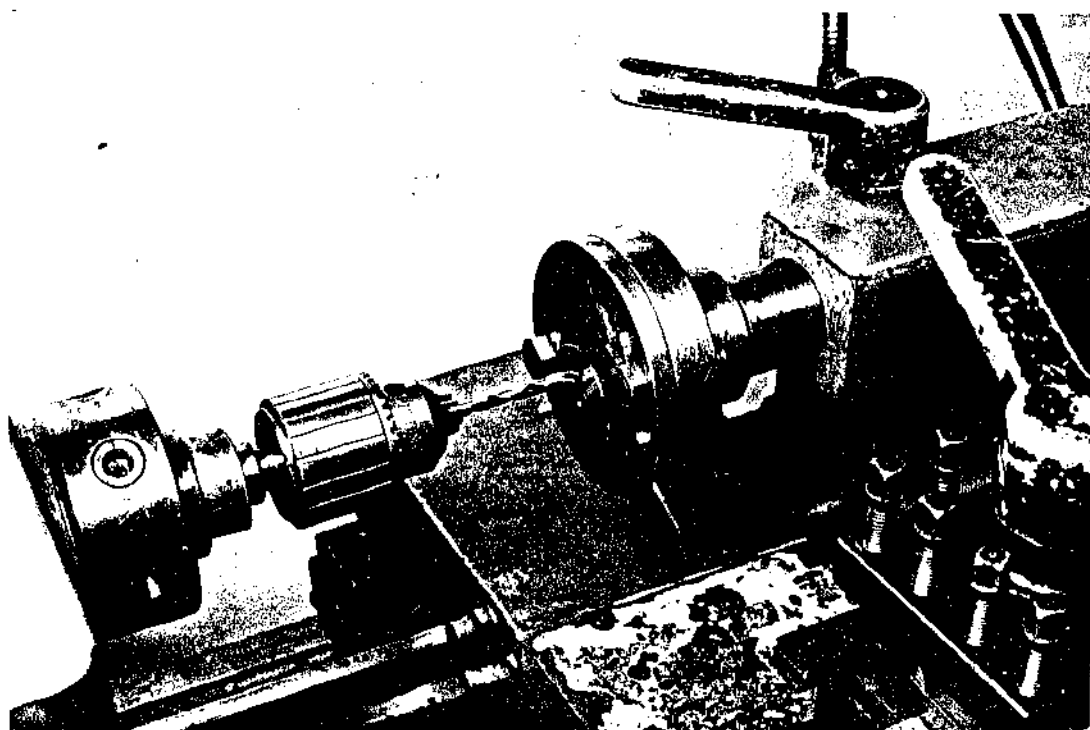
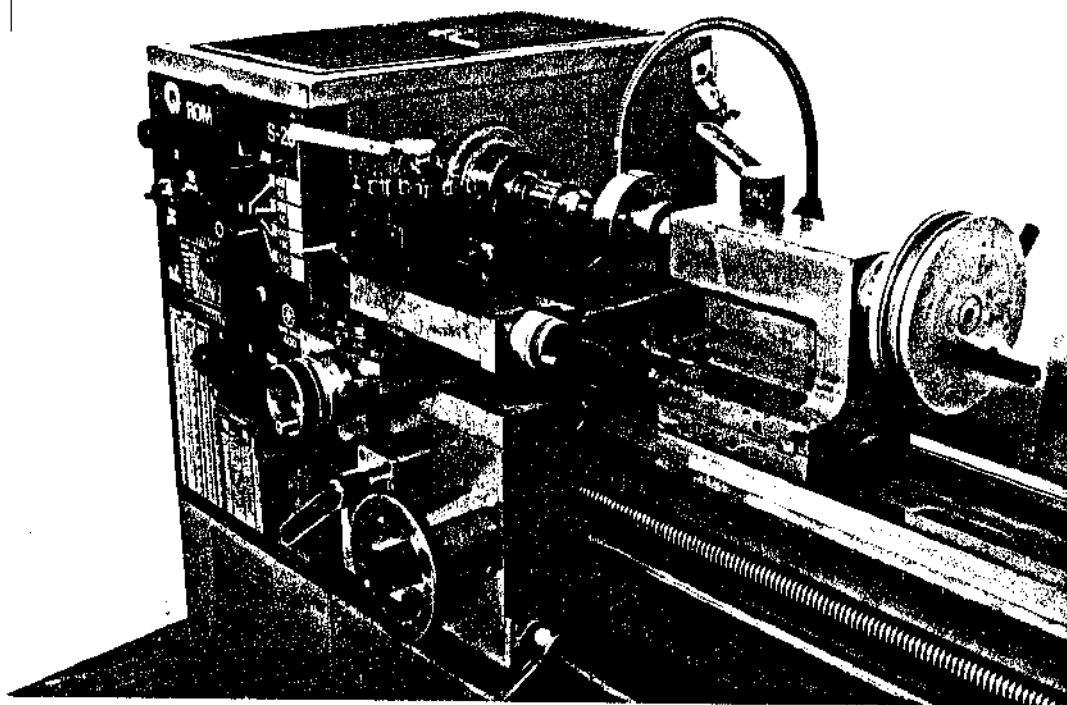


Figura 5.13 - Montagem dos equipamentos para o ensaio de furação com força de avanço constante.

de confiança nos resultados alcançados. A tabela 5.5 mostra o número mínimo de experimentos para cada ensaio. Vê-se que a repetibilidade dos tempos de furação em cada ensaio é boa, exceto para o teste com broca N-afiação cônica a 400 e 500 RPM, onde a aleatoriedade do processo era muito grande devido ao empastamento do cavaco na broca que ora acontecia, ora não e para o teste com broca N-afiação cruzada com pré-furação a 1000 RPM, onde o desgaste acelerado das brocas fazia com que os primeiros furos realizados por uma broca tivessem tempos de corte menores que os últimos furos. Assim, a confiança nos resultados obtidos nos ensaios citados baixou para 80%.

O fluido de corte utilizado foi o óleo solúvel na proporção 1:20, isto é, para cada parte do óleo misturou-se 20 partes de água.

TABELA 5.5 - Número mínimo de amostras para um ensaio com 90% de confiança

ROTAÇÃO (RPM)	MA-TERIAL	BROCA	N-AFIAÇÃO CONICA	N-AFIAÇÃO CRUZADA	HD-100	N-AFIAÇÃO CONICA COM PRE-FURO	N-AFIAÇÃO CRUZADA COM PRE-FURO
400	303		2	3	1	1	6
	316		55	2	10	6	9
500	303		2	2	-	-	-
	316		129	6	-	-	-
630	303		1	2	2	2	2
	316		3	3	3	2	4
800	303		1	2	-	-	-
	316		1	2	-	-	-
1000	303		1	2	4	3	24
	316		1	7	9	2	17

BIBLIOGRAFIA

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standards methods and definitions for mechanical testing of steel products, A370, Philadelphia, 1974.
- [2] FERRARESI, D., Usinagem dos Metais 4 ed. Associação Brasileira dos Metais, São Paulo, 1972.
- [3] FPB - FÁBRICA PAULISTA DE BROCAS, Normas para brocas com afiação em cruz. São Paulo, 1978 (Desenho MP-334A - folha 3/5).
- [4] HOGG, R.V. & CRIAG, A.T., Introduction to mathematical Statistics. 3 ed. Mac Millan Publishing Co. Inc., Londres, 1973.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os gráficos das figuras 6.1 a 6.6 e as tabelas 6.1 e 6.2 mostram um panorama geral dos resultados obtidos na parte experimental deste trabalho.

A partir destes resultados pode-se discutir a influência da rotação, da geometria da broca e da pré-furação sobre o avanço durante o processo de furação dos aços inoxidáveis austeníticos AISI316 e AISI 303, mantendo-se a força de avanço constante. Com isso pode-se recomendar faixas de avanço e velocidades de corte e também as geometrias mais adequadas da broca para a furação destes dois aços e dentro de um campo de diâmetros próximos do ensaiado.

Outro fator que merece ser discutido é a influência dos três fatores citados sobre o índice de usinabilidade do aço 316, segundo o critério da força de avanço constante na furação, tendo como padrão o aço AISI303.

6.1. ENSAIOS REALIZADOS COM BROCAS TIPO N COM AFIAÇÃO CÔNICA NORMAL - INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO NO AVANÇO

A figura 6.1 mostra os resultados obtidos na furação com broca helicoidal tipo N-afiação cônica normal. Nota-se que, no caso da furação sem pré-furação, o avanço aumenta seu valor à medida que a rotação cresce.

Para a discussão destes resultados é necessário que se façam algumas considerações preliminares.

Define-se grau de recalque (R_C) como a relação entre a espessura de corte medida no cavaco (h') e a espessura de corte calculada (h) (ver figura 6.7).

