

uma fresa frontal de 125 mm para que não houvesse sobreposição do sinal de mais de um inserto no mapa.

O mapa mostra claramente a superfície do bloco, evidentemente com as distorções provocadas pela geometria circular da fresa. No mapa, observam-se a posição dos cilindros, canais de lubrificação e refrigeração e também os furos de montagem. Também se pode observar que na entrada e saída da ferramenta na peça e nas interrupções devido aos furos e canais, a intensidade do sinal é maior devido às intensas solicitações mecânicas ocasionados pelo corte que ocorrem nestas regiões. Além disto, durante a fase inativa deste inserto, este também tocava a peça, provocando a outra reprodução, de menor intensidade, da superfície, porém com menor intensidade luminosa.

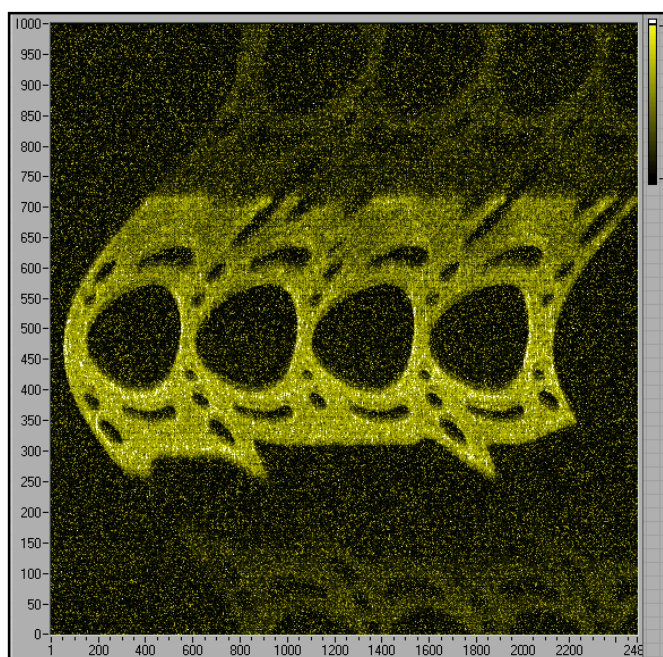


Figura 4.4 – Mapa de intensidade luminosa reproduzindo o fresamento de um bloco de motor.

4.1.5 Reprodução do lascamento de uma aresta de corte

Através do sinal de emissão acústica adquirido durante o corte, é possível detectar um eventual lascamento das ferramentas de usinagem, além do desgaste e batimento axial. A Figura 4.5 mostra o comportamento do sinal durante um fresamento em que ocorreu um lascamento aproximadamente na metade do percurso de avanço. Na parte a, o corte é reproduzido no plano, como feito nos itens anteriores. A parte b mostra o comportamento tridimensional do sinal de emissão acústica. Como nos ensaios mencionados anteriormente, a diminuição da penetração da aresta de corte, devido ao lascamento, diminui o nível do sinal de EA_{RMS} gerado e portanto, a intensidade luminosa.

Nestas figuras outros dois aspectos interessantes podem ser observados. Nas figuras a e b, o alisamento da superfície durante a fase inativa aparece nas extremidades das figuras, mesmo após o lascamento da aresta. Um segundo aspecto é mais facilmente observável na figura a: na entrada da ferramenta, parte inferior da representação da peça, o sinal aumenta de modo brusco, quase instantaneamente, distinguindo claramente a fase inativa da fase ativa. Porém, durante a saída da ferramenta, parte superior da representação da peça, o sinal tem uma atenuação menos brusca, o que gera uma região meio difusa, evidenciada no retângulo. Durante a usinagem, verificou-se visualmente que, na saída da ferramenta, houve a formação de rebarba de grandes proporções. O mecanismo de formação da rebarba de saída pode ser o responsável por este fenômeno (Kaminise et al., 2004). Quando a ferramenta se aproxima da aresta da peça, o plano de cisalhamento primário sofre uma rotação, devido à deformação plástica pela falta de resistência mecânica (Pekelharing, 1978). Isto faz com que a saída da ferramenta da peça seja mais suave.

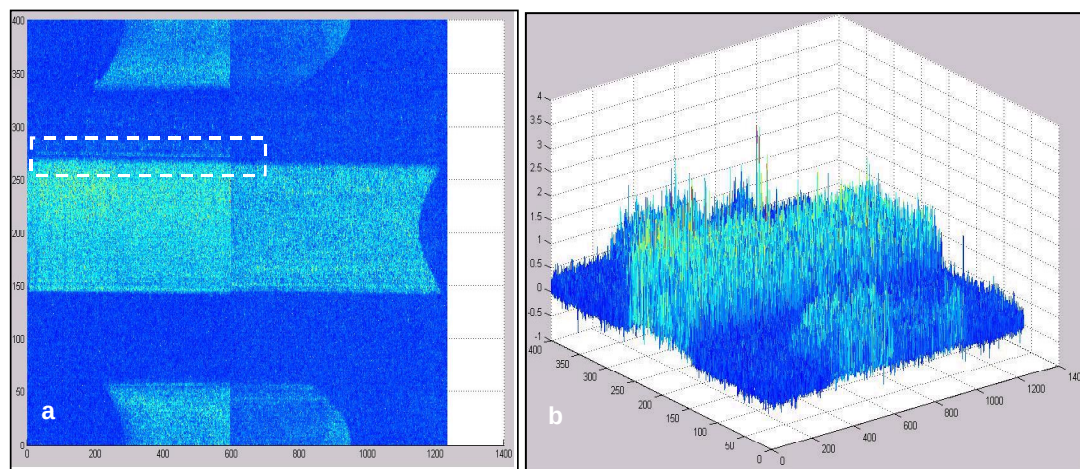


Figura 4.5 – Reprodução via EA do lascamento da aresta de corte da ferramenta.

4.2 Resultados dos Testes com Sinal Bruto de Emissão Acústica

Nesta seção serão apresentados os resultados da aquisição do sinal bruto de emissão acústica, da análise de sensibilidade dos possíveis parâmetros indicativos de desgaste de flanco máximo, bem como da classificação da rede PNN, para fins de monitoramento, que é o objetivo principal deste trabalho.

A Figura 4.6 mostra o comportamento deste sinal durante o fresamento da barra de testes com um único inserto. É possível ver claramente as fases ativas da usinagem. Esta se apresenta nas regiões onde há picos na amplitude do sinal. Onde o sinal apresenta apenas

uma faixa contínua, de baixa intensidade, é a fase inativa deste processo. Este sinal constitui-se de ruído e do sinal da aresta alisadora ao raspar a superfície da peça nesta fase. Porém, este sinal foi todo desprezado e a análise concentrou-se apenas no sinal da fase ativa.

Nesta figura observam-se alguns aspectos interessantes: em primeiro lugar, quando se conta o número de ciclos ativos dentro da faixa de tempo da aquisição (2 segundos), é possível saber o número de rotações por minuto empregado nesta fase dos testes através de simples cálculos; em segundo lugar, ao observar uma aproximação do sinal que representa uma fase ativa qualquer (no detalhe da figura), nota-se que, a entrada do inserto na peça é representado por um crescimento praticamente instantâneo do sinal de EA. Porém, na saída do inserto da peça, há um decaimento mais suave do sinal. Isto pode ser justificado, como mostrado para o sinal de EA_{RMS} (seção 4.1.5), devido ao fato de que na saída da peça há a formação de rebarbas de grandes proporções, resultante de uma intensa deformação plástica. Mesmo que o inserto já tenha saído da peça, ele ainda está em contato com a rebarba. Assim, o sinal vai caindo até que o inserto perca totalmente o contato com esta rebarba.

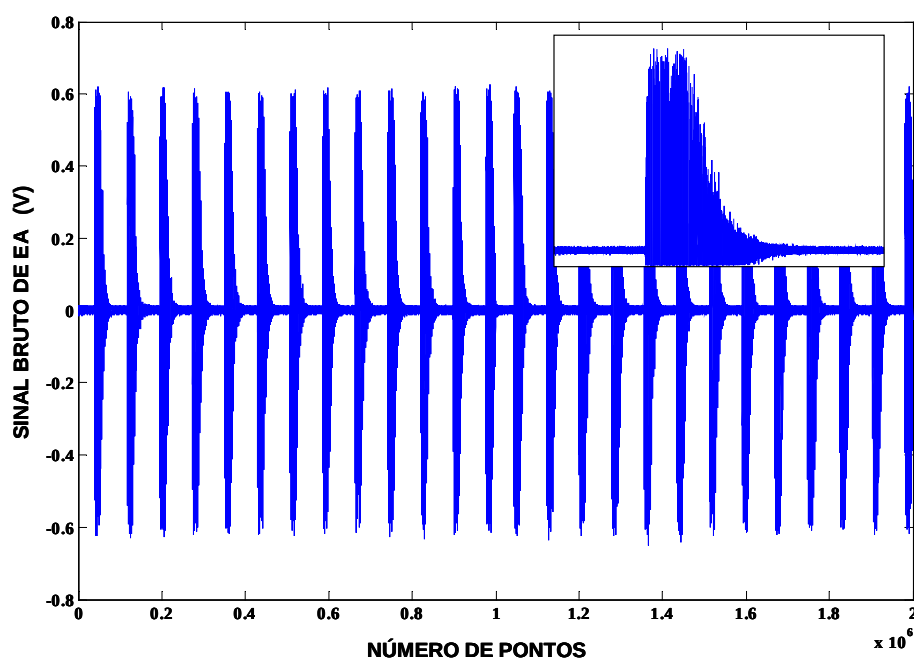


Figura 4.6 – Representação do sinal bruto de EA durante o fresamento com um único inserto.

4.2.1 Determinação de possíveis parâmetros do sinal de EA indicativos de $VB_{Bmáx}$

Alguns parâmetros estatísticos foram estimados dos dados das aquisições do sinal bruto de EA, como descrito mais detalhadamente no capítulo III (Procedimentos Experimentais). Estes parâmetros foram: curtose, *skewness*, fator de crista, pico e RMS global.

Porém, outros parâmetros também foram determinados com o objetivo de facilitar a tarefa de encontrar alguns destes que apresentem uma boa sensibilidade com o desgaste. Estes parâmetros foram determinados no domínio da frequência, de onde se observou bandas que apresentassem curvas (ferramenta nova, média e gasta) sensíveis à evolução do desgaste. As curvas consideradas mais sensíveis foram aquelas que se apresentaram mais distintas, de fácil identificação e o menos sobrepostas possível. As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam os espectros de frequências para as condições de corte 1, 2 e 3, respectivamente, determinadas para estes experimentos.

Os gráficos apresentados a seguir estão dentro da faixa de frequências (50 a 500 kHz) delimitadas previamente durante os ensaios.

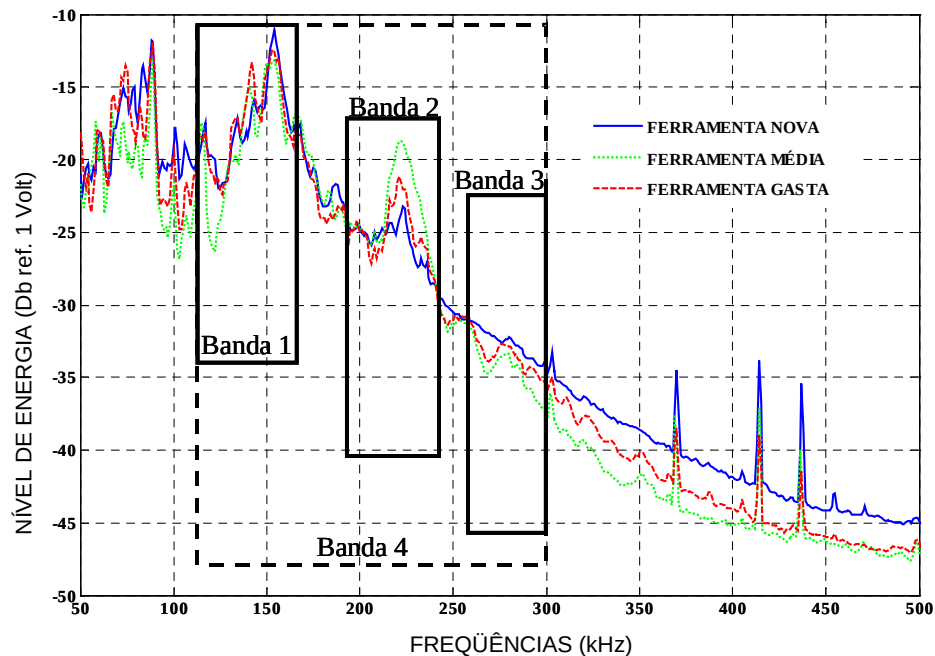


Figura 4.7 – Nível de energia global do sinal de EA em função da frequência para os estágios de desgaste (nova, média, gasta) na condição de corte 1.

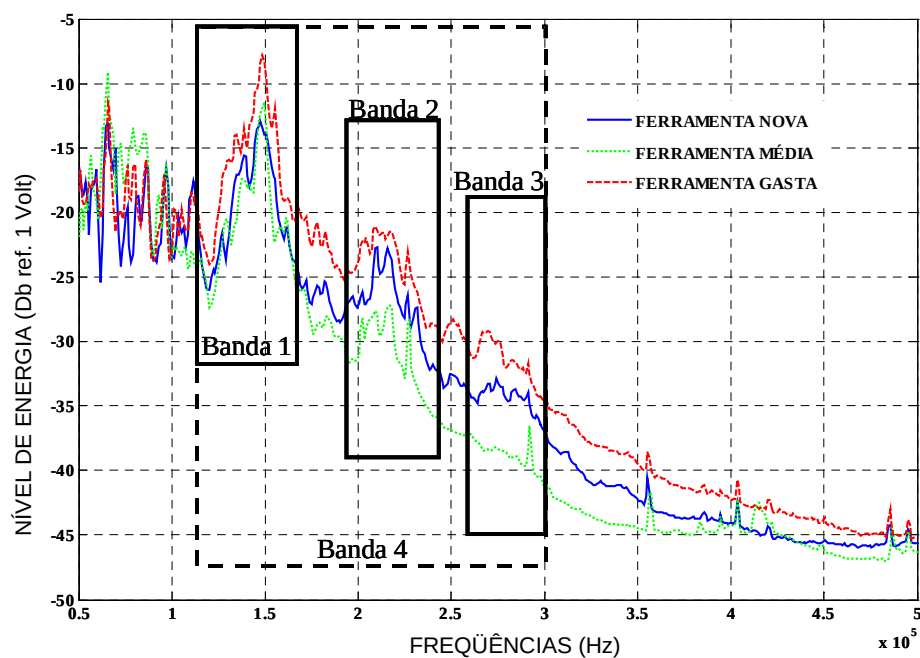


Figura 4.8 – Nível de energia global do sinal de EA em função da frequência para os estágios de desgaste (nova, média, gasta) na condição de corte 2.

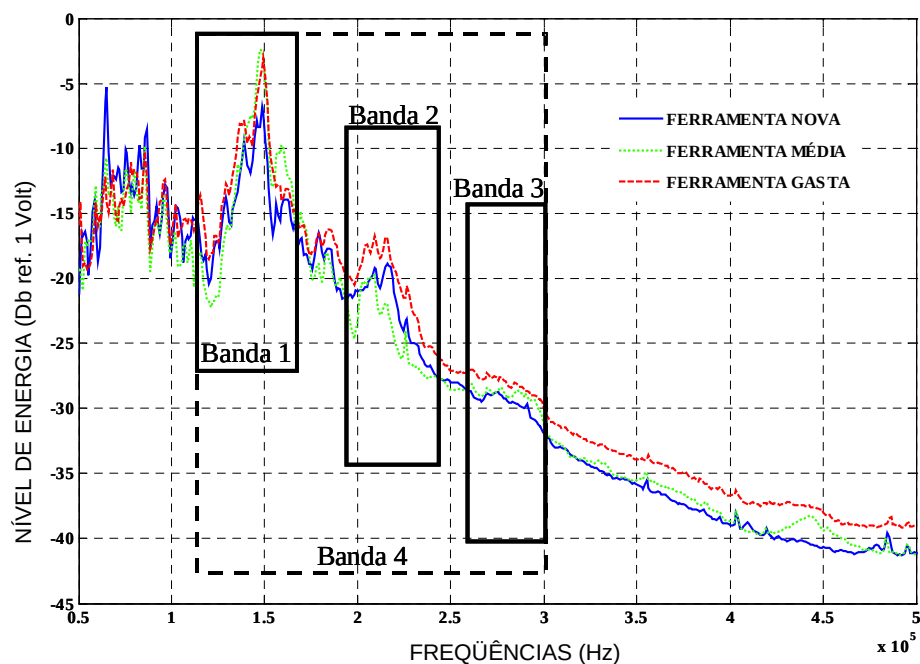


Figura 4.9 – Nível de energia global do sinal de EA em função da frequência para os estágios de desgaste (nova, média, gasta) na condição de corte 3.

