



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

CENTRO DE ENGENHARIAS

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DIEGO DOS SANTOS BARBOSA

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTA NO PROCESSO DE
FURAÇÃO ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DE POTÊNCIA**

MOSSORÓ – RN

2019

DIEGO DOS SANTOS BARBOSA

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTA NO PROCESSO DE
FURAÇÃO ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DE POTÊNCIA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,
Centro de Engenharias título de Engenheiro
Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Ramsés Otto Cunha
Lima - UFERSA.

MOSSORÓ – RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

B238m Barbosa, Diego dos Santos .
Monitoramento do desgaste de ferramenta no
processo de furação através da variação de potência
/ Diego dos Santos Barbosa. - 2019.
52 f. : il.

Orientador: Ramsés Otto Cunha Lima.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2019.

1. Monitoramento de desgaste. 2. Potência
elétrica. 3. Furação. I. Lima, Ramsés Otto Cunha,
orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da Instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

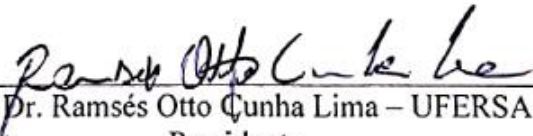
DIEGO DOS SANTOS BARBOSA

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTA NO PROCESSO DE
FURAÇÃO ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DE POTÊNCIA**

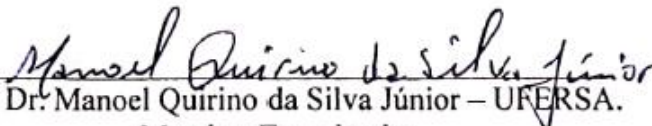
Monografia apresentada ao Centro de
Engenharias para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Defendida em: 13 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Ramsés Otto Cunha Lima – UFERSA.
Presidente


Prof. Dr. Francisco Evaristo Uchoa Reis– UFERSA.
Membro Examinador


Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Júnior – UFERSA.
Membro Examinador

Dedico este trabalho com muito amor a minha família, que é meu exemplo de determinação. A vocês dedico também a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades proporcionadas nesta vida e por estar ao meu lado em todas as conquistas.

Agradeço aos meus pais e minha irmã por dedicarem seu tempo para cuidar de mim. Por nunca deixarem que nada faltasse, nem material e nem sentimental. Pela educação que me deram, pois foi isto que me tornou a pessoa que sou hoje.

Agradeço a todos os meus familiares, que não mediram esforços pra me ajudar nessa caminhada com muito carinho e atenção.

À todos meus amigos, que me ajudaram seja academicamente ou me apoiando ou simplesmente na hora da diversão, vocês fizeram essa caminhada mais fácil e divertida.

Aos membros da banca examinadora por participarem me ajudando a conseguir concluir minha formação acadêmica

Agradeço a todas as pessoas que fizeram parte desta etapa decisiva da minha vida.

RESUMO

Na indústria a busca por redução de custos e de tempos é constante. Um dos grandes problemas nos processos de usinagem é o gerenciamento das ferramentas de corte, pois muitas vezes ocorre o não aproveitamento das ferramentas ao máximo nas melhores condições ou utiliza-se delas com o desgaste excessivo, diminuindo a produtividade e qualidade das peças produzidas. Atualmente existem vários estudos no qual se monitora o desgaste da ferramenta de forma não intrusiva, e permite determinar o melhor momento de trocar a ferramenta de corte, evitando os problemas citados. Uma das formas de monitorar o desgaste é por meio da potência elétrica do motor da máquina ferramenta. O presente trabalho tem como objetivo principal correlacionar a potência elétrica do motor de uma furadeira de coluna com os desgastes de flanco, permitindo determinar o melhor momento para a troca da ferramenta no processo de furação através da potência elétrica. Para isso foi utilizado multímetro para medir a corrente elétrica do processo durante a furação do aço SAE 1045. Foram utilizadas brocas de aço rápido de 6mm de diâmetro, as velocidades de corte e avanço serão 24m/min e 0,1mm/rotação respectivamente. A furação realizada foi do tipo profunda em cheio, 30mm de profundidade. As correntes elétricas foram medidas instantes antes do fim de cada furo e em vazio (antes da broca tocar a peça). A diferença entre as correntes eram relacionadas com os desgastes de flanco da ferramenta medidos após cada furo, e calculadas as potências de corte. Os desgastes foram medidos com o auxílio de um microscópio. Os resultados mostraram que foi possível correlacionar o fim de vida das brocas com uma variação de corrente de 0,11A. Apesar disso o método não foi confiável, durante a validação do método apenas uma das brocas não ultrapassou o fim de vida após a parada com a corrente de 0,11A.

Palavras-chave: Monitoramento de desgaste; Potência elétrica; Furação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.-Operações de furação: a)Furação em cheio; b)Furação com pré-furação; c)Furação escalonada; d)furação de centros; e)Furação profunda em cheio; f)Trepanação.	16
Figura 2. Velocidades de corte e de avanço para brocas de aço rápido em função do material a ser usinado e do diâmetro da broca.	17
Figura 3.- Diversas partes de uma broca helicoidal.....	19
Figura 4. Ângulos na ponta da broca helicoidal.	20
Figura 5. Influência do ângulo de ponta na vida da ferramenta na usinagem de uma liga de titânio com broca helicoidal de metal-duro revestida.....	21
Figura 6. Influência do ângulo de incidência na vida da ferramenta na usinagem de uma liga de titânio com broca helicoidal de metal-duro revestida.....	22
Figura 7.-Desgaste na broca helicoidal.....	23
Figura 8. Os vários tipos de desgaste em brocas.	24
Figura 9. Desgaste da aresta transversal de uma broca.	24
Figura 10. Diversos desgastes em brocas (a) desgaste de flanco; (b) e (c) desgaste de flanco com lascamento; (d)desgaste da guia; (e) e (f) lascamento na superfície de saída.	25
Figura 11. Desgastes de broca de aço rápido na usinagem de AISI 1045.	26
Figura 12. Desgaste frontal x velocidade de corte mostrando a região da aresta postiça de corte.	27
Figura 13. Evolução do desgaste em brocas helicoidais: (1) Desgaste inicial, (2) desgaste leve-regular. (3) desgaste moderado por microlascamentos, (4) desgaste severo e (5) colapso.	28
Figura 14. Gráfico mostrando os efeitos causados na potência elétrica pelo aumento do desgaste, pelo aumento da velocidade de corte e pelo aumento da velocidade de avanço.	33
Figura 15. Comparação entre potência mecânica e potência elétrica durante a furação de ferro fundido.....	34
Figura 16.Influência do desgaste de brocas na corrente elétrica medida no motor de fuso e no motor de alimentação.....	34
Figura 17. Monitoramento de potência elétrica (a) e da Vibração(b) na furação do ferro fundido nodular perlítico bruto de fundição em diversas condições.....	35
Figura 18. Peça cilíndrica de Aço SAE 1045	38
Figura 19. Sistema de medição e a calibração utilizada para medir os desgastes da broca.	39
Figura 20. Evolução dos desgastes de flanco com o numero de furos.	41
Figura 21. Evolução dos desgastes na broca. (A) Broca nova;(B) Broca meia vida $VB'=0,15$ e $VB=0,22$; (C) Broca fim de vida $VB'=0,31$ e $VB=0,54$	42
Figura 22. Comportamento das brocas (A) $I \times VB'$; (B) $I \times VB$; (C) $P \times VB'$; (D) $P \times VB$	44
Figura 23. Intervalos de confiança para desgastes de flanco médio (A) e máximo (B) em relação à variação de corrente elétrica.....	46
Figura 24. Desgastes das brocas de validação (A)Broca 1;(B)Broca 2(C) Broca 3(D) Broca4	47
Figura 25. Variações das correntes elétricas medidas em vazio.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados consolidados para grandezas diretas	32
Tabela 2. Informações dimensionais a respeito da broca.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

γ	Ângulo de hélice
γ_f	Ângulo de saída
σ	Ângulo de ponta
α	Ângulo de incidência ou folga
Ψ	Ângulo do gume transversal
W	Desgaste de quina
VB'	Desgaste de flanco no ponto médio
VB	Desgaste de flanco máximo
M_w	Desgaste da guia lateral
K_m	Desgaste de cratera
C_t	Desgaste no gume transversal medido em relação ao gume de corte (altura)
C_m	Desgaste no gume transversal medido em relação ao gume de corte (largura)
f_n	Avanço da máquina
D	Diâmetro
APC	Aresta postiça de corte
Pc	Potência de corte
Vc	Velocidade de corte
K_c	Força específica de corte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Furação.....	16
3.1.1	Brocas helicoidais.....	18
3.1.2	Desgaste em brocas helicoidais	22
3.1.3	Monitoramento de desgaste através de parâmetros elétricos.....	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1	Brocas de aço rápido.....	37
4.2	Material usinado	37
4.3	Parâmetros de corte.....	38
4.4	Avaliação do desgaste.....	39
4.5	Monitoramento de Corrente elétrica	40
4.6	Validação do experimento	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1	Resultados referentes à etapa de calibração.....	41
5.1.1	Resultados referentes aos desgastes	41
5.1.2	Resultados referentes aos parâmetros elétricos	43
5.2	Resultados referentes à validação do experimento	45
5.2.1	Resultados referentes aos desgastes	45
5.3	Considerações finais sobre os resultados do experimento.....	48
6	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS	50
	ANEXO	53

1 INTRODUÇÃO

Na indústria existe uma busca constante por melhorar a qualidade de seus produtos, obter maior produtividade e diminuição dos custos. Um bom monitoramento do desgaste de ferramentas pode ter um impacto significativo nos três fatores citados. Esse procedimento permite que a ferramenta seja trocada no momento certo, de modo que ela trabalhe o máximo de tempo possível nas condições que proporcionam melhor produtividade e melhor qualidade das peças produzidas.

Diniz (2013) afirma que a furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria manufatureira. A maioria das peças de qualquer tipo de indústria tem pelo menos um furo e, somente uma parte muito pequena dessas peças já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta (fundição, forjamento, etc.). A furação por meio de brocas é o meio mais utilizado na obtenção de furos na indústria.

Pimentel (2014) comenta que furação é geralmente um dos últimos processos realizados na fabricação de peças. Caso ocorram problemas graves nessa operação, que gere o refugo da peça, todos os processos realizados anteriormente serão perdidos. Devido ao exposto, o monitoramento dessa operação pode ter grande impacto na produtividade e redução de custos na produção.

De acordo com Silva (2010) o monitoramento do desgaste de ferramentas consiste em observar parâmetros que permitem mensurar o desgaste da ferramenta. Existem vários métodos de monitoramento de ferramenta como por meio da emissão acústica, da temperatura, da vibração, por meio de parâmetros elétricos do motor da máquina ferramenta (potência e/ou corrente), a medição direta dos desgastes.

Cada técnica de monitoramento tem suas características e essas devem ser analisadas de acordo com a aplicação que o método será utilizado, de modo a não trazer mais prejuízos do que benefícios ao processo como um todo. Um exemplo de monitoramento que pode causar mais prejuízo que benefício é a medição direta, que de acordo com Silva (2010), tem uma grande desvantagem que é a necessidade de paradas na usinagem, isso torna o processo pouco produtivo, e por isso os métodos que não necessitam de paradas são mais utilizados.

Um método de monitoramento de desgaste que pode ser utilizado na furação é o através de parâmetros elétricos do motor da máquina ferramenta. Esse método de acordo com Souto (2007) relaciona o desgaste máximo desejado para a ferramenta (fim de vida da ferramenta) com parâmetros elétricos do motor, que pode ser potência e/ou corrente, através

de uma calibração, pode-se determinar o melhor momento para a troca da ferramenta observando apenas o parâmetro monitorado.

Esse método segundo Souto (2007) não é dificultado pelo fato da ferramenta estar escondida e é pouco intrusivo, já que a medição é feita perto do motor e longe da região de corte. Outras vantagens dessa técnica são o baixo custo e a simplicidade, em relação a outros métodos de monitoramento, que são devido à facilidade de se medir potência e/ou corrente e ao pouco equipamento necessário para se fazer o monitoramento (multímetro) e aos custos dos equipamentos utilizados.

Então o presente trabalho propõe um estudo a respeito de assuntos relacionados ao monitoramento de desgaste através da variação de parâmetros elétricos do motor da máquina ferramenta na furação, realização de ensaios utilizando o monitoramento proposto e a análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados. Espera-se que o monitoramento seja confiável de modo que a troca de ferramenta seja realizada baseada na observação dos parâmetros elétricos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho é monitorar o desgaste de brocas de aço rápido no processo de furação, através da medição de corrente elétrica consumida numa furadeira de coluna, determinando então o momento adequado para fazer a troca da ferramenta de corte.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um procedimento experimental para o monitoramento de desgaste de ferramentas no processo de furação através da leitura de corrente elétrica da máquina com multímetro;
- Calcular potência de corte através das leituras de corrente elétrica;
- Testar a confiabilidade do método.

