

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM UMA BROCA GERADAS DURANTE A  
FURAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 ATRAVÉS DA ANÁLISE DE  
DISPERSÃO DOS SINAIS MONITORADOS DE FORÇA E TORQUE

por

Joaquim Francisco Bertuol Porto

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2017



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM UMA BROCA GERADAS DURANTE A  
FURAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 ATRAVÉS DA ANÁLISE DE  
DISPERSÃO DOS SINAIS MONITORADOS DE FORÇA E TORQUE

por

Joaquim Francisco Bertuol Porto

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientadora: Esp. Andressa Caroline da Silva Carvalho

Comissão de Avaliação:

Prof. Flávio José Lorini

Prof. Heraldo José de Amorim

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 21 de Julho de 2017.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor André João de Souza, pela orientação, compreensão e conselhos.

À mestranda Andressa Caroline da Silva Carvalho, pela orientação, paciência, companhia nos experimentos e dicas.

Ao técnico Guilherme Vargas Schirmer, pelo trabalho, tempo e conversas.

Aos meus pais, pelas oportunidades, companhia, conselhos e dedicação.

À minha família, pelo carinho e todos os momentos juntos.

À Walter Tools, pela doação das brocas utilizadas.

Ao LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS, pelas análises químicas dos corpos de prova.

PORTO, J. 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 dispersão dos sinais monitorados de força e torque.** 2017. 20 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## RESUMO

O monitoramento de processos de usinagem permite avaliar indiretamente a qualidade da peça acabada detectando possíveis falhas na ferramenta ou na operação de corte que comprometam a mesma. Permite também detectar trincas, lascamentos ou até evitar a quebra da ferramenta de corte por inadequações no processo. Neste trabalho foram monitorados sinais de força de avanço e momento torsor (torque) no domínio do tempo durante a vida da broca no processo de furação do aço inoxidável austenítico AISI 304 com o intuito de demonstrar que as análises de dispersão podem ser aplicadas para detecção de falhas na ferramenta. Esta hipótese é sustentada por trabalhos apresentados na revisão bibliográfica. Para tanto, utilizou-se uma broca de aço-rápido com revestimento de TiAlN e 8,1 mm de diâmetro para a geração de furos passantes em chapas com 9,8 mm de espessura. A aquisição dos dados de força e torque foi realizada a cada um minuto de usinagem. Assim, foram realizados 393 furos, sendo que destes foram monitorados 29 furos. Os sinais coletados foram então analisados a partir dos parâmetros de assimetria e curtose da distribuição- $\beta$  por serem facilmente calculados a partir da média e variância da distribuição. Houve uma tendência destas análises revelar informações sobre falhas ocorridas durante o processo. Porém, os experimentos não levaram a ferramenta à sua total inutilização.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aço inoxidável AISI 304, Monitoramento de sinais de força e torque, Detecção de falhas em brocas, Assimetria e curtose em furação.

PORTO, J. F. B. **Methodology for drill failure detection during the drilling of AISI 304 stainless steel sheets through the dispersion analysis of the force and torque monitored signals**. 2017. 20 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

#### ABSTRACT

The indirect monitoring of machining processes allows to evaluate the quality of the finished part by detecting possible failures in the tool or cutting operation that compromise this part. It also allows the detection of cracks, chippings or even the cutting tool breakage due to inadequacies in the process. In this work, signals of feed force and drilling moment in time domain were monitored during the tool life of the drill in the austenitic stainless steel AISI 304 drilling in order to demonstrate that the dispersion analysis can be applied to detect tool failures. This hypothesis is supported by references presented in the literature review. So, a high-speed steel drill with TiAlN coating and 8.1 mm diameter was used to generate through-holes in 9.8 mm thick sheets. Force and moment data were captured every minute of machining. Thus, 393 holes were performed, of which 29 holes were monitored. Then the collected signals were analyzed from the skewness and kurtosis parameters of the  $\beta$ -distribution because they were easily calculated from the mean and variance of the distribution. There was a likely tendency for these analysis to reveal information about failures that occurred during the process. However, the experiments did not take the tool to its total disuse.

**KEYWORDS:** AISI 304 stainless steel, Force and torque signals monitoring, Drill failures detection, Skewness and kurtosis in drilling.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS .....	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1	Processo de Furação.....	2
3.2	Forças de Usinagem.....	3
3.3	Desgastes e Fim de Vida.....	3
3.4	Medidas de Dispersão .....	4
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	5
4.1	Materiais e Equipamentos .....	5
4.2	Procedimento Experimental.....	7
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	9
5.1	Avaliação do Estado Final da Broca .....	9
5.2	Monitoramento dos Esforços .....	10
5.3	Análises de Assimetria e Curtose .....	11
6	CONCLUSÕES.....	13
6.1	Trabalhos futuros.....	13
	REFERÊNCIAS.....	13

## 1 INTRODUÇÃO

A automação de processos de fabricação tem ganhado espaço na busca por maiores volumes de produção com maior qualidade e menores custos e tempos. Para isto exigem-se elevados graus de monitoramento e controle de processos destinados à fabricação de um componente mecânico, mecanismo ou máquina. Dentre os processos de fabricação, a usinagem é um dos que mais demonstrou mudanças, principalmente na automação, com o advento de centros de usinagem automatizados por comando numérico.

A aplicação de um sistema de monitoramento em um processo de usinagem permite a obtenção de peças com maior qualidade e está em consonância com os princípios da manutenção preditiva definida como *“a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática e onde as falhas são definidas como oriundas de causas que possam ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada”* [Kardec, 2015].

Os aços austeníticos podem ser considerados os mais importantes e os mais utilizados dentre os aços inoxidáveis devido às suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. Suas aplicações incluem desde utensílios domésticos de cozinha (talheres) até instrumentos cirúrgicos e da indústria petrolífera [Camargo, 2008]. Possuem elevada resistência à corrosão tanto em temperatura ambiente quanto em altas temperaturas. Entretanto, apresentam um elevado grau de encruamento quando deformados a frio, o que remete a uma baixa usinabilidade, formando cavacos longos (alta ductilidade) e gerando adesão de material na ferramenta de corte. Com relação ao aço inoxidável AISI 304, objeto deste estudo, destaca-se a estabilidade variável da austenita no trabalho a frio quanto à formação de martensita [Kwitniewski e Kiss, 2011]. Além disso, durante a usinagem, o AISI 304 possui baixa condutividade térmica, e alto coeficiente de atrito na interface peça/ferramenta e alta tensão de ruptura, o que obriga o processo de usinagem a ser feito com baixas velocidades de corte (evitando o caldeamento entre peça e ferramenta). Todas essas características dificultam a realização de operações com baixas tolerâncias dimensionais e de alta qualidade superficial [Camargo, 2008].

Durante o processo de furação em cheio de materiais dúcteis (como o AISI 304), considerando a rotação da ferramenta constante, observa-se que a velocidade de corte ( $v_c$ ) aumenta do centro para a periferia da broca. Esta situação, ( $v_c$  nula no centro da broca e máxima nas quinas) ocasiona diferentes falhas na ferramenta de corte. No caso, os desgastes de flanco nas arestas principais crescem proporcionalmente à  $v_c$ . Além disso, as quinas e guias ficam mais suscetíveis a arredondamentos e lascamentos. Já a região próxima ao centro (onde se localiza a aresta transversal) irá apresentar uma maior adesão de material devido a baixas  $v_c$ , levando inclusive à formação de aresta postiça de corte (APC) [Diniz et al., 2010].

