

O desgaste foi medido a cada cinco passadas da fresa sobre o corpo de prova. As medições do desgaste de flanco máximo foram realizadas em um microscópio ferramenteiro construído no próprio laboratório, com uma resolução de 0,01 mm.

3.1.3 Aquisição dos sinais de emissão acústica

A aquisição do sinal de emissão acústica foi realizada a partir de um sensor de EA conectado na peça e um condicionador de sinais DM 42 (com quatro canais de entrada e um canal de saída que fornece sinal RMS e outro canal de saída que fornece o sinal bruto). No condicionador de sinais foi ajustada uma constante de integração de 0,2 milissegundos para o sinal RMS gerando uma amostragem de 50 k/seg. Estes equipamentos citados foram fabricados pela Sensis. Os sinais RMS da emissão acústica adquiridos eram enviados a um bloco de conectores BNC-2110 e a seguir para uma placa de aquisição NI-DAQ PCI-6035E que possui uma taxa de amostragem de 200 kS/s ou para a placa NI-DAQmx PCI-6251M, que possui uma taxa de amostragem de 1,25 MS/s, indicada para a aquisição do sinal bruto de EA. Estes últimos equipamentos citados foram fabricados pela *National Instruments*.

O sensor de emissão acústica possui um núcleo composto por dois cristais piezoelétricos. A frequência de ressonância de cada cristal individualmente é de 1 MHz. Os sinais dos cristais são adquiridos de forma diferencial, a fim de eliminar ruídos. Posteriormente, o sinal é amplificado com ganho 200 pelo pré-amplificador que fica embutido no sensor. Dessa forma, este sensor fornece um sinal de baixa impedância e grande sensibilidade para o monitor. A faixa de frequência do sinal é de 100 kHz a 500 kHz.

A primeira fase deste trabalho foi realizada e avaliada exclusivamente com sinais RMS da emissão acústica em virtude principalmente do número mais baixo de pontos adquiridos, o que facilita o processamento e o armazenamento dos dados para os computadores. Este procedimento não influencia em uma das mais importantes informações que se buscou avaliar, que é o nível da energia do sinal (que é o próprio RMS) de emissão acústica que o processo está gerando.

Um instrumento virtual, baseado no *LabVIEW*, foi criado para que se efetuasse a aquisição, armazenamento dos pontos e montagem de um mapa de intensidade luminosa. O mapa de intensidade luminosa é construído da seguinte maneira: os pontos da aquisição de EA_{RMS} são agrupados a cada rotação completa da fresa. O sinal de emissão acústica é então transformado em um gráfico de intensidade luminosa. Os gráficos individuais, por cada volta da fresa, são então posicionados lado a lado, formando um mapa que se completa após um passe completo na peça. Um exemplo de um mapa de intensidade luminosa pode ser visto na Fig. 3.5. Para transformar o sinal de emissão acústica em gráfico de intensidade luminosa foi

utilizado um software desenvolvido no NUMA – Núcleo de Manufatura Avançada, da USP de São Carlos.