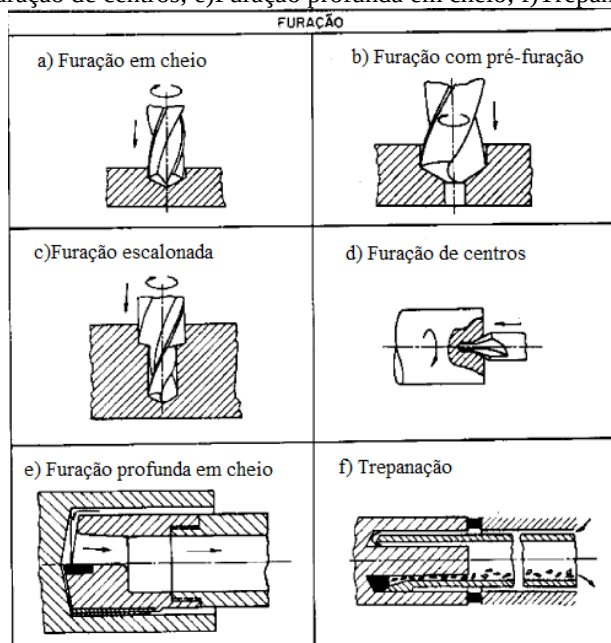
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são abordados, com base em artigos, teses e outras referências, os principais pontos referentes ao processo de furação e aos métodos de monitoramento de desgaste.

3.1 Furação

Ferraresi (2012) define furação como um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para isso, a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina. Ele subdivide a furação nas seguintes operações: furação em cheio, escareamento, furação escalonada, de centros e trepanação, sendo a furação em cheio a operação mais utilizada em geral. Na Figura 1 pode-se observar os tipos de furação.

Figura 1.-Operações de furação: a)Furação em cheio; b)Furação com pré-furação; c)Furação escalonada; d)furação de centros; e)Furação profunda em cheio; f)Trepanação.



Fonte: Ferraresi (2012)

Barbosa e Miranda (2007) destacam que na indústria automobilística a furação é responsável por 34% do tempo total consumido em usinagem. Pimentel (2014) explica que a furação é, juntamente com o torneamento e o fresamento, uma das operações de usinagem

mais importantes sendo ela responsável por aproximadamente 33% de todas as operações de usinagem de metais, porém ela não é tão estudada quanto às outras duas operações. O exposto pelos autores evidencia a necessidade do estudo dessa operação.

Os parâmetros de corte tem grande influência na qualidade do corte e na vida da ferramenta. Fortunato (2012, *apud* KOLE, 1997) comenta que através de experiências envolvendo as ferramentas de corte e diversos tipos de materiais, foram desenvolvidas tabelas com indicações de parâmetros de corte. Na Figura 2 são mostradas algumas indicações de parâmetros de corte para brocas de aço rápido.

Figura 2. Velocidades de corte e de avanço para brocas de aço rápido em função do material a ser usinado e do diâmetro da broca.

VELOCIDADE E AVANÇO PARA BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RÁPIDO									
MATERIAL		ACO 0,20 A 0,30% C (MACIO) E BRONZE	ACO 0,30 A 0,40% C (NEIO - MACIO)	ACO 0,40 A 0,50% C (NEIO - DURO) FERRO FUNDIDO	FERRO FUNDIDO (DURO)	FERRO FUNDIDO (MACIO)	CORRE	LATÃO	ALUMÍNIO
VELOCIDADE-CORTE (m/min)		35	25	22	18	32	50	65	100
Ø DA BROCA (mm)	AVANÇO (mm/rot)	ROTAÇÕES POR MINUTO (rpm)							
1	0,06	11140	7050	7003	5730	10186	15000	20670	31800
2	0,08	5570	3975	3502	2865	5093	7950	10335	15900
3	0,10	3713	2650	2334	1910	3396	5300	6890	10600
4	0,11	2785	1988	1751	1433	2547	3975	5167	7950
5	0,13	2228	1590	1401	1146	2037	3180	4134	6360
6	0,14	1857	1325	1167	955	1698	2650	3445	5300
7	0,16	1591	1136	1000	819	1455	2271	2953	4542
8	0,18	1392	994	875	716	1273	1987	2583	3975
9	0,19	1238	863	778	637	1132	1767	2298	3534
10	0,20	1114	795	700	573	1019	1590	2067	3180

Fonte: Fortunato (2012, *apud* WALKER, 2004)

Na Figura 2 pode-se observar que são indicadas velocidades de corte de acordo com o material. Para materiais mais duros são indicadas velocidades de corte menores. Com relação às velocidades de avanço, são indicadas de acordo com o diâmetro da broca utilizada, sendo que diâmetros para diâmetros maiores são indicadas maiores avanços.

Diniz (2013) e Castro (2001) citam algumas características da operação de furação:

- A velocidade de corte diminui quando se vai da periferia para o centro da broca;
- O processo de geração do cavaco é escondido e invisível;

- O processo de retirada do cavaco é difícil, devido ao espaço limitado;
- O fluido de corte chega com dificuldades à parte de trabalho da ferramenta;
- Distribuição inadequada de calor na região de corte;
- Ocorrem atrito e desgaste pronunciado nas quinas com cantos vivos;
- Quando ocorre a quebra da broca, é de difícil retirada;
- Quando materiais dúcteis são furados em cheio (sem pré-furação), a formação de aresta postiça de corte (APC) na vizinhança do centro da broca é inevitável.

Algumas dessas características como a chegada do fluido de corte, distribuição inadequada de calor na região de corte dentre outras, contribuem para um desgaste mais rápido da broca, fazendo com que o estudo, o monitoramento e o gerenciamento do desgaste dessa ferramenta sejam de grande importância.

3.1.1 Brocas helicoidais

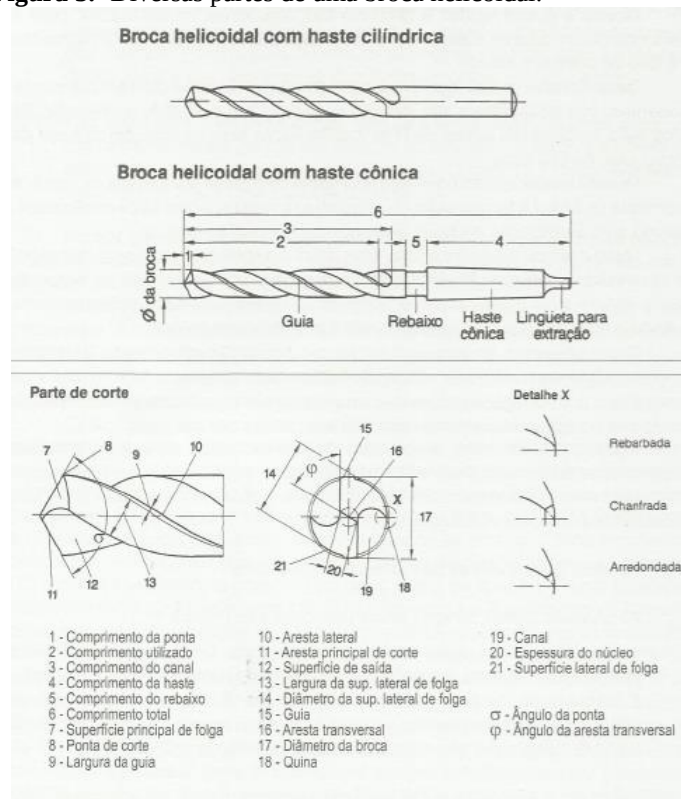
A ferramenta de corte da operação de furação é a broca. Existem vários tipos de broca, segundo Castro (2001) os diferentes tipos de broca podem ser utilizados dependendo das características da operação como diâmetro do furo, profundidade, tolerância de forma, de medidas e volume de produção.

Stemmer (1995) classifica as brocas como: chatas, escalonadas, com canais de refrigeração, de centro, canhão, “*ejector*”, ocas, de pastilhas reversíveis e helicoidais. O último tipo de broca citado conforme Castro (2001) é a ferramenta de corte fabricada em maior quantidade e a mais difundida na indústria, a participação das brocas helicoidais em todas as atividades de corte de metal é estimada em 20% a 25% do total.

Apesar dessa informação apresentada pelo autor ser antiga, e que a participação dessa ferramenta possa ter diminuído, esse tipo de broca ainda é uma das ferramentas de usinagem mais importantes, e por isso objeto desse estudo.

De acordo com Bellini (2005) a broca helicoidal foi inventada pela *Moses Twist Drill and Machine Company* em 1820, e é largamente empregada no processo de produção de furos e alargamento de furos pré-existentes. As diversas partes de uma broca helicoidal podem ser observadas na Figura 3.

Figura 3.- Diversas partes de uma broca helicoidal.



Fonte: Diniz (2013)

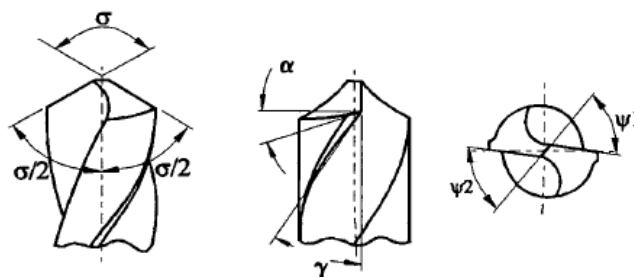
Diniz (2013) e Castro (2001) comentam sobre algumas das partes da broca helicoidal:

- Haste: destina-se a fixação da broca na máquina. Ela pode ser cônica ou cilíndrica;
- Diâmetro (D): é medido entre as duas guias da broca. Normalmente possui tolerância dimensional h8;
- Núcleo: parte interior da broca possui 0,16 D. Serve para conferir rigidez à broca;
- Guias: cada aresta de corte apresenta uma região que tem diâmetro maior que o diâmetro das paredes da broca, essas regiões são denominadas guias. Elas possuem duas funções básicas, guiar a broca dentro do furo e evitar que toda a parede externa da broca atrite com as paredes do furo (isso diminui os esforços necessários para a furação).
- Canais helicoidais: são espaços que permitem a saída de cavaco e possibilitam a chegada de fluido de corte nos gumes. Esses canais são usinados ou formados no corpo da broca para constituírem as arestas de corte. Os canais helicoidais podem ser do tipo N, H ou W.

- f) Arestas de corte: numa broca helicoidal as duas arestas principais de corte não se encontram em um ponto, mas existe uma terceira aresta ligando-as. A terceira aresta é chamada de aresta transversal de corte.

De acordo com Teixeira (1995) para a broca realizar o seu trabalho de forma eficiente ela deve possuir uma geometria adequada para aquele tipo de trabalho. Então, são classificados alguns ângulos de grande importância nesse contexto, esses ângulos são mostrados na Figura 4.

Figura 4. Ângulos na ponta da broca helicoidal.



Fonte: Teixeira (1995)

Ângulo de hélice (γ): é o ângulo da helicóide formada pelos canais da broca. Existem três classificações para as brocas em relação ao ângulo de hélice: tipo N (normal), tipo H (para materiais duros e frágeis) e tipo W (para materiais moles).

Ângulo de saída (γ_f): é o ângulo responsável pelo corte do material. O seu valor define a estabilidade da cunha de corte. Nas brocas helicoidais, com afiação normal, o valor do ângulo de saída é variável ao longo dos gumes cortantes, sendo que no diâmetro externo o seu valor é aproximadamente igual ao ângulo de hélice.

Ângulo de ponta (σ): esse ângulo é formado entre as partes cortantes do gume principal que devem estar simetricamente posicionadas em relação ao eixo da broca. Esse ângulo tem grande importância na furação, ele tem influência no tipo de cavaco gerado, ângulos de ponta grande geram cavacos com maiores espessuras e menores larguras, para um dado avanço. Estes ângulos trazem benefícios na furação de materiais com grande tendência ao encruamento, mas ele faz com que haja concentração de desgaste abrasivo na quina dos gumes. Além disso, o ângulo de ponta pode contribuir para vibrações no processo ou na tendência do gume enganchar e quebrar na ponta.

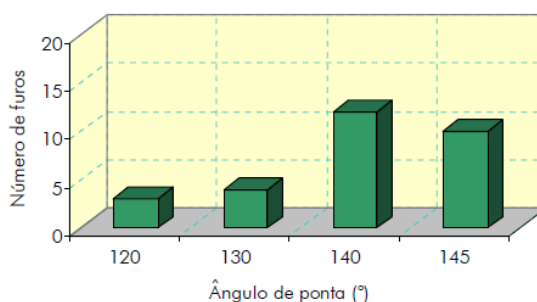
Ângulo de incidência ou folga (α): é gerado por uma afiação adequada e obtido pelo rebaixamento da superfície de incidência (folga). Tem como função principal evitar o atrito entre a superfície de corte e o flanco da ferramenta e permitir que o gume penetre no material

e corte livremente. Para ângulos de incidência pequenos, o gume não pode penetrar convenientemente no material e a ferramenta cega rapidamente. Assim ocorre forte atrito com a peça, superaquecimento da ferramenta e mau acabamento superficial. Ângulos de incidência muito grandes, o gume quebra ou pode sofrer pequenos lascamentos em virtude de apoio deficiente.

Ângulo do gume transversal (Ψ): é formado entre os gumes cortantes e o gume transversal. O valor deste ângulo é afetado diretamente pelo valor do ângulo de flanco executado na afiação adequada da broca.

No trabalho de Chen (2003) foi estudada a influência do ângulo de ponta e do ângulo de incidência, na vida da ferramenta na furação de uma liga de titânio com brocas de metal-duro revestidas. Os desempenhos de diferentes ângulos de ponta, com relação à vida da ferramenta, podem ser observados na Figura 5.

Figura 5. Influência do ângulo de ponta na vida da ferramenta na usinagem de uma liga de titânio com broca helicoidal de metal-duro revestida



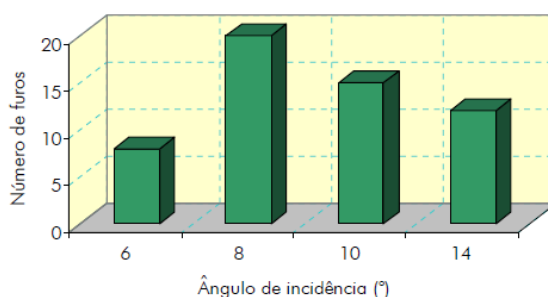
Fonte: Castillo (2005, *apud* CHEN, 2003)

Nas condições de ensaio (velocidades de corte e avanço, material da ferramenta, etc.) foi obtido que o aumento do ângulo de ponta até 140° vai aumentando a vida da ferramenta, e após isso tem-se uma queda no desempenho.