Para que se possa estabelecer um critério para o fim de vida da broca (quando a mesma perde a sua capacidade de corte) utilizam-se limites predefinidos para as dimensões dos desgastes e das avarias (lascas). Pode-se inclusive utilizar a broca até a sua completa inutilização (quebra) [Diniz et al., 2010].

As forças que atuam sobre uma broca helicoidal durante o corte geram esforços de compressão (devido ao avanço da broca) e esforços de torção (devido à rotação da broca). Assim, podem-se estimar os esforços de corte no processo de furação através da força de avanço ( $F_f$ ) e do momento torsor ( $M_t$ ) [Diniz et al., 2010; Souza et al., 2014; Sória et al., 2016].

As análises estatísticas de dispersão envolvem parâmetros que descrevem o grau de variação de um conjunto de valores em torno da média, sendo o desvio-padrão o mais utilizado. Outros parâmetros são assimetria (indica os valores de uma distribuição que se agrupam mais acima ou mais abaixo de um ponto central) e curtose (grau de concentração de valores da distribuição em torno do centro desta distribuição).

Niu et al., 1998, utilizaram a distribuição- $\beta$  para análises de assimetria e curtose em sinais de emissão acústica (EA) para torneamento, com o objetivo de comparar o desgaste de flanco em ferramentas com e sem recobrimento. Eles apresentaram a possibilidade de se utilizar sinais de EA conjugados com os sinais de força para obter dois parâmetros independentes de monitoramento que se complementam em um sistema de tomada de decisão. Jemielniak e Belgassim, 2011, também utilizaram essa distribuição para detectar falhas na ferramenta durante

o processo de torneamento com corte intermitente. Para tanto, definiram uma distribuição como uma volta completa da peça, analisando os parâmetros de assimetria e curtose dos valores da média RMS do sinal de EA progressivamente durante toda a operação. Os autores citam ainda que a amplitude da média RMS do sinal monitorado não se altera significativamente no momento da quebra da ferramenta durante o corte intermitente, enquanto que a assimetria ( $S_\beta$ ) e a curtose ( $K_\beta$ ) da distribuição- $\beta$  apresentam boa correlação com a detecção dessa fratura. Vale dizer que a eficiência da detecção depende do tamanho da amostra e do intervalo de tempo entre duas amostras sucessivas.

O processamento de sinais no domínio do tempo apresenta vantagens em relação ao processamento no domínio de frequência, principalmente com relação a maior facilidade de interpretação dos dados gerados por um sistema de monitoramento.

## 2 OBJETIVOS

Monitorar os sinais de força ( $F_f$ ) e torque ( $M_t$ ) gerados pelo processo de furação em cheio de uma chapa de aço inoxidável AISI 304 com uma broca de aço-rápido para que, a partir das análises de assimetria e curtose destes sinais, consiga-se detectar a ocorrência da falha catastrófica da ferramenta (FCF).

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é abordada a fundamentação teórica relativa ao processo de furação, as forças de usinagem durante o processo, os critérios de fim de vida para ferramentas e as medidas de dispersão adotadas para as análises estatísticas.

### 3.1 Processo de Furação

Dentre os processos de usinagem, a furação é um dos que apresenta maiores problemas, seja pela má refrigeração e lubrificação no fundo do furo, pela formação inadequada de cavacos e sua dificultosa extração, e também pelo fato de ter-se velocidades de corte diferentes ao longo do comprimento das arestas de corte. Este processo usualmente incorre em acabamentos insatisfatórios e tolerâncias dimensionais elevadas para grandes comprimentos de furos (usualmente utiliza-se uma razão comprimento/diâmetro  $L/D \leq 3$ ). Para furos com tolerâncias pequenas usualmente utiliza-se o processo de furação seguido de um processo de acabamento (alargamento, retificação ou brunimento) [Diniz et al, 2010].

A geometria de uma broca helicoidal com dois canais pode ser observada na Figura 3.1.

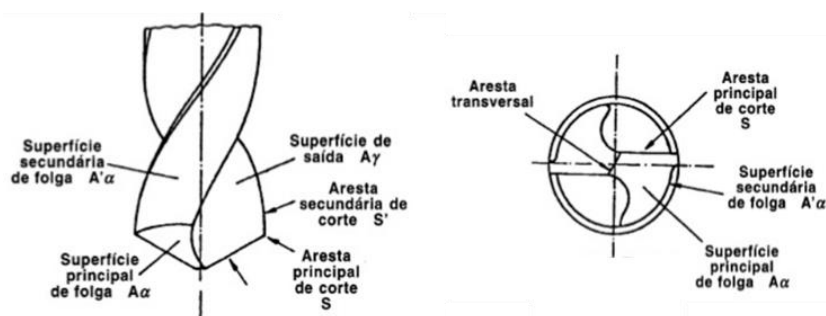


Figura 3.1 – Geometria de uma broca helicoidal [Diniz et al, 2010]

Destacam-se neste trabalho a aresta transversal de corte e as arestas principais de corte, que foram monitoradas para desgastes. As arestas principais não se encontram em um ponto e sim são unidas pela aresta transversal. Durante o movimento de corte, as arestas principais terão sua velocidade variando ao longo do raio da broca e a aresta transversal será pressionada no fundo do furo, com velocidade de corte nula no centro.



### 3.2 Forças de Usinagem

As resistências à furação de um material são três: (a) a resistência de corte das arestas principais, (b) a resistência devido ao esmagamento do material pela aresta transversal e (c) a resistência devido à atritos das guias da broca nas paredes do furo. Estas resistências irão gerar esforços de torção (devido à rotação da broca) e de compressão (devido ao avanço da broca) na ferramenta. Assim, podem-se estimar os esforços de corte no processo de furação, através do momento torsor ( $M_t$ ) e da força de avanço ( $F_f$ ) [Diniz et al, 2010; Souza et al., 2014].

A Figura 3.2 apresenta as decomposições das forças de usinagem originadas na broca durante o processo de furação. A força de usinagem “F” é a resultante das forças de corte ( $F_c$ ), passiva ( $F_p$ ) e de avanço ( $F_f$ ) geradas pela reação aos movimentos de rotação da ferramenta e de avanço na peça.

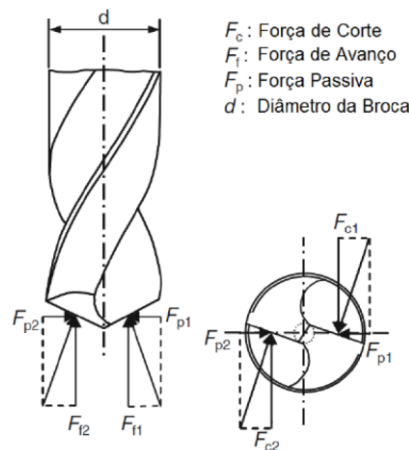


Figura 3.2 – Atuação das forças de corte em uma broca [Sória et al., 2016].

