

ALEX ALLEGRINI

**ASPECTOS DA FURAÇÃO DO TITÂNIO 6Al4V COM BROCA DE AÇO RÁPIDO
SINTERIZADO E BROCA DE METAL DURO.**

Guaratinguetá

2014

ALEX ALLEGRINI

**ASPECTOS DA FURAÇÃO DO TITÂNIO 6Al4V COM BROCA DE AÇO RÁPIDO
SINTERIZADO E BROCA DE METAL DURO.**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para a
Obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2014

A422a	Allegrini, Alex Aspectos da furação do titânio 6Al4V com broca de aço rápido sinterizado e broca de metal duro../ Alex Allegrini – Guaratinguetá, 2014. 123 f : il. Bibliografia: f. 120 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr Marcos Valério Ribeiro 1. Perfuração e broqueamento 2. Usinagem 3. Titânio 4. Refrigeração I. Título CDU 622.24(043)
-------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ALEX ALLEGRINI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Cocchiari Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MARCOS VALERIO RIBEIRO
Orientador / UNESP/FEG



Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA
UNESP/FEG



Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES
USP/EESC/SEM

DADOS CURRICULARES

ALEX ALLEGRINI

NASCIMENTO	24.04.1964 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Emerson Allegrini Lélia Maria Nogueira
1988/1993	Curso de Graduação Engenharia Civil – Universidade de Taubaté
2010/2014	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” <i>campus</i> de Guaratinguetá.

Dedico este trabalho à minha esposa Isaura pelo apoio incondicional e aos meus filhos Caroline e Igor, aos quais espero que os inspirem à buscarem seus objetivos com persistência e perseverança, jamais desistindo de seus sonhos.

À minha mãe, que sempre foi uma vencedora criando-nos, a mim e meu irmão, sozinha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, nosso protetor e fonte de vida;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* pela valorosa orientação, dedicação e atenção;

aos funcionários e técnicos da FEG pelo total apoio nas atividades realizadas no laboratório do Campus de Guaratinguetá;

à UNESP – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, por disponibilizar todos os recursos necessários à execução e finalização desta dissertação;

à OSG Ferramentas, na pessoa do Eng. Allan Bradley por ceder todas as ferramentas de corte para execução dos testes;

à GLOBO Usinagem na pessoa do Eng. Wellington Martins por ceder todas as placas de Ti 6Al4V;

à Embraer, empresa que faz parte da minha vida nestes últimos 25 anos;

ao amigo José Geraldo Nogueira, que me proporcionou todo o respaldo necessário à conclusão deste trabalho.

“A dúvida é o princípio da sabedoria”
Aristóteles

ALLEGRINI, ALEX – Aspectos da furação do titânio 6Al4V com broca de aço rápido sinterizado e broca de metal duro. 2014, 123fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista-UNESP, 2014.

RESUMO

As exigências e a competitividade atual levam, cada vez mais, à busca por soluções mais baratas e eficazes, para qualquer segmento de mercado. Com isso, o ramo aeronáutico tem procurado por ferramentas que possibilitem o mais alto rendimento possível aliado à redução de custos. Este trabalho de furação em placas de titânio 6Al4V tem origem em função da comunalidade de uso deste material nas indústrias, por manter alta resistência mecânica e a altas temperaturas. As ferramentas escolhidas foram brocas de metal duro e brocas de aço rápido sinterizado objetivando um estudo comparativo entre estas, nas mais variadas condições de corte, desde a refrigeração em abundância com utilização de óleo solúvel, passando pela usinagem à seco e finalizando com o sistema da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) com óleo de corte puro. Os parâmetros de corte adotados foram conforme literatura técnica, para brocas de metal duro, utilizou-se velocidade de corte de 28 m/min, avanço total de 72 m/min e rotação de 2123 RPM e para as brocas de aço rápido sinterizado, velocidade de corte de 11 m/min, avanço total de 29 mm/min e rotação de 876 RPM. Anterior ao início dos testes, foi aplicado a ferramenta de Análise do Modo e Efeito de Falha a fim de identificar e prevenir possíveis discrepâncias na execução do processo de furação. A usinagem ocorreu em passes de 8mm de profundidade com interrupção a cada 200mm a 250mm para recolhimento de amostra de cavaco e avaliação parcial dos diversos possíveis desgastes nas ferramentas. Os parâmetros iniciais de finalização de cada broca foram estabelecidos com desgaste de 0,1mm ou tolerância de furos finais acima de H12. Os testes foram repetidos para ambas as brocas sempre em condições idênticas a fim de permitir uma comparação de resultados entre as ferramentas, geração de cavaco e diâmetro final. Os diâmetros foram medidos com pinos padrão a cada 20 furos onde, mesmo após desgastes intensos, não houve qualquer variação dimensional fora dos limites pré-estabelecidos ou seja, tolerância H12. Assim, foi possível notar que houve diferentes tipos e profundidades de desgastes entre as ferramentas e que o aço rápido sinterizado definitivamente não é recomendável na ausência de fluido refrigerante. Na condição de refrigeração em abundância, o aço rápido sinterizado pode ser uma alternativa em função do menor custo deste em relação ao metal duro. Na ausência de refrigeração ou no modo MQL, a conclusão é de uso de metal duro para as brocas.

PALAVRAS CHAVE: Furação, Usinagem, Titânio, Desgaste, Refrigeração.

Drilling aspects from titanium 6Al4V with sintered high speed steel drill and carbide drill.2014, 123fls. Dissertation (Masters in Mechanical Engineering) - Faculty of Engineering at Guaratinguetá Campus, Univ. Estadual Paulista - UNESP, 2014.

ABSTRACT

The current requirements and the competitiveness lead, increasingly, to the search for cheaper and more effective solutions, to any segment of the market. Thus the aeronautics the aviation industry has been searching for tools that allow the highest possible income combined with the cost reduction.. This work of drilling in 6Al4V titanium plates originates due to the commonality of use of this material in industries, for maintaining high mechanical strength and high temperatures. The tools chosen were carbide drills and drills of sintered high speed steel aiming at a comparative study between these, in the most varied cutting conditions, since refrigeration in abundance with use of oil soluble, through dry machining and finishing with the system of Minimal Quantity of Lubrication with neat cutting oil. The cutting parameters were adopted as technical literature, for carbide drills, used cutting speed of 28 m/min, total advance of 72 m/min and 2123 RPM rotation and sintered high speed steel drills, cutting speed of 11 m/min, total advance of 29 mm/min and 876 RPM rotation. Prior to the start of the tests, was applied to the analysis tool mode and effect of failure in order to identify and prevent possible discrepancies in the execution of the drilling process. The machining occurred in 8 mm deep steps with interruption every 200 mm to 250 mm for chip sample and partial evaluation of the various possible wear on tools. The initial parameters of completion of each drill were set with 0,1mm wear or tolerance of final holes above H12. The tests were repeated for both drills always in identical terms in order to allow a comparison of results between the tools, chip generation and final diameter. The diameters were measured with standard pins every 20 holes where, even after intense damage, there was no pre-established dimensional limits variation i.e. H12 tolerance. Thus, it was possible to notice that there were different kinds and depths of wear between the tools and the sintered high speed steel is definitely not recommended in the absence of refrigerant. On cooling condition their abundance, the sintered high speed steel can be an alternative on the basis of the lowest cost in relation of the hard metal. In the absence of refrigeration or MQL mode, the conclusion is the use of the hard metal for the drills.

KEYWORDS: Drilling, Machining, Titanium, Wear, Coolant.

SUMÁRIO

1 .	INTRODUÇÃO.....	12
2 .	OBJETIVO	14
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	SURGIMENTO DO TITÂNIO	15
3.2	VARIAÇÕES DO TITÂNIO	16
3.3	MATERIAIS E FERRAMENTAS	19
3.4	METAL DURO	21
3.4.1	Classes do Metal Duro	22
3.5	AÇO RÁPIDO	24
3.6	METALURGIA DO PÓ.....	28
3.7	CARACTERÍSTICAS DOS PÓS METÁLICOS	30
3.8	PROCESSO DE FURAÇÃO	32
3.9	TIPOS DE BROCAS E CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUÇÃO.....	36
3.10	DESGASTES E AVARIAS EM BROCAS	41
3.10.1	Consequências oriundas das avarias	46
3.11	REFRIGERAÇÃO	48
3.11.1	Tipos de fluídos de corte	50
3.11.2	Formas de aplicação dos fluídos de corte	52
3.11.3	Sistema da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL)	53
3.12	PARÂMETROS DE CORTE	55
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.1	MATERIAL UTILIZADO	59
4.2	MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	60
4.2.1	Fresadora 5 eixos Deckel MAHO-DMU 50 ECO	60
4.2.2	Microscópio OPTON – ZEISS – SEMI 2000	61

4.2.3	Jogo de pinos padrão	62
4.2.4	Dispositivo de MQL	62
4.3	FERRAMENTAS E FLUIDOS DE CORTE	63
4.3.1	Broca de aço rápido sinterizado	63
4.3.2	Broca de metal duro	64
4.3.3	Óleos refrigerantes	65
4.4	METODOLOGIA	65
4.4.1	Furação com refrigeração em abundância	66
4.4.2	Furação à seco, com pré-furo Ø 2,5mm	66
4.4.3	Furação à seco, sem pré-furo	67
4.4.4	Furação com MQL, sem pré-furo	67
4.5	FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)	67
4.5.1	Defeito	69
4.5.2	Aplicação do método FMEA	74
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
5.1	RESULTADOS DO FMEA	79
5.2	RESULTADOS DOS TESTES	80
5.2.1	Furação com refrigeração abundante e sem pré-furo	81
5.2.2	Furação à seco e sem pré-furo Ø 2,5mm	90
5.2.3	Furação à seco e com pré-furo Ø 2,5mm	92
5.2.4	Furação com MQL e sem pré-furo	102
5.2.5	Resultados dos diâmetros	115
5.2.6	Quadro resumo dos desgastes	116
6.	CONCLUSÃO	117
	REFERÊNCIAS	120

1. INTRODUÇÃO

Muito são os materiais usados no universo aeronáutico, devido às mais variadas exigências quanto à redução de peso, aumento da resistência mecânica, etc. Dentre estes, o titânio, por possuir todas características citadas, apesar de não ser de fácil usinabilidade, é extremamente favorável à construção de diversos produtos, desde próteses para humanos à aeronaves, além de ser bastante aplicado em componentes que exigem resistência estrutural. Diante desta realidade, não como um problema mas como uma necessidade, a construção estrutural de aviões apresenta uma grande quantidade de furos que, preenchidos com prendedores específicos, fazem a união de partes tais como revestimentos, perfis longitudinais e cavernas de forma a garantir um conjunto homogêneo e robusto. Deste modo, comprovadamente as principais uniões de peças são através de rebites sólidos dos mais variados tipos e diâmetros e também de prendedores com características de resistência aos esforços de tração e cisalhamento mas, com todas as variações, o diâmetro de prendedor mais comumente utilizado na área da aviação é de 4mm, o que justifica a escolha desta dimensão para os testes práticos. Atualmente, a execução de furos é feita com máquinas manuais, mais precisamente furadeiras e sem utilização de óleo de corte ou solúvel e, por esta razão as brocas, objeto desta dissertação, foram submetidas às diversas condições que serão explicitadas no capítulo 5. Por isso, nesta dissertação, a abordagem dos trabalhos ocorre com a liga de Titânio 6Al4V devido às características bastante peculiares que o tornam de uso muito comum em peças estruturais de aviões, mais especificamente ferragens que sofrerão esforços mecânicos aliadas à altas temperaturas. Especificamente na fabricação de aviões, cerca de 80% das peças são passíveis do processo mais comum de remoção de cavaco, a furação. Diante de todos estes fatores, este trabalho tem como cunho principal o estudo do processo de furação no Titânio 6Al4V com broca de aço rápido sinterizado e broca de metal duro, a fim de estabelecer dados que permitam a escolha do mais viável material de ferramenta nas condições estudadas. Assim, será possível, numa avaliação de custo x benefício, identificar o melhor caminho que resultará em benefício à uma dada situação prática. Trata-se de um estudo comparativo, quando se busca materiais de ferramentas propostas em suas condições peculiares de parâmetros de corte de acordo com literatura técnica específica e com fluidos refrigerantes do tipo solúvel para ambas as ferramentas, sistema da Mínima Quantidade de Fluido, com óleo de corte específico para titânio e também à seco. Consequentemente, os parâmetros de corte serão bastante diferentes entre as

ferramentas, em função dos materiais propostos, mas refletirão as utilizações comumente executadas no mundo da usinagem.

2. OBJETIVOS

A presente dissertação objetiva o levantamento de dados que possam justificar, no processo de furação em placa de Titânio 6Al4V, a utilização de broca de aço rápido sinterizado ou broca de metal duro. Dito isto, os principais objetivos desta dissertação referem-se a:

- Definir o desgaste da broca de aço rápido sinterizado e de metal duro que não seja capaz de influenciar no diâmetro final dos furos, com parâmetros baseados no desgaste da aresta principal em 0,1mm;
- Definir, dentre as situações de testes com refrigeração abundante, a seco e com Mínima Quantidade de Fluido, aquela que mais pode evitar o desgaste elevando a vida da ferramenta;
- Aplicação do método de Análise de Modo e Efeito de Falha e avaliação deste na garantia da execução do processo prático de furação e de todos os fatores intrínsecos ao mesmo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A abordagem se dará através de informações do surgimento da Liga de Titânio 6Al4V, suas características principais e diferenças entre os mais variados tipos. Alguns dos principais materiais de ferramentas serão citados, como são confeccionados e elementos de liga constituintes. Uma análise preliminar do processo de furação será detalhadamente apresentada a fim de prever possíveis discrepâncias no momento da execução dos furos e situações adjacentes que podem influenciar negativamente no processo. As ferramentas de furação também terão capítulo específico para definição das principais características de construção e os mais variados tipos de desgaste que poderão ocorrer na execução dos furos. A refrigeração será um fator importante no estudo e serão aplicados alguns modos de refrigeração para vislumbrar um estudo comparativo de performance em função destas.

3.1 SURGIMENTO DO TITÂNIO

Segundo Lutjering (2010), o titânio é apresentado na crosta terrestre por volta de 0,6%, entretanto é o quarto mais abundante metal estrutural depois do alumínio, aço e magnésio. Os mais importantes recursos minerais são a ilmenita (FeTiO_3) e o rutilo (TiO_2).

A primeira suspeita de um elemento novo, desconhecido, foi identificado em 1791 por Gregor, um clérigo e mineralogista amador. Em 1795, Klaproth, químico alemão, analisou o rutilo, da Hungria, e identificou um óxido de um elemento desconhecido, o mesmo reportado por Gregor. Klaproth nomeou de titânio o elemento, conforme os Titãs, os filhos poderosos da Terra na mitologia grega.

Muitas tentativas foram feitas para isolar o metal do minério de titânio usando tetracloreto como um passo intermitente, isto devido à enorme dificuldade e só pode se tornar interessante a partir do século XX, mais precisamente por volta de 1940, através de um processo desenvolvido por Kroll em Luxemburgo, o qual envolvia a redução do tetracloreto de titânio com magnésio numa atmosfera de gás inerte. O resultado foi batizado como “titânio esponja”, devido aos poros como aparência. Este processo de Kroll permaneceu essencialmente inalterado, sendo ainda o mesmo nos dias de hoje na produção do titânio. (Lutjering, 2010).

Devido aos grandes atributos, o titânio é bastante utilizado em situações especiais onde se exige boa resistência mecânica, resistência à corrosão aliada a uma redução significativa de peso, além de possuir uma razoável resistência a altas temperaturas, em torno de 600°C. A principal característica de baixo peso específico teve aceitação imediata no meio aeronáutico pois possui resistência superior ao alumínio e é muito mais leve que o aço, preenchendo uma lacuna ora existente. Atualmente, tem seu aproveitamento em aeronaves, mais precisamente em locais onde a resistência mecânica se torna necessária aliada à redução de peso. Outras aplicações comuns são na indústria de fabricação de motores, em partes como paletas e componentes de compressores. Nas aeronaves, são aplicados em muitas ferragens de regiões críticas, onde cargas são exigidas, tais como trem de pouso, sistemas de superfícies móveis, sustentação de motores, etc. Segundo Lutjering, s (2010), hoje estima-se que da produção mundial de Titânio, 80% é dirigida aos fabricantes de aeronaves. Pode ser encontrado totalmente puro e tem utilização quando se deseja uma média resistência mecânica aliada à resistência a corrosão. De forma geral, o titânio tem facilidade em reagir com materiais como C, O, H e N, o que pode lhe conferir um aumento na resistência e consequente perda de ductilidade, tornando-o frágil.

Não há somente vantagens para a aplicação do titânio. Dentre as desvantagens, destacam-se a difícil usinabilidade deste material, pois é duro e abrasivo e, principalmente, o custo, pois comparado à materiais como alumínio e aço, é da ordem de 3 a 4 vezes mais caro.

3.2 VARIAÇÕES DO TITÂNIO

O titânio, apesar de existir na forma pura, sofre transformações alotrópicas a 890°C, passando da estrutura Hexagonal Compacta (HC) para uma estrutura Cúbico de Corpo Centrado (CCC). Nestas transformações, é possível a adição de elementos de liga que permitem uma melhor estabilização das fases, a saber. Os elementos químicos Al, O, N e C são característicos estabilizadores da fase HC de outro modo, tem-se o V e o Fe que são ótimos estabilizadores da fase CCC.

Durante a vida do titânio, muitas composições foram elaboradas tais como Ti-4Al-3Mo-1V, Ti-7Al-4Mo. No entanto, a liga mais utilizada até hoje é a Ti-6Al-4V, à medida em que combina propriedades atraentes como resistência mecânica, alto ponto de fusão, resistência a altas temperaturas, etc.

Quando se deseja aumento na resistência, é possível a adição de elementos de liga, o que permite patamares acima de 1000MPa. No entanto, é primordial citar que sua usinabilidade, comparada com outros materiais também comuns na aviação, é muito reduzida, conforme Figura 3.1.

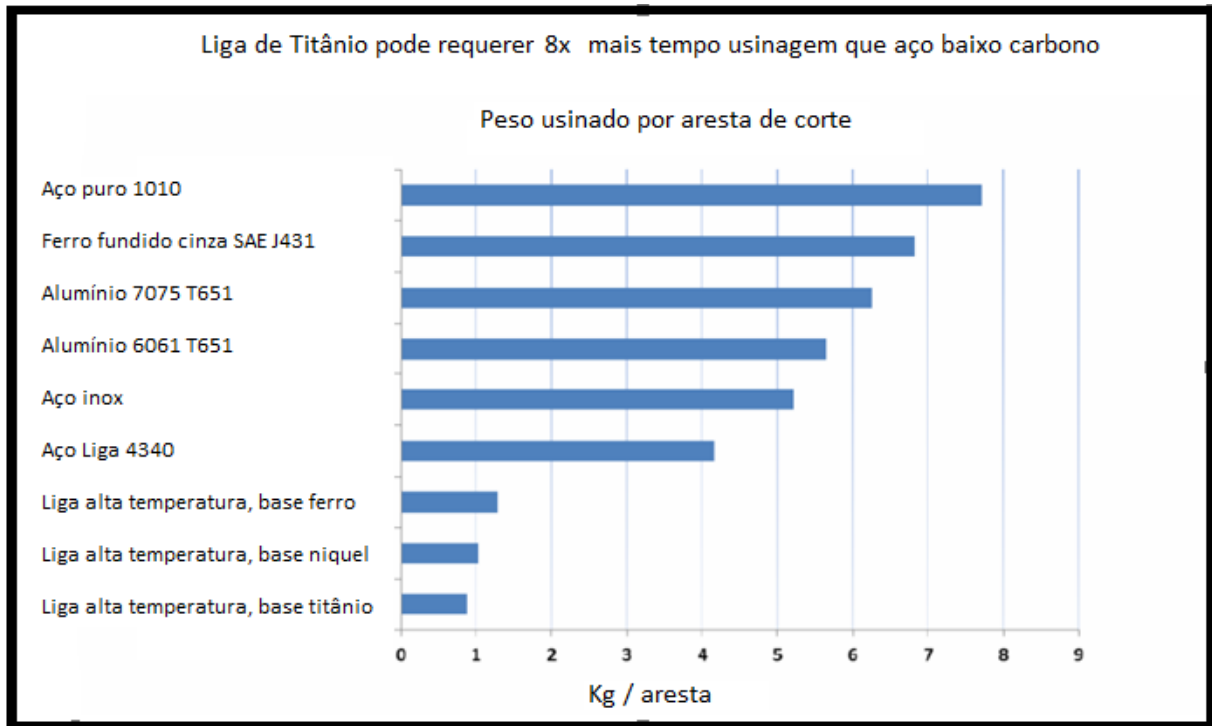
Para conhecimento, dentre as ligas de titânio, as composições que mais se destacam são mostradas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1- Principais ligas comerciais de titânio

Designação	Força tração (min)		Teor do elemento químico								
	Mpa	Ksi	N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo
ASTM grade 1	240	35	0,03	0,04	0,015	0,2	0,11	-	-	-	-
ASTM grade 2	240	50	0,03	0,08	0,015	0,3	0,25	-	-	-	-
ASTM grade 3	450	65	0,05	0,08	0,015	0,3	0,35	-	-	-	-
ASTM grade 4	550	80	0,05	0,08	0,015	0,5	0,4	-	-	-	-
ASTM grade 7	340	50	0,03	0,04	0,015	0,3	0,25	-	-	-	-
ASTM grade 11	240	35	0,03	0,04	0,015	0,2	0,11	-	-	-	-
Ti-0,35-0,826	480	70	0,03	0,1	0,015	0,3	0,25	-	-	-	0,3
Ti-5Al-2,55a	790	115	0,05	0,06	0,01	0,5	0,2	5	2	-	-
Ti-5Al-2,55a-ELI	690	100	0,07	0,06	0,013	0,23	0,12	5	5	-	-
Ti-8Al-1Mo-1V	900	130	0,05	0,08	0,015	0,3	0,12	8	2,5	-	1
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	900	130	0,05	0,05	0,013	0,25	0,15	6	-	4	2
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0,8Mo	790	115	0,02	0,03	0,013	0,12	0,1	6	2	-	1
Ti-2,25Al-11Sn-5Zr-1Mo	1000	145	0,04	0,04	0,004	0,12	0,17	2,25	11	5	1
Ti-5Al-4Sn-3,5Zr-0,7Nb-0,5Mo-0,35Si	1390	149	0,03	0,08	0,006	0,05	0,15	5,8	4	0,35	0,5
Ti-6Al-4V	900	130	0,05	0,1	0,013	0,2	0,2	6	-	-	-
Ti-6Al-6V-2Sn	1000	150	0,04	0,05	0,015	1	0,2	6	2	-	-
Ti-8Mo	860	125	0,05	0,08	0,015	0,3	0,2	-	-	-	-
Ti-7Al-4Mo	1000	150	0,05	0,1	0,013	0,3	0,2	7	-	-	4
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-4Zr-6Mo	1170	170	0,04	0,04	0,013	0,15	0,15	6	2	4	6
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	1125	160	0,04	0,05	0,013	0,3	0,13	5	2	2	4
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr	1000	150	0,03	0,05	0,013	0,25	0,14	6	2	2	2
Ti-3Al-2,5V	600	90	0,015	0,05	0,015	0,3	0,12	3	-	-	-
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0,5Si	1100	160	-	0,02	0,013	0,2		4	2	-	4
Ti-10V-2Fe-3Al	1120	170	0,05	0,05	0,015	2,5	0,16	3	-	-	-
Ti-13V-11Cr-3Al	1170	170	0,05	0,05	0,025	0,35	0,17	3	-	-	-
Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	1170	170	0,03	0,05	0,015	2,5	0,17	3	-	-	2
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zn	900	130	0,03	0,05	0,2	0,25	0,12	3	-	4	4
Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn	600	100	0,05	0,1	0,02	0,35	0,18	-	4,5	6	11,5
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	1000	145	0,05	0,05	0,015	0,25	0,13	3	3	-	-
Ti-15Mo-3Al-2,7Nb-0,25Si	852	125	0,05	0,05	0,015	0,25	0,13	3	-	-	15

Fonte: Adaptado de (MATTEW JR,2007).

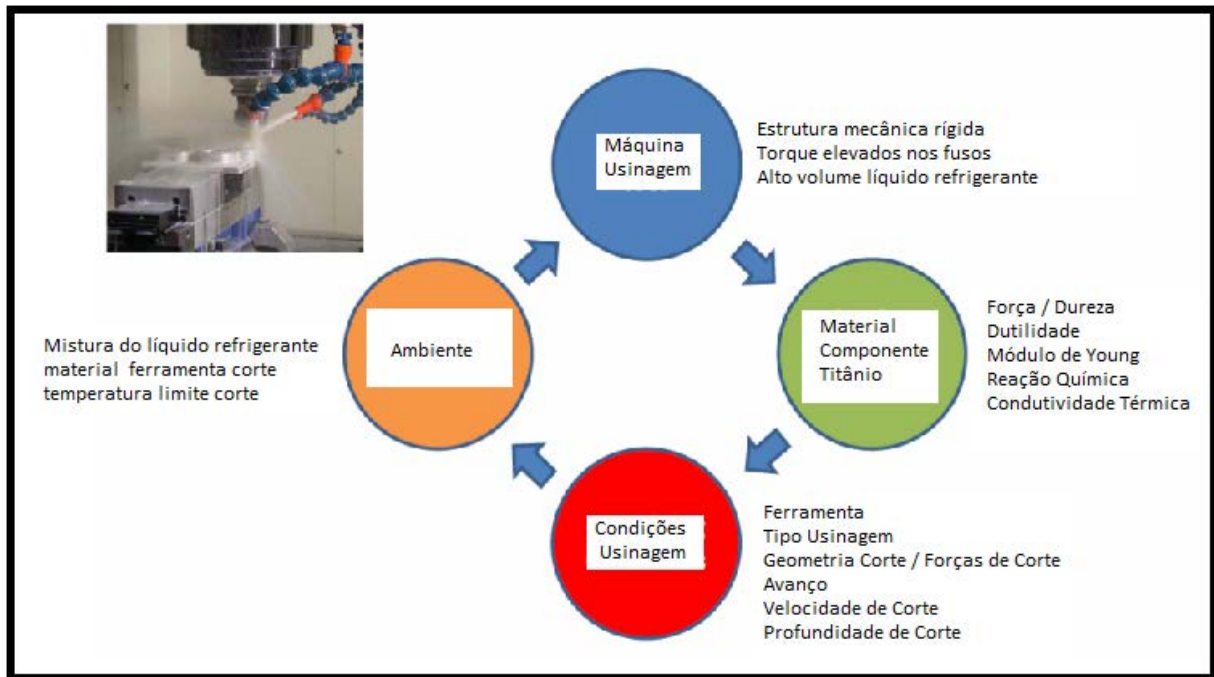
Figura 3.1 - Usinabilidade do Titânio comparado com outras ligas



Fonte: Adaptado de (KENNAMETAL, 2013)

Portanto, o titânio 6Al4V, por ser diferenciado em suas propriedades e características, deve ser tratado como tal ao ser usinado, seja qual for o processo empregado e alguns parâmetros podem e devem ser otimizados na busca de um processo eficiente de furação, como visto na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Parâmetros de otimização do processo de furação na usinagem do Ti 6Al-4V



Fonte: Adaptado de (KENNAMETAL, 2013).

3.3 MATERIAIS DE FERRAMENTAS

Segundo Machado, Abraão, Coelho e Da Silva (2011), o processo de usinagem baseia-se na remoção de material, utilizando como ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça. Partindo-se do princípio da dureza relativa, ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuíram para o aparecimento de novos materiais para a confecção de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem.

Para que se obtenha um aço ferramenta capaz de cumprir sua principal função, ou seja, remover material, é preciso que ele possua algumas propriedades essenciais à sua condição, independentemente do material a ser usinado. Assim, consideram-se como importantíssimas a dureza, a resistência à compressão e ao cisalhamento, a resistência ao impacto e à abrasão, ao choque térmico, resistência a altas temperaturas, etc. É evidente que nem sempre se consegue todas estas propriedades num só material de ferramenta. Diante disto, devem ser levados em consideração alguns fatores, tais como:

- o material que será usinado e também o tipo de cavaco que será gerado a fim de concatenar a melhor condição material x ferramenta;
- tipo de operação de usinagem, isto é, fresamento, que pode ser de topo, de rasgo, de contorno, furação, ser passante ou cega nos modos contínuo ou descontínuo que pressupõe ferramenta de corte mais tenaz, além do conjunto máquina-peça-ferramenta-dispositivos serem rígidos o suficiente para suportar à determinada operação;
- condições de usinagem a serem executadas, ou seja, velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, rotação e avanço;
- condição da operação, ou seja, acabamento ou desbaste.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), não existe uma classificação geral de materiais para ferramentas. No entanto, com base nas suas características químicas, eles podem ser agrupados da seguinte forma:

- Aços rápidos;
- Aços rápidos com cobertura;
- Metal duro;
- Metal duro com cobertura;
- Nitreto de boro cúbico;
- Diamante.

3.4 METAL DURO

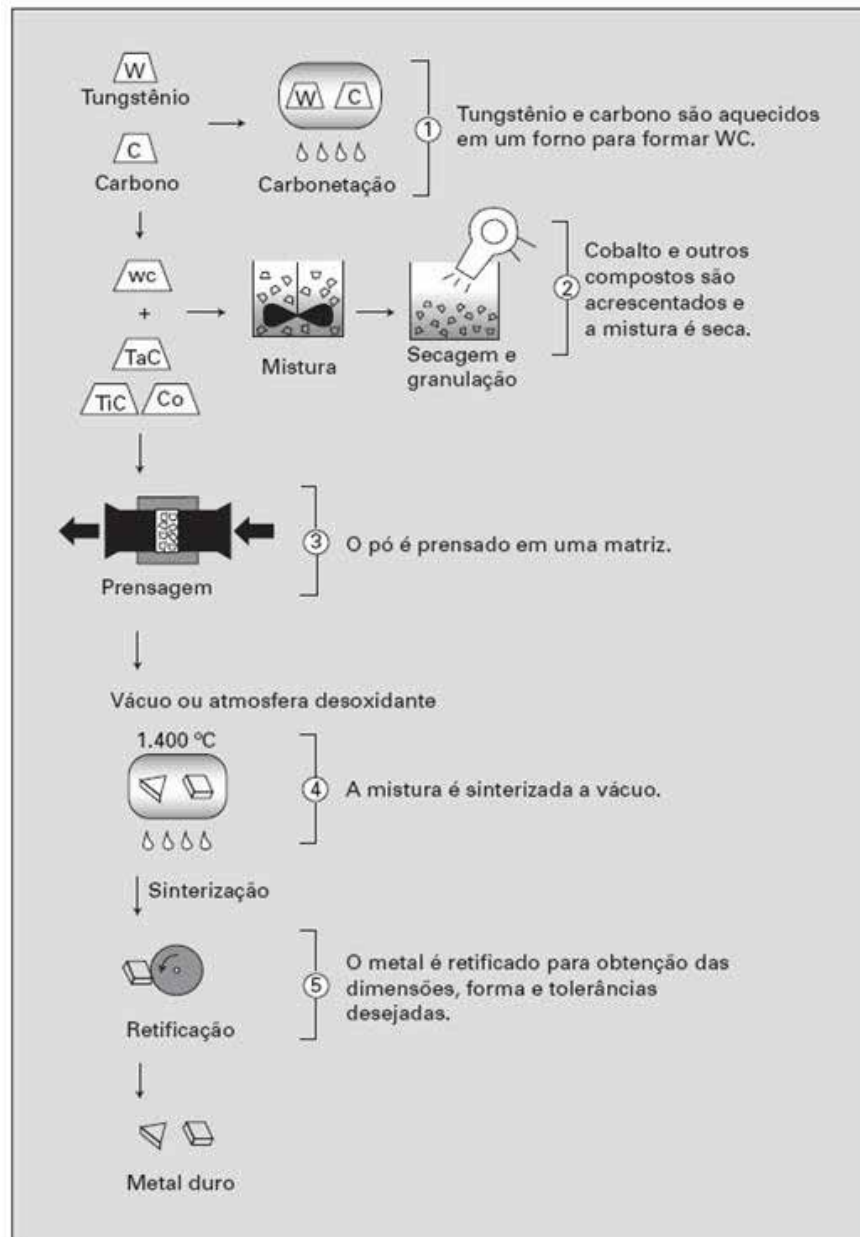
Sabe-se que a classe de metal duro surgiu por volta de 1920, na Alemanha, depois da produção em laboratório do carbetos de tungstênio (WC) em pó realizada por Schroter em 1925.

Segundo Machado, Abrão, Coelho e Da Silva (2011), o primeiro grande impulso na área dos materiais para ferramentas de corte aconteceu com a descoberta do aço rápido, o segundo com metal duro, pois com este novamente as velocidades de corte puderam ser aumentadas em praticamente dez vezes, de 35m/min para 250 m/min a 300 m/min.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), o metal duro é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. Da mesma forma, ferramentas de carbono sinterizado, também conhecidas como ferramentas de metal duro ou ferramentas de carboneto cementado são formadas por uma mistura de microgrãos de carbetos de tungstênio com cobalto em temperatura e pressão altas. Tântalo, titânio ou carbetos de vanádio podem também ser misturados em pequenas proporções (Davim, 2011).

Na realidade, os carbetos de tungstênio são combinados com outros carbetos, tais como titânio, nióbio e tântalo, variando estes entre 1 a 10 micrometros e ocupando 60 a 95% do volume do material. O metal duro, no processo de descobrimento, depois da adição de cobalto ao carboneto de tungstênio, também recebe materiais adicionais como TiC ou NbC sempre na busca de melhores propriedades, como resistência ao desgaste, resistência mecânica, etc. De forma simples, é possível descrever o processo de obtenção do metal duro através da metalurgia do pó, conforme Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Processo de metalurgia do pó para obtenção dos metais duros.