Castillo (2005) explica que o aumento do ângulo de ponta gera um aumento do ângulo de quina, elevando a resistência mecânica e a dissipação de calor, isso explica a melhora de desempenho apresentada até 140° na Figura 5. Já a queda de desempenho após 140° pode ser explicada pela observação de Stemmer (1995) que com ângulos de ponta maiores que 118°, os gumes tornam-se côncavos, o que provoca, durante a utilização da broca, tendência do gume se prender e quebra das pontas, essa tendência deve ter crescido até um ponto no qual diminuiu a vida da ferramenta.

A respeito do ângulo de incidência, Chen (2003) obteve o desempenho apresentado na Figura 6. Pode-se observar que com ângulos de incidência de 8°, nas condições de usinagem utilizadas pelo autor, a ferramenta teve sua vida aumentada.

Figura 6. Influência do ângulo de incidência na vida da ferramenta na usinagem de uma liga de titânio com broca helicoidal de metal-duro revestida



Fonte: Castillo (2005, *apud* CHEN, 2003)

Os ângulos de incidência maiores diminuem o contato entre a superfície de folga e a peça, gerando assim menos desgaste de flanco. Por outro lado esse aumento do ângulo de incidência causa uma diminuição de material na cunha de corte. O melhor desempenho obtido com o ângulo de 8° pode ser atribuído ao equilíbrio alcançado com esse ângulo, no qual foi diminuído o desgaste de flanco, mas não teve tanta perda de material na cunha.

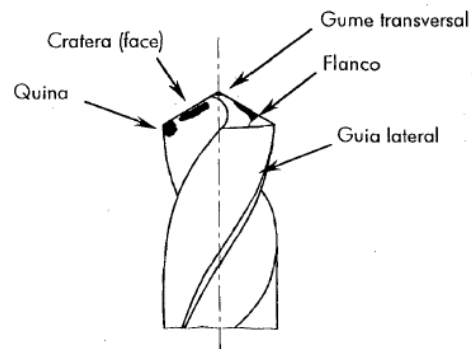
No trabalho de Castillo (2005) foram utilizadas 4 brocas com geometrias diferentes, e foram analisados os desempenhos das mesmas com relação à vida da ferramenta e à qualidade dos furos produzidos por elas. Foram obtidos grandes diferenças em relação aos desempenhos das brocas, evidenciando a importância da geometria para a operação.

Assim como a geometria da ferramenta tem influência no desgaste, o desgaste também tem influência na geometria da ferramenta, pois o desgaste promove alterações na geometria da ferramenta. Como a geometria da broca está intimamente ligada à qualidade das peças produzidas é de extrema importância o estudo do desgaste das brocas.

3.1.2 Desgaste em brocas helicoidais

Castro (2001) explica que o desgaste das brocas helicoidais pode aparecer na face, no flanco, no gume transversal, na quina e nas guias laterais conforme a Figura 7.

Figura 7.-Desgaste na broca helicoidal

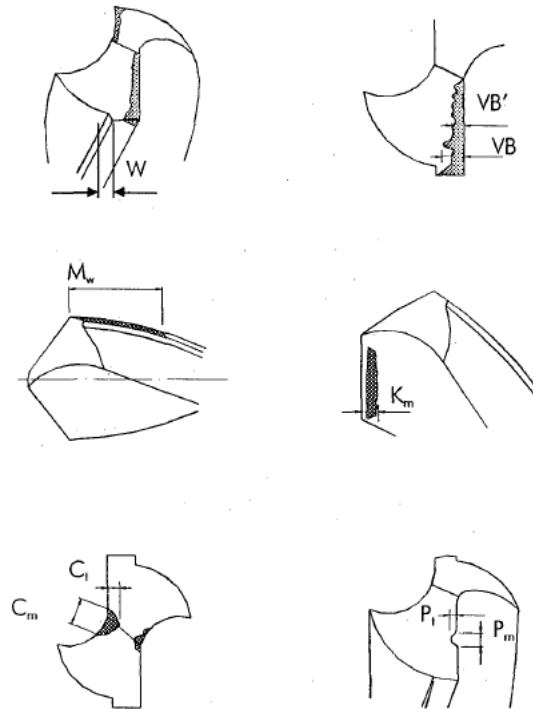


Fonte: Castro (2001, *apud* BRINKSMEIER, 1990)

Castro (2001, *apud* BRINKSMEIER, 1990) cita também os sete tipos de desgaste que ocorrem em brocas, o desenho representativo desses desgastes pode ser observado na Figura 8, eles são:

- a) Desgaste de quina, W ;
- b) Desgaste de flanco no ponto médio, VB' ;
- c) Desgaste de flanco máximo, VB ;
- d) Desgaste da guia lateral, M_w ;
- e) Desgaste de cratera, K_m ;
- f) Desgaste no gume transversal medido em relação ao gume de corte (altura), C_t ;
- g) Desgaste no gume transversal medido em relação ao gume de corte (largura), C_m

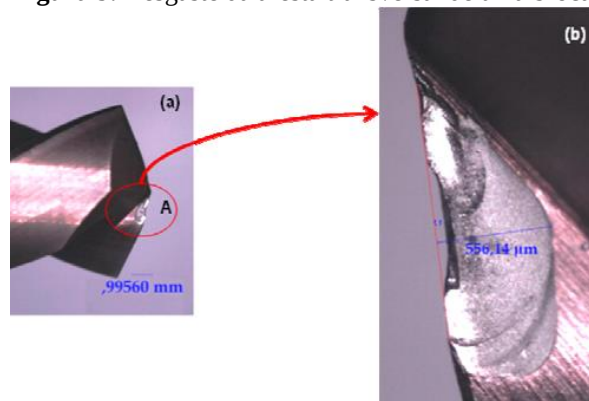
Figura 8. Os vários tipos de desgaste em brocas.



Fonte: Castro (2001, *apud* BRINKSMEIER, 1990)

Barbosa (2009) na usinagem de um ferro fundido nodular perlítico austenitizado e austemperado, ADI I (ISO 1.050-6), utilizou uma broca helicoidal de metal duro, K20, com revestimento multicamadas TiN/TiAlN e 10 mm de diâmetro. Foi utilizada velocidade de corte de 140m/min, avanço de 0,25 mm/volta e fluido de corte com fluxo de 50 ml/h. Na Figura 9 pode-se observar o desgaste obtido na aresta transversal da broca.

Figura 9. Desgaste da aresta transversal de uma broca.

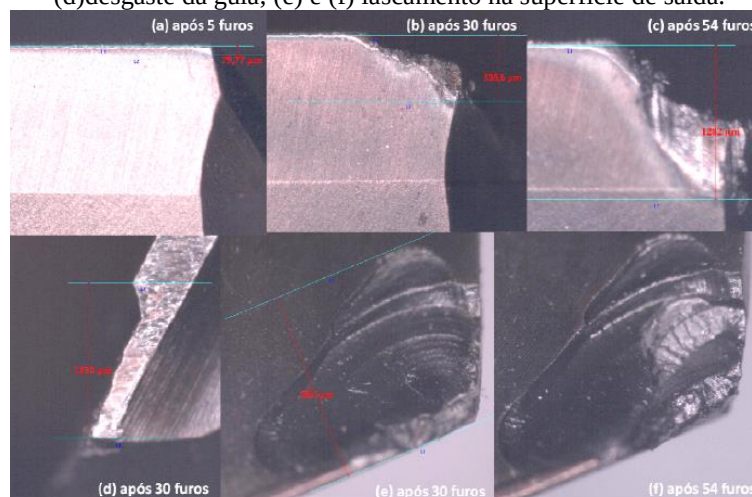


Fonte: Barbosa (2009)

No trabalho esse comportamento foi atribuído à elevada dureza do material usinado, ADI I, isso fez com que ocorressem lascamentos na aresta transversal da broca. Utilizando a

mesma broca nas mesmas condições foi usinado outro material, Ferro fundido nodular perlítico bruto de fundição, DI (ASTM FE 70003). Os desgastes obtidos podem ser visualizados na Figura 10.

Figura 10. Diversos desgastes em brocas (a) desgaste de flanco; (b) e (c) desgaste de flanco com lascamento; (d) desgaste da guia; (e) e (f) lascamento na superfície de saída.

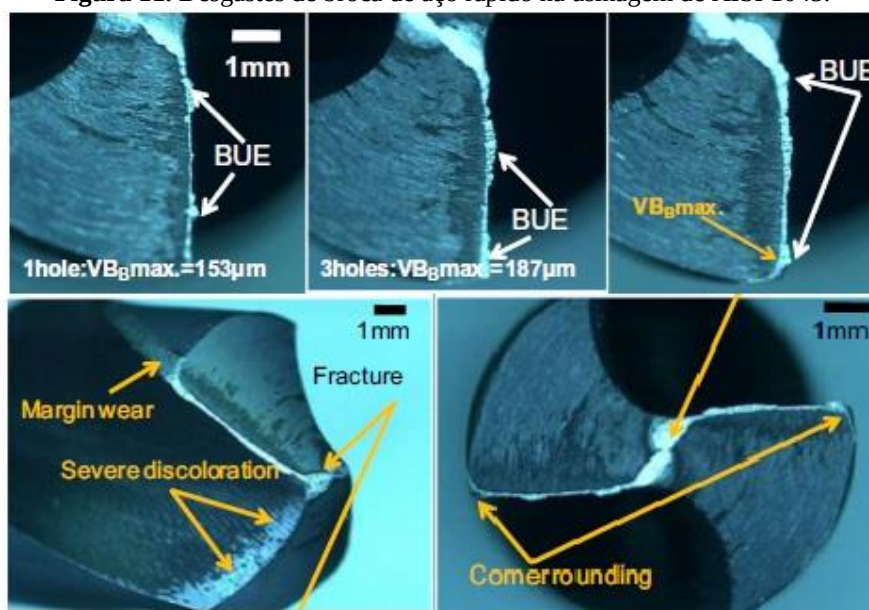


Fonte: Barbosa (2009)

Como o segundo material usinado possuía menor dureza, não ocorreram os lascamentos na aresta transversal da broca. Pode ser observado que houve uma evolução do desgaste de flanco. Na Figura 10-(b) aparecem lascamentos no flanco da ferramenta, isso se deve à perda gradual de material, com menos material a ferramenta fica mais susceptível aos lascamentos, que também são observados na Figura 10-(c). Com relação às Figuras 10-(d), 10-(e) e 10-(f), também aparecem lascamentos, que podem ter ocorrido por causa das condições de usinagem muito severas ou também pelo mesmo motivo explicado para o desgaste de flanco.

Khan (2017) usinou o aço AISI 1045 com brocas de aço rápido, em seu trabalho foram variadas as velocidades de corte, taxa de avanço e o recuo da ferramenta, e foram analisados os desgastes obtidos. A Figura 11 mostra a progressão dos desgastes de flanco e os desgastes ao final de vida da ferramenta obtidos nas seguintes condições de corte: velocidade de corte 15m/min, taxa de avanço 20mm/min e recuo a cada 5 mm usinados.

Figura 11. Desgastes de broca de aço rápido na usinagem de AISI 1045.



Fonte: Khan (2017)

Na Figura 11 podem-se observar os desgastes na superfície de saída, desgastes na guia lateral, desgastes no flanco, formação de arestas postiças de corte e fratura na aresta transversal. O autor destaca que em todas as condições de corte que foram ensaiadas obtiveram-se fraturas na aresta transversal e a formação de arestas postiças de corte.

Com relação à fratura na aresta transversal foi explicado que essa foi obtida devido a grandes cargas mecânicas sofridas pela aresta durante o corte. Khan (2017) explica que isso ocorreu provavelmente devido à aresta transversal espremer e extrudar o material da peça de trabalho para a periferia ao invés de cortar, pois a aresta fica próxima ao centro de modo que suas velocidades são mais baixas. Além disso, grandes ângulos de inclinação negativos da aresta transversal aumentam a possibilidade de fratura devido à maiores forças de corte e maior área de contato.

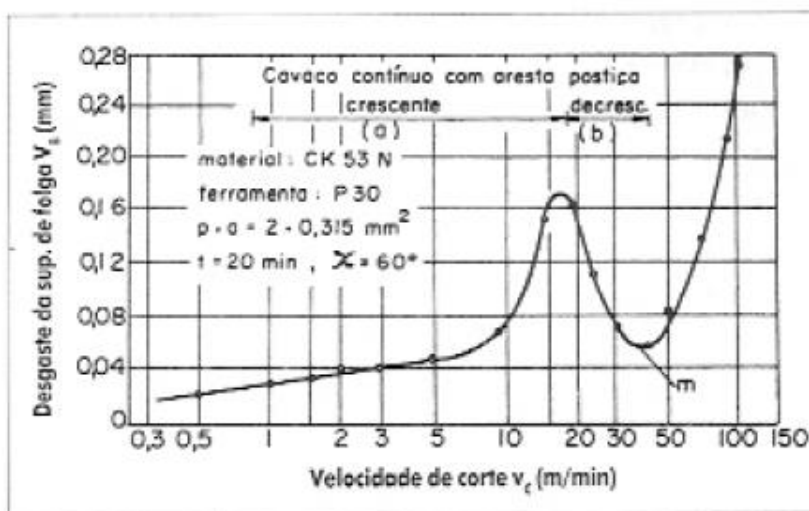
Já em relação à aresta postiça de corte observada na Figura 11, pode-se presumir que o mecanismo desgaste adesão estava presente, já que a aresta se forma através desse mecanismo. O autor explica que a formação da APC é cíclica, primeiro ocorrendo a formação, após isso o crescimento e finalmente desprendendo da ferramenta, e levando material da ferramenta com ela. O autor atribui desprendimento ao crescimento dos estresses e ao aumento de temperatura.