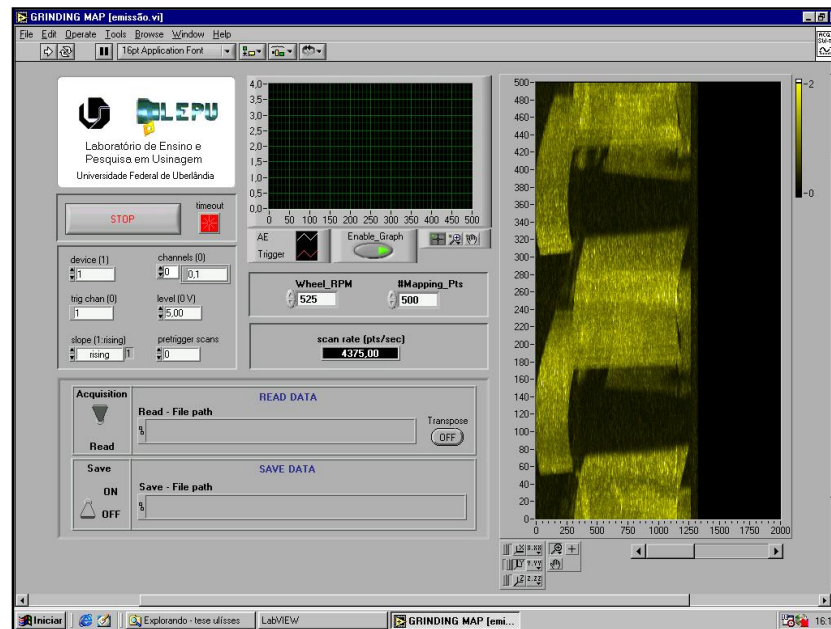


Fig. 3.5 – Exemplo do mapa de intensidade luminosa gerado a partir do sinal de EA_{RMS} representando o fresamento de uma barra com dois insertos.

Onde houver maior intensidade de EA em determinada volta (no fresamento será na fase ativa de cada pastilha), na linha correspondente a esta volta aparecerá uma região de maior luminosidade representando o aumento de intensidade do sinal de emissão acústica. As regiões de luminosidade menos intensa indicam que houve um menor nível de emissão. Se a região estiver negra, não foi adquirido nenhum sinal de EA (indicando que nesta região não ocorreu nenhuma fonte de EA, que no caso do fresamento corresponde à fase inativa ou um vazio na peça). Com a evolução do corte, o mapa vai sendo gerado e tem-se uma autêntica fotografia do que ocorreu no processo em termos da emissão acústica. Neste mapa, a abscissa corresponde ao número de voltas da ferramenta durante o tempo de aquisição e a ordenada representa o número de pontos adquiridos a cada volta. Porém, no mapa, o número de voltas será sempre ligeiramente menor ao número de voltas realizados na operação do fresamento. Este fato ocorre devido às limitações de processamento e armazenamento de dados que o computador tem, dificultando para o aplicativo montar o mapa.

Para a construção do mapa de intensidade luminosa houve a necessidade de construir um dispositivo para detectar os giros da fresa e possibilitar ao *software* separar os pontos da aquisição a cada revolução. Este dispositivo é o *trigger*, que para este trabalho, foi desenvolvido e construído nas instalações do LEPU. Este *trigger* consiste basicamente, como visto na Fig. 3.6, de uma fonte de *laser*, um fotodiodo e um anteparo reflexivo (foi usado um pequeno espelho). Com a fonte do *laser* ligada, o seu feixe será refletido quando o espelho montado no corpo da fresa passar na sua direção. Um fotodiodo posicionado em um ângulo adequado irá captar este feixe refletido. Ao captar o feixe, o fotodiodo mandará um pulso para a placa de aquisição, avisando que uma rotação se completou e outra esta sendo iniciada, criando assim o sincronismo necessário para a construção do mapa.

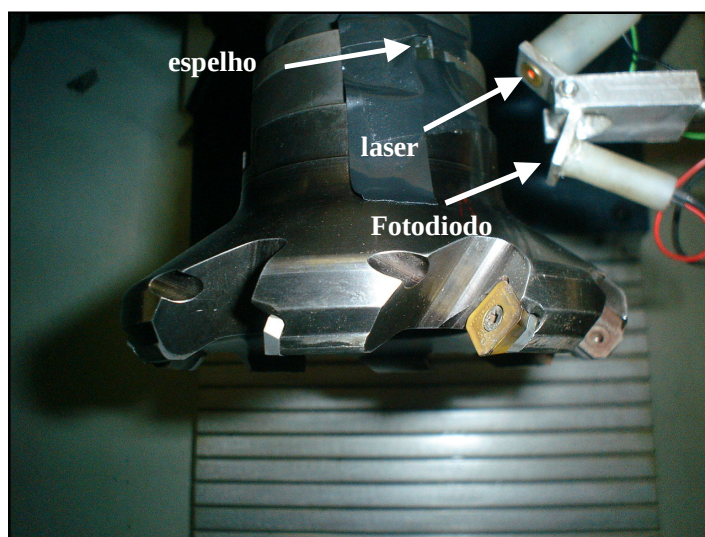


Figura 3.6 – Dispositivo (*trigger*) de sincronização de voltas para a montagem do mapa de intensidade luminosa.

A Figura 3.7 representa todo o esquema de montagem dos dispositivos para a aquisição do sinal RMS de emissão acústica.