Fonte: Adaptado de (MITSUBISHI, 2005)

3.4.1 Classes do Metal Duro

Com a criação deste material-ferramenta, tornou-se necessária a identificação segundo padrões internacionais. Assim, a ISO 513 padronizou a classificação da seguinte forma:

- classe K: contém WC + Co. Muito conhecida como a classe dos ferros fundidos ou assim designado como utilizável na usinagem de materiais de cavacos curtos.

Trata-se de um composto de carbonetos de tungstênio com aglomerados de cobalto;

- classe P: quando é adicionado TiC, TaC ou NbC. Diferentemente da classe K, esta é chamada de “classe dos materiais de cavacos longos”;
- classe M: é uma intermediária e formada pelo WC + Co com adições de TiC , TaC ou NbC, porém menores quantidades que a classe P, com uso direcionado aos aços inoxidáveis, com aproveitamento melhor quando se trata do tipo inoxidável austenítico.

Apesar de todos estes tipos de metais duros, a Norma ISO 513 de 2004 criou outras classes de metais duros, que são:

- classe N: para metais e ligas não ferrosas, destacando-se o cobre e alumínio;
- classe S: para ligas resistentes ao calor, tais como o titânio, ferro, níquel e cobalto;
- classe H: utilizado para aços endurecidos, tais como aços fundidos e ferros fundidos temperados, sendo que esta classificação abstém a classe K do rótulo de uso em materiais não ferrosos.

Na sequência, é preciso detalhar que os metais duros, além da letra de identificação de tipo que depende do tamanho dos grãos de carboneto e da composição química do material da ferramenta, são seguidos de um número que representa a resistência ao desgaste e tenacidade, isto é, quanto maior o número, que normalmente varia de 01 a 50, maior deverá ser a tenacidade e, conseqüentemente, menor será a resistência ao desgaste.

O Quadro 3.3 conforme classificação da Norma ISO 513 de 2004, mostra a designação de cada tipo de metal duro.

Quadro 3.3 - Classificação dos metais duros.

Principais Classes			Classes de Aplicação			
Letra de Identificação	Cor de Identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros			
P	AZUL	Aços: Todos os tipos de aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	a	b
						
M	AMARELO	Aço inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplos (austenítico / ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	a	b
						
K	VERMELHO	Ferro Fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	a	b
						
N	VERDE	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	a	b
						
S	MARROM	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	a	b
						
H	CINZA	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	a	b
						
a - Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta; b- Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta						

Fonte: Adaptado da Norma ISO 513 (2004)

3.5 AÇO RÁPIDO

Segundo Juneja, Sekhon e Seth (2005) aço rápido é uma liga de aço a qual contém elementos como tungstênio, cromo, vanádio, molibdênio e cobalto, além do desejado carbono, a fim de aumentar a resistência a quente e ao desgaste.

Durante muitos anos, as ferramentas de corte utilizaram como material o aço-carbono, que permitia velocidades de corte de 3 a 5 m/min, o que era considerado plausível para a época, isto é, século XIX. No entanto, na virada deste século, dois pesquisadores, Taylor e White, foram capazes de desenvolver um aço que possibilitava o aumento das velocidades de corte em até 10 vezes, revolucionando a área de usinagem dos materiais. Devido a este factível aumento das velocidades de corte, o aço foi chamado de “aço rápido” ou HSS (High Speed Steel), justificando o nome. Este continha os elementos químicos 18,91% W, 5,4% Cr, 0,11% Mn e 0,29% V, convenientemente tratado termicamente e com características mínimas que devem constar neste, quais sejam:

- **Dureza a quente:** em qualquer operação de remoção de material, a temperatura é um fator que deve ser considerado e a ferramenta de corte deve suportá-la, podendo atingir 1000°C nas regiões de corte;
- **Tenacidade:** em função das exigências pelas forças de corte atuantes na operação de remoção de material, a ferramenta deve suprir a energia aplicada, resistindo aos choques inevitáveis;
- **Resistência ao desgaste:** é a capacidade de resistir à abrasão no momento da usinagem e está intimamente ligada à resistência à dureza a quente.

Há outras características de um material-ferramenta, mas considera-se as três citadas como as mais importantes e influentes numa usinagem.

A metalografia do aço rápido é martensítica com carbonetos, seja qual for o material como elemento cortante. Sua utilização, apesar da superação de alguns outros materiais muito mais vantajosos na concepção de ferramentas de corte, ainda tem sua função em brocas, fresas, barras para tornear (bits), cossinetes ,etc.

A AISI, pela vasta gama de tipos de aços-rápidos, viu-se na condição de tê-los segundo uma classificação específica, a qual segue conforme Quadro 3.4.

Quadro 3.4: Classificação dos aços rápidos

CLASSE	ANSI	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Outros
CLASSE 610 - tipos ao W										
610	T1	0,70/0,75	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,10	1,00/1,20	18,00/18,25	0,70(opc)	-	-
611	T2(tipo 1)	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,00/2,15	18,00/18,50	0,50/0,75(opc)	-	-
612	T2(tipo 2)	0,95/0,98	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,00/2,15	18,00/18,50	0,50/0,75(opc)	-	-
613	-	0,97/1,03	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	2,80/3,20	13,50/14,50	0,65/0,85	-	-
614	-	1,08/1,13	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,90/3,35	18,00/18,50	0,70/0,90	-	-
615	T9	1,22/1,28	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	3,75/4,25	18,00/18,50	0,71(opc)	-	-
616	T7	0,70/0,75	0,10/0,40	0,10/0,40	4,50/5,00	1,50/1,80	13,50/14,50	-	-	-
CLASSE 620 - tipos ao W - Co										
620	T4	0,70/0,75	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,00/1,25	18,00/19,00	0,60/0,70(opc)	4,75/5,25	-
621	T5	0,77/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,85/2,00	18,50/19,00	0,65/1,00(opc)	7,60/9,00	-
622	T6	0,75/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,60/2,00	18,75/20,50	0,60/0,80(opc)	11,50/12,25	-
623	T15	1,50/1,60	0,10/0,40	0,10/0,40	4,50/4,75	4,75/5,00	12,50/13,50	0,50(opc)	4,75/5,25	-
624	T8	0,75/0,80	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	2,00/2,25	13,75/14,00	0,75	5,00/5,25	-
CLASSE 630 - tipos ao Mo										
630	M1	0,78/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,00	1,00/1,25	1,50/1,65	8,00/9,00	-	-
631	M10	0,85/0,90	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	1,90/2,10	-	8,00/8,50	-	-
632	M7	0,97/1,03	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,00	1,90/2,10	1,50/1,75	8,50/8,75	-	-
CLASSE 640 - tipos ao Mo - Co										
640	M30	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	1,10/1,40	1,50/1,80	8,25/8,50	4,75/5,25	-
641	M34	0,87/0,93	0,10/0,40	0,10/0,40	3,50/4,00	1,85/2,25	1,38/1,60	8,45/8,95	8,00/8,25	-
642	-	0,56/0,62	0,10/0,40	0,10/0,40	4,75/5,25	1,10/1,40	-	7,75/8,25	2,30/2,70	0,25B
643	-	0,55/0,60	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,60/1,90	1,65/1,75	8,15/8,50	8,00/8,50	0,50B
644	M33	0,85/0,95	0,10/0,40	0,10/0,40	3,50/4,00	1,00/1,30	1,30/1,70	9,25/9,75	7,75/8,25	-
645	M33	1,05/1,10	0,10/0,40	0,10/0,40	3,50/4,00	1,05/1,25	1,30/1,70	9,25/9,75	-	-
CLASSE 650 - tipos ao W - Mo										
650	M2	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	1,70/2,10	6,00/6,50	4,75/5,25	-	-
651	M3(tipo1)	1,00/1,10	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,40/2,55	6,00/6,25	5,70/6,25	-	-
652	M3(tipo2)	1,10/1,20	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	3,00/3,30	5,00/6,25	5,00/6,25	-	-
653	M4	1,25/1,30	0,10/0,40	0,10/0,40	4,25/4,50	3,75/4,25	5,50/6,00	4,50/4,75	-	-
654	-	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,35/1,65	5,25/5,75	4,30/4,70	-	1,10/1,40Nb
CLASSE 660 - tipos ao W - Mo-Co										
660	M35	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	3,90/4,40	1,75/2,15	6,15/6,65	4,75/5,25	4,75/5,25	-
661	M36	0,80/0,90	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	1,65/2,20	5,50/6,00	4,25/5,25	7,75/9,00	-
662	M6	0,75/0,80	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	1,25/1,55	3,75/4,25	4,75/5,25	11,50/12,50	-
663	M15	1,50/1,60	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,75	4,75/5,25	6,25/6,75	3,00/5,00	4,75/5,25	-
664	-	1,20/1,30	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	4,00/4,50	9,50/10,50	2,30/2,70	5,25/5,75	-

Fonte: Adaptado da Norma AISI (2004)

A classificação dos aços rápidos baseia-se em dois grandes grupos, quais sejam, aços ao tungstênio identificados pela letra “T” e aços ao molibdênio identificados pela letra “W”.

Importante salientar que este tipo de aço ferramenta possui alguns variados elementos de ligas que, conforme porcentagem, levam-no a certas características. Dentre os mais comuns e mais impactantes na sua definição, estão:

- Carbono: tendem a aumentar a dureza e a temperabilidade do material com a formação de carbonetos, com teores que podem estar entre 0,7% a 1,6% C, designando-o como de alto teor de carbono;
- Cobalto: este elemento químico tem a propriedade de elevar a dureza a quente da ferramenta e, consequentemente, aumentar a resistência a altas temperaturas, capacitando-a para grandes desbastes e para aqueles materiais de cavacos curtos, tal como o ferro fundido, onde não se recomenda fluido de corte;
- Cromo: são apresentados com teores variando em torno de 4% e, com o elemento Carbono, capacita o aço-rápido a alta temperabilidade, tendo, também, a tendência de reduzir a oxidação;
- Molibdênio: é o elemento substituidor do Tungstênio e, como característica importante, possui um peso atômico 50% menor que o W e produz o dobro de átomos para ligar-se ao aço. Por isso, como exemplo, será preciso somente 1% de Mo enquanto para W será preciso 2%. Como o Mo possui um menor ponto de fusão em relação ao W, a temperatura de tempêra pode ser menor e a austenita residual é menos estável, o que resulta numa menor temperatura para revenimento, sempre em relação ao W;
- Vanádio: apresenta-se com teores de 1% a 5% e, a cada 1%, é necessário o aumento do teor de carbono em 0,25% a fim de permitir a formação de carbonetos, fato que, se não ocorrer, causa a ferritização, reduzindo de forma considerável a dureza. É considerado o mais resistente dos carbonetos encontrados no aço rápido, atingindo valores em torno de 83 HRc. Por isso, além de desoxidante, é muito recomendado para operações em que se exige grande resistência ao desgaste e resistência a quente. Ao mesmo tempo que produz dureza altíssima, por se posicionar ao redor dos grãos impedindo-os de crescimento no tratamento térmico, fazem-no também mais tenazes. Essa combinação de C e V em altas porcentagens, originou a denominação de “aços super-rápidos”. No Brasil, devido ao menor custo e características semelhantes, o elemento Nióbio é bastante utilizado em substituição ao V.
- Tungstênio: atua formando carbonetos, dissolvendo-se somente parcialmente na austenita em temperaturas superiores a 980°C e o revenimento ocorre em

temperaturas na faixa de 500°C A 590°C. Possui a característica de elevar a dureza e a resistência ao desgaste do aço-rápido, com teores em torno de 20%.

Outros elementos químicos também podem ser introduzidos nos aços rápidos a fim de melhorar a usinabilidade, como é o caso do enxofre, que por outro lado perde em tenacidade.

Apesar do aço rápido ter sido uma descoberta que revolucionou em termos de velocidades de corte, por volta dos anos 70, o avanço neste material tornou-se mais evidente com o surgimento das ferramentas revestidas e aquelas produzidas pela metalurgia do pó, sendo esta última, objeto de nosso estudo.

3.6. METALURGIA DO PÓ

Sinterização pode ser definida como um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de determinado material, inicialmente em contato mútuo, adquira resistência mecânica. Sua força motora é o decréscimo da energia superficial livre do conjunto de partículas, conseguido pela diminuição da superfície total do sistema (Da Silva, Alves Junior, 1998).

O processo é simples, pois configura-se com ferramental apropriado para tal e, em condições corretas de temperatura, ou seja, abaixo do ponto de fusão do metal base, adquire-se uma ligação entre as partículas. Com o aquecimento, o aglomerado de pó se transforma numa forte composição de propriedades físicas e mecânicas muito atraentes. É destacável a característica de economia de material na confecção de uma matéria prima sinterizada, isto é, não existe a geração de cavacos e há ocorrência de, ao menos, 97% de matéria prima original, principalmente quando se tem peças de geometrias complexas. No entanto, é possível a aquisição de ferramentas de corte sinterizadas, as quais possuem características bastante atraentes em relação às demais.

Aprofundando mais sobre a sinterização, há dois tipos básicos definidos como fase sólida e fase líquida, nas quais a porosidade da estrutura tende a fechar com o preenchimento dos espaços vazios, definindo o tipo de sinterização.

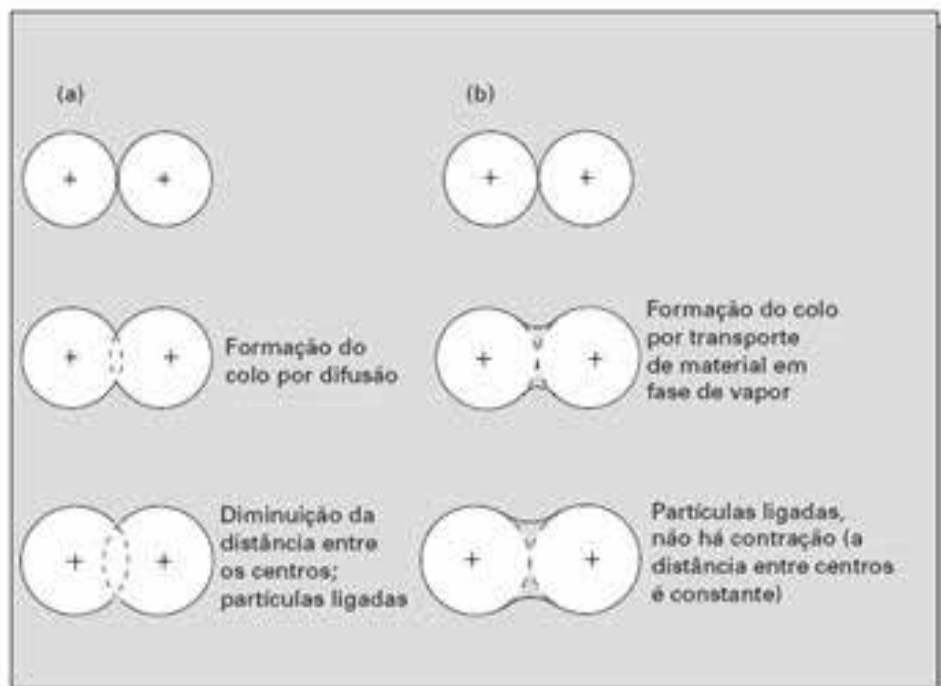
A sinterização por fase sólida ocorre com o transporte do material com total ausência de líquido, sendo este na forma de fluxo viscoso por difusão atômica, como é o caso de cristais ou através de transporte de vapor. De qualquer forma de deslocamento, a rigidez e o material

denso são obtidos pela intensidade do aumento da área de contato entre as partículas e o empacotamento da matéria.

Na sinterização com a fase líquida, naturalmente ocorre a formação de líquido na estrutura, com a fusão de um dos componentes quando da reação entre os mesmos. Na comparação com a fase sólida, a fase líquida é mais rápida e este fato reverte à uma estrutura mais facilmente vedada, tornando-se este tipo o mais próprio quando se tem materiais de difícil sinterização (German, 1985).

Além das sinterizações já citadas, há também aquela chamada de ativada, na qual utiliza-se de substâncias ativadoras que aceleram o processo. Estas são aplicadas em pequenas quantidades e podem gerar um melhor atalho para a difusão, isto é, a ocupação dos espaços vazios entre as substâncias majoritárias e minoritárias. Outra forma não menos comum é através do aumento da velocidade da amostra. Esquemáticamente, é possível demonstrar a união dos pós na fase sólida e também na fase líquida, de acordo com a Figura 3.3:

Figura 3.3 - Esquema ilustrativo dos dois mecanismos de união dos pós durante o processo de sinterização: a) transporte de material no estado sólido; b) transporte de material no estado líquido.



Fonte: Adaptado de (KALPAKAJIAN, 1984)

Há três campos de operação de processamento da sinterização, realizados em fornos contínuos ou semi-contínuos, quais sejam:

- Pré-aquecimento;
- Manutenção;
- Resfriamento.

Basicamente existem 4 tipos de fornos:

- Forno de Esteira (até 1150oC);
- Forno Wakkingbean (até 1300oC);
- Forno Pussher (até 1300oC);
- Forno a vácuo (até 1350oC).

Para a realização da sinterização, os fornos obrigatoriamente são usados de acordo com as temperaturas de operação. Assim, podem ser à gás ou elétricos, por resistência ou indução (fornos a vácuo, geralmente). Para os fornos a resistência, barras ou fios de NiCr proporcionam o aquecimento em temperatura em torno de 1150°C, de carboneto de silício para temperaturas em torno de 1400 °C ou 1550 °C, para molibdênio ou tungstênio.

É demandada atmosfera de proteção para os fornos de sinterização a fim de evitar a oxidação das peças e também para reduzir os óxidos dos pós, que, por conseguinte, podem afetar o grau de sinterização dos metais em questão.

3.7. CARACTERÍSTICAS DOS PÓS METÁLICOS

O tamanho e a forma das partículas individuais podem ser consideradas as características mais contundentes neste processo. Na obtenção de uma ferramenta de corte é demasiado importante que haja possibilidade de um controle e distribuição dos grãos, além do necessário domínio do processo de obtenção do pó metálico, a fim de obter a melhor condição de usinabilidade. Estes pós apresentam-se de várias formas, das quais se destacam as esféricas, aciculares e dendríticas.

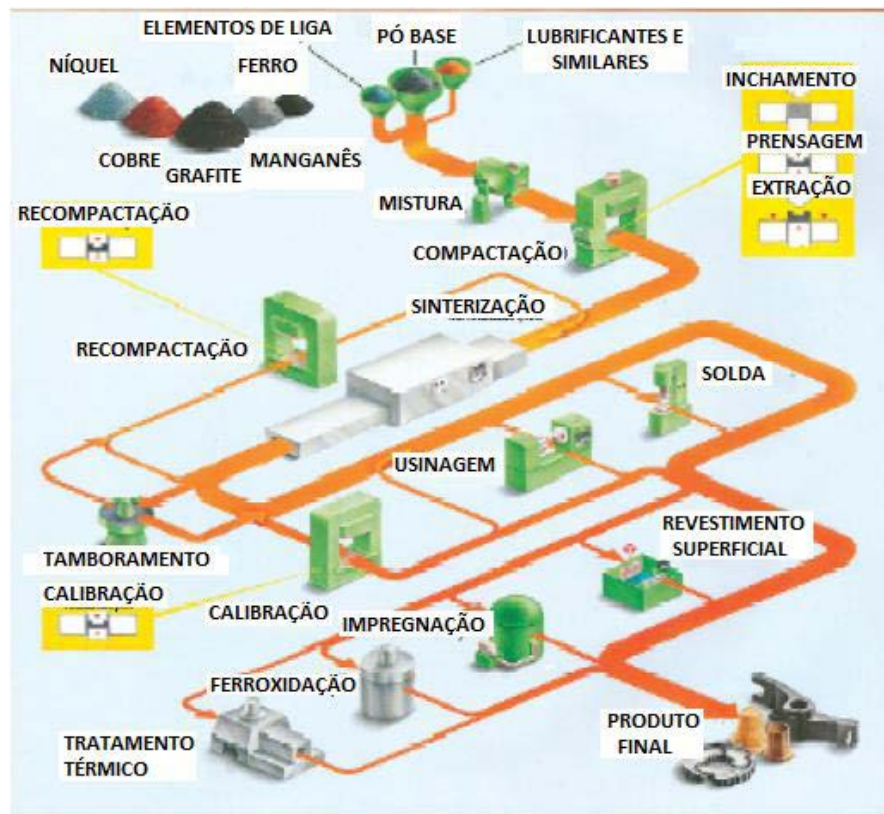
Para a medição dos grãos de partículas, o método mais comum é aquele em que se tem peneiras padronizadas, tal qual a Série de Taylor. Este processo pode ser considerado como o mais significativo de obtenção dos pós metálicos e passam pela atomização e eletrólise.

Na atomização, há o vazamento do metal fundido via orifício controlado e próprio para tal operação, caracterizando um filete líquido, o qual sofre ataques de jatos de ar, de gás, ou mesmo de água, provando a pulverização do filete com consequente resfriamento.

Os fatores que mais influenciam na forma e tamanho das partículas são a pressão de água ou outro refrigerante, a espessura do filete e também o tipo de atomização, sendo que, com água, as partículas são irregulares e com ângulo, diferentemente da atomização a ar, quando se obtém partículas mais regulares em forma de esferas.

Já a eletrólise é um processo muito utilizado na fabricação de pós de cobre, adquirindo alta dureza com baixa densidade e estrutura dendrítica. O recolhimento da massa junto aos tanques é totalmente neutralizada, secada, reduzida e finalizada com o peneiramento. Além destas formas mais comuns de obtenção de pós metálicos, ainda existem os métodos mecânicos, tais como a trituração e moagem, ou métodos químicos, quando são realizadas reduções de óxidos por hidrogênio ou monóxido de carbono. Portanto, os pós podem ser considerados como uma associação de um grande número de partículas que podem variar de 1 a 500 micrometros (Remy, Gay; Gonthier, 2002).

Figura 3.4 - Etapas do processo de metalurgia do pó (sinterização).



Fonte: Adaptado de (GERMAN, 1985)

Os pós são misturados em misturadores tipo "Y" ou "duplo cone" e são processados em etapas conforme Figura 3.4.

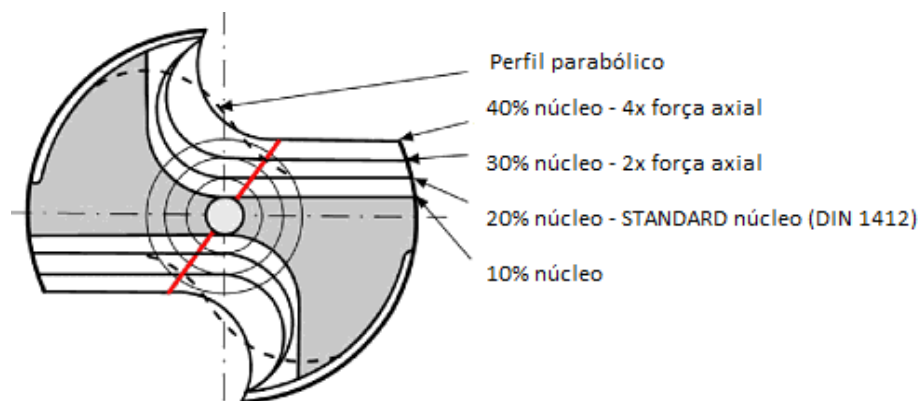
Na utilização de pós previamente ligados, torna-se necessária a adição de lubrificantes sólidos, que tem a função de diminuir o atrito entre os componentes do ferramental que compactam os pós. Os pós compactados são produzidos através de prensas mecânicas ou hidráulicas. Basicamente, o processo norteia-se pela quantidade de pó adicionada numa matriz contra o macho, com punções superiores e inferiores realizando deslocamentos à temperatura ambiente.

3.8 PROCESSO DE FURAÇÃO

O processo de furação é basicamente realizado pela rotação da ferramenta que, ao penetrar no material, remove-o de acordo com o avanço, rotação e velocidade de corte, a qual

não é totalmente uniforme na ferramenta, podendo se tornar severa, à medida que aplicada incorretamente, ou seja, com parâmetros de corte exagerados, conjunto máquina x ferramenta x material inadequados ou refrigeração insuficiente, uma vez que atinge a tendência de valores baixos no centro e maiores em direção à periferia de corte. Este comportamento ocorre exatamente porque o núcleo da ferramenta que define a dimensão da aresta transversal sofre variações conforme afiação, isto é, à medida que esta é reduzida em seu comprimento de corte, há o aumento do núcleo, enrijecendo-a e exigindo uma força axial maior, ao mesmo tempo que prejudica sensivelmente a saída do cavaco, ocasionando, muitas vezes, um acúmulo deste nas regiões de corte, tendo como consequências desde um mau acabamento a um rompimento da ferramenta devido aos esforços acumulados. Na Figura 3.5 pode-se observar a relação força axial x aresta transversal.

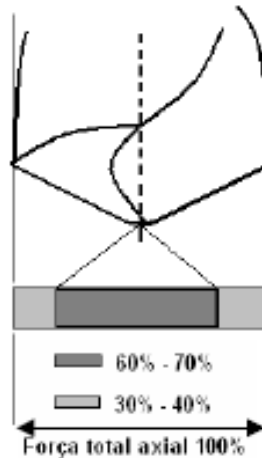
Figura 3.5 - Secção transversal de broca



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte SKF,2002)

Com as afiações da ferramenta, o comprimento da aresta transversal é sempre maior, de forma que, a aproximadamente 1/3 do comprimento do canal eliminado, é necessária a redução da aresta transversal, pois, caso não feito, o esforço axial tende a aumentar de forma considerável, resultando em furos ovalizados devido à incapacidade de auto-centrar-se corretamente. A aresta transversal é responsável por 60 a 70% do esforço axial.

Figura 3.6 - Força axial da broca.



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte SKF,2002).

Segundo Caspar (1992), no processo de furação, devem ser considerados os seguintes fatores, sem os quais não há o completamento do processo de furação:

- profundidade de furação;
- diâmetro do furo;
- tolerância do furo;
- velocidade de corte;
- avanço;
- rotação;

Com todas as nuances de uma broca, a análise do movimento de furação de uma broca é caracterizada pelos movimentos de corte, efetivo e de avanço, todos simultâneos, que efetivam-se no processo com a remoção de cavaco e confecção do furo. Esses movimentos são conceituados conforme NBR 6162 (ABNT, 1989), na qual se tem como premissa, no conjunto máquina x ferramenta, a relação de movimento uniforme entre as partes. Assim, segundo a NBR 6162, a conceituação é estabelecida a seguir:

- **Movimento de corte:** efetuado entre a peça e a aresta de corte, produzindo somente uma remoção de cavaco quando não há movimento de avanço;
- **Movimento de avanço:** feito entre a peça e a aresta de corte originando cavaco quando há também o movimento de corte;
- **Movimento efetivo:** é a resultante dos movimento de avanço e corte no mesmo instante.

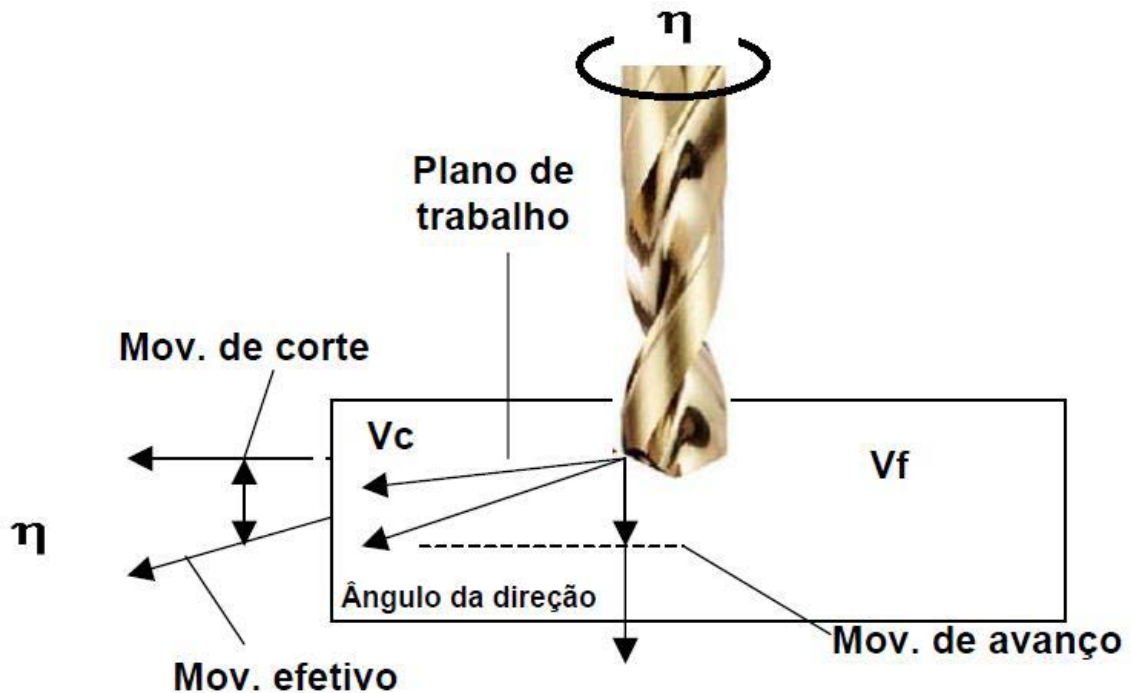
Além destes movimentos, outros são definidos conforme a NBR 6162 e devem ser considerados, quais são:

- **Movimento de aproximação:** é aquela em que há o movimento da peça e aresta de corte na mesma direção e sentido, antes do contato;
- **Movimento de ajuste:** realizado entre a peça e a aresta cortante onde se determina a espessura de usinagem;
- **Movimento de correção:** feito entre a peça e a aresta de corte quando há o desgaste da ferramenta, que deve ser compensado, ou qualquer variação térmica que tenha ocorrido durante o processo de usinagem;
- **Movimento de recuo:** onde ocorre o movimento entre a peça e a aresta cortante após o corte, com o afastamento das partes.

Além dos movimentos característicos de um conjunto máquina x ferramenta x peça, as direções destas determinam a retirada de cavacos, conforme cada parâmetro de corte adotado, seguindo premissas que consideram o conjunto. Por vez, as direções, conforme Figura 3.7, são definidas assim:

- **Direção de corte:** é aquela em que há o movimento de corte da ferramenta na peça;
- **Direção de avanço:** é aquela onde há o movimento de encontro da ferramenta e peça;
- **Direção efetiva:** é a direção feita pelo movimento efetivo de corte.

Figura 3.7 - Direção dos movimentos de corte, avanço e efetivo na furação



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte SKF,2002)

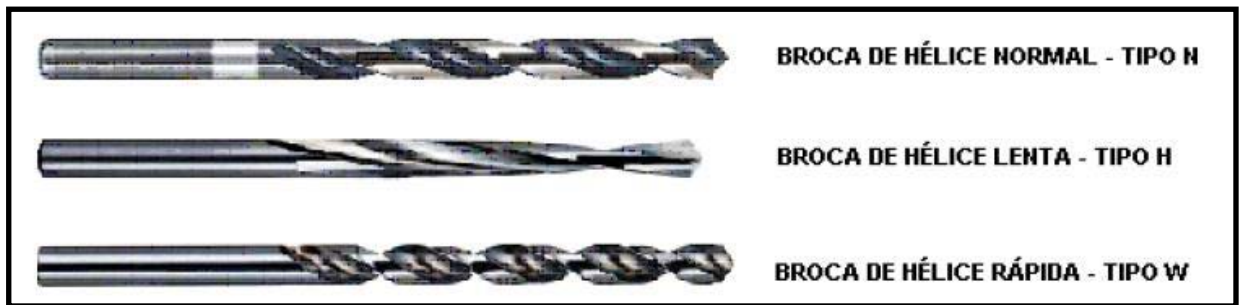
3.9 TIPOS DE BROCAS E CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUÇÃO

Segundo Stephenson e Agapiou (2006) a broca é uma ferramenta de corte de ponta que possui um ou mais canais retos ou helicoidais e que pode ter um corpo oco para passagem do fluido de corte e sulcos para a evacuação de cavacos durante a geração de um furo num material sólido ou tubular. Pode ser construída com tolerância IT14 para operações de desbaste, podem apresentar tolerâncias dentro da faixa IT8 para acabamento e furos tolerados e, em casos especiais, até mesmo estar na condição IT7.

Muitas são as características que definem uma broca no seu tipo, forma, afiação, material, etc.

Os tipos que comumente abrangem as diferentes situações de furação são conforme Figuras 3.8 a 3.12.

