

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

PATRÍCIA SPERBER DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO COM E SEM
APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DE NITRETO DE TITÂNIO (TiN)

Belo Horizonte
2020

PATRÍCIA SPERBER DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO COM E SEM
APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DE NITRETO DE TITÂNIO (TiN)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

Belo Horizonte

2020

PATRÍCIA SPERBER DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO COM E SEM
APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DE NITRETO DE TITÂNIO (TiN)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Apresentado em: 03/12/2020

BANCA EXAMINADORA

.....
Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

.....
Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

.....
Prof. Me. Paulo Roberto de Souza

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sua graça todos os dias.

Agradeço aos meus familiares, meu pai David, minha mãe Aretuza, minha irmã Ana e minha avó Nilza, por todo o apoio, amor e carinho incondicional durante toda minha vida.

Agradeço ao meu noivo Samuel por seu companheirismo, apoio e motivação até nos dias difíceis.

Agradeço ao meu orientador Prof. Carlos, por suas orientações, ensinamentos e todo o suporte principalmente neste período de pandemia.

Também agradeço ao CEFET-MG, que tornou esse momento possível, pela educação que obtive através da instituição, pela sua infraestrutura e pelo material fornecido para os ensaios realizados.

RESUMO

A usinagem é um processo amplamente utilizado na indústria e especialmente a furação que representa de 20% a 25% de todo o processo. Portanto, a broca tem um papel fundamental e, por causa disso, é essencial continuar pesquisando como aprimorá-la. Os revestimentos já estão sendo utilizados para este fim e estão contribuindo para o aumento de produtividade. Este trabalho foi focado no estudo do desempenho obtido pelas brocas de aço rápido revestidas com filme de nitreto de titânio (TiN) e pelas brocas de aço rápido sem revestimento. Para isto, ambos os tipos de brocas foram utilizados em diferentes condições. Então foi avaliado os mecanismos de desgastes sofridos através da análise da rugosidade e das imagens obtidas por microscópio. Os resultados obtidos indicam que as brocas revestidas apresentaram uma maior vida útil especialmente nas condições em que não foram usadas fluido de corte.

Palavras-chave: usinagem, furação, mecanismos de desgaste, revestimento de nitreto de titânio (TiN).

ABSTRACT

The machining is a process largely used in industry and specially the drilling which represents 20% to 25% from all processes. So, the drill has a key role and, because of that, it's essential to continue researching how to improve it. The coatings are already being used for this purpose and are contributing to increase productivity. This study was focused on the analysis of the performance obtained by high speed steel drills coated with titanium nitride and by uncoated high speed steel drills. For this, both types of drills were used in different conditions. Then, was evaluated the wear mechanisms through the analysis of roughness and images obtained by microscope. The results obtained indicate that the coated drills had a longer tool life, especially in conditions where cutting fluid was not used.

Keywords: machining, drilling, wear mechanisms, titanium nitride coating

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Movimentos em um processo de furação	13
Figura 2 - Profundidade de corte no processo de furação	14
Figura 3 - Broca helicoidal	14
Figura 4 - Partes integrantes de uma broca helicoidal	15
Figura 5 - Formas de desgastes em uma broca helicoidal	18
Figura 6 - Diagrama dos mecanismos de desgaste em função da temperatura	19
Figura 7 - Mecanismos de desgastes em ferramentas de corte	20
Figura 8 - Fluxograma do experimento	25
Figura 9 - Imagem do equipamento ROMI Discovery 560	26
Figura 10 - Fixação da peça e broca	27
Figura 11 - Dimensões corpo de prova	28
Figura 12 - Amostra 35/TiN/N	32
Figura 13 - Amostra 35/Sem/N	32
Figura 14 - Amostra 30/TiN/S	33
Figura 15 - Amostra 15/TiN/S	33
Figura 16 - Amostra 30/Sem/S	34
Figura 17 - Amostra 15/Sem/S	34
Figura 18 - Amostra 30/Sem/N	35
Figura 19 - Amostra 15/Sem/N	36
Figura 20 - Amostra 30/TiN/N	36
Figura 21 - Amostra 15/TiN/N	37
Figura 22 - Análise de DRX	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos principais tipos de aço rápido	17
Tabela 2 - Propriedades dos revestimentos de TiN, TiCN e TiAlN	23
Tabela 3 - Planejamento dos ensaios	26
Tabela 4 - Configurações do rugosímetro	28
Tabela 5 - Quantidade de furos	30
Tabela 6 - Rugosidade aferida nos ensaios	31
Quadro 1 - Dados de varredura do DRX	29

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Usinagem	12
2.1.1 Processo de Furação	12
2.1.2 Parâmetros de Corte	12
2.1.2.1 Velocidade de Corte	13
2.1.2.2 Avanço	13
2.1.2.3 Profundidade de Corte	13
2.2 Brocas Helicoidais	14
2.2.1 Partes e Ângulos das Brocas Helicoidais	15
2.3 Materiais para Ferramenta de Corte	16
2.3.1 Aço Rápido	16
2.3.2 Metal Duro	17
2.4 Mecanismo de Desgaste das Ferramentas de Corte	17
2.4.1 Vida Útil das Ferramentas de Corte	22
2.5 Revestimentos para Ferramenta de Corte	22
2.5.1 Técnicas de Revestimento	22
2.5.2 Tipos de Revestimento	23
3. METODOLOGIA	24
3.1 Planejamento dos Ensaios	25
3.2 Máquina Ferramenta	25
3.3 Ferramenta de Corte	27
3.4 Usinagem do Corpo de Prova	27
3.5 Caracterização das Amostras	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 Quantidade de Furos por Amostra	30
4.2 Rugosidade	31
4.3 Desgaste	31
4.4 Difração de Raios-X	37
5. CONCLUSÃO	39

1. INTRODUÇÃO

No âmbito industrial, mais especificamente nos processos que envolvem algum tipo de usinagem, a furação com brocas helicoidais está presente na faixa de 20% a 25% do total destes processos. Sendo assim, as brocas helicoidais têm um papel fundamental e por isso estudos e desenvolvimentos para esta ferramenta de corte são relevantes e podem agregar valor para a indústria tornando os processos mais eficientes (CALZA 2007).

Para o processo de usinagem, o desgaste das ferramentas de corte pode ser considerado um problema pois implica no controle dimensional e também na quantidade de paradas para troca de ferramenta, sendo assim, este fator tem influência direta na produtividade (CALZA 2007). Por isto, nos últimos anos, as brocas estão recebendo melhorias especialmente na área de revestimentos e o revestimento de TiN é um dos destaques por apresentar um bom balanço nas propriedades de dureza, tenacidade, aderência (sobre aço e metal duro), estabilidade química, estabilidade térmica e coeficiente de atrito (MIRANDA 2003).

1.1 Objetivos

Geral

Avaliar a vida útil da ferramenta na furação com broca de HSS x Broca de HSS+TiN.

Específicos

- Avaliar a influência da V_c na furação com brocas de HSS sem revestimento e com revestimento de TiN;
- Avaliar a influência da refrigeração na furação com brocas de HSS sem revestimento e com revestimento de TiN;
- Avaliar os mecanismos de desgaste gerados na ferramenta durante a furação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Usinagem

Conforme Machado (2009), a usinagem é um processo no qual se produzem peças removendo-se o excesso de material na forma de cavaco. Este processo descrito de forma simples é ao mesmo tempo complexo pois requer a determinação de imprevisíveis condições de corte e simples pois uma vez determinada estas condições, o cavaco se forma corretamente. As condições ideais de corte são aquelas que produzem peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível.

2.1.1 Processo de Furação

O processo de furação é definido por Machado (2009) como um processo de usinagem que apresenta movimento rotativo principal, ou seja, movimento de corte circular onde o movimento de avanço feito pela ferramenta é apenas na direção do seu eixo de rotação.