O momento torsor (torque) ( $M_t$ ) é dado pela Equação 3.1:

$$M_t = F_c \cdot \frac{D}{2} \quad (3.1)$$

Diniz et al, 2010, define a participação destas resistências como mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Contribuição percentual das resistências nos esforços de corte

	Arestas Principais	Aresta Transversal	Atritos nas Guias
Momento Torsor ( $M_t$ )	77 – 90%	3 – 10%	3 – 13%
Força de Avanço ( $F_f$ )	39 – 59%	40 – 58%	2 – 5%

A grande participação da aresta transversal de corte nos valores de  $F_f$  se deve à velocidade de corte nula no centro da broca, resultando no esmagamento do cavaco e encruamento do material no fundo do furo (ainda mais se tratando de aços inoxidáveis austeníticos). Isto é minimizado com o chanframento da aresta transversal [Diniz et al, 2010].

### 3.3 Desgastes e Fim de Vida

O fim de vida de uma broca é definido pela condição em que a mesma não realiza mais a operação de furação dentro das especificações exigidas. Pode-se definir desde um valor limite de desgaste, um nível de rugosidade do furo ou até a variação dimensional do furo. Ainda, para situações experimentais, pode-se considerar a completa inutilização da ferramenta (quebra) como um critério de fim de vida.

Dentre os desgastes que podem ser quantificados em uma broca destacam-se os desgastes da quina e das guias, utilizados como critérios de fim de vida pois os mesmos afetam o acabamento superficial e o diâmetro do furo. Caso a broca esteja sendo monitorada para uma futura reafiação pode-se tomar o desgaste de flanco como referência, utilizando-se geralmente valores de  $VB \leq 0,3$  mm [Souza, 2011].

Os desgastes da aresta transversal de corte ocorrem em uma região onde a velocidade de corte é baixa e até nula, assim em um processo de furação sem realização de pré-furo, principalmente em materiais dúcteis, a formação de aresta postiça de corte (APC) nesta região será esperada, assim como adesão de material.

Pode-se observar estes e outros desgastes característicos em uma broca na Figura 3.3.

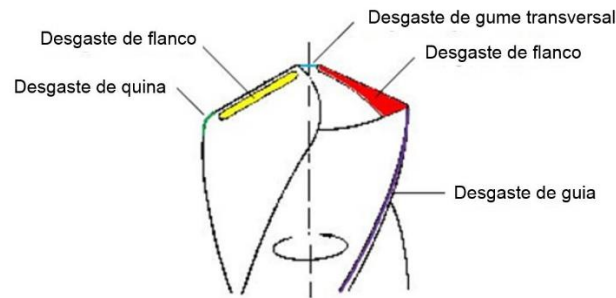


Figura 3.3 – Desgaste em uma broca [Souza, 2011].

Os desgastes podem ser relacionados com os movimentos de corte (avanço e rotação da broca). Pode-se evitar a formação de APC aumentando a velocidade de corte (rotação), porém, irá observar-se um maior desgaste das quinas e guias. Também, se a velocidade de avanço for incrementada a fim de diminuir os desgastes de quina, será observada uma maior formação de APC junto com uma má expulsão do cavaco do furo durante o processo que pode levar à quebra da ferramenta por esforços de flexão ou soldagem da broca no fundo do furo.

### 3.4 Medidas de Dispersão

Medidas de dispersão referem-se às medidas estatísticas que permitem compreender a forma de uma determinada distribuição e seu comportamento em volta da média. Duas medidas de dispersão bastante utilizadas são o desvio padrão e a variância.

Jemelniak e Belgassim, 2011, demonstraram que para sinais de emissão acústica (EA) é possível utilizar uma distribuição- $\beta$  para o cálculo de assimetria ( $S_\beta$ ) e curtose ( $K_\beta$ ) para a detecção de falhas na ferramenta de corte. Foi comentado que os valores de tendência central, no caso a média RMS, não conseguem detectar pequenas variações durante um monitoramento *on-line* do processo de usinagem.

Niu et al., 1998, e Jemielniak e Otman, 1998, representaram os parâmetros  $S_\beta$  e  $K_\beta$  quantitativamente pelas Equações (3.2) e (3.3) respectivamente:

$$S_\beta = \frac{2(b-a)}{a+b+2} \sqrt{\frac{a+b+1}{ab}} \quad (3.2)$$

$$K_\beta = \frac{6[(a-b)^2(a+b+1) - ab(a+b+2)]}{ab(a+b+2)(a+b+3)} \quad (3.3)$$

No caso, os parâmetros “a” e “b” podem ser calculados em função da média ( $\mu_\beta$ ) e da variância ( $\sigma_\beta^2$ ) da distribuição- $\beta$ , respectivamente pelas Equações (3.4) e (3.5):

$$a = \mu_{\beta} \left[ \frac{\mu_{\beta}(1 - \mu_{\beta})}{\sigma_{\beta}^2} - 1 \right] \quad (3.4)$$

$$b = (1 - \mu_{\beta}) \left[ \frac{\mu_{\beta}(1 - \mu_{\beta})}{\sigma_{\beta}^2} - 1 \right] \quad (3.5)$$

Souza, 2004, afirma que os valores de assimetria positivos ou negativos podem ser compreendidos como uma quantificação do afastamento da simetria da distribuição- $\beta$ . Ou seja, para valores de assimetria positivos tem-se os valores da moda<sup>1</sup> menores que da média, e para valores negativos de assimetria verifica-se o contrário. Souza cita também que a definição de curtose é dada pelo grau de achatamento da distribuição- $\beta$ . Entende-se que para valores menores de curtose tem-se uma distribuição pontiaguda ou leptocúrtica, e para valores maiores se tem uma distribuição achatada ou platicúrtica (Fig. 3.4).

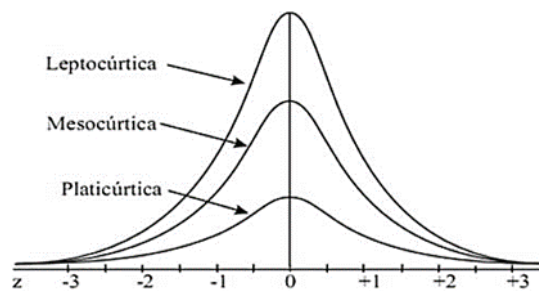


Figura 3.4 – Curvas de uma distribuição.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo inclui o detalhamento dos materiais, equipamentos e procedimentos experimentais utilizados para a execução do ensaio de fim de vida e para as análises.

### 4.1 Materiais e Equipamentos

Foram utilizados cinco corpos de prova (CP) com dimensões diferentes do aço AISI 304 cortados de uma mesma chapa, chamados “chapa de desgaste” (Fig. 4.1a) e “chapa de monitoramento” (Fig. 4.1b). Foi realizada uma verificação da composição química dos corpos de prova no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF-UFRGS) e seu resultado pode ser visto na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química do aço inoxidável AISI 304 utilizado (% massa)

Fe	C	Cr	Ni	Mn	Si	Co	Cu	Mo
71,3	0,05	17,83	8,52	1,22	0,47	0,17	0,16	0,15
P	V	Nb	Ti	S	Al	Sn	W	Pb
0,043	0,040	0,020	0,005	0,003	0,003	0,005	<0,010	<0,002

O primeiro CP, medindo 250 x 250 x 9,8 mm, foi utilizado para desgastar a ferramenta de corte até atingir 28 min de operação ou a falha da ferramenta (desgastes ou avarias). O segundo

<sup>1</sup> A moda de uma amostra é o valor que ocorre com a maior frequência, isto é, o valor mais comum.