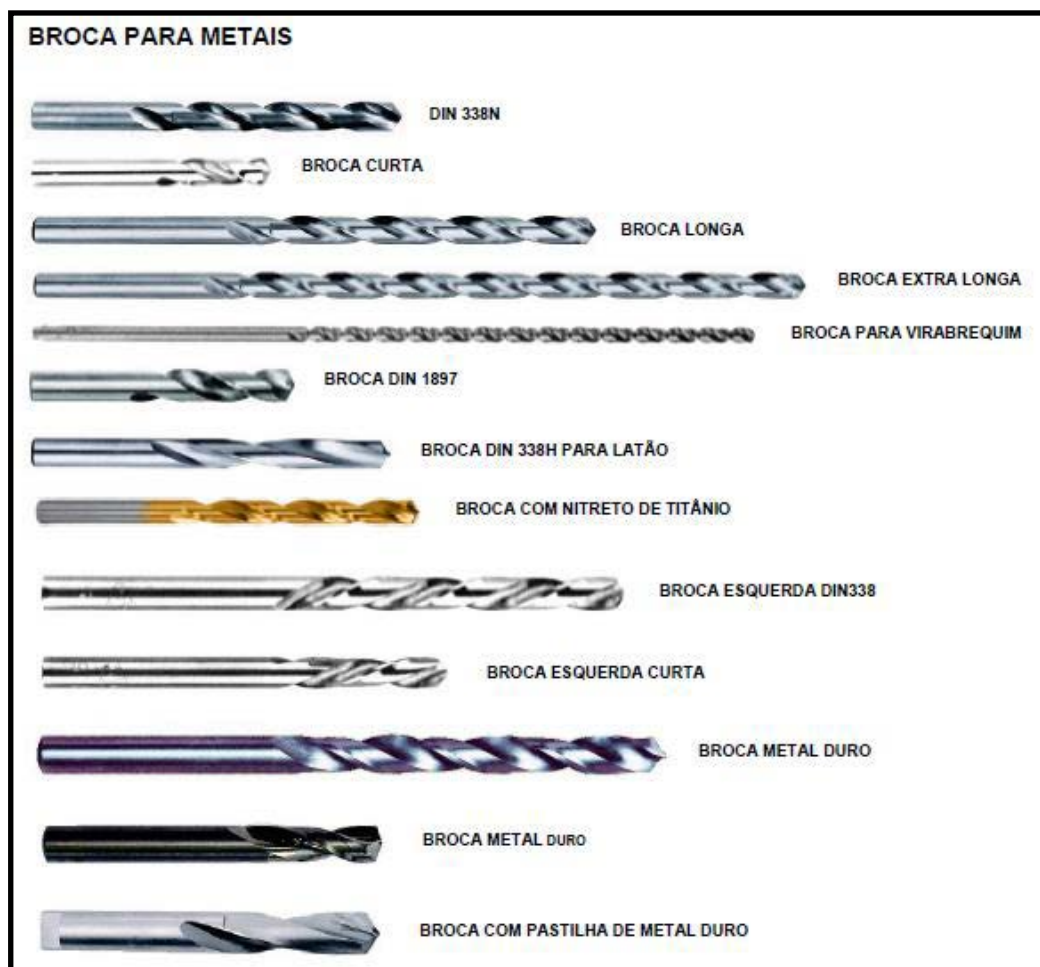
Figura 3.8 - Tipos hélices de brocas helicoidais



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte SKF,2002)

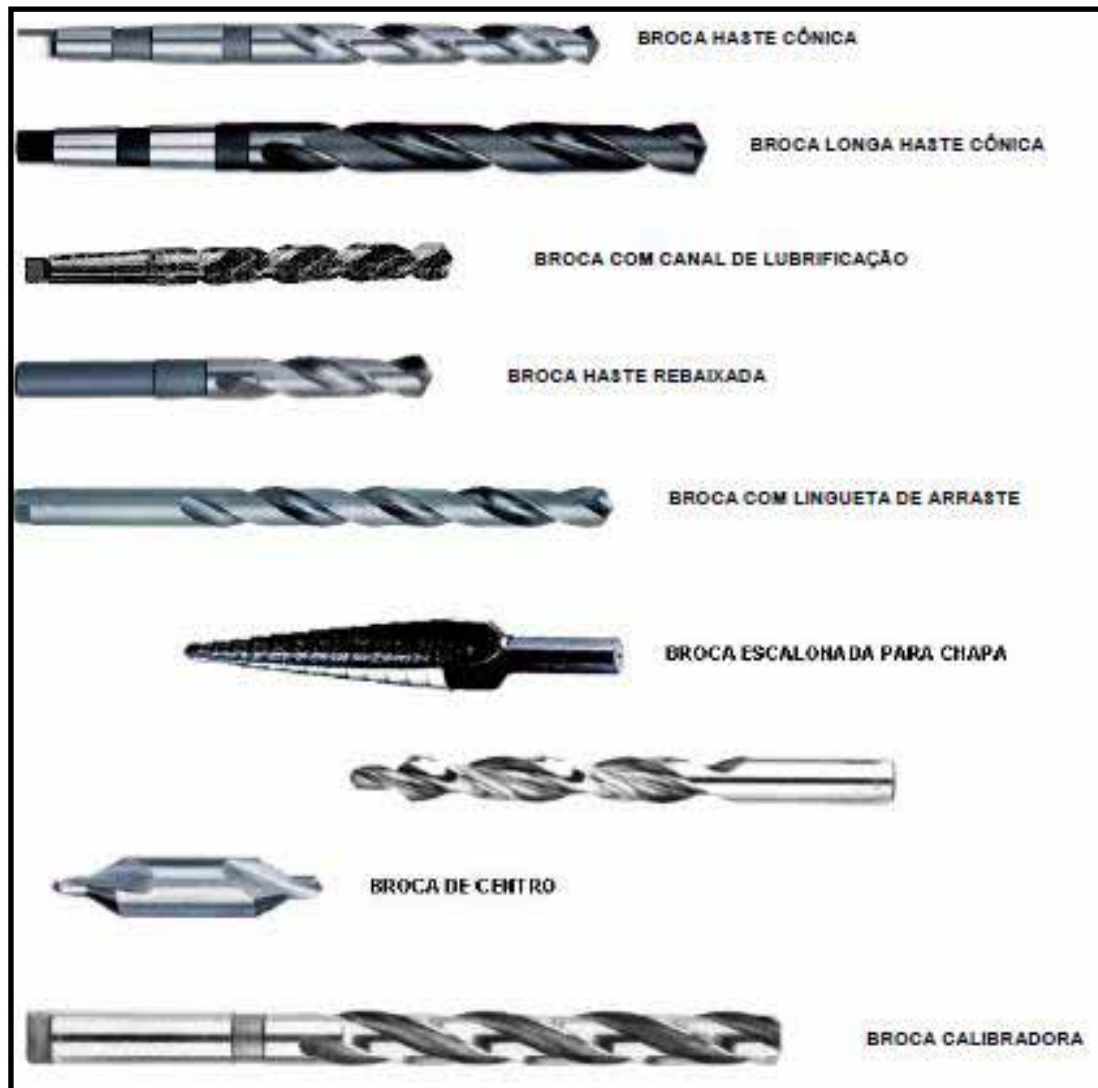
Estes tipos possibilitam muitas outras variações alterando-se hélice em função do material a ser usinado, tipo de haste devido à restrição de fixação da broca, etc.

Figura 3.9 - Tipos variados de brocas helicoidais



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte SKF,2002)

Figura 3.10 - Tipos variados de brocas helicoidais



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte SKF,2002)

As hastes de brocas helicoidais podem ser cônicas ou cilíndricas, o que determina o tipo de mandril existente na máquina disponível.

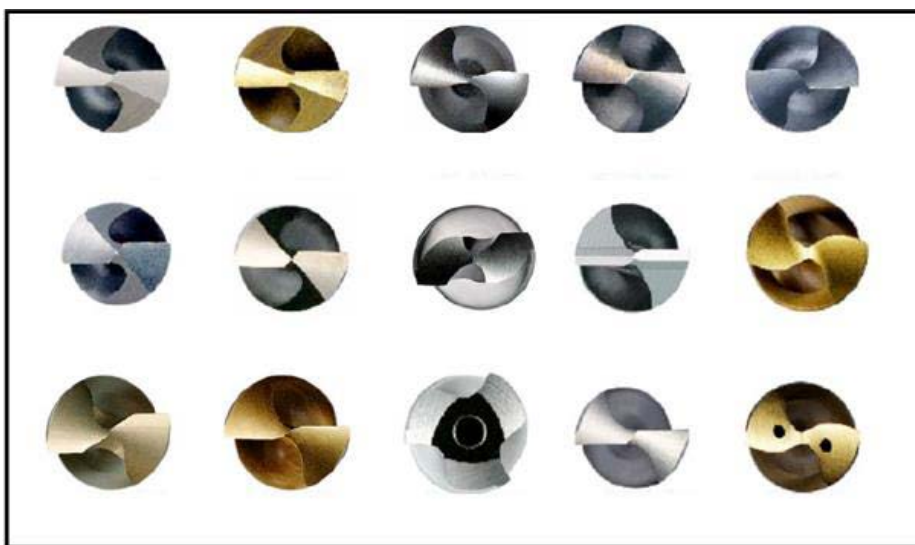
Figura 3.11 - Tipos de hastes de brocas mais comuns.



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte SKF,2002)

Quanto a afiação da ponta, são determinadas pelo material que será usinado. Estas afiações são importantes para a remoção correta do material e geração de cavaco e são determinantes para que a broca obtenha o melhor desempenho, aliado aos parâmetros de corte empregados, conforme Figura 3.12.

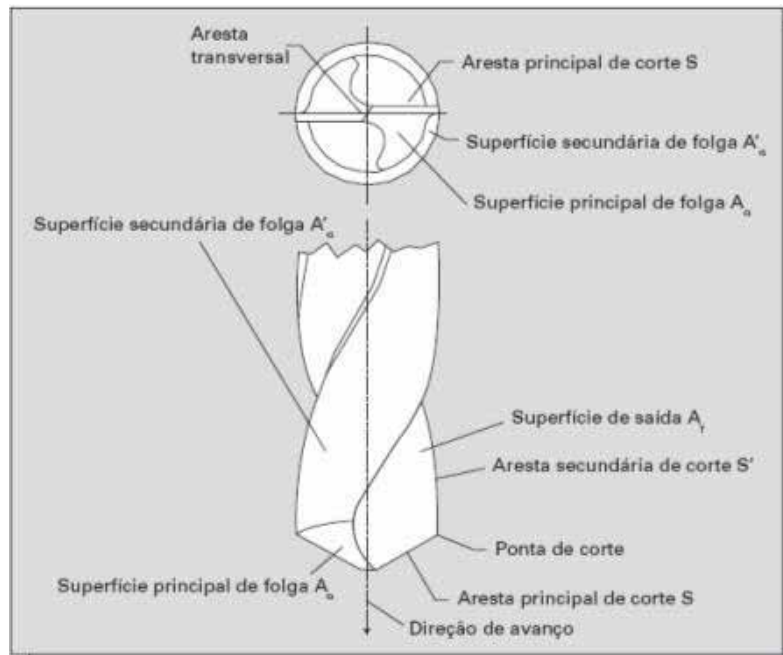
Figura 3.12 - Tipos de afiação de topo de broca



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte SKF,2002)

Na abordagem da geometria de uma broca, independentemente de sua forma, possui geometria definida e identificada por nomenclaturas distintas que, de acordo com as variações desta, direcionam para determinados materiais e parâmetros de corte. As mais comumente citadas e utilizadas são conforme Figura 3.13.

Figura 3.13 - Elementos da cunha de corte de uma broca helicoidal



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte SKF, 2002)

- *Aresta transversal*: aresta de primeiro contato com a peça e que sofre os primeiros esforços cortantes;
- *Aresta principal de corte (S)*: é aquela que efetivamente será a geradora de cavaco;
- *Aresta secundária de corte (S')* : serve como guia da broca no momento da execução do furo;
- *Superfície principal de folga (A_s)*: é aquela que define a cunha cortante sendo responsável pela robustez da aresta principal de corte;

- *Superfície secundária de folga ($A'\alpha$):* é aquela que define o deslizamento periférico em contato com a superfície do furo;
- *Superfície de saída:* é o canal por onde percorre o cavaco;
- *Ponta de corte:* é a interseção da aresta principal de corte com a aresta secundária de corte.

3.10 DESGASTES E AVARIAS EM BROCAS

Este tipo de ferramenta, apesar da resistência própria que lhe é peculiar, não foge das diversas possibilidades de avarias no decorrer do processo produtivo de execução de furos. As avarias mais comuns e que devem ser observadas a fim de evitar furos com geometrias irregulares ou rugosidades acima do objetivo final, são as apresentadas a seguir.

- Aresta Postiça

Figura 3.14 - Broca com aresta postiça



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte Embraer, 2006)

- Quebra dos cantos

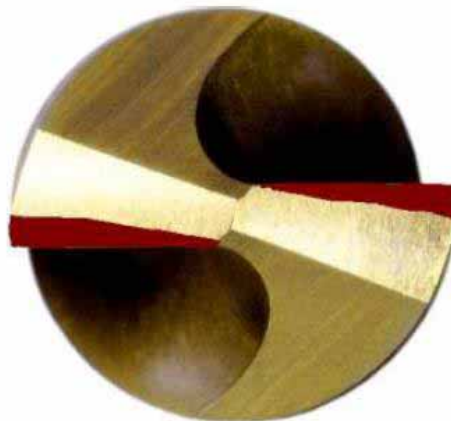
Figura 3.15 - Broca com quebra de canto



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte Embraer,2006)

- Desgaste da superfície de folga

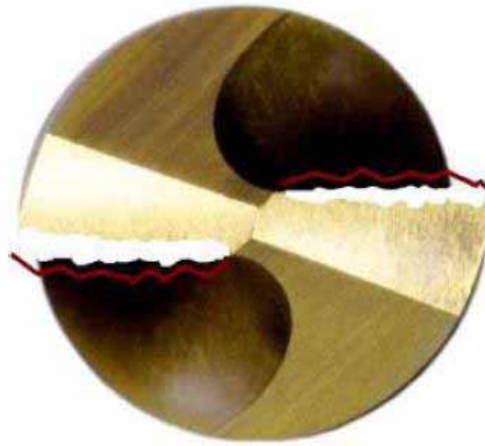
Figura 3.16 - Broca com desgaste na superfície de folga



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte Embraer,2006)

- Lascas na aresta principal

Figura 3.17 - Broca com lascamentos na aresta principal



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte Embraer,2006)

- Desgaste da superfície cilíndrica

Figura 3.18 - Broca com desgaste na superfície cilíndrica



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte Embraer,2006)

- Riscos sobre a superfície cilíndrica

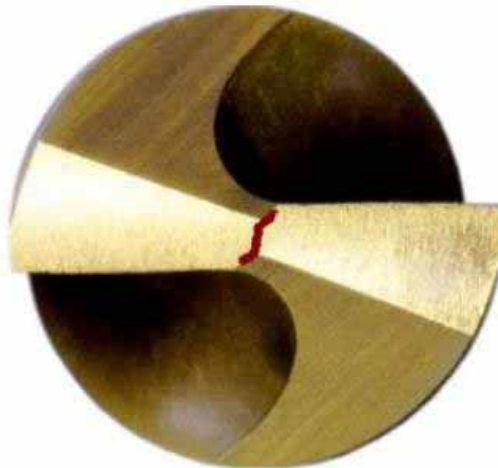
Figura 3.19 - Broca com riscos na superfície cilíndrica



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte Embraer,2006)

- Desgaste na aresta transversal

Figura 3.20 - Broca com desgaste na aresta transversal



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte Embraer,2006)

- Lascamento na junção aresta principal e aresta transversal

Figura 3.21 - Broca com lascamento na junção da aresta principal e transversal



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte Embraer,2006)

- Deformação plástica dos cantos

Figura 3.22 - Broca com deformação plástica dos cantos



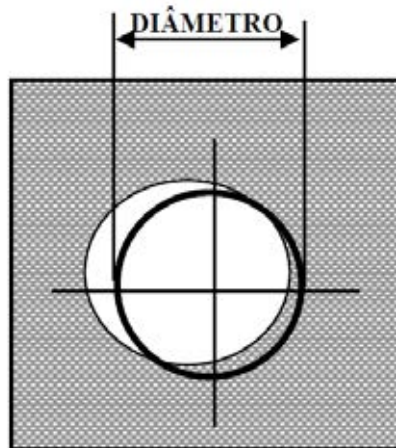
Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte Embraer,2006)

3.10.1 Consequências oriundas das avarias

Ao se trabalhar no processo de furação com ferramenta incorreta, em más condições ou avariada, as consequências podem ser drásticas no resultado final, podendo afetar, não só a tolerância exigida para o furo como também a qualidade deste. Portanto, representa-se na sequência, os possíveis efeitos de uma broca em condições adversas.

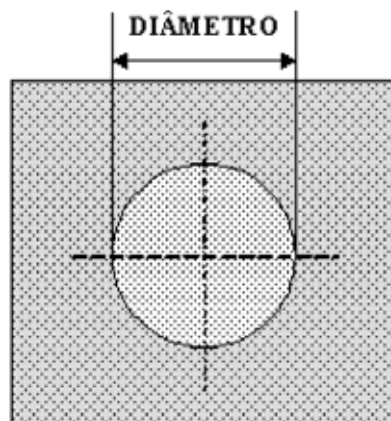
- furo deslocado

Figura 3.23 - furo deslocado em relação ao centro



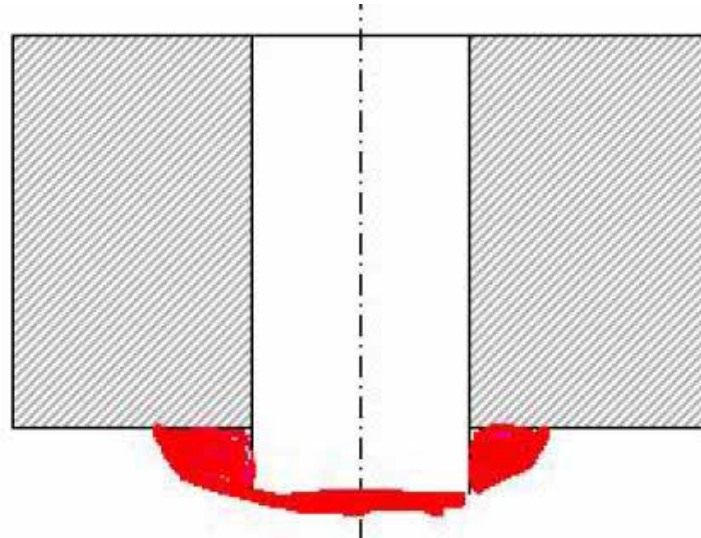
- diâmetro acima do especificado

Figura 3.24 - furo com diâmetro acima do especificado



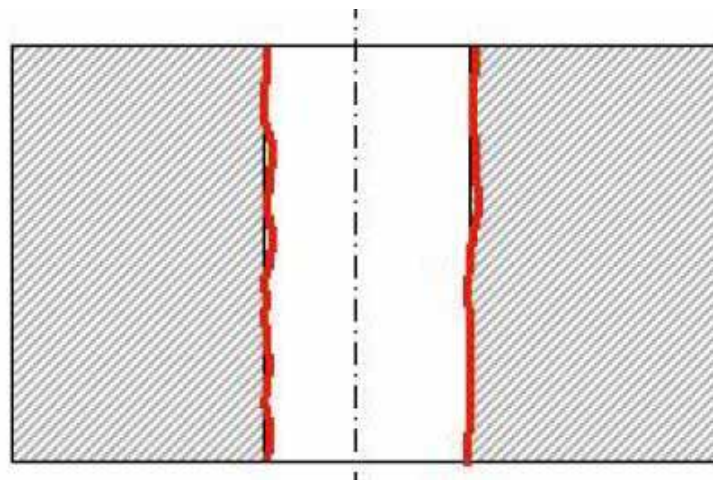
- rebarba na saída do furo

Figura 3.25 - Furo com rebarbas na saída



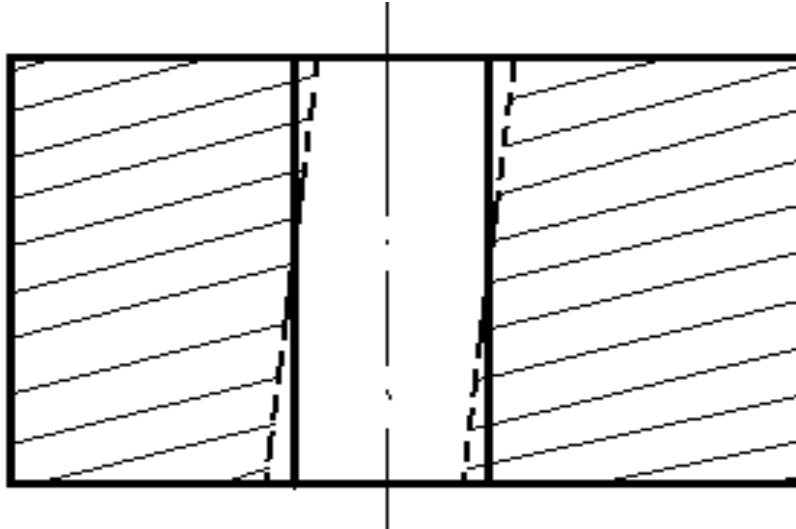
- mau acabamento do furo

Figura 3.26- Furo com mau acabamento



- furo desalinhado

Figura 3.27 - Furo desalinhado



3.11 REFRIGERAÇÃO

É inegável que, hoje em dia, tem-se operações de usinagem onde abstêm-se do fluido refrigerante, muito em função da qualidade de fabricação da ferramenta aliada à sua estrutura, isto é, seu material conjugado ao material que será devidamente usinado. No entanto, a eliminação deste pode ocasionar aumento excessivo de temperatura no conjunto peça-ferramenta, conseqüente queda no rendimento da ferramenta, comprometimento da qualidade final da peça tanto no aspecto dimensional quanto no geométrico e acúmulo de cavacos, provocando soldagem na ferramenta, causando forças extras na máquina. Ocorre que, em condições normais de utilização, é essencial o uso de fluido de corte, pois este atua para refrigerar quando a usinagem acontece em altas velocidades e age como lubrificante quando em baixas velocidades de corte.

As várias teorias de como agem os fluidos de corte originaram em 1894, quando Frederick Winslow observou que, aplicando grande quantidade de água na região de corte, era possível aumentar a velocidade de corte em 33%, sem prejuízo para a vida da ferramenta (Ruffino, 1977 - citado por Alisson, Abraão, Coelho e Silva, 2011). Desde então, a evolução deste quesito na usinagem de materiais é fator preponderante e decisivo na busca por qualidade de resultado e vida útil da ferramenta. Isto porque, sem qualquer tipo de refrigeração, grandes empresas atentaram para o fato que máquinas paradas estavam

ocorrendo com frequência devido à necessidade de troca da ferramenta e o custo direcionado era da ordem de 2 a 17% do valor final da peça.

Grandes são os avanços tecnológicos na excelência dos fluidos de corte, com a adição de aditivos, diferenciando-os de forma contundente, estabelecendo diferenças em suas composições e proporcionando especificidade conforme o material a ser usinado. Inclusive, além da busca por melhores fluidos com características mais avançadas nas funções de refrigerante e lubrificante, é fato que o aspecto do meio ambiente também é considerado, pois a cada dia as exigências no cuidar das pessoas e meio são intensamente cobrados.

Por tudo isso, pode-se identificar como principais funções de um fluido de corte:

- refrigeração para altas velocidades de corte;
- lubrificação para baixas velocidades de corte;
- facilitar a remoção dos cavacos na região do corte;
- proteger o conjunto máquina-ferramenta e peça contra a oxidação.

Para abster-se de refrigeração, apesar da busca constante da Engenharia, não é comum usinagem sem fluido pois, para isso, é necessária a combinação de processos de usinagem , material e ferramenta de corte . Estes princípios indicam que ainda não dispomos, hoje, de uma combinação de processos de usinagem que atenda a todos os seus requisitos para operar sem fluido solúvel. Mais complicada ainda se torna quando há usinagem severa, com altas velocidades de corte, materiais duros, etc., onde a refrigeração é essencial para o bom resultado final objetivado e em materiais como aço e alumínio, onde a presença do fluido de corte solúvel exerce papel importante. O que existe de fato, com usos constantes nas empresas é a utilização racionada do fluido refrigerante num processo chamado MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação)

3.11.1 Tipos de fluidos de corte

São muitas as maneiras de classificar os fluidos de corte, não havendo, em princípio, um padrão que os defina. A forma mais simples de diferenciá-los é através da condição de aplicação, ou seja, sólido, líquido ou gasoso. A condição gasosa mais comum é o ar comprimido que, na verdade, só possui a funcionalidade de expulsão dos cavacos na região de corte pois não é eficaz na refrigeração ou lubrificação.

Os primeiros lubrificantes empregados na usinagem de metais foram os óleos vegetais e os animais. No entanto, a utilização destes não foi à frente, primeiramente pelo alto valor agregado e depois pela facilidade em deteriorar-se com relativa rapidez. Porém, ainda hoje, tanto os óleos vegetais quanto os animais são empregados na mistura com óleos minerais na função de aditivos e agem na melhoria das propriedades lubrificantes.

A partir do refinamento do petróleo, obtêm-se os hidrocarbonetos ou óleos minerais que apresentam-se de forma pura ou com aditivos e possuem propriedades que dependem especificamente da estrutura molecular e do refino dos elementos. Apesar disto, devido ao alto custo de aquisição e relativo baixo ponto de fulgor, o que traduz-se em risco de incêndio, há perda de mercado para aqueles emulsionáveis.

Conforme orientação da Shell, os óleos de corte podem ser:

- Base naftênica: através do refinamento do petróleo totalmente cru naftênico. Não é muito utilizado nos fluidos de corte em função dos problemas que pode causar à saúde;

- Base parafínica: da mesma forma, derivam do refinamento do petróleo totalmente cru parafínico e apresentam alto teor de parafina com grande vantagem no quesito lubrificação. Por ter facilidade de localização e abundância, o custo é relativamente mais acessível em relação ao naftênico. Além das vantagens citadas, ainda apresentam ótima resistência à oxidação e alto índice de viscosidade (IV);

- Base aromática: apesar de apresentar a vantagem de melhorar a resistência ao desgaste e propriedades EP, não são empregados na obtenção de fluidos de corte devido à oxidação excessiva que causam.

Os sólidos mais comumente utilizados são a grafita ou o bissulfeto de molibdênio, que são utilizados ao aplicá-los na superfície de corte e saída da ferramenta, objetivando a redução do atrito entre cavaco gerado e sulco da ferramenta. Não é um método eficiente pela necessidade contínua de interrupção da operação de usinagem para aplicação de qualquer deles. Assim, restam os fluidos líquidos que são, sem dúvida, com uso em quase 100% das operações de remoção de cavacos. Estes, por sua vez, possuem uma classificação conforme determinada categoria, que são: emulsões, soluções e óleos.

As emulsões são compostos basicamente de duas fases e perfazem os emulsionáveis e os semi-sintéticos.

Os emulsionáveis são aqueles óleos minerais misturados a água, em proporções 1:10 até 1:100, mais emulsificantes para redução da tensão superficial, ao formar uma película monomolecular na interface dos componentes, no caso o óleo mineral e a água, tornando-se compostos estáveis pelo desenvolvimento de uma camada elétrica entre os elementos. A água, por si só, é um componente que causa corrosão por sua própria característica, que é reprimida com a adição de anticorrosivos tais como nitrito de sódio e também biocidas, que tem a função de inibir os fungos e bactérias. Há outros componentes como a gordura e óleos animal e vegetal que funcionam para melhorar a lubrificação.

Os semi-sintéticos são fluidos que também formam emulsões e se apresentam com 5% a 50% de óleo mineral na concentração, com aditivos e compostos e, juntos, se dissolvem na água formando moléculas individuais. Aditivos acrescentados à mistura, anticorrosivos e umectantes, elevam a qualidade do fluido de corte, da mesma forma que uma menor quantidade de óleo mineral e a adição de biocidas aumentam a vida do fluido com sensível redução à saúde.

Quando se tem compostos monofásicos de óleos e estes se dissolvem na água, vamos ao encontro das soluções, sem qualquer necessidade de adição de agentes emulsificantes, isentando-se de óleos minerais na mistura, comumente chamado de fluido sintético. Sua consistência baseia-se em sais orgânicos e inorgânicos, biocidas e inibidores de corrosão, dentre muitos outros, sempre misturados à água. Sua resistência é maior pois consegue inibir as bactérias e aumenta sua vida de uso.

3.11.2 Formas de aplicação dos fluidos de corte

O modo como o fluido de corte é aplicado no conjunto máquina-ferramenta-peça é extremamente importante, pois poderá ser um facilitador ou um gerador de problemas, desde um mau acabamento até uma possível falha da ferramenta. O fluido pode ser aplicado sob muitas direções, isto é, diretamente na face da peça, diretamente na ferramenta de corte, ou em ambos. Os métodos de aplicação se resumem em três, quais sejam, jorro de baixa pressão, jorro de alta pressão e a atomização ou comumente chamado de MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação).

O primeiro sistema é o mais usado devido a sua simplicidade, onde o fluido de corte, através de uma bomba simples, é direcionado ao conjunto máquina-ferramenta-material conforme decisão do operador. Neste, há um consumo normal de fluido.

Figura 3.28 - Refrigeração à baixa pressão.



Já no sistema de alta pressão exige-se, primeiramente, um reservatório com capacidade elevada de fluido, além de bomba específica de múltiplos estágios e também um isolamento ou encapsulamento do conjunto. Neste, a refrigeração do conjunto é mais eficaz, porém o consumo de fluido é muito maior.

3.11.3 Sistema MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação)

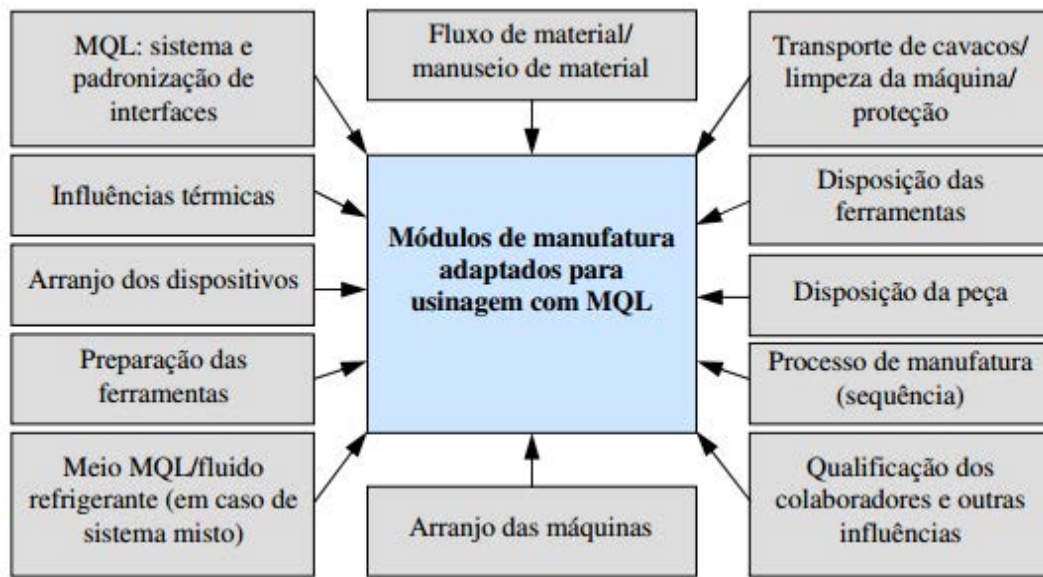
O terceiro método, chamado de MQL, é o resultado da busca da redução do consumo de fluido de corte, não só economicamente, mas também pelo foco no meio ambiente. Este método é uma opção para a usinagem sem refrigeração, onde uma mínima quantidade de fluido é direcionada por um jato de ar ao conjunto máquina-ferramenta-material.

Na realidade, o surgimento, dentre muitos fatores, preponderou pela necessidade de controle ambiental e na busca das normas de preservação de meio ambiente, mais precisamente a ISO 14000. Aliado a esta preocupação, intrinsecamente entende-se também que o foco volta-se à proteção à saúde do operador. Vislumbra-se, nesta visão, a usinagem com utilização de fluidos de corte ou mesmo a seco e a técnica da mínima quantidade de fluido, que combina as funcionalidades de refrigeração com um baixo consumo de lubrificante (Silva, Bianchi, Fusse, Catai, 2007).

No entanto, a variação periódica da temperatura pode causar expansão e contração das ferramentas, levando à formação de trincas térmicas. O uso do fluido aumenta a variação térmica e, portanto, aumenta a probabilidade de ocorrência desses tipos de trincas, as quais podem provocar o lascamento do gume da ferramenta (Liao, Lin, 2007).

Com abordagem referenciando ao processo de furação, a redução da utilização de fluidos de corte pode ser crítica devido a algumas características próprias da furação, ou seja, há uma redução da velocidade efetiva de corte em direção ao centro da broca, atingindo o valor da velocidade de avanço no eixo da ferramenta, dificultando o fluxo contínuo de saída do cavaco para fora do furo; aumento do calor na região de corte e consequente aumento de desgaste na aresta principal de corte, principalmente no canto vivo. Devido a todos estes fatores, é considerado um dos mais difíceis processos de remoção de cavaco pois, geralmente, exige-se furos com perfeita perpendicularidade, excelente rugosidade e tolerâncias.

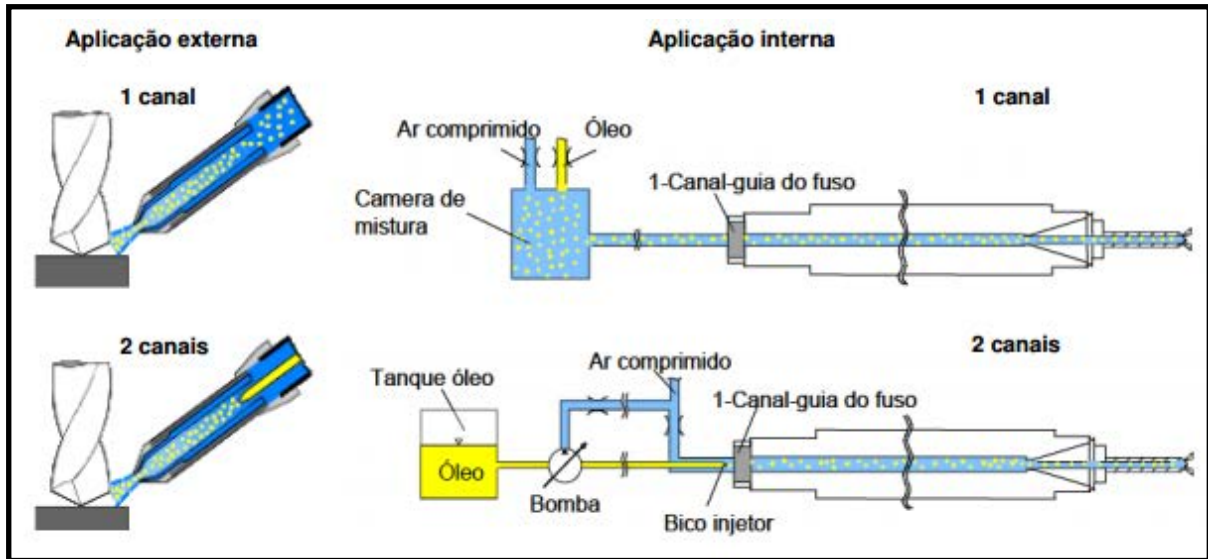
Para a aplicação da técnica de MQL, é essencial que todos os fatores que influenciam o processo de furação estejam criteriosamente controlados. A adoção desta técnica exige uma criteriosa análise e adequação de todos os fatores influentes no processo, como mostra a Figura 3.32.