Diniz (2013) explica que a aresta postiça é formada à baixas velocidades de corte e na zona de aderência, quando o cavaco é pressionado sem movimento relativo durante um

espaço de tempo suficiente para se soldar à ferramenta. Com posterior fluxo de mais cavaco sobre essa camada, ela se deforma e se encrua fazendo a de aresta de corte.

Diniz (2013) exalta que a aresta postiça modifica a geometria da ferramenta, de modo a alterar o comportamento da ferramenta com relação ao acabamento superficial da peça, à força de corte e ao desgaste da ferramenta. Na Figura 12 pode-se ver como a APC pode aumentar o desgaste da ferramenta.

Figura 12. Desgaste frontal x velocidade de corte mostrando a região da aresta postiça de corte.



Fonte: Diniz (2013)

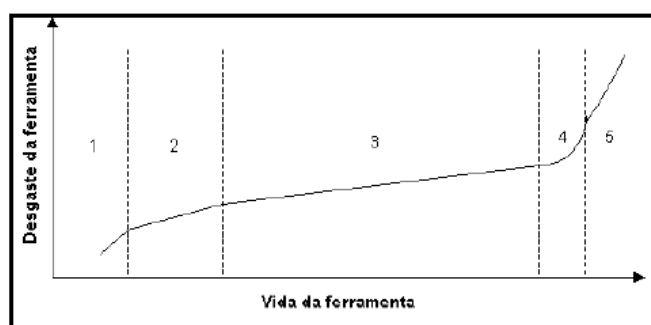
A Figura 12 mostra que o desgaste da ferramenta aumenta conforme a velocidade de corte aumenta, isso ocorre aparentemente à uma taxa constante. Quando se chega a velocidades propícias para a formação de aresta postiça de corte, esse desgaste tem um aumento muito grande. Quando a velocidade de corte continua crescer, tem-se temperaturas maiores, chegando à temperatura de recristalização do material, o encruamento do material é impossibilitado, eliminando assim a formação das APCs. Na Figura 12 percebe-se que próximo a 20m/min de velocidade de corte os desgastes começam a diminuir, pois a formação de arestas postiças começam a diminuir e por volta de 40m/min as APCs desaparecem.

Machado (2009) comenta que durante o processo de usinagem a ferramenta passa por três estágios de desgaste, o primeiro estágio, quando se começa a usinagem, é caracterizado por uma alta taxa de desgaste que é desacelerada com o tempo, devido à ferramenta estar se adequando ao processo, esse estágio é terminado no primeiro ponto de inflexão. No segundo estágio a ferramenta se encontra adequada ao processo, apresentando assim uma taxa de desgaste constante até atingir o segundo ponto de inflexão. O terceiro estágio de início

apresenta uma aceleração no desgaste, e caso se continue a usinagem a ferramenta entra em colapso rapidamente.

Nas brocas helicoidais, Barbosa (2009, *apud* ERTUNC *et al.*, 2001) faz a classificação da evolução do desgaste de forma parecida mas em cinco estágios diferentes, que podem ser observados na Figura 13.

Figura 13. Evolução do desgaste em brocas helicoidais: (1) Desgaste inicial, (2) desgaste leve- regular. (3) desgaste moderado por microlascamentos, (4) desgaste severo e (5) colapso.



Fonte: Barbosa (2009)

Na Figura 13 observa-se que até o terceiro estágio (desgaste moderado por microlascamentos) o desgaste ocorre de forma lenta comparado com os estágios quatro e cinco. Então a operação deve ser parada durante o estágio três, evitando assim o colapso da ferramenta e maiores prejuízos (refugo da peça).

Stemmer (1995) comenta que existem três critérios para avaliar a perda de afiação (desgaste) de uma broca: marca de desgaste de flanco (superfície de incidência), junto ao gume; marca de desgaste nas guias, reduzindo o diâmetro da broca; falha completa. O autor relaciona também os tipos dos desgastes com o tipo de broca, as condições de corte e com a afiação de ponta:

- Achatamento do gume transversal: indica avanço excessivo;
- Desgaste demasiado das quinas: indica velocidade de corte muito alta;
- Marca de desgaste uniforme no flanco (superfície de incidência): avanço e velocidade de corte corretos;
- Grandes aderências de material na face (superfície de saída): ângulo de saída da broca muito pequeno para o material que está sendo furado;
- Leve colagem de material no flanco (superfície de incidência) ou polimento da superfície, perto da ponta da broca: indica que o ângulo de incidência está muito pequeno ou o avanço escolhido está muito grande;

- Aderência de material nas guias: indica ou que a broca não tem redução de diâmetro em direção a haste ou que ocorrem forças transversais devidas à afiação assimétrica dos gumes;
- Colagem de material no final dos canais da broca: indica que o comprimento de hélice é muito pequeno (frequentes saídas da broca para remoção dos cavacos podem eliminar o problema).

De acordo com Porto (2017) o fim de vida de uma broca é quando a mesma não consegue mais realizar a operação dentro das especificações exigidas. Pode-se definir o fim de vida de uma ferramenta por meio de um valor limite de desgaste. Em brocas os desgastes mais utilizados como fim de vida são os desgastes de quina e das guias, devido a afetar o acabamento e o diâmetro. Em caso de brocas que estão sendo monitoradas para uma futura reafiação, geralmente utiliza-se o desgaste de flanco médio (VB') menor que 0,3mm ou o desgaste de flanco máximo (VB) maior que 0,6mm como referência.

Souto (2007) cita alguns critérios de fim de vida de uma ferramenta como valores limites para a rugosidade da superfície usinada, para os desgastes de flanco, profundidade (KT) do desgaste de cratera, para a vibração do conjunto, potência consumida pela máquina ferramenta, dentre outros.

3.1.3 Monitoramento de desgaste através de parâmetros elétricos

Determinando um critério de fim de vida pode-se monitorar o processo e fazer a troca ou reafiação da ferramenta no momento adequado. Silva (2010) afirma que existem duas formas de realizar o monitoramento de desgaste, a forma direta e a indireta. No monitoramento direto as variáveis que devem ser avaliadas são medidas diretamente por contato, o autor cita como exemplo a medição do desgaste por um microscópio. O monitoramento indireto é caracterizado pela medição de variáveis que são afetadas pelo fenômeno que se estuda e são elas que serão monitoradas, como exemplo foram citados os monitoramentos de desgaste através de emissão acústica ou potência de corte, já que esses dois parâmetros são afetados pelo desgaste da ferramenta.

Silva (2010) afirma que os métodos diretos são mais confiáveis que os indiretos, porém, apresentam uma grande desvantagem em relação aos indiretos que é não ter acesso às ferramentas de corte enquanto esse ocorre, sendo necessário parar o processo para a medição

da variável estudada. Essas paradas diminuem a produtividade e por isso os métodos indiretos são mais utilizados.

Souto (2007) cita algumas características desejáveis em um sistema de monitoramento: confiabilidade, baixo custo, simplicidade, suportar ambiente industrial, não ser influenciado por ruídos externos, o parâmetro medido deve ser dependente somente do que se quer monitorar, baixo tempo de resposta, ser pouco intrusivo (não interferir na operação de usinagem) e ser suficientemente sensível para que se consiga acompanhar a evolução do desgaste.

Um método que possui muitas dessas características é o monitoramento através de parâmetros elétricos do motor, podendo este ser através da variação da corrente elétrica ou da potência do motor.

Souto (2007) cita as principais vantagens e desvantagens deste tipo de monitoramento, sendo as vantagens: ser uma técnica pouco intrusiva, possuir baixo custo em comparação com outras técnicas de monitoramento de desgaste, possuir tecnologia e operação relativamente simples, ser uma técnica de fácil instalação, não requerer muito espaço, poder ser aplicada à maioria dos motores elétricos (AC e DC) e poder realizar o monitoramento em processo (on-line). Já suas desvantagens são a baixa sensibilidade ao estado de desgaste da ferramenta (não há muitas diferenças entre a potência consumida utilizando uma ferramenta nova e uma já desgastada) e uma perda de precisão no sistema de monitoramento devido nem toda potência elétrica consumida ser transformada em potência mecânica.

Silva (2010) explica que uma maneira de se medir a potência efetiva de corte é transformar as forças de corte e avanço em potência, através da multiplicação delas pela velocidade de corte e de avanço, respectivamente. Dessa forma a potência necessária para que o corte seja realizado seria a soma das duas potências calculadas (de corte e de avanço). Devido a potência de avanço ser muito menor que a potência de corte (esse fato ocorre devido a velocidade de avanço ser muito pequena em relação à velocidade de corte), a potência de corte é considerada como a potência de corte efetiva. Como a potência de corte é gerada pelo motor principal da máquina (o motor que produz o movimento de corte) chega-se à conclusão que a potência efetiva de corte, em teoria, tem valor equivalente ao do motor principal.

Sandvik Coromant (N/A) apresenta a Equação 1, ela é usada para calcular a potência efetiva de corte teórica na furação. A potência de corte (P_c) é calculada em KW, ela depende do avanço (f_n) em mm/rotação, velocidade de corte (V_c), do diâmetro da broca (D) em mm e da força de corte específica (K_c) em N/mm².

$$P_c = \frac{f_n \times V_c \times D \times K_c}{240 \times 10^3} \quad (1)$$

Com relação à força de corte específica Diniz (2013) comenta que é influenciado pelo material da peça, pelo material e geometria da ferramenta, secção de corte, velocidade de corte, condições de lubrificação e refrigeração e estado de afiação da ferramenta. Existem algumas tabelas que estimam valores de K_c de acordo com o material da peça, porém como explicado por Diniz (2013) esse parâmetro depende dos fatores citados.

A potência efetiva de corte tem relação direta com o desgaste da ferramenta, sendo necessária maior potência para usinar quando a ferramenta está desgastada. Assumindo que potência efetiva de corte é a potência que o motor fornece, pode-se monitorar o desgaste da ferramenta através da potência do motor, bastando a utilização de um multímetro para medir tal parâmetro.

Silva (2010) fez uma análise da variação da potência durante o processo de usinagem, o autor explica que durante a usinagem a temperatura da peça aumenta, diminuindo a dureza do material e facilitando o corte, isso diminui a potência requerida na usinagem. Outro fenômeno analisado pelo autor é que com o desgaste da ferramenta a área de contato entre ferramenta e peça aumenta, aumentando assim o atrito e a potência requerida para a usinagem. O autor ainda conclui que o aumento da área de contato prevalece sobre a redução da resistência havendo um aumento da potência de corte consumida durante a usinagem.

Alguns autores fizeram trabalhos monitorando o desgaste por meio da variação de parâmetros elétricos no motor principal. Silva (2010) em seu trabalho monitorou o desgaste na operação de fresamento, e concluiu que há uma tendência de aumento nos valores de potência efetiva de corte média à medida que o tempo de usinagem aumenta e consequentemente o desgaste. O autor obteve em seu trabalho uma diferença na potência efetiva média de uma ferramenta nova e a mesma desgastada de aproximadamente 15%, esse valor é expressivo, e indica que o monitoramento pode captar alterações de forma simples e sem dificuldade quanto à sensibilidade, contrariando a característica da técnica que foi citada por Souto (2007).

Barbosa e Miranda (2007) utilizaram brocas com diferentes níveis de desgaste frontal, e mediram a força de avanço média, o momento torsor médio, a tensão e a corrente elétrica média, durante a usinagem. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados consolidados para grandezas diretas

<i>Código do teste</i>	<i>VB (mm)</i>	<i>V_m (V)</i>	<i>I_m (A)</i>	<i>Fa_m (Kgf)</i>	<i>Mt_m (Kgf.m)</i>
VB=0,00	0,00	224,09	12,13	145,15	1,09
VB=0,05	0,05	223,39	12,34	173,64	1,15
VB=0,10	0,10	223,69	12,12	303,73	1,36
VB=0,15	0,15	225,58	12,39	405,55	1,72
VB=0,20	0,20	229,98	12,21	539,27	2,08

Fonte: Barbosa e Miranda (2007)

O comportamento dos parâmetros elétricos obtidos pelos autores não foi o esperado e obtido por outros autores como Al Sulaiman, Baseer e Sheikh (2004) e Li e Tso (1999), por exemplo. O esperado era obter sempre maiores valores de corrente e/ou tensão, de modo a obter maiores potências conforme fossem utilizadas brocas mais desgastadas, devido a uma maior área de contato, provocando mais atrito e necessitando de maiores esforços para se fazer a usinagem.

Uma explicação para o comportamento obtido por Barbosa e Miranda (2007) pode ser que o efeito da diminuição da dureza na potência tenha sobressaído em relação ao efeito da maior área de contato, obtendo assim uma menor potência nessa situação (VB=0,10mm).