Com o objetivo de produzir furos, a furação é um dos processos de usinagem mais solicitados nas indústrias de manufatura. Tal processo possui algumas particularidades, tais como (BORK, 1995):

- A velocidade de corte não é constante. Na periferia a mesma se torna máxima e no centro da ferramenta ela se torna zero. Isto implica em esforços variados e assim, variados mecanismos de formação de cavaco ao longo dos gumes;
- Difícil transporte de cavacos;
- As quinas da broca são susceptíveis ao desgaste;
- Atrito pronunciado entre as guias e a parede do furo.

2.1.2 Parâmetros de Corte

Segundo Bork (1995), tais grandezas de corte devem ser ajustadas de forma direta ou indireta para que ocorra uma eficiente usinagem e correta retirada de cavaco.

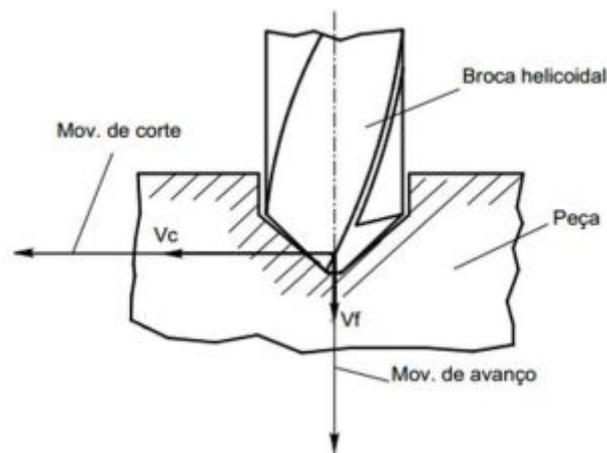
2.1.2.1 Velocidade de Corte

A velocidade de corte é a velocidade instantânea no ponto de referência da aresta cortante, segundo uma direção e sentido de corte (FERRARESI, 2012). Sendo assim, no processo de furação, esta grandeza é dependente do diâmetro da broca. Esta grandeza é diretamente responsável pelo aumento de temperatura no sistema ferramenta/peça e por isto ela é de grande influência no desgaste da ferramenta (MACHADO, 2009).

2.1.2.2 Avanço

O avanço é o percurso de avanço em cada volta. Já o movimento de avanço, durante as várias revoluções ou cursos dos processos de usinagem e juntamente com o movimento de corte, origina um levantamento repetido ou contínuo de cavaco. Este movimento ocorre entre a peça e a aresta de corte. A direção de avanço se dá pela direção instantânea do movimento. E a velocidade de avanço se dá pela velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e o sentido de avanço (FERRARESI, 2012).

Figura 1 - Movimentos em um processo de furação



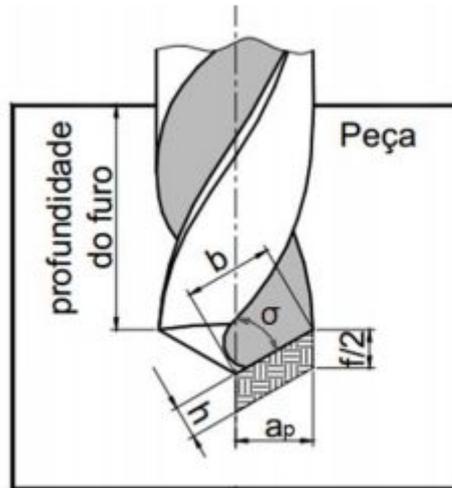
Fonte: Morand, 2016

2.1.2.3 Profundidade de Corte

A profundidade de corte se dá pela medição perpendicular ao plano de trabalho a profundidade -ou largura- de penetração da aresta principal de corte. Na furação, esta

grandeza corresponde à metade do diâmetro da broca e que quando multiplicada pelo avanço de corte resulta na área da seção de corte (FERRARESI, 2012).

Figura 2 - Profundidade de corte no processo de furação



Fonte: Morand, 2016

2.3 Brocas Helicoidais

No processo de furação, as brocas helicoidais são as principais ferramentas e elas são utilizadas nas operações de furos cilíndricos, pré-furados ou maciços. Ainda de acordo com Soares (1995), uma broca helicoidal compreende, simplificada, uma haste e uma parte cortante. Para a classificação são utilizados como parâmetros o tipo de material do qual são feitas, forma da haste, número de canais, sentido de corte, comprimento, diâmetro e geometria da ponta.

Figura 3 - Broca helicoidal



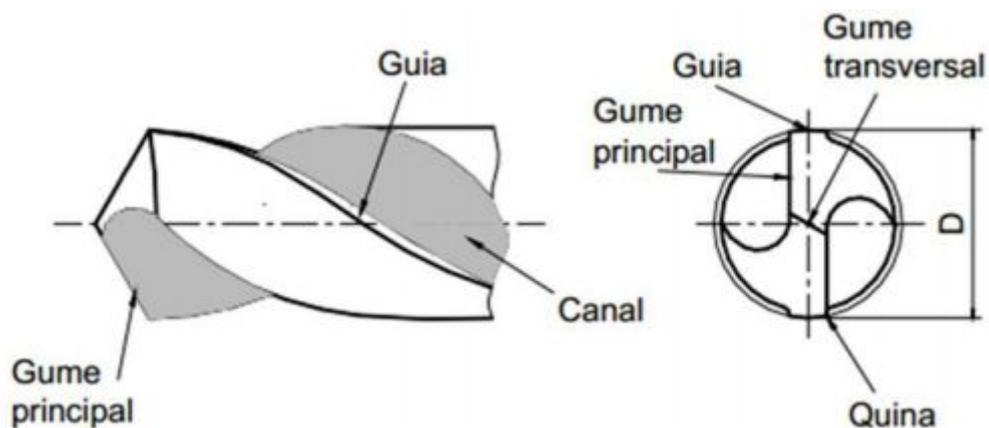
Fonte: Lopes, 2016

2.3.1 Partes e Ângulos das Brocas Helicoidais

Conforme citado por Morand (2016), as partes integrantes das brocas helicoidais definidas pela norma ABNT NBR ISO 5419:2009, podem ser descritas como:

- Haste: parte destinada à fixação da broca. Esta parte pode ser cônica ou cilíndrica;
- Diâmetro: diâmetro do envelope criado pela rotação das guias da broca;
- Núcleo: é parte no interior da broca que lhe confere rigidez e seu diâmetro equivale à um valor aproximado de 0,16 do diâmetro da broca;
- Arestas de corte principais: se localizam no sentido de corte da ferramenta e o ângulo entre elas é denominado ângulo de ponta, sendo geralmente igual a 118° de acordo com o plano de referência da ferramenta;
- Aresta transversal: aresta que liga as partes cortantes das arestas principais. O diâmetro do núcleo define o seu comprimento;

Figura 4 - Partes integrantes de uma broca helicoidal



Fonte: Morand, 2016

2.3 Materiais para Ferramenta de Corte

A usinagem é um processo em que as ferramentas de corte estão submetidas à condições de altas temperaturas e pressões devido ao atrito com a superfície a ser usinada e com o cavaco proveniente desta operação. Sendo assim, é fundamental a seleção de materiais para se definir o material da ferramenta de corte para uma usinagem eficiente. Tendo isto em vista, o material da ferramenta deve apresentar as seguintes propriedades (SOUSA, 2011):

- Dureza à quente: por normalmente ser utilizada em temperaturas elevadas, esta propriedade confere à ferramenta resistência ao desgaste e resistência mecânica nas temperaturas de trabalho;
- Tenacidade: no processo a ferramenta sofre choques mecânicos sendo assim a tenacidade lhe confere resistência a estes esforços comuns nas operações de usinagem evitando avarias;
- Resistência ao desgaste: visando principalmente resistência à abrasão devido ao atrito inerente ao processo, esta propriedade é fundamental se combinada à dureza à quente;
- Estabilidade química: mesmo à altas temperaturas é importante que a ferramenta não sofra desgaste por difusão.