CP, com 200 x 15,9 x 9,8 mm, foi fixado no dinamômetro para aquisição dos dados de força ( $F_f$ ) e torque ( $M_t$ ).

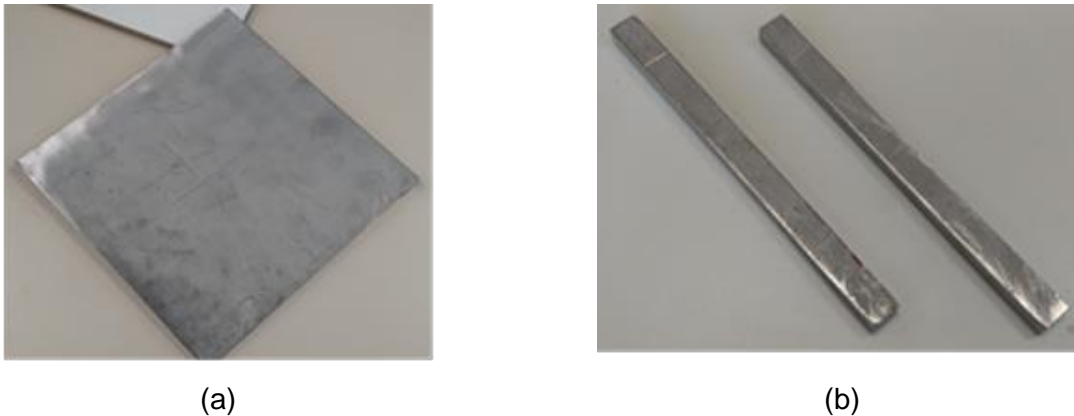


Figura 4.1 – Corpos de prova: (a) chapa de desgaste; (b) chapa de monitoramento

No ensaio de vida aplicou-se uma broca Walter Tools VA Inox A1154 TFT de aço-rápido com 5% de cobalto para aplicações em altas temperaturas segundo a norma AISI M35, com revestimento de TiAlN (Fig. 4.2). Esta broca possui 8,1 mm de diâmetro, 79 mm de comprimento total (37 mm de comprimento útil) e ângulo de ponta  $\sigma = 118^\circ$  [Walter, 2012].



Figura 4.2 – Broca Walter Tools VA Inox A1154 TFT

As condições de corte fornecidas pelo fabricante da ferramenta (velocidade de corte  $v_c = 17$  m/min e avanço  $f = 0,19$  mm/volta) não foram variadas com o intento de analisar o desempenho da ferramenta quanto às falhas em uma mesma condição de uso.

Os experimentos foram realizados no centro de usinagem ROMI modelo Discovery 308 com comando Mach 8, rotação máxima de 4000 rpm e potência máxima de 5,5 kW disponível no LAUS – Laboratório de Automação em Usinagem (Fig. 4.3).



Figura 4.3 – Centro de usinagem ROMI Discovery 308.

Para a medição dos sinais de força e torque foi utilizado o dinamômetro piezelétrico Kistler modelo 9272 (Fig. 4.4a). Este equipamento permite medir a força de avanço ( $F_z = F_f$ ) em um intervalo de  $-5$  a  $+20$  kN e o momento torsor ( $M_z = M_t$ ) em um intervalo de  $\pm 200$  Nm, com sensibilidades de  $-3,5$  pC/N e  $-160$  pC/Nm, respectivamente.

O equipamento utilizado para o condicionamento de sinais foi o amplificador de carga Kistler modelo 5070A (Fig. 4.4b), o qual transforma a carga elétrica (pC) proveniente da plataforma, em tensão elétrica (V). Este possui uma taxa de medição de  $\pm 200$  pC até  $\pm 200$  nC e quatro canais de entrada.



Figura 4.4 – Sistema de aquisição: (a) dinamômetro piezoeletrico Kistler 9272; (b) amplificador de carga Kistler 5070A

A aquisição de dados é feita com uma placa dedicada *Measurement Computing* modelo PCIM-DAS-1602/16, a qual possui uma taxa de aquisição de até 100 kS/s (100 kHz) dividido em até 8 canais (ou 12,5 kHz por canal). Para auxiliar no processamento dos dados e visualização gráfica dos sinais, utiliza-se o software LabVIEW™ 8.6 com VI (*Virtual Instrument*) desenvolvida pelo LAUS especialmente para este fim.

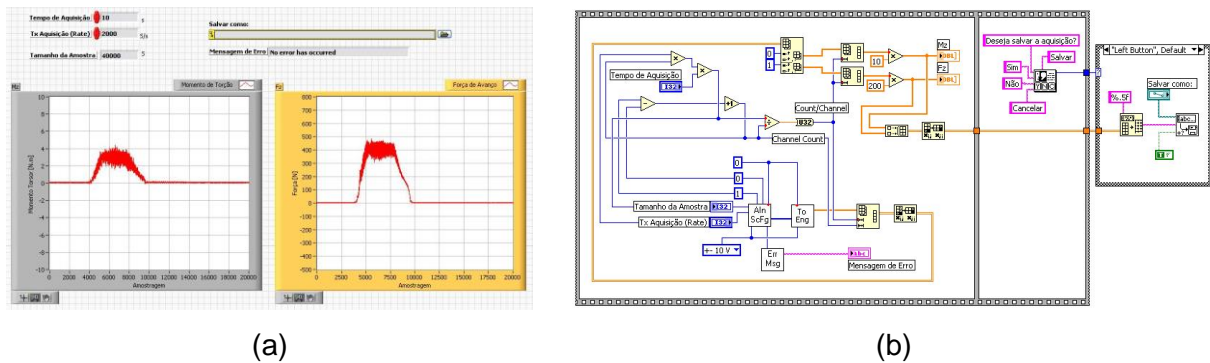


Figura 4.5 – Ambiente de programação LABVIEW™: (a) painel frontal; (b) diagrama de blocos

Também se utilizou o microscópio digital DinoLite modelo AM-413ZT (Fig. 4.6) para registrar imagens do estado da ferramenta previamente a cada furo de monitoramento.



Figura 4.6 – Microscópio digital DinoLite AM-413ZT

## 4.2 Procedimento Experimental

O monitoramento dos desgastes na ferramenta foi feito a cada 1 minuto de usinagem. Para tanto, foram feitos furos na “chapa de desgaste” correspondendo a 1 minuto de usinagem



e depois um furo foi realizado na “chapa de monitoramento” onde foram captados os sinais de força e torque. A montagem do experimento está apresentada na Figura 4.7a onde se observa a chapa de desgaste posicionada ao lado da plataforma piezelétrica onde está a chapa de monitoramento fixada por um dispositivo que permite a realização de furos no centro da plataforma. Desta maneira, a chapa de monitoramento somente é reposicionada a cada furo. Com as condições de corte predefinidas, estimou-se um tempo de 4,63 segundos por furo. Assim, foram realizados 13 furos por minuto. A Figura 4.7b ilustra o furo sendo realizado. Ao considerar um tempo de usinagem de  $T = 28$  minutos foram executados, portanto, 364 furos nas “chapas de desgaste” e 29 nas “chapas de monitoramento” considerando que o primeiro furo (Furo 0 – broca nova) foi monitorado para avaliação das forças, totalizando 393 furos.