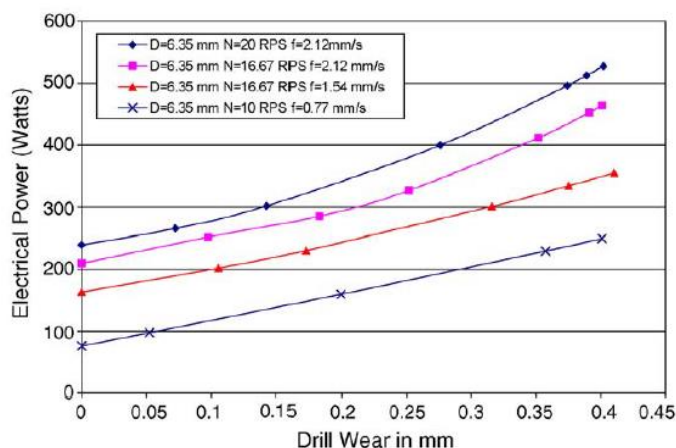
Chaves, Casarin e Kiecow (2014) monitoraram o desgaste de um inserto durante o torneamento através da variação de corrente elétrica. Os autores concluíram que o método foi capaz de detectar o desenvolvimento do desgaste e, se aplicado em ambiente industrial, a corrente é um sinal claro para o operador de quando a ferramenta se aproxima do fim de vida. Os autores, porém, observam que mudanças na velocidade de corte geram mudanças nos parâmetros elétricos, não sendo possível fixar um valor de corrente para o fim de vida da ferramenta que sirva para todas as velocidades.

Como observado por Chaves, Casarin e Kiecow (2014) mudanças na velocidade de corte alteram os parâmetros elétricos usados no monitoramento de desgaste (potência e corrente), mas não é apenas a velocidade de corte que vai ter influência nos parâmetros elétricos, mudanças no material da ferramenta, mudança no material da peça, mudança na operação dentre outros também mudarão os parâmetros elétricos. Contudo, em grandes indústrias, é comum a fabricação da mesma peça utilizando sempre os mesmos processos com os mesmos parâmetros (material de peça, ferramenta, operação etc.), então nesses casos esse fato não seria um problema, podendo assim definir uma potência e/ou uma corrente elétrica como fim de vida para uma ferramenta.

Al-Sulaiman, Baseer e Sheikh (2004) monitoraram a potência elétrica consumida pela máquina ferramenta e o desgaste de flanco de brocas, esse monitoramento foi feito em várias

condições diferentes (diâmetros de broca, velocidade de corte, velocidade de avanço etc.). A Figura 14 mostra o comportamento do desgaste e da potência obtidos no trabalho.

Figura 14. Gráfico mostrando os efeitos causados na potência elétrica pelo aumento do desgaste, pelo aumento da velocidade de corte e pelo aumento da velocidade de avanço.

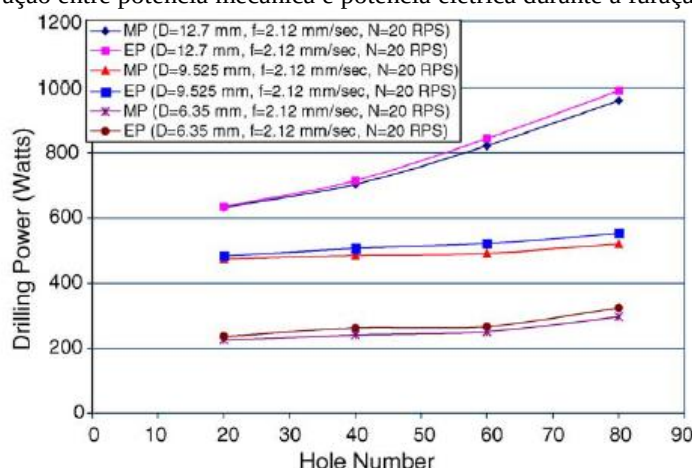


Fonte: Al-Sulaiman, Baseer e Sheikh (2004)

Na Figura 14 observa-se a potência sempre aumentando conforme o desgaste vai evoluindo, como esperado, e diferente do obtido por Barbosa e Miranda (2007). Isso pode ser explicado pela perda de afiação da ferramenta que não conseguirá fazer o corte do material com a mesma eficiência. Na Figura 14 também pode-se observar que com o aumento das velocidades de corte e/ou de avanço tem-se um aumento da potência elétrica medida. Esse comportamento era o esperado, pois um aumento de velocidade vai exigir mais energia (potência) da máquina ferramenta.

Al Sulaiman, Baseer e Sheikh (2004) compararam a potência mecânica do processo de furação com a potência elétrica, foram utilizados materiais diferentes e diâmetros de brocas diferentes. A Figura 15 apresenta os resultados obtidos na usinagem de ferro fundido.

Figura 15. Comparação entre potência mecânica e potência elétrica durante a furação de ferro fundido.

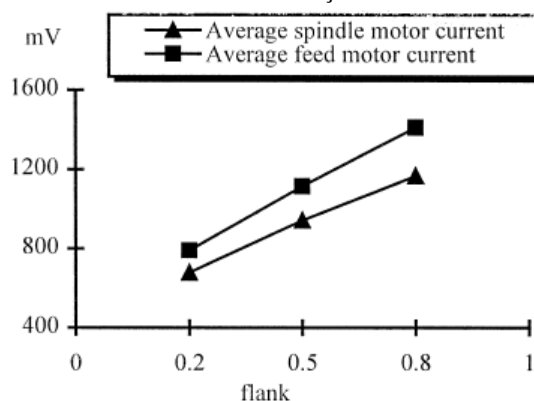


Fonte: Al-Sulaiman, Baseer e Sheikh (2004)

Na Figura 15 observa-se que as duas potências tem comportamento similares, sendo a potência elétrica um pouco maior, isso se deve à eficiência do processo (nem toda energia elétrica se transformará em mecânica). Com relação aos diâmetros de broca, observa-se que quanto maior o diâmetro maiores são as potências, isso era esperado devido à uma maior área de contato entre peça e ferramenta e à maior quantidade de material usinado.

Li e Tso (1999) analisaram a variação de corrente elétrica no motor do fuso e no motor de alimentação para estimar o desgaste de brocas no processo de furação. Os autores relacionaram o diâmetro da broca, a velocidade de avanço e a velocidade de corte com o desgaste da ferramenta. A Figura 16 mostra os resultados obtidos pelo autor referentes à relação entre desgaste e corrente elétrica.

Figura 16. Influência do desgaste de brocas na corrente elétrica medida no motor de fuso e no motor de alimentação.



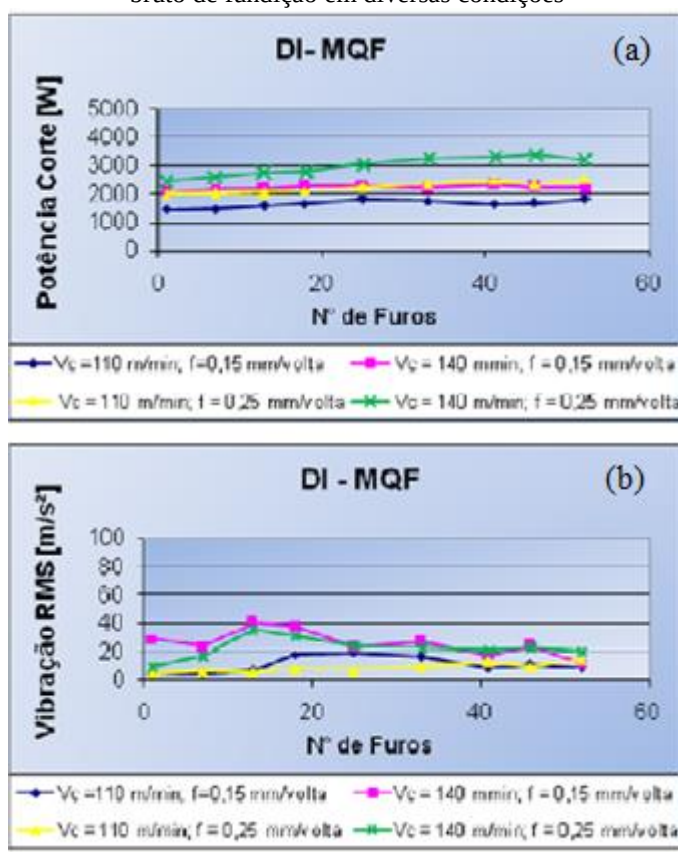
Fonte: Li e Tso (1999)

Na Figura 16 pode-se observar que conforme o desgaste da broca aumentava a corrente elétrica medida tanto no motor de fuso como no motor de alimentação aumentavam. Esse comportamento se explica pelo fato da perda de afiação da ferramenta, tornando a usinagem mais difícil e requerendo assim mais esforços para manter a velocidade de corte e a de avanço.

Li e Tso (1999) observaram também que houve aumento da corrente elétrica em ambos os motores, de alimentação e de fuso, com o aumento do diâmetro da broca, confirmando o obtido por Al Sulaiman, Baseer e Sheikh (2004).

Barbosa (2009) monitorou a potência elétrica e a vibração no processo de furação e também monitorou o desgaste. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 17, as Figuras 17 (a) e (b), curva verde, mostram o monitoramento da potência e da vibração nas condições que foram obtidos os desgastes da Figura 10.

Figura 17. Monitoramento de potência elétrica (a) e da Vibração(b) na furação do ferro fundido nodular perlítico bruto de fundição em diversas condições



Fonte: Barbosa (2009)

Comparando a Figura 10 com a curva verde da Figura 17 (a), observa-se que a potência elétrica cresce de forma uniforme de acordo com o aumento do desgaste apresentado na Figura 9, até aproximadamente 18 furos. Após os 18 furos a potência começa a crescer

mais rapidamente, talvez esse comportamento se deva ao começo dos lascamentos e a um aumento dos desgastes, modificando a geometria da ferramenta mais rapidamente. Nas Figuras 10 (b), (d) e (e) pode-se ver lascamentos já evoluídos, na situação de 30 furos, indicando que começaram antes. Com 5 furos Figura 10 (a) observa-se um desgaste de flanco ainda pequeno, e sem lascamentos, presume-se que os lascamentos apareceram bem mais tarde.

A Figura 17 (b) observa-se uma oscilação muito grande dos valores de vibração, dificultando assim um monitoramento de desgaste através desse parâmetro. Barbosa (2009) atribuiu as oscilações no comportamento da vibração aos lascamentos. Essa atribuição pode ser confirmada pela comparação da Figura 10 com a curva verde da Figura 17 (b), quando os lascamentos começam a aparecer a vibração começa a oscilar.

Os resultados obtidos pelos autores confirmam o quanto o monitoramento pode ser influenciado pelos parâmetros usados no corte. No monitoramento de desgaste através de parâmetros elétricos (potência e/ou corrente) não se pode utilizar os mesmos valores de potência e/ou corrente como parâmetro de fim de vida em operações com parâmetros de corte diferentes. Deve-se sempre que trocar algum parâmetro obter uma nova curva de calibração e determinar uma nova potência para o fim de vida.

Com relação à eficácia desse método, autores como Al Sulaiman, Baseer e Sheikh (2004), Chaves, Casarin e Kiecow (2014) e Silva (2010) conseguiram obter uma relação entre o desgaste e parâmetros elétricos da máquina ferramenta, de modo que consiga-se determinar a troca de ferramenta baseando-se nos parâmetros elétricos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico são mostrados os materiais que foram utilizados durante o experimento, bem como os métodos que foram utilizados.

4.1 Brocas de aço rápido

As brocas utilizadas no trabalho são brocas helicoidais de aço rápido DIN 338, fabricadas pela empresa HTOM. Foram utilizadas quatro brocas para a calibração entre desgastes e corrente e outras quatro para a validação do método. Na Tabela 2 são apresentadas algumas informações dimensionais dadas pela empresa a respeito da broca.

Tabela 2. Informações dimensionais a respeito da broca.

Diâmetro $\varnothing$ (mm)	C. total (mm)	C. canal (mm)	Ângulo de ponta σ (°)
6	93	57	118

Fonte: HTOM (2016)

4.2 Material usinado

O material a ser usinado foi escolhido baseado em trabalhos como Khan (2017), Fortunato (2012) e Calza (2007). Foi escolhido o aço SAE 1045, Na Tabela 3 pode-se ver a composição do material utilizado. O material foi fabricado pela empresa GERDAU, possui resistência à tração entre 630 e 780 N/mm², e dureza entre 180 e 228 HB de acordo com o fabricante.

Tabela 3. Composição química do Aço SAE 1045

SAE/COPANT	Composição química (%)			
	C	Mn	P máx.	S máx.
1045	0,43 - 0,50	0,60 – 0,90	0,030	0,050

Fonte: GERDAU (N/A)

Foi utilizada uma peça de formato cilíndrico, apresentando 4” de diâmetro e 40 mm de espessura. Os furos tinham distância entre centro de aproximadamente 10mm, sendo assim possível realizar 101 furos no corpo de prova. Para ajudar no posicionamento foi utilizado o aparelho divisor, ao final de cada furo era girada 1 volta e 9 furos, garantindo distância entre furos. A Figura 18 apresenta a peça antes dos furos.

Figura 18. Peça cilíndrica de Aço SAE 1045



Fonte: Autoria própria (2019)

4.3 Parâmetros de corte

As condições de corte foram baseadas na Figura 2, que indicam velocidades de corte para brocas de aço rápido de acordo o material a ser usinado. Levou-se em conta também o trabalho de Khan (2017), que estudou o desgaste de brocas de aço rápido (10mm de diâmetro) na usinagem do aço AISI 1045, em diferentes condições de velocidade de corte e avanço.

Utilizando as características do material foi consultada a Figura 2, comparando com os resultados obtidos por Khan (2017) e respeitando as limitações da máquina ferramenta, foi-se decidido que a velocidade de corte seria de 24m/min. A profundidade de corte foi de 30mm (furação profunda, cinco vezes o diâmetro da broca de acordo com CALZA (2007)) e não houve utilização de fluido de corte.