2.3.1 Aço Rápidos

O aço rápido é um aço de alta liga dos seguintes elementos: tungstênio (W), molibdênio (Mo), cromo (Cr), vanádio (V), cobalto (Co) e nióbio (Nb). Este é um material que além de possuir elevada dureza à quente e elevada tenacidade (se comparado com os aços carbono utilizados em ferramentas), também suporta temperaturas de corte da ordem de 600°C.

Há no mercado um grupo variado de aços rápidos e estes são classificados em dois grupos segundo a AISI e SAE: os aços rápidos ao tungstênio designados pela letra T, e os ao molibdênio M que, por sua vez, são subdivididos em subcategorias contendo Co, W-Co e MoCo respectivamente (MARQUES, 2012). A tabela a seguir mostra a classificação dos aços rápidos com sua correspondente composição.

Tabela 1 - Composição dos principais tipos de aço rápido

Tipo	C	W	Mo	Cr	V	Co
T1	0,7	18	-	4	1	-
T4	0,75	18	-	4	1	5
T6	0,8	20	-	4	2	12
M2	0,8	6	5	4	2	-
M4	1,3	6	5	4	4	-
M15	1,55	6	3	5	5	5
M42	1,08	1,5	9,5	4	1,1	8

Fonte: Marques, 2012

2.3.2 Metal Duro

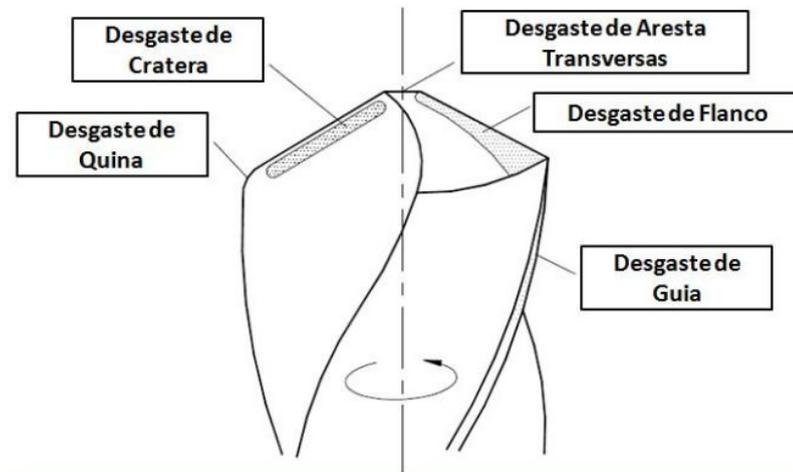
Pelo processo de fabricação chamado metalurgia do pó o metal duro é produzido. Através da prensagem do pó ou por técnicas de molde de injeção, o corpo do metal é formado. Após esta etapa, o mesmo é sinterizado até chegar na densidade final.

O metal duro é constituído por partículas de carbonetos de tungstênio (WC), o que lhe confere alta dureza à quente, resistência ao desgaste e à compressão. Ele também é constituído por um ligante sinterizado rico em cobalto (Co) que tem como função ligar as partículas de WC entre si e assim formar um material além de duro, resistente ao desgaste (MARQUES, 2012).

2.4 Mecanismo de Desgaste das Ferramentas de Corte

Uma ferramenta de corte sempre estará sujeita ao desgaste mesmo tendo tenacidade o suficiente para evitar uma avaria. Isto ocorre pois durante a utilização da ferramenta ela está sujeita a um desgaste progressivo em suas superfícies (MACHADO, 2009). Na figura 5, a seguir, é indicado os tipos de desgastes comumente encontrados em uma broca helicoidal:

Figura 5 - Formas de desgastes em uma broca helicoidal



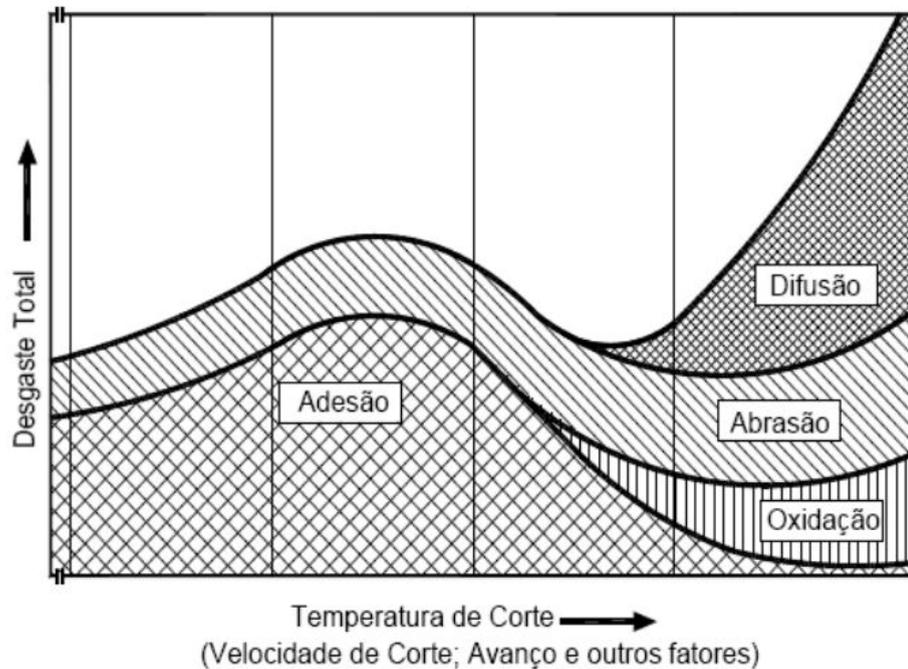
Fonte: Adaptação realizada por Souza (2011).

Conforme Machado (2009), todas as formas de desgastes estarão presentes nas ferramentas de corte porém deva existir a prevalência de uma delas. E para quantificar estes desgastes, de acordo com a ISO 3685 (1977), os principais parâmetros são:

- Profundidade de cratera (KT);
- Desgaste de flanco médio (VB_B);
- Desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$);
- Desgaste de entalhe (VB_N).

No diagrama abaixo é representado os mecanismos de acordo com a temperatura de corte ou de qualquer parâmetro que a influencie, principalmente a velocidade de corte (MACHADO, 2009).