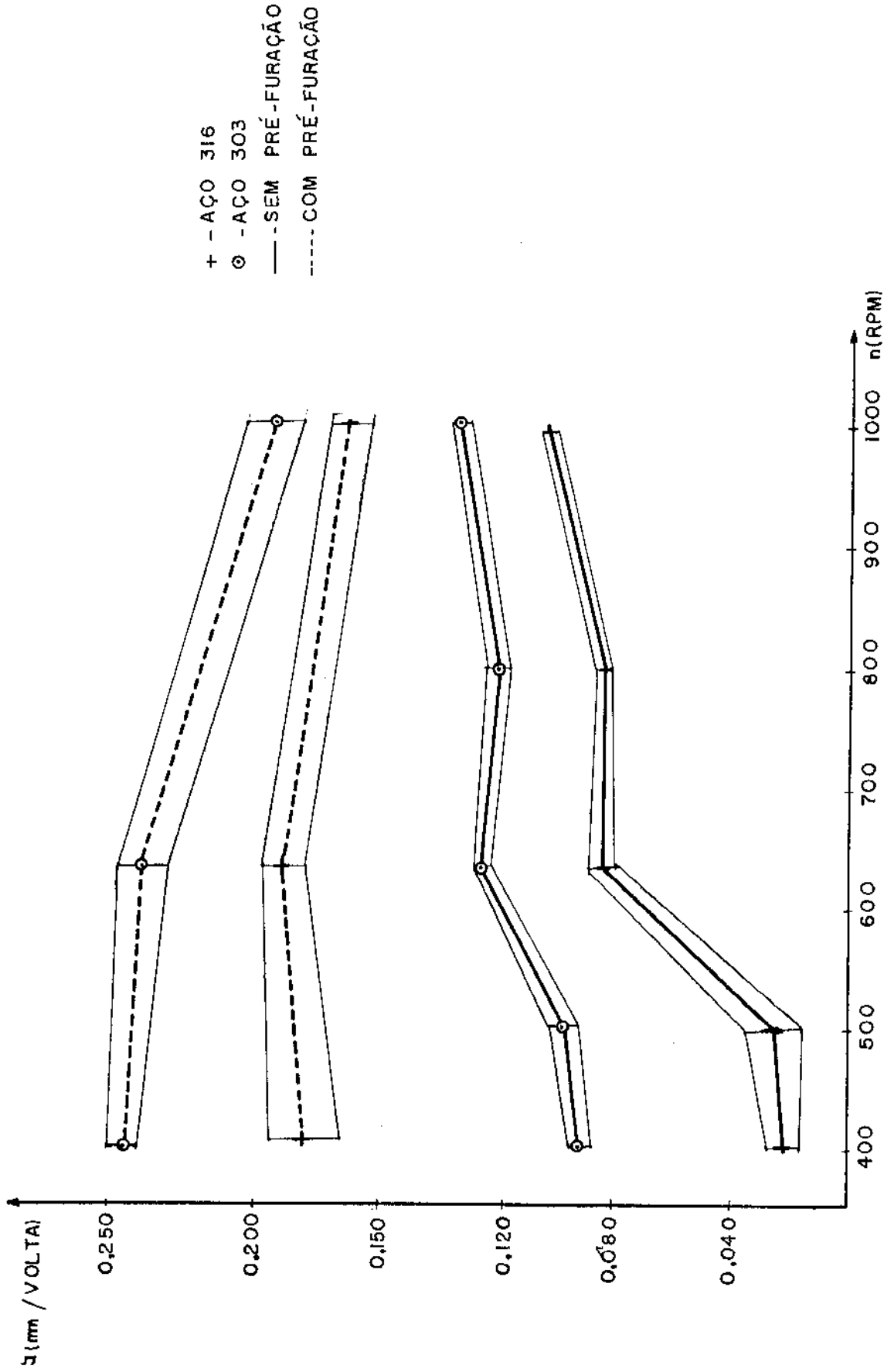


Figura 6.1 - Variação do avanço em função da rotação da broca.
 Broca tipo N-afiação cônica.

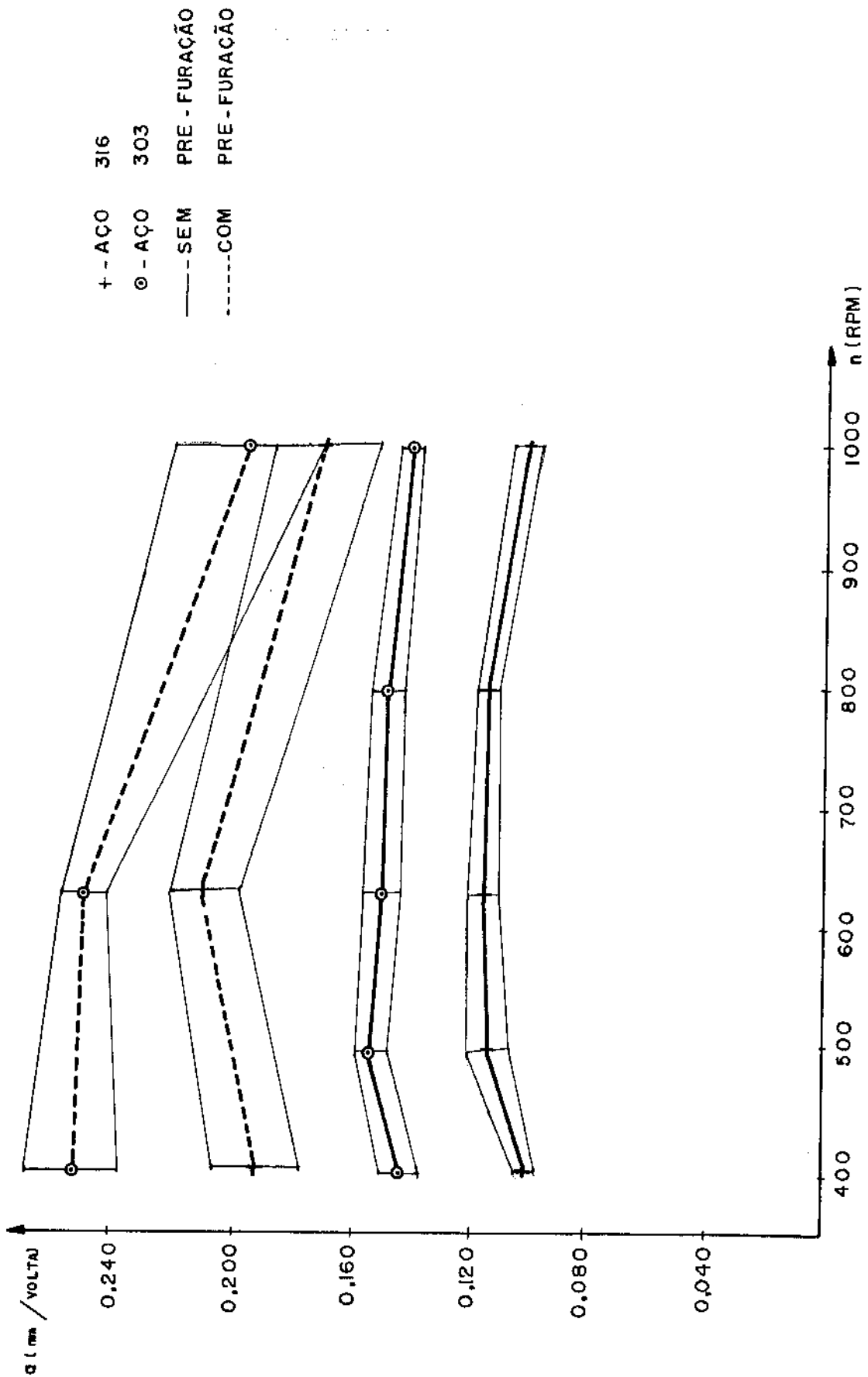


Figura 6.2 - Variação do avanço em função da rotação da broca.
 Broca tipo N-afiação cruzada.

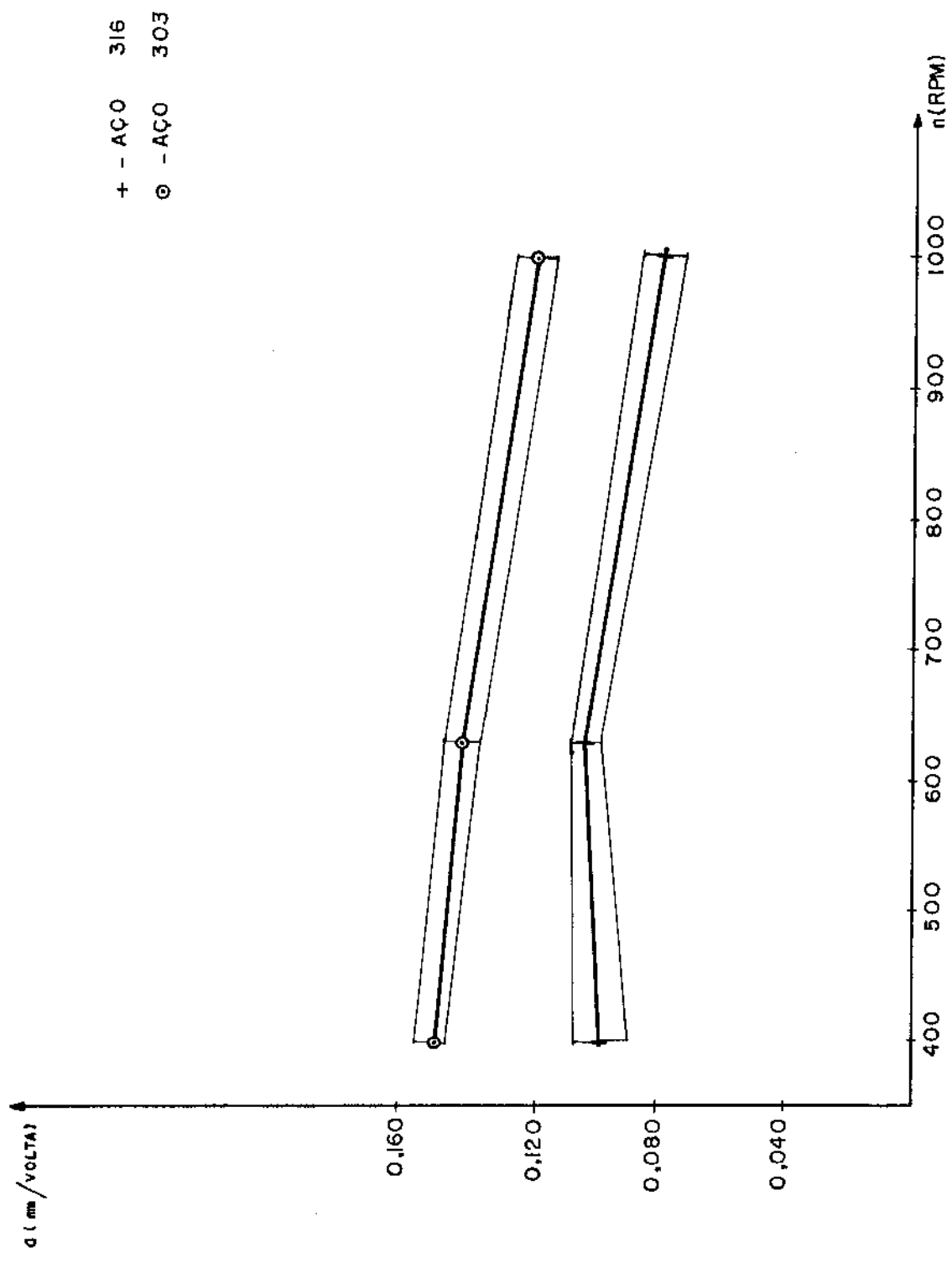


Figura 6.3 - Variação do avanço em função da rotação.
Broca tipo HD-100.