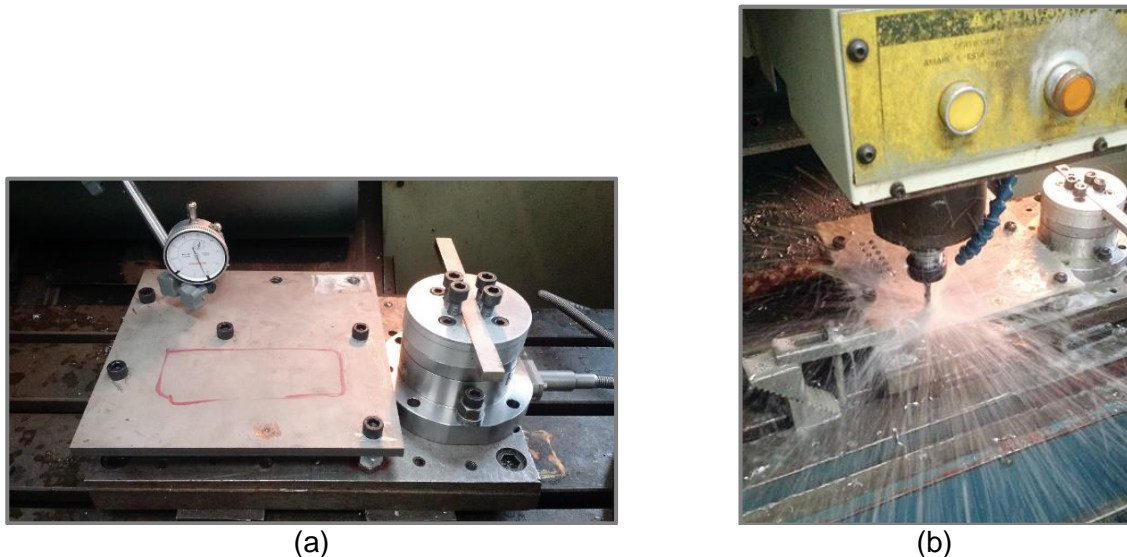


Figura 4.7 – Experimento dentro da máquina CNC: (a) montagem; (b) execução de furo na “chapa de desgaste”

As análises de dispersão dos dados de força e torque foram planejadas de maneira a cobrir toda a operação de corte. Para tanto, considerou-se que cada volta da broca correspondia a um conjunto de pontos representando uma distribuição- $\beta$ . A partir dos dados de entrada, calculou-se que a broca realizaria 52 voltas por furo onde foram coletados 400 pontos por volta. Assim, a taxa de aquisição de sinais foi de 4500 pontos por segundo (4,5 kHz) em cada canal.

Após a coleta de dados fez-se uma análise dos pontos correspondentes à furação em cheio, ou seja, somente enquanto a broca encontrava-se com a totalidade de suas arestas em contato com a peça (Fig. 4.8), que corresponde ao intervalo de 2,4 a 7,4 mm de usinagem do furo ou 0,93 a 3,45 segundos. Lembrando que a chapa possui 9,8 mm de espessura. Na Figura 4.9 exemplifica-se os pontos selecionados para as análises na região verde do gráfico.

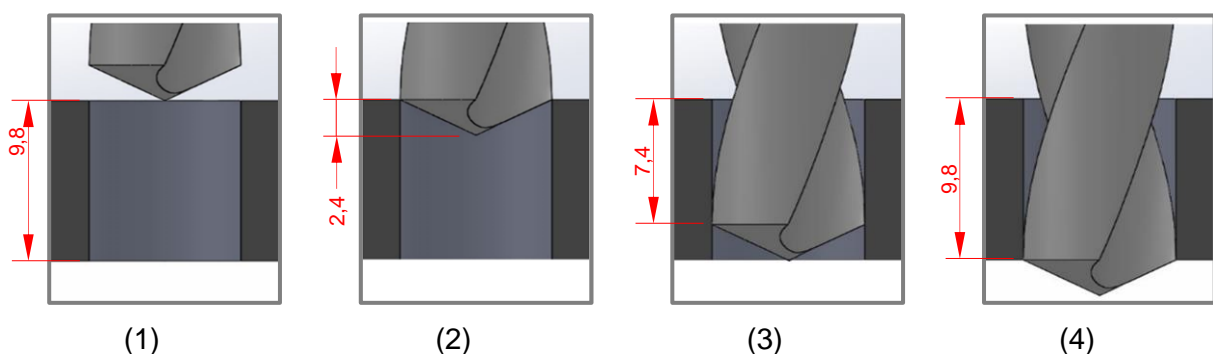


Figura 4.8 – Estágios do processo de furação: (a) primeiro contato; (b) contato total das arestas; (3) início da saída; (4) furo concluído

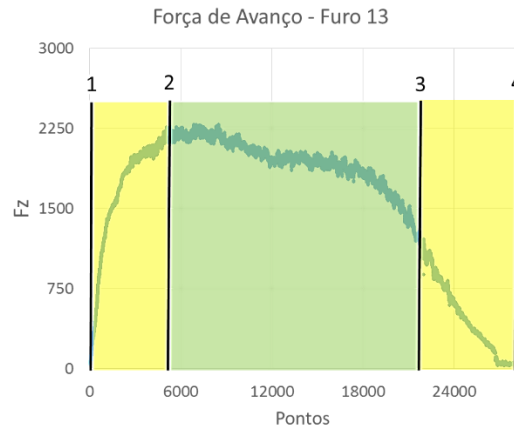


Figura 4.9 – Pontos selecionados para as análises de dispersão conforme Figura 4.8.

A partir deste primeiro tratamento fez-se o cálculo de assimetria ( $S_\beta$ ) e curtose ( $K_\beta$ ) para cada distribuição utilizando-se as Equações 3.2 e 3.3. Utilizou-se uma metodologia de concatenação para melhor revelar variações nas distribuições analisadas. Para tanto, definiu-se que cada distribuição analisada de 400 pontos é separada por um intervalo chamado de “passo” que corresponde à 50 pontos conforme mostra o exemplo da Figura 4.10.

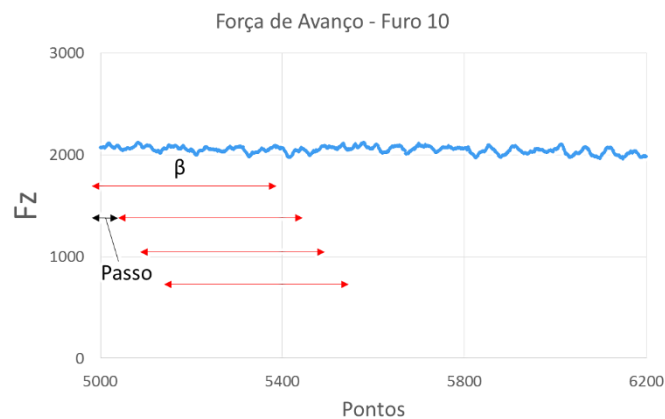


Figura 4.10 – Demonstração das distribuições- $\beta$  concatenadas com passo de 50 pontos.