Figura 6 - Diagrama dos mecanismos de desgaste em função da temperatura

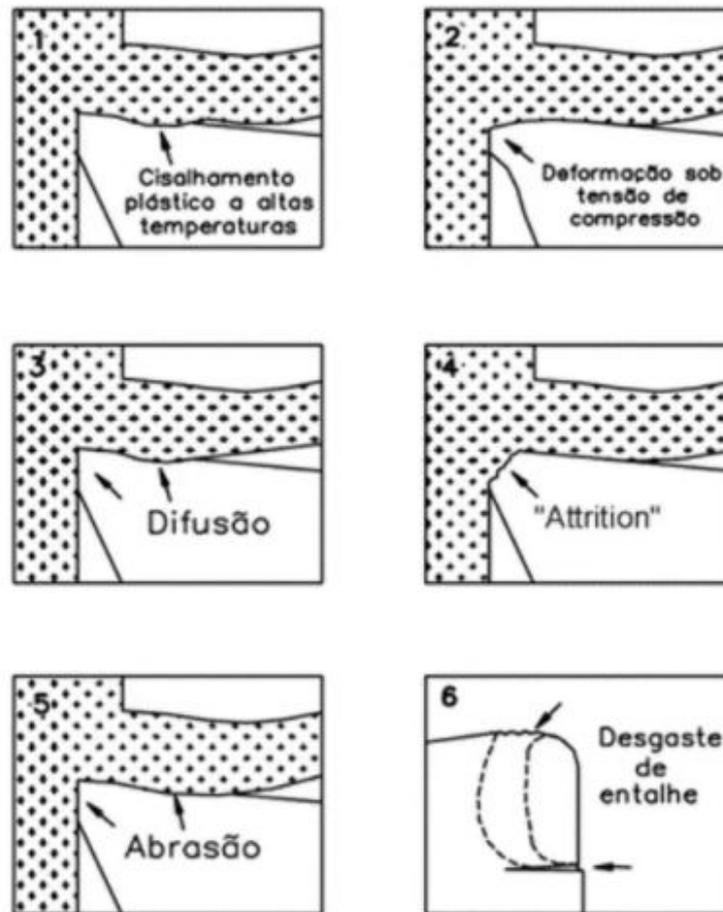


Fonte: Machado (2009)

Através do diagrama é possível perceber que para cada faixa de temperatura os mecanismos de desgaste têm diferentes participações. Em temperaturas mais baixas predomina o mecanismo de abrasão mas principalmente o mecanismo de adesão. Já em temperaturas mais altas o mecanismo de adesão é o que está menos presente e a presença do mecanismo de difusão cresce exponencialmente. Outro item importante de se observar é que o desgaste total aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura.

Na literatura há algumas variações nas classificações dos mecanismos de desgastes como observado por Machado (2009). A figura 7 sumariza os diferentes mecanismos.

Figura 7 - Mecanismos de desgastes em ferramentas de corte



Fonte: Machado (2009)

A seguir será descrito os mecanismos relatados na figura acima de acordo com Machado (2009).

- (1) Deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas: é um processo de destruição da ferramenta onde as tensões cisalhantes da interface ferramenta/cavaco são grandes suficientes para deformar plasticamente a superfície de saída. Com as altas temperaturas, a resistência ao escoamento nesta região é reduzida e assim, o material é cisalhado juntamente com o cavaco resultando em uma cratera;
- (2) Deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão: ocorre quando combinado altas tensões de compressão com altas temperaturas na superfície de saída de ferramentas de aço rápido ou metal duro. Também pode ocorrer em altas

velocidades de corte e de avanço. Estas condições podem levar à uma falha catastrófica;

- (3) Difusão: é um processo de transferência de material no nível atômico. Ele depende de condições como a temperatura, tempo e solubilidade -afinidade química- dos materiais que estão em contato. Na usinagem o contato entre os materiais da interface ferramenta/cavaco é mínimo exceto na situação de aderência onde há tempo suficiente para a ocorrência de difusão. Ocorrendo a difusão com a presença do íntimo contato entre os materiais, alta temperatura e altas tensões de compressão há o favorecimento de ligações mais intensas do que aquelas presentes no próprio material e então a separação passa a ocorrer em um dos materiais envolvidos;
- (4) Aderência e arrastamento, também conhecido como *attrition*: geralmente ocorre em baixas velocidades de corte pois pode gerar um fluxo irregular de material sobre a superfície de saída. Se surgir a aresta postiça de corte, o processo se torna ainda menos contínuo e assim fragmentos microscópicos podem ser arrancados da superfície e arrastados junto deste fluxo de material. Este fenômeno gera uma superfície de textura áspera;
- (5) Abrasão: pode ser de “dois corpos” quando partículas emergem de uma superfície e esta é deslocada em outra superfície. Quando ocorre de as partículas estarem soltas e assim livres para escorregar e rolar entre as duas superfícies a abrasão é considerada de “três corpos”. O desgaste por abrasão pode envolver deformação plástica e fratura frágil criando uma aparência na superfície da ferramenta de vários sulcos paralelos entre si;
- (6) Desgaste de entalhe: não há um consenso na literatura para classificá-lo e nem para definir sua causa. Sendo assim, é comum tratá-lo como um mecanismo que ocorre, principalmente, na usinagem de materiais resistentes à altas temperaturas. A aparência gerada é a formação de sulcos característicos com o entalhe em formato de “V”.

2.4.1 Vida Útil das Ferramentas de Corte

A vida útil de uma ferramenta de corte pode ser considerada como o tempo em que a mesma é capaz de trabalhar efetivamente sem perder sua capacidade de corte. Ou seja, sem precisar ser reafiada ou substituída. Esta capacidade deve estar dentro de critérios previamente estabelecidos (SOUZA, 2011).

Conforme Machado (2009), a ISO (1977) recomenda como critério para avaliar o fim de vida para ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmica, em operações de desbaste os seguintes valores para os parâmetros:

- Desgaste de flanco médio ($VB_B = 0,3 \text{ mm}$);
- Desgaste de flanco médio máximo ($VB_{B_{\text{máx}}} = 0,6 \text{ mm}$);
- Profundidade de cratera ($KT = 0,06 + 0,3f_c$) onde f_c é o avanço de corte em mm/rev;
- Desgaste de entalhe ($VB_N = 1 \text{ mm}$);
- Falha catastrófica.

A vida útil da ferramenta tem maior influência pela velocidade de corte utilizada. Isto porque este parâmetro é responsável pelo aumento de temperatura na região de formação dos cavacos. Sendo assim ele é capaz de ativar ou acelerar os mecanismos de desgaste (MACHADO, 2009).

2.5 Revestimentos para Ferramenta de Corte

2.5.1 Técnicas de Revestimento

De acordo com Miranda (2003) os processos de revestimento principais são os processos por deposição química a vapor (CVD) e revestimento por deposição física a vapor (PVD). Estes processos podem ser subdivididos em subtipos de processos se diferenciando por seus efeitos na estrutura formada e, portanto, nas propriedades de atrito adicionadas às ferramentas revestidas.

O principal pré requisito para realizar o processo CVD é a alta temperatura de substrato para que o filme seja depositado. A mesma promove durante o processo o tratamento de recozimento dos substratos de aço rápido. Isso afeta o resultado dos tratamentos térmicos

realizados anteriormente no material. É possível realizar processos CVD com temperaturas mais moderadas (na faixa de 850°C) amenizando o problema citado anteriormente.

Já processo PVD pode ser executado em uma temperatura menor, no intervalo entre 200°C e 500°C, sendo assim, não apresenta praticamente nenhum impacto na estrutura da ferramenta. Neste processo os materiais que formarão o revestimento são transformados em gases e então condensados no substrato. O processo PVD mais utilizado por apresentar uma taxa maior de ionização é o processo a arco (MIRANDA 2003).

2.5.2 Tipos de Revestimento

Os revestimentos de nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) e nitreto de titânio alumínio (TiAlN) podem ser aplicados através do processo de PVD e têm se destacado como revestimentos de ferramentas de corte. Isto se deve às propriedades que agregam à ferramenta tais como: alta dureza, excelente aderência, baixa porosidade e altas estabilidades química e térmica. Estas propriedades podem aumentar a vida útil da ferramenta ao retardar os mecanismos de desgaste que a mesma sofre durante o processo de usinagem (MIRANDA 2003).

Tabela 2 - Propriedades dos revestimentos de TiN, TiCN e TiAlN

Camada	TiN	TiCN	TiAlN
Dureza (HV 0,05)	2.500	2.700	2.600
Espessura máxima (µm)	4	4	3
Estabilidade térmica (°C)	550	450	800
Aderência *1 (N)	60	50	50
Coefficiente de atrito contra aço	0,65	0,50	0,60
Coefficiente de transmissão de calor (W/mK)	29	29	-
Cor	Dourado	Lilás	Cinza/ preto

*1 - Aderência medida indiretamente através da determinação da carga crítica no ensaio de riscamento, utilizando aço rápido temperado como substrato.