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam detalhes dos espectros mostrados (120 a 300 kHz). As aproximações foram realizadas dentro de uma banda menor para facilitar a visualização das melhores bandas que representassem o objetivo de observação dos espectros. Estas figuras também são apresentadas na mesma sequência das anteriores: condição 1, 2 e 3, respectivamente.

Para a seleção das bandas que melhor distinguisse o sinal de cada estágio de desgaste, levou-se em consideração que estas deveriam ser aplicadas a todas as condições de corte. Por isto, mesmo que algumas bandas em certas condições possam aparentar não serem ideais, para a maioria dos casos, elas são as melhores.

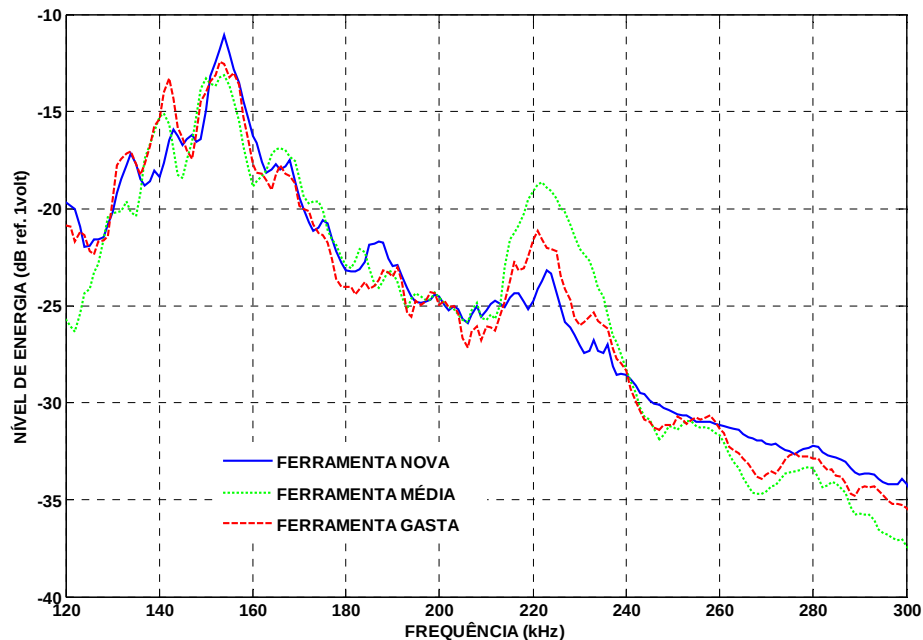


Figura 4.10 – Detalhe do espectro de potências dos sinais de desgaste para os estágios (nova, média, gasta) na condição de corte 1.

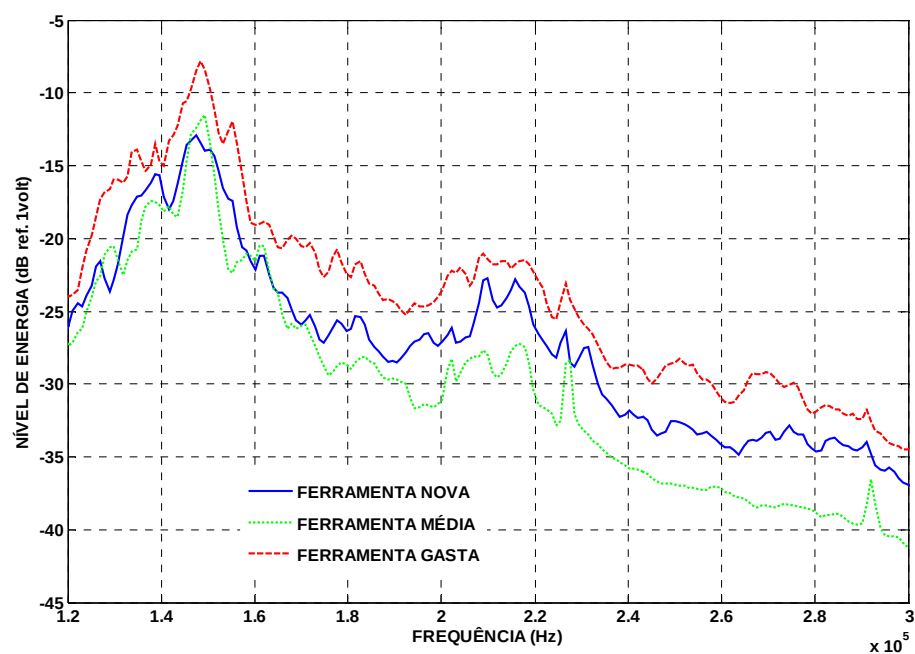


Figura 4.11– Detalhe do espectro de potências dos sinais de desgaste para os estágios (nova, média, gasta) na condição de corte 2.

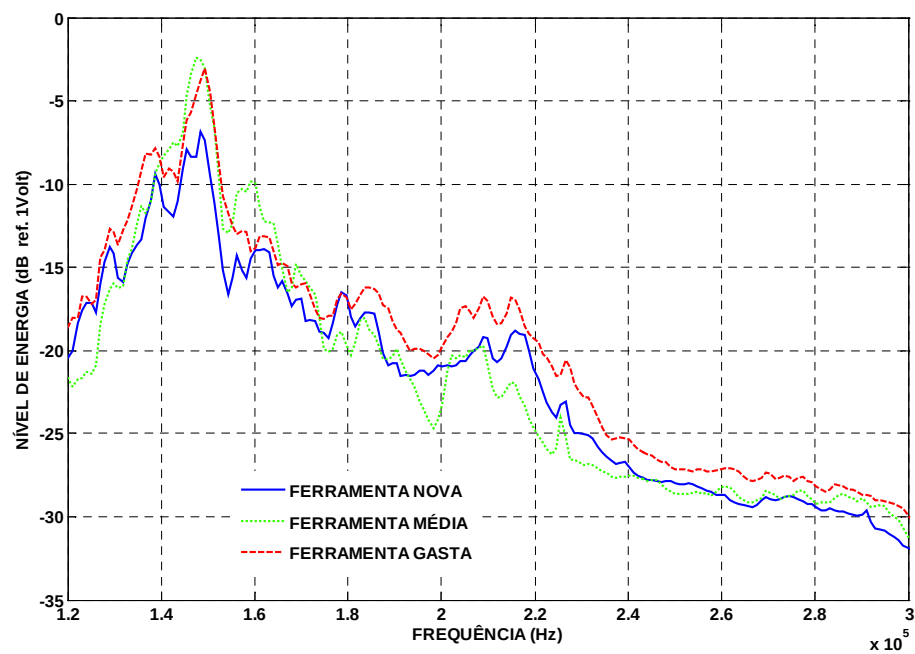


Figura 4.12 – Detalhe do espectro de potências dos sinais de desgaste para os estágios (nova, média, gasta) na condição de corte 3.

Da observação das figuras anteriores, foram escolhidas as seguintes bandas de frequência:

- . Banda 1: nível de energia do sinal (ref. 1V) na banda de frequências 120 a 170 kHz;
- . Banda 2: nível de energia do sinal (ref. 1V) na banda de frequências 190 a 240 kHz;
- . Banda 3: nível de energia do sinal (ref. 1V) na banda de frequências 260 a 300 kHz.
- . Banda 4: nível de energia do sinal (ref. 1V) na banda de frequências 120 a 300 kHz.

O parâmetro banda 4 foi escolhido com o objetivo de analisar a influência de uma banda mais ampla, que englobasse todas as demais. Portanto, esta foi obtida a partir da menor frequência que caracteriza a banda 1 e a maior que caracteriza a banda 3.

4.2.2 Avaliação da influência da variação da distância da região de corte para o sensor no sinal de EA

Como mostrada no capítulo 3, uma série de procedimentos foi adotada durante os experimentos para que fosse possível a aquisição do sinal às altas taxas de amostragem empregadas. Estes procedimentos serão analisados nesta seção, visto que a partir dos seus resultados e de suas interpretações foi dado prosseguimento à maior parte da avaliação.

O procedimento de dividir um passe completo de usinagem da peça, em três partes e em cada uma delas se realizar uma aquisição foi realizado com intuito de melhorar a relação entre o tempo de usinagem e o tempo de aquisição. A aplicação deste procedimento resultou em uma variação da posição do sensor com relação à região de corte e conseqüentemente, a posição relativa à fonte de EA e o sentido de propagação do sinal. A Figura 4.13 mostra o sentido do avanço da fonte de EA e de suas ondas elásticas que são captadas pelo sensor. Nos dois primeiros trechos, a fonte de EA está aproximando do sensor. Tanto o sentido de avanço da fonte de EA como os de suas ondas elásticas são os mesmos. No último trecho, a fonte de EA se afasta do sensor devido ao avanço enquanto que as ondas elásticas captadas por ele têm sentido contrário.

Após estas observações, houve a necessidade de se realizar uma avaliação de como estas variações influenciaram nas aquisições.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados do Teste de Hipótese para a ferramenta no estágio de desgaste nova para cada uma das condições de corte utilizadas neste trabalho.

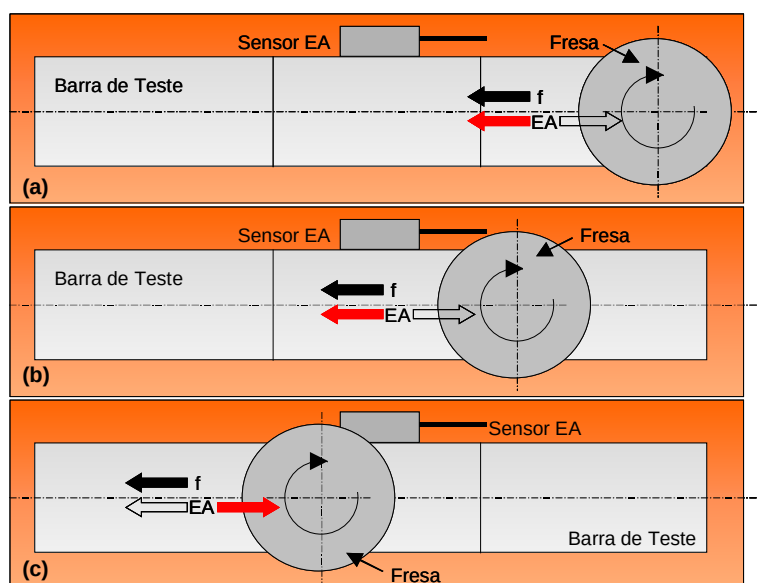


Figura 4.13 – Variação da posição da fonte de EA com relação ao sensor. (a) e (b) nas partes 1 e 2 da aquisição, respectivamente, o avanço de corte faz com que a fonte de EA esteja aproximando do sensor; (c) a fonte de EA está afastando do sensor.

Tabela 4.1 – Teste de Hipótese de verificação das partes de aquisição 1, 2 e 3 nas ferramentas com estágio de desgaste nova.

	CONDIÇÃO DE CORTE 1			CONDIÇÃO DE CORTE 2			CONDIÇÃO DE CORTE 3		
	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3
Curtose	0,17	1,31	1,14	0,26	8,81	8,21	0,95	4,76	2,26
Pico	0,28	0,24	0,10	0,24	0,09	0,16	0,17	0,52	0,32
RMS	0,05	0,26	0,29	0,12	1,39	1,42	1,56	1,38	0,93
Fator de crista	0,05	0,38	0,34	0,09	1,62	1,68	1,81	1,44	0,97
Skewness	0,04	0,39	0,32	0,07	0,67	0,58	0,41	3,78	2,68
Banda 1	0,01	0,28	0,28	0,16	1,38	1,36	0,02	0,65	0,64
Banda 2	0,01	0,27	0,26	0,06	1,35	1,34	0,25	0,55	0,37
Banda 3	0,02	0,12	0,14	0,03	1,18	1,20	0,17	0,25	0,13
Banda 4	0,00	0,27	0,26	0,13	1,31	1,30	0,07	0,63	0,59

O Teste de Hipótese foi aplicado para a verificação do comportamento do sinal para cada uma dos trechos da aquisição. Nestes testes, os trechos foram comparados dois a dois, como mostrado na tabela anterior. Foram empregados para análise todos parâmetros estimados dos sinais de cada condição. Como foram realizadas 16 repetições, cada parâmetro é resultado da média destas repetições. Todos parâmetros foram testados com seu

correspondente de outro trecho, mas dentro de um mesmo estágio de desgaste. Espera-se deste teste que a hipótese de que as médias que representam cada trecho pertençam ao mesmo grupo estatístico. Para isto, os resultados do teste (t_0/ t_{α}) devem ser menores que 1. Valores do teste maiores que 1 indicam que as partes não pertencem a um mesmo grupo estatístico e que, portanto, a variação da posição do sensor em relação a fonte de EA de alguma forma influenciou na aquisição do sinal.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados do Teste de Hipótese para a ferramenta no estágio de desgaste média para cada uma das condições de corte utilizadas neste trabalho.

Tabela 4.2– Teste de Hipótese de verificação das partes de aquisição 1, 2 e 3 nas ferramentas com estágio de desgaste médio.

gasta	CONDIÇÃO DE CORTE 1			CONDIÇÃO DE CORTE 2			CONDIÇÃO DE CORTE 3		
	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3
Curtose	0,09	1,65	3,15	0,05	2,99	3,46	0,49	5,79	3,42
Pico	0,20	0,17	0,02	0,17	0,40	0,24	0,27	0,25	0,07
RMS	0,04	0,50	0,50	0,09	0,48	0,60	0,41	8,45	4,02
Fator de crista	0,10	0,64	0,65	0,07	0,72	0,87	0,46	7,78	3,95
Skewness	0,02	0,54	0,53	0,47	0,41	1,02	0,14	3,10	2,39
Banda 1	0,10	0,63	0,55	0,10	0,47	0,64	0,17	3,93	3,41
Banda 2	0,08	0,23	0,32	0,05	0,25	0,30	0,27	1,27	0,92
Banda 3	0,17	0,42	0,59	0,10	0,02	0,07	0,19	3,22	2,61
Banda 4	0,04	0,51	0,50	0,09	0,41	0,55	0,34	6,28	4,38

A Tabela 4.3 apresenta os resultados do Teste de Hipótese para a ferramenta no estágio de desgaste gasta para cada uma das condições de corte utilizadas neste trabalho.

Dos resultados dos Testes de Hipótese, observa-se que a maior parte dos parâmetros que representam a parte 3, quando comparado com a parte 1 ou com a parte 2, foram recusados, ou seja, seus valores foram maior que 1. Esta observação é ainda mais realçada quando:

- . Passa-se da condição de corte 1 para 2 e ainda mais quando se passa da condição 2 para 3;
- . Faz-se a comparação das partes 2 com 3 em relação as partes 1 com 3;
- . Evolui o estágio de desgaste da ferramenta.

Tabela 4.3– Teste de Hipótese de verificação das partes de aquisição 1, 2 e 3 nas ferramentas com estágio de desgaste gasta.