Este passo de 50 pontos foi escolhido a partir de análises feitas sem concatenação, com passo de 200 pontos, 100 pontos e finalmente de 50 pontos, onde se obtiveram os melhores resultados (maior quantidade de informação extraída dos sinais).

Para a identificação de falhas na ferramenta foram captadas imagens com o auxílio do microscópio digital DinoLite AM-413ZT, utilizando uma ampliação de 50 vezes. Estas foram realizadas antes de cada furo feito nas “chapas de monitoramento” de maneira a representar a condição da ferramenta quando da realização deste furo. Através destas imagens foi possível observar os desgastes progressivamente durante todo o experimento.

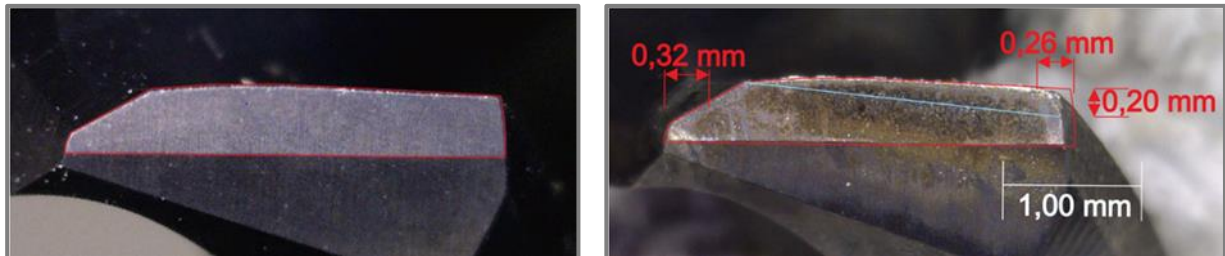
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta o estado final da ferramenta e os furos monitorados mais relevantes que levaram a este estado, juntamente com os respectivos gráficos de assimetria e curtose gerados nas situações mais relevantes.

### 5.1 Avaliação do Estado Final da Broca

Após todos os furos realizados pôde-se mensurar os desgastes totais da ferramenta a partir de uma medição nas imagens coletadas. Estas medições estão apresentadas nas Figuras

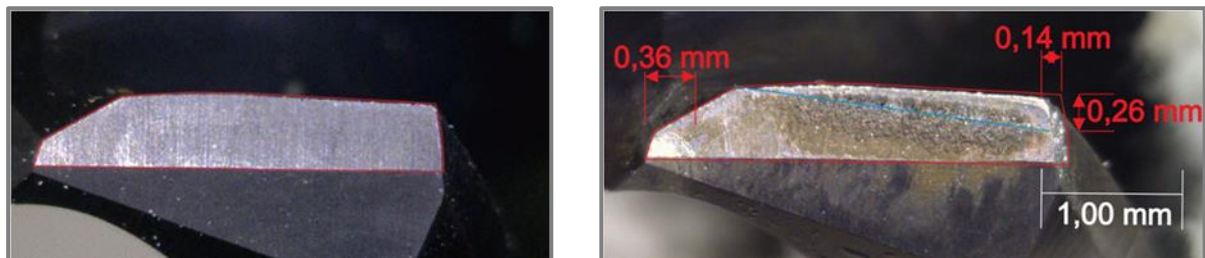
5.1 e 5.2, onde estão representadas as arestas principais 1 e 2 respectivamente em seu estado inicial com a broca nova e em seu estado final (após os 393 furos realizados). Nas figuras, o contorno em vermelho indica a geometria da aresta nova e a linha em azul representa a largura da marca de desgaste de flanco, a qual cresce do centro para a periferia da broca.



(a)

(b)

Figura 5.1 – Aresta 1: (a) nova; (b) desgastada: marcas de quina (0,26 mm); de flanco (0,20 mm); de ponta (0,32 mm).



(a)

(b)

Figura 5.2 – Aresta 2: (a) nova; (b) desgastada: marcas de quina (0,14 mm); de flanco (0,26 mm); de ponta (0,36 mm).

Percebe-se um desgaste de flanco já avançado em ambas as arestas principais. Também se observa uma significativa redução da quina da broca, em especial na Aresta 1, onde houve lascamento. Nota-se na ponta da broca que o revestimento já não está mais presente e/ou possui material aderido.

## 5.2 Monitoramento dos Esforços

A Figura 5.3 mostra os gráficos dos valores médios de momento torsor (torque) e força de avanço registrados na geração dos furos monitorados 0 (broca nova), 7, 14, 21 e 28. As barras de dispersão representam a incerteza expandida para uma confiança de 95%.

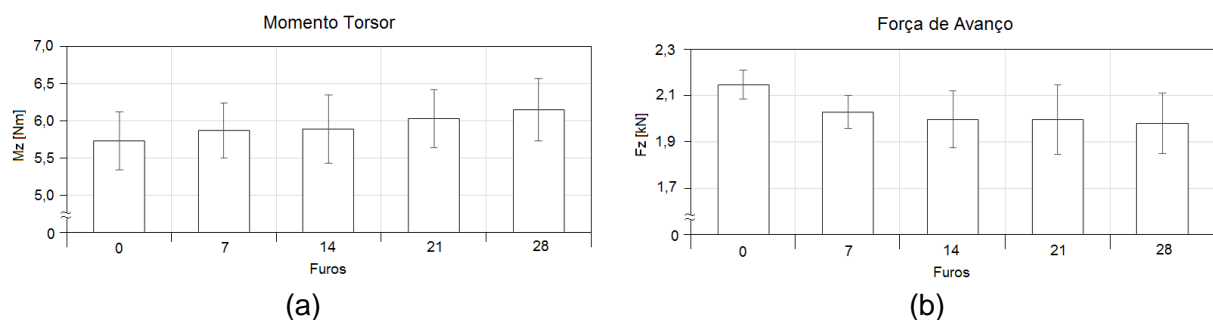


Figura 5.3 – Dados de médias com suas barras de dispersão para furos selecionados: (a) momento torsor; (b) força de avanço.



Observam-se comportamentos antagônicos nos esforços. Enquanto o torque ( $M_z = M_t$ ) apresenta um aumento com o tempo de usinagem (e progressão dos desgastes), a força ( $F_z = F_f$ ) apresenta uma queda principalmente nos primeiros furos. Além disto, é visível que a variação do torque apresenta pouca alteração enquanto a força dobra seu comportamento de variação.

Sabe-se que o aumento de  $M_t$  se deve aos desgastes das arestas principais, conforme apresentado na Tabela 3.1, pois tem-se uma grande contribuição destas nos esforços de torção.