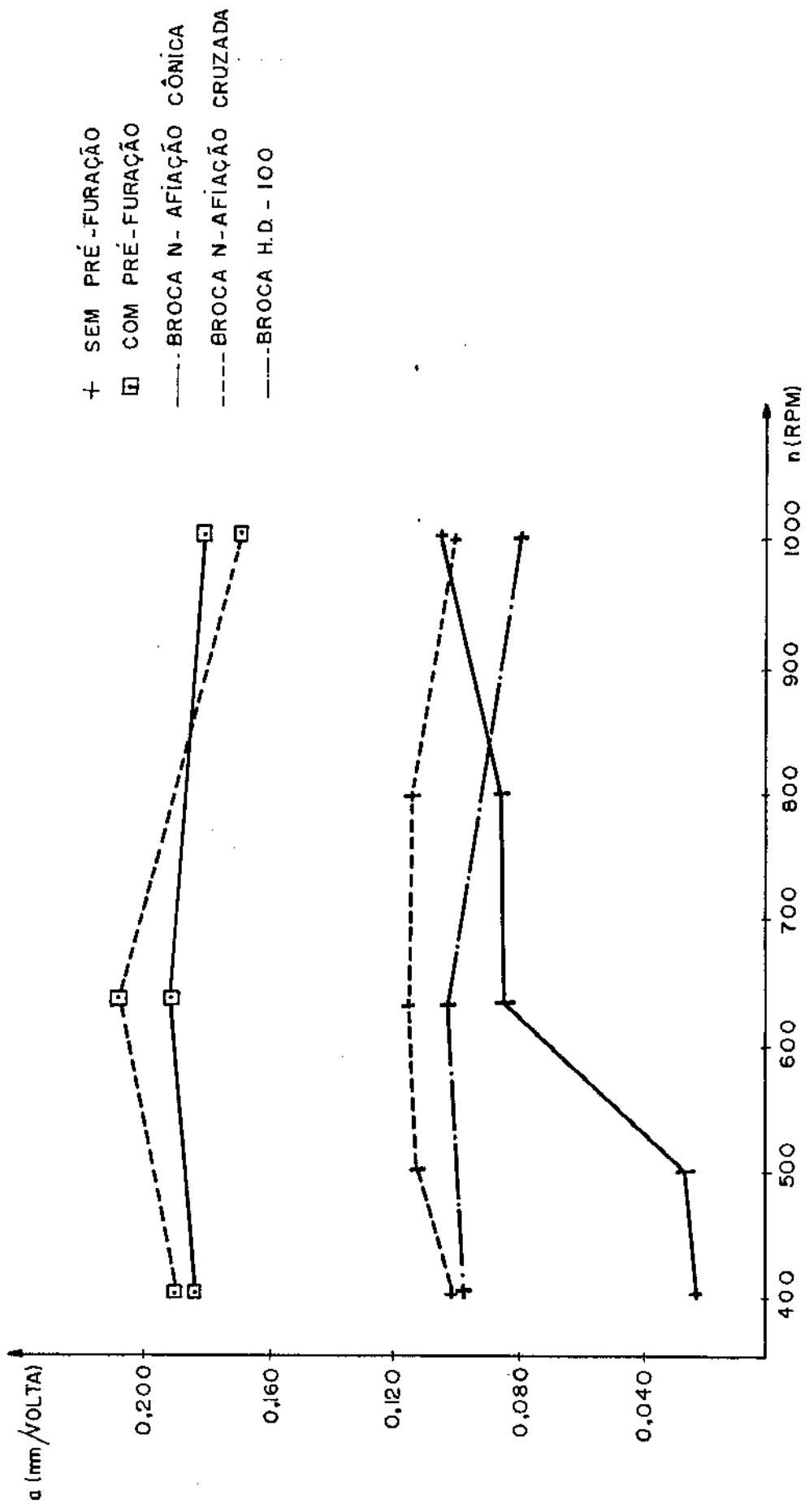


Figura 6.4 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios com as 3 geometrias de brocas para o aço 316 - Variação do avanço em função da rotação da broca.

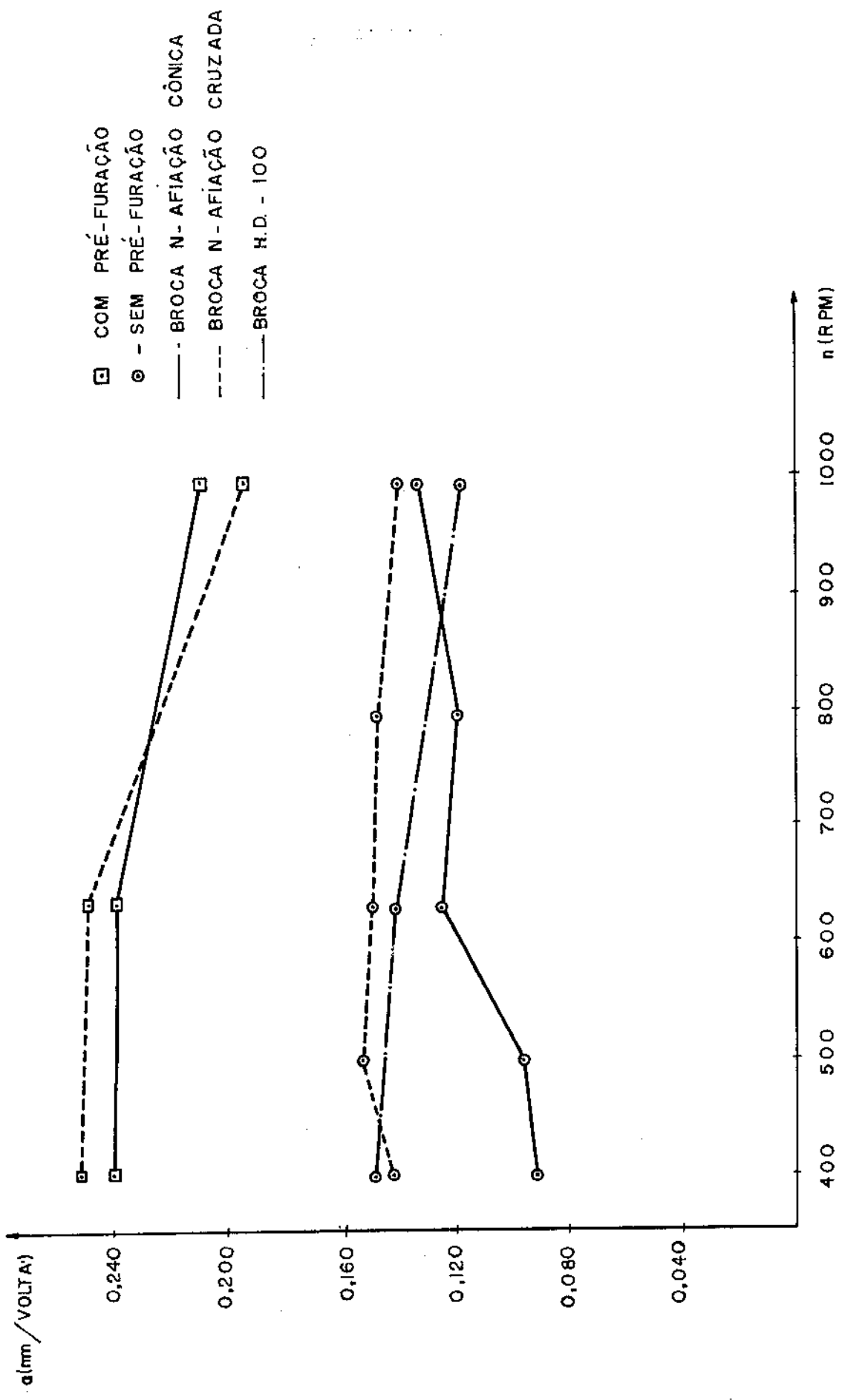


Figura 6.5 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios com as 3 geometrias de brocas para o aço 303 - Variação do avanço em função da rotação da broca.