Com relação à velocidade de avanço a ser adotada foi-se consultada também a Figura 2. Utilizando o diâmetro da broca como parâmetro de entrada, na Figura 2 recomenda-se uma velocidade de avanço de 0,14mm/rotação. O valor recomendado pela Figura 2 não é alcançado pela máquina ferramenta (Furadeira de coluna Clark, modelo FC35A), então se foi utilizado o valor de 0,1mm/rotação, que dos avanços disponíveis na furadeira, era o mais próximo do recomendado. Outra característica do método de furação utilizado foi que optou-se por não utilizar o ciclo pica-pau, pois na furadeira não se tem o recuo automático, e a execução do ciclo pica-pau de formas diferentes poderia influenciar nos desgastes. Outro fator considerado para a não utilização do recuo foi garantir que as medições de corrente durante a usinagem ocorressem sempre com a ferramenta em contato com a peça. Os principais parâmetros da furação utilizada podem ser observados na Tabela 4.

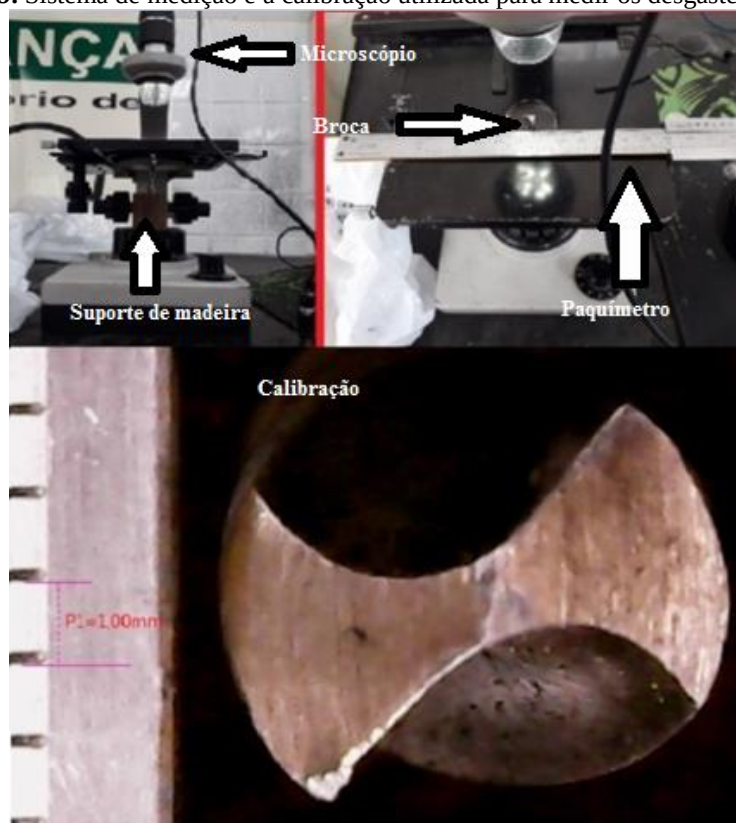
Tabela 4. Parâmetros de corte selecionados para os ensaios

Vc (m/min)	f_n (mm/rotação)	Profundidade do furo (mm)
24	0,1	30

Fonte: Autoria própria (2019)

4.4 Avaliação do desgaste

Foi fabricado um suporte de madeira para fixar a broca, e obter sempre a mesma distância entre as brocas e o sistema microscópio/câmera. Um paquímetro foi posicionado em relação ao sistema microscópio/câmera (*Digital Microscope Eletronic Magnifier*) à mesma distância que as brocas eram posicionadas em relação ao sistema, de modo que pôde-se fazer uma calibração com o auxílio do software AmScope®. Na Figura 19 pode-se ver como foram feitas as medições.

Figura 19. Sistema de medição e a calibração utilizada para medir os desgastes da broca.

Fonte: Autoria própria (2019)

No software foi possível relacionar a dimensão real (imagem da graduação do paquímetro) com os pixels das imagens obtidas sempre na mesma distância em relação ao sistema câmera microscópio.

Foram feitas imagens das brocas novas e das brocas após cada furo realizado. Os desgastes medidos foram no flanco das arestas das brocas, desgastes de flanco máximo (VB) e médio (VB'). Essas medições eram feitas comparando as dimensões da broca desgastada com a broca nova, os valores de desgaste considerados para a calibração e validação do experimento eram os das arestas que apresentaram maior desgaste.

4.5 Monitoramento de Corrente elétrica

O monitoramento da corrente elétrica foi feito através do multímetro BRYMEN ET-4090, que foi instalado de modo a medir a corrente de linha que alimentava o motor da furadeira. As correntes elétricas eram registradas em vazio (a furadeira funcionando, mas sem usinar a peça), pouco tempo após entrar em contato com a peça e instantes antes do fim do termino do furo.

A corrente elétrica registrada logo após a broca entrar em contato com a peça pela primeira vez, no primeiro furo, foi relacionada com a broca nova (desgaste zero). As correntes medidas instantes antes do final da operação foram relacionadas com os desgastes das brocas que foram medidos imediatamente após a obtenção do furo.

Utilizando os valores de corrente de linha e assumindo o sistema elétrico equilibrado entre as três fases e tensão de 380V, pôde-se calcular a potência elétrica instantânea que estava sendo consumida pelo motor da furadeira. A diferença entre as potências elétricas durante o corte e a potência elétrica em vazio é equivalente à potência de corte.

4.6 Validação do experimento

Após se obter a curva de calibração foi determinada uma variação de corrente na qual o desgaste seria um pouco inferior ao do fim de vida. Com os valores de desgaste obtidos para essa variação de corrente foi determinado, pelo método de T-Student com 95% de confiança, um intervalo de desgastes a ser respeitado.

Após isso, eram feitos furos e o critério de parada era a variação de corrente elétrica (diferença entre corrente em usinagem e em vazio) determinada. Após a parada eram medidos os desgastes e se estavam dentro do intervalo de desgastes determinado, verificando assim a confiabilidade da calibração.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos no experimento, e serão discutidas as causas dos comportamentos obtidos durante os ensaios.

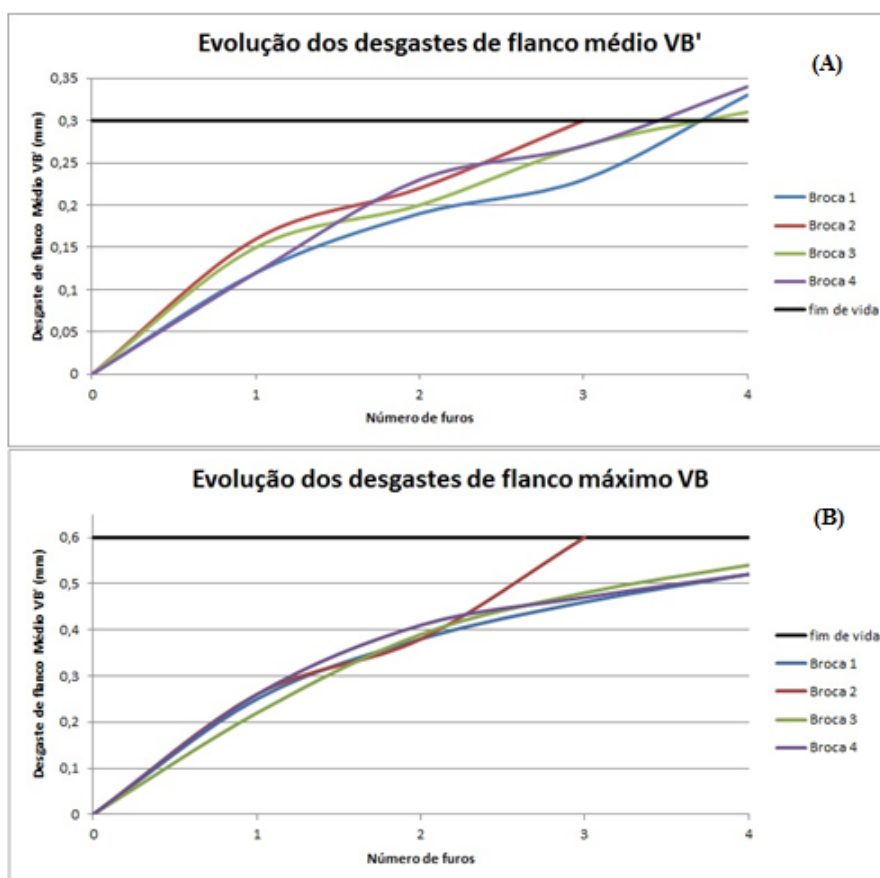
5.1 Resultados referentes à etapa de calibração

Neste tópico serão apresentados os resultados referentes à primeira etapa do trabalho, na qual foi feita a calibração entre corrente elétrica e desgastes.

5.1.1 Resultados referentes aos desgastes

A maioria das brocas utilizadas nos ensaios chegaram ao fim de vida após quatro furos. Na Figura 20 é mostrado como foi a evolução dos desgastes de flanco máximo e médio nas brocas, sendo a Figura 20 (A) referente aos desgastes de flanco médio (VB') e 20 (B) em relação aos desgastes de flanco máximo (VB).

Figura 20. Evolução dos desgastes de flanco com o numero de furos.



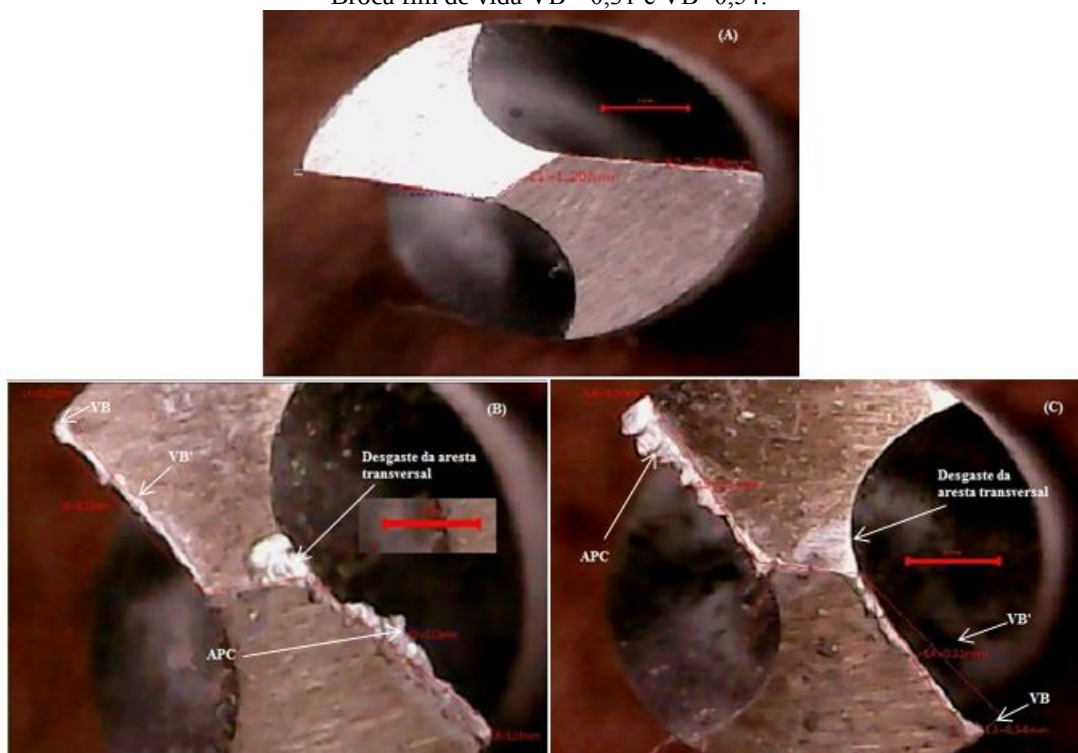
Fonte: Autoria própria (2019)

Os gráficos mostram que apenas uma broca falhou antes dos quatro furos, pelos critérios de desgaste de flanco médio (VB') ou máximo (VB). As brocas apresentaram comportamentos parecidos com relação aos desgastes de flanco.

O comportamento das curvas de desgastes obtidas são semelhantes ao discutido por Machado (2012) e Barbosa (2009, *apud* ERTUNC *et al.*, 2001), Figura 13. Pelo fato de o ensaio não ter continuado até o colapso da ferramenta(estágio de desgaste 5), a maior parte das curvas de brocas não aparenta ter chegado também ao estágio de desgaste 4 (desgaste severo). Apenas a broca 2 (curva vermelha do Figura 20(B)) aparenta ter chegado ao desgaste severo, as demais brocas passam apenas pelos estágios 1, 2 e 3 (desgaste inicial, desgaste leve-regular e desgaste moderado, respectivamente).

Na Figura 21 podem ser observadas imagens ampliadas da evolução do desgaste que foi apresentado em uma das brocas. Na Figura 21 tem-se (A) broca nova, (B) broca no estado de meia vida e (C) broca no estado de fim de vida.

Figura 21. Evolução dos desgastes na broca. (A) Broca nova; (B) Broca meia vida $VB'=0,15$ e $VB=0,22$; (C) Broca fim de vida $VB'=0,31$ e $VB=0,54$.



Fonte: Autoria própria (2019)

Na Figura 21(B) pode-se perceber que houve desgaste na aresta transversal e formação de aresta postiça de corte. Esse comportamento foi observado em todos ensaios, incluindo o

da Figura 21 (C), que apresenta uma evolução do desgaste em relação à Figura 21 (B), com o desgaste da aresta transversal e desgaste de flanco maior.

Com relação aos mecanismos teve-se abrasão, devido ao atrito entre ferramenta e peça, principalmente adesão. A adesão fica evidenciada pela grande formação de aresta postiça, que é formada na zona de adesão. Pela aresta postiça também pode-se supor que não houve difusão, pois a aresta postiça não é formada em grandes temperaturas (temperatura de recristalização do metal), já o mecanismo de difusão só aparece em grandes temperaturas.