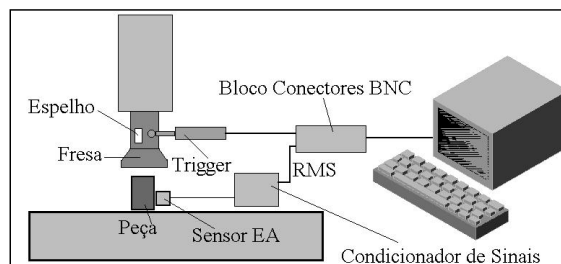


Figura 3.7 – Representação esquemática da montagem dos sistemas de aquisição de E_{Arms} .

3.2 Testes com o Sinal Bruto de Emissão Acústica

Estes testes também foram realizados na operação de fresamento. Com os resultados desta parte do trabalho foram realizadas as análises do sinal bruto de EA para fins de monitoramento da evolução do desgaste de flanco. Aqui se empregou apenas o sinal bruto de EA.

Nestes ensaios foi empregado apenas um inserto de cada vez para que não houvesse a sobreposição das informações contidas na aquisição do sinal de mais de uma aresta, que poderiam estar em diferentes estágios de desgaste. Além disto, esta sobreposição poderia conter eventuais diferenças de batimentos radiais e axiais que porventura pudessem influenciar o sinal de EA adquirido.

Os sinais adquiridos nesta parte do trabalho foram adquiridos, armazenados, tratados e avaliados como o mostrado na Fig. 3.8.

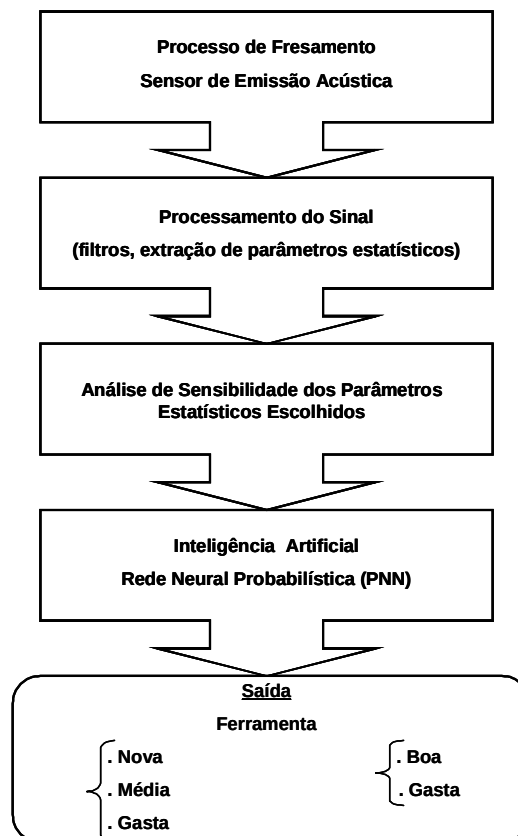


Figura 3.8 – Esquema do emprego do sinal de emissão acústica no monitoramento do desgaste.

3.2.1 Condições de corte, especificações da ferramenta e estágios de desgaste

Utilizou-se as mesmas condições de corte e ferramentas descritas na seção 3.1.2 e empregou o material (aço microligado) descrito na seção 3.1.1. Porém, foram estabelecidos estágios de desgaste com a finalidade de observar como o sinal de emissão acústica se apresenta em cada uma delas. Estes estágios foram criados levando-se em consideração a experiência adquirida em ensaios preliminares em relação à evolução do desgaste dos insertos empregados usinando o aço microligado.

A Tabela 3.4 apresenta os estágios de desgaste utilizadas neste trabalho. Para simplificar e reduzir espaços dentro de tabelas e figuras, as ferramentas sem nenhum desgaste anterior, as com desgaste intermediário e as com desgaste elevado serão nomeadas respectivamente de: nova, média e gasta.

Tabela 3.4 – Valores de desgaste da ferramenta em que foram realizadas aquisições de EA.