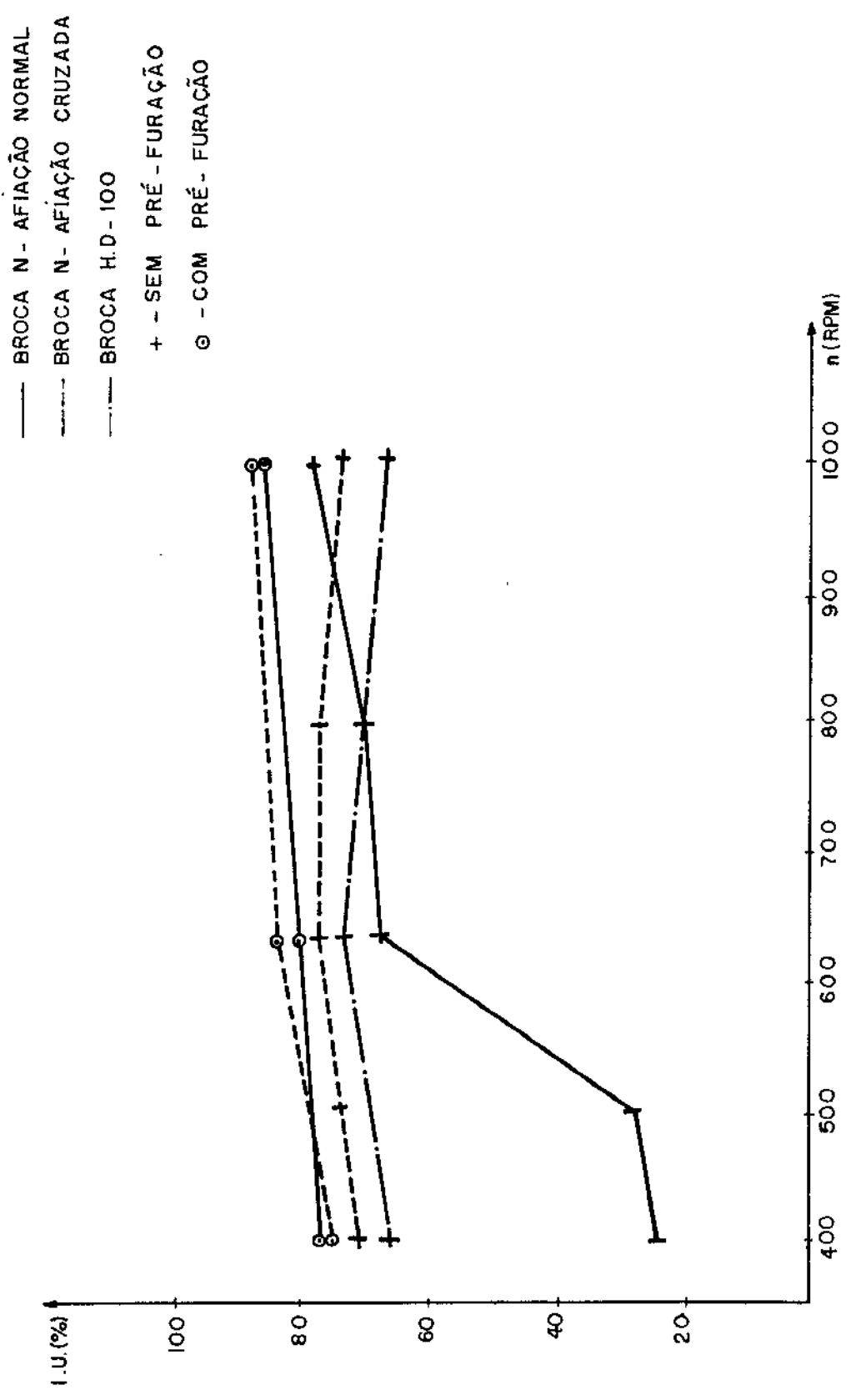


Figura 6.6 - Variação do Índice de usinabilidade retirado do ensaio de força de avanço constante na furação com a rotação.

TABELA 6.1 - Valores do avanço (mm/volta) obtidos nos ensaios de furação com força de avanço constante.

ROTAÇÃO (RPM)	BROCA		N-AFIAÇÃO CONICA	N-AFIAÇÃO CRUZADA	HD-100	N-AFIAÇÃO CONICA COM PRE-FURO	N-AFIAÇÃO CRUZADA COM PRE-FURO
	MA- TERIAL						
400	316		0,022	0,100	0,097	0,183	0,190
	303		0,091	0,142	0,148	0,240	0,251
500	316		0,026	0,112	-	-	-
	303		0,095	0,152	-	-	-
630	316		0,083	0,110	0,102	0,191	0,208
	303		0,124	0,143	0,140	0,239	0,49
800	316		0,083	0,113	-	-	-
	303		0,118	0,147	-	-	-
1000	316		0,103	0,100	0,078	0,180	0,169
	303		0,132	0,136	0,117	0,209	0,194

TABELA 6.2 - Valores do Índice de usinabilidade (%) obtidos nos ensaios de usinabilidade segundo o critério da força de avanço constante na furação.

RO- TAÇÃO	BROCA	N-AFIAÇÃO CÔNICA	N-AFIAÇÃO CRUZADA	HD-100	N-AFIAÇÃO CÔNICA COM PRE-FURAÇÃO	N-AFIAÇÃO CRUZADA COM PRE-FURAÇÃO
400		23,8	70,4	65,4	76,3	75,8
500		27,4	73,4	-	-	-
630		67,2	77,0	72,9	79,8	83,5
800		70,0	77,0	-	-	-
1000		78,0	73,4	66,4	86,0	87,0

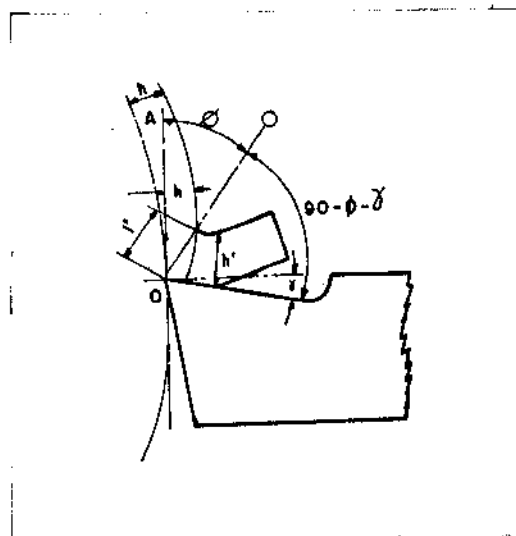


Figura 6.7 - Esquema da formação do cavaco. [1]

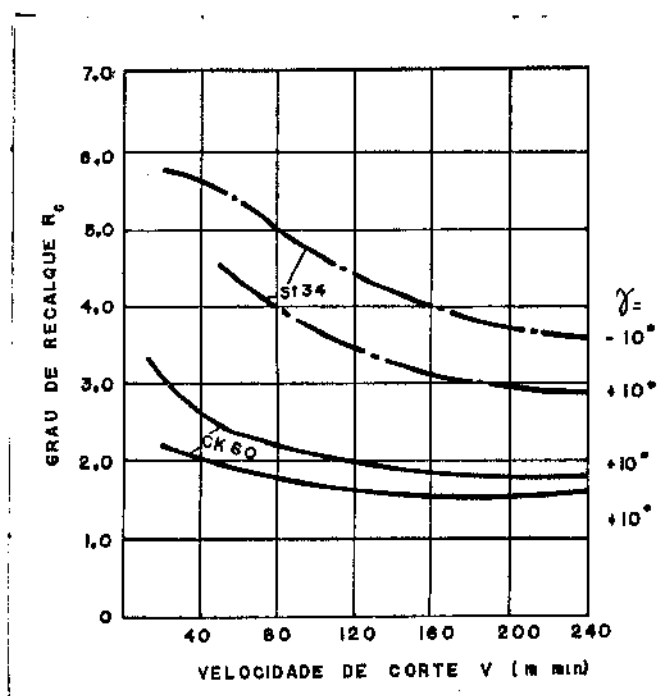


Figura 6.8 - Grau de recalque em função da velocidade [1] de corte (v).

$h = 0,19 \text{ mm}$; $p = 2 \text{ mm}$; $\chi = 60^\circ$; $\alpha = 5^\circ$;
 $r = 1 \text{ mm}$.

$$R_c = \frac{h'}{h} \quad (9)$$

O grau de recalque é um fator que mede o quanto o cavaco foi deformado na operação de usinagem. A medida que se diminui o ângulo de saída (γ) da ferramenta o grau de recalque aumenta pois a ferramenta impõe uma deformação maior ao cavaco. A medida que se aumenta a velocidade de corte o grau de recalque tende a diminuir, conforme mostra a figura 6.8, pois aumenta-se a velocidade de deformação do cavaco [1]. Essa variação do grau de recalque com as condições de deformação do cavaco é muito mais acentuada para materiais dúteis que formam cavacos contínuos, que antes de se destacarem da peça sofrem uma grande deformação. Os materiais frágeis que tendem a formar cavaco de ruptura, que quando começam a sofrer a deformação própria do processo de usinagem, logo se rompem e saltam para fora da zona de corte, tem um grau de recalque muito baixo e muito pouco influenciável pelas condições de deformação impostas pelo processo [2].

O ângulo de cisalhamento (ϕ) que é o ângulo entre o plano de corte e o plano onde ocorre o cisalhamento do cavaco (figura 6.7) varia com o grau de recalque segundo a seguinte expressão

$$\text{tg}\phi = \frac{\cos\gamma}{R_c - \text{sen}\gamma} \quad (10)$$

Assim, quando o grau de recalque diminui o ângulo de cisalhamento aumenta.

Segundo Hucks, o coeficiente de atrito (μ) entre o cavaco e a ferramenta varia com o ângulo de cisalhamento (ϕ) da seguinte maneira:

$$\text{arc tg} \frac{\mu}{2} = 45 + \gamma - \phi \quad (11)$$

Assim, quando ϕ aumenta, μ diminui, causando uma diminuição dos esforços de atrito.

Além disso, a medida que o ângulo de cisalhamento (ϕ) aumenta, tanto a força de corte quanto a força de avanço diminuem, conforme mostra as expressões obtidas por Merchant [2].

$$P_c = s \cdot \tau_s (\operatorname{tg}(C-\phi) + \operatorname{cotg}\phi) \quad (12)$$

$$P_a = s \cdot \tau_s (\operatorname{cotg}\phi \cdot \operatorname{tg}(C-\phi) - 1) \quad (13)$$

onde: P_c = força de corte

P_a = força de avanço

s = área da secção de corte (b.h)

τ_s = tensão dinâmica de cisalhamento que age no plano de cisalhamento

C = constante do material \rightarrow 80 a 90° para o aço inoxidável

Tudo o que foi dito sobre o ângulo de cisalhamento e sua influência nos esforços de corte são válidos para o corte ortogonal, mas podem ser extrapolados para a operação de furação.