A diminuição de  $F_f$  e o aumento de sua variação podem ser entendidos possivelmente pelo aumento da temperatura de corte causado pelo desgaste na ferramenta. Tomando como exemplo o gráfico da Figura 4.9, observa-se que o valor de  $F_f$  diminui com o aumento da profundidade do furo. Em geral, um aumento da temperatura faz com que haja uma diminuição da deformação e da dureza do cavaco (diminuindo o endurecimento do aço inoxidável AISI 304). Como a aplicação de fluido de corte é externa, a ação lubrificante fica dificultada na região central da broca (e esta dificuldade cresce com o aumento da profundidade do furo). Isto causa uma diminuição de  $F_f$  com o incremento da temperatura. Porém, isto dificulta a formação de cavacos e aumenta a tendência ao empastamento no fundo do furo. No caso, esta dificuldade foi contornada pelo fato de a broca utilizada apresentar um chanframento na aresta transversal justamente para contornar estes problemas. Assim, a dispersão tende a aumentar provavelmente pela vibração que aumenta à medida que o desgaste cresce, devido ao crescimento do atrito na interface peça-ferramenta.

### 5.3 Análises de Assimetria e Curtose

Conforme dito anteriormente, foram monitorados 29 furos. Destes, foram escolhidos três que apresentaram resultados expressivos de assimetria ( $S_\beta$ ) e curtose ( $K_\beta$ ): Furo 0 (broca nova), Furo 7 (broca desgastada após 92 furos) e Furo 14 (broca desgastada após 183 furos).

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram os gráficos de assimetria do torque ( $M_t$ ) e da força ( $F_f$ ), respectivamente, para os três furos citados.

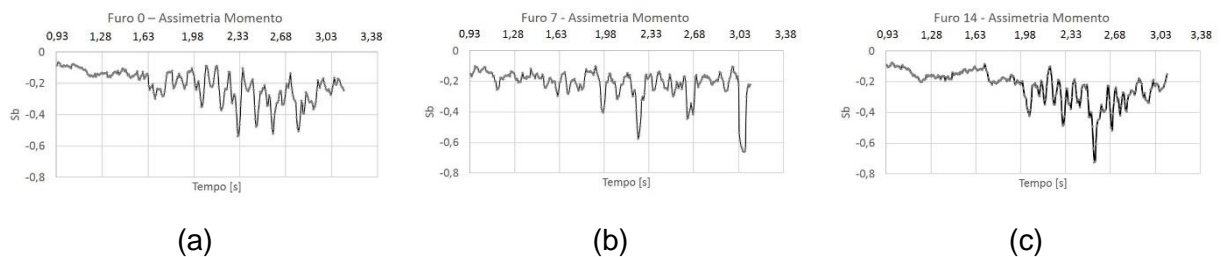


Figura 5.4 – Gráficos de assimetria para o momento torsor: (a) Furo 0; (b) Furo 7; (c) Furo 14.

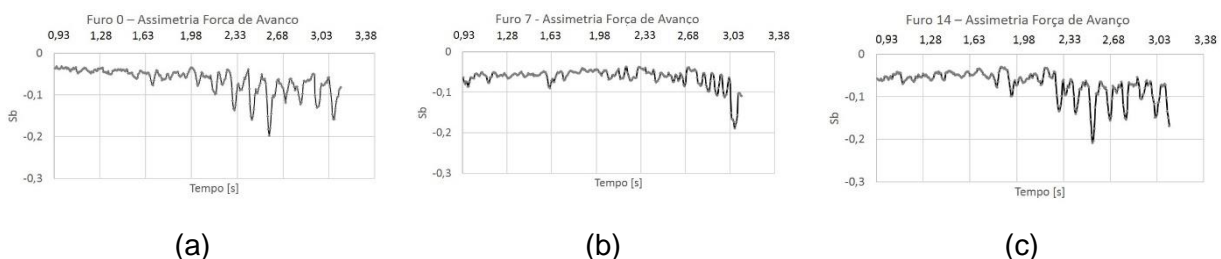


Figura 5.5 – Gráficos de assimetria para a força de avanço: (a) Furo 0; (b) Furo 7; (c) Furo 14.

Como todos os resultados de  $S_\beta$  foram negativos, isto indica que a amostra apresenta valores da moda maiores do que da média, ou seja, a distribuição é desviada para a esquerda.

Os resultados para o Furo 0 mostram que os valores de  $S_\beta$  tanto para  $M_t$  quanto para  $F_f$  são baixos e os picos encontram-se ainda afastados das regiões de entrada e saída, ou seja, na região em que há efetivamente corte em cheio de todas as arestas da ferramenta.

O Furo 7 apresentou resultados de interesse, pois foi o primeiro furo monitorado em que a broca apresentou uma condição de lascamento da quina. Essa condição da broca gerou picos de  $S_\beta$  nos valores das distribuições de  $M_t$  (não foi observado isso para  $F_f$ ). Isto mostra a influência do estado da quina (periferia da broca) na análise de dispersão do momento torsor. Pode-se verificar na Figura 5.6 o estado da ferramenta que gerou este sinal.

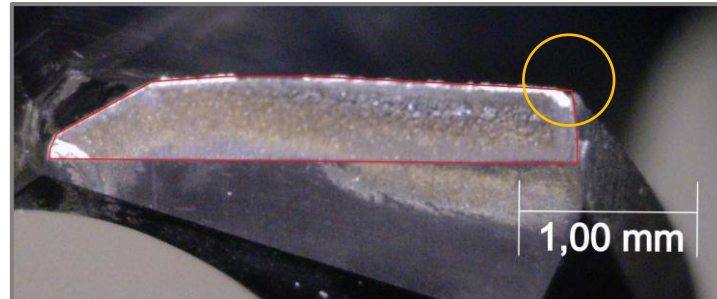


Figura 5.6 – Lascamento de quina na Aresta 1 antes do Furo 7 (indicado pelo círculo em amarelo).

Já o Furo 14 foi o que exibiu maiores valores de  $S_\beta$  para  $M_t$  (não foi notado isso para  $F_f$ ). As Figuras 5.7 e 5.8 mostram os gráficos de curtose do torque ( $M_t$ ) e da força ( $F_f$ ), respectivamente, para os três furos citados.

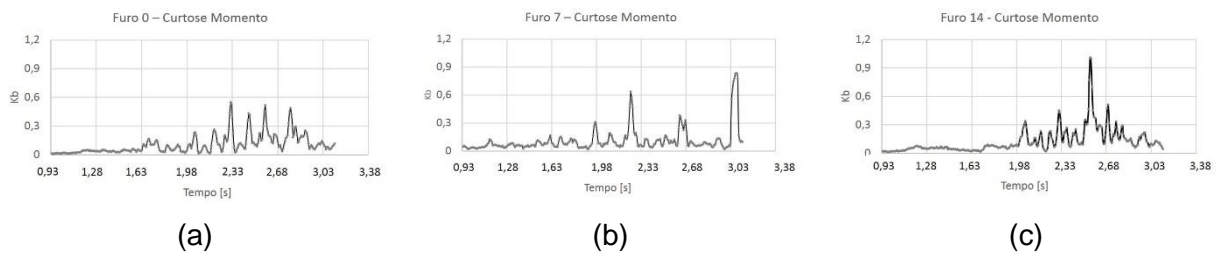


Figura 5.7 – Gráficos de curtose para o momento torsor: (a) Furo 0; (b) Furo 7; (c) Furo 14.