Estágios do desgaste (1º situação)	valor de $VB_{Bmáx}$
Nova	0 (primeira passada)
Média	entre 0,20 e 0,30 mm
Gasta	acima de 0,40 mm
Estágios de desgaste (2º situação)	valor de $VB_{Bmáx}$
Boa	entre 0 e 0,30 mm
Gasta	acima de 0,40 mm

A segunda situação apresentada na tabela é apenas uma fusão dos dois primeiros estágios, nos quais o sinal de emissão acústica foi adquirido para apenas dois estágios de desgaste das ferramentas, ferramenta boa ou gasta. O critério de final de vida estabelecido foi de 1,00 mm de $VB_{Bmáx}$, valor habitualmente empregado para ferramentas de metal duro (Norma ISO 8688-1 1989) ou a ocorrência de uma falha catastrófica.

Ao final de cinco passadas, a fresa era retirada do centro de usinagem e efetuado as medições de $VB_{Bmáx}$. No momento que o desgaste atingia uma das faixas descritas na tabela anterior, era realizada uma aquisição de EA durante a primeira passada do novo ciclo. A Figura 3.9 apresenta resumidamente como foram realizados os ensaios deste trabalho.

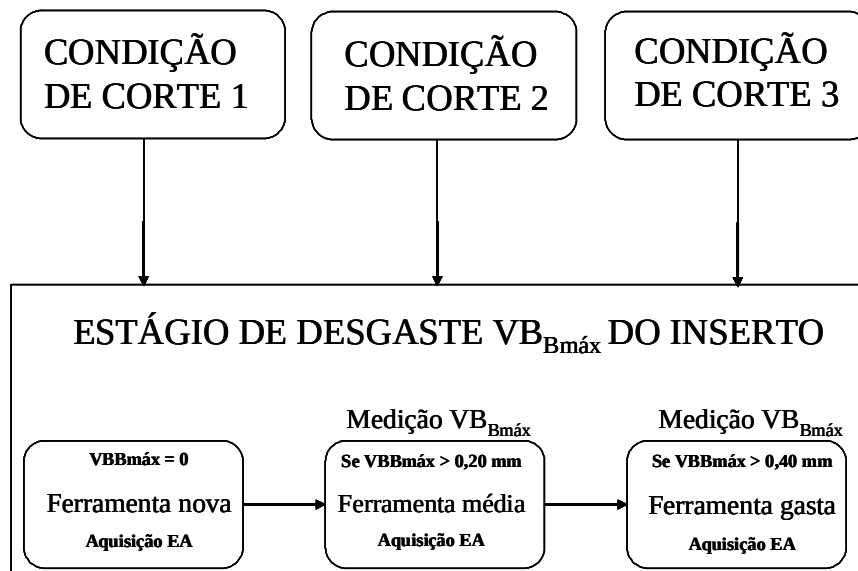


Figura 3.9 – Representação esquemática da metodologia do trabalho.

3.2.2 Processamento do sinal

A taxa de aquisição para o sinal bruto foi empregada observando-se a literatura existente, já citada na revisão de emissão acústica (capítulo 2 – Revisão Bibliográfica), de que a faixa dentro das frequências de 50 kHz até 500 kHz representa bem os fenômenos presentes na usinagem convencional. Portanto, a taxa empregada na aquisição do sinal bruto foi de 1 MHz. Durante a aquisição, os parâmetros empregados no condicionador foram: filtro passa-alta de 50 kHz, ganho de entrada de 1 unidade e ganho de sinal de 5 unidades. Estes parâmetros não foram mudados ao longo dos experimentos.

A Figura 3.10 mostra a interface do instrumento virtual empregado para a aquisição do sinal bruto. Este instrumento foi empregado principalmente para armazenar os dados, mas também gerava uma visualização gráfica do sinal que estava sendo adquirido.

Nesta etapa também optou-se por posicionar o sensor na própria peça já que, na literatura a respeito deste tema (capítulo 2 - revisão bibliográfica), afirma que a atenuação do sinal devido sua localização em relação à distância da região de corte seria insignificante (Fig. 3.11).