Figura 3.29 - Fatores de influência nos processos de manufatura com MQL

Existem três tipos principais de sistemas MQL. No primeiro tipo estão os sistemas de atomização de baixa pressão, em que o refrigerante é aspirado por uma corrente de ar e levado à superfície ativa como uma mistura. Esses sistemas apresentam volume de refrigeração de 0,5 a 10 litros por hora. De modo intermediário, há o sistema que utiliza bombas dosadoras pulsando quantidade definida de fluido diretamente na superfície, mas sem uso de ar comprimido. A alimentação é dada por volta de 0,1 e 1 ml por ciclo com até 260 ciclos por minuto, caracterizando-se pela melhor utilização em processos de usinagem intermitentes. Finalmente, o último e mais usado sistema MQL é definido pela pressão, onde o fluido é bombeado para a superfície através de um tubo com alimentação separada. Neste ponto, é misturado com o ar comprimido fornecido individualmente, de modo que as quantidades de ar e de fluido tem ajustes independentes, facilitando e regulando um menor consumo de materiais na ordem de 10 a 100 ml/h.

Os sistemas de MQL são fornecidos comercialmente de duas formas: pela injeção do lubrificante externamente, por meio de jatos separados; internamente, via orifícios da própria ferramenta, tendo este, variação pela quantidade do número de canais da ferramenta. Em canal único, a mistura é formada externamente ao fuso e o canal funciona como rota de alimentação da mistura. Para canais duplos, óleo e ar são alimentados separadamente e a mistura é feita no interior do fuso, conforme Figura 3.30.

Figura 3.30 - Grupos de sistemas MQL



Fonte: Adaptado de (LÓPEZ de LACALLE,2006)

No sistema externo, a vantagem converge para a utilização em máquinas já existentes, reduzindo custos. Especificamente para furação, nosso foco de testes, o abastecimento externo é apropriado pois é prudente que a relação de comprimento/diâmetro (l/d) seja menor ou igual a 3 pois, caso seja maior que a citada, a ferramenta obrigatoriamente será recuada diversas vezes para que obtenha lubrificação adequada, onerando os resultados relacionados a ciclo. A desvantagem se torna presente quando se tem comprimentos e diâmetros variados, devido à necessidade de adequação do posicionamento dos bicos.

Para resolver este problema com ferramentas de relação l/d maiores que 3, a forma interna é recomendada, pois o fluido chegará a superfície através dos canais, independentemente da posição da ferramenta.

3.12 PARÂMETROS DE CORTE

São as grandezas diretamente ligadas à operação de furação, sendo estas determinantes para o sucesso do processo em questão, uma vez que, caso sejam definidas diferentes das ideais, resultados serão gerados, mas com deficiência. Assim, pode definir as grandezas da seguinte maneira:

- **Velocidade de corte (V_c)**

Esta grandeza, primordialmente, refere-se ao diâmetro da broca. É definida como a velocidade tangencial imediata resultante da rotação da ferramenta para a furação, onde há ocorrência simultânea dos movimentos de corte e avanço. A velocidade de corte de uma broca é determinada pela seguinte fórmula, conforme 3.12:

$$V_c = \pi \cdot d \cdot n / 1000 \quad (3.12)$$

Onde:

V_c = Velocidade de corte (m / min);

π = constante = 3,1416;

d = diâmetro da broca (mm);

n = rotações por minuto.

A velocidade de corte, em função dos diversos testes laboratoriais feitos em centros de pesquisas, já é estipulada e recomendada segundo determinado material a ser usinado, tipo e material da ferramenta.

- **Rotação (n)**

É a velocidade angular da ferramenta, isto é, o número de revoluções da ferramenta em dado tempo, normalmente em RPM. Este valor é definido em função da velocidade de corte recomendada para o material (ferramenta e Peça) e do diâmetro da ferramenta, conforme 3.13.

$$n = V_c \times 1000 / \pi \times d \quad (3.13)$$

- **Avanço por dente (fz)**

É o valor do avanço de um dente da ferramenta em uma rotação, dividido pelo número de dentes da ferramenta.

- **Avanço por rotação (fn)**

É o avanço da ferramenta em uma rotação.

- **Avanço total (Vf)**

É o produto do avanço por dente, do número de dentes e da rotação por minuto, ou seja, é a velocidade com que a ferramenta se movimenta contra o produto, conforme 3.14.

$$V_f = f_z \cdot n \cdot z \quad (3.14)$$

Onde:

V_f = avanço total (mm / min);

f_z = avanço por dente (mm / dente);

n = rotação (RPM)

z = número de dentes.

Quanto ao sentido de corte, é aquele chamado de horário quando a ferramenta gira em torno de seu eixo no sentido do relógio e anti-horário quando contrário ao sentido do relógio. Esta definição, apesar de muito singela, é bastante importante, pois, conjugado com a característica do sentido da hélice da ferramenta, tende o cavaco a *escorregar* pelos canais com direção e sentido favorável ao corte, sendo bastante prejudicial aos resultados ou a *escalar* pelos canais com direção e sentido contrários ao corte, tornando-se bastante promissor aos resultados. Resumidamente, é preponderante definir que para furos cegos os cavacos obrigatoriamente devem escalar por entre os canais, a fim de evitar seu contato com a aresta

de corte da ferramenta. Portanto, se a broca apresentar corte sentido direito (sentido horário) as hélices ou canais também devem ter sentido horário, conforme Figura 3.34.

Figura 3.31 - Sentido da hélice de uma broca helicoidal



Fonte: Adaptado de (Manual de Ferramentas de Corte Embraer, 2006)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

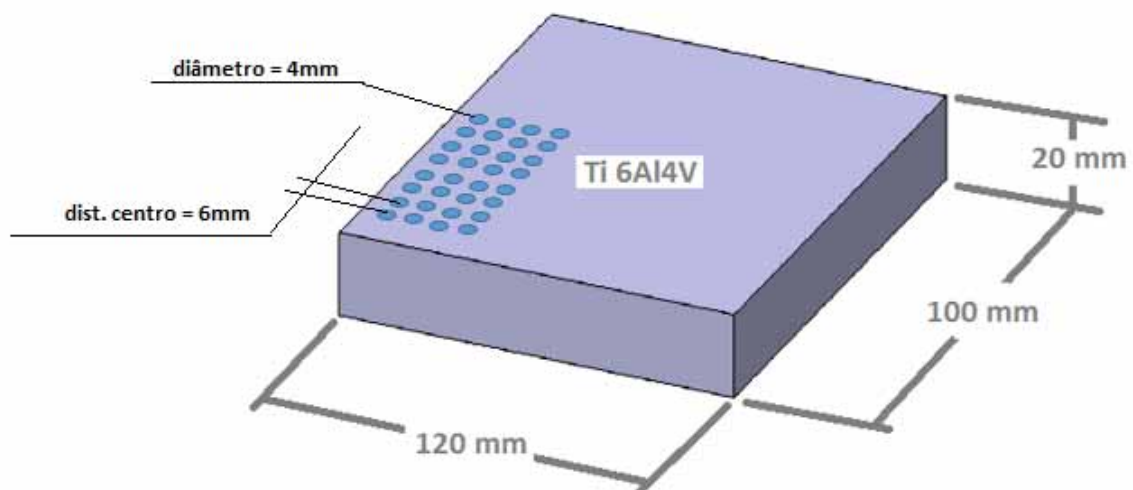
Serão apresentados todos os materiais, máquinas, equipamentos, ferramentas e técnicas para realização dos testes e medição dos furos. Também será abordado o método empregado para elaboração dos trabalhos, coleta e análise dos dados.

4.1 MATERIAL UTILIZADO

Neste trabalho foram utilizadas placas de Titânio 6Al4V fornecidas pela empresa de usinagem denominada Globo Usinagem com dureza média de 66 HRc.

Os corpos de prova foram fresados nas superfícies de execução dos furos e esquadrejados em medidas tais para fixação na morsa, resultando em corpos de prova conforme Figura 4.1.

Figura 4.1 – Corpo de Prova de Titânio 6Al4V



4.2 MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS

Todos as máquinas e equipamentos utilizados nos diversos ensaios foram possíveis através dos laboratórios da Unesp, fato este que facilitou enormemente a coleta de dados. Assim, é relatado o universo de recursos que propiciou a obtenção de dados confiáveis na elaboração deste trabalho.

4.2.1. Fresadora 5 eixos DECKEL MAHO – DMU 50 ECO

Para a obtenção das geometrias pretendidas, utilizou-se de um centro de usinagem de 3+2 eixos opcionais, conforme Figura 4.2. As dimensões e características do centro de usinagem são:

- Dimensões (comp x larg x alt) 2206 x 2829 x 2426 mm
- Dimensão da mesa 630 x 500 mm
- Potência do equipamento 18 kW
- Capacidade do armazém de ferramentas 16 ferramentas
- Velocidade de rotação 8000 RPM
- Velocidade de avanço 12 m/min
- Peso máximo na mesa 200 Kg

Figura 4.2 - Fresadora DECKEL MAHO – DMU 50 ECO



4.2.2 Microscópio OPTON – ZEISS – STEMI 2000

Na medição do desgaste das ferramentas e dos cavacos, utilizou-se o Microscópio OPTON – ZEISS – STEMI 2000, conforme Figura 4.3, com as principais características:

- Dimensões (largura x profundidade x altura) = 65 x 336 x 371 mm;
- Peso = 4.53 kg;
- Temperatura de trabalho = +15 a +35°C.

Figura 4.3 - Microscópio OPTON – ZEISS – STEMI 2000



4.2.3 Jogo de pinos padrão LANGENMESSTECHNIK - TGL 13820/I, 4 - 5/ 0,01.

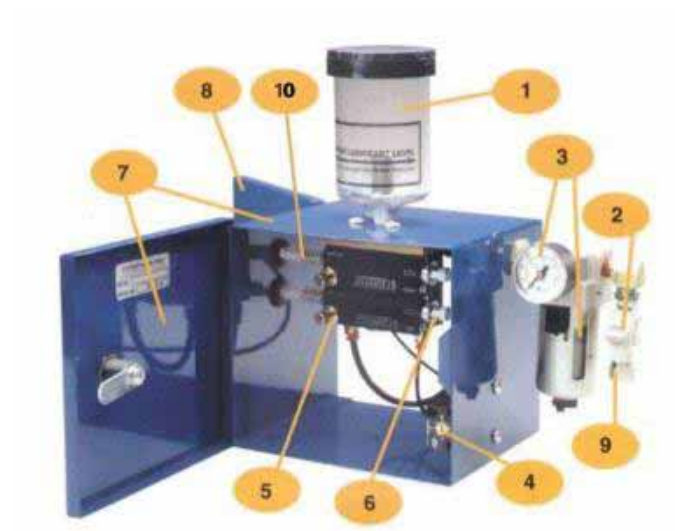
Na medição dos furos, decidiu-se pela utilização de pinos padrão com precisão centesimal em detrimento do projetor de perfil pelo simples motivo dos furos todos estarem cegos.

Figura 4.4 - Jogo de pinos padrão 4-5mm



4.2.4 Dispositivo de MQL

Figura 4.5 – Esquema do reservatório hidráulico de MQL



Fonte: (ITW Chemical Products Ltda).

1. Reservatório 300 ml
2. Registro de acionamento
3. Manômetro e filtro de ar
4. Gerador de frequência (sentido horário aumenta frequência)
5. Bomba pneumática de ajuste individual
6. Ajuste do fluxo de lubrificante
7. Caixa metálica
8. Furos de montagem ou bases magnéticas para fixação rápida
9. Entrada de ar
10. Saída para o bocal aplicador

As condições de uso do equipamento na execução dos testes foram de vazão 5 ml/h e pressão 4 Bar.

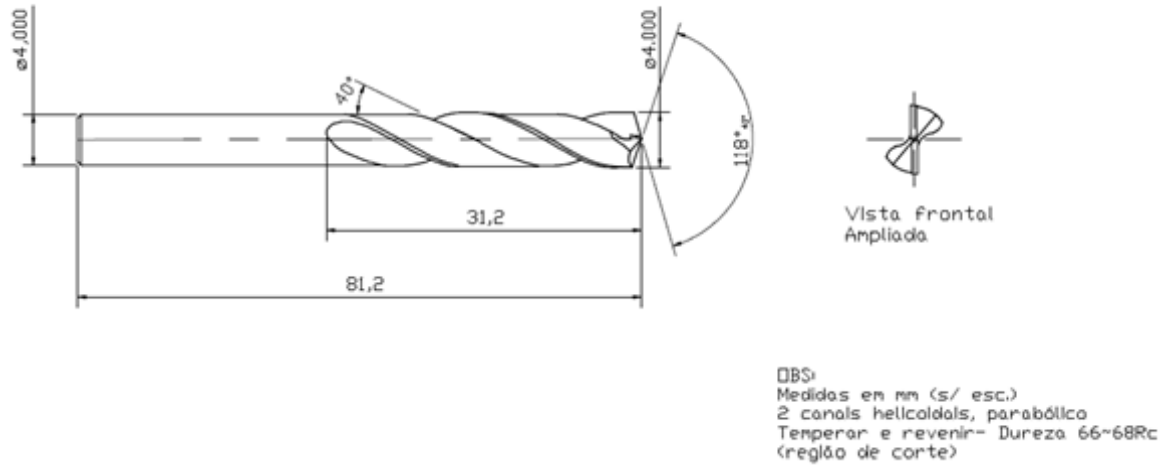
4.3 FERRAMENTAS E FLUIDOS DE CORTE

Na execução dos testes, basicamente definiu-se pelo uso de brocas de metal duro e aço rápido sinterizado e fluidos de corte que serão expostos a seguir.

4.3.1 Broca de aço rápido sinterizado

A empresa OSG ferramentas forneceu brocas chamadas HSS sinterizada modelo PM-SC-BDR 4 x 31,2 x 81,2mm – cod. 70601445.

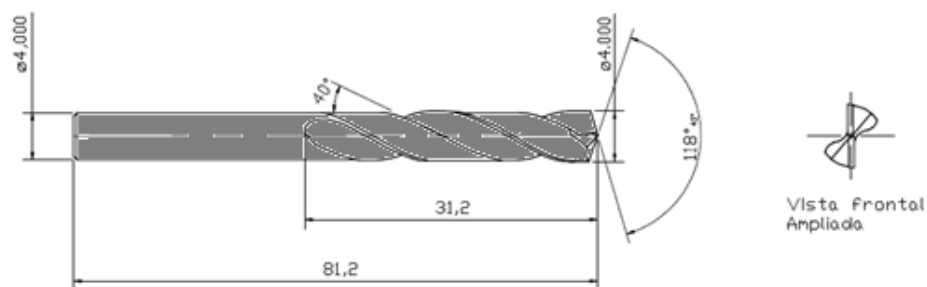
Figura 4.6 – Broca helicoidal em aço rápido sinterizado.



4.3.2 Broca de metal duro

A empresa OSG ferramentas forneceu brocas de metal duro MD-BDR-ES 5DS-227-B, 4 x 31,2 x 81,2mm.

Figura 4.7 – Broca helicoidal em metal duro.



4.3.3 Óleos Refrigerantes

Para elaboração dos testes no processo de refrigeração por Mínima Quantidade de Fluido, foi utilizado o óleo de corte RCOL ACCU-LUBE LB-1100. Na usinagem em abundância, utilizou-se de fluido miscível em água a base de óleo vegetal (isento de cloro). VASCO 1000, BLASER SWISSLUBE do Brasil LTDA, concentração 5 a 15%. Para os testes em questão, a concentração permeou 5%.

4.4 METODOLOGIA

Os ensaios mantiveram um procedimento padrão de usinagem de furos e, a cada etapa, obteve-se o recolhimento da amostra de cavaco conforme demonstrado subsequentemente. Foram divididos em 4 etapas:

- Furação com refrigeração abundante, usinagem cheia, furo cego;
- Furação a seco, com pré-furo Ø 2,5mm, furo cego;
- Furação a seco, sem furo de centro, furo cego;
- Furação com MQL, sem furo de centro, furo cego.

Os parâmetros adotados foram baseados na literatura técnica HandBook e assim definidos conforme Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Parâmetros de Corte para as brocas

PARÂMETROS DE CORTE ADOTADOS CONFORME HANDBOOK		
	<i>broca MD</i>	<i>Broca AR sinterizado</i>
Velocidade de corte (m/min)	28	11
Avanço total (mm/min)	72	29
Rotação (RPM)	2123	876
Profundidade do furo (mm)	8	8

4.4.1 Furação com refrigeração em abundância

Os testes iniciais foram realizados com refrigeração em abundância para ambas as brocas. A cada 320mm (40 furos) de usinagem, interrompeu-se o teste para recolhimento de amostra de cavaco. Este procedimento foi mantido até o total de 2640mm (330 furos) quando cessou esta etapa mesmo com possibilidade de continuidade. Os resultados são mostrados e comentados posteriormente.

4.4.2 Furação à seco, com pré-furo dia. Ø 2,5mm

Sequencialmente, os testes foram mais radicais, com total ausência de refrigeração ou seja, a seco mas com pré-furos Ø 2,5mm. Nestas condições, a cada 200mm a broca sofreu medições de desgaste nas arestas principais e secundárias de corte e folga e também o recolhimento de amostra de cavaco a cada interrupção do processo, perfazendo 1072mm (134 furos) quando se rompeu. Igualmente o procedimento foi idêntico para a broca de metal duro, sendo que esta atingiu 1360mm (170 furos) não havendo o rompimento da ferramenta de corte.

4.4.3 Furação à seco, sem pré-furo

Considerada a condição mais arrojada para ambas as ferramentas, submeteu-se ambas na condição de usinagem em profundidade 18mm com 2 incrementos (pica-pau). A cada 504mm (28 furos) o processo de furação era interrompido parcialmente para recolhimento de amostra de cavaco e análise de desgaste da broca em todas as superfícies. Isto ocorreu até 2016mm (252 furos), quando houve a quebra da ferramenta de metal duro. A broca de aço rápido sinterizado quebrou com 24mm.

4.4.4 Furação com MQL, sem pré-furo

A condição imposta para este tipo de refrigeração foi a submissão de ambas as brocas em furação parcial de 187,5mm em profundidade de 7,5mm e, após, procedeu-se com o recolhimento de amostra de cavaco e medição de desgaste. Na broca de aço rápido sinterizado e de metal duro, foram totalizados 1125mm (150 furos) quando houve a interrupção do processo sem rompimento das ferramentas.

4.5 FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)

Segundo Romeiro Filho(2011), o FMEA ou Análise do Modo e Efeito de Falha é um processo analítico para identificar e documentar de forma sistemática falhas em potencial, de modo a eliminá-las ou reduzir sua ocorrência, por meio de um processo de aplicação estruturado.

Segundo Lighter e Fair(2004), FMEA envolve estudo de processo, já existente ou proposto, para determinar onde a falha poderá ocorrer e quais efeitos a falha causará no processo.

Esta técnica de detecção de falha foi desenvolvida, inicialmente, pela NASA em 1960, com o intuito de obter uma maior confiabilidade no segmento aeroespacial. Esta, por sua vez, foi introduzida em outros segmentos da indústria, mais precisamente na aeronáutica e

automobilística, sendo a precursora deste último citado, a Ford, que identificou sua necessidade de obtenção das causas e efeitos das possíveis falhas em seus processos de fabricação e montagem, a fim de prevenir futuros problemas potenciais.

Para a realização deste modo de analisar e buscar as possíveis falhas, causas e efeitos gerados por um processo é preciso entender as etapas necessárias a uma boa verificação, quais sejam:

- escolher um processo que realmente possui risco;
- montar um grupo familiar com o processo a ser analisado;
- identificar o fluxo de processo corrente; se o processo for novo, seguir conforme próximo item;
- definir um fluxo de processo que seria o ideal;
- avaliar o fluxo de processo para determinar a localização, tipo e severidade do modo de falha e às potenciais falhas que poderão ocorrer em cada etapa do processo;
- para cada modo de falha, calcular o fator de criticidade que ajuda a priorizar o plano de ação para a mudança. A criticidade, também chamada de um número de prioridade de risco, é o produto do ranking de três parâmetros: severidade, ocorrência e detecção. A criticidade de cada modo de falha pode então ser usada para identificar o item de alta prioridade, com o maior *score* recebendo a maior valoração;
- implementar mudanças usando o planejar-fazer-estudar-agir;
- recalcular o fator criticidade para cada modo de falha depois da implantação da melhoria. Cada modo de falha deve ser reavaliado porque a melhoria é em parte uma fase do processo e pode haver melhoria em outras partes ou setores;
- otimizar o processo e fazer as mudanças necessárias ao processo.

A vantagem do FMEA deriva do uso de um sistema de quantificação dos 3 atributos do modo de falha, ou seja, severidade, ocorrência e habilidade do sistema de detectar falha.

4.5.1 Defeito

Em qualquer processo de fabricação, montagem ou outro em questão, há sempre a probabilidade de defeitos. A previsibilidade se torna possível e está intimamente conectada com as condições de operação e, principalmente, com os recursos em uso, isto é, quanto maior a utilização de ótimas máquinas, equipamentos de apoio, etc., menor será a possibilidade de defeitos num determinado processo.

Todo produto apresenta riscos razoáveis, porém não definitivos. Estes são reduzidos ao despendar maior tempo no pensar antes de executar, na razão de 80% x 20%, segundo os japoneses. Os defeitos de manufatura existem quando o produto final vem da linha de produção em condições diferentes daquelas pré-estabelecidas no início do processo. Ao ocorrer qualquer destes, é sinal que não foi aplicado o FMEA ou que a análise não foi a contento no sentido de absorver todas as possíveis causas do processo. Os defeitos, quando ocorridos, podem sugerir um FMEA corretivo, onde as possibilidades de causas são analisadas pós processo. Nesta, prováveis perdas já ocorreram e servem de base para identificação das discrepâncias. De qualquer forma, o processo de análise FMEA, preventivamente ou corretivamente, é iniciado pela captação dos dados iniciais conforme a Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Dados iniciais de um processo de PFMEA

PFMEA (Process Failure Mode and Effect Analysis)			
Programa		PFMEA número	
Nome do Processo		Data da elaboração	
Área/Elaborador		Revisão número	
Área/Aprovador		Data da revisão	
Pessoas envolvidas			

Participante	Área	Participante	Área

Revisão	Data	Comentários	Revisado por

Revisão	Premissas adotadas

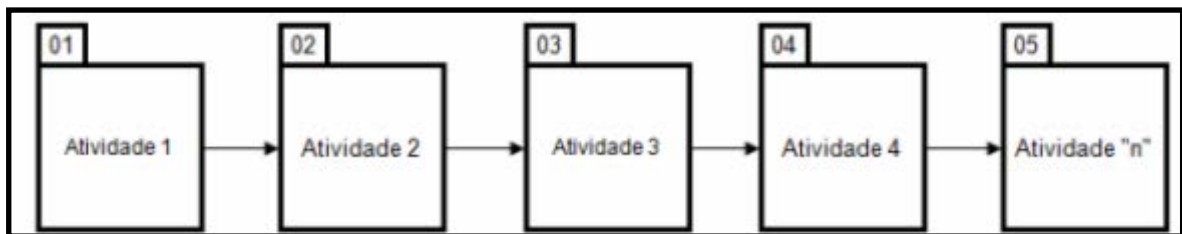
Referente ao Quadro 4.2, para o início de uma análise de processo através do método FMEA, tem-se os seguintes campos:

- Programa: identifica para qual setor da empresa será direcionado o FMEA;
- Nome do Processo: identifica o teste;
- Área Elaborador: local de trabalho do elaborador;
- Área Aprovador: local de trabalho do aprovador;
- FMEA nº: identificação numérica;

- Data Elaboração: data de início e finalização do FMEA;
- Revisão nº: letra de identificação de revisão do FMEA;

Na etapa seguinte, conforme Figura 4.8, é necessário identificar minuciosamente as etapas do processo através de um fluxo contínuo, sendo que cada etapa deste será analisada posteriormente de forma detalhada.

Figura 4.8 - Fluxo de Processo



Posteriormente, é realizada a análise de cada etapa do processo identificada via fluxo, onde preponderantemente são avaliados os seguintes tópicos, conforme Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Análise do fluxo do processo

PFMEA - ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA DE PROCESSO									
NOME DO PROCESSO		Furação 6Al4V com brocas MD x HSS sinterizada		PFMEA Nº		001		PAG.	1
ITEM	FUNÇÃO DO PROCESSO	REQUISITOS	FALHAS POSSÍVEIS			ÍNDICES			
			MODOS DE FALHA	EFEITOS DA FALHA	CAUSAS DA FALHA	S	O	PROBABILIDADE DE DETECÇÃO	RPN
1									

Cada parâmetro tem sua função específica, a fim de mapear todas as possíveis futuras discrepâncias e são pontuadas conforme explicitado abaixo:

Item: número sequencial das atividades do fluxo de processo;

Função do Processo: atividade identificada no "fluxo de processo";

Requisitos: condição que deve existir para ocorrer a atividade de processo;

Modo de Falha: É a forma pela qual um processo específico fracassaria no cumprimento da sua função que atenderia aos seus requisitos;

Efeito da Falha: É a forma como os modos de falha afetam o desempenho das funções requeridas. Deve ser avaliado o impacto sobre os requisitos do cliente. Geralmente, é focado no cliente externo, mas também pode incluir um efeito local ou processo/fluxo subsequente;

Causas da Falha: São os eventos que geram ou motivam o aparecimento dos modos de falha. Para a determinação das causas da falha, sugere-se utilizar o método 6M (medição, mão de obra, máquina, meio-ambiente, método, matéria-prima), brainstorming, etc;

S: Severidade: É o índice que deve refletir o grau de gravidade do EFEITO da falha para o cliente interno e/ou externo. A severidade é classificada em:

A - Alta

M - Média

B - Baixa

O: Ocorrência: É o índice que avalia a frequência com que uma dada causa ocorre e gera um do modo de falha. A ocorrência é classificada em:

R - Repetitiva

M - Moderada

I - Isolada

Probabilidade: Probabilidade de detecção. É o índice que indica a probabilidade de detecção do modo de falha no ponto de controle previsto. Deve-se assumir que a falha ocorreu e, então, avaliar a eficácia dos controles de processo em prevenir a saída de peças com este modo de falha ou defeito.

A Probabilidade de detecção é classificada em:

A - Alta

M - Média

B – Baixa

RPN: Número de Prioridade de Risco: É o produto dos índices de Severidade, Ocorrência e Probabilidade de Detecção e é usado para estabelecer a prioridade de análise para implementação das ações.

Por sua vez, os números que identificam o maior ou menor risco são pontuados conforme Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Número de Prioridade e Risco

Severidade	Nota severidade (S)	Ocorrência	Nota Ocorrência (O)	Probabilidade de Detecção	Nota detecção (D)	NPR S x O x D	Ação
Baixa	1	Isolada	1	Baixo	5	1 até 15	Observar
Média	3	Moderada	3	Médio	3	Acima de 15	Agir
Alta	5	Repetitiva	5	Alto	1		

Onde:

Severidade / Nota de Severidade: é a avaliação da possibilidade do efeito de falha afetar o processo. É classificada como: Alta = 5 ; Média = 3 ; Baixa = 1;

Ocorrência / Nota de Ocorrência: é avaliação quantitativa da possibilidade da causa de falha ocorrer. É classificada como: Repetitiva = 5; Moderada = 3; Isolada = 1;

Probabilidade de Detecção / Nota de Detecção: é a possibilidade de identificação do modo de falha. É classificada como: Baixa = 5 ; Média = 3; Alta = 1;

Para concluir, conforme Quadro 4.5, é possível relacionar as causas aos efeitos através do interfaceamento da *severidade e ocorrência*.

Quadro 4.5 - Critérios de Pontuação

MODOS DE FALHA	EFEITOS DA FALHA	CAUSAS DA FALHA	S	O	Probabilidade de detecção	RPN

4.5.2 Aplicação do Método FMEA

Com relação a este trabalho, os prováveis defeitos do processo de furação que poderão surgir com o método, identificar-se-ão os potenciais problemas e, diante destes, serão tomadas ações de contenção ou eliminação de quaisquer riscos que possam afetá-los. Estes problemas

potenciais são classificados segundo pontuação que, após analisada para cada etapa do processo diante da avaliação das possibilidades, resulta em ações de prevenção que deverão ocorrer protegendo a boa execução dos testes e explicitando os resultados de forma a garantir que todos os fatores estejam contornados antes da verdadeira execução dos testes.

Quadro 4.6 - Aplicação do FMEA

PFMEA - ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA DE PROCESSO										PFMEA - ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA DE PROCESSO									
Furação 6AHV com brocas MD x HSS sinterizada					FMEA N°	PAG.				Furação 6AHV com brocas MD x HSS sinterizada					PAG.				
ITEM	FUNÇÃO DO PROCESSO	REQUISITOS	FALHAS POSSÍVEIS	EFEITOS DA FALHA	CAUSAS DA FALHA	ÍNDICES	PROBABILIDADE DE DETECÇÃO	RPN	AÇÃO CORRETIVA				STATUS		PONTUAÇÃO PÓS AÇÃO TOMADA				
									AÇÃO Nº	AÇÃO	PRAZO	RESPONSÁVEL	ABERTA / FECHADA	S	O	Probabilidade de detecção	RPN		
1	Retirar a proteção plástica das brocas	Proteção totalmente removida	Brocas sem proteção / proteção inadequada	Lâminas quebradas/ sem corte	Falha operacional	A	I	A	5	1	N/C								
2	Posicionar o cdp na máquina	Posicionar conforme necessidade e	Posicionar o cdp mal fixado na mesa da máquina (solto)	Furos ovalizados	Falha operacional	A	I	A	5	2	N/C								
2.1					Grampos deficientes	A	I	A	5	2.1	N/C								
2.2					Parafusos de fixação deficientes	A	I	A	5	2.2	N/C								
2.3				Quebra da ferramenta	Falha operacional	A	I	A	5	2.3	N/C								
2.4					Grampos deficientes	A	I	A	5	2.4	N/C								
2.5					Parafusos de fixação deficientes	A	I	A	5	2.5	N/C								
2.6				Dano ao operador	Falha operacional	A	I	A	5	2.6	N/C								
2.7					Grampos deficientes	A	I	A	5	2.7	N/C								
2.8					Parafusos de fixação deficientes	A	I	A	5	2.8	N/C								
3	Posicionar a broca na máquina	Broca ajustada perfeitamente e no mandril	Posicionar a broca sem apertar / apertar com batimento	Furos ovalizados	Falha operacional	A	M	M	45	3	Startar o conj maq x ferramenta e checar antes de iniciar a furação	asap	Alex	Fechada	A	M	A	15	
3.1					Mandril deficiente	A	I	M	15	3.1	Observar								
3.2				Furos não perpendiculares	Falha operacional	M	I	M	9	3.2	N/C								
3.3					Mandril deficiente	M	I	M	9	3.3	N/C								

4	Ajustar refrigeração	Sistema de refrigeração adequada	Refrigerante inadequado	desgaste prematuro da broca	erro operacional	A	I	B	25	4	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.	asap	Alex	Fechada	A	I	A	5
4.1					identificação errada da embalagem	A	I	B	25	4.1	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.	asap	Alex	Fechada	A	I	A	5
4.2				má qualidade do furo	erro operacional	A	I	B	25	4.2	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.	asap	Alex	Fechada	A	I	A	5

4.3					identificação errada da embalagem	A	I	B	25	4.3	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.	asap	Alex	Fechada	A	I	A	5
4.4				mau acabamento final	erro operacional	A	I	B	25	4.4	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.	asap	Alex	Fechada	A	I	A	5
4.5					identificação errada da embalagem	A	I	B	25	4.5	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.	asap	Alex	Fechada	A	I	A	5
4.6			Pouco refrigerante	desgaste prematuro da broca	erro operacional	M	I	A	3	4.6	N/C							
4.7					sistema de refrigeração	M	I	A	3	4.7	N/C							

4.8				super-aquecimento da broca	erro operacional	A	I	A	5	4.8	N/C							
4.9					sistema de refrigeração desregulado.	A	I	A	5	4.9	N/C							
4.10				mau acabamento final	erro operacional	A	I	A	5	4.10	N/C							
4.11					sistema de refrigeração desregulado.	A	I	A	5	4.11	N/C							
4.12			Refrigerante de má qualidade / estragado	desgaste prematuro da broca	erro operacional	M	I	A	3	4.12	N/C							
4.13					identificação errada da embalagem	M	I	A	3	4.13	N/C							
4.14				super-aquecimento da broca	erro operacional	M	I	A	3	4.14	N/C							
4.15					identificação errada da embalagem	M	I	A	3	4.15	N/C							

4.16				mau acabamento final	erro operacional	M	I	A	3	4.16	N/C								
4.17					identificação errada da embalagem	M	I	A	3	4.17	N/C								
5	Ajustar parâmetros de corte da máquina	Máquina em condições de regulação	máquina desregulada	parâmetros de corte errôneos	manutenção periódica não realizada	B	I	B	5	5	N/C								
5.1					máquina com defeito	B	I	B	5	5.1	N/C								
5.2				qualidade inferior do furo	manutenção periódica não realizada	A	I	A	5	5.2	N/C								
5.3					máquina com defeito	A	I	A	5	5.3	N/C								

6	Execução de furo (40 furos prof. 8mm)	Conjunto homem x máquina x ferramenta preparados	Aresta postiça na broca	furo ovalizado	velocidade de corte baixa	A	I	A	5	6	N/C								
6.1					limite de desgaste ultrapassado	A	M	A	15	6.1	Observar								
6.2					Geometria inadequada	A	I	A	5	6.2	N/C								
6.3				furo riscado	velocidade de corte baixa	A	I	A	5	6.3	N/C								
6.4					limite de desgaste ultrapassado	A	M	A	15	6.4	Observar								
6.5					Geometria inadequada	A	I	A	5	6.5	N/C								
6.6			Quebra de canto da broca	furo ovalizado	condição instável, fixação	A	M	A	15	6.6	Observar								

6.7					corte interrompido	A	I	A	5	6.7	N/C								
6.8					ultrapassado limite de desgaste	A	M	A	15	6.8	Observar								
6.9					geometria inadequada	A	I	A	5	6.9	N/C								
6.10				furo riscado	condição instável, fixação deficiente	A	I	A	5	6.10	N/C								
6.11					corte interrompido	A	I	A	5	6.11	N/C								
6.12					ultrapassado limite de desgaste	A	M	A	15	6.12	Observar								
6.13					geometria inadequada	A	I	A	5	6.13	N/C								
6.14			Desgaste da Superfície de Folha	mau acabamento final	velocidade de corte alta	A	I	M	15	6.14	Observar								
6.15					avanço muito baixo	A	I	M	15	6.15	Observar								
6.16					ângulo de folga pequeno	A	I	M	15	6.16	Observar								

6.17			Lasca na aresta principal	péssimo acabamento final	fixação deficiente	A	I	A	5	6.17	N/C								
6.18					corte interrompido	A	I	A	5	6.18	N/C								
6.19					ultrapassado limite de desgaste	A	M	A	15	6.19	Observar								
6.20				Quebra da ferramenta	fixação deficiente	A	I	A	5	6.20	N/C								
6.21					corte interrompido	A	I	A	5	6.21	N/C								
6.22					ultrapassado limite de desgaste	A	M	A	15	6.22	Observar								
6.23				vida útil reduzida	fixação deficiente	B	I	A	1	6.23	N/C								
6.24					corte interrompido	B	I	A	1	6.24	N/C								
6.25					ultrapassado limite de desgaste	B	M	A	3	6.25	N/C								

6.26				esforço maior do conjunto máquina/ferramenta	fixação deficiente	B	I	A	1	6.26	N/C								
6.27					corte interrompido	B	I	A	1	6.27	N/C								
6.28					ultrapassado limite de desgaste	B	M	A	3	6.28	N/C								
6.29			Desgaste da Lâmina cilíndrica	ovalização do furo	fixação deficiente	A	I	A	5	6.29	N/C								
6.30					excentricidade alta	A	I	A	5	6.30	N/C								
6.31					refrigerante errado, emulsão fraca	A	M	A	15	6.31	Observar								
6.32				furo riscado	fixação deficiente	A	I	A	5	6.32	N/C								
6.33					excentricidade alta	A	I	A	5	6.33	N/C								

6.34					refrigerante errado, emulsão fraca	A	M	A	15	6.34	Observar								
6.35				furo não perpendicular	fixação deficiente	B	I	A	1	6.35	N/C								
6.36					excentricidade alta	B	I	A	1	6.36	N/C								
6.37					refrigerante errado, emulsão fraca	B	M	A	3	6.37	N/C								
6.38			Desgaste da aresta transversal		velocidade de corte baixa	B	I	A	1	6.38	N/C								
6.39					avanço alto	B	I	A	1	6.39	N/C								
6.40					aresta transv. grande ou	B	I	A	1	6.40	N/C								

6.41			Deformação plástica nos cantos	furo não centrado	velocidade de corte alta	B	I	A	1	6.41	N/C								
6.42					refrigerante insuficiente	B	I	A	1	6.42	N/C								
6.43					margem do canto errada ou sem margem	B	I	A	1	6.43	N/C								
6.44				furo não perpendicular	velocidade de corte alta	B	I	A	1	6.44	N/C								
6.45					refrigerante insuficiente	B	I	A	1	6.45	N/C								
6.46					margem do canto errada ou sem margem	B	I	A	1	6.46	N/C								

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS DO FMEA

É importante frisar que as atividades identificadas com valor acima de 15 devem ser obrigatoriamente tratadas antes do início efetivo do processo. Aquelas que atingem o valor exato 15 devem ficar sob observação constante e, abaixo deste valor, considera-se sem ação momentânea. Assim, tem-se como possíveis ações comprometedoras ao processo de furação caso não sejam tratadas:

Atividade 3 : A possibilidade de inserir a broca e, por algum descuido, não apertar ou fazer de forma incorreta é preocupante e, por isso, deve-se verificar o conjunto bem fixado livre de riscos na execução do processo. Cabe ao operador montador do conjunto cabeçote/mandril x broca a inspeção deste antes do início.