	CONDIÇÃO DE CORTE 1			CONDIÇÃO DE CORTE 2			CONDIÇÃO DE CORTE 3		
	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3
Curtose	1,21	3,00	3,39	0,54	4,88	8,19	0,28	6,32	5,34
Pico	0,08	0,38	0,44	0,26	0,27	0,45	0,21	0,30	0,07
RMS	0,27	0,02	0,24	0,44	1,64	1,49	0,56	7,40	7,58
Fator de crista	0,57	0,45	1,04	0,46	1,98	2,01	0,38	8,03	7,47
Skewness	0,13	0,97	1,29	1,20	1,66	0,28	1,82	3,46	1,87
Banda 1	0,15	0,11	0,25	1,67	3,46	2,52	0,15	2,99	3,54
Banda 2	0,06	0,04	0,02	0,40	1,43	1,17	0,19	3,25	2,16
Banda 3	0,17	0,17	0,02	0,33	0,86	0,59	0,88	4,07	4,61
Banda 4	0,14	0,08	0,21	1,14	2,47	1,83	0,15	3,45	3,78

Em função dos resultados anteriores, ficou decidido que a parte 3 seria excluída das avaliações deste trabalho, pois este poderia interferir de maneira não previsível nos resultados. As análises realizadas posteriormente levaram em consideração a soma das partes 1 e 2, como se fosse uma única aquisição. Esta soma foi realizada no *software* Matlab[®] gerando arquivos de quatro milhões de pontos com extensão deste aplicativo. Com isto, foi possível o emprego de suas ferramentas em análises posteriores.

4.2.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros estimados

Nesta parte do trabalho foi analisada a sensibilidade dos parâmetros previamente escolhidos com a evolução do desgaste. O número de parâmetros avaliados foram relativamente elevados pois o objetivo foi aumentar a possibilidade de encontrar alguns destes que realmente sejam sensíveis. Para a análise da sensibilidade de cada parâmetro, foi utilizado o gráfico *boxplot*. Uma explicação mais detalhada desta ferramenta foi realizada no capítulo 3 (Métodos Experimentais).

O que se espera observar de cada parâmetro é que as linhas dos quartis de cada grupo de dados representante de cada estágio de desgaste não estivessem contidas dentro dos grupos dos outros estágios, não havendo assim interferências, e/ou pelo menos a mediana deles esteja o mais distanciado possível. A Figura 4.14 apresenta os gráficos *boxplot* para os parâmetros curtose, pico e RMS global em cada estágio de desgaste na condição de corte 1.

Nesta figura observa-se que os parâmetros analisados apresentam uma elevada sobreposição dos quartis dos grupos que representam cada estágio de desgaste. Em nenhum deles há uma clara diferenciação, mesmo quando se analisa pela mediana.

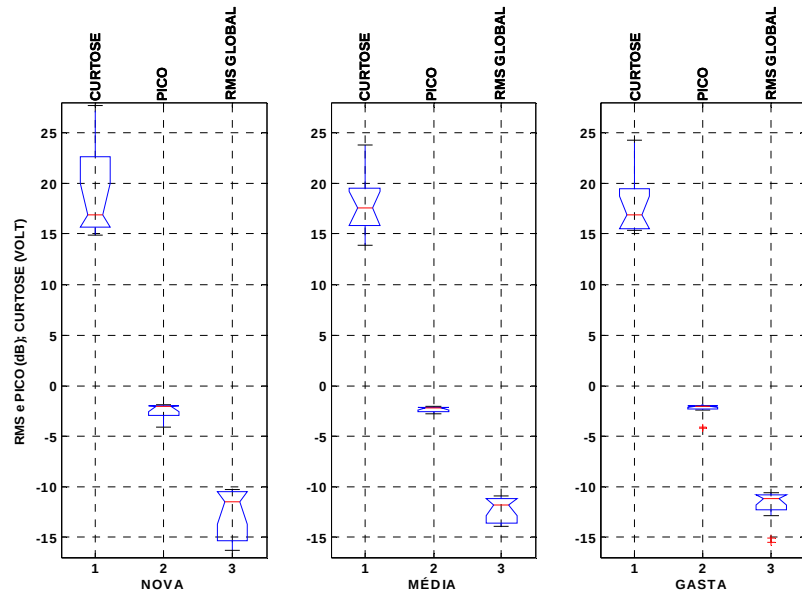


Figura 4.14 – Gráficos *boxplot* para os parâmetros curtose, pico e RMS global na condição de corte 1.

A Figura 4.15 apresenta os gráficos *boxplot* para os parâmetros fator de crista, *skewness* e banda 1 na condição de corte 1.

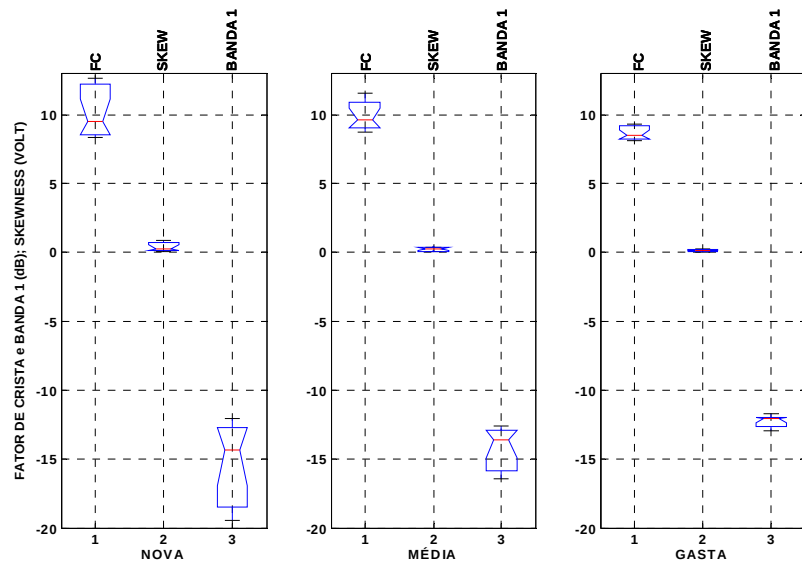


Figura 4.15 – Gráficos *boxplot* para os parâmetros fator de crista, *skewness* e banda 1 na condição de corte 1.

Na figura anterior pode-se observar que todos parâmetros possuem elevada sobreposição entre seus quartis. Com relação às medianas, apenas o parâmetro banda 1 apresentou um bom distanciamento entre os estágios.

A Figura 4.16 apresenta os gráficos *boxplot* para os parâmetros banda 2, banda 3 e banda 4 na condição de corte 1.

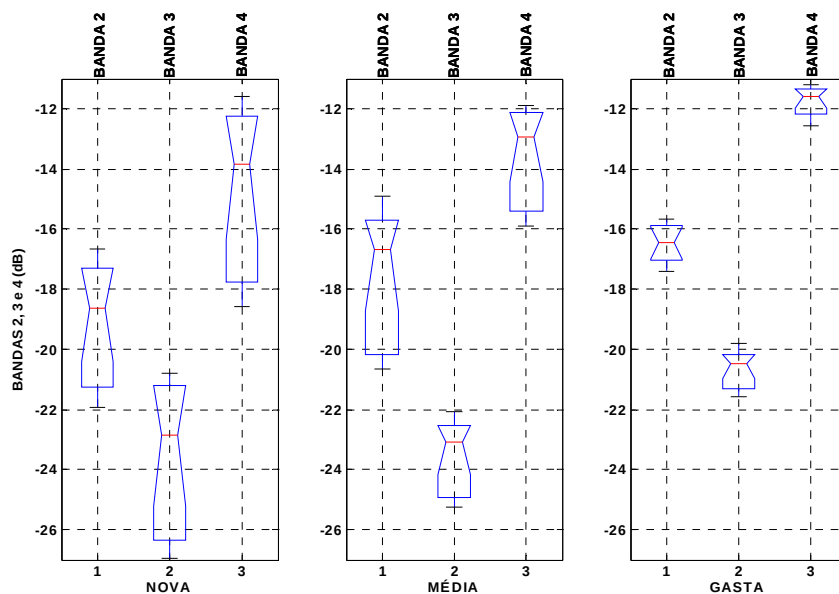


Figura 4.16 – Gráficos *boxplot* para os parâmetros banda 2, banda 3 e banda 4 na condição de corte 1.

Na figura anterior pode-se observar uma pequena diminuição na sobreposição dos quartis dos parâmetros, especialmente no estágio de desgaste mais elevado. Porém, o distanciamento entre as medianas revelou-se aqui também como um critério mais interessante para a diferenciação dos estágios de desgaste através destes parâmetros.

As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam os gráficos *boxplot* para alguns dos parâmetros estatísticos na condição de corte 2.

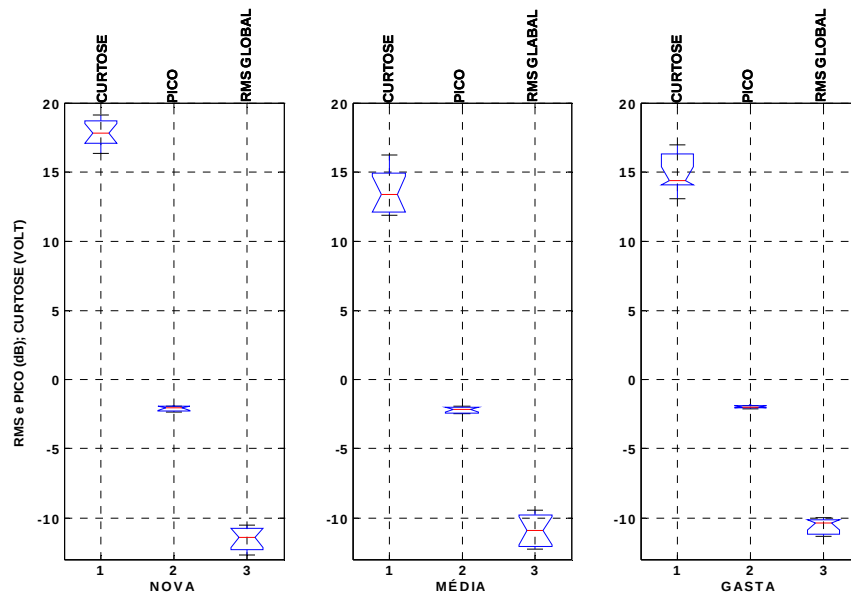


Figura 4.17 – Gráficos *boxplot* para os parâmetros curtose, pico e RMS global na condição de corte 2.

Os parâmetros mostrados na figura anterior apresentaram uma elevada sobreposição entre seus quartis para cada estágio de desgaste. As medianas também não mostraram um distanciamento razoável entre os estágios de desgaste para estes parâmetros.

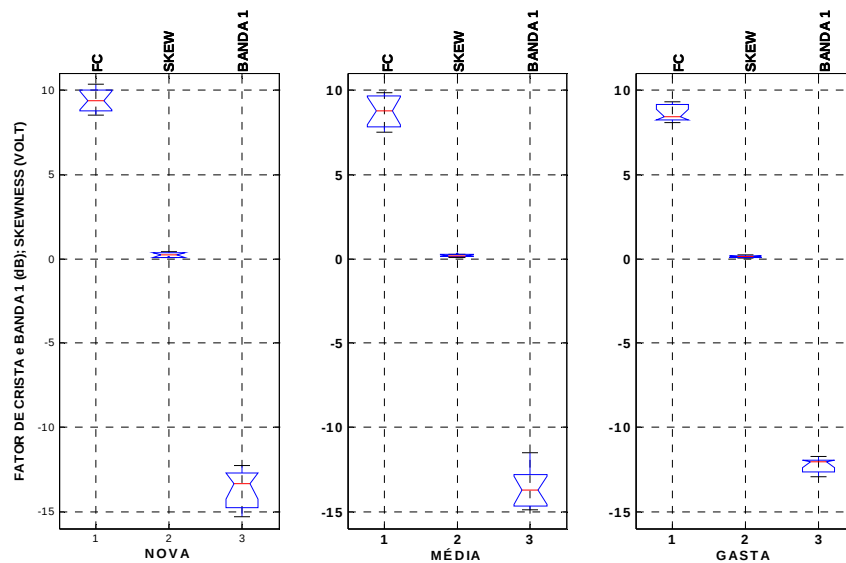


Figura 4.18 – Gráficos *Boxplot* para os parâmetros fator de crista, skewness e banda 1 na condição de corte 2.

Os parâmetros apresentados na figura anterior apresentam uma elevada sobreposição entre os quartis de cada estágio de desgaste, com exceção para o estágio de desgaste mais elevado do parâmetro banda 1. As medianas não se revelaram um bom critério, apresentando um melhor distanciamento apenas para o parâmetro banda 1.

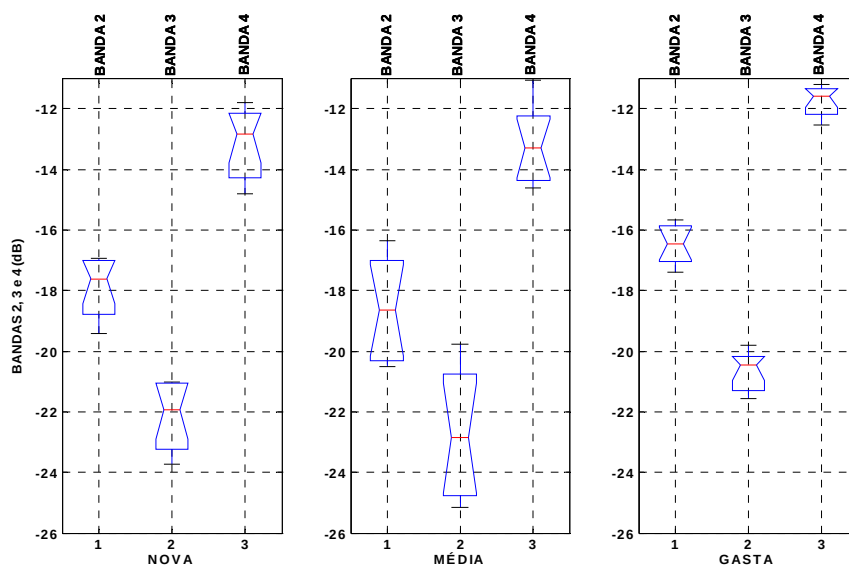


Figura 4.19 – Gráficos *Boxplot* para os parâmetros banda 2, banda 3 e banda 4 na condição de corte 2.

Os parâmetros apresentados na figura anterior apresentam sobreposição entre os quartis dos grupos que representam os estágios de desgaste nova e média, porém uma baixa sobreposição entre quartis dos grupos que representam o estágio de desgaste mais elevado. A mediana apresentou um bom distanciamento entre os estágios de desgaste para estes parâmetros.

A Figura 4.20 apresenta o *boxplot* dos parâmetros curtose, pico e RMS global para a condição de corte 3.

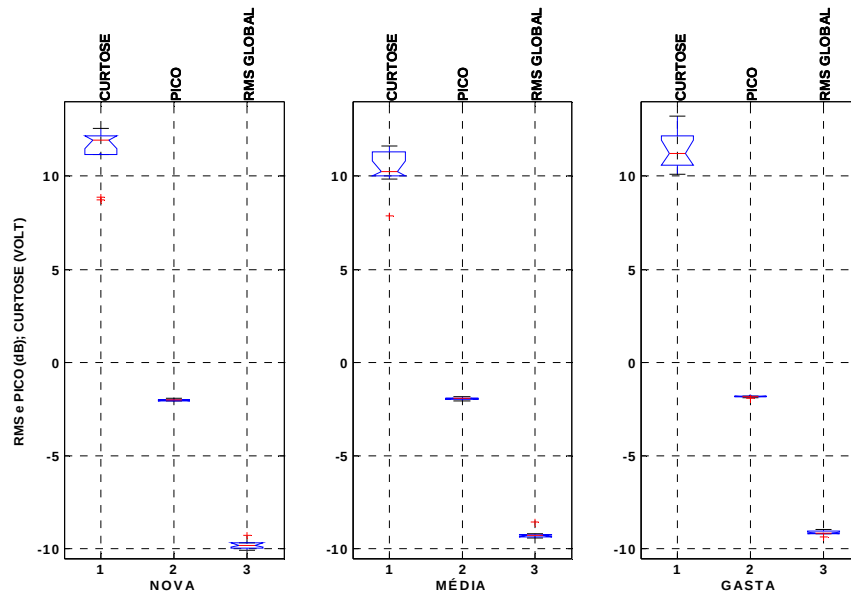


Figura 4.20 – Gráficos *Boxplot* para os parâmetros curtose, pico e RMS global na condição de corte 3.

Destes parâmetros acima, apenas o parâmetro curtose apresenta uma fácil visualização. Para este, houve uma sobreposição razoável entre os quartis dos grupos de desgaste, principalmente entre o do estágio de desgaste média com os outros dois estágios. Com relação à mediana, os estágios de desgaste nova e gasta apresentaram baixo distanciamento.