Fonte: Miranda (2003)

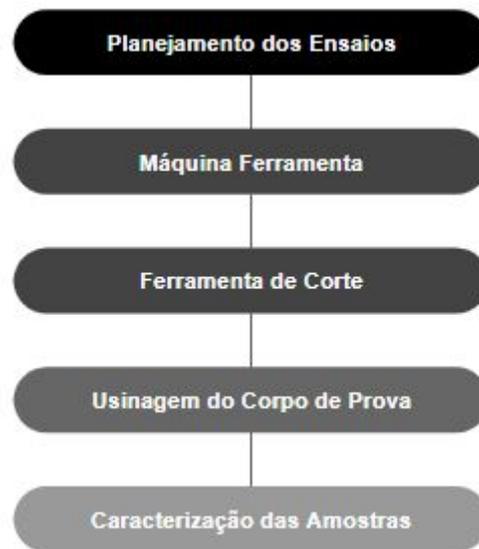
Como demonstrado pela tabela acima, as propriedades de dureza, tenacidade, aderência (sobre aço e metal duro), estabilidade química, estabilidade térmica e coeficiente de atrito do

revestimento de nitreto de titânio apresenta valores desejáveis para utilização na usinagem (MIRANDA 2003).

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho seguirá o seguinte fluxograma:

Figura 8 - Fluxograma do experimento



Fonte: Próprio autor

3.1 Planejamento dos Ensaios

O experimento deste trabalho foi reduzido da proposta inicial devido à dificuldade de acesso aos laboratórios em função da Pandemia do COVID-19. Neste experimento foram utilizadas as seguintes variáveis: velocidade de corte, avanço de corte, revestimento de nitreto de titânio (TiN) e o fluido de corte. Desta forma, foi possível avaliar as brocas com e sem revestimento e ainda com diferentes parâmetros de usinagem. A tabela abaixo ilustra as variáveis utilizadas nos 10 ensaios realizados.

Tabela 3 - Planejamento dos ensaios

Amostra	Vc	Revestimento	Refrigeração
35/TiN/N	35	Sim	Não
35/Sem/N	35	Não	Não
30/TiN/S	30	Sim	Sim
15/TiN/S	15	Sim	Sim
30/Sem/S	30	Não	Sim
15/Sem/S	15	Não	Sim
30/Sem/N	30	Não	Não
15/Sem/N	15	Não	Não
30/TiN/N	30	Sim	Não
15/TiN/N	15	Sim	Não

Fonte: Próprio autor

O nome de cada amostra foi escrito de acordo com as condições em que as ferramentas de corte foram submetidas. Os primeiros dois dígitos indicam a velocidade de corte, a abreviação TiN indica que a amostra é revestida com filme de nitreto de titânio, a palavra Sem indica que a amostra não contém o revestimento, a letra S indica que foi utilizado fluido refrigerante e a letra N indica que não foi utilizado o fluido.

3.2 Máquina Ferramenta

Para o processo de furação foi utilizado o Centro de Usinagem ROMI Discovery 560 do CEFET-MG. A figura 9 ilustra a disposição do ensaio realizado, como foi realizada a fixação da peça e broca. O fluido refrigerante utilizado foi semi-sintético com diluição de 8% em água.

Figura 9 - Imagem do equipamento ROMI Discovery 560



Fonte: Próprio autor

Figura 10 - Fixação da peça e broca



Fonte: Próprio autor

3.3 Ferramenta de Corte

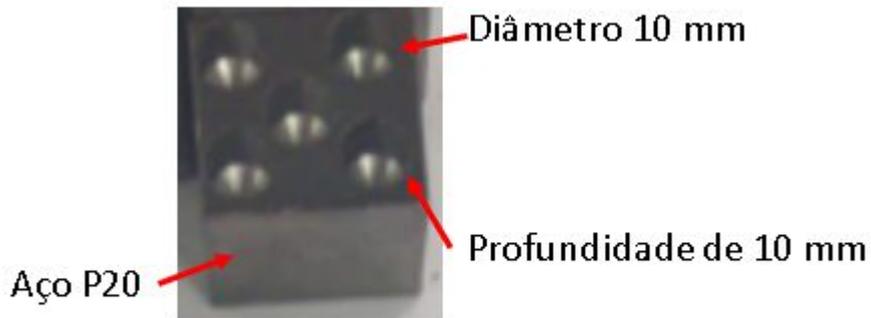
Neste experimento foram utilizadas no total 10 brocas helicoidais de 10 mm sendo 5 brocas helicoidais DIN 338 HSS sem revestimento e 5 brocas helicoidais DIN 338 HSS com revestimento de TiN.

Como parâmetro para pausar o ensaio, foi utilizado como indicador o momento em que se dava o início de um ruído característico ou então quando a broca não era capaz de dar continuidade ao processo de furação.

3.4 Usinagem do Corpo de Prova

Os corpos de prova foram confeccionados utilizando o aço ferramenta P20 com as dimensões de 30 x 30 x 25 mm. Em cada corpo de prova foram realizados 10 furos, sendo 5 de cada lado conforme ilustrado pela figura a seguir.

Figura 11 - Dimensões corpo de prova



Fonte: Próprio autor

3.5 Caracterização das Amostras

No início e após a finalização de cada sequência experimental, foi realizado a medição de rugosidade com um rugosímetro portátil TESA, medindo o perfil do acabamento superficial referente aos parâmetros de amplitude de rugosidade Ra e Rt, as configurações do instrumento estão descritas na tabela a seguir.

Tabela 4 - Configurações do rugosímetro

Amostra	Valores
Cutt Off	0,8
Comp. Medição	4 mm
Comprimento Amostragem	0,8 mm

Fonte: Próprio autor

Cada broca foi submetida a visualização e medição da região de desgaste utilizando uma lupa ótica com ampliação de 50 x, as imagens foram analisadas no software livre ImageJ, quantificando a região de desgaste após a finalização da sequência de furação.

Uma broca com e sem revestimento foi submetida à difração de raio-X para analisar a estrutura de composição do material da ferramenta, os dados de varredura estão demonstrados no quadro 1. O equipamento utilizado foi um difratômetro XRD7000 fabricado pela Shimadzu.

Quadro 1 - Dados de varredura do DRX

Parâmetros		Unidade
Radiação	Cu-K α	
Voltagem do tubo	40	KV
Corrente	30	mA
Modo de varredura	Tempo Fixo	
Espaçamento	0,02°	
Velocidade de varredura	1	Graus/minuto
Tempo de varredura por ponto	5	Segundos
Ângulo inicial (2θ)	20	Graus
Ângulo final (2θ)	100	Graus

Fonte: Próprio autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Quantidade de Furos por Amostra

A tabela a seguir traz a quantidade de furos que cada amostra foi capaz de realizar nas condições em que a mesma foi submetida.

Tabela 5 - Quantidade de furos

Amostra	Quantidade Furos
35/TiN/N	1
35/Sem/N	1
30/TiN/S	15
15/TiN/S	58
30/Sem/S	2
15/Sem/S	42
30/Sem/N	1
15/Sem/N	2
30/TiN/N	11
15/TiN/N	60

Fonte: Próprio autor

Os maiores valores observados foram obtidos pelas amostras 15/TiN/N e 15/TiN/S. Nesta mesma velocidade, comparando as amostras sem revestimento entre si, nas condições de com fluido de corte e sem fluido, foi observado um valor superior de furos na condição com a utilização do fluido.

Nos ensaios onde foram empregados o dobro da velocidade de corte, as amostras revestidas (30/TiN/S e 30/TiN/N) também foram capazes de produzir um número consideravelmente maior do que as amostras sem revestimento que, por sua vez, não foram capazes de usinar mais que 2 furos.