Resumindo: o aumento da velocidade de corte causa uma diminuição no grau de recalque do cavaco e conseqüente aumento do ângulo de cisalhamento. Com isto temos a diminuição dos esforços de atrito, da força de corte e da força de avanço.

Feitas essas considerações, pode-se agora discutir os resultados obtidos nos ensaios com broca tipo N-afiação cônica normal.

Vê-se na figura 6.1 que tanto para o aço 316, quanto para o aço 303, quando se efetua a furação sem pré-furação em rotações baixas (de 400 a 500 RPM), o avanço permanece em níveis baixos. Nota-se que a 630 RPM o valor do avanço já é bem maior, permanecendo quase constante até valores de rotação próximos de 800 RPM, voltando a crescer, desta vez menos acentuadamente, quando se aproxima de 1000 RPM.

Estes resultados contrariam a expressão obtida por Daar [3] para o cálculo da força de avanço sem pré-furação, citada no capítulo 3 (expressão (5)).

No caso estudado, a força de avanço, o diâmetro do furo e o material foram mantidos constantes. Segundo esta expressão o avanço não deveria variar com a rotação da broca. Mas, exceto para uma determinada faixa de rotações (630 a 800 RPM), o que se viu foi uma grande variação do avanço. Conclui-se que para os aços estudados a rotação da broca influencia o valor do avanço, ou da força de avanço quando aquele é mantido constante, na furação sem pré-furação, a medida que se distancie de uma faixa específica de rotações, o que não é previsto quando se aplica a expressão de Daar.

A pergunta que surge dessa constatação é o por quê deste fato ocorrer.

Um exame da figura 6.1 mostra que a aresta transversal de corte é a responsável pelo pequeno avanço conseguido quando usina-se sem pré-furação, principalmente em baixas rotações (até 500 RPM aproximadamente), pois os valores do avanço na furação com pré-furação, onde a ação da aresta transversal de corte não existe, são muito maiores que os valores do avanço da furação sem pré-furação principalmente para o aço 316.

Como foi visto no Capítulo 4 - Processo de Furação, o ângulo de saída (γ) de uma broca helicoidal varia com o diâmetro da broca, sendo que na região da aresta transversal de corte ele é muito negativo, com valores na faixa de -50° . Assim, esta aresta causa uma grande deformação do cavaco (alto grau de recalque), mais esmagando o fundo do furo e o cavaco do que propriamente cortando. Isto é crítico quando a furação é realizada em um aço inoxidável austenítico que é muito dútil, sofrendo um grande nível de deformação antes de se romper e possui uma alta taxa de encruamento, isto é, quando sofre deformação plástica encrua muito facilmente, aumentando assim sua resistência mecânica, podendo, dependendo do nível de temperatura e de deformação, haver transformação da austenita em martensita.

Assim, em baixas rotações, o grau de recalque na re-

gião central do furo é muito alto, fazendo com que os esforços de corte necessários também sejam altos. Como nos ensaios manteve-se a força de avanço constante, o avanço obtido foi pequeno.

Nos ensaios com o aço 316 em baixas rotações, devido ao alto grau de recalque, à baixa velocidade de saída do cavaco e ao alto coeficiente de atrito, houve um empastamento e posterior aderência do cavaco na superfície de saída da ferramenta, ocasionando algumas vezes uma paralisação por alguns segundos do movimento de avanço da broca. Ao se retirar a broca do furo constatava-se que pedaços grandes de cavaco haviam aderido à superfície de saída.

Na figura 6.1 vê-se que este efeito da aresta transversal de corte em baixas rotações não é tão acentuado para o aço 303, onde a diferença entre o avanço a 500 RPM e a 630 RPM não é tão grande quanto no aço 316. Este resultado está concorde com o que foi dito por Kovach e Moskowitz [4] que constataram que o sulfeto de manganês, que existe em boa quantidade no aço 303, tem o efeito de aumentar o ângulo de cisalhamento (ϕ) e assim diminuir o grau de recalque.

A medida que aumentou-se a rotação na furação sem pré-furação, os valores do avanço foram crescendo gradativamente. Isto pode ser explicado pela diminuição do grau de recalque e do coeficiente de atrito a medida que se aumenta a velocidade de corte, principalmente na região da aresta transversal de corte, diminuindo assim os esforços de corte necessários. Como a força de avanço foi mantida constante, o avanço aumentou.

Na furação com pré-furação os resultados foram bem diferentes:

A 400 e 630 RPM os valores do avanço permaneceram praticamente constantes. Neste caso, como a aresta transversal de corte não está em trabalho, o recalque do cavaco e do furo não é tão acentuado, fazendo com que a influência da variação da velocidade no grau de recalque seja desprezível, mantendo assim o avanço constante.

A 1000 RPM os valores do avanço caíram levemente para os dois aços, um pouco mais acentuadamente para o aço AISI303. Isto se deve ao processo de desgaste da ferramenta que começa a se evidenciar, devido a valores de rotação e de avanço simultaneamente altos, principalmente para o aço AISI303. Neste aço, o tempo de corte médio para a execução dos últimos furos realizados por cada uma das brocas foi aproximadamente 10% superior ao tempo de corte médio dos primeiros furos.

6.2. ENSAIOS REALIZADOS COM BROCAS TIPO N COM AFIAÇÃO CRUZADA - INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO NO AVANÇO

A figura 6.2 mostra o comportamento dos dois aços estudados na furação com broca tipo N com afiação cruzada, tanto na furação sem pré-furação, quanto na furação com furo prévio.

Na furação sem furo prévio, para o aço 316, o avanço permaneceu praticamente constante na faixa de rotações de 500 a 800 RPM, sendo que a 400 e a 1000 RPM os valores do avanço foram pouco menores.

A afiação cruzada reduz em muito a aresta transversal de corte e por isso impõe uma deformação ao cavaco e a peça na região central do furo muito menor que na afiação cônica comum. Assim, mesmo em baixas rotações, a influência do grau de recalque é pequena fazendo com que o valor do avanço a 400 RPM seja somente pouco menor que a 500, 630 e 800 RPM. Nesta última faixa de rotações o aumento da velocidade de corte não tem influência no grau de recalque e portanto os valores do avanço permaneceram praticamente constantes, obedecendo à expressão de Daar para força de avanço.

A 1000 RPM o avanço voltou a cair levemente, isto devido a já se notar a influência do desgaste da ferramenta nos tempos de corte, pois os últimos furos realizados por uma broca foram executados em um tempo 17,5% maior, em média, que os primeiros furos. Em outras palavras, se o tempo levado em conta fosse a média somente do primeiro furo realizado por cada uma das três

brocas, o valor do avanço aumentaria, chegando bem próximo do avanço conseguido a 800 RPM.

No aço 303, também na furação sem pré-furação, praticamente não houve variação dos valores do avanço, pelo menos se considerar-se a faixa de rotações de 400 a 800 RPM. Isto era de se esperar, pois além da broca com afiação cruzada não impor um recalque muito acentuado ao cavaco e ao fundo do furo, o grau de recalque do aço 303 é sempre menor que dos outros aços inoxidáveis austeníticos, mantidos às mesmas condições de usinagem, devido ao fato dele ser resulfurado, como já foi visto no item 6.1.

A 1000 RPM houve também uma queda no valor do avanço devido ao desgaste da ferramenta, mas muito pequena, quase desprezível.

Outra coisa interessante de se notar é que a diferença entre os valores do avanço com e sem pré-furação, para os dois aços, não é tão marcante quanto no caso da furação com broca tipo N-afiação cônica comum. Isto é devido ao fato de que a influência maléfica da aresta transversal de corte não é tão grande na broca com afiação cruzada.

Na furação com pré-furação um fato é digno de nota: a sensível queda dos valores de avanço a 1000 RPM. Nesta rotação, devido a valores de velocidade de corte e de avanço simultaneamente altos, o desgaste da broca foi bem acentuado, sendo que duas das três brocas não conseguiram realizar todos os seis furos.

6.3. ENSAIOS REALIZADOS COM BROCA HD-100 - INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO NO AVANÇO

A figura 6.3 mostra os resultados obtidos para a furação sem pré-furação com brocas tipo HD-100. Essa broca tem a geometria de sua ponta muito semelhante à broca com afiação cruzada e possui ângulo de hélice (ϕ) e conseqüentemente o ângulo de saída (γ) maior que a broca tipo N.

Devido a esta geometria, a deformação do cavaco é peque

na e por isso a influência da velocidade de corte no grau de recalque e na força de avanço também é baixa e, portanto, os valores de avanço permanecem praticamente constante com a variação da rotação de 400 para 630 RPM, tanto para o aço 316 quanto para o aço 303.

Esta broca, porém, se mostrou muito sensível ao desgaste e com isso a queda dos valores de avanço a 1000 RPM foi grande. Já a 630 RPM notou-se uma diferença razoável entre os tempos de furação dos primeiros e dos últimos furos de uma broca. A 1000 RPM o desgaste foi tão acentuado que nenhuma das três brocas conseguiu realizar os últimos furos de suas séries de seis furos.

Esta suscetibilidade maior ao desgaste da broca HD-100, apesar de ser construída com o mesmo material que as outras brocas, explica-se pela sua geometria. Sua ponta é frágil devido ao tipo de afiação, seu ângulo de saída é grande fragilizando ainda mais a cunha da ferramenta e a largura de sua superfície lateral de folga é menor, o que facilita a saída do cavaco por causa do aumento da largura do canal helicoidal por onde o cavaco se escoia, mas fragiliza ainda mais a broca.