Figura 5.1 - Detalhe de atividade 3 com probabilidade de discrepância

3	Posicionar a broca na máquina	Broca ajustada perfeitamente no mandril	Posicionar a broca sem apertar / apertar com batimento	Furos ovalizados	Falha operacional	A	M	M	45	3	Startar o conj maq x ferramenta e checar antes de iniciar a furação
---	-------------------------------	---	--	------------------	-------------------	---	---	---	----	---	---

Atividade 4: A possibilidade de trabalhar com fluido de corte em condições aquém do mínimo exigido pode acarretar problemas na ferramenta e consequente má qualidade do furo. O *check* do controle periódico ou mesmo a constatação de odor e viscosidade podem ser executados pelo operador antes do início do processo.

Figura 5.2 - Detalhe de atividade 4 com probabilidade de discrepância

4	Ajustar refrigeração	Sistema de refrigeração adequada	Refrigerante inadequado	desgaste prematuro da broca	erro operacional	A	I	B	25	4	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.
---	----------------------	----------------------------------	-------------------------	-----------------------------	------------------	---	---	---	----	---	---

Figura 5.3 - Detalhe das atividades 4.1 a 4.5 com probabilidade de discrepância

4.1					identificação errada da embalagem	A	I	B	25	4.1	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.
4.2				má qualidade do furo	erro operacional	A	I	B	25	4.2	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.
4.3					identificação errada da embalagem	A	I	B	25	4.3	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.
4.4				mau acabamento final	erro operacional	A	I	B	25	4.4	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.
4.5					identificação errada da embalagem	A	I	B	25	4.5	Verificar controle periódico do refrigerante; Odor, cor, viscosidade do refrigerante tb são avisos.

5.2 RESULTADOS DOS TESTES

Neste momento serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para os dois materiais de brocas sujeitos aos testes de furação em liga de Titânio 6Al4V ou seja, aço rápido

sinterizado e metal duro. Para facilitar o entendimento do comportamento destas, buscou-se o esgotamento da aresta principal de corte em até 0,1mm e demais desgastes oriundos da operação de furação, monitorando amostras de cavacos concomitantemente ao controle dos diâmetros. Foram adotadas as refrigerações em abundância, sem refrigeração (à seco) e na condição MQL.

5.2.1 Furação com refrigeração abundante e sem pré-furo.

Foram executados furos utilizando-se óleo solúvel em abundância, para ambas as ferramentas em questão, obtendo-se resultados expressivos.

Nesta etapa dos testes, referenciando 1360 mm de furação conforme Quadros 5.1 e 5.2, é nítida a supremacia da broca de metal duro em relação à broca de aço rápido sinterizado, fato este demonstrado pois:

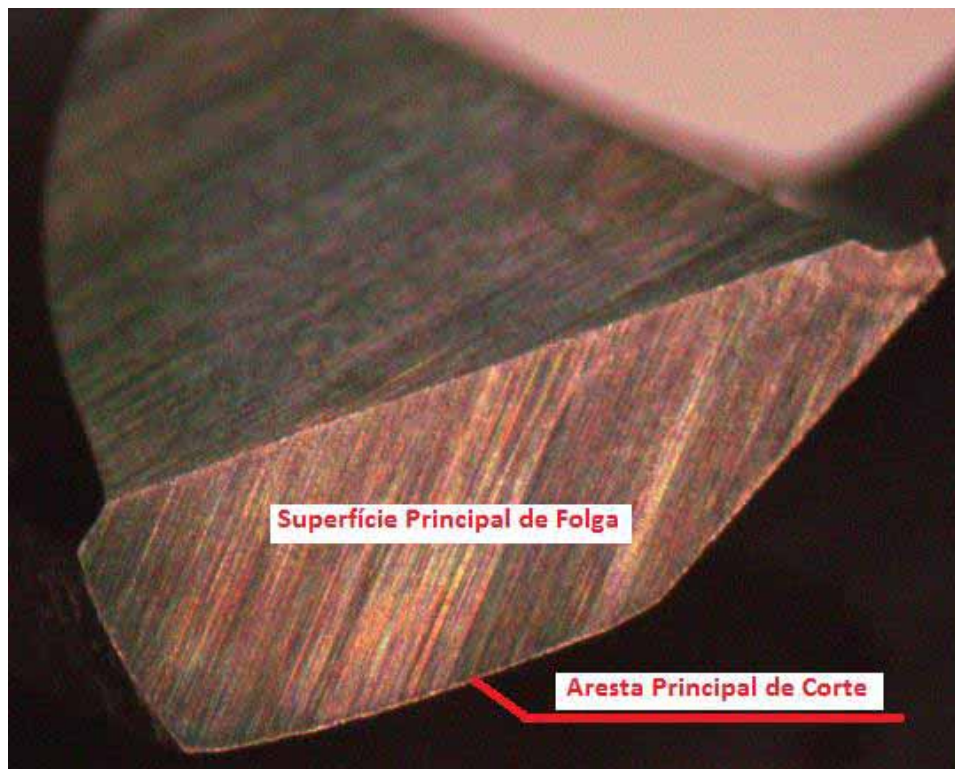
- 1º) o desgaste da aresta principal de corte apresenta-se de forma contundente na broca de aço rápido sinterizado, diferentemente da broca de metal duro que mantém-se praticamente intocável;
- 2º) o cavaco gerado com a broca de metal duro demonstra-se com boa formação e de forma contínua em toda sua extensão. No entanto, na broca de AR sinterizado, está claro a diferença entre as mesmas, isto é, o cavaco gerado, em sua periferia, vem de uma forma com grande serrilhado;
- 3º) A aresta transversal não apresentou desgaste na broca de metal duro, contrariamente à broca de aço rápido sinterizado que, já nesta etapa, mostrou-se com desgaste nítido e por ser a região onde primeiro há o contato com a superfície a ser usinada, recebe todas as forças de corte oriundas do processo de furação.

Ao atingir 2640mm de furação, resultou-se , quanto à broca de metal duro, uma eficácia de rendimento pois praticamente manteve-se intacta em sua aresta principal de corte, aresta transversal e boa formação de cavaco. O desgaste foi praticamente nulo e a ferramenta comportou-se de maneira absoluta demonstrando estar apta a continuar sem qualquer tipo de problema em usinagens futuras. Contrário a isto, a broca de aço rápido sinterizado já não obteve resultados tão favoráveis com a apresentação de lascas na aresta principal de corte o

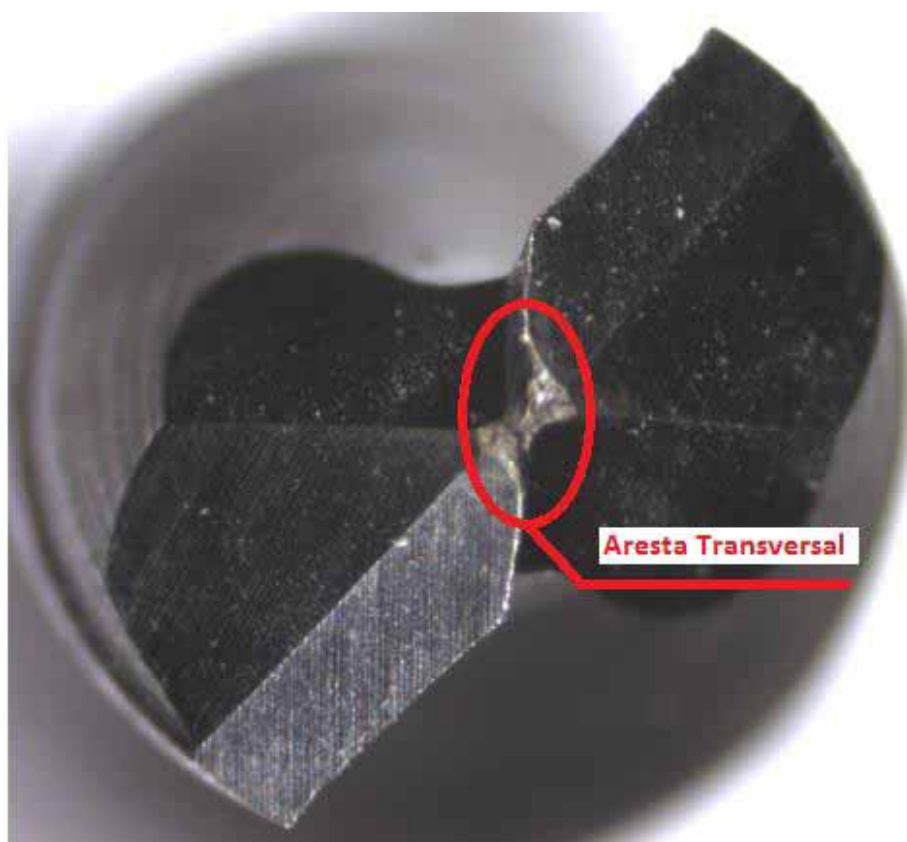
que, naturalmente, tem influência direta na formação de cavaco com resultado direto na rugosidade da superfície dos furos. Já a aresta transversal também foi influenciada em sua extensão. Até este momento é possível afirmar que, em função da refrigeração abundante, o metal duro manteve-se com resultados muito melhores que o aço rápido sinterizado sendo possível uma maior vida de corte além do que foi atingido. Em suma, é clara a continuidade do processo de furação com perspectiva de vida ainda longa para o metal duro e vida não tão longa para a broca de aço rápido sinterizado.

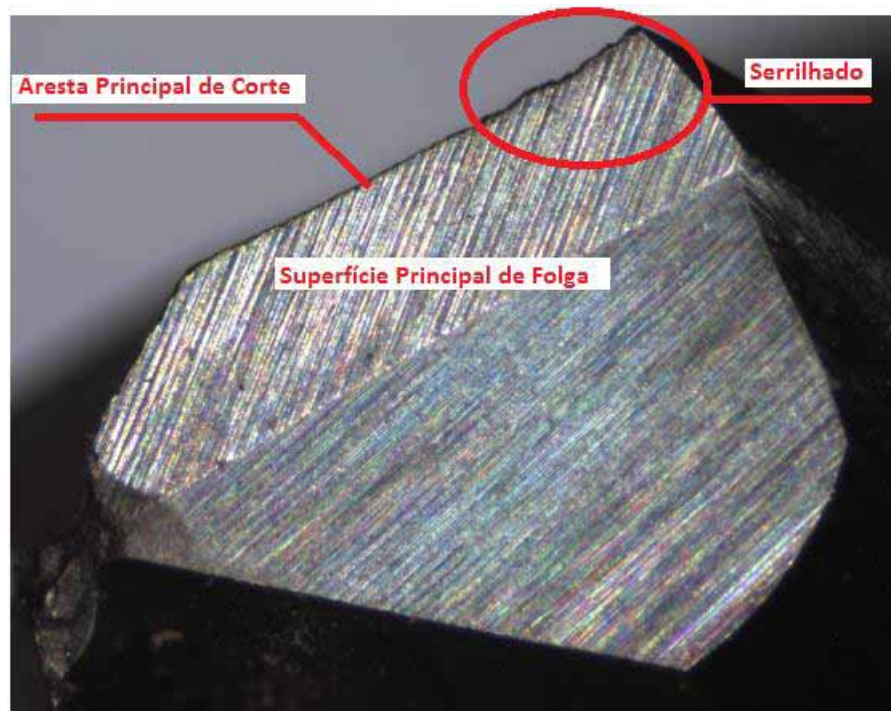
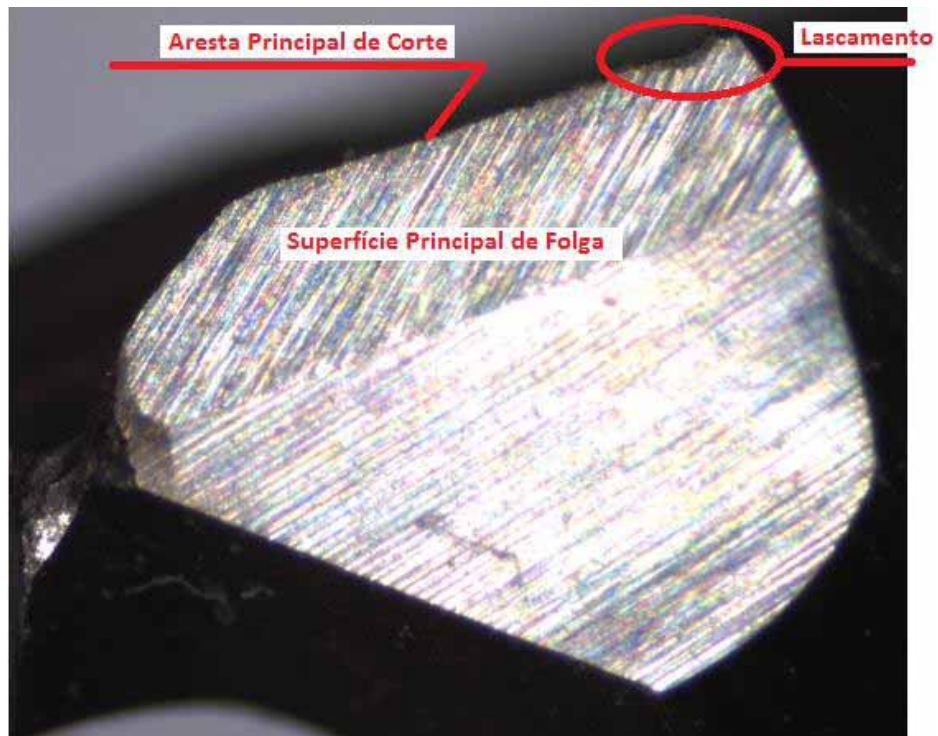
Quadro 5.1 - Sequência de fotos da broca de metal duro, refrigeração abundante e sem pré-furos, aos 1360 mm.



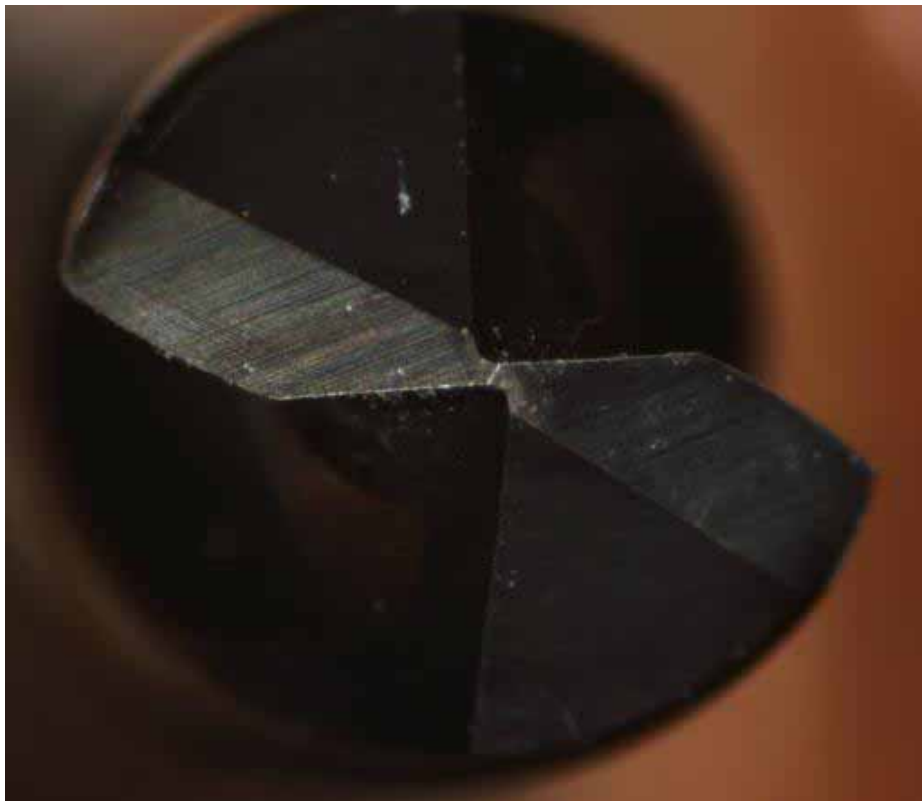
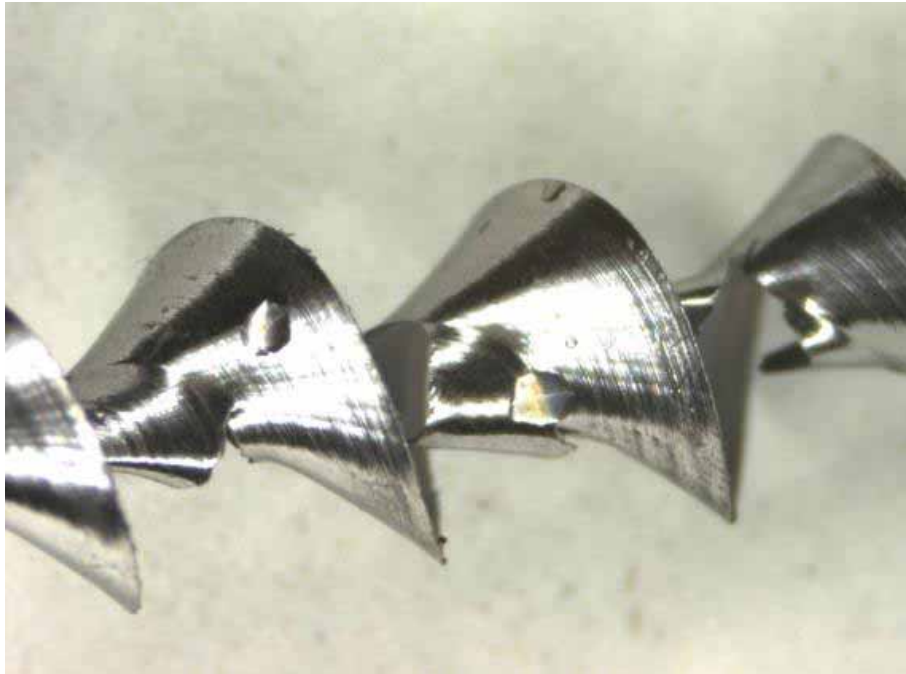


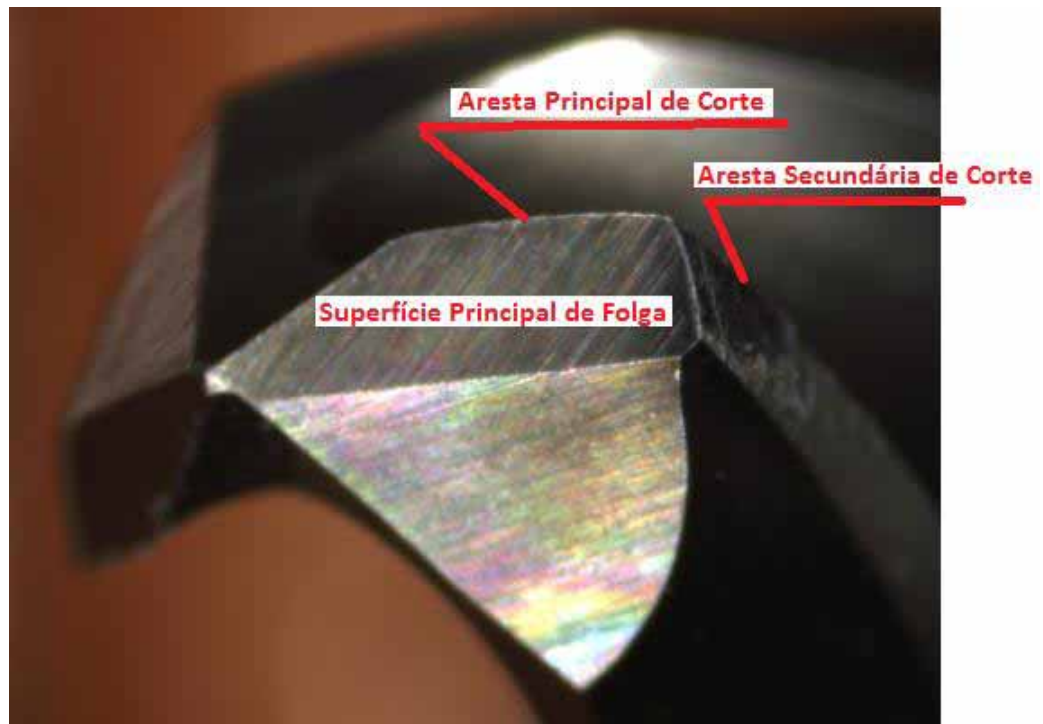
Quadro 5.2 - Sequência de fotos da broca de aço rápido sinterizado, refrigeração abundante e sem pré-furos, aos 1360 mm.



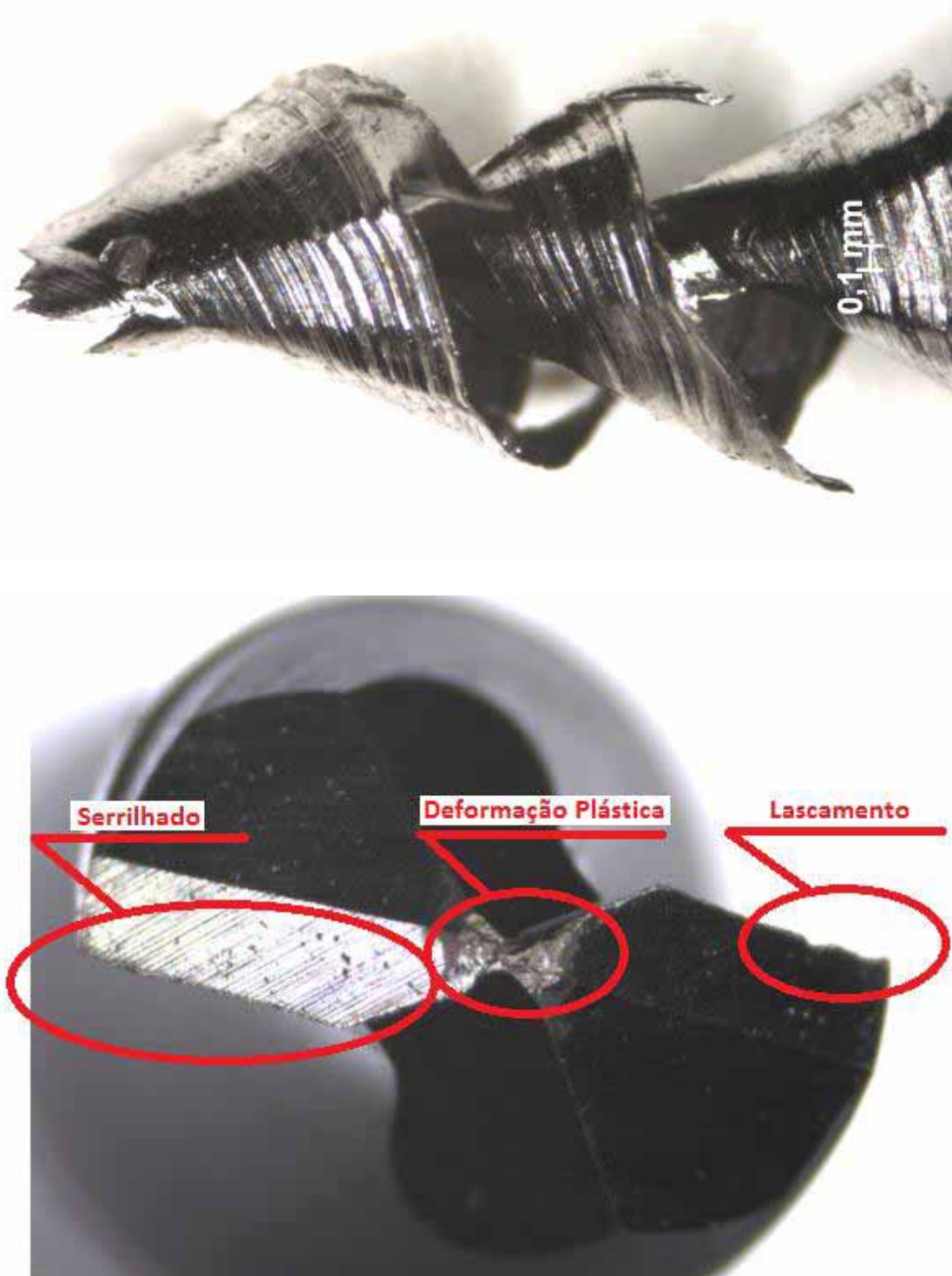


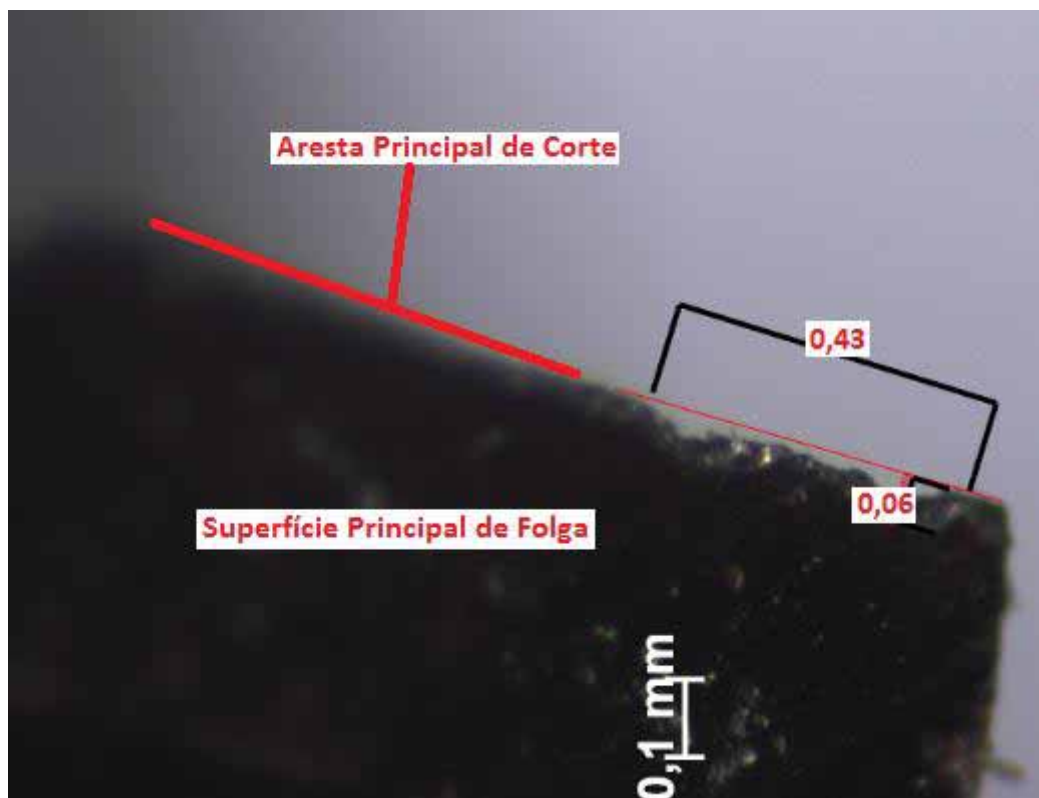
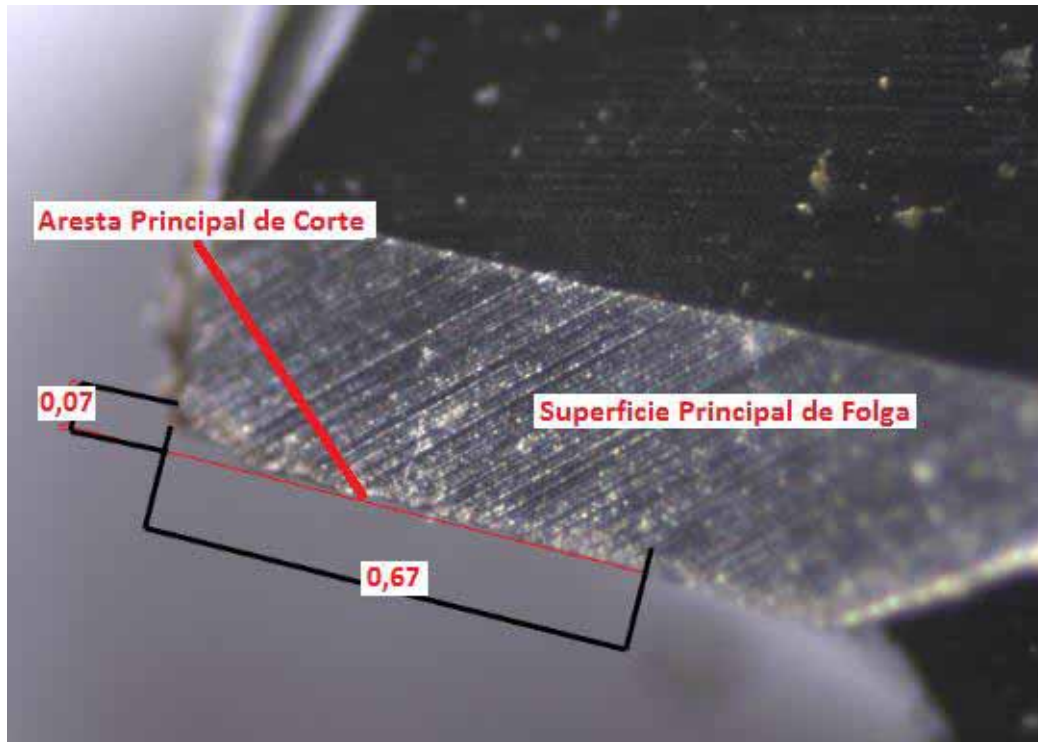
Quadro 5.3 - Sequência de fotos da broca de metal duro, refrigeração abundante e sem pré-furos, aos 2640 mm.





Quadro 5.4 - Sequência de fotos da broca de aço rápido sinterizado, refrigeração abundante e sem pré-furos, aos 2640 mm.