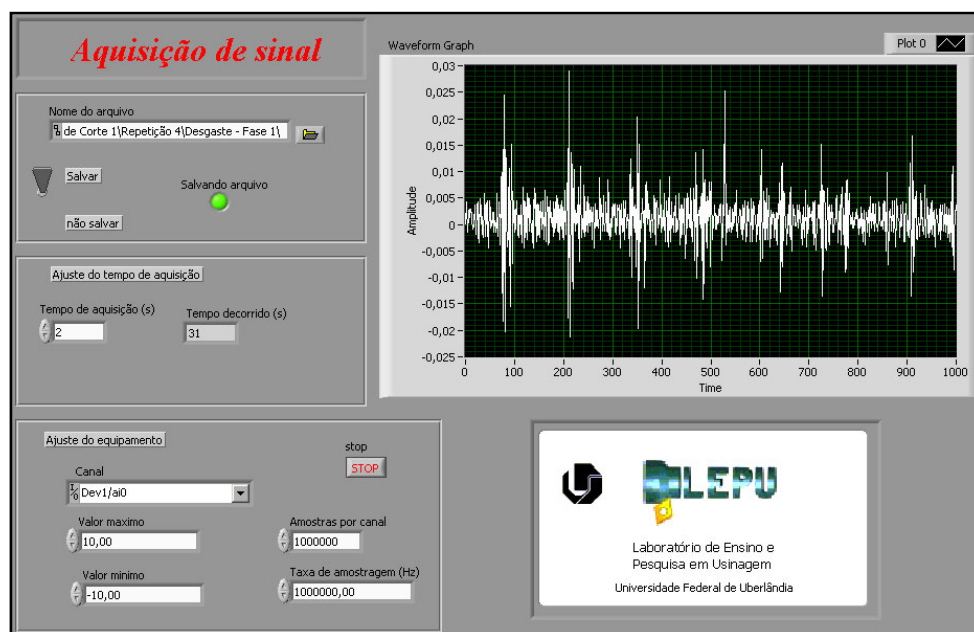


Figura 3.10 – Instrumento virtual para aquisição do sinal bruto de emissão acústica.

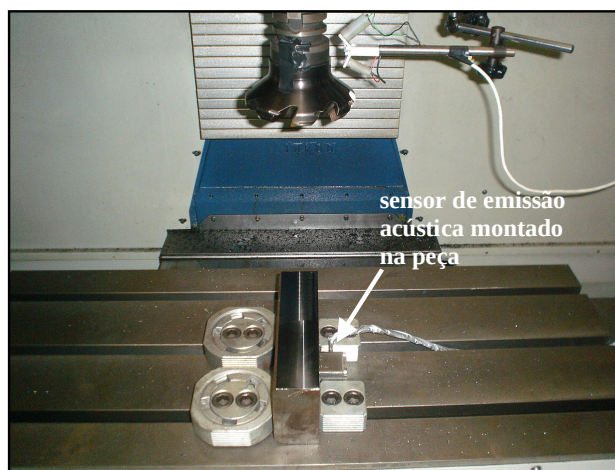


Figura 3.11 – Posicionamento do sensor de EA na peça.

Para a interface do sensor com a superfície da peça, foi usado vaselina como fluido acoplante, baseado em trabalho de Beattie (1983), que afirma que uma película de um fluido colocada entre o sensor e a superfície da peça é capaz de aumentar e melhorar o sinal.

Cada aquisição foi realizada por dois segundos. Este tempo de aquisição foi empregado em virtude da taxa de aquisição utilizada e do número de pontos máximo que podiam ser armazenados por arquivo. O aplicativo que suportava o maior número de pontos era o bloco de notas (dois milhões de pontos) gerando, portanto, arquivos com dois milhões de pontos da

aquisição de EA. Devido esta limitação, a aquisição foi realizada durante três etapas durante cada passada da fresa. A região de aquisição na peça foi dividida em três partes, uma parte (1) na entrada da fresa no corte, uma parte (2) onde a fresa passa aproximadamente pelo meio da peça e uma última parte (3) nas proximidades da saída da fresa da peça, como mostrado na Fig. 3.12. Em cada uma das partes, foi realizada uma aquisição. Este procedimento foi adotado com o objetivo de aumentar a representatividade da aquisição, visto que uma passada completa pela peça, dependendo da velocidade de avanço, demorava mais de 3 minutos e cada aquisição apenas 2 segundos.