Já na condição mais extrema, nenhum dos dois tipos de broca foram capazes de produzir furos com mais de 15mm.

4.2 Rugosidade

A tabela a seguir contém os resultados de rugosidade. Para cada furo, as medições foram realizadas em triplicatas. Em furos onde a profundidade era inferior que 15mm não foi possível realizar a medição da rugosidade pois o rugosímetro necessita de no mínimo 15mm de profundidade para que seja possível inseri-lo no furo para percorrer a distância de 4mm e assim realizar a medição nesta região.

Tabela 6 - Rugosidade aferida nos ensaios

Amostra	Prof.(mm)	Ra(i)	Ra(i)	Ra(i)	Rz(i)	Rz(i)	Rz(i)	Ra(f)	Ra(f)	Ra(f)	Rz(f)	Rz(f)	Rz(f)
35/TiN/N	9	Não foi possível medir devido a baixa profundidade do furo											
35/Sem/N	5	Não foi possível medir devido a baixa profundidade do furo											
30/TiN/S	20	3.48	3.87	3.32	16.27	19.3	16.44	2.71	2.7	3.12	16.47	15.46	19.19
15/TiN/S	20	5.05	4.91	5.02	29.68	23.36	25.43	6.01	5.9	5.37	30.56	34.87	28.01
30/Sem/S	20	4.13	3.38	3.37	28.28	21.89	20.09	Somente 1 furo (R (i) = R(f))					
15/Sem/S	20	9.71	8.36	7.51	48.17	44.39	36.201	8.34	7.17	8.97	39.07	31.26	41.88
30/Sem/N	4	Não foi possível medir devido a baixa profundidade do furo											
15/Sem/N	20	6.85	7.29	6.13	34.6	36.32	32.54	Somente 2 furos (R (i) = R(f))					
30/TiN/N	20	2.3	1.81	2.35	12.48	11.02	12.57	2.26	1.33	1.76	13.43	8.18	9.19
15/TiN/N	20	4.58	5.09	4.9	25.76	26.92	24.81	3.63	3.44	3.56	21.25	18.32	22.15

Fonte: Próprio autor

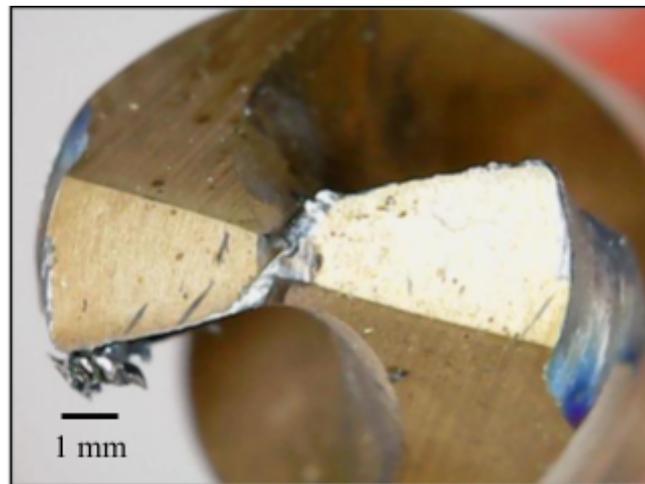
Sendo que a letra i representa a medida inicial (realizada no primeiro furo) e a letra f representa a medida final (realizada no último furo).

4.3 Desgaste

Para analisar e avaliar os tipos de desgaste que cada broca sofreu foi utilizado as seguintes imagens obtidas através de microscópio.

- Amostra 35/TiN/N

Figura 12 - Amostra 35/TiN/N

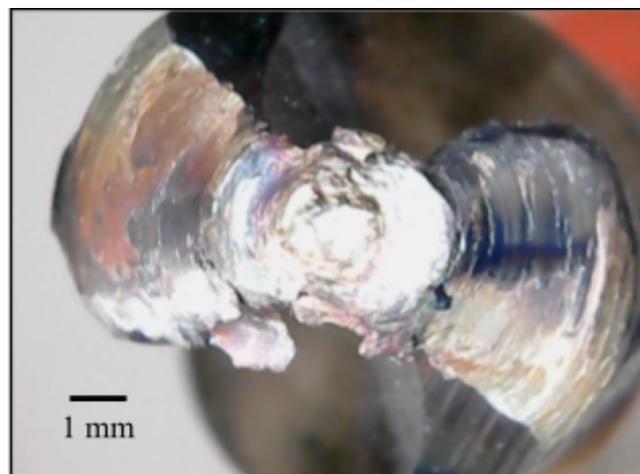


Fonte: Próprio autor

Devido à alta velocidade de corte e a ausência de fluido de refrigeração, a broca não suportou as condições extremas e então o único furo gerado tinha somente 9mm. Mesmo com o revestimento, a broca não suportou estas extremas condições. É possível perceber que as quinas sofreram dobramento e também houve o fenômeno de adesão. Além disso, também é possível perceber que o aresta transversal e o principal de corte sofreram desgaste de flanco.

- Amostra 35/Sem/N

Figura 13 - Amostra 35/Sem/N

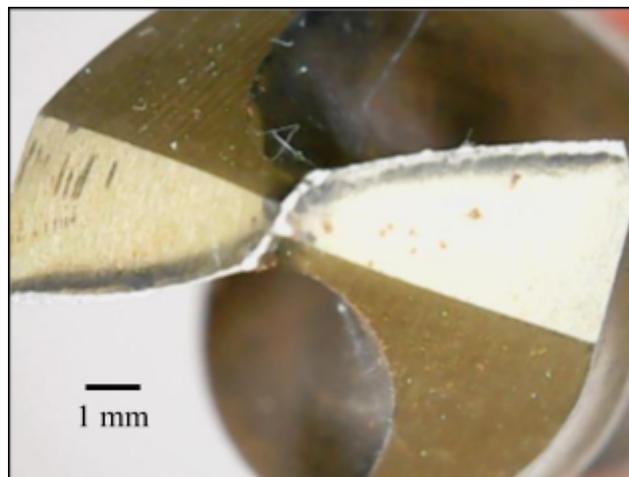


Fonte: Próprio autor

Sendo utilizada nas mesmas condições extremas que a amostra 35/TiN/N, a amostra 35/Sem/N apresentou danos severos em todos os seus gumes e perda considerável de material. Isto provavelmente ocorreu devido ao alto calor gerado pela alta velocidade de corte e ausência de fluido de refrigeração.

- Amostra 30/TiN/S

Figura 14 - Amostra 30/TiN/S

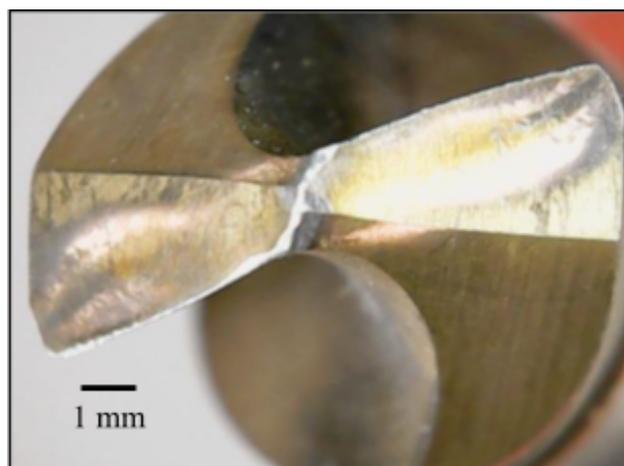


Fonte: Próprio autor

Apresentou produtividade quase 8 vezes superior que a amostra 30/Sem/S que foi utilizada nas mesmas condições de corte. É possível perceber que a amostra 30/TiN/S sofreu desgaste por abrasão e que em seus gumes o revestimento foi severamente desgastado e provavelmente oxidado. Isto deve ter acontecido devido ao calor gerado pela velocidade de corte.