5.2.2 Furação à seco, sem pré-furo.

Nesta proposta, o objetivo foi a avaliação das brocas em uma condição de extrema exigência, isto é, furação em cheio com a força inicial de corte totalmente concentrada na aresta transversal de corte e, posteriormente, sendo distribuída por toda a extensão das arestas principais de corte além dos furos realizados sendo feitos sem qualquer fluido de refrigeração.

Pode-se considerar desastroso o resultado da broca de aço rápido sinterizado pois houve um rompimento precoce aos 50 mm de furação, diferentemente da broca de metal duro que, como será visto a seguir, atingiu resultados mais expressivos nas mesmas condições do sinterizado mas, mesmo com este desempenho, ainda está bastante aquém do que se deseja para justificar seu uso nestas condições.

Prosseguindo com os comentários à cada etapa, a continuidade dos testes concentrou-se somente à broca de metal duro, uma vez que a broca de aço rápido sinterizado apresentou rompimento precoce. Aos 1008mm, a formação do cavaco foi bastante prejudicado, com geometria do tipo “sanfona” oriunda, muito provavelmente, das “falhas” nas superfícies de corte. A aresta transversal aumentou seu desgaste oriundo do lascamento inicial, exigindo-se uma força ainda maior pois é uma região que teoricamente suporta as cargas iniciais da força de corte e, uma vez danificada, sobrecarrega as demais superfícies de contato da broca ao titânio. As lascas, principalmente em uma das lâminas, intensificou-se de forma gradativa prejudicando a performance da ferramenta.

Aos 1242mm, todas as evidências anteriores naturalmente aumentaram pois o acúmulo de desgastes à medida que as furações foram executadas, causaram gradativos desgastes nas superfícies já danificadas. O cavaco apresentou um maior efeito “sanfona”. Em uma das lâminas, houve indícios de fissura na superfície principal de folga.

Aos 1458mm, como era de se esperar, a ferramenta em questão apresentou nítida piora em toda seu núcleo em função do excessivo desgaste na aresta transversal e acentuado desgaste nas lâminas, mais precisamente na superfície principal de corte, além do aparecimento de “pitching” na superfície principal de folga. Estava sinalizada a bem provável ruptura da ferramenta.

Aos 1638mm, a ferramenta se rompeu, muito em função das avarias diversas ocorridas durante o processo de furação, paralelamente a não existência de pré-furo para aliviar a força

de corte do núcleo da ferramenta e , principalmente, pela total ausência de refrigeração, acelerando em demasia a redução da vida útil da mesma. Não há evidências da broca nesta etapa pois com o rompimento, perdeu-se a ponta eliminando qualquer possibilidade de registro. Assim, tem-se evidências da etapa anterior, quando houve a interrupção do processo de furação para coleta de informações e medições (1458mm).

Quadro 5.5 - Sequência de fotos da broca de metal duro, à seco, sem pré-furos, aos 1458 mm.





5.2.3 Furação à seco e com pré-furo Ø 2,5mm

A condição de furação proposta nesta etapa visou avaliar o comportamento da ferramenta com o alívio da aresta transversal ao definir-se pré-furos diâmetro 2,5mm transferindo o contato inicial ferramenta x material diretamente nas arestas principais de corte.

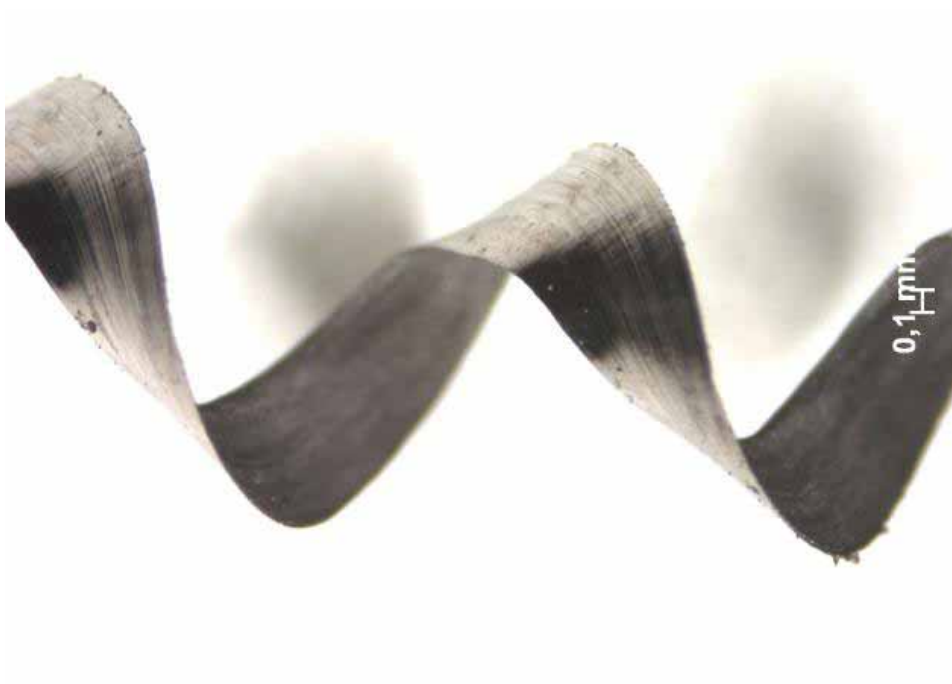
O simples fato da execução de um pré-furo diâmetro 2,5mm naturalmente pode elevar a vida útil de uma broca. Apesar disto, é visível que o impacto inicial da broca de metal duro ao iniciar o corte, aos 200mm de usinagem, causou um lascamento considerável em uma das arestas, que poderá determinar uma menor vida útil e até mesmo afetar no resultado final, ou seja, diâmetro final desejado e poderá afetar também a rugosidade deste que, caso seja um fator importante, reduzirá drasticamente o prosseguimento de furos. Este lascamento se apresentou somente em uma das arestas principais de corte porém, na outra aresta, exatamente na mesma região, isto é, no primeiro contato, há uma descontinuidade da aresta mostrando um desgaste inicial, em menor proporção. O cavaco formado em forma de fita contínua a demonstrar uma usinagem leve, sem descontinuidade e sem marcas oriundas do lascamento. Na mesma condição, a broca de aço sinterizado, até esta etapa, portou-se bem

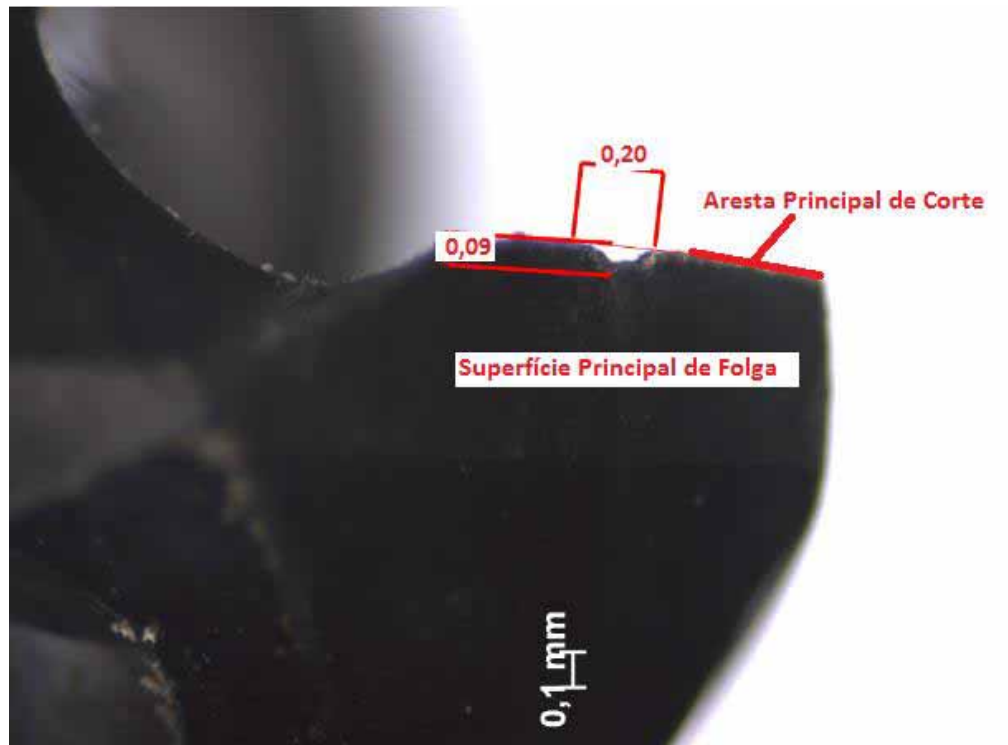
mas já apresentando inicialmente uma das lâminas com muitos desgastes profundos, que ficam nítidos se verificarmos a superfície gerada no cavaco, onde há riscos contínuos na fita, muito provavelmente pela aresta de corte bastante danificada. É latente a diferença de desgastes entre as brocas, onde se percebe que, em função do material metal duro ser bastante frágil, mais fácil a possibilidade de lascamento por impactos gerados no momento da furação, diferentemente do aço rápido sinterizado, onde a possibilidade de lascamento é menor em função de uma maior tenacidade, porém mais suscetível ao desgaste devido a menor dureza.

Momentos antes do rompimento de ambas as ferramentas, naturalmente o desgaste nas regiões já constantes anteriormente se intensificaram gradativamente. Se analisarmos pelo cavaco, é clara a forma do cavaco com serrilhados em sua periferia, principalmente na broca de metal duro. No cavaco gerado pela broca de aço rápido sinterizado, a continuidade deste se intensificou porém, com várias marcas na extensão maior ratificando um desgaste progressivo. Na proporção que a usinagem vai se prolongando, com a ausência de refrigeração, a força de corte é cada vez maior pois são arestas de corte cada vez menores, à medida que aumentam o desgaste. A broca de aço rápido sinterizado manteve-se trabalhando até 1072mm quando rompeu-se em função do desgaste excessivo na aresta transversal e , essencialmente, nas arestas principais de corte, mesmo com desgaste na ordem de 0,11mm, considerado aceitável e , comparativamente aos demais testes realizados, caso não houvesse o rompimento desta, teria totais condições de continuidade do processo de furação. Portanto, a coleta de dados e informações está representado na etapa 1000mm (125 furos de 8mm), quando ocorreu esta última coleta.

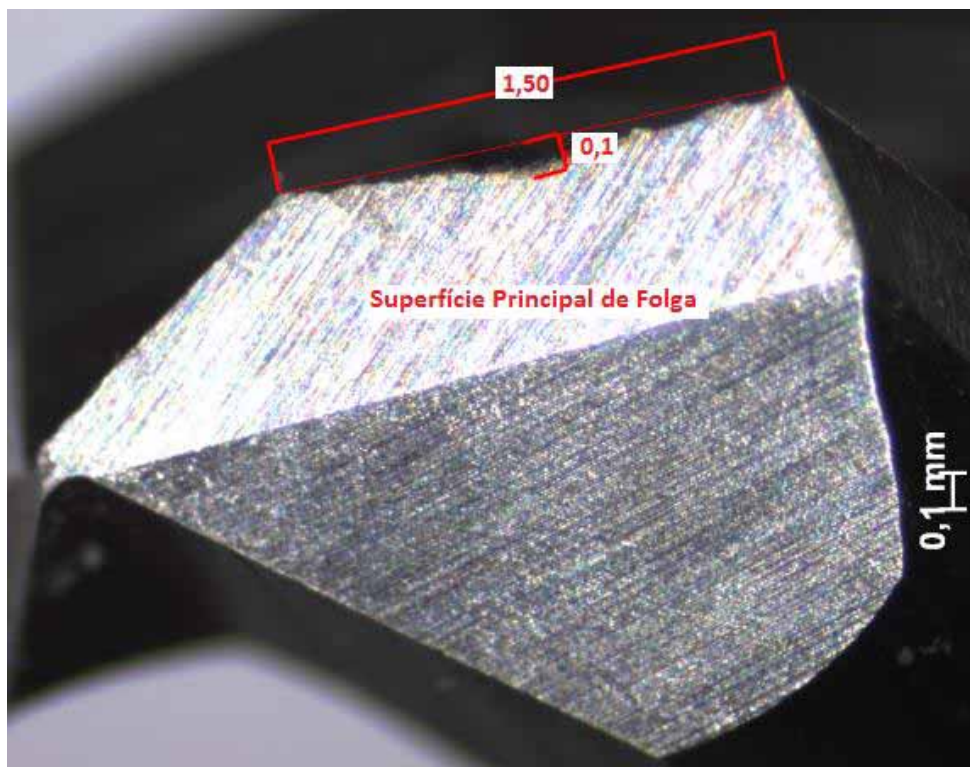
A broca de metal duro suportou até 1360mm (170 furos de 8mm) quando ocorreu a quebra da ferramenta. Portanto, conforme Quadro XXX, a coleta de dados e informações é foi possível até a etapa anterior ao processo ou seja, 1160mm (145 furos de 8mm) e onde apresentou desgastes nas arestas principais de corte de 0,28mm e 0,35mm, fato este que determinou a interrupção do processo de furação.

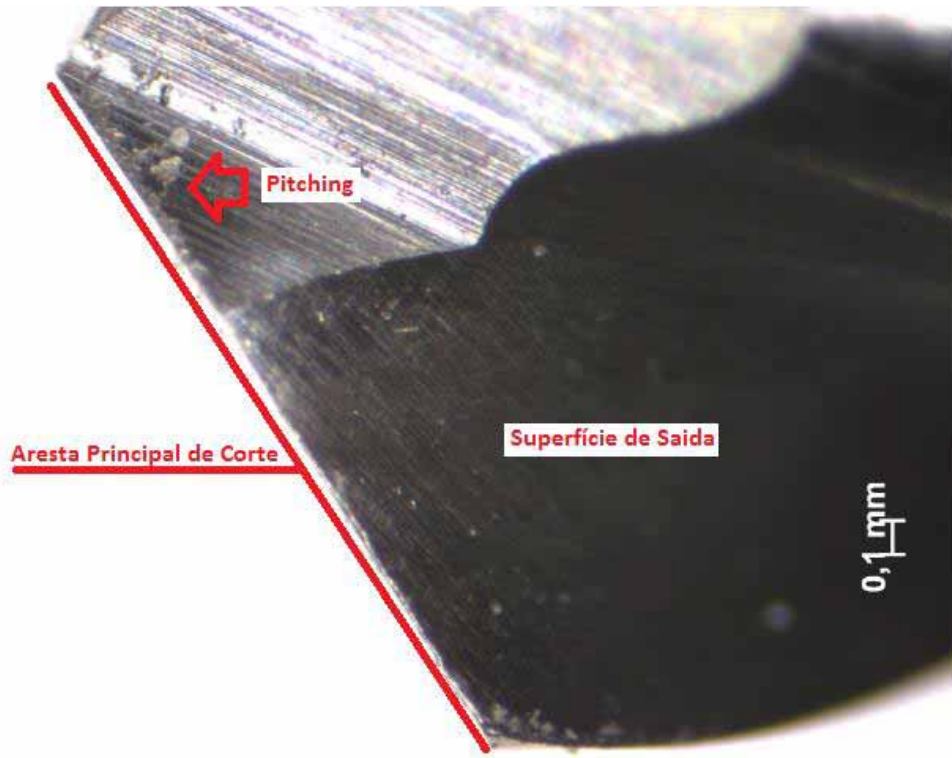
Quadro 5.6 - Sequência de fotos da broca de metal duro, à seco, com pré-furos 2,5mm, aos 200mm.





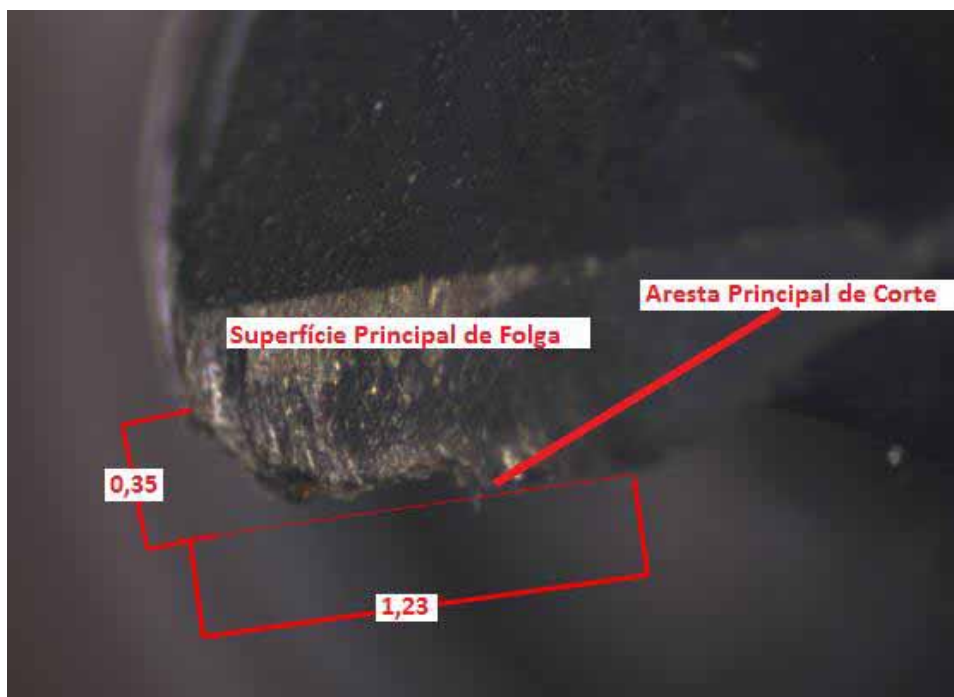
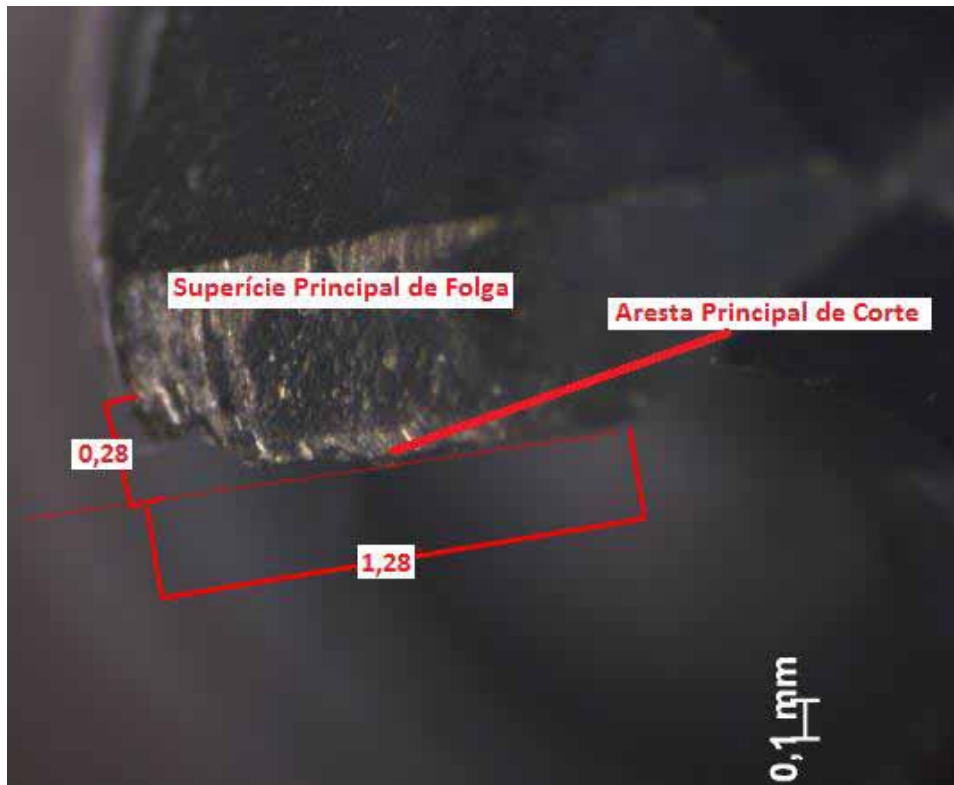
Quadro 5.7 - Sequência de fotos da broca de aço rápido sinterizado, à seco, com pré-furos 2,5mm, aos 200mm.

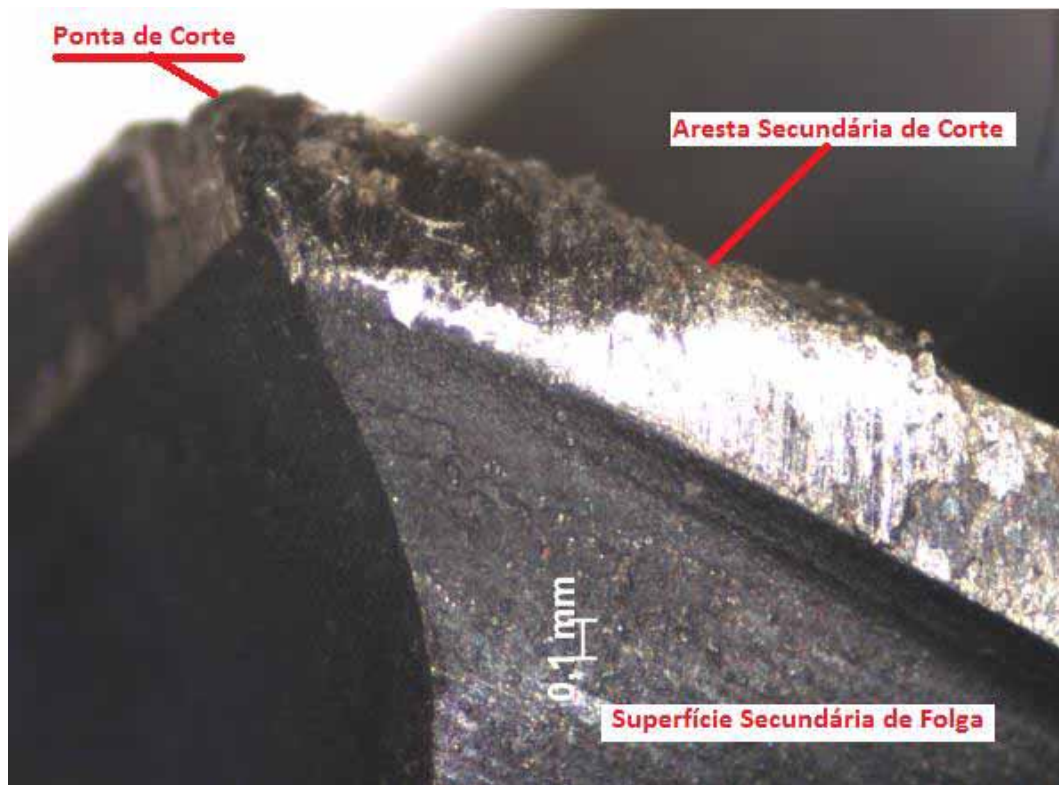




Quadro 5.8 - Sequência de fotos da broca de metal duro, à seco, com pré-furos 2,5mm, aos 1160mm.

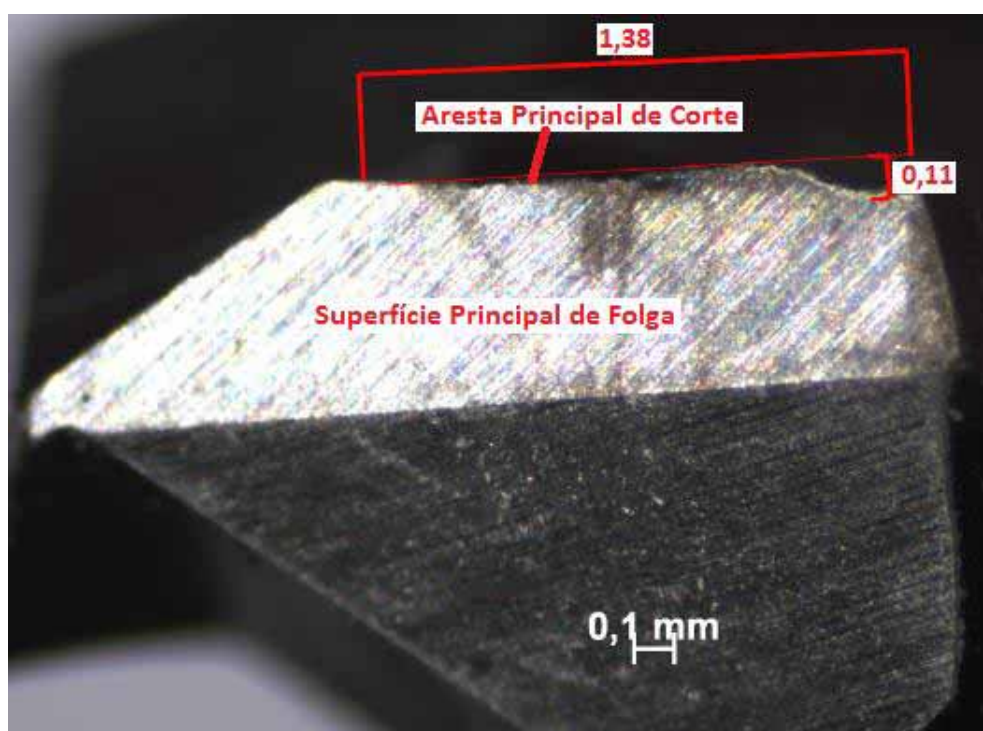
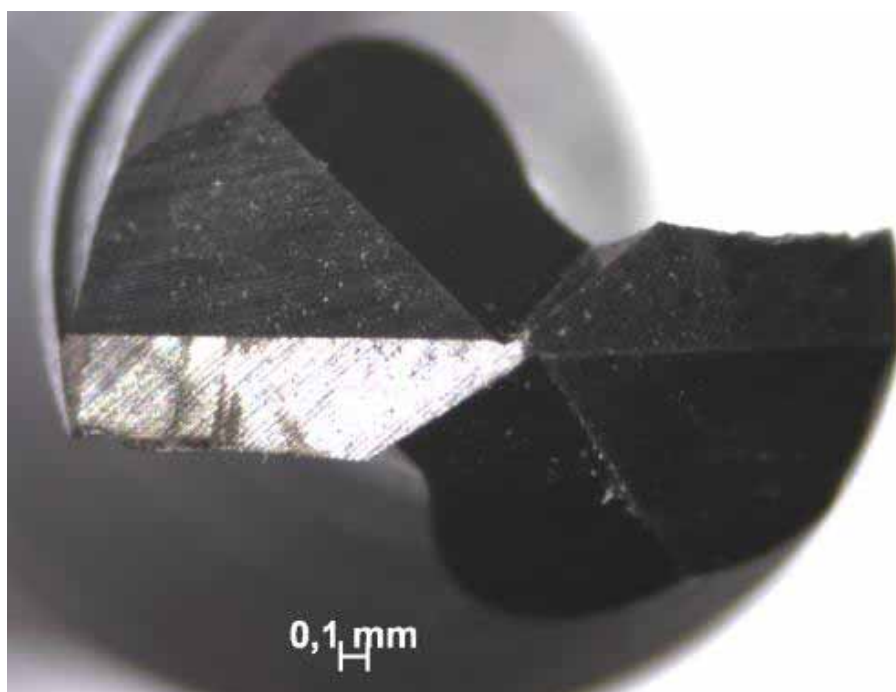


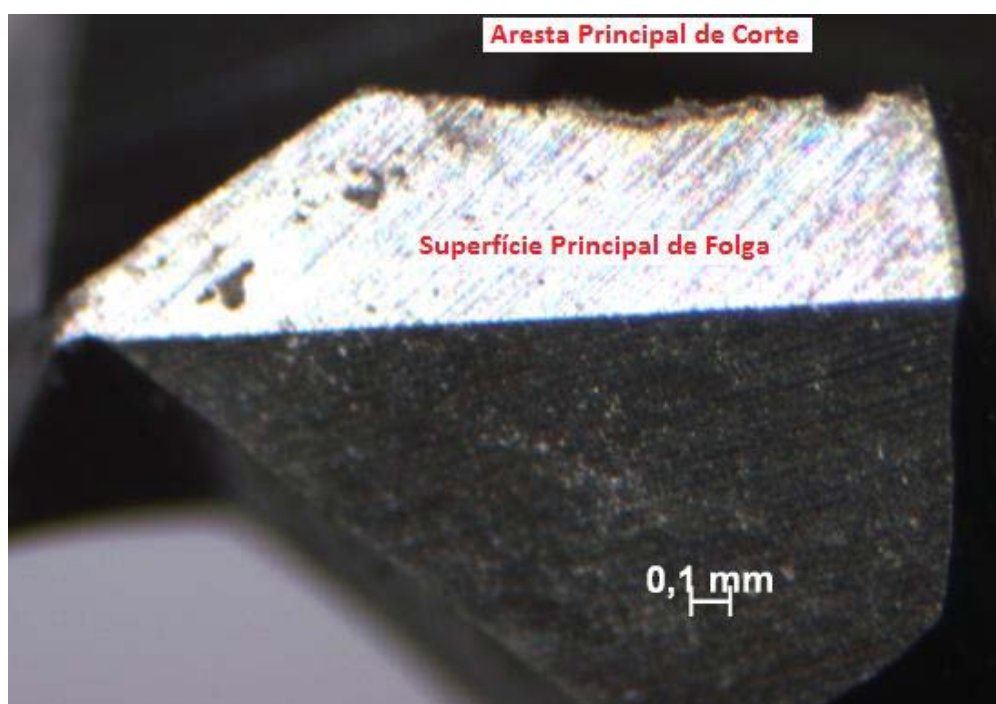
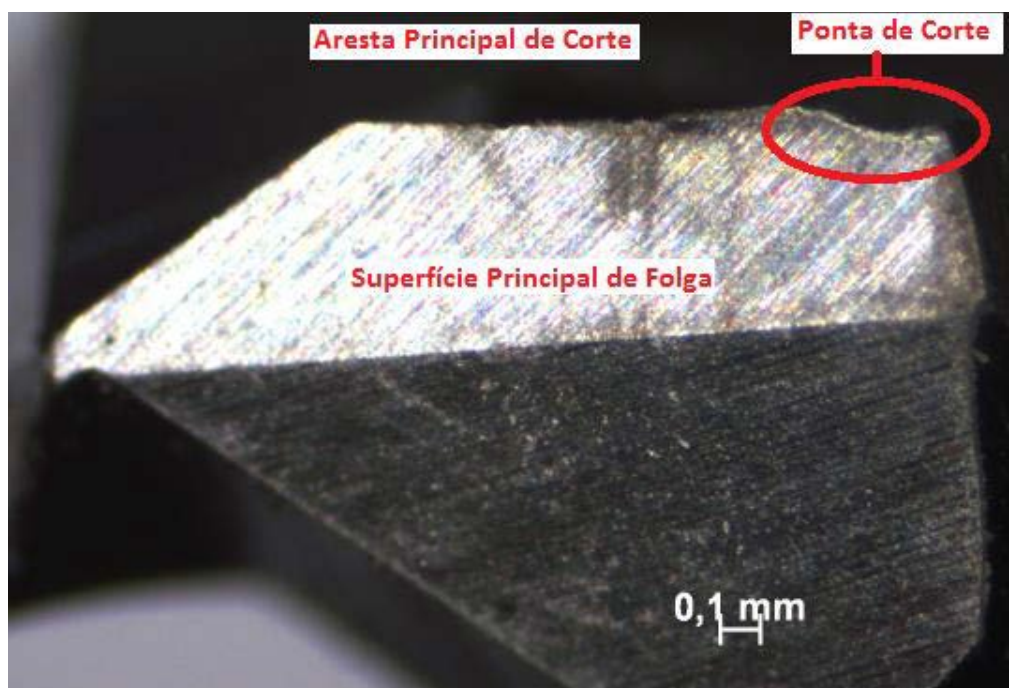




Quadro 5.9 - Sequência de fotos da broca de aço rápido sinterizado, à seco, com pré-furos dia. 2,5mm, aos 1000mm.







5.2.4 Furação com MQL e sem pré-furo

Finalmente, os testes derradeiros submeteram as ferramentas na condição de refrigeração com a Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) que foi preservado, para a broca de aço rápido sinterizado, até 1200mm com desgastes até mesmo superiores ao limite de 0,1mm. Sem dúvida, o óleo de corte agindo na ferramenta externamente possibilitou um aumento da vida de usinagem apesar da ausência de pré-furo forçando em damasia a aresta transversal de corte. Para a broca de metal duro, avançou-se até 2000mm quando os testes cessaram, apesar do aparente desgaste superior a 0,1mm foi possível postergar o aproveitamento da ferramenta, chegando a cerca de 67% superior à broca de aço rápido sinterizado.

Aos 400mm de usinagem, o cavaco da ferramenta de aço rápido sinterizado mostra-se com boa formação em fita e uniforme o que, a princípio, demonstraria estar sem desgaste. No entanto, ocorreu um prematuro desgaste de 0,11mm danificando consideravelmente a aresta principal de corte. Além destes fatos, foi nítido o desgaste tipo serrilhado em toda a extensão da aresta principal de corte de ambas as arestas.