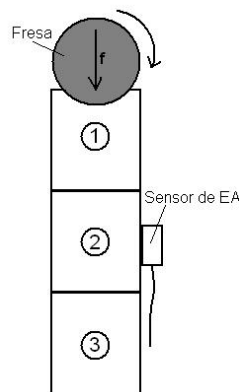


Figura 3.12 – Esquema de aquisição em etapas durante a usinagem.

Posteriormente, os arquivos com as aquisições foram avaliados com o objetivo de observar se a adoção deste procedimento trouxe resultados adequados. O método da avaliação será apresentado na seção 3.2.3 e os resultados no capítulo de resultados e discussão.

Para extrair informações do sinal bruto de emissão acústica, foi necessário retirar deste sinal alguns parâmetros estatísticos para posterior análise de sua sensibilidade à evolução do desgaste de flanco. A princípio, cinco parâmetros foram selecionados:

- . Curtose;
- . *Skewness*;
- . RMS;
- . Pico;
- . Fator de crista.

Os três primeiros parâmetros foram descritos no capítulo 2 (Revisão Bibliográfica). O valor de pico indica níveis máximos de sinais transientes da amostra. O parâmetro fator de crista é a razão entre o valor do pico e o valor RMS desta amostra.

Em seguida, com a finalidade de ampliar os parâmetros a serem avaliados a um valor significativo, quatro bandas de frequência foram retiradas do espectro de potência de cada estágio de desgaste dentro de cada condição de corte. A retirada destas quatro bandas ampliou o número de parâmetros a serem analisados, porém até um valor que não aumentasse desnecessariamente a quantidade de avaliações. Os espectros foram obtidos com 1024 pontos e uma resolução de 976 Hz. Uma descrição mais detalhada e as representações gráficas deste procedimento serão mostradas no capítulo dos resultados e discussões. De cada uma dessas quatro bandas de frequência foi retirado o valor do parâmetro RMS. Com isto, criaram-se mais quatro parâmetros a serem avaliados:

- . Banda 1 – (120 a 170 kHz);
- . Banda 2 – (190 a 240 kHz);
- . Banda 3 – (260 a 300 kHz);
- . Banda 4 – (120 a 300 kHz).

Souto et al. (2006) correlacionaram o sinal bruto de EA diretamente com o parâmetro desgaste com objetivo de encontrar bandas de frequências. Para isso, os autores buscaram, dentro do espectro de frequências, bandas onde as três condições de corte (as mesmas utilizadas neste trabalho) possuíam simultaneamente os melhores coeficientes de correlação entre os dois parâmetros. Dentro destas bandas selecionadas, foram montados os gráficos das magnitudes normalizadas (dB) versus os estágios de desgaste da ferramenta. Com isto foi possível observar o comportamento do nível de energia do sinal com a evolução do desgaste.

Estabelecidos todos os parâmetros que representarão o sinal de EA, aplicou-se cada um deles para os sinais de cada estágio de desgaste de cada uma das condições de corte estabelecidas.

Foram realizadas o máximo de repetições possíveis para cada um dos ensaios com a finalidade de aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos. Em função da limitação de material disponível (cada aresta consumia enorme quantidade de material e de tempo até atingir o critério de final de vida), o número de repetições realizadas foi dezesseis. Deste total, doze repetições foram empregadas para o treinamento da rede neural. As outras quatro repetições foram empregadas na validação do treinamento da rede.

3.2.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros estimados

Com o resultado da aplicação dos parâmetros aos sinais, partiu-se para a verificação da capacidade de cada um destes parâmetros de diferenciar o estágio de desgaste dentro de cada condição de corte. O resultado que interessa neste caso é que, um conjunto de resultados de um dado parâmetro para um dado estágio de desgaste seja diferente de um conjunto de resultados de um mesmo parâmetro de um outro estágio de desgaste. Com isto, é possível o emprego, posteriormente, destes parâmetros escolhidos em uma ferramenta que reconheça a condição de desgaste de ferramenta.

Para a verificação da diferença de um conjunto de resultados de um parâmetro dentro de um estágio de desgaste para a mesmo conjunto dentro de outro estágio, foi empregado uma ferramenta estatística presente no *software* Matlab®, o “boxplot”. A Figura 3.13 representa um modelo do *boxplot*.