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram aproximações da figura anterior para melhorar a visualização dos parâmetros pico e RMS global, respectivamente. Na figura anterior, estes parâmetros aparecem bastante achatados em função da escala geral empregada no gráfico.

Para o parâmetro pico, não houve nenhuma sobreposição dos quartis dos grupos que representam os estágios de desgaste. A mediana também apresenta um bom distanciamento entre seus valores para cada estágio de desgaste.

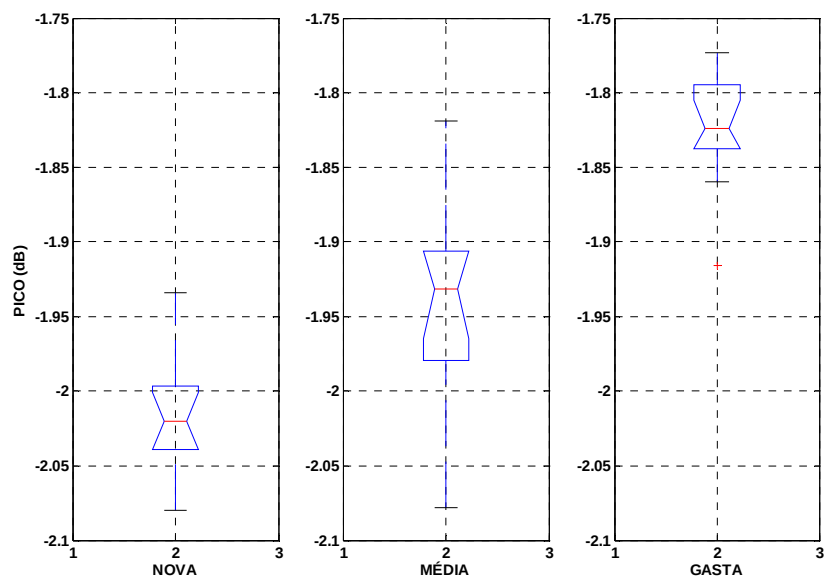


Figura 4.21 – Aproximação do gráfico *boxplot* anterior para a visualização do parâmetro pico.

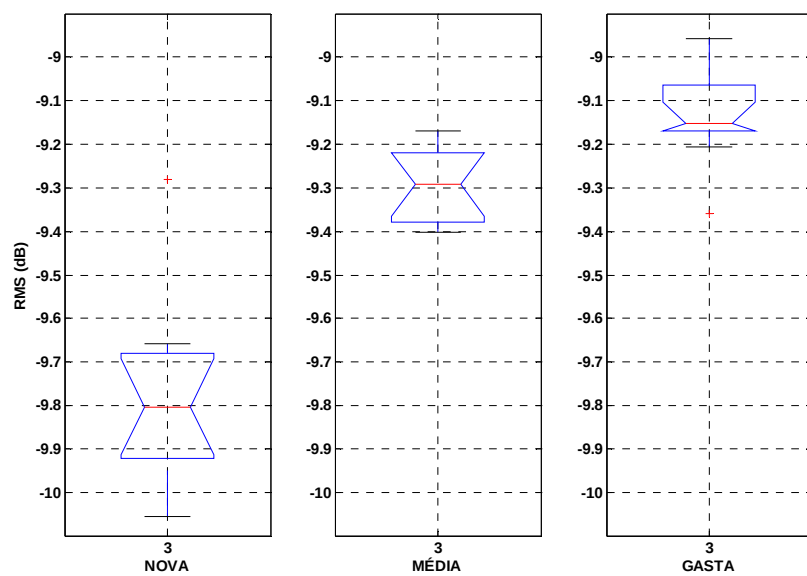


Figura 4.22 – Aproximação do gráfico *boxplot* anterior para a visualização do parâmetro RMS global.

Para o parâmetro RMS, também não houve nenhuma sobreposição dos quartis dos grupos que representam os estágios de desgaste. A mediana também apresenta um bom distanciamento entre seus valores para cada estágio de desgaste.

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam os gráficos *boxplot* para o restante dos parâmetros empregados na condição de corte 3.

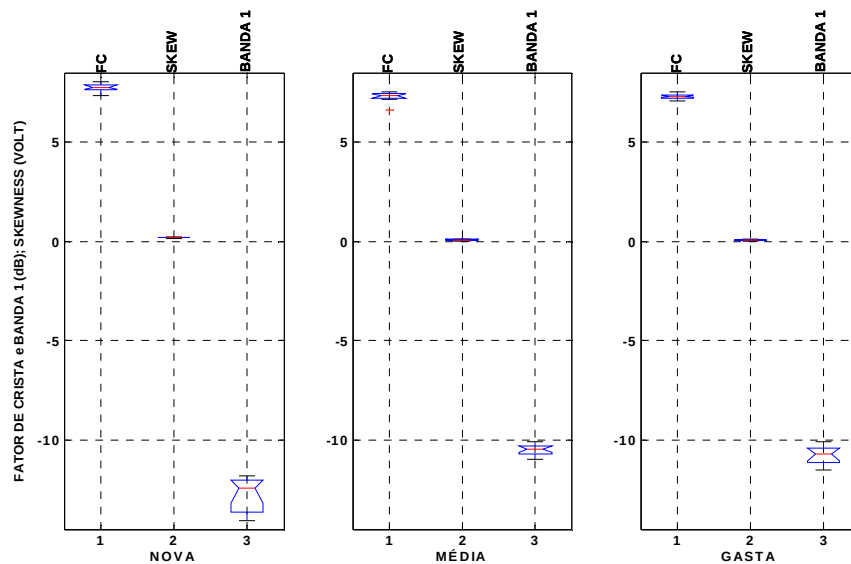


Figura 4.23 – Gráficos *Boxplot* para os parâmetros fator de crista, *skewness* e Banda 1 na condição de corte 3.

Os parâmetros da figura anterior apresentam sobreposição entre os quartis dos grupos que representam os estágios de desgaste. Em todos parâmetros, apenas o estágio de desgaste nova apresenta boa diferenciação. As medianas apresentam um baixo distanciamento, exceção também apenas para o estágio de desgaste nova.

Nesta figura, dos parâmetros apresentados, apenas o parâmetro banda 3 não apresenta nenhuma sobreposição dos quartis entre os estágios de desgaste. As medianas apresentam um razoável distanciamento entre estágios de desgaste, com exceção do parâmetro banda 4, em que os estágios média e gasta estão bem próximos.

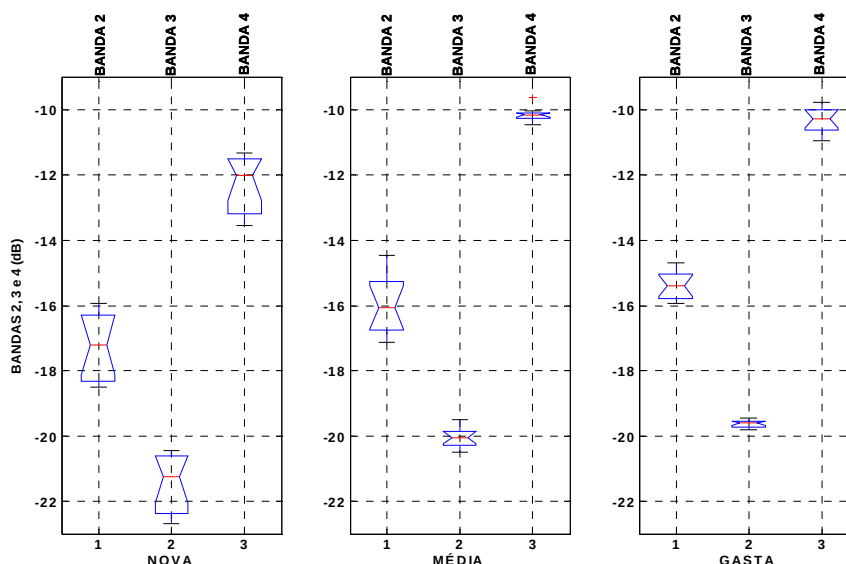


Figura 4.24 – Gráficos *Boxplot* para os parâmetros Banda 2, Banda 3 e Banda 4 na condição de corte 3.

Destas figuras analisadas foram escolhidos os parâmetros que apresentavam maior sensibilidade na tarefa de diferenciar os estágios de desgaste. Dos nove parâmetros estatísticos estudados, buscou-se escolher três ou no máximo quatro mais adequados para cada condição de corte.

A condição de corte 1 (desbaste) foi a que apresentou maiores dificuldades para encontrar parâmetros bem diferenciados. Nesta condição, a geração de energia que origina as ondas elásticas da EA é normalmente mais elevada devido ao emprego de parâmetros de corte mais severos. Este fato pode estar evidenciando outros fenômenos que ocorrem na usinagem que possuem maiores quantidades de energia nesta situação e mascarando as fontes de EA que se relacionam com o desgaste. Com isto, os parâmetros escolhidos neste trabalho para descreverem o sinal não conseguem reproduzir as variações no desgaste com muita clareza, nesta condição de corte. Porém, três parâmetros se apresentaram com melhores características para diferenciar o desgaste e foram selecionados baseados principalmente no distanciamento das medianas. O distanciamento variou de 1 a 2 decibéis, valores razoáveis levando-se em consideração a escala total de variação destes parâmetros. Os parâmetros selecionados para a condição de corte 1 foram:

- . Banda 1;
- . Banda 2;
- . Banda 3.

Na banda 1, o grupo que representa a ferramenta em um estágio de desgaste médio está completamente inserido no grupo que representa uma ferramenta nova. Contudo, suas medianas apresentam uma razoável separação. O grupo que representa a ferramenta desgastada apresentou uma boa diferenciação, com uma mediana bem separada e linhas que representa seus quartis completamente fora dos demais.

No caso das bandas 2 e 3, a diferenciação ocorreu melhor através das medianas. Os grupos representando cada estágio de desgaste não bons na diferenciação, pois havia grande sobreposição dos dados.

A condição de corte 2 (intermediária) apresentou menos dificuldades na seleção de parâmetros que a condição 1, porém, mais que a condição 3 (acabamento). Para este fato pode-se aplicar a mesma explicação dada nas discussões para a condição 1. Então, à medida que a severidade da operação diminui, algumas das fontes de EA que estão ligadas ao desgaste ficam mais evidenciadas. Os parâmetros selecionados para a condição de corte 2 foram:

- . Banda 1;
- . Banda 2;
- . Banda 3;
- . Banda 4.

As bandas 1, 2, 3 e 4 apresentaram uma fraca diferenciação entre grupos, havendo uma razoável sobreposição de seus valores extremos. Portanto, as medianas foram mais eficientes para a diferenciação, havendo um distanciamento de até 2 decibéis entre elas. Todos os parâmetros selecionados na condição 2 apresentaram uma queda da mediana para o estágio de desgaste médio em relação a ferramenta nova. Quando o desgaste está no nível mais elevado, há um crescimento considerável da mediana. Este comportamento foi verificado em boa parte dos parâmetros em que se retirou o valor RMS (RMS global, banda 1, banda 2, banda 3 e banda 4).

O valor eficaz (RMS) representa uma das medidas mais importantes da amplitude, uma vez que ele quantifica a energia contida no sinal. Portanto, este parâmetro estaria descrevendo uma acomodação do sinal no estágio de desgaste intermediário. Este fato é coerente com a curva que descreve o comportamento padrão da evolução da taxa desgaste de uma ferramenta.

O comportamento padrão de desgaste apresenta um rápido crescimento da taxa de desgaste no início da utilização da ferramenta. A seguir, este passa por um período relativamente longo de estabilização até que a taxa desgaste rapidamente cresça e a ferramenta atinja seu final da vida. Nestes períodos de crescimento rápido da taxa, há uma

maior geração da energia que origina a EA que no estágio intermediário do desgaste, onde há uma acomodação do sinal. E, finalmente, no estágio final de desgaste da ferramenta, o nível da energia é maior que os dois estágios anteriores. Portanto, os parâmetros citados estão reproduzindo este comportamento.

Na condição de corte 3 (acabamento), quase todos parâmetros apresentaram boas condições de diferenciação do estágio de desgaste. Foram escolhidos os que mais se sobressaíram para esta tarefa. Os parâmetros selecionados para a condição de corte 3 foram:

- . Pico;
- . RMS;
- . Banda 3.

Em todos estes parâmetros escolhidos para a condição de corte 3, houve uma evolução crescente dos valores da mediana. Houve muito pouca sobreposição dos valores extremos de um grupo dentro de outro, o que irá facilitar muito no reconhecimento de padrões com este sinal.

Diferentemente das outras condições, os parâmetros que empregam o RMS não apresentaram o comportamento entre os estágios de desgaste descritos na condição de corte 2. Este comportamento diferenciado pode ser justificado pela menor geração de energia proveniente de operações de acabamento, fazendo com que não seja possível reproduzir as fases de rápido crescimento da fase de acomodação do desgaste. Nesta situação, a EA se mostrou satisfatória apenas para reconhecer a evolução dos estágios de desgaste propostos neste trabalho.

4.2.4 Saída da rede (classificação do sinal de entrada)

Nesta etapa foi possível analisar o índice de acertos dos procedimentos descritos nas etapas anteriores.

A resposta de uma PNN é a probabilidade de um conjunto de dados fornecidos a ela pertencer a uma das classes previamente definidas durante a etapa de treinamento. Em cada uma das classes aparecerá o valor da probabilidade, mesmo que zero, dos dados pertencerem a ela. Aqui foram empregados os dados reservados (quatro repetições) para validação do treinamento.

A Tabela 4.4 apresenta as classificações para a condição de corte 1 e com três estágios de desgaste distintos (ferramenta nova, média e gasta). Nesta tabela, na primeira coluna, aparecem a qual das quatro repetições pertencem os dados fornecidos a rede. As quatro primeiras linhas desta coluna indicam que o conjunto de dados é de uma ferramenta nova, as quatro seguintes são de um conjunto de dados de uma ferramenta com desgaste intermediário

e as quatro últimas são de um conjunto de dados das ferramentas com desgaste elevado. Todas essas separações podem ser visualizadas na última coluna.

Cada repetição possui um conjunto de dados para cada estágio do desgaste. Estes conjuntos de dados foram fornecidos a rede sem que esta soubesse previamente a qual classe eles pertencem.

As três colunas intermediárias indicam a probabilidade dos dados de cada repetição pertencerem a cada uma das classes que representam os estágios de desgaste. A coluna que estiver em destaque (números em negrito) é aquela que se espera que os dados pertençam, para dado estágio de desgaste. Isto quer dizer que, para um conjunto de dados de certo estágio, é esperado que a probabilidade deste pertencer a sua respectiva classe seja maior que as outras classes.

Tabela 4.4 – Classificação da PNN para a condição de corte 1 com três estágios de desgaste da ferramenta distintos (nova, média e gasta).

	Classe: nova (%)	Classe: média (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	99,97	0,00	0,03	Ferramenta nova
Repetição 2	99,76	0,00	0,24	
Repetição 3	13,95	0,46	85,58	
Repetição 4	0,13	27,42	72,42	
Repetição 1	0,00	77,01	22,99	Ferramenta Média
Repetição 2	0,00	20,18	79,82	
Repetição 3	0,00	99,20	0,80	
Repetição 4	0,01	59,68	40,31	
Repetição 1	0,67	0,00	99,33	Ferramenta gasta
Repetição 2	46,28	0,00	53,72	
Repetição 3	10,00	2,90	87,10	
Repetição 4	00,24	23,59	76,17	

A Tabela 4.5 mostra a classificação para os mesmos dados da condição de corte 1. Porém, esta tabela foi empregada para a situação de desgaste da ferramenta em que há apenas duas classificações. A ferramenta será classificada como em condições (boa) ou como ferramenta com desgaste elevado (gasta). A primeira classificação é resultado da união dos dois primeiros estágios de desgaste da tabela anterior.

A mesma leitura da tabela anterior pode ser aplicada a esta com relação aos valores das duas colunas intermediárias. Dentro de certo estágio de desgaste, é esperado que os valores das repetições de validação tenham maior probabilidade de pertencer a sua respectiva classe. Os valores desta classe estarão evidenciados com negrito.

As tabelas seguintes seguem o mesmo padrão, mudando apenas a condição de corte empregada na geração do conjunto de dados.