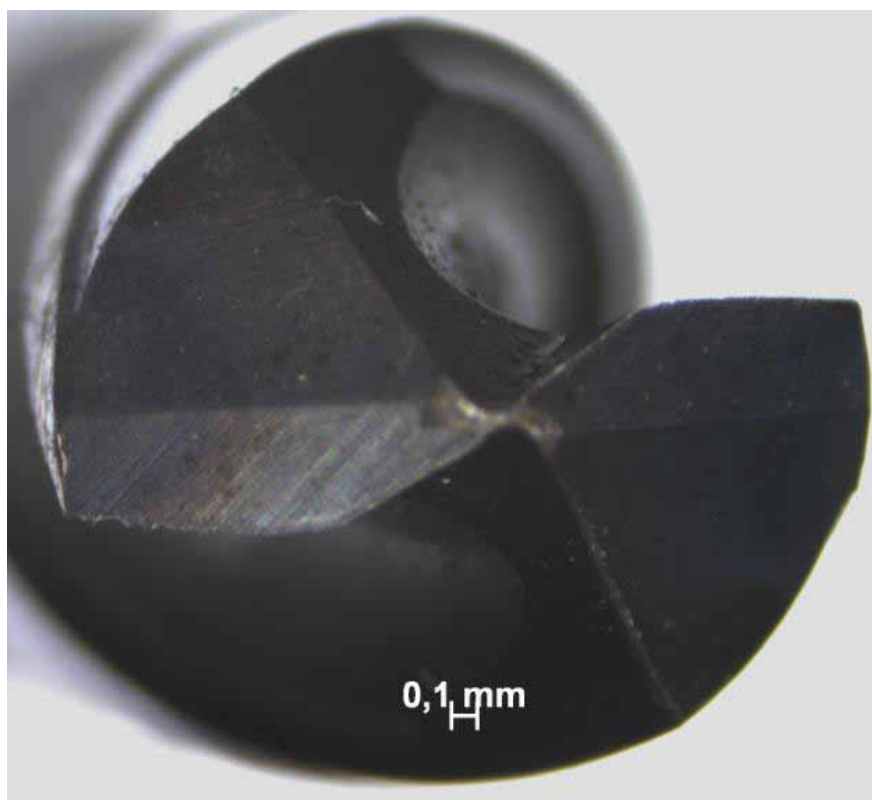
A ferramenta de metal duro gerou um cavaco em fita porém todo “sanfonado” demonstrando, no momento, estar suscetível a desgaste maior que a broca de aço rápido. Porém, o desgaste apresentado chegou a 0,07mm, bastante inferior à ferramenta anterior.

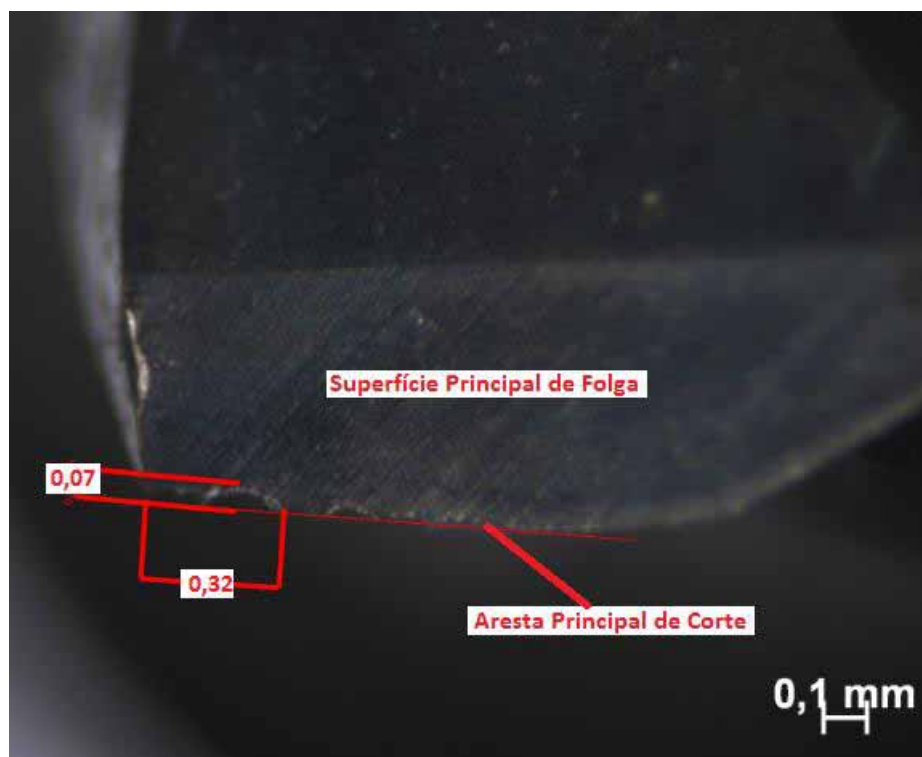
Sequenciando a análise parcial dos resultados, aos 1200mm, é visível uma melhor formação do cavaco de metal duro comparativamente ao cavaco de aço rápido sinterizado pois o efeito “sanfona” mostrou-se muito mais latente neste último, o que nos leva a perceber que o desgaste nas arestas principais de corte foram mais profundos e perceptíveis na broca de aço rápido sinterizado. As arestas principais de corte no metal duro apresentaram um desgaste muito pequeno, da ordem de 0,07 em uma delas somente. Já nas mesmas arestas da broca de aço rápido sinterizado, os desgastes foram bastante claros, da ordem de 0,18mm e, por já ultrapassar o limite estabelecido inicialmente na proposta desta dissertação, interrompeu-se o processo de furação para a broca de aço rápido sinterizado, apesar de ter-se dados de diâmetro dos furos atingidos estarem todos no universo da tolerância H12 também pré-estabelecida.

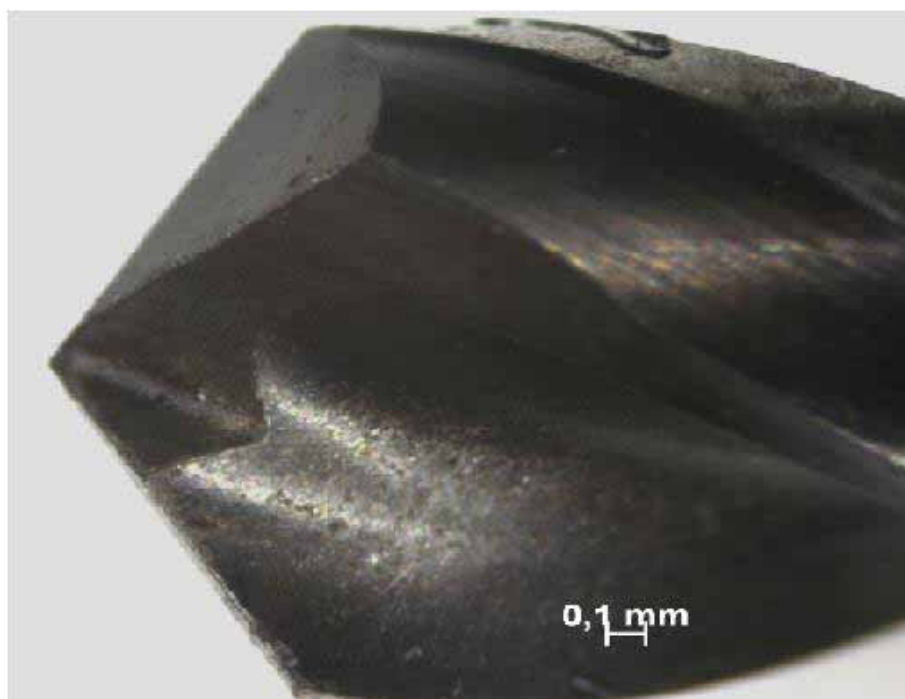
Com a interrupção dos testes para a broca de aço rápido sinterizado, a continuidade deu-se para a broca de metal duro e, nitidamente, a progressão do efeito “sanfona” da amostra

de cavaco demonstrou sinais de avarias maiores na aresta de corte , principalmente naquela já bem mais desgastada, anteriormente com 0,07mm e que, nesta fase, chegou ao valor 0,11mm, permitindo a interrupção dos testes finais devido a ultrapassar o valor inicial proposto de 0,1mm como limite de análise. Curiosamente, a outra aresta de corte permaneceu com ótima formação e desgaste praticamente nulo. Nestas condições e com os diâmetros não sendo afetados, apesar do desgaste em uma das lâminas, seria perfeitamente plausível o prosseguimento dos testes. Segue, na sequência, os Quadros XX, YY, ZZ onde pode-se visualizar a evolução dos desgastes.

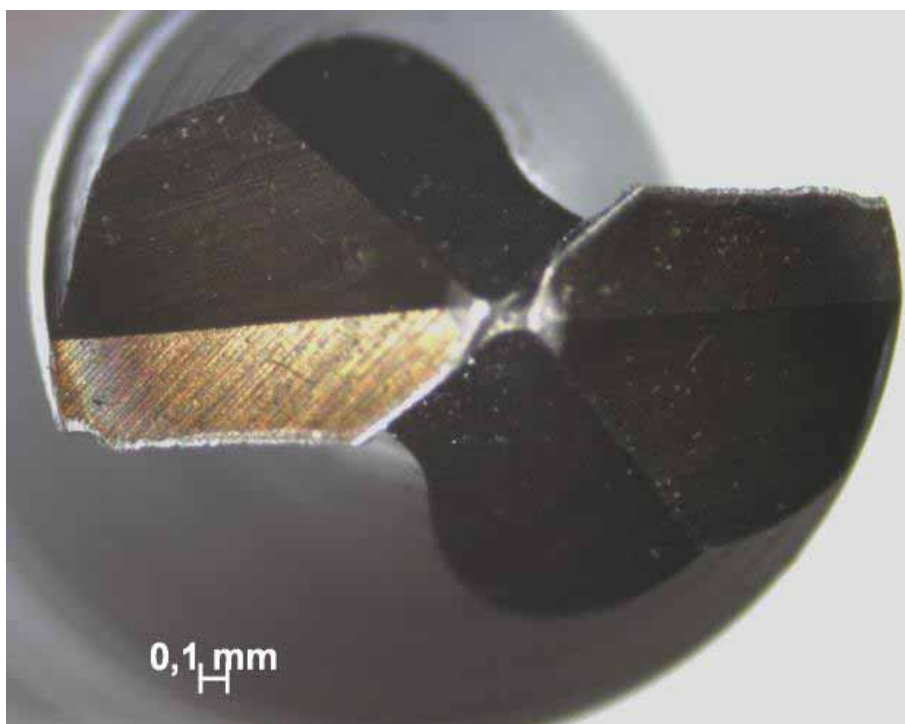
Quadro 5.10 - Sequência de fotos da broca de metal duro, à seco, sem pré-furos, aos 400mm.

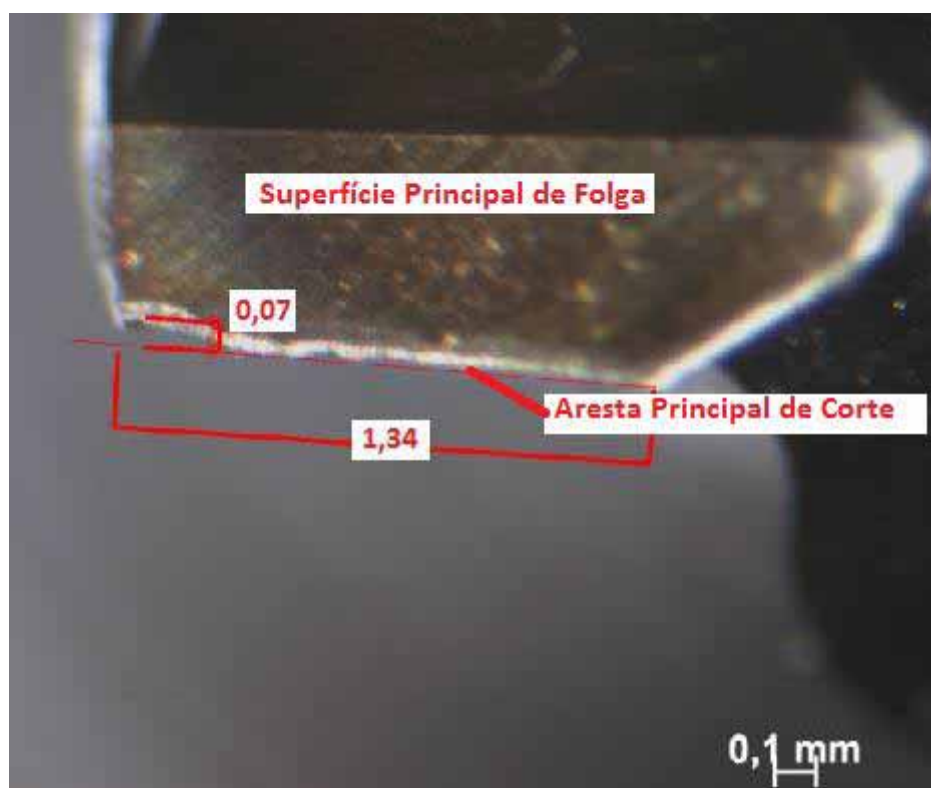
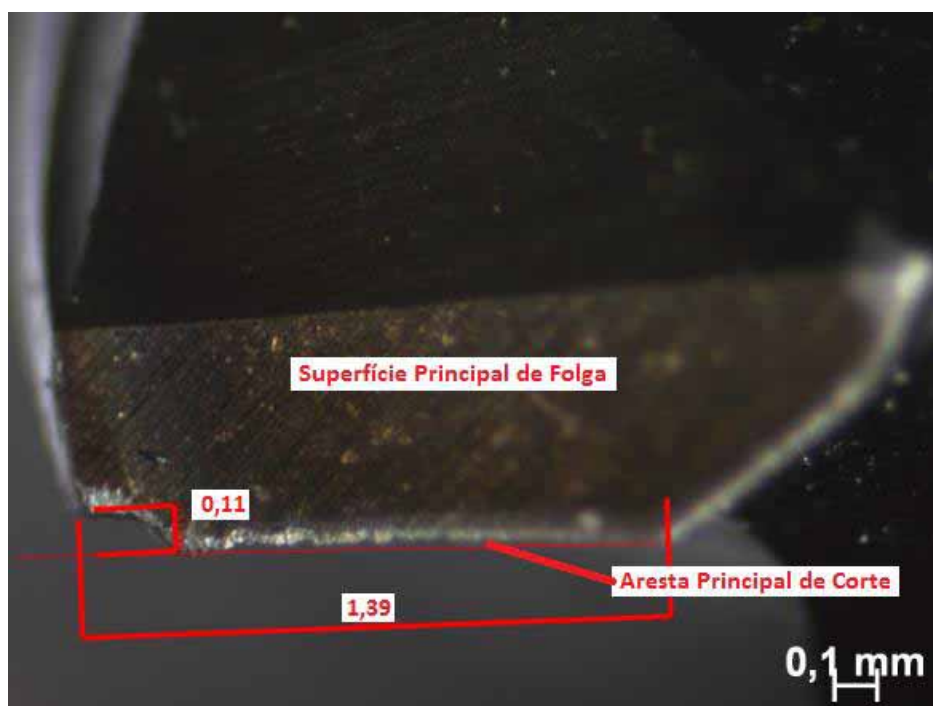


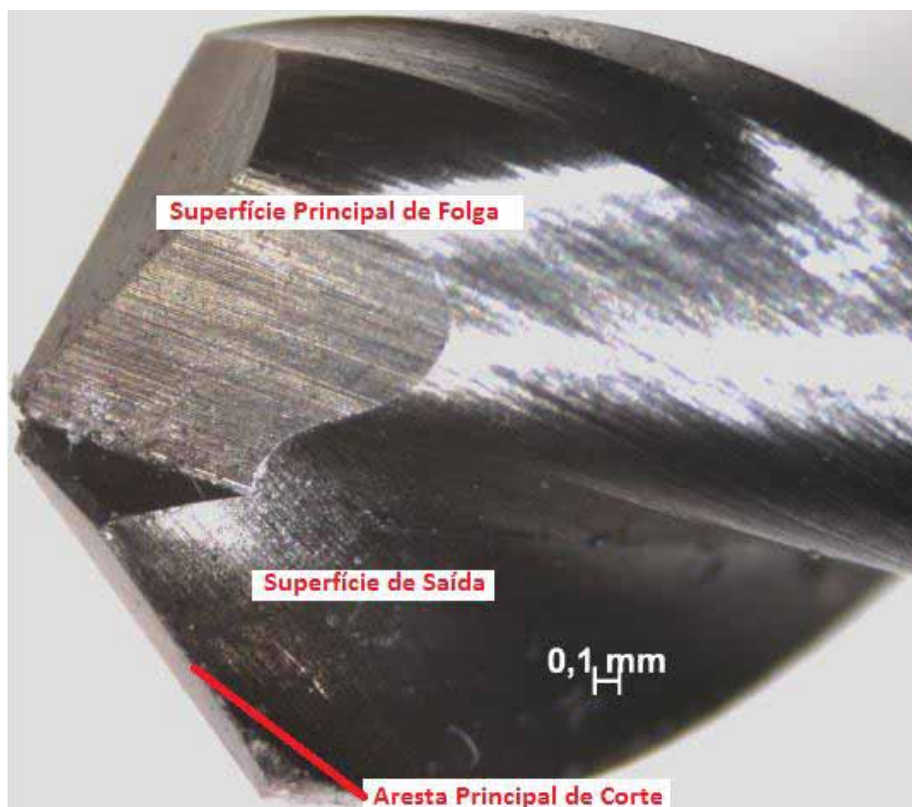




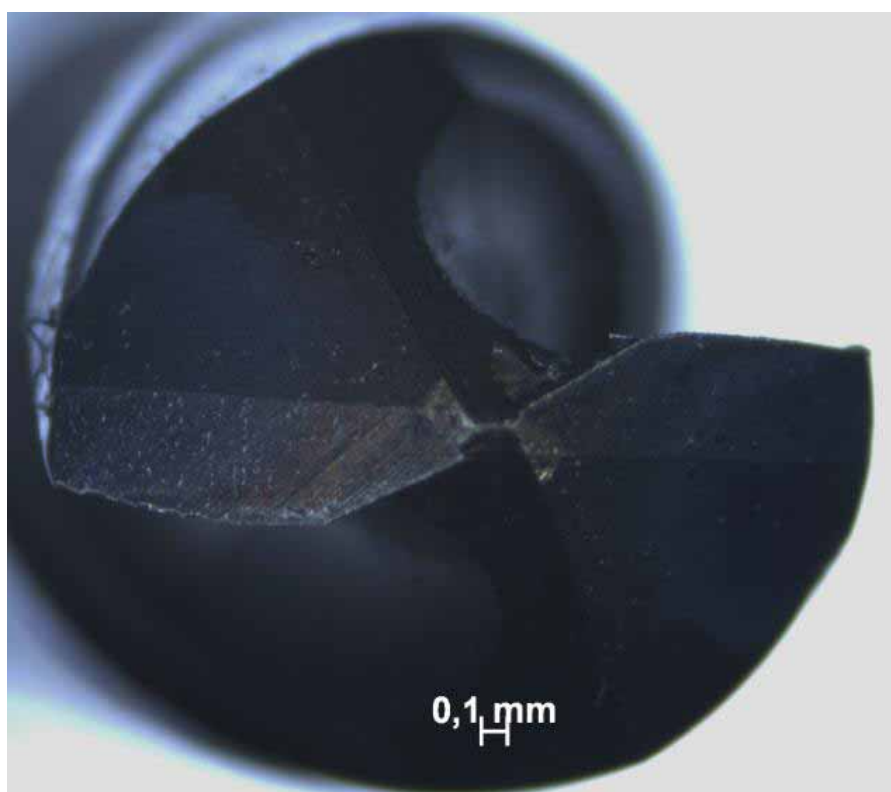
Quadro 5.11 - Sequência de fotos da broca de aço rápido sinterizado, à seco, sem pré-furos, aos 400mm.

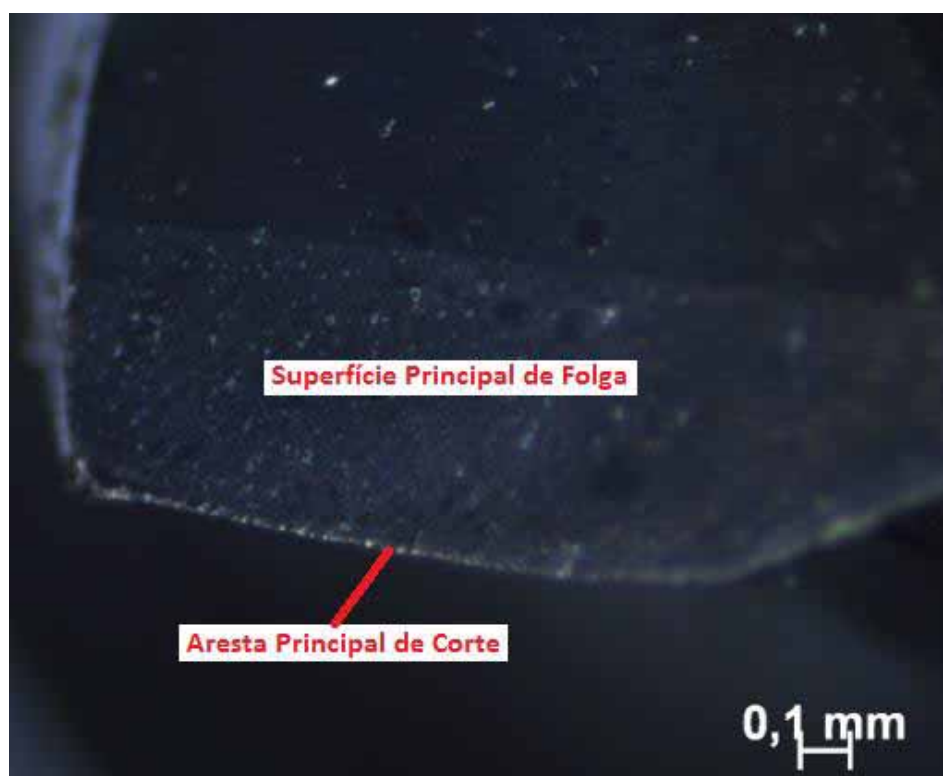




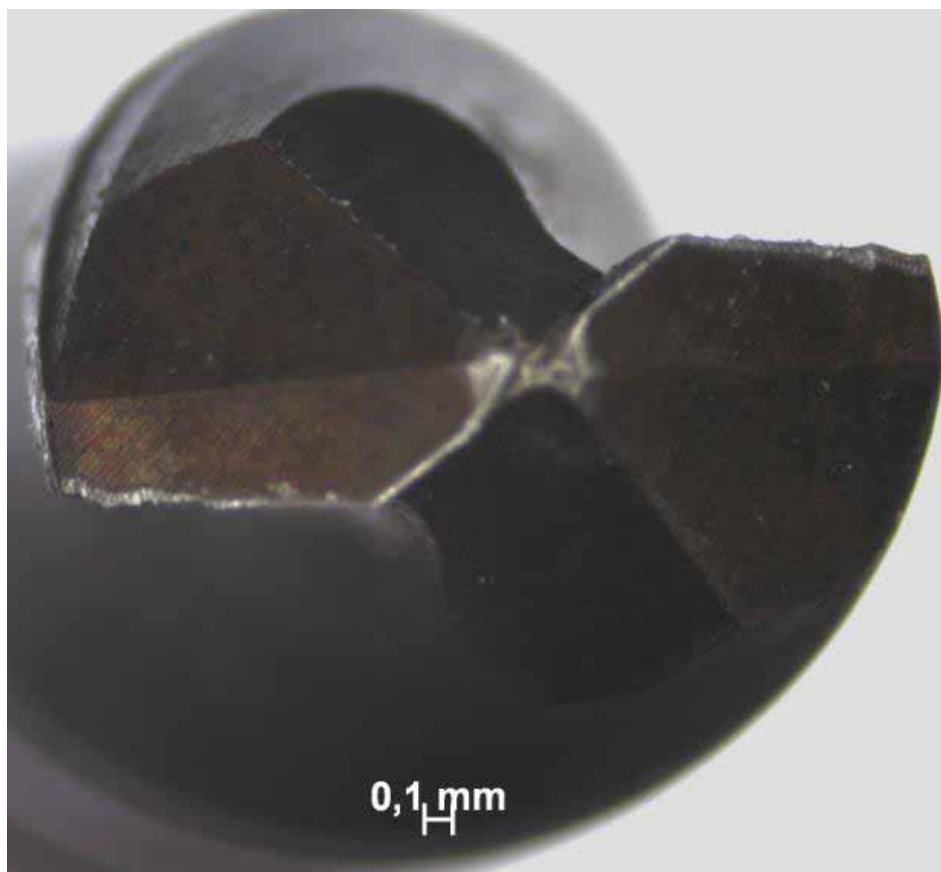
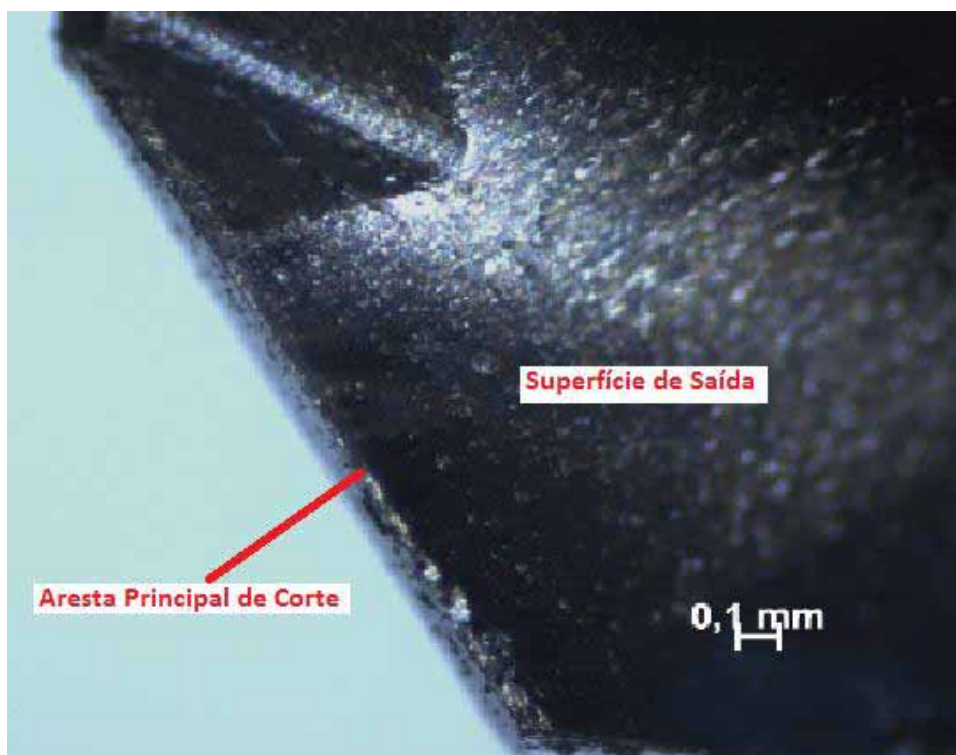


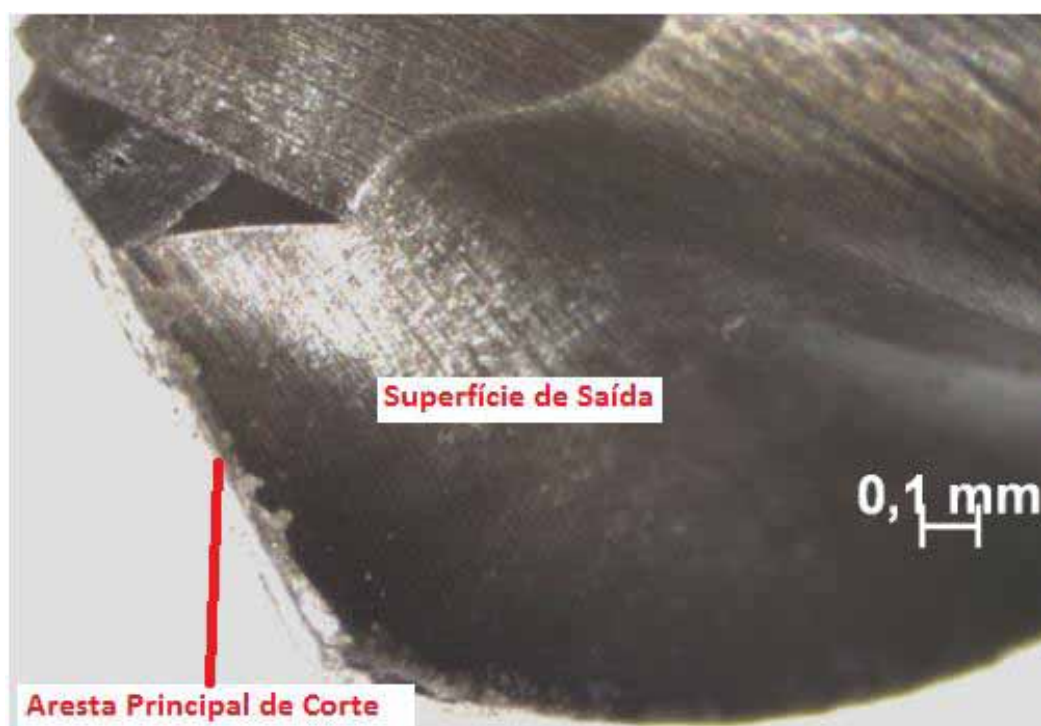
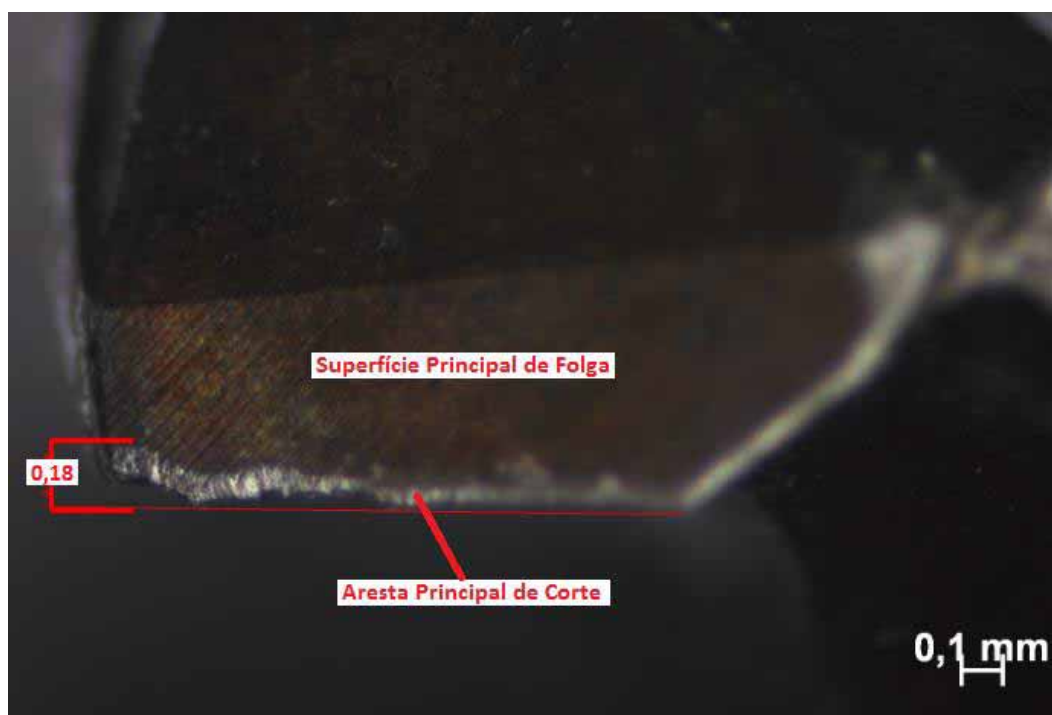
Quadro 5.12 - Sequência de fotos da broca de metal duro, à seco, sem pré-furos, aos 1200mm.