- Amostra 15/TiN/S

Figura 15 - Amostra 15/TiN/S

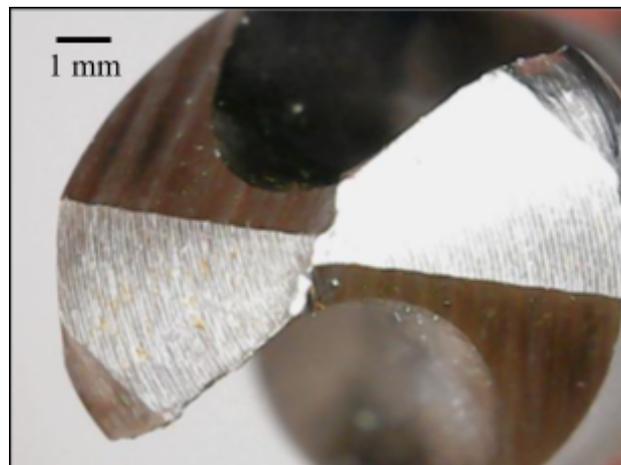


Fonte: Próprio autor

Na presença de fluido de corte e com velocidade de corte menor, esta broca com revestimento obteve o segundo melhor resultado do experimento, sendo capaz de perfurar 58 furos. É possível perceber que o seu maior desgaste foi no gume principal, sofrendo desgaste de flanco.

- Amostra 30/Sem/S

Figura 16 - Amostra 30/Sem/S

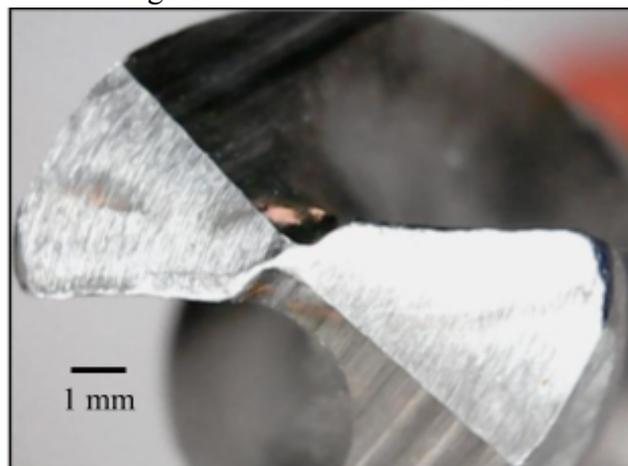


Fonte: Próprio autor

Esta amostra foi capaz de furar uma quantidade de furos bem inferior se comparado com a amostra 30/TiN/S. É possível perceber que a amostra sofreu severa deformação em suas quinas, sofrendo dobramento e também desgaste de flanco em sua aresta principal e transversal de corte.

- Amostra 15/Sem/S

Figura 17 - Amostra 15/Sem/S

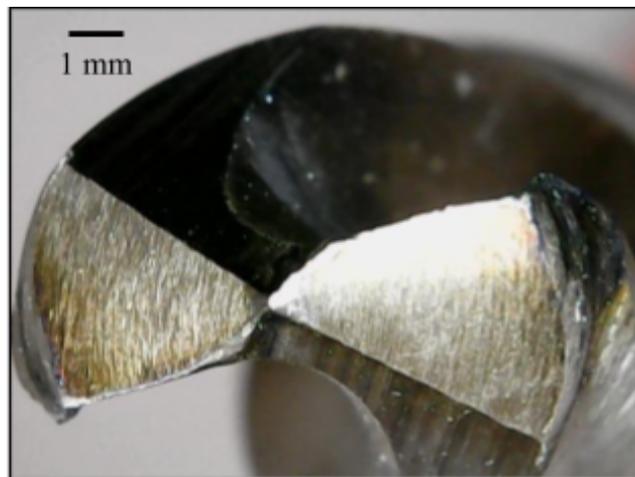


Fonte: Próprio autor

Esta amostra também apresentou deformação em suas quinas mas não tão severo quanto apresentada pela amostra 30/Sem/S. Isto provavelmente se deve pela diminuição da velocidade de corte que, comparando estes dois casos, foi 50% menor. Esta amostra também sofreu desgaste por abrasão em sua aresta principal e transversal de corte.

- Amostra 30/Sem/N

Figura 18 - Amostra 30/Sem/N

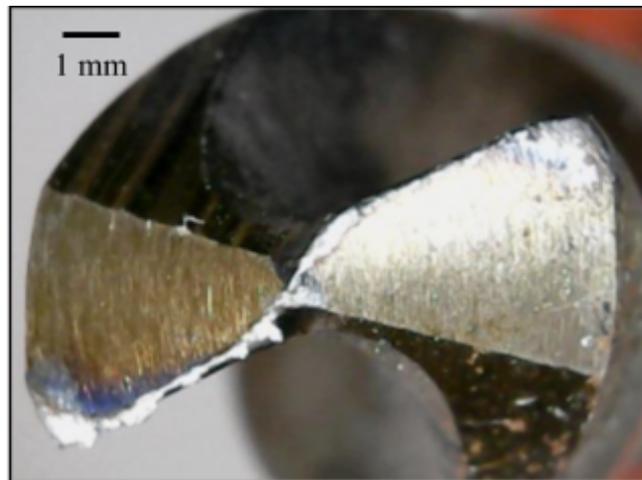


Fonte: Próprio autor

Apesar de serem condições menos extremas que aquelas aplicadas às amostras 35/TiN/N e 35/Sem/N, a alta velocidade de corte juntamente com a ausência do fluido de refrigeração geraram tão altas temperaturas que a amostra 30/Sem/N apresentou mudança em sua coloração principalmente nas extremidades de seu diâmetro onde se encontram as maiores temperaturas. Provavelmente houve oxidação nessas regiões de mudança de cor.

- Amostra 15/Sem/N

Figura 19 - Amostra 15/Sem/N

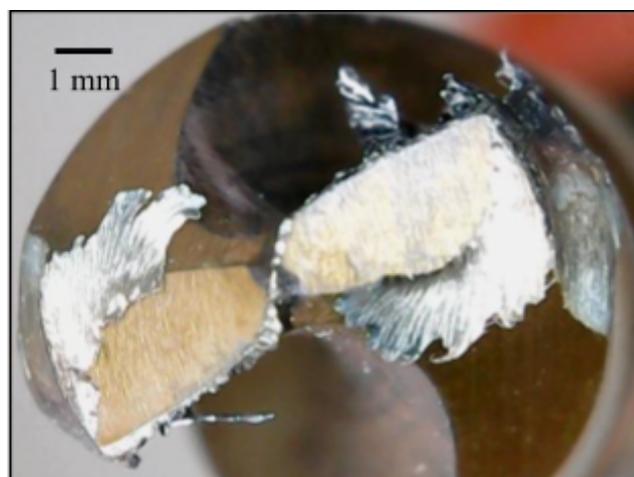


Fonte: Próprio autor

Mesmo sendo utilizada com a metade da velocidade de corte da amostra anterior, a amostra 15/Sem/N não foi capaz de furar 2 furos completos. Sendo assim, o parâmetro que mais deve ter influenciado nos dois ensaios (das amostras 30/Sem/N e 15/Sem/N) é a ausência de fluido de corte. Já que ambas as amostras não têm revestimento, esta característica parece ter um grande peso na transferência e dissipação do calor.