Tabela 4.5 – Classificação da PNN para a condição de corte 1 com dois estágios de desgaste da ferramenta distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta).

	Classe: boa (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	99,93	0,07	Ferramenta boa
Repetição 2	99,50	0,50	
Repetição 3	7,88	92,12	
Repetição 4	16,06	83,94	
Repetição 5	62,46	37,54	
Repetição 6	11,36	88,64	
Repetição 7	98,33	1,67	
Repetição 8	42,46	57,54	
Repetição 1	0,35	99,65	Ferramenta gasta
Repetição 2	30,05	69,95	
Repetição 3	7,00	93,00	
Repetição 4	13,62	86,38	

Analisando as tabelas anteriores, conclui-se que a porcentagem de acertos da PNN para distinguir os três estágios de desgaste foi de 75 % e para distinguir os dois estágios de desgaste também foi de 66,67 %. O critério adotado para se atingir estas porcentagens foi de a rede reconhecer o estágio de desgaste na sua respectiva classe com probabilidade acima de 50 %.

Se for analisada a capacidade de reconhecimento apenas por estágio de desgaste, na primeira tabela observa-se que o índice de acertos para o estágio nova foi de 50 %, para o estágio média foi de 75 % e para o estágio gasta foi de 100 %. Pela segunda tabela, observa-se o índice de acertos para o estágio de desgaste boa foi de 50 %, mas para o reconhecimento do estagio gasta foi de 100 %.

Era esperado que a PNN tivesse certas dificuldades com sua tarefa de reconhecer o estágio de desgaste para essa condição de corte (desbaste). Quando foram extraídos os parâmetros estatísticos que seriam fornecidos à rede, verificou-se, através da ferramenta *boxplot*, que cada conjunto de dados formado por cada parâmetro (cada um representando certa condição de desgaste) tinham os bigodes sobrepostos entre si. As explicações sobre os motivos desta interferência foram discutidas na seção 4.2.3.

Portanto, ao se empregar estes parâmetros como dados de entrada da rede, eles reproduziram na PNN a dificuldade que tiveram para separar o estado de desgaste da ferramenta nos gráficos *boxplot*.

A Tabela 4.6 mostra as classificações da PNN para os dados de validação da condição de corte 2 com três estágios de desgaste distintos (ferramenta nova, média e gasta).

Tabela 4.6 – Classificação da PNN para a condição de corte 2 com três estágios de desgaste da ferramenta distintos (nova, média e gasta).

	Classe: nova (%)	Classe: média (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	99,75	0,00	0,25	Ferramenta nova
Repetição 2	0,76	2,90	96,34	
Repetição 3	68,05	19,32	12,62	
Repetição 4	59,44	1,19	39,37	
Repetição 1	0,00	100,00	0,00	Ferramenta Média
Repetição 2	0,00	100,00	0,00	
Repetição 3	11,84	51,05	37,11	
Repetição 4	47,93	37,02	15,05	
Repetição 1	10,33	6,55	83,12	Ferramenta gasta
Repetição 2	57,86	7,31	34,83	
Repetição 3	0,00	8,45	91,55	
Repetição 4	0,00	0,56	99,44	

A Tabela 4.7 mostra as classificações da PNN para os dados de validação da condição de corte 2 com dois estágios de desgaste distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta).

Tabela 4.7 – Classificação da PNN para a condição de corte 2 com dois estágios de desgaste da ferramenta distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta).

	Classe: boa (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	96,09	3,91	Ferramenta boa
Repetição 2	6,35	93,65	
Repetição 3	33,29	66,71	
Repetição 4	42,06	57,94	
Repetição 5	100,00	0,00	
Repetição 6	100,00	0,00	
Repetição 7	46,33	53,67	
Repetição 8	72,27	27,73	
Repetição 1	18,88	81,12	Ferramenta gasta
Repetição 2	47,90	52,10	
Repetição 3	7,60	92,40	
Repetição 4	0,97	99,03	

Analizando as duas tabelas anteriores que mostram os resultados da classificação da rede para a condição de corte 2 (intermediária), observa-se que o índice de acertos não melhorou em relação à condição de corte 1. Na situação que empregou três estágios de desgaste o índice de acertos geral da rede foi de 75 % e na situação que empregou dois estágios de desgaste o índice de acerto foi de 66,67 %.

Na análise do estágio de desgaste individualmente, para a tabela com três estágios de desgaste distintos, o índice de acertos para o estágio nova foi de 75 %, para o estágio média foi de 75 % e para o estágio gasta também foi 75 %. No caso da tabela com dois estágios de desgaste distintos, o índice de acertos foi de 50 % para o estágio boa e de 100 % para o estágio gasta.

Novamente a alta interferência entre os grupos representantes de cada estágio de desgaste, discutida na seção 4.2.3, interferiu na capacidade de reconhecimento da rede. A extração dos parâmetros teve de ser realizada levando-se em consideração apenas a separação das medianas.

A Tabela 4.8 mostra as classificações da PNN para os dados de validação da condição de corte 3 com três estágios de desgaste distintos (ferramenta nova, média e gasta).

Tabela 4.8 – Classificação da PNN para a condição de corte 3 com três estágios de desgaste da ferramenta distintos (nova, média e gasta).

	Classe: nova (%)	Classe: média (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	100,00	0,00	0,00	Ferramenta nova
Repetição 2	100,00	0,00	0,00	
Repetição 3	100,00	0,00	0,00	
Repetição 4	100,00	0,00	0,00	
Repetição 1	0,00	68,33	31,67	Ferramenta Média
Repetição 2	0,00	96,26	3,74	
Repetição 3	0,00	99,65	0,35	
Repetição 4	0,00	87,02	12,98	
Repetição 1	0,00	0,00	100,00	Ferramenta gasta
Repetição 2	0,00	11,60	88,40	
Repetição 3	0,00	4,88	95,12	
Repetição 4	0,00	9,55	90,45	

Nesta tabela observa-se que a condição de corte 3 (acabamento) foi a que obteve os melhores resultados na classificação. Este resultado também era esperado visto que, na etapa de extração dos parâmetros relevantes, foi a que apresentou maiores facilidades na seleção. As razões deste resultado também estão discutidas na seção 4.2.3.

A Tabela 4.9 mostra as classificações da PNN para os dados de validação da condição de corte 3 com dois estágios de desgaste distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta).

O índice geral de acerto foi de 100 % para a situação de três estágios distintos de desgaste e de 100 % para o caso de acerto na situação de apenas dois estágios de desgaste. Com isto, o índice de acertos para o reconhecimento dos estágios de desgaste individualmente também foi de 100 % tanto para a tabela com os três estágios distintos quanto para a tabela com dois estágios de desgaste distintos.

Tabela 4.9 – Classificação da PNN para a condição de corte 3 com dois estágios de desgaste da ferramenta distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta).

	Classe: boa (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	100,00	0,00	Ferramenta boa
Repetição 2	100,00	0,00	
Repetição 3	100,00	0,00	
Repetição 4	100,00	0,00	
Repetição 5	51,92	48,08	
Repetição 6	92,80	7,20	
Repetição 7	99,30	0,70	
Repetição 8	77,07	22,93	
Repetição 1	0,00	100,00	Ferramenta gasta
Repetição 2	6,14	93,86	
Repetição 3	2,50	97,50	
Repetição 4	5,00	95,00	

A seguir serão apresentados os resultados da classificação da rede quando não há distinção da condição de corte. O objetivo deste procedimento foi observar se a rede seria eficiente no reconhecimento das classes independente da condição de corte, o que é uma situação mais realista no chão de fábrica de uma indústria.

Não foi realizada nova avaliação, item por item, como a descrita até esta seção. O objetivo foi verificar se os mesmos procedimentos aplicados para reconhecer o estágio de desgaste em uma condição de corte qualquer poderiam ser eficiente mesmo se não fosse fornecido em que condições foram realizadas as aquisições. Isto é importante pois, como verificado nos resultados anteriores, a análise empregada com EA não foi muito sensível às condições de corte mais severas. Portanto, para este procedimento, os parâmetros simplesmente foram somados, como explicado no parágrafo anterior. Com isto, cada estágio de desgaste, que tinha três ou quatro parâmetros por condição de corte, passou a ter dez parâmetros para representá-lo, mesmo que alguns sejam repetidos.

A Tabela 4.10 mostra as classificações da PNN para os dados de validação com três estágios de desgaste distintos independente da condição de corte.

Tabela 4.10 – Classificação da PNN para três estágios de desgaste da ferramenta distintos (nova, média e gasta) independente da condição de corte.

	Classe: nova (%)	Classe: média (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	100,00	0,00	0,00	Ferramenta nova
Repetição 2	12,72	0,00	87,28	
Repetição 3	100,00	0,00	0,00	
Repetição 4	100,00	0,00	0,00	
Repetição 1	0,00	100,00	0,00	Ferramenta Média
Repetição 2	0,00	100,00	0,00	
Repetição 3	0,00	99,76	0,24	
Repetição 4	0,00	83,25	16,75	
Repetição 1	0,00	0,00	100,00	Ferramenta gasta
Repetição 2	0,00	0,00	100,00	
Repetição 3	0,00	0,07	99,95	
Repetição 4	0,00	1,31	98,69	

A Tabela 4.11 mostra as classificações da PNN para os dados de validação com dois estágios de desgaste distintos independente da condição de corte.

Estas tabelas mostram que a rede obteve um índice de acerto de 91,67 % no reconhecimento da classe a qual o estágio desgaste pertence.

Na situação em que se empregou três estágios distintos de desgaste, a rede acertou quatro das quatro repetições empregadas para validação (100%), tanto para ferramenta com estágio de desgaste intermediário como para ferramenta com desgaste elevado. Para uma ferramenta nova, a rede acertou três em quatro repetições (75 %).

Na situação em que se empregou apenas dois estágios de desgaste, a rede acertou sete em oito repetições para a ferramenta boa (87,5 %). Para a ferramenta gasta, a rede acertou na classificação de todas quatro repetições (100 %).

Destas duas últimas tabelas, observa-se que o valor responsável por a rede não obter um índice de acerto de 100 % em qualquer situação foi a repetição 2 dos valores de validação. Analisando todas tabelas anteriores que descrevem os resultados da rede, observa-se que na condição de corte 2 esta mesma repetição apresenta valores extremamente baixos onde deveria haver a classificação correta.

Tabela 4.11 – Classificação da PNN para dois estágios de desgaste da ferramenta distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta) independente da condição de corte.

	Classe: boa (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	100,00	0,00	Ferramenta boa
Repetição 2	1,57	98,43	
Repetição 3	100,00	0,00	
Repetição 4	100,00	0,00	
Repetição 5	100,00	0,00	
Repetição 6	100,00	0,00	
Repetição 7	99,99	0,01	
Repetição 8	80,27	19,73	
Repetição 1	0,00	100,00	Ferramenta gasta
Repetição 2	0,00	100,00	
Repetição 3	0,00	100,00	
Repetição 4	0,05	99,95	

Como esta etapa do trabalho foi realizada com a adição de todas repetições de todas as condições de corte, certamente a repetição 2 da condição de corte 2 influenciou fortemente no erro de classificação da rede. Portanto, esta repetição deve apresentar um problema aleatório, tal como um erro ou algum fator que passou despercebido durante a aquisição, visto que as repetições 2 das outras condições comportaram dentro do esperado.

O bom índice de acertos de classificação nesta última situação pode ser justificado pelo aumento do número de amostras por cada estágio de desgaste que foram fornecidas para a rede. Com isto, aproxima-se da função densidade de probabilidade (fdp) verdadeira e aumenta-se a probabilidade de um certo valor cair dentro do trecho que representa a classificação correta. Como houve uma limitação no número de repetições para as condições de corte avaliadas individualmente, valores que antes não foram classificados corretamente aumentaram suas chances de serem incluídos dentro da classe correta.

Uma análise mais aprofundada destes resultados baseia-se no estimador de Parzen, empregado na PNN. Este estimador demonstra ser uma ótima ferramenta para aproximar a verdadeira função densidade de probabilidade quando o número de amostras cresce. Como a PNN é baseada na regra de decisão de Bayes, a classificação será mais correta se lhe for fornecido uma estimativa mais aproximada da fdp verdadeira. Estas explicações podem ser vistas mais detalhadamente na seção 2.4.7 da revisão sobre redes neurais artificiais.

A seguir, será apresentado um resumo dos índices de acertos da rede (PNN) no reconhecimento do estágio de desgaste correto:

Porcentagem de acerto total na classificação (critério: classificação correta e probabilidade acima de 50 %):

Condição de corte 1 (desbaste):

- . Para 3 estágios de desgaste: 75,00 %
- . Para 2 estágios de desgaste: 66,67 %

Condição de corte 2 (intermediária):

- . Para 3 estágios de desgaste: 75,00 %
- . Para 2 estágios de desgaste: 66,67 %

Condição de corte 3 (acabamento):

- . Para 3 estágios de desgaste: 100,00 %
- . Para 2 estágios de desgaste: 100,00 %

Independente da condição de corte:

- . Para 3 estágios de desgaste: 91,67 %
- . Para 2 estágios de desgaste: 91,67 %

Porcentagem de acerto na classificação por estágio de desgaste (critério: classificação correta e probabilidade acima de 50 %):

Condição de corte 1 (desbaste):

- . Para 3 estágios de desgaste:
 - . Nova: 50 %
 - . Média: 75 %
 - . Gasta: 100 %
- . Para 2 estágios de desgaste:
 - . Boa: 50 %
 - . Gasta: 100 %

Condição de corte 2 (intermediária):

- . Para 3 estágios de desgaste:
 - . Nova: 75 %
 - . Média: 75 %

- . Gasta: 75 %
- . Para 2 estágios de desgaste:
 - . Boa: 50 %
 - . Gasta: 100 %

Condição de corte 3 (acabamento):

- . Para 3 estágios de desgaste:
 - . Nova: 100 %
 - . Média: 100 %
 - . Gasta: 100 %
- . Para 2 estágios de desgaste:
 - . Boa: 100 %
 - . Gasta: 100 %

Independente da condição de corte:

- . Para 3 estágios de desgaste:
 - . Nova: 75 %
 - . Média: 100 %
 - . Gasta: 100 %
- . Para 2 estágios de desgaste:
 - . Boa: 87,5 %
 - . Gasta: 100 %

Capítulo V

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho.

- 1) O mapa de intensidade luminosa empregado no fresamento mostrou-se uma interessante ferramenta na avaliação de alguns problemas típicos desta operação, tais como: erros de batimento axial e radial e insertos com diferentes níveis de desgaste.
- 2) É possível representar a superfície usinada através do mapa de intensidade luminosa. Nesta representação identificam-se fenômenos como: maior intensidade de energia durante o impacto do inserto na entrada da peça; uma área difusa na saída da peça, que é gerada pela intensa formação de rebarbas nesta região; o momento exato em que a aresta de corte do inserto lascou; também é possível observar o momento em que as arestas alisadoras raspam a superfície da peça durante a fase inativa.
- 3) Os espectros de potência mostram que o nível de energia do sinal de emissão acústica tem valores maiores para as frequências próximas de 150 kHz e 200 kHz para este trabalho.
- 4) Quanto menos severas foram as condições de corte empregada, mais fácil foi a diferenciação dos estágios de desgaste da ferramenta através dos espectros de potência do sinal de emissão acústica.
- 5) A faixa de frequência de 120 a 300 kHz mostrou ser interessante, dentro do espectro utilizado (50 a 500 kHz), para a diferenciação dos estágios de desgaste. Dentro desta faixa há outras menores que apresentam resultados de diferenciação ainda melhores.
- 6) A variação do posicionamento relativo do sensor de EA com a região de corte devido ao movimento causado pelo avanço, apresentou influência nos dados adquiridos. As duas

aquisições realizadas quando a região de corte se aproximava do sensor diferenciaram da aquisição quando a região de corte se afastava.

7) Os gráficos *boxplot* demonstraram ser uma ferramenta útil para análise de sensibilidade e extração dos parâmetros estatísticos empregados que foram mais sensíveis. Estes gráficos expõem claramente o comportamento estatístico dos dados facilitando sua análise.