Os desgastes obtidos durante os ensaios são semelhantes aos apresentados no trabalho de Khan (2017), no qual se obteve arestas postiças e a na aresta transversal um desgaste que foi denominado fratura pelo autor. Apesar de o desgaste apresentado aparentar uma fratura, a ferramenta é de aço rápido, apresentando boa tenacidade e dificultando a possibilidade de fratura. Na Figura 21 (B) observa-se a presença de material aderido à aresta transversal, já na Figura 21 (C) esse material não está mais presente, indicando que tal material se desprendeu. Ao se desprender da aresta transversal possivelmente o material que estava aderido na aresta transversal levou material da mesma consigo. Para se analisar melhor esse desgaste e ter certeza que não é uma fratura, deve-se obter imagens melhores (no microscópio eletrônico de varredura).

O desgaste da aresta transversal foi atribuído por Khan (2017) ao carregamento mecânico. Como o carregamento mecânico utilizado no presente trabalho foi maior que o utilizado pelo autor (devido a maiores velocidades de corte e de avanço), então não é surpresa esse comportamento ter aparecido. Barbosa (2009) obteve lascamento da aresta transversal da broca e atribuiu à dureza do material, talvez o desgaste obtido na aresta transversal nesse trabalho e por Khan (2017) tenham o mesmo motivo. Outra possibilidade é que esse desgaste seja o achatamento do gume transversal citado por Stemmer (1995), que é causado devido às grandes velocidades de avanço.

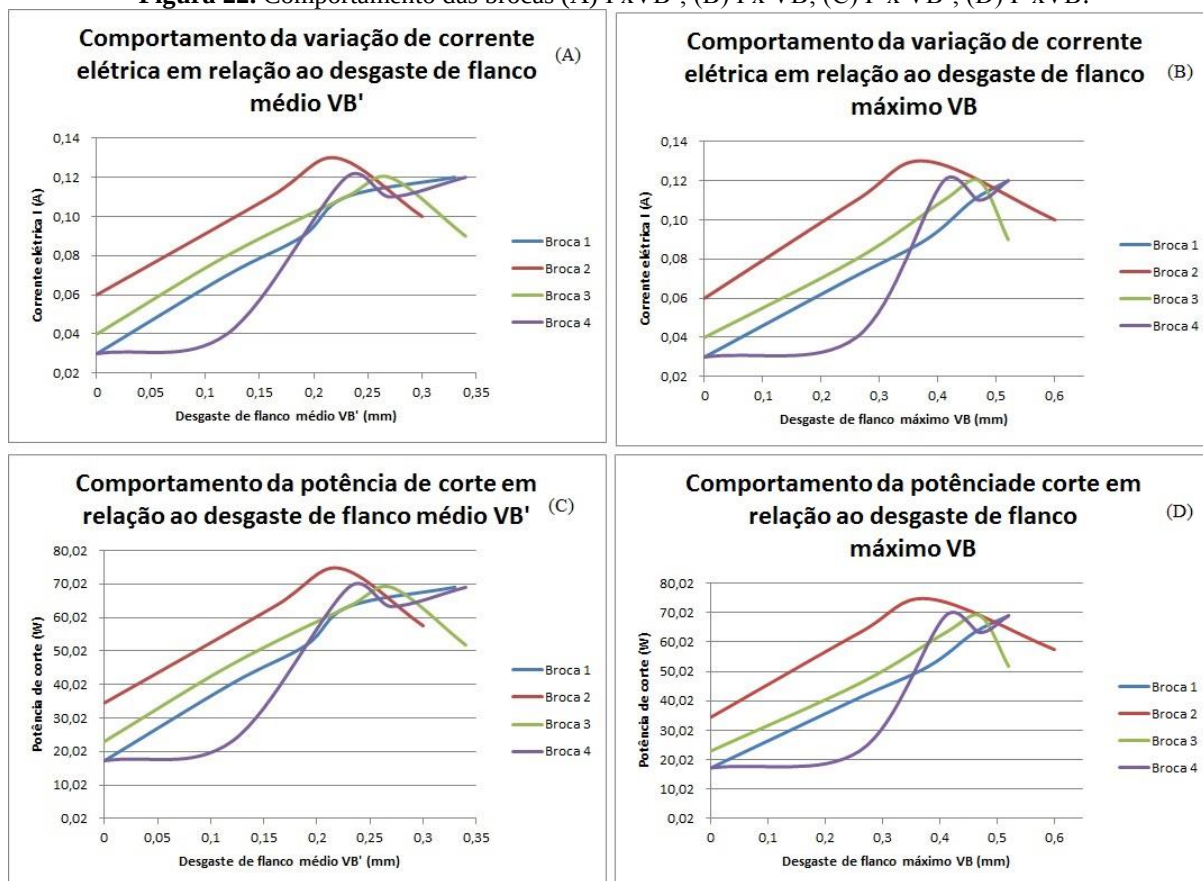
Com relação às APCs, apesar de maiores velocidades em relação ao trabalho de Khan (2017), da não utilização de fluido ou recuo durante a operação, as APCs ainda apareceram. Então presume-se que a temperatura de recristalização do aço usinado não foi atingida durante a usinagem, pois segundo Diniz (2013) as APCs desaparecem ao se chegar nessa temperatura.

5.1.2 Resultados referentes aos parâmetros elétricos

Na Figura 22 é mostrado o comportamento de cada broca, em relação à potência de corte e à corrente elétrica, conforme os desgastes de flanco médio e máximo evoluem. Na

Figura 22 (A) e (B) observa-se o comportamento da corrente elétrica em relação aos desgastes de flanco médio e máximo, respectivamente. Já a 22 (C) e 22 (D) o comportamento da potência de corte em relação aos desgastes de flanco médio e máximo, respectivamente.

Figura 22. Comportamento das brocas (A) $I \times VB'$; (B) $I \times VB$; (C) $P \times VB'$; (D) $P \times VB$.



Fonte: Autoria própria (2019)

As curvas de potência de corte apresentadas na Figura 22 (C) e (D) tem comportamento igual, às respectivas curvas de corrente elétrica, já que foram obtidas a partir dos valores de corrente elétrica medidos. Os valores de potência apresentados nas Figuras 22 (C) e (D) variam em torno de 20 a 80 W, comparados com o valor teórico calculado 113 W (equação 1), foram baixos. Essa diferença pode ser explicada pelo valor de K_c utilizado da Tabela 4 (anexo 1), na qual não é levado em conta a geometria e o material da ferramenta, o processo de usinagem e condições de corte, que segundo Diniz (2013) são relevantes na magnitude do K_c .

Com relação às curvas de desgaste de flanco médio e máximo observa-se um comportamento parecido, com uma tendência de crescimento de corrente/potência elétrica

conforme o desgaste se desenvolve, até certo ponto (próximo ao fim de vida), após isso ele decresce.

A tendência da corrente/potência aumentar é explicada pela perda de afiação da ferramenta. Essa perda causa um aumento da área de contato e do atrito entre a peça e a ferramenta, exigindo mais potência da máquina ferramenta, para manter a velocidade, e aumentando assim a corrente. Al Sulaiman, Baseer e Sheikh (2004) e Li e Tso (1999), obtiveram esse crescimento de corrente/potência em seus trabalhos.

Com relação ao decaimento observado, uma das causas para esse decaimento pode ser o comentado por Silva (2010), que o aumento da temperatura de corte diminui a dureza da peça e facilita o corte, exigindo menor potência. Talvez essa diminuição da dureza tenha sobressaído em relação ao aumento da área de contato e do atrito também explicado pelo autor. Outra hipótese para o decaimento de corrente elétrica apresentado pode ser o explicado por Diniz (2013), que a aresta postiça de corte modifica a geometria da ferramenta e as forças de corte da usinagem. A aresta postiça apresentada na Figura 21 (C) é maior que a apresentada na Figura 21 (B), talvez essa mudança de geometria tenha provocado essa diminuição na potência.

Com relação os resultados mostrados na revisão bibliográfica Figuras 14, 15 16 e 17(A), a parte na qual a corrente cresce da curva obtida é similar ao comportamento das Figuras citadas. Quanto ao decaimento obtido, é apresentado somente em algumas curvas da Figura 17 (A).

Foi observado um aumento das potências de corte nas brocas no estado de fim de vida (67,33W) em relação às brocas novas (24,48 W) de em média 175%, maior do que os 15% obtidos por Silva (2010) durante o seu processo de fresamento.

5.2 Resultados referentes à validação do experimento

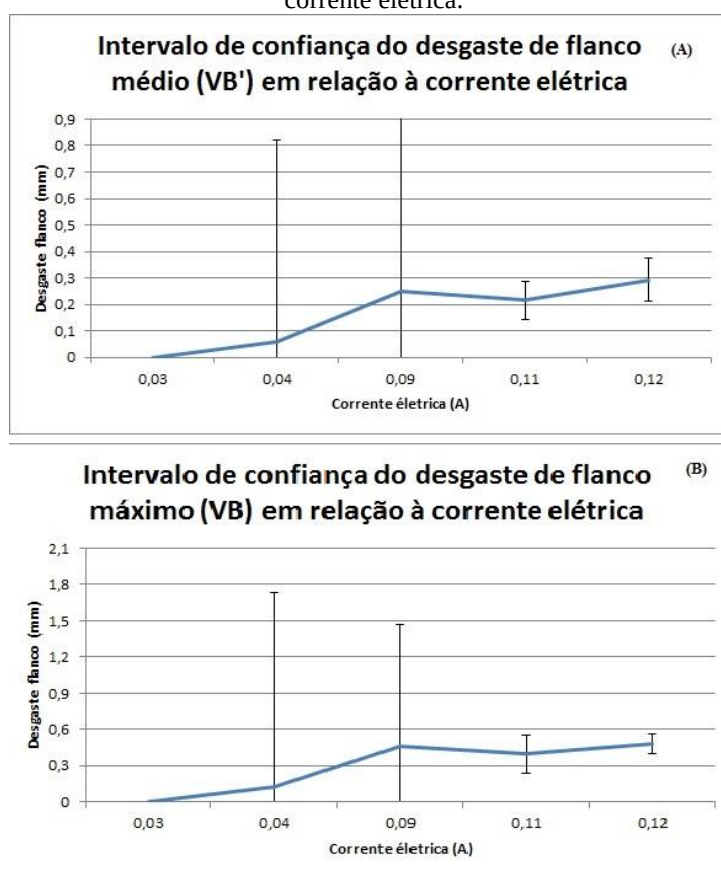
Neste tópico serão apresentados os resultados referentes à segunda parte do experimento, na qual é feita a validação do experimento.

5.2.1 Resultados referentes aos desgastes

Com base nas curvas de calibração foi determinado que o critério de troca de ferramenta seria a variação de corrente igual a 0,11A. As amostras que apresentaram essa corrente foram tratadas estatisticamente e pelo método de T-Student foi-se determinado um intervalo de confiança. Com um nível de confiança de 95% esperava-se que ao parar o

processo quando a corrente fosse 0,11A os valores de desgaste VB' estejam entre 0,14mm e 0,29mm e de VB entre 0,24mm e 0,55mm. Então os furos eram feitos e o processo era monitorado, quando se chegava à corrente determinada, esperava-se terminar o furo e então eram feitas as medições do desgaste. Na Figura 23 pode-se observar os intervalos de confiança gerados para algumas correntes.

Figura 23. Intervalos de confiança para desgastes de flanco médio (A) e máximo (B) em relação à variação de corrente elétrica.



Fonte: Autoria própria (2019)

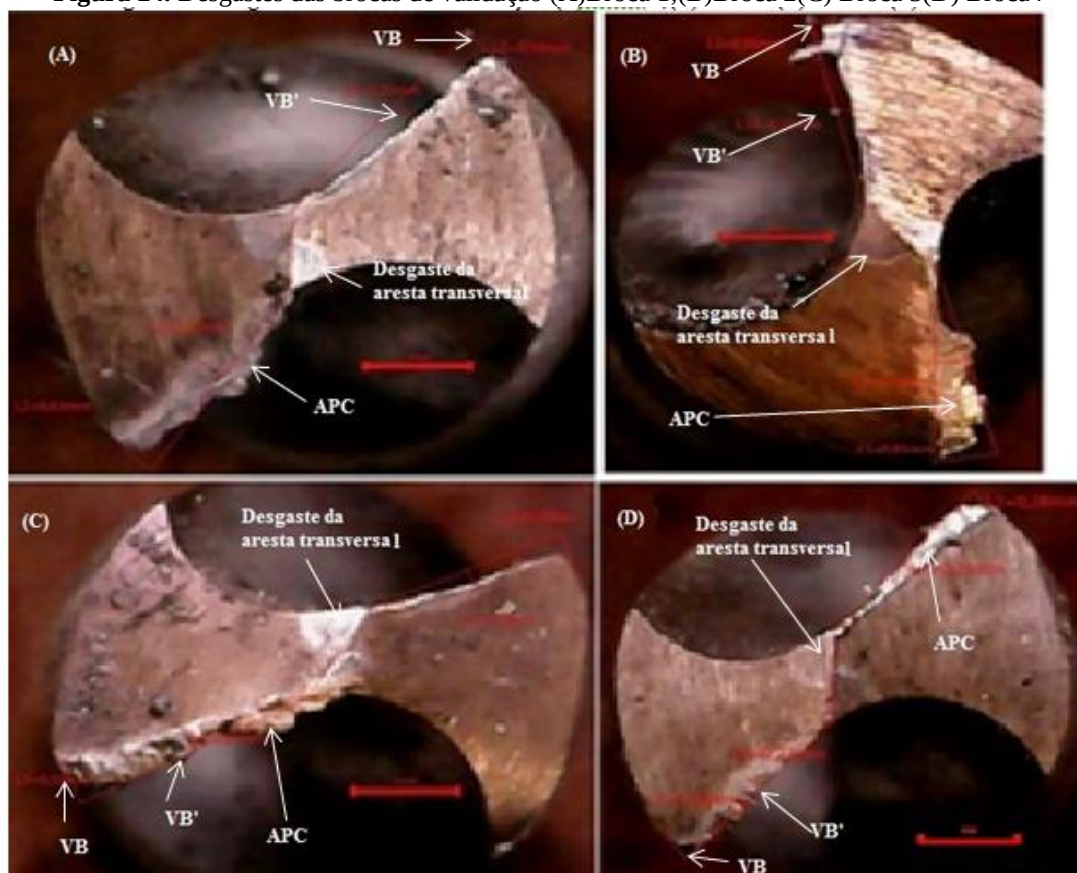
Observa-se intervalos de confiança grandes para algumas correntes (maiores que do desgaste zero ao fim de vida), isso deve-se à baixa amostragem e dispersão dos valores de desgaste obtidos em cada corrente. O intervalo de confiança para correntes 0,11A e 0,12A são menores, pois houve mais ocorrência de paradas nessas correntes e menores dispersões dos valores de desgastes medidos.