Concluindo, a broca HD-100 pode ser recomendada para materiais que são problemáticos devido à deformação plástica do cavaco e do fundo do furo e também para furos onde a saída do cavaco é crítica (furos profundos), mas não deve ser utilizada com altos avanços e velocidades de corte, sob pena de se obter uma vida muito curta da ferramenta. A firma fabricante da broca não a recomenda para materiais que contenham partículas duras e abrasivas por causa do alto desgaste que isso acarretaria, confirmando o que foi constatado nos ensaios.

6.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NA FURAÇÃO COM AS TRÊS GEOMETRIAS DE BROCAS, PARA O AÇO 316.

A figura 6.4 mostra um quadro geral do comportamento de cada tipo de broca em relação aos outros dois. Alguns pontos merecem discussão:

- a) apesar de possuir um ângulo de saída mais positivo,

a broca HD-100 não se mostrou mais eficiente que a broca N com afiação cruzada, como poder-se-ia inicialmente supor. A 400 RPM os valores do avanço destas duas brocas estão bem próximos e a partir disso se distanciam sempre com superioridade para a broca N com afiação cruzada. Isto nos leva a concluir que o ângulo de saída da broca tipo N já é suficiente para não esmagar demais o cavaco e que seu acréscimo que ocorre na broca HD-100, não leva a nenhum resultado positivo em termos de deformação do cavaco. Em altas rotações (800 e 1000 RPM) a diferença entre os valores do avanço destas duas brocas é maior ainda. Isto, como foi explicado no item anterior, é devido principalmente à maior rapidez com que a broca HD-100 se desgasta.

- b) Na rotação de 1000 RPM os valores de avanço das brocas tipo N com afiação cônica normal e com afiação cruzada são praticamente iguais. Isto é devido principalmente a dois fatores: 1) a broca com afiação cônica se mostrou um pouco mais resistente ao desgaste que a afiação cruzada, não apresentando diferença entre o tempo de furação do primeiro e do último furo realizado por uma broca, o que já acontece com a broca com afiação cruzada; 2) nesta rotação, o recalque causado pela aresta transversal de corte da broca com afiação cônica normal já é bem menor, fazendo com que a melhoria causada pela afiação cruzada seja desprezível.
- c) A broca tipo N com afiação cruzada se mostrou, na grande maioria das rotações a mais eficiente no processo de furação do aço inoxidável tipo 316. A 1000 RPM porém, a broca N com afiação cônica se mostrou tão eficiente quanto a broca com afiação cruzada. Assim, levando-se em conta os esforços de usinagem, em velocidades de corte baixas e médias recomenda-se o uso da broca N com afiação cruzada para a furação do aço inoxidável austenítico, e em velocidades altas a broca N com afiação cônica normal é mais recomendável. Porém, outros dois fatores devem ser verifica-

dos antes da utilização destas brocas, quais sejam: o custo da afiação cruzada que, por sua maior complexidade, tende a ser maior e a vida da broca com afiação cônica em altas velocidades de corte.

- d) A broca HD-100, apesar de se mostrar menos eficiente que a broca N com afiação cruzada em todas as rotações, talvez seja mais eficiente que esta broca em baixas velocidades, a medida que a furação se torne mais profunda (L/D maior). Isto é devido à maior facilidade que o cavaco encontra para sair da região de corte quando a furação é realizada com a broca HD-100.
- e) A furação com pré-furação sempre se mostrou mais eficiente que qualquer outro processo que não utilize pré-furo e a mudança da broca com afiação cônica normal para a broca com afiação cruzada neste tipo de furação não trouxe grandes benefícios. Acontece que a furação com furo prévio exige custos adicionais para a realização do pré-furo. Porém se a furação for realizada com broca com afiação cônica normal evita-se o maior custo da afiação cruzada. Assim, cabe aqui também um estudo para verificação da viabilidade econômica do uso da pré-furação com relação à furação sem pré-furação realizada com broca com afiação cruzada e mesmo com broca com afiação normal, no caso de altas velocidades de corte.

6.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NA FURAÇÃO COM AS TRÊS GEOMETRIAS DE BROCAS, PARA O AÇO 303.

A figura 6.5 mostra um quadro geral do comportamento de cada tipo de broca em relação aos outros dois, para a furação do aço 303. Nota-se que as discussões e conclusões tiradas do estudo da furação do aço 316 podem também ser aplicadas para o aço 303, ou seja, o maior ângulo de saída da broca HD-100 não trouxe os resultados positivos esperados e seu desempenho até 630 RPM foi semelhante ao da broca N com afiação cruzada; também para este

aço o grande desgaste da broca HD-100 a 1000 RPM fez com que sua eficiência baixasse em relação a broca N com afiação cruzada. Até 800 RPM a broca N com afiação cruzada foi a que se mostrou mais eficiente, mas a proximidade dos valores do avanço das brocas N com afiação cruzada e com afiação cônica normal a 1000 RPM, faz com que nesta faixa de velocidades a broca N com afiação cônica normal seja mais recomendável devido ao seu menor custo de afiação. A mesma discussão feita para o aço 316 no caso de furação com pré-furação cabe também para o aço 303.

Em todas as rotações porém, notou-se que a diferença entre os valores do avanço da broca N-afiação cruzada e afiação cônica não é tão grande quanto no caso da furação do aço 316, tornando mais viável a utilização da broca com afiação cônica normal para a furação do aço resulfurado tipo 303.

6.6. RESULTADOS OBTIDOS PARA O ÍNDICE DE USINABILIDADE

Como já foi visto, um dos objetivos do presente trabalho é fazer uma crítica ao ensaio de usinabilidade baseado na força de avanço constante na furação, verificando a variação do índice de usinabilidade retirada deste ensaio, a medida que se varia a rotação e a geometria da broca.

A figura 6.6 mostra como o índice de usinabilidade do aço 316 varia com a rotação para as diferentes geometrias de brocas.

A tabela 6.3 mostra a faixa de variação do índice de usinabilidade (I.U.) e a porcentagem da variação deste índice para as três geometrias de brocas.

TABELA 6.3

BROCA	FAIXA DE VARIAÇÃO DO I.U. (%)	PORCENTAGEM DE VARIAÇÃO
N-afiação cônica	28 - 78	178,6
N-afiação cruzada	70 - 77	10
HD-100	66 - 73	10,6
N _{CO} -c/pré-furo	76 - 86	13,2
N _{Cr} -c/pré-furo	76 - 88	15,8

O exame desses resultados leva às seguintes discussões

- a) O índice de usinabilidade é razoavelmente intercambiável para todos os tipos de brocas ensaiadas com ou sem pré-furação, exceto para a broca tipo N-afiação cônica sem pré-furação, onde o índice de usinabilidade teve uma variação muito grande. Nota-se que este caso foi o que apresentou também maiores variações dos valores de avanço. A melhoria tão acentuada do índice de usinabilidade do aço 316 demonstra que a melhoria da eficiência do processo com o aumento da rotação foi muito mais sentida no aço 316 que no aço 303 tomado como padrão.
- b) A medida que o processo se aproxima das melhores condições de usinagem, o índice de usinabilidade aumenta. Senão vejamos: os processos que apresentam os maiores índices de usinabilidade (furação com pré-furação) são também aqueles que apresentaram maior eficiência. Na furação sem pré-furação a broca que apresentou melhor desempenho, no geral, foi a broca tipo N com afiação cruzada e foi também a que apresentou maior índice de usinabilidade. Na furação sem pré-furação com a broca N-afiação cônica, a rotação que apresentou maior índice de usinabilidade (1000 RPM) foi também a que apresentou maior eficiência do processo. Com isso conclui-se que a padronização de um ensaio de usinabilidade, pelo menos para materiais

com características semelhantes às dos aços inoxidáveis austeníticos, deve ser precedida de um estudo prévio com o objetivo de encontrar-se condições de usinagem (velocidade de corte, geometria da ferramenta, etc.), recomendáveis para aquele determinado grupo de materiais, as quais seriam utilizadas nos ensaios.

- c) A grande variação do índice de usinabilidade quando se toma todos os tipos de furação realizados, indo de um valor mínimo de 28% na broca N com afiação cônica sem pré-furação até um valor máximo de 88% na broca N com afiação cruzada com pré-furação demonstra a necessidade de padronização do ensaio de usinabilidade. Sem isso, fica sem sentido a obtenção deste índice.
- d) A variação do índice de usinabilidade traz consigo um resultado positivo: é possível, alterando-se somente as condições de usinagem, fazer com que um aço inoxidável austenítico comum aproxime suas características de usinagem às do aço inoxidável austenítico resulfurado de usinagem fácil. Esse resultado é importante pois, como foi visto, o enxofre apesar de melhorar a usinabilidade do aço faz com que outras propriedades desejáveis no aço inoxidável, como por exemplo a resistência a corrosão, sejam prejudicadas.
- e) Conforme o que foi discutido nos itens acima, fica sem valor prático a padronização de um ensaio de usinabilidade a ser aplicado em qualquer material e não levando em conta as condições de corte que o material ensaiado vá ser usinado, se a metodologia do ensaio for a que está proposta na literatura e que foi utilizada no presente trabalho.
- f) O ensaio como está proposto na literatura se presta porém, ao estudo do processo de furação como feito no presente trabalho, tendo a vantagem da simplicidade da sua realização e da confiabilidade dos resultados obtidos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] FERRARESI, D., Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., 1970.
- [2] MICHELETTI, G.F., Tecnologia Mecânica 1 - Il taglio dei metalli 2 ed. Torino, Unione tipografico - editrice torinese, 1977.
- [3] DAAR, H.L.A., Uma contribuição ao conhecimento do processo de furação dos aços com brocas helicoidais. Tese de doutorado, São Carlos, 1967.
- [4] KOVACH, C.W. & MOSKOWITZ, A., Effects of manganese and sulfur on the machinability of martensitic stainless steels. Transactions of Metallurgical society of AIME, v. 245: 2157-64, 1969.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Com relação à influência da velocidade de corte e da geometria da broca nos valores de avanço, pode-se concluir que:

- a) Em rotações médias e baixas, não se deve usar brocas que possuam aresta transversal de corte (brocas com afiação comum), pois ela causa um grande recalque do cavaco e do fundo do furo, aumentando em muito os esforços de avanço. Em rotações relativamente altas a influência da aresta transversal de corte já é bem menor e as brocas que a possuem passam a requerer força de avanço de intensidade semelhante às brocas que tem a dimensão desta aresta bem reduzida.
- b) As brocas que tem a aresta transversal de corte reduzida (broca tipo N com afiação cruzada e broca HD-100) tiveram um melhor desempenho em termos de força de avanço em baixas e médias rotações, pois o recalque do cavaco e do fundo do furo na região central do furo não é tão acentuado. Em altas rotações o desempenho dessas brocas baixou, devido à influência do desgaste da ferramenta na força de avanço. Essa influência do desgaste foi muito sentida na broca HD-100, que por sua geometria se mostrou excessivamente sensível ao desgaste.
- c) A broca tipo HD-100, apesar de possuir maiores ângulos de saída se mostrou menos eficiente que a broca tipo N-afiação cruzada em todas as rotações. Isso mostra que os ângulos de saída da broca N já são suficientes para um pequeno recalque do cavaco e que seu acréscimo não traz vantagens.
- d) A pré-furação é uma operação que surte grandes efeitos na furação de aços inoxidáveis austeníticos, di-

minuindo em muito a força de avanço requerida, principalmente quando a furação é realizada com broca tipo N-afiação cônica.

- e) O aço 303 sempre se mostrou superior ao aço 316, isto é, exigiu menores forças de avanço em todas as condições de usinagem ensaiadas, como era de se esperar, mas a diferença entre os avanços obtidos nos ensaios dos aços diminui à medida que se encontram condições mais favoráveis para a furação do aço 316.
- f) O aço 316 mostrou-se mais sensível às variações das condições de usinagem que o aço 303.
- g) Os coeficientes da equação de Daar para a força de avanço não são válidos para os aços ensaiados, quando a furação é realizada com broca N-afiação cônica sem pré-furação. Isto ocorre devido ao fato desta expressão não considerar influências importantes, como por exemplo a rotação.
- h) Nas furações realizadas com eliminação parcial ou total dos efeitos da aresta transversal de corte (broca tipo N com afiação cruzada, broca HD-100 e furação com pré-furação) a fórmula de Daar pode ser considerada válida para estes aços. A queda dos valores de avanço com o desgaste da ferramenta foi previsto por Daar quando da elaboração da expressão citada.

Com relação à influência da rotação e da geometria da broca nos valores dos índices de usinabilidade para o aço 316, obtidos no ensaio de força de avanço constante na furação, pode-se concluir que:

- a) Quando se toma a variação do índice de usinabilidade com a rotação em cada broca, vê-se que para as brocas tipo N-afiação cruzada e tipo HD-100, este índice é razoavelmente intercambiável, isto é, sua variação é pequena. Na broca tipo N-afiação cônica, no entanto, a variação é muito grande o que faz com que seja recomendável a determinação do índice de usina-

bilidade por faixas estreitas de rotação da broca.

- b) Os índices de usinabilidade obtidos na furação com pré-furação são sempre superiores aos obtidos na furação sem pré-furação, sendo que a faixa de variação desses seus índices é também razoavelmente pequena.
- c) Quando se toma a variação do índice de usinabilidade levando em conta todas as variações realizadas nos ensaios (geometria da broca, rotação, existência ou não do pré-furo) vê-se que ela foi muito grande.
- d) O aumento do índice de usinabilidade sempre foi coincidente com a melhoria do desempenho do processo.
- e) Com a variação do índice de usinabilidade devido às condições de usinagem, de valores bem baixos até valores próximos de 100%, pode-se dizer que, apenas manipulando as condições de corte, consegue-se fazer com que um aço inoxidável austenítico comum tenha suas características de usinagem bem próximas às do aço inoxidável austenítico resulfurado de usinagem fácil.
- f) O ensaio de usinabilidade baseado na força de avanço constante na furação, realizado com a metodologia proposta por Kovach e Moskowitz e utilizada neste trabalho, é relativamente rápido e fácil de ser realizado, além de chegar em resultados com uma precisão muito boa.

CAPÍTULO 8

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Estudar o comportamento dos aços inoxidáveis austeníticos levando em conta a vida da broca.
- 2) Estudar a furação dos aços inoxidáveis austeníticos não mais com broca helicoidal, mas em processos que exigem maior precisão e potência tais como a furação com broca T-MAX U, com o sistema BTA, brocas canhão, etc.
- 3) Estudar a furação de aços inoxidáveis austeníticos que já tenham sofrido uma preliminar deformação a frio e conseqüente encruamento.
- 4) Estudar o critério de usinabilidade segundo a força de avanço constante na furação visando a padronização de um ensaio.
- 5) Fazer um estudo, levando-se em conta os aspectos econômicos da usinagem, comparando a furação com brocas helicoidais tipo N-afiação cônica e afiação cruzada com a furação com pré-furação dos aços inoxidáveis austeníticos.

APÊNDICE 1

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FURAÇÃO

TEMPOS DE CORTE (s)

Ensaio N° 1: Broca tipo N-afiação cônica sem pré-furação

ROTAÇÃO: 400 RPM		
Broca n° \ mater.	316	303
1	90,9	24,1
1	76,1	24,0
1	68,9	24,7
2	124,3	24,6
2	156,8	26,5
2	103,0	26,8
3	79,3	22,7
3	131,5	23,5
3	99,1	24,1
MÉDIA (s)	103,3	24,6
DESV. PADRÃO	27,43	1,25
I.U. (%)	23,8	100

ROTAÇÃO: 500 RPM		
Broca n° \ mater.	316	303
1	86,1	19,2
1	125,2	20,0
1	88,2	18,8
2	66,5	18,4
2	29,0	17,2
2	67,8	19,0
3	48,4	19,2
3	51,8	18,2
3	58,4	20,4
MÉDIA (s)	69,0	18,9
DESV. PADRÃO	27,97	0,954
I.U. (%)	27,4	100

ROTAÇÃO: 630 RPM		
Broca n° \ mater.	316	303
1	16,2	11,3
1	17,3	11,5
1	17,6	11,6
2	15,7	11,1
2	15,7	11,4
2	17,3	11,9
3	17,6	11,4
3	18,7	11,6
3	18,2	11,9
MÉDIA (s)	17,1	11,5
DESV. PADRÃO	1,064	0,264
I.U. (%)	67,2	100

ROTAÇÃO: 800 RPM		
mater. Broca nº	316	303
1	12,9	9,7
1	14,0	10,1
1	13,3	9,5
2	13,5	9,1
2	13,7	9,4
2	13,9	9,3
3	14,1	9,2
3	12,7	9,4
3	13,9	9,8
MÉDIA (s)	13,6	9,5
DESV. PADRÃO	0,500	0,316
I.U. (%)	70,0	100

ROTAÇÃO: 1000 RPM		
mater. Broca nº	316	303
1	8,5	6,8
1	8,7	6,3
1	8,8	6,9
2	8,5	6,7
2	8,7	6,9
2	9,3	6,9
3	8,6	6,9
3	8,5	7,1
3	9,1	6,9
MÉDIA (s)	8,7	6,8
DESV. PADRÃO	0,280	0,220
I.U. (%)	78,0	100

Ensaio Nº 2: Broca tipo N-afiação cruzada sem pré-furação

ROTAÇÃO: 400 RPM		
Broca n° \ mater.	316	303
1	23,2	17,0
1	23,6	16,6
1	23,0	16,6
2	21,2	15,0
2	21,2	14,8
2	20,8	15,0
3	23,0	17,0
3	22,6	15,0
3	23,0	15,0
MÉDIA (s)	22,4	15,8
DESV. PADRÃO	1,039	0,982
I.U. (%)	70,4	100

ROTAÇÃO: 500 RPM		
Broca n° \ mater.	316	303
1	15,5	12,4
1	17,2	12,5
1	18,6	12,7
2	16,3	10,8
2	15,8	11,0
2	13,7	11,3
3	14,7	11,4
3	16,8	11,6
3	16,7	11,9
MÉDIA (s)	16,1	11,8
DESV. PADRÃO	1,440	0,627
I.U. (%)	73,4	100

ROTAÇÃO: 630 RPM		
Broca n° \ mater.	316	303
1	12,6	9,8
1	12,9	9,9
1	13,2	9,9
2	13,0	9,8
2	13,0	10,3
2	13,2	10,1
3	11,3	8,9
3	11,7	8,9
3	11,6	9,0
MÉDIA (s)	12,5	9,6
DESV. PADRÃO	0,753	0,526
I.U. (%)	77,0	100

ROTAÇÃO: 800 RPM		
Broca n° \ mater.	316	303
1	10,0	8,2
1	10,1	7,9
1	10,7	8,0
2	9,6	7,0
2	9,6	7,5
2	10,4	7,4
3	9,4	7,5
3	9,6	7,5
3	10,0	7,8
MÉDIA (s)	9,9	7,6
DESV. PADRÃO	0,427	0,364
I.U. (%)	77,0	100

ROTAÇÃO: 1000 RPM		
Broca n° \ mater.	316	303
1	8,7	6,3
1	9,4	6,6
1	10,2	6,1
2	8,3	6,1
2	8,4	6,6
2	8,7	6,7
3	8,2	6,6
3	9,1	6,5
3	9,9	6,6
MÉDIA (s)	9,9	6,5
DESV. PADRÃO	0,715	0,230
I.U. (%)	71,8	100