8) Os parâmetros banda 1, banda 2, banda 3, banda 4 além do RMS global foram os mais representativos da evolução do desgaste em todas condições de corte. Isto quer dizer os parâmetros que empregam o filtro RMS, que quantifica a energia contida no sinal, foram os que melhor descreveram o comportamento geral da evolução do desgaste.

9) Dos parâmetros que empregam o filtro RMS a banda 3 foi o que melhor representou a evolução do desgaste para as condições de corte empregadas. Isto indica que uma faixa de frequências próxima de 260 a 300 kHz pode ser ideal para o monitoramento do desgaste com o sinal EA_{RMS} .

10) Os resultados da PNN foram bem consistentes na condição de acabamento. Foi possível classificar os estágios de desgaste das ferramentas com um excelente índice de acerto (100%). Nas condições de corte intermediária e de desbaste, os índices de acerto foram menores tanto para dois estágios de desgaste como para três (66,67 % e 75,00 %, respectivamente), com exceção do estágio de ferramenta desgastada. Neste caso, o índice de acerto também foi muito bom (quase sempre 100 %).

11) Os resultados da PNN mostram que o monitoramento do desgaste via emissão acústica é fortemente influenciado pelas condições de corte. Porém, quando não se informa a condição de corte empregada, os resultados foram extremamente satisfatórios, com índices de 91,67 % de acertos na classificação do estágio de desgaste.

5.1 – Sugestão para Trabalhos Futuros

- . Expandir progressivamente este trabalho realizado com um inserto para dois, quatro e oito insertos.
- . Verificar a viabilidade desta proposta de monitoramento para fresas com mais de oito insertos, para diferentes penetrações de trabalho, para o fresamento de topo e o tangencial, para diferentes geometrias de ferramentas e para diferentes materiais da peça e da ferramenta.
- . Criar procedimentos para que o monitoramento seja capaz não só de avaliar a condição de desgaste das ferramentas na fresa, mas também de apontar qual delas está fora dos padrões de desgaste recomendável.
- . Utilizar outros sinais, como o de potência, trabalhando em conjunto e simultaneamente com a emissão acústica, para verificar se há uma melhora ainda mais significativa da resposta do sistema.
- . Elaborar um *software* para utilizar todos os procedimentos deste trabalho em um processo de monitoramento em tempo real.
- . Verificar a viabilidade da utilização destas propostas de monitoramento em tempo real via emissão acústica em um ambiente industrial.

Capítulo VI

Referências Bibliográficas

ABNT, NBR 6162. **Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais – Terminologia**. 1989.

ABNT, NBR 6163. **Conceitos da Técnica de Usinagem – Geometria da Cunha Cortante – Terminologia**. 1980.

ASPINWALL, D.K.; CHEN, W. Machining Grey Cast Iron using Advanced Ceramic Tool Materials. 1978, 27th International MATADOR Conference, Manchester, UK.

AXINTE, D.A. Approach Into the Use of Probabilistic Neural Networks for Automated Classification of Tool Malfunctions in Broaching. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 46, pp. 1445-1448, 2005.

AXINTE, D.A.; GINDY, N.; FOX, K.; UNANVE, I. Process Monitoring to Assist the Workpiece Surface Quality in Machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 44, pp. 1091-1108, 2004.

BALINT, J.J.; BROWN, R.H. **International Journal Machining Tool Des. Res.**, vol. 4, pp. 117-122, 1964.

BEATTIE, A.G. Acoustic Emission: Principles and Instrumentation. **Journal of Acoustic Emission**. Volume 2, Number ½, 1983.

BER, A., KALDOR, S. The first second of cutting, wear behaviour. **Ann. CIRP** 31/1, pp. 13-17, 1982.

BHATIA, S.M.; PANDEY, P.C.; SHAN, H.S. The Thermal Condition of the Tool Cutting Edge in Intermittent Cutting. **Wear**. vol. 61, pp. 21-30, 1986.

BLUM, T.; INASAKI, I. A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process. **Journal of Engineering for Industry**. vol. 112, pp. 203-211, 1990.

BOOTHROYD, G. **Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools**. New York: Mc Graw – Hill, 1975.

BRAGA, A.P.; CARVALHO, A.P.L.F.; LUDEMIR, T.B. **Fundamentos de Redes Neurais Artificiais**. 11ª Escola de Computação, UFRJ, 1998.

BRAGA, D.U. **Monitoramento do Processo de Torneamento via Parâmetros Elétricos do Motor**. 1992. Dissertação de Mestrado, DEF-FEM-UNICAMP.

CALDEIRANI FILHO, J. **Estudo e Monitoramento do Processo de Fresamento Frontal com Fresas de Insertos Intercambiáveis**. 1998. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

CHAO, B.T.; TRIGGER, K.J. **Trans. ASME**, vol. 77, pp.1074-1121, 1955.

CHATTOPADHYAY, A.K.; CHATTOPADHYAY, A.B. Wear and Performance of Coated Carbide and Ceramic Tools. **Wear**. vol. 80, pp. 239-258, 1982.

Centro de Informação Metal Mecânica (CIMM), Apostila Didática, Usinagem, <http://www.cimm.com.br/cimm/geral/jsps/frame_univers.jsp?pagina=http://construtor.cimm.com.br/cgi-win/construt.cgi?configuradorresultado&id=1220&construt=true>. Acesso em: 15 dezembro 2006.

DAN, L.; MATHEW, J. Tool wear and failure monitoring techniques for turning – a review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. V. 30, pp. 579 – 598, 1990.

DE CARVALHO, S.R.; SILVA, S.M.M.L.; MACHADO, A.R.; GUIMARÃES, G. Determinação da Temperatura na Interface Cavaco-Ferramenta a Partir da Modelagem 3D do Conjunto Ferramenta e Porta-Ferramenta. In: 3º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, abril 2005, Joinville, SC, Brasil.

DE MELO, A.C.A. **Estudo das Trincas de Origem Térmica Geradas em Ferramentas de Metal Duro Durante o Fresamento Frontal**. 2001. Tese de Doutorado, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

DEARNLEY, P.A.; TRENT, E.M. Wear Mechanisms of Coated Carbides Tools. **Metals Technology**. vol. 9, February, pp.60-75, 1982.

DIEI, E.N.; DORNFELD, D.A. Acoustic Emission Sensing of Tool Wear in Peripheral Milling. **ASME**. vol. 14, pp. 107-124, 1984.

DIMLA SNR, D.E. **Multivariate Tool Condition Monitoring in a Metal Cutting Operation Using Neural Networks**. 1998, Ph.D. thesis, School of Engineering and the Built Environment, The University of Wolverhampton, UK.

DIMLA SNR, D.E. Sensor Signals for Tool-Wear Monitoring in Metal Cutting Operations – A Review of Methods. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. pp. 1073-1098, 2000.

DINIZ, A.E.; LIU, J.J., DORNFELD, D.A. Correlating Tool Life, Tool Wear and Surface Roughness by Monitoring Acoustic Emission in Finish Turning. **Wear**. 152, pp. 395-407, 1992.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**. 3ª edição, São Paulo, Artliber Editora, 2001.

DOLINSEK, S.; KOPAC, J. Acoustic Emission Signals for Tool Wear Identification. **Wear**. 225-229, pp. 295-303, 1999.

DORNFELD, D.A. Monitoring of the Cutting Process by Means of AE Sensor. **Proceedings of the 3rd International Machine Tool Engineering Conference**. 1988.

DORNFELD, D.A. Neural Networks Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring. CIRP, **CIRP Annals**, Vol. 39/1, pp, 101-105, 1990.

DORNFELD, D.A. Monitoring of Machining Process – Literature Review. In STC “C” Meeting. Paris: **CIRP**, p.51, 1992.

DOS SANTOS, A.L.B. **Metodologia Via Redes Neurais para Estimativa da Rugosidade e do Desgaste de Ferramentas de Corte no Processo de Fresamento**. 2001. Tese de Doutorado, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

DOS SANTOS, M.T. **Estudo do Monitoramento do Desgaste de Fresas de Topo Baseado em Emprego de Sensores**. 1988, Tese de Doutorado, USP, São Paulo.

DUARTE, M. A. V. **Manutenção Preditiva Via Análise de Vibrações**. Apostila Didática. Laboratório de Vibração e Acústica, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, 2005, Uberlândia, MG.

DU, R.; ELBESTAWI, M.A.; WU, S.M. Automated Monitoring of Manufacturing Process, Part 1: Monitoring Methods. **Journal Engineering for Industry**. vol. 117, pp. 121-132, 1995.

DU, R.; ELBESTAWI, M.A.; WU, S.M. Automated Monitoring of Manufacturing Process, Part 2: Applications. **Journal Engineering for Industry**. vol. 117, pp. 133-141, 1995.

EL-WADARNY, T.I.; GAO, D.; ELBESTAWI, M.A. Tool Condition Monitoring in Drilling Using Vibration Signature Analyses. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 36 (6), pp. 687-711, 1996.

EL-WADARNY, T.I.; MOHAMMED, E.; ELBESTAWI, M.A. Cutting Temperature of Ceramic Tools in High Speed Machining of Difficult-to-Cut Materials. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol.36 nº 5, pp. 611-634, 1995.

FERNANDES, E.B.F.; ALVES, M.F.; JUNIOR, P.P.C. Classificação de Padrões de Afundamentos de Tensão em Sistemas de Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica. VI SBQEE, Belém, 2005.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo, ed. Edgard Blücher, 1977, 751 p.

HARRIS, S. G., DOYLE, E. D., VLASVELD, A. C., AUDY, J., QUICK, D. A study of the wear mechanism of $Ti_{1-x}Al_xN$ and $Ti_{1-x-y}Al_xCr_yN$ coated high-speed steel twist drills under dry machining conditions. **Wear**, 254, pp. 723 – 734, 2003.

ISO 8688-1. **Tool Life Testing in Milling – Part 1: Face Milling.** 1989-05-01.

IWATA, K.; MORIWAKI, T.; TAKENAKA, N. An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear. In: CIRP, **CIRP Annals**, vol. 25, pp. 21-26, 1977.

JAIN, A.K.; MAO, J. Artificial Neural Networks: A Tutorial. Computer – IEE, pág. 31-44, março, 1996.

JEMIELNIAK, K. Some Aspects of Acoustic Emission Signal Pre-Processing. **Journal of Materials Processing technology**. 109, pp 242 – 249, 2001.

JETLY, S. Measuring Cutting Tool Wear On-Line: Some Practical Considerations. **Manufacturing Engineering**. pp 55-60, 1984.

KAMINISE, A.K., ARIZA, R.G., MACHADO, Á.R., DA SILVA, M.B., Properties of Burrs Formed When Cutting AISI 1045 Carbon Steel in Turning Operation, 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing, Berkeley, Estados Unidos, p.127 – 135, 2004.

KANNATEY-ASIBU, E.J.; DORNFELD, D.A. Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting, Trans. ASME, **Journal of Engineering Industry**. 103, 330, 1981.

KANNATEY-ASIBU, E.J.; DORNFELD, D.A. A Study of Tool Wear Using Statistical Analyses of Metal Cutting Acoustic Emission. **Wear**. 76, pp. 247-261, 1986.

LAN, M.S.; DORNFELD, D.A. In-Process Tool Fracture Detection. Trans. ASME, **J. Eng. Ind.** 106, pp. 111-118, 1984.

LEE, D.E.; HWANG, I.; VALENTE, C.M.O.; OLIVEIRA, J.F.G.; DORNFELD, D.A. Precision Manufacturing Process Monitoring with Acoustic Emission. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 46, pp. 176-188, 2005.

LENZ, E., MAYER, J. E., LEE, D. G. Investigation in drilling. **Ann. CIRP** 27/1, pp. 49-53, 1978.

LI, X. A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Monitoring During Turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 42, pp. 157-165, 2002.

LI, W.; LI, D.; NI, J. Diagnosis of Tapping Process Using Spindle Motor Current. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 43, pp. 73-79, 2003.

LIANG, S.Y., DORNFELD, D.A. Detection of Cutting Tool Wear Using Adaptive Time Series Modeling of Acoustic Emission Signal. In: **ASME**, Boston, Winter Annual Meeting, 1987.

MACHADO, A.R.; DA SILVA, M.B. **Usinagem dos Metais**. Apostila Didática, 8ª edição, Editora da UFU, 2004.

MASTER, T. Advanced Algorithms for Neural Networks. **John Wiley & Sons, New York**, 1993.

MATSUMOTO, H.; DINIZ, A.E. Torneamento de Aço Endurecido Monitorado por Emissão Acústica e Corrente do Motor. In: 14ª COBEM, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP, Brasil, 1997.

MCCULLOCH, W.S.; PITTS, W, A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity. **Bulletin of Mathematical Biophysics**, 5, pp. 115-133, 1943.

MEISEL, W., **Computer-Oriented-Approaches to Pattern Recognition**. Academic Press, New York, 1972.

MEOLA, T. **Monitoramento em Tempo Real da Qualidade de Sinais de Vibrações, Utilizando Inteligência Artificial**. 2005. Dissertação de Mestrado, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

METAL'S HANDBOOK. **Machining**. 9ª ed., Vol. 16, ASM International, 1989.

MODERN METAL CUTTING. **A Practical Handbook**. First Edition, 1994.

NAERHEIM, Y.; LAN, M. Acoustic Emission Reveals Information About The Metal Cutting Process and Tool Wear. SME, **Proc. 16th North American Manufacturing Research Conf.**, Detroit, MI, pp. 240-244, 1988.

NORMAN, P. **Monitoring and Control of Highspeed Milling**. 2003. Master's Thesis. Lulea University of Technology, Division of Manufacturing Systems Engineering, Sweden.

OLIVEIRA, J.F.G., DORNFELD, D.A. Application of AE Contact Sensing In Reliable Grinding Monitoring. **CIRP Annals** , 50 (1), 2001.

PALMAI, Z. Cutting Temperature in Intermittent Cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 27 (2), pp. 261-274, 1987.

PARZEN, E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode, **Annals of Mathematical Statistics**, V. 33, pp. 1065-1076, 1962.

PEKELHARING, A.J. The Exit Failure in Interrupted Cutting. **CIRP Annals**, vol 27, n 1, pp. 5-10, 1978.

PIGARI, A.C. **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Torneamento Usando Emissão Acústica**. 1995, 130 p, Dissertação de Mestrado, DEF-FEM-UNICAMP, Campinas, SP.

RANGWALA, S.; DORNFELD, D.A. A Study of Acoustic Emission Generated During Orthogonal Metal Cutting - 1: Energy Analyses. **International Journal of Mechanical Science**. Vol. 33, N. 6, pp. 471 – 487, 1991.

RANGWALA, S., DORNFELD, D.A. A Study of Acoustic Emission Generated During Orthogonal Metal Cutting - 2: Spectral Analyses. **Int. J. of Mech. Science**. vol. 33, nº 6, pp. 489-499, 1991.

RAVINDRA, H.V.; SRINIVASA, Y.G.; KRISHNAMURTHY, R. Modeling of Tool Wear Based on Cutting Forces in Turning. **Wear**. 169, pp. 25-32, 1993.

RAVINDRA, H.V.; SRINIVASA, Y.G.; KRISHNAMURTHY, R. Acoustic Emission for Tool Condition Monitoring in Metal Cutting. **Wear**. 212, pp. 78-84, 1997.

ROTBURG, J.; BRAUN, S.; LENZ, E. Mechanical Signature Analyses in Interrupted Cutting. **CIRP Annals**. 36 (1), pp. 249-252, 1987.

SANDVIK COROMANT. **Manual do Fresamento 3**. Sandvik do Brasil S.A., São Paulo, 1989, 76 p.

SANDVIK COROMANT. **Modern Metal Cutting**. 1º Edition, Sweden, Sandvik Coromant Technical Editorial Dept., Tofters Tryckeri AB, ISBN 91-972299-0-3, 1994, pp. X1-X159.

SANDVIK COROMANT. **Aplication Guide: Die and Mould Making**. 1999.

SANDVIK COROMANT. **Produtos para Usinagem de Metais: Ferramentas Rotativas**. Sandvik do Brasil S.A., São Paulo, 2003, 665 p.

SHAW, M.C. Metal Cutting Principles. Oxford Science Publications, **ISBN 0 19 859002 4**, USA, 594 pgs, 1986.