A corrente determinada para a troca da ferramenta chegou para as duas primeiras brocas no quarto furo, para a terceira broca no terceiro e para a ultima broca no segundo furo. Com relação ao desempenho do método, as duas primeiras brocas ensaiadas ultrapassaram o fim de vida obtendo a primeira $VB'=0,32\text{mm}$ e $VB=0,63\text{mm}$, já a segunda $VB'=0,40\text{mm}$ e

VB=0,66mm. A terceira broca obteve desgaste de flanco médio de VB'=0,29mm, respeitando o intervalo admitido para o desgaste de flanco médio. Porém a terceira broca falha com relação ao intervalo de confiança do desgaste de flanco máximo, apresentando 0,59mm (abaixo do fim de vida). Somente a quarta broca respeitou os dois intervalos de confiança obtendo VB'=0,27mm e VB=0,44mm.

Um fator que contribuiu para a falha da validação é o fato que mesmo após chegar à corrente determinada o furo era concluído, promovendo assim mais desgastes. Outro fator que pode ter influenciado é a temperatura, já que durante a calibração eram medidos os desgastes após cada furo, dando tempo necessário para que a ferramenta voltasse à temperatura ambiente. Nas brocas de validação o tempo entre furos foi menor, apenas o de reposicionar a broca para o novo furo. A temperatura mais elevada pode ter contribuído para a diminuição da dureza da ferramenta de modo que esta desgastou mais rapidamente. Na Figura 24 pode-se observar os desgastes obtidos nas brocas de validação.

Figura 24. Desgastes das brocas de validação (A) Broca 1; (B) Broca 2; (C) Broca 3; (D) Broca 4



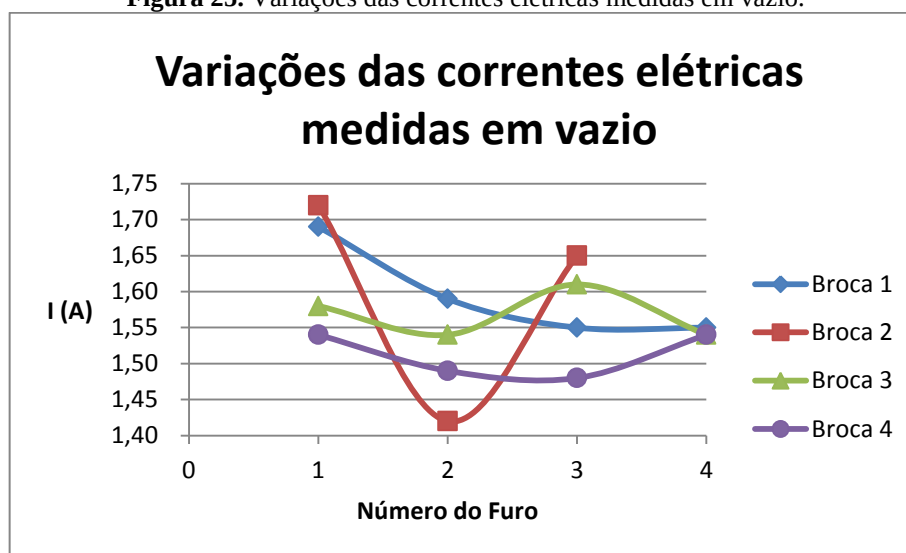
Fonte: Autoria própria (2019)

Os tipos de desgastes obtidos foram similares aos obtidos na obtenção da curva de calibração apresentando arestas postiças e o mesmo desgaste de aresta transversal, discutidos anteriormente. Porém, os desgastes obtidos na validação quando comparados com os obtidos na obtenção da curva de calibração tem maior magnitude.

5.3 Considerações finais sobre os resultados do experimento

Durante o experimento a corrente elétrica variava, mesmo antes de começar a usinagem. Esse problema pode ser causado por instabilidade da rede elétrica, essa instabilidade é comprovada pela observação da Figura 25, na qual são mostradas as diferenças das correntes medidas em vazio (sem usinar a peça).

Figura 25. Variações das correntes elétricas medidas em vazio.



Fonte: Autoria própria (2019)

Na Figura 25 observa-se uma diferença de até 0,30A (quase o triplo da determinada como critério de parada, 0,11A) na dispersão dos valores. Como as correntes em vazio eram subtraídas das correntes relacionadas aos desgastes, então parte desses “ruídos” eram eliminados. Por outro lado, nada impede que essas variações tenham ocorrido durante o processo de usinagem, prejudicando tanto a obtenção das curvas de calibração como a validação.

No trabalho de Al Sulaiman, Baseer e Sheikh (2004) foram identificados problemas quanto aos “ruídos” e quanto à baixa variação de corrente/potência elétrica. Para se resolver esses problemas foi utilizado um dispositivo denominado *Differential current detector box*. Esse dispositivo amplifica a corrente, de modo a ficar mais detectável, e equilibra os “ruídos”.

6 CONCLUSÕES

A partir das pesquisas realizadas e da realização do experimento pode-se atestar a influência do desgaste na potência de corte e consequentemente na potência e corrente elétrica do motor da máquina ferramenta que realiza a usinagem. Houve um aumento de em média 175% da corrente elétrica de uma broca no estado de fim de vida em relação a uma broca nova, consequentemente esse aumento se refletiu na potência calculada.

Os desgastes sofridos pelas brocas foram caracterizados por abrasão e principalmente adesão, com grande formação de arestas postiças de corte. As APCs contribuíram para que com poucos furos as brocas chegassem ao fim de vida.

O procedimento de medição de corrente utilizado no experimento é sujeito a variações da rede elétrica, que podem comprometer o monitoramento do processo, de modo causar a troca de ferramenta após o fim de vida.

A validação do experimento mostrou que as curvas de calibração obtidas não foram confiáveis, e que nas condições de chão de fábrica (a ferramenta sem tempo para resfriar) a ferramenta possuiu um desgaste mais elevado.

O método utilizado e com os equipamentos utilizados não foi capaz de monitorar a vida da ferramenta de forma confiável. Porém autores como Al Sulaiman, Baseer e Sheikh (2004) e Li e Tso (1999) conseguiram realizar o monitoramento por esse método, mostrando que pode ser uma ferramenta bastante útil no monitoramento de desgastes.

REFERÊNCIAS

DINIZ, Anselmo E. *et al.* **TECNOLOGIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. São Paulo: MM editora, 2013. 175-184, 105-108 p.

CASTRO, Pablo R. A. **ASPECTOS TECNOLÓGICOS DA USINAGEM A SECO E COM MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO DE CORTE NA FURAÇÃO COM BROCA HELICOIDAL**. 2001. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/81635>>. Acesso em: 7 jun. 2018.

FERRARESI, Dino. **FUNDAMENTOS DA USINAGEM DOS METAIS**. São Carlos: Editora Edgard Blucher Ltda, 2012. xxix p.

BARBOSA, Leonardo M. ; MIRANDA, Gilberto W. A. **MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO DA BROCA CHANDRILL NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO CINZENTO**. In: 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 2007, Aguas de São Pedro – SP.

PIMENTEL, Ricardo. **MELHORIA DO PROCESSO DE FURAÇÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO COM BROCAS HELICOIDAIS DE METAL-DURO**. 2014. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/128786>>. Acesso em: 2 out. 2018.

STEMMER, Caspar E. **FERRAMENTAS DE CORTE II**. 2º edição. Florianópolis: Editora da UFSC. 1995. 1-31p.

BELLINI, Paulo H. C. **ESTUDO DO DESGASTE NA FURAÇÃO E ROSCAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS**. 2005. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-05022016-135542/pt-br.php>>. Acesso em: 2 out. 2018.

TEIXEIRA, Cleiton R. **INFLUÊNCIA DOS ERROS GEOMÉTRICOS DE AFIAÇÃO NAS BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RÁPIDO NA QUALIDADE DOS FUROS PRODUZIDOS**. 1995. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/76274>>. Acesso em: 7 jun. 2018.

HOFFMANN, Ivens D. **UMA AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO CINZENTO PARA O PROCESSO DE FURAÇÃO SEM FLUIDOS LUBRIFRIGERANTES**. 2013. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1824/TCC%20Ivens%20Daniel%20Hoffmann.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 7 jun. 2018.

SILVA, Rodrigo H. L. **MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS NO FRESAMENTO DE TOPO ATRAVÉS DOS SINAIS DE POTÊNCIA E EMISSÃO ACÚSTICA E REDES NEURAIAS**. 2010. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14840/1/Rodrigo.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2018.

SOUTO, Ulisses B. **MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS NO PROCESSO DE FRESAMENTO VIA EMISSÃO ACÚSTICA**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14788/1/UBSoutoTES01PRT.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2018.

PORTO, Joaquim F. B. **METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM UMA BROCA GERADAS DURANTE A FURAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 ATRAVÉS DA ANÁLISE DE DISPERÇÃO DOS SINAIS MONITORADOS DE FORÇA E TORQUE**. 2017. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/165248>>. Acesso em: 7 jun. 2018.

AL-SULAIMAN, Faleh A.; BASEER, Abdul M.; SHEIKH, Anwar K. **USE OF ELECTRICAL POWER FOR ONLINE MONITORING OF TOOL CONDITION**. In: Journal of Materials Processing Technology, Vol.166. 2005.

LI, Xiaoli; TSO, S. K. **DRILL WEAR MONITORING BASED ON CURRENT SIGNALS**. In: Wear, Vol.231. 1999.

SOUSA, José A. G. **DESEMPENHO DE FERRAMENTAS REAFIADAS- FURAÇÃO**. 2011. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14884/1/d.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2018.

CASTILLO, Willian J. G. **FURAÇÃO PROFUNDA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO GG25 COM BROCAS DE METAL-DURO COM CANAIS RETOS**. 2001. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/101938>>. Acesso em: 7 jun. 2018.

CHEN, Y. C.; LIAO, Y. S. **STUDY ON WEAR MECHANISMS IN DRILLING OF INCONEL 718 SUPERALLOY**. In :Journal of materials processing technology. V 140. 2003.

MACHADO, A. R. ; ABRÃO, A. M. ; COELHO, R. T. ; SILVA, M. B. **TEORIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. 1. Ed. São Paulo-SP: Edgard Blucher, 2012. v. 1. 248 e 249 p.

BARBOSA, Patrícia A. **FURAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS AUSTEMPERADOS E NODULAR PERLÍTICOS**. 2009. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14838>>. Acesso em: 7 jun. 2019.

Khan, Sarmad A; *et al.* **DEEP HOLE DRILLING OF AISI 1045 VIA HIGH-SPEED STEEL TWIST DRILLS: EVALUATION OF TOOL WEAR AND HOLE QUALITY**. In : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. V 93. 2017.

FORTUNATO, Fernando A. P. da S. **MEDIÇÃO DO DESGASTE DE BROCAS HELICOIDAIAS DE AÇO RÁPIDO POR MEIO DO USO DE UM DISPOSITIVO A LASER**. 2012. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2012. Disponível em: < <https://bibliotecatede.uninove.br/handle/tede/179> >. Acesso em: 5 mai. 2019.

CALZA, Maurício; SANTIN, Ricardo; NICOLA, Gerson L.; ZEILMANN, Rodrigo P. **DESGASTE DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO NA FURAÇÃO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DE FLUIDOS LUBRI-REFRIGERANTES**. In: 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 2007, Aguas de São Pedro – SP.

SANDVIK COROMANT. **FORMULAS DE FURAÇÃO E DEFINIÇÕES**. N/A. Disponível em: < <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/drilling.aspx> >. Acesso em: 15 Jul. 2019.

ANEXO

Curso Técnico em Mecânica Centro de Fabricação Mecânica					
<u>PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE “k_s” PARA OS MATERIAIS MAIS COMUNS</u>					
Peça			Pressão Específica de Corte (k_s), N/mm ² p/condições de usinagem:		
Tipo do Material	Classificação	Dureza Brinell (HB)	Geral	Acabamento	Desbaste
Aço carbono	ABNT 1020	125-175	1720	1990	1860
Aço carbono	ABNT 1045	175-200	1970	2070	1880
Aço de liga	ABNT 4140	175-200	2020	2270	1990
Aço de liga	ABNT 4340	200-225	2020	2290	1990
Aço de liga	ABNT 4140	250-275	2160	2400	2100

Fonte: Prof. Ricardo Adriano dos Santos

<http://paranagua.ifpr.edu.br/wp-content/uploads/2014/03/tabela-Press%C2%A6o-espec%C3%ADfica-de-corte.doc>