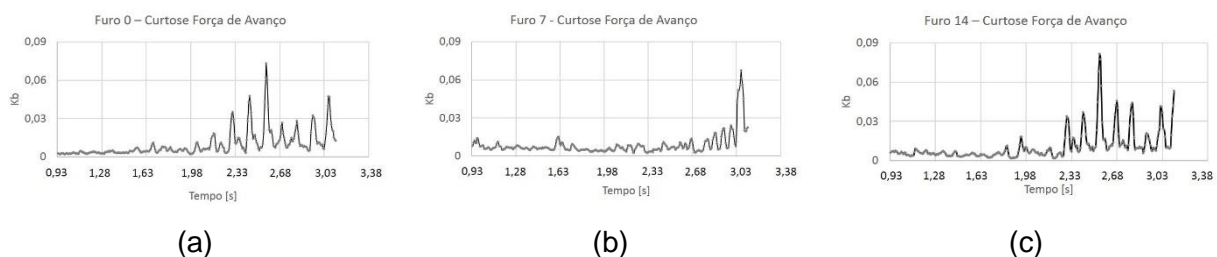


Figura 5.8 – Gráficos de curtose para a força de avanço: (a) Furo 0; (b) Furo 7; (c) Furo 14.

Como os gráficos de curtose apresentaram resultados com pequenos valores de  $K_\beta$ , isto indica que a distribuição é pontiaguda ou leptocúrtica, ou seja, pouca dispersão de valores (ou baixa vibração). Entretanto, observa-se que os valores crescem com o tempo de usinagem (consequentemente, com o desgaste da broca).

Os resultados de curtose foram semelhantes aos de assimetria (detecção apenas por  $M_t$ ). No entanto, os valores de  $K_\beta$  foram mais sensíveis ao desgaste que os de  $S_\beta$  para os três furos monitorados, como mostra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Percentual de aumento dos valores de  $S_\beta$  e  $K_\beta$  com o desgaste para  $M_t$ 

Análise de Dispersão	Furo 0 – Furo 7	Furo 0 – Furo 14
Assimetria ( $S_\beta$ )	22%	35%
Curtose ( $K_\beta$ )	53%	103%

## 6 CONCLUSÕES

O trabalho foi feito com o intento de demonstrar a capacidade do monitoramento via análises de dispersão para detecção de falhas que não são comumente detectadas por medidas de tendência central. Sobretudo, propor também esta análise para sinais de força e torque na furação de aço inoxidável austenítico.

A partir dos resultados obtidos, e de todo o sistema montado para os procedimentos experimentais, pôde-se compreender melhor o processo como um todo e determinar uma metodologia para a continuação de estudos neste sentido.

Considerando os valores de torque ( $M_t$ ) e força ( $F_f$ ) gerados em função do aumento do tempo de usinagem (relacionado ao número de furos e, conseqüentemente, ao desgaste da broca), foram observados comportamentos distintos. O primeiro ( $M_t$ ) aumentou enquanto que o segundo ( $F_f$ ) diminuiu. No primeiro, os desgastes das arestas principais tem grande contribuição sobre os esforços de torção (ver Tab. 3.1). No segundo, o esforço de compressão diminuiu com o aumento da temperatura (que aumenta com o desgaste) pela dificuldade de refrigeração na região central da broca com o aumento da profundidade do furo (ver Fig. 4.9).

Os dados de assimetria ( $S_\beta$ ) e curtose ( $K_\beta$ ) encontrados demonstram que apenas microlascamentos foram efetivamente monitorados, tendo em vista que foi utilizada uma broca adequada para os ensaios. É possível afirmar que eles ocorreram em maior quantidade em alguns furos a partir da análise de todos os gráficos de assimetria e curtose justapostos.

A partir da análise do Furo 7 pode-se afirmar que um lascamento na quina da ferramenta somente afetou os dados de  $M_t$ , como esperado, não tendo praticamente influência sobre os valores de  $S_\beta$  e  $K_\beta$  de  $F_f$ .

Durante as análises de dispersão no processo de furação é necessário um cuidado especial ao se considerar a entrada e a saída do furo conforme demonstrado na Seção 4.2, tendo em vista que nestes dois instantes do processo ocorrem um rápido aumento e queda, respectivamente, dos valores de  $F_f$  e  $M_t$  que, se analisados como forma de dispersão irão levar a resultados errôneos pois a variação instantânea é muito alta.

A concatenação de dados apresentou-se muito importante para uma melhor detecção dos resultados permitindo uma análise de mais distribuições- $\beta$  e conseqüentemente uma maior resolução dos dados analisados.

### 6.1 Trabalhos futuros

Futuramente, utilizando-se dos conhecimentos retirados deste trabalho, a implementação de um sistema que faça estas mesmas análises, porém *on-line* em todos os furos realizados, irá demonstrar com maior clareza a relação entre falhas e picos de assimetria e curtose.

Ainda, a continuação destes experimentos até a falha catastrófica da ferramenta (FCF) pode ser feita para que se obtenha uma situação em que o fim de vida seja completamente estabelecido.

## REFERÊNCIAS

Camargo, R., **Verificação da usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos através do processo de furação**, Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Fabricação, FEM-UNICAMP, 118p., 2008

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 7.ed., Ed. Artiber, São Paulo, 262 p., 2010

Jemielniak K., Otman, O., **Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals**, Journal of Materials Processing Technology, v.76, n.1-3, p.192-197, 1998.

Jemielniak, K., Belgassim, O., **Tool Failure Detection Based on Statistical Analysis of Metal Cutting Acoustic Emission Signals**, Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, v.5, n.2, p.378-385, 2011.

Kardec, A., **Manutenção – Função Estratégica**, 4ª ed., Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 436 p., 2015.

Kwitniewski, C. E. F., Kiss, F. J., **Metalografia e Tratamentos Térmicos de Aços e Ferros Fundidos**, LAMEF-UFRGS, 363p., 2011.

Niu, Y. M., Wong, Y. S., Hong, G. S., **An Intelligent Sensor System Approach for Reliable Tool Flank Wear Recognition**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.14, n.2. p.77-84, 1998.

Sória, B. S., Figueiredo, M. T., Souza, A. J., **Influência da geometria da broca de metal-duro na qualidade do furo realizado em ferro fundido DIN GGG50**, 9º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do IX CONEM), Fortaleza, CE, 2016

Souza, A. J.; Mattes; F. B., Mognaga; G. F., **Análise dos esforços de corte gerados na furação de ferro fundido DIN GGG50 para brocas de metal-duro com diferentes microgeometrias**, 8º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VIII CONEM), Uberlândia, MG, 11p., 2014

Souza, A. J.; **“Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 2: Processos de usinagem com ferramentas de geometria definida”**, DEMEC-UFRGS, Apostila, 2011, 113p.

Souza, A. J., **Aplicação de multisensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento**, Tese (Doutorado), POSMEC-UFSC, 211p., 2003

Walter Tools, 2012, **Handbook Furação**, Brasil, 398p.