- Amostra 30/TiN/N

Figura 20 - Amostra 30/TiN/N

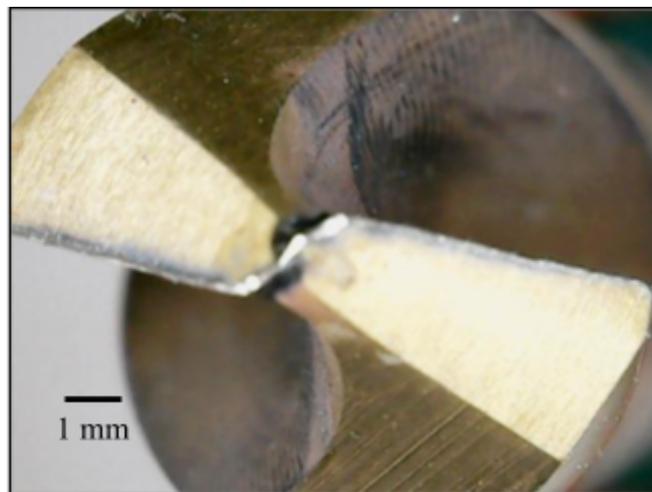


Fonte: Próprio autor

Mesmo não sendo utilizada nas mesmas condições aplicadas às amostras 35/TiN/N e 35/Sem/N, a alta velocidade de corte juntamente com a ausência do fluido de refrigeração levaram a geração de adesão de material nos gumes da amostra 30/TiN/N além do desgaste de flanco.

- Amostra 15/TiN/N

Figura 21 - Amostra 15/TiN/N



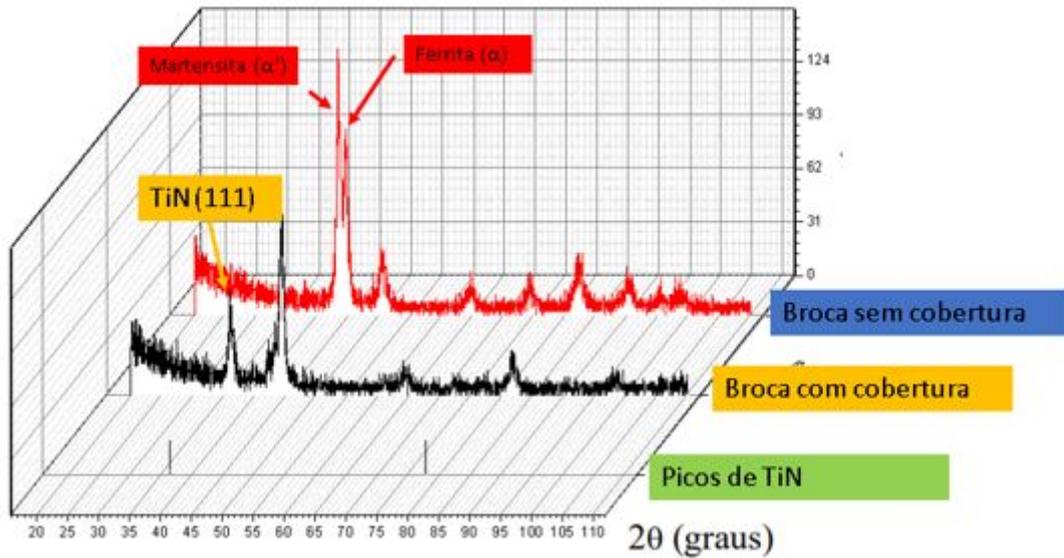
Fonte: Próprio autor

Apresentando o melhor resultado do experimento, a amostra 15/TiN/N foi capaz de perfurar 60 furos. Esta amostra foi utilizada na mesma velocidade da amostra 15/TiN/S que foi capaz de perfurar 58 furos. A diferença do ensaio de ambas as amostras foi a utilização de fluido de corte no ensaio da 15/TiN/N. É possível observar que ao não utilizar o fluido nos ensaios com as brocas revestidas, as mesmas não sofreram tanta alteração na produtividade como as brocas sem revestimento.

4.4 Difração de Raios-X

A figura a seguir representa o resultado encontrado através da análise do DRX.

Figura 22 - Análise de DRX



Fonte: Próprio autor

Na análise de DRX, foi verificado o pico de TiN no plano (111) de acordo a referência apresentada por Goller et.al. (1999), tendo sua intensidade difratada próximo dos 36,5°. Este pico não foi observado na broca sem revestimento, que apresentou somente na sua estrutura a formação de ferrita e martensita, proveniente do tratamento térmico do aço rápido, salienta-se uma expressividade maior no pico de martensita, que é a fase advindo com o tratamento térmico de têmpera na broca, uma vez que esta característica melhora a vida útil das ferramentas de corte de aço rápido.

O mesmo pico de martensita também pode ser observado na amostra revestida, isto é, devido a profundidade de varredura do DRX, que alcança em média 10µm, acredita-se que o filme depositado não alcança esta espessura, acarretando a exposição do substrato durante a varredura de DRX.

5. CONCLUSÃO

As brocas helicoidais de aço rápido com revestimento de nitreto de titânio se comparadas com as brocas helicoidais de aço rápido sem revestimento, apresentaram uma vida útil maior como também foram capazes de gerar furos com menor rugosidade, o que implica em um maior controle dimensional no processo de usinagem. E o revestimento aumentou a resistência ao desgaste das brocas mesmo em condições sem fluido de refrigeração.

Sobre as velocidades de corte utilizadas no experimento, foi observado que ambos os tipos de brocas obtiveram um melhor resultado, ou seja, foram capazes de furar uma quantidade maior de furos em uma menor velocidade. Já o uso de fluido de refrigeração teve maior relevância para as brocas sem revestimento pois estas nas condições sem fluido de corte não foram capazes de furar uma quantidade de furos similar à condição com fluido.

Tendo em vista todos esses fatores, para aplicação no meio industrial, é necessário analisar a relação custo benefício. Pois as brocas revestidas com nitreto de titânio trazem o benefício de aumentar a vida útil e por isso de diminuir a quantidade de paradas para troca de ferramenta, gerar furos com menor rugosidade e diminuir a necessidade do uso de fluido de refrigeração porém têm um valor maior que as brocas não revestidas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORK, Carlos Alberto. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. 1995. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CALZA, M.; SANTIN, R.; NICOLA, G. L.; ZEILMANN, R.P. **Desgaste de brocas de aço rápido na furação sob diferentes condições de aplicação de fluidos lubri refrigerantes**. COBEF, São Paulo, 2007.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. ed. São Paulo - SP: Edgard Blucher, 2012. v. 15. 751 p.

GOLLER, R.; TORRI, P.; BAKER, A. M.; GILMORE, R.; GISSLER, W. **The deposition of low-friction TiN-MoSx hard coatings by a combined arc evaporation and magnetron sputter process**. Surface & Coatings Technology. 1999, vol 120-121, 453-457.

LOPES, Pedro A. F. **Desenvolvimento de modelo semi-empírico para determinação da força de avanço e do binário em furação com brocas helicoidais**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade NOVA de Lisboa.

MACHADO, Á. R. ; ABRÃO, A. M. ; COELHO, R. T. ; DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo - SP: Edgard Blucher, 2009. v. 1. 371 p.

MARQUES, F. M. **Avaliação do desempenho de brocas helicoidais de aço-rápido revestidas na usinagem de ferro fundido nodular GGG50**. 2012. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MIRANDA, Gilberto W. A. **Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida com TiAlN**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 162p. 2003.

MORAND, João P. M. **Usinabilidade de ligas metálicas com aplicação odontológica a partir da evolução das forças de avanço na furação.** 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SOARES F., Martiliano. **Estudo da formação de rebarbas no processo de furação.** 1995. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SOUSA, J. A. G. **Desempenho de ferramentas reafiadas – furação.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2011.