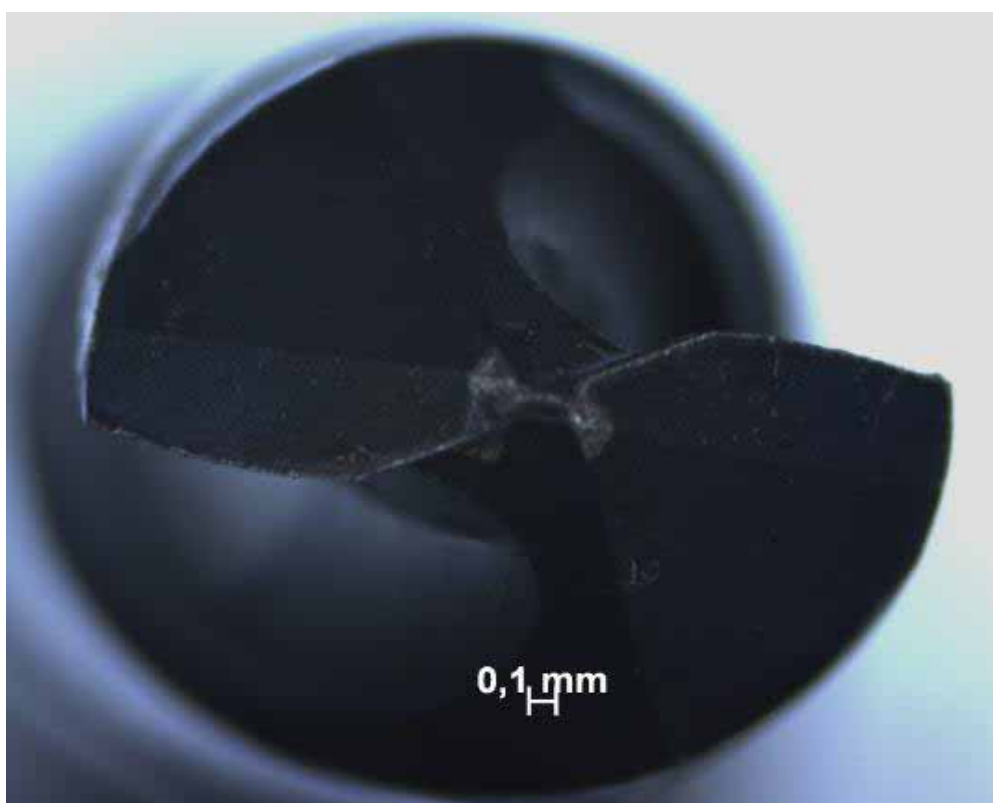


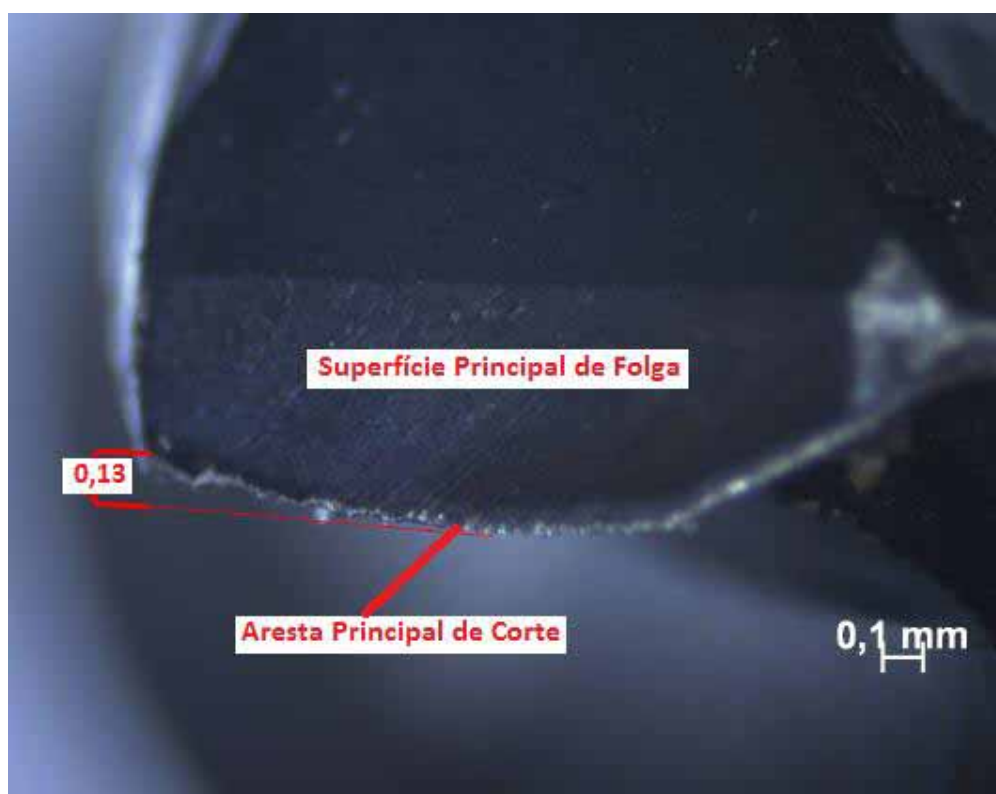
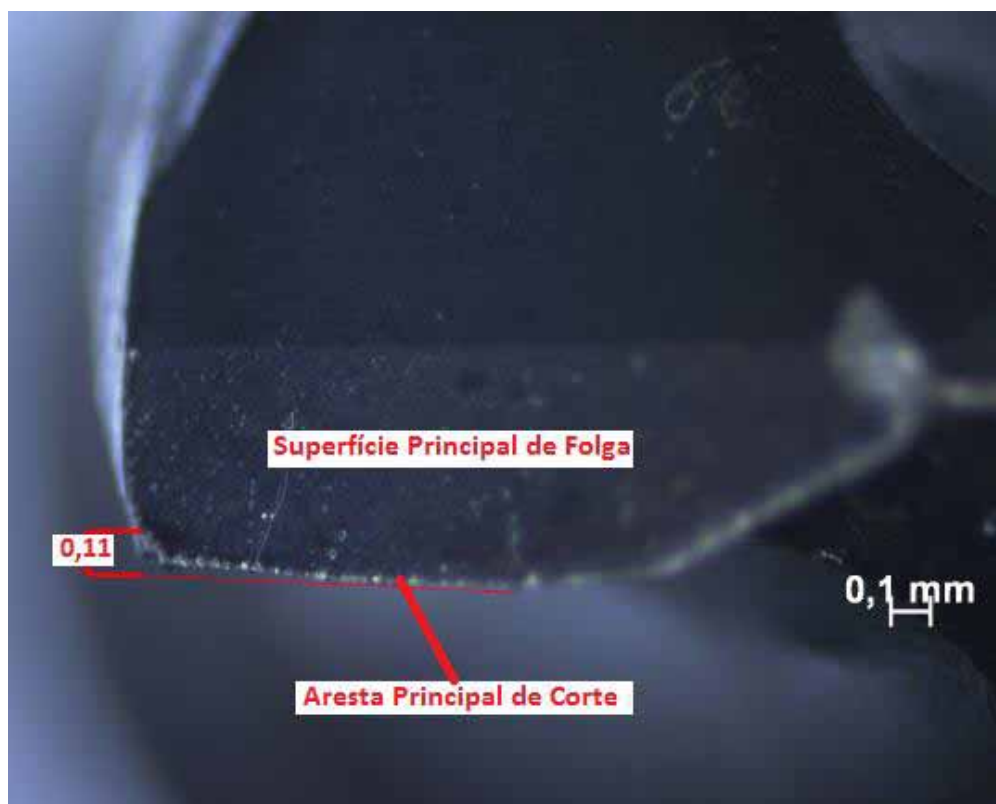
Quadro 5.13 - Sequência de fotos da broca de aço rápido sinterizado, à seco, sem pré-furos, aos 1200mm.

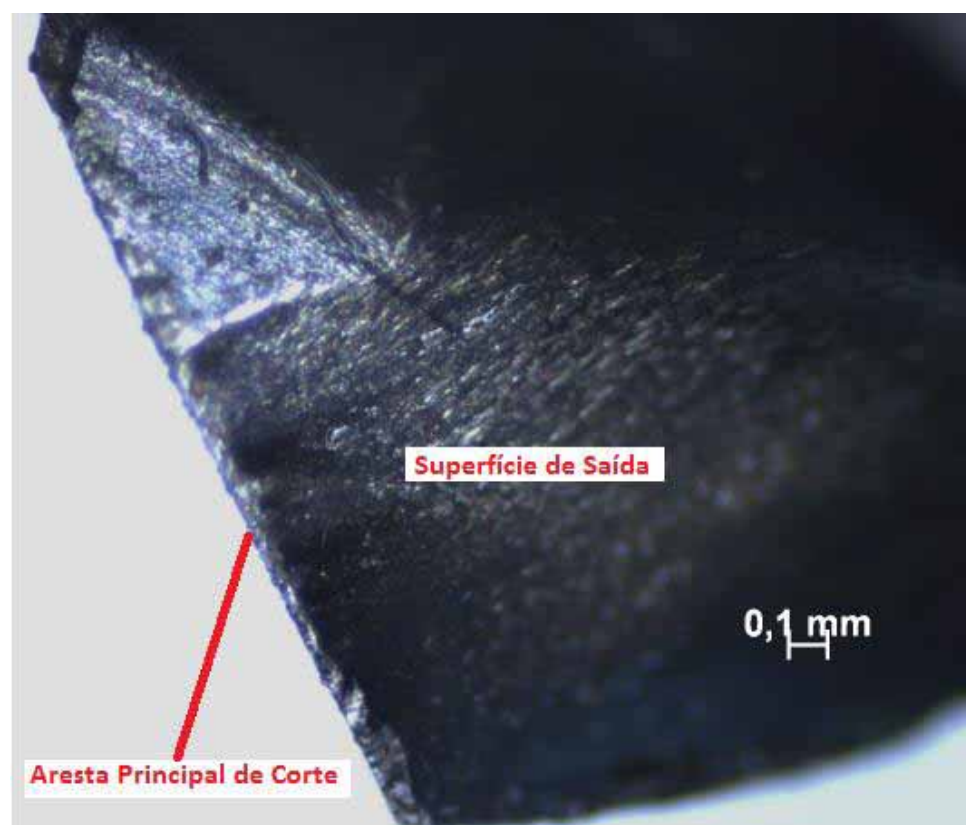
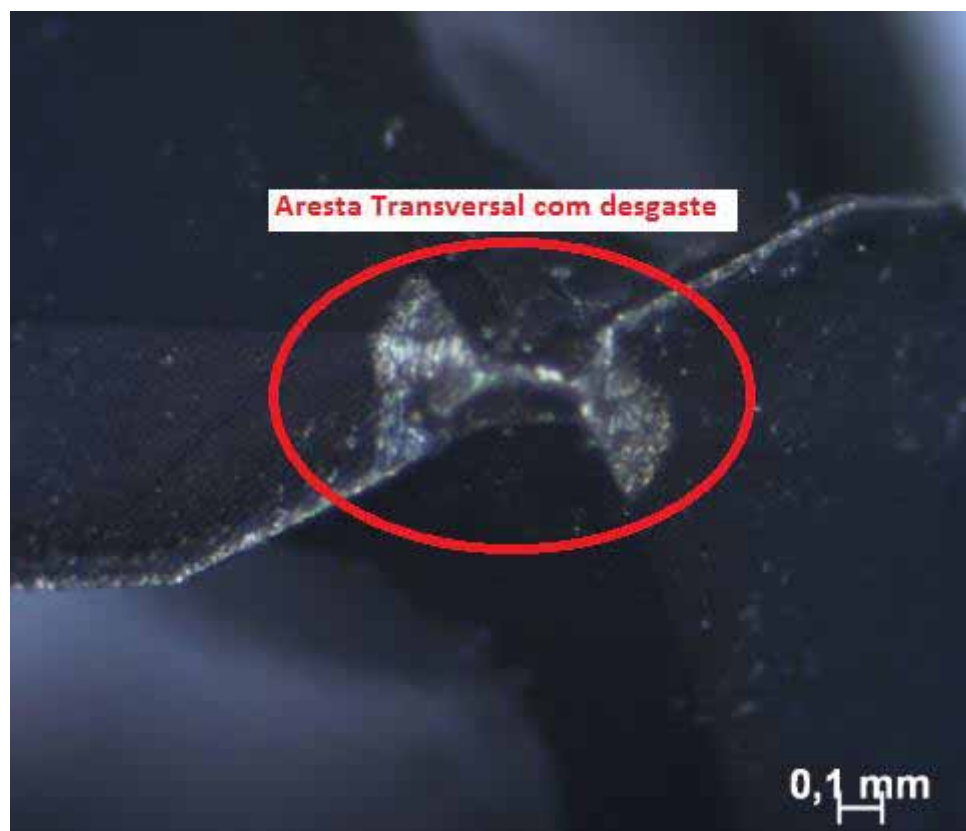


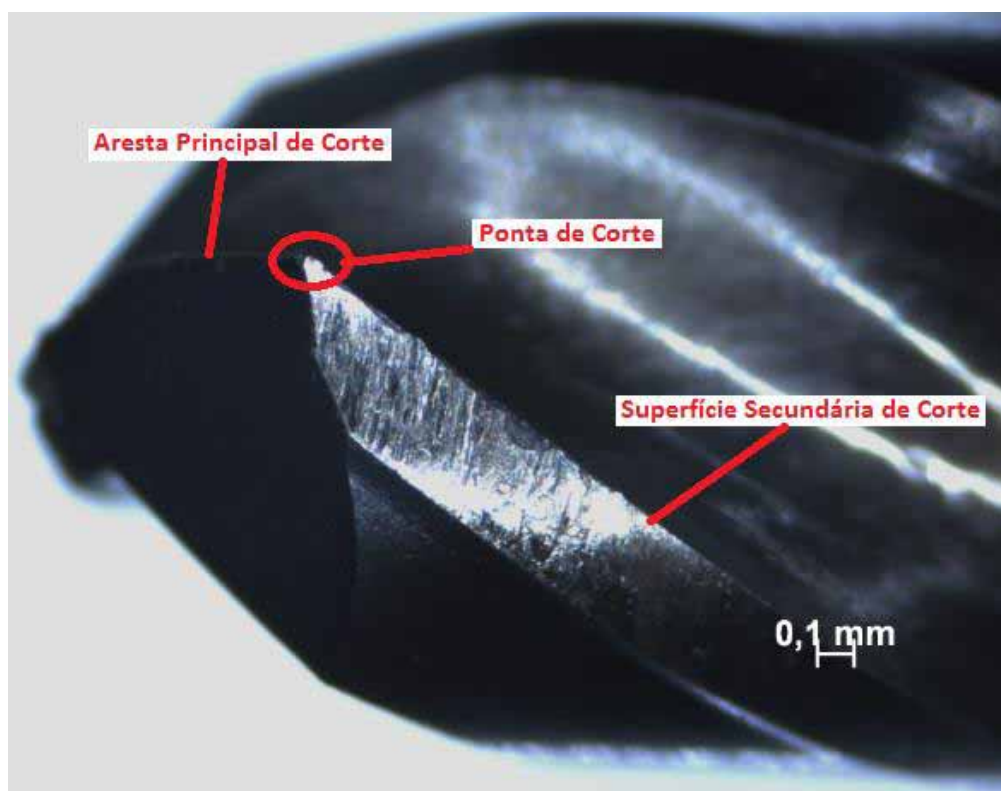
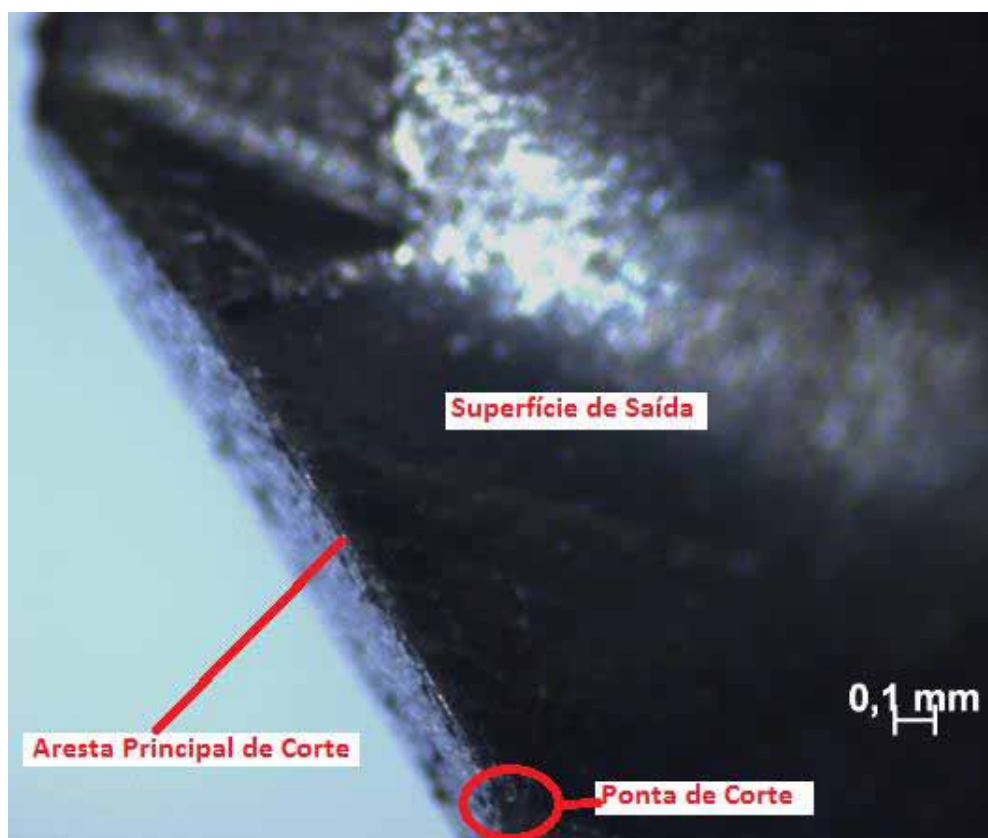


Quadro 5.14 - Sequência de fotos da broca de metal duro, à seco, sem pré-furos, aos 2000mm.





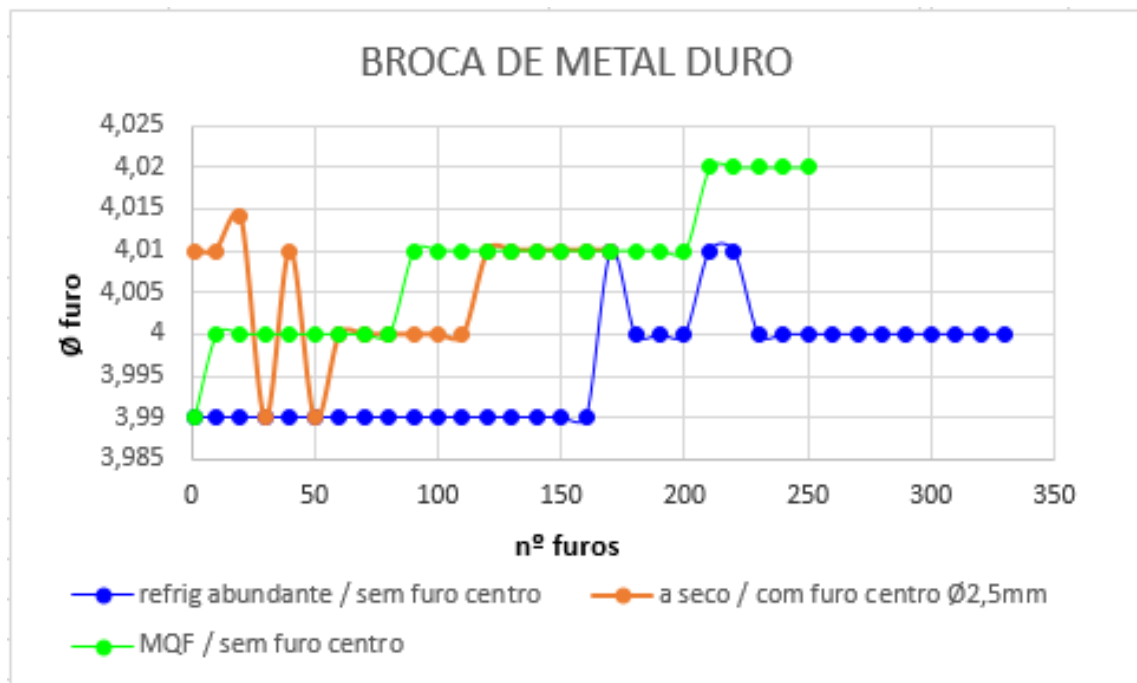


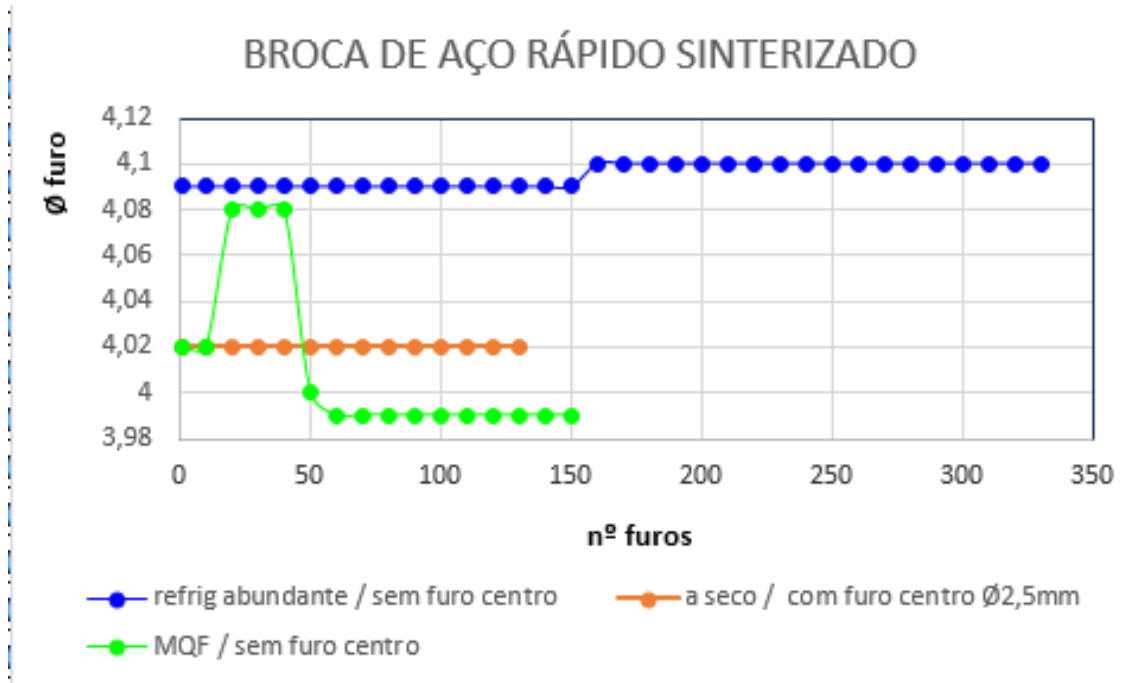


5.2.5 Resultados dos diâmetros

As ferramentas utilizadas nos testes foram fabricadas com tolerância h8, isto é, com mínima de 0,012 e máxima 0,00 e a tolerância de furo é H12, mais precisamente de 0,00mm a 0,120. Com estes parâmetros, os furos foram todos medidos com pinos padrão e, surpreendentemente, os resultados finais demonstraram pouquíssimas variações nos diâmetros atestando que os inúmeros desgastes nas mais variadas profundidades não foram suficientes para comprometer a dimensão final dos furos. A maioria dos furos apresentaram dimensões muito mais na mínima do permissível atribuindo uma segurança no que diz respeito ao quesito diâmetro, permitindo uma possível continuidade dos testes se visto somente por este prima. Fator que pode chamar a atenção é a constatação de medições de diâmetros abaixo de 4mm, o que pode ser explicado pela condição de fabricação da broca em questão ter sido fabricada com diâmetro abaixo de 4mm, mas sempre respeitando a tolerância h8.

Quadro 5.15 – Resultados dos diâmetros da broca de metal duro



Quadro 5.16 – Resultados dos diâmetros da broca de aço rápido sinterizado

5.2.6 Quadro Resumo de desgaste

Resumidamente, segue abaixo um quadro comparativo de desgaste das brocas em função do comprimento de furação realizado para cada condição proposta e que permite conclusões mais explícitas.

Quadro 5.17 – Resultados dos desgastes em função dos comprimentos de corte.

Condição	BROCA METAL DURO			BROCA AÇO RÁPIDO SINTERIZADO		
	Total usinado (mm)	desgaste (mm)	desgaste 0,1mm (°)	Total usinado (mm)	desgaste (mm)	desgaste 0,1mm (°)
Refrigeração abundante e sem pré-furo	2640	0,00	-	2640	0,11	2640
Sem refrigeração e sem pré-furo	1620	0,07	quebrou antes	50	n/c	quebrou antes (3º furo)
Sem refrigeração e com pré-furo 2,5mm	1360	0,35	1200	1072	0,11	1000
MQL sem pré-furo	2000	0,11	2000	1200	0,18	400

(°) Condição ao atingir 0,1mm de desgaste em uma das arestas principais de corte

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento desta dissertação permitiu, na comparação de uma broca de metal duro e uma broca de aço rápido sinterizado, ambas com diâmetro 4mm e usinando titânio 6Al4V em parâmetros de corte definidos através de literatura técnica específica, a definição clara do melhor aproveitamento entre ambas para, praticamente, todas as condições impostas para avaliação das mesmas. Inicialmente, a aplicação do método de Análise do Modo e Efeito de Falha preventivamente ao processo de furação, permitiu que este pudesse ocorrer sem qualquer transtorno técnico pois todas as hipóteses de possíveis discrepâncias foram detectadas e solucionadas. Por todo o ocorrido, é possível afirmar que a broca de metal duro é melhor aproveitada na condição de refrigeração em abundância pois não apresentou desgaste, ou seja, atingiu 2640mm sem praticamente apresentar alterações nas arestas principais de corte e aresta transversal sendo possível a continuidade deste processo sem qualquer ônus ao teste, diferentemente da broca de aço rápido sinterizado, que atingiu 0,11mm nas arestas principais de corte e também mostrou-se bastante afetada na aresta transversal, fatos estes que não impedem a continuidade dos testes pois o resultado final dos diâmetros não ultrapassaram a tolerância H12.

Para a usinagem sem refrigeração e sem pré-furos, considerada a condição mais arrojada executada, ficou bastante claro que a broca de aço rápido sinterizado não tem a menor condição de furação pois, ao atingir somente 50mm, houve o rompimento desta. O metal duro, apresentou uma vida de 1620mm até o rompimento e, se tiver uma situação hipotética em que não haja qualquer refrigeração, somente o metal duro poderá eventualmente apresentar um resultado menos ruim.

Para a condição de furação sem refrigeração e com pré-furos diâmetro 2,5mm, o comportamento da broca de aço rápido atingiu 800mm até apresentar o desgaste de 0,1mm e ficou aquém da broca de metal duro que atingiu 1072mm ou seja, cerca de 25% a mais. Assim, é possível concluir que, nas proposições feitas nesta etapa, a broca de metal duro é mais vantajosa.

Finalmente, na condição da Mínima Quantidade de Lubrificação, a broca de metal duro também mostrou-se mais eficaz em relação ao aço rápido pelos resultados apresentados.

Dentre todos os testes realizados ficou bastante claro que a refrigeração abundante é a que mais possibilita o aumento da vida útil da ferramenta, para ambos materiais de brocas escolhidos, ficando num plano abaixo a refrigeração em Mínima Quantidade de Lubrificação.

É importante frisar que todas as definições de comprimento de furação para interrupção e coleta de amostras de cavacos e medições dos desgastes foram empíricos e variaram conforme o comportamento na primeira execução de furos, possibilitando redefinição da quantidade de furos.

Outra definição não menos importante é que, em função da pouca quantidade de material disponível para os testes, não houve qualquer repetição destes em quaisquer das condições definidas.

A procura por trabalhos similares a este foram escassos pois aqueles realizados são bem específicos e com muita aplicação em torneamento e bem diferentes da proposta deste, principalmente pela adoção de brocas diâmetro 4mm, sendo uma dimensão muito pequena. Mesmo assim, tese com abordagem na Mínima Quantidade de Lubrificação foi apresentada na Universidade Federal de Santa Catarina e, apesar deste ter sido em torneamento, um fator muito importante levantado e que poderia ser influente em nossos testes é a profundidade de furação, isto é, com a Mínima Quantidade de Lubrificação, sem a propositura de uso de broca com canais de refrigeração interna, talvez fosse recomendável a profundidade máxima de $1 \times$ o diâmetro pois, além disto, a possibilidade de penetração do fluido é bem mais improvável.

De acordo com o artigo apresentado no 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação intitulado “Revisão da Literatura sobre a Usinabilidade do Titânio e suas ligas”, a usinagem do titânio pode obter melhores resultados ao adotar algumas técnicas de refrigeração como o arrefecimento de alta pressão, onde um jato de alta velocidade de fluido de corte é direcionado na interface material-ferramenta aliviando o calor na região de corte, além de ajudar na remoção dos cavacos. Também pode ser recomendável o uso de arrefecimento criogênico que é um excelente método adotado atualmente em processos de usinagem para a diminuição temperatura na região de corte (Ezugwu, 2003).

O fato é que os trabalhos abordados sobre o assunto são mais voltados à usinagem por torneamento, mas, mesmo aqueles que referenciam furação em titânio, orientam para a variabilidade das possibilidades de arrefecimento, isto é, dependendo dos parâmetros de corte adotados no processo, relação da profundidade de corte $\times$ diâmetro da broca, pode-se adotar modos de lubrificação que se adaptem melhor às condições iniciais.

Para trabalhos futuros, é recomendável submeter brocas com profundidades de furação maiores e em outras condições de refrigeração, além de diâmetros maiores ao adotado nesta dissertação, ampliando o campo de possibilidades.

REFERÊNCIAS

- ABNT, **NBR 6162**, 1989.
- ABNT, **ISO 3685**, 1993.
- **ASM HANDBOOK - Machining** - Volume 16, Revised by R.W. Breitzig, INCO Alloys International, 1990.
- BAKER, R. D., **Ceramic cutting tools: Application guidelines**. Carbide Tool, 1981.
- BRINKSMEIER, E.; WALTER, A.; JANSSEN, R.; DIERSEN, P. **Aspects of cooling lubrication reduction in machining advanced materials**, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 213, Part B. 1999.
- CHILDS, T.; MAEKAWA, KTSUHIRO; OBIKAWA, TOSHIYUKI, YAMANE, YASUO, **Metal machining theory and applications**. New York, 1ª ed, editora John Wiley & Sons Inc, 2000.
- DAVIM, J. P., **Machining of Hard Materials**, 1ª ed, editora Springer, 2011.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: 7ª. Ed., Art Lîber Editora, 2010.
- DA SILVA, A. G. P., ALVES JUNIOR, C., **A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização**, Cerâmica; volume 44, número 290, páginas 225-232. Dezembro 1998.
- DINIZ, A. E.; NORITOMI, P. Y. **Influência dos parâmetros de corte na rugosidade**. Máquinas e Metais. São Paulo, v. 35 (391), 1998,
- EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. **An overview of the machinability of aeroengine alloys**. Journal of Materials Processing Technology, v.134,(2), 2003.
- EZUGWU, E. O.; TANG, S. H., **Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with ceramic tools**. Journal of Materials Processing Technology, n.55, 1995.
- ROMEIRO FILHO, E., FERREIRA, C. V., MIGUEL, P. A. C., GOUVINHAS, R. P., NAVEIRO, R. M., **Projeto do Produto**, 1ª ed, editora Elsevier, 2011

- FERRARESI, D., **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: 1ª ed. Edgard Blucher Ltda, 10ª reimpressão 2000.
- GERD L., WILLIAMS, C. J., **Titanium**, 2ª ed., editora Springer, 2010.
- HEISEL, U.; LUTZ, D.; WASSMER, R.; WALTER, U., **A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte**. Máquinas e Metais, n.386, fev. 1998.
- HONG, H.T., CHOU, T. L., **Modelling of tool/chip interface temperature distribution in metal cutting**. International Journal Mechanical Science 36, 1994
- JEELANI, S.; RAMAKRISHNAN, K., **Surface damage in machining titanium 6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy**. Journal of Materials Science, v.20,1985.
- JOSHI, V. A. N., **Titanium alloy- Na Atlas of Structures and Fracture Features**, 1ª ed, editora Taylor & Francis, 2006.
- JUNEJA, SEKHON, G.S, SETH, NITIN, **Fundamentals of Metal Cutting and Machine tools**, 2ª ed, editora New AgeInternacional Publishers, 2005.
- KALPAKJAN, S. **Manufacturing Processes for Engineering Materials**, 2nd ed., Addison- Wesley, Reading, MA, 1991.
- KLOCKE, F.; GERSCHWILER, W., **Advanced machining of titanium and nickelbase alloys**, in: Advanced Manufacturing Systems and Technology, CISM Courses and Lecture No. 372, Springer, Wien, 1996.
- KRAMER, B.M. **On tool materials for high speed machining**, J. Eng. Ind. 109, 1987.
- LI, L.; HE, N.; WANG, M.; WANG, Z. G., **High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts**. Ournal of Materials Processing Technology 129, 2002.
- LOPEZ DE LACALLE, L.N., LLORENTE, J.I., SANCHEZ, J.A. **Improving the cutting Parameters the machining of Nickel and Titanium alloys**, in Annals of the CIRP, v. 47, 1998.
- LÓPEZ de LACALLE, L.N.; ANGULO, C.; LAMIKIZ, A.; SÁNCHEZ, J.A, **Journal Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling**. Journal of Materials Processing Technology, n. 172, p. 11-15, 2006.
- LIGHTER, D. E., FAIR, D. E., **Quality Management and Health Care, - Principles and Methods**, 2ª ed, editora Jones and Bartlett Publishers, 2004.

- EZUGWU, E.O. and WANG, Z.M., 2003, “**Titanium Alloys and their Machinability – a review**”, Journal of Material Processing Technology, Vol. 68, pp. 262-274.
- LÓPEZ de LACALLE, L.N.; ANGULO, C.; LAMIKIZ, A.; SÁNCHEZ, J.A., **Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling. Journal of Materials Processing Technology**, n. 172, p. 11-15, 2006.
- LIAO, Y.S.; LIN, H.M., **Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, n. 47, p. 1660-1666, 2007.
- MACHADO, A. R.; SILVA, M. B., **Usinagem dos metais**. 4. Ed. Editora da Universidade Federal de Uberlândia, 1999.
- MATTHEW JR, D., **Titanium**, 2ª ed, editora ASM Internacional, 2007.
- MACHADO, A. R., ABRAÃO, A. M., COELHO, R. T., DA SILVA, M. B., **Teoria da Usinagem dos Materiais** , 2ª ed., editora Blucher, 2011.
- METALS HANDBOOK Desk Edition, 2nd edition, **ASM International Handbook Committee**, edited by Joseph R. Davis, 1998.
- RIBEIRO, M. V.; MOREIRA, M. R. V.; FERREIRA, J. R.; **Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining**. Journal of Materials Processing Technology, v. 143, 2003.
- REMY A., GAY, M, GONTHIER R, **Materiais**, 2ª ed, editora Hemus, 2002.
- RANDAL M. GERMAN, **Liquid Phase Sintering**, 1ª ed, editora Plenum Press, New York, 1985.
- REDDY, N.S.K.; RAO, P.V, **Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, n. 46, p. 189-198, 2006.
- STEMMER, C. R., **Ferramentas de corte I. Florianópolis**, 6ª ed, editora da UFSC, 2005.
- STEMMER, C. R., **Ferramentas de corte II. Florianópolis**, 6ª ed, editora da UFSC, 2005.
- SHAW, M. C, **Metal Cutting Principles Oxford Publication**, Oxford Science Publications, Claredon Press, 2005.
- SALES, W. F., **Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte**. Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, MG. Tese de doutorado, 1999.

- STEPHENSON D. A., AGAPIOU, J. S., **Metal Cutting Theory and Practice**, 2^a ed, editora Taylor & Francis, 2006.
- SANDVIK COROMANT, **Manual Técnico de Usinagem**, AB Sandvik Coromant, 2005.
- DA SILVA, L.R.; BIANCHI, E.C.; FUSSE, R.Y.; CATAI, R.E, **ML in grinding**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, n. 47, p. 412-418, 2007;
- VIGNEAU, J., **Obtendo alta produtividade na usinagem de ligas de titânio e superligas**. Máquinas e Metais, v.32,1997.
- VIKTOR P. A., **Geometry of Single-Point Turning Tools and Drills**, 1^a ed, editora Springer, 2010.
- YANG, Y.; CHUANG, M.; LIN, S, **Optimization of dry machining parameters for highpurity graphite in end milling process via design of experiments methods**. Journal of Materials Processing Technology, n. 209, p. 4395-4400, 2009.
- **Manual de Ferramentas de Corte**, Embraer, 2004.
- **Manual de Ferramentas de Corte**, AKF, 2002.