SOUSA, M. M. **Utilizando a Vibração Mecânica para Monitorar o Desgaste das Ferramentas de Corte e o Acabamento Superficial no Processo de Fresamento**. 1998. Tese de Doutorado, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

SOUTO, U.B.; DA SILVA, R.H.L.; MEOLA, T.; DA SILVA, M.B. Monitoramento do Fresamento: Análise da Correlação do Sinal de Emissão Acústica com o Desgaste. IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM, Recife, PE, Brasil, agosto 2006.

SPECHT, D. Probabilistic Neural Network, **Neural Network**, V. 3, pp. 109-118, 1990.

TAY, A.A.O. A Review of Methods of Calculating Machining Temperature. **Journal of Materials Processing Technology**. 36, pp. 225-257, 1993.

TETI, R.; DORNFELD, D.A. Modeling and Experimental Analyses of Acoustic Emission from Metal Cutting. **Int. Journal of Engineering for Industry**. Vol. III, pp. 229-237, 1989.

TLUSTY, J.; ANDREWS, G.C. A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining. **Annals of the CIRP**. vol. 32, pp 563-572, 1983.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4th Edition, Butterworths - Heinemann, ISBN 0-7506-7069-X, 2000, 446 pags.

USUI, E.; SHIRAKASHI, T.; KITAGAWA, T. **ASME J. Eng.**, vol. 100, pp. 236-243, 1978.

WANG, K.K.; TSAO, K.C.; WU, S.M. Investigation of Face-Milling Tool Temperatures by Simulation Techniques. **Journal of Engineering for Industry**. august, pp. 772-80, 1969.

WEBSTER, J.; MARINESCO, I.; BENNETT, R. Acoustic Emission for Process Monitoring Control and Monitoring of Surface Integrity During Grinding. **CIRP Annals**. vol. 43, 1994.

XIAOLI, L.; ZHEJUN, Y. Tool Wear Monitoring with Wavelet Packet Transform – Fuzzy Clustering Method. **Wear**. 219, pp. 145-154, 1998.

Anexo

Estudo da Relação Entre o Sinal de Emissão Acústica e a Rugosidade no Torneamento

1. RUGOSIDADE DE UMA SUPERFÍCIE USINADA

Blum e Inasaki (1990); Lan e Dornfeld (1983); Iwata, Moriwaki e Takenaka (1977); Xiaoli (2002) afirmam que a intensidade do sinal de EA cresce linearmente com o aumento da velocidade de corte, é pouco influenciado pela profundidade de corte e diminui com o aumento do avanço e do ângulo de saída da ferramenta. O aumento do desgaste de flanco da ferramenta, que afeta diretamente a rugosidade da superfície gerada, aumenta a área de contato entre o cavaco e a ferramenta, fazendo com que aumente o atrito entre ambas. Portanto, o aumento do desgaste da ferramenta aumenta a intensidade do sinal de EA.

A condição de uma superfície usinada é o resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e às vezes reações químicas (Machado; da Silva, 2004). Assim, o acabamento superficial é a combinação de alguns fatores que podem ser definidos como ondulação, rugosidade e falhas.

A rugosidade de uma superfície usinada é também o resultado da combinação de alguns fatores que ocorrem durante o processo de corte tais como as condições de corte, geometria da ferramenta, geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta, material da peça e material da ferramenta (Nakayama et al., 1966; Shouckry, 1982).

Em geral, alguns fatores podem ser trabalhados para se conseguir um melhor acabamento superficial, tais como (Machado; da Silva, 2004):

- deflexões geradas por esforços de usinagem ou pequenas vibrações;
- raio de arredondamento da ponta da ferramenta;
- posicionamento e centragem corretas da peça e da ferramenta;
- o material da peça é inerentemente puro (sem trincas, bolhas, e inclusões);
- eixo principal da máquina ferramenta corretamente alinhado e as guias sem desgastes;

- aresta de corte sem desgaste ou quebras;
- corte sem aresta postiça de corte (APC).

As condições de corte, principalmente o avanço e a velocidade de corte, tem grande influência na rugosidade superficial. Velocidades de corte muito baixa podem favorecer o aparecimento da APC, que é altamente prejudicial ao acabamento. As diferenças de altura entre os picos e vales das marcas de avanço são aumentadas à medida que se aumenta o avanço.

2. METODOLOGIA

Os experimentos deste trabalho foram realizados em um torno convencional IMOR PRN-320. O corpo de prova tem a forma de barra cilíndrica de 160 mm de comprimento 65,80 mm de diâmetro de aço ABNT 1045, com dureza média de 206 HB.

O equipamento usado para a aquisição do sinal de emissão acústica é fabricado pela Sensis e constitui-se de um sensor de EA, um condicionador de sinal de 4 canais DM 42, uma fonte para o condicionador e um instrumento virtual do *LabVIEW* específico para EA. Além destes equipamentos, também foram utilizados uma placa de aquisição NI-DAQ PCI-6035E, um computador e um *trigger*. A função deste *trigger* é sincronizar as rotações da peça com a aquisição do sinal de EA. Com isto, consegue-se separar o sinal de EA adquirido a cada volta da peça. Seu funcionamento consiste de uma fonte de luz que é refletida por um anteparo espelhado localizado na placa do torno e captada por um *led* sensível à luz na outra extremidade do *trigger*. Este dispositivo foi criado e construído nas instalações do LEPU. A Figura 1 mostra um esquema do sistema de aquisição de sinais utilizado neste trabalho.

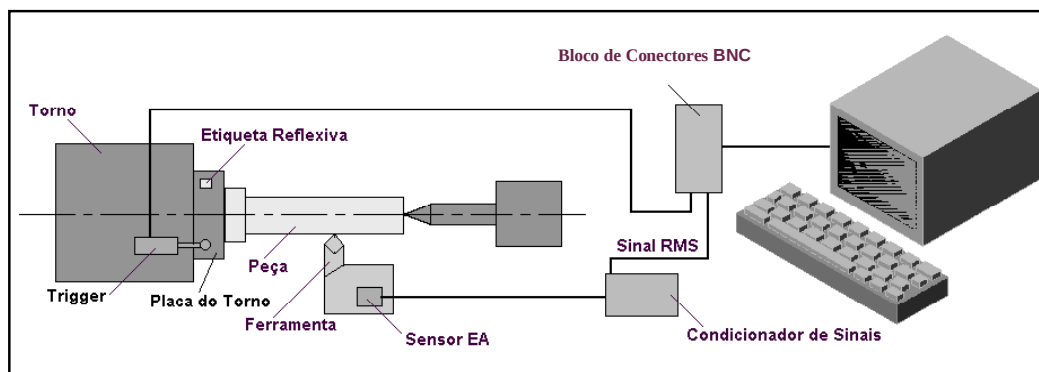


Figura 1. Esquema do sistema de aquisição de sinais de emissão acústica utilizado.

Para facilitar a localização do sinal de EA adquirido durante a volta, foi feito um canal de 10x10 mm ao longo de todo o comprimento da peça, como mostrado na Fig. 2. Para obtenção do perfil de rugosidade foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo SJ 201P.



Figura 2. Barra cilíndrica feita com o aço ABNT 1045.

As condições de corte consistiram em rotação da máquina ferramenta de 618 rpm que, para o diâmetro inicial da peça de 65,80 mm e o diâmetro final de 64,80 mm após o último passe, implicou em velocidades de corte v_c de 127,65 m/min e 125,81 m/min respectivamente. A profundidade de corte a_p adotada foi de 0,50 mm e avanço f de 0,079 mm/rotação. O porta ferramenta utilizado tem especificação ISO CSBPR 2020 K12 e o inserto de metal duro revestido SPUN 12 03 08, classe ISO P35.

Este trabalho consistiu em comparar a rugosidade obtida na direção longitudinal da superfície usinada da peça com o sinal de emissão acústica médio adquirido ao longo deste mesmo trecho. Um gráfico do sinal de EA foi adquirido a cada volta da peça. Como foi necessário um comprimento de 4 mm para a obtenção do perfil de rugosidade (utilizou-se um *cut-off* de 0,8 mm), foram necessários 50 gráficos de EA (pois para avançar 4 mm são necessárias 50 rotações da peça). Cada gráfico de EA continha aproximadamente 400 pontos.

A Figura 3 mostra um sinal de EA típico obtido ao longo de uma revolução da peça. Pelo gráfico observa-se que, aproximadamente no ponto 250 (para este gráfico), a ferramenta passa pelo canal da peça, pois o sinal de emissão acústica tende a cair para zero. Deste gráfico retira-se apenas um valor, que corresponde ao sinal de EA na região onde foi medida a rugosidade. Para este trabalho foi feita uma média dos cinco pontos nas vizinhanças da região analisada (entre os pontos 315 e 319). A cavidade na peça serve assim como referência.

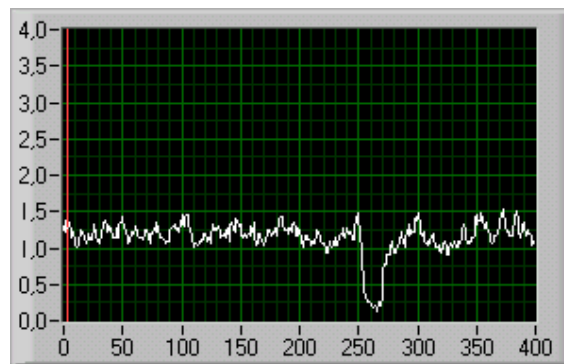


Figura 3. Característica do sinal de EA ao passar pela cavidade.

A fim de se obter várias situações de rugosidade, duas ferramentas de metal duro com diferentes estados de desgaste foram empregadas. Na primeira, a ferramenta já iniciava o corte com um desgaste de flanco máximo $VB_{Bmáx}$ de 0,31 mm. Na segunda, foi utilizada uma ferramenta nova, portanto sem nenhum tipo de desgaste. Para cada situação, foram marcados três trechos de 4 mm ao longo da barra para que se fossem realizadas as aquisições de rugosidade e do sinal de EA. Estes trechos foram marcados a uma distância de 15, 65 e 120 mm da face da peça. Com isto, também se obteve situações diferentes de rugosidade, pois, quanto mais longe do seu engastamento, maior era o momento aplicado e maior era a vibração. Foram realizadas duas repetições para cada estado de desgaste da ferramenta. A Tabela 1 mostra como foram subdivididas e numeradas as etapas de usinagem deste trabalho.

Tabela 1. Subdivisões e numeração das etapas do experimento

Trecho – 1ª repetição	Pastilha com desgaste	Pastilha sem desgaste
1º trecho (15mm)	Teste A _{1.1}	Teste B _{1.1}
2º trecho (65mm)	Teste A _{1.2}	Teste B _{1.2}
3º trecho (120 mm)	Teste A _{1.3}	Teste B _{1.3}
Trecho – 2ª repetição	Pastilha com desgaste	Pastilha sem desgaste
1º trecho (15mm)	Teste A _{2.1}	Teste B _{2.1}
2º trecho (65mm)	Teste A _{2.2}	Teste B _{2.2}
3º trecho (120 mm)	Teste A _{2.3}	Teste B _{2.3}

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O perfil de rugosidade é composto por vários eventos, entre eles as marcas de avanço de acordo com a geometria da ferramenta. Estas marcas formariam uma superfície teórica, para a qual o perfil poderia ser previsto. O perfil real, no entanto, desvia do teórico devido a

vibrações do sistema, rebarbas, fluxo lateral (*side flow*), partículas de APC, desgaste ou avarias da cunha cortante.

O sinal de emissão acústica por sua vez é composto por deformações plásticas e elásticas que ocorrem durante a formação do cavaco e outros fenômenos. Desta forma, mesmo que se conseguisse usinar um perfil teórico, o sinal de EA não poderia representar o perfil de rugosidade. No entanto, o sinal de EA poderia indicar outros fenômenos que contribuem para formar o perfil. Assim, seria interessante analisar o perfil de rugosidade em busca de alterações em relação ao perfil teórico e, se possível, identificar dentre estas alterações, quais poderiam ser detectadas pelo sinal de EA.

A Figura 4 apresenta o sinal de emissão acústica completo durante a realização do teste a. percebe-se claramente a queda do sinal de EA, tendendo ao valor zero, quando a ferramenta passa pelo canal da peça. O gráfico contém cerca de 32.000 pontos, já que são adquiridos 400 pontos a cada rotação da peça e que o gráfico corresponde a um tempo de aquisição em que foram dadas 80 rotações da peça.

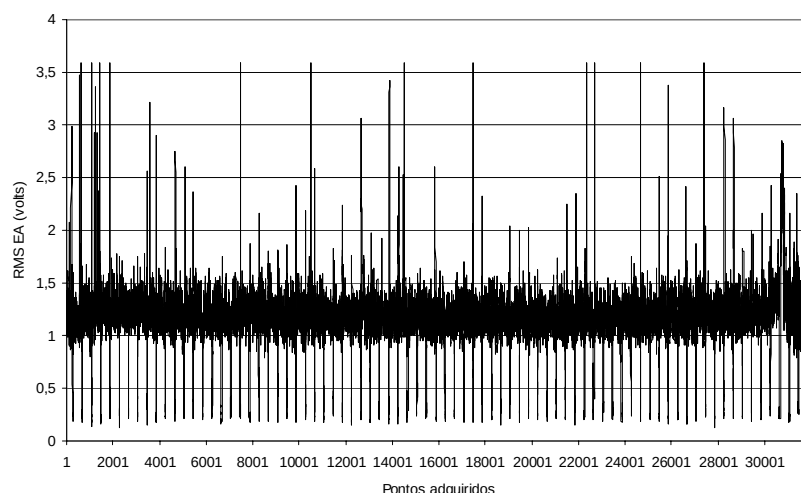


Figura 4. Sinal de emissão acústica para o teste A.

Diniz; Liu; Dornfeld (1992) empregou em seus experimentos com EA e torneamento uma faixa de frequência, após analisar o espectro de frequência, entre 200 kHz e 300 kHz. Devido à limitações do equipamento empregado neste experimento, principalmente com a faixa de corte do filtro passa baixa, empregou-se apenas o filtro passa alta com 100 kHz.

Para este trabalho, entretanto, não se buscou algum tipo de relação através do espectro de frequência, pois, além da limitação da placa de aquisição de dados, trabalhou-se apenas com o sinal RMS, portanto, qualquer informação advinda do espectro poderia não corresponder à realidade.

A Figura 5 mostra a parte correspondente aos primeiros 1000 pontos adquiridos do gráfico da Figura 4. Este gráfico permite uma melhor observação do comportamento do sinal de EA durante a usinagem. A região da peça onde foi obtido o perfil de rugosidade corresponde a uma região entre os pontos 315 e 319 do gráfico da Figura 5.

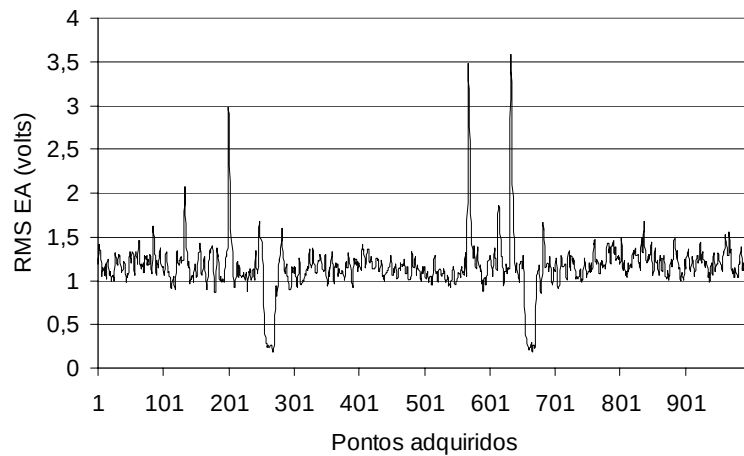


Figura 5. Sinal de EA para os primeiros 1000 pontos adquiridos.

Assim, o sinal de EA que corresponderia ao início do trecho onde foi obtido o perfil de emissão acústica foi admitido como sendo uma média do sinal entre os pontos 315 a 319, o que resulta num valor de 1,034 V (nível RMS). Utilizando o mesmo procedimento para a segunda volta, obtemos a média do sinal entre os pontos 715 a 719 que é de 1,1284 V. Repetindo este procedimento para todas as voltas necessárias para a usinagem de aproximadamente 4 mm de comprimento, obtemos os resultados apresentados na Figura 6.