Ensaio Nº 3: Broca tipo HD-100

ROTAÇÃO: 400 RPM		
mater. Broca nº	316	303
1	21,2	15,1
1	21,7	15,5
1	22,2	15,1
2	24,8	14,9
2	24,9	15,9
2	25,3	15,5
3	18,0	14,3
3	25,4	14,3
3	25,3	16,0
MÉDIA (s)	23,2	15,2
DESV. PADRÃO	2,584	0,626
I.U. (%)	65,4	100

ROTAÇÃO: 630 RPM		
mater. Broca nº	316	303
1	13,9	9,2
1	14,2	10,0
1	14,0	10,5
2	14,7	9,7
2	15,1	10,7
2	14,5	10,7
3	12,3	9,9
3	13,6	10,5
3	13,6	10,6
MÉDIA (s)	14,0	10,2
DESV. PADRÃO	0,807	0,527
I.U. (%)	72,9	100

ROTAÇÃO: 1000 RPM		
mater. Broca nº	316	303
1	10,4	7,8
1	10,6	7,6
1	12,6	queimou a broca
2	11,1	6,9
2	12,1	8,3
2	queimou a broca	8,3
3	10,5	7,3
3	13,6	7,5
3	queimou a broca	broca
MÉDIA (s)	11,6	7,7
DESV. PADRÃO	1,243	0,512
I.U. (%)	66,4	100

Ensaio N° 4: Broca tipo N-afiação cônica com pré-furação

ROTAÇÃO: 400 RPM		
mater. / Broca n°	316	303
1	10,3	9,0
1	11,6	9,1
1	11,4	9,5
2	13,0	9,3
2	13,3	9,3
2	13,3	9,6
3	11,7	9,5
3	13,4	9,2
3	12,5	9,8
MÉDIA (s)	12,3	9,4
DESV. PADRÃO	1,084	0,255
I.U. (%)	76,3	100

ROTAÇÃO: 630 RPM		
mater. / Broca n°	316	303
1	7,1	6,3
1	8,1	5,9
1	7,7	6,3
2	7,4	5,6
2	7,8	6,2
2	7,8	6,2
3	7,0	5,6
3	7,2	5,8
3	7,2	5,8
MÉDIA (s)	7,5	6,0
DESV. PADRÃO	0,383	0,287
I.U. (%)	79,8	100

ROTAÇÃO: 1000 RPM		
mater. / Broca n°	316	303
1	4,8	3,9
1	4,8	4,2
1	4,9	4,2
2	4,9	3,9
2	4,9	4,5
2	5,2	4,5
3	4,9	4,4
3	5,2	4,5
3	5,4	4,6
MÉDIA (s)	5,0	4,3
DESV. PADRÃO	0,212	0,265
I.U. (%)	86	100

Ensaio Nº 5: Broca tipo N-afiação cruzada com pré-furação

ROTAÇÃO: 400 RPM		
mater. Broca nº	316	303
1	10,5	8,7
1	13,8	8,5
1	12,5	10,9
2	12,6	8,9
2	11,0	8,9
2	12,1	8,7
3	10,1	8,5
3	12,8	8,5
3	11,2	9,2
MÉDIA (%)	11,84	9,0
DESV. PADRÃO	1,214	0,758
I.U. (%)	75,8	100

ROTAÇÃO: 630 RPM		
mater. Broca nº	316	303
1	6,5	6,0
1	6,7	5,7
1	7,2	5,6
2	7,1	6,0
2	7,5	5,9
2	7,6	5,9
3	6,1	5,3
3	6,5	5,5
3	6,6	5,7
MÉDIA (%)	6,9	5,7
DESV. PADRÃO	0,507	0,240
I.U. (%)	83,5	100

ROTAÇÃO: 1000 RPM		
mater. Broca nº	316	303
1	4,5	4,0
1	6,0	4,2
1	queimou	a broca
2	5,1	3,7
2	5,5	5,5
2	queimou a broca	5,3
3	4,3	4,3
3	5,5	4,3
3	6,5	5,9
MÉDIA (s)	5,3	4,6
DESV. PADRÃO	0,783	0,816
I.U. (%)	87,1	100

APÊNDICE 2

PROCEDIMENTO PARA CÁLCULO POR AMOSTRAGEM DA MÉDIA E DO
DESVIO PADRÃO DE UMA POPULAÇÃO CONTÍNUA

Exemplo: Ensaio nº 2 - Broca tipo N-afiação cruzada sem pré-furação (400 RPM)

MATERIAL		
BROCA Nº	316	303
1	23,2	17,0
1	23,6	16,6
1	23,0	16,6
2	21,2	15,0
2	21,2	14,8
2	20,8	15,0
3	23,0	17,0
3	22,6	15,0
3	23,0	15,0
MÉDIA (s)	22,4	15,8
DESV. PADRÃO	1,039	0,982
I.U. %	70,4	100

Condições preliminares

- 1) Amostra inicial: $n_0 = 9$
- 2) Erro tolerado : $d = 5\%$ do tempo médio
- 3) Risco assumido: $\alpha = 10\%$
- 4) Tabela de distribuição "t" de Student

$$\left. \begin{array}{l} P = 1 - \alpha = 90\% \\ \gamma = n_0 - 1 = 8 \end{array} \right\} 1,108 = t$$

$$S_{0316} = 1,039$$

$$S_{0303} = 0,982$$

$$t_{c316} = 22,4$$

$$t_{c303} = 15,8$$

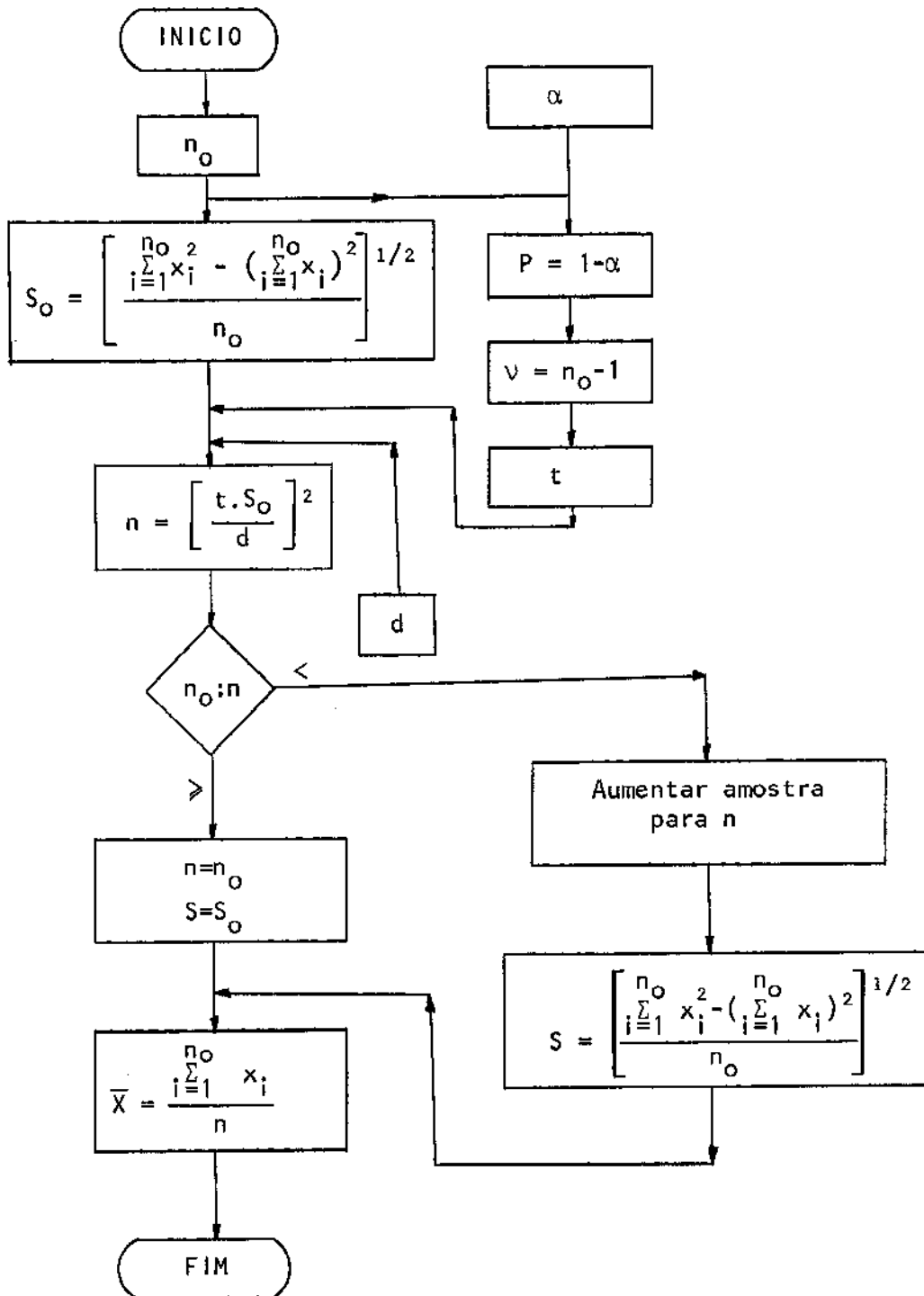
$$n_{316} = \left| \frac{1,108 \cdot 1,039}{0,05 \cdot 22,4} \right|^2 = 1,056$$

$$1,056 < 9 \rightarrow n_{316} < n_0 \rightarrow \text{O.K.}$$

$$n_{303} = \left| \frac{1,108 \cdot 0,982}{0,05 \cdot 15,8} \right|^2 = 1,897$$

$$1,897 < 9 \rightarrow n_{303} < n_0 \rightarrow \text{O.K.}$$

Procedimento para cálculo por amostragem da média e do desvio padrão de uma população contínua.



n_o = Amostra inicial (x_1, x_2, \dots, x_n)

S_o = Desvio padrão da amostra

d = Erro tolerado

α = Risco assumido

t = tabela de distribuição de Student

n = amostra mínima

S = Estimativa do Desvio Padrão da população

\bar{X} = Estimativa da média da população