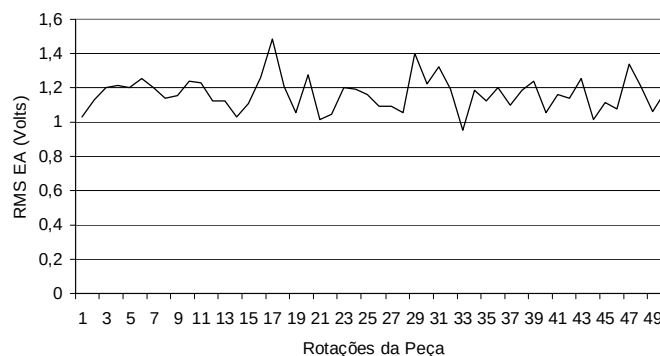


Figura 6. Sinal de EA correspondente ao trecho de medição da rugosidade.

A Figura 7 mostra o perfil de rugosidade da superfície correspondente ao ensaio A.

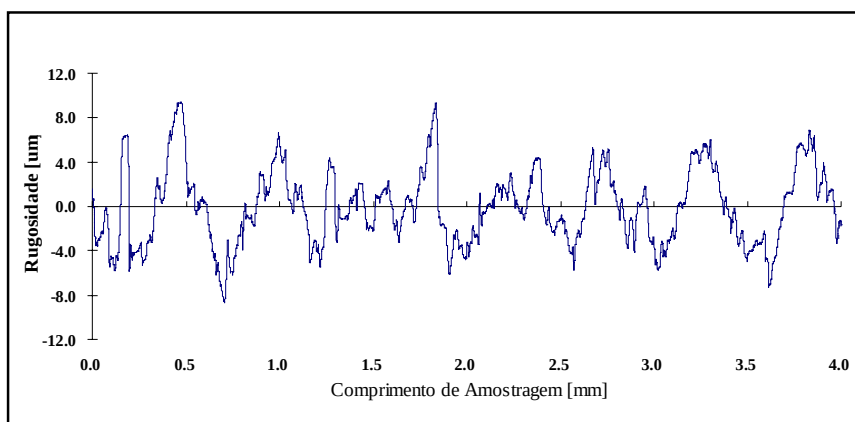


Figura 7. Perfil de rugosidade da superfície obtida no teste A_{1.1}.

A comparação entre os gráficos das figuras 6 e 7 não devem ser feitos diretamente, já que o primeiro representa 50 pontos e o segundo cerca de 8000 pontos. É necessário então utilizar um parâmetro que represente os dois gráficos e assim comparar os sinais. Para a medição do perfil da superfície usinada, existem inúmeros parâmetros que podem ser utilizados para avaliar a rugosidade. Entre eles está a rugosidade média (R_a), parâmetro mais utilizado pela sua simplicidade. No entanto, apesar de ser bastante utilizado, a rugosidade R_a não se mostra um bom parâmetro para trabalhos estatísticos, ainda mais se levando em consideração o número de pontos do sinal de EA. A curtose (R_{ku}) dos pontos que formam um sinal é um parâmetro utilizado para avaliar a rugosidade de uma superfície, porém, não é normalmente muito empregado.

Este parâmetro pode detectar se os picos do perfil estão distribuídos de forma uniforme no comprimento de amostragem. Se a distribuição da amplitude de um perfil tiver uma forma gaussiana balanceada, o valor de R_{ku} será próximo de 3. Uma superfície acidentada e áspera terá R_{ku} menor que 3, enquanto que para superfícies com muitos picos o valor será maior que 3. Uma superfície retificada, por exemplo, com um rebolo afiado, teria R_{ku} igual a 3. A curtose é portanto uma medida da aspereza da superfície. Quanto ao sinal de EA obtido, será utilizado a média dos cinco pontos obtidos e das duas repetições.

Repetindo-se o procedimento para obtenção do gráfico da Figura 6, para todos os testes da Tabela 1, e calculando-se a média para todos os gráficos de EA resultantes, obtém-se os valores mostrados na Tabela 2, assim como os valores de curtose, skewness (R_{sk}) e rugosidade média para o perfil de rugosidade das superfícies correspondentes.

Tabela 2 – Média dos conjuntos de pontos do RMS de EA e curtose da rugosidade.

Teste	Sinal EA (RMS)	Rugosidade R_{ku} (μm)	Rugosidade R_{sk} (μm)	Rugosidade R_a (μm)
A _{1.1}	1,167	-0,2624	0,2801	2,74
A _{1.2}	1,133	-0,4070	0,1099	2,15
A _{1.3}	1,166	-0,1409	-0,2486	1,62
A _{2.1}	1,185	1,9813	0,9724	5,62
A _{2.2}	1,246	0,3086	0,4679	4,40
A _{2.3}	1,355	3,0227	0,6262	3,28
B _{1.1}	1,400	0,1250	0,2601	2,38
B _{1.2}	1,727	0,6999	0,0948	1,47
B _{1.3}	2,163	7,1876	2,0529	2,86
B _{2.1}	1,241	0,0871	-0,4263	2,09
B _{2.2}	1,259	0,2653	-0,4718	2,37
B _{2.3}	0,725	0,0157	-0,4179	2,47

Utilizando os dados da tabela anterior podemos construir um gráfico representando a relação entre os dois parâmetros calculados, o que é mostrado na Figura 8.

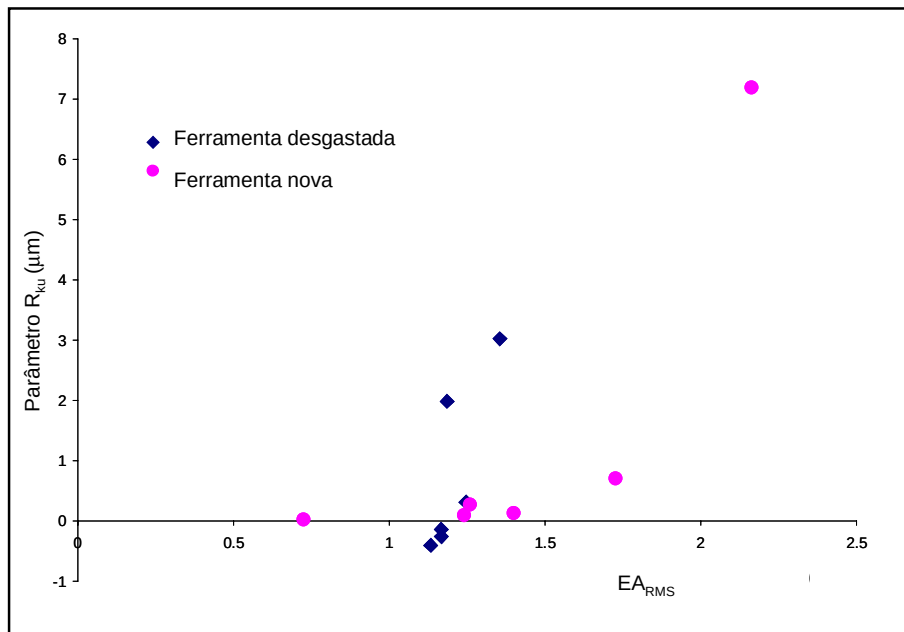


Figura 8. Relação entre a média do sinal de EA e a curtose do perfil de rugosidade.

O gráfico mostra claramente uma tendência de aumento do sinal de emissão acústica com o parâmetro R_{ku} do perfil de rugosidade da superfície usinada. O sinal de EA parece ainda ser mais sensível para valores de R_{ku} superiores a 1.

A variação do nível de emissão acústica durante a usinagem, partindo-se do princípio que nenhuma condição de corte foi variada, esta relacionada com a variação do nível de energia liberado de suas fontes. Entre essas fontes, as principais seriam: movimento de discordâncias, transformações de fase, formação de trincas e mecanismos de fricção (Liptai; Harris; Tatro, 1972). Provavelmente, durante a usinagem com as condições de corte fixas e pré-estabelecidas nos procedimentos experimentais, as três primeiras fontes de liberação de EA não se aplicam na variação do nível RMS do sinal. A última fonte citada é a que melhor se aplica a situação da variação do desgaste da pastilha com o nível do sinal.

No entanto, a relação entre rugosidade e emissão acústica deve ser muito influenciada pela relação entre desgaste de flanco e emissão acústica. Com a evolução do desgaste de flanco, que é o tipo de desgaste mais comum nas ferramentas de corte empregadas nestes experimentos, a área de contato da peça com a ferramenta aumenta fazendo com que o atrito, ou o contato da superfície de folga secundária com a superfície usinada da peça, aumente nesta região. Segundo Pigari e Diniz (1996), o nível do sinal RMS da EA aumenta substancialmente quando o fim de vida da ferramenta está próximo. Como o aumento do nível de EA, neste caso, está associado ao aumento do desgaste de flanco máximo da ferramenta, a associação com o nível de rugosidade gerado na peça também pode ser feita, já que o estado do desgaste da pastilha influencia diretamente os parâmetros de topografia de superfície.

Outro parâmetro de rugosidade que pode indicar a forma do perfil obtido é a skewness (R_{sk}), que é um parâmetro derivado da curva de distribuição de amplitude. A relação entre R_{sk} e o sinal de EA para os resultados deste trabalho é mostrado na Figura 9. Percebe-se também uma tendência de aumento do sinal de EA (da forma como calculado neste trabalho valor) com o aumento do R_{sk} . Este parâmetro é uma boa indicação da simetria do perfil de rugosidade, ou seja, pode indicar se uma superfície é dominada por picos ou vales. Este parâmetro, juntamente com R_{ku} é indicado quando é necessário distinguir a forma do perfil de rugosidade para superfícies com mesmo valor de R_a .

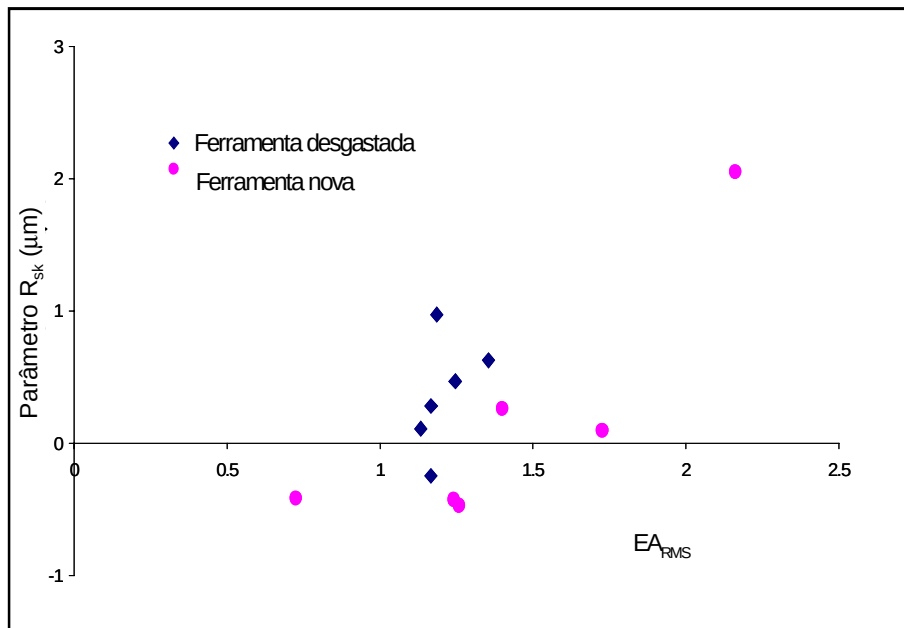


Figura 9. Relação entre a média do sinal de EA e a skewness do perfil de rugosidade.

É interessante observar que não se obtém correlação entre o sinal de EA e a rugosidade R_a (valores mostrados na Tabela 2), as rugosidades de todos os testes são valores próximos. Neste caso, a rugosidade R_a parece não ser influenciada pelos fenômenos responsáveis pelo sinal de EA (Fig. 10).

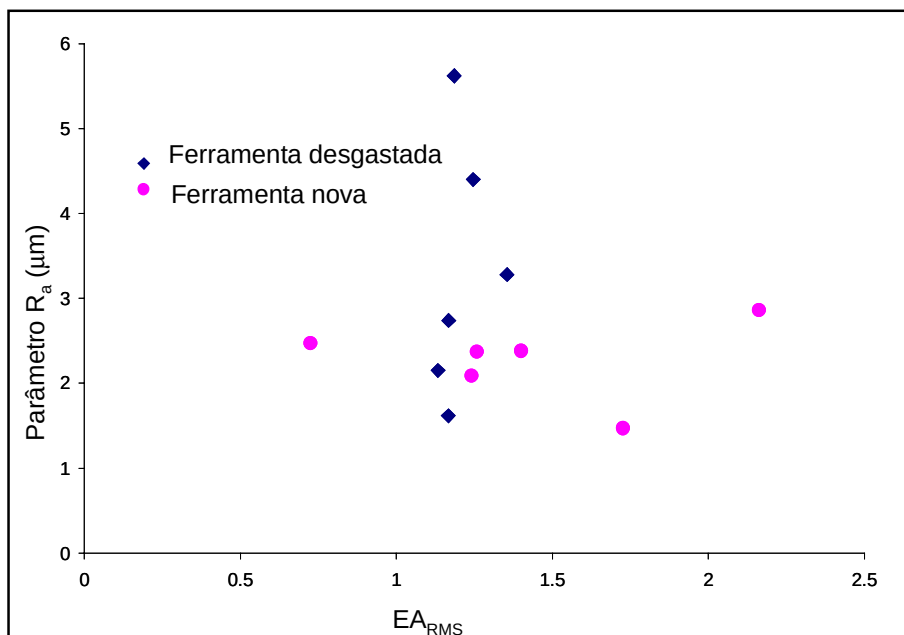


Figura 10. Parâmetro R_a x EA_{RMS} .

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões, para as condições de corte e materiais empregados neste trabalho:

1. Não houve uma relação do sinal de EA com o parâmetro de rugosidade R_a , porém percebe-se uma certa relação entre EA e os parâmetros R_{ku} e R_{sk} ;
2. A ferramenta nova apresentou uma boa correlação dos parâmetros R_{ku} e R_{sk} com o sinal EA_{RMS} . Quando os dois parâmetros crescem, o sinal de EA cresce;
3. A ferramenta desgastada não apresentou uma boa correlação dos parâmetros R_{ku} e R_{sk} com o sinal de EA_{RMS} .

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BLUM, T; INASAKI, I. A study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process. **International Journal of Engineering for Industry**, vol. 112, pp.203-211, 1990.
2. DINIZ, A.E.; LIU, J.J.; DORNFELD, D.A. Correlating Tool Life, Tool Wear and Surface Roughness by Monitoring Acoustic Emission in Finish Turning. **Wear**, vol. 152, pp. 395-407, 1992.
3. IWATA, K; MORIWAKI, T.; TAKENAKA, N. An Application of Acoustic Emission Measurement to in-Process Sensing of Tool Wear. **Annals of the CIRP**, vol. 25, pp 21-26, 1977.
4. LAN, M.S.; DORNFELD, D.A. Chip Form Detection Using Acoustic Emission. Madson: **Proceedings of 11 th NARMC**, pp. 386-389, 1983.
5. LIPTAI, R.B.; HARRIS, D.O.; TATRO, C.A. An Introduction of Acoustic Emission. **ASTM STP** 505, pp. 3-10, 1972.
6. MACHADO, A.R.; DA SILVA, M.B. Usinagem dos Metais. 8ª versão, Universidade Federal de Uberlândia, pp. 222-233, 2004.
7. NAKAYAMA, K.; SHAW, M.C.; BREWER, R.C. Relationship Between Cutting Forces, Temperature, Built-up Edge and Surface Finish. **Annals of CIRP**, vol. 14, pp.211-223, 1966.

8. PIGARI, A.C.; DINIZ, A.E. Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Torneamento Usando Emissão Acústica. **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas**, vol. XVIII, nº 3, pp. 227-238, 1996.
9. SHOUCKRY, A.S. The Effect of Cutting Conditions on Dimensional Accuracy. **Wear**, vol.80, pp.197-205, 1982.
10. XIAOLI, L. A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring During Turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 42, pp.157-165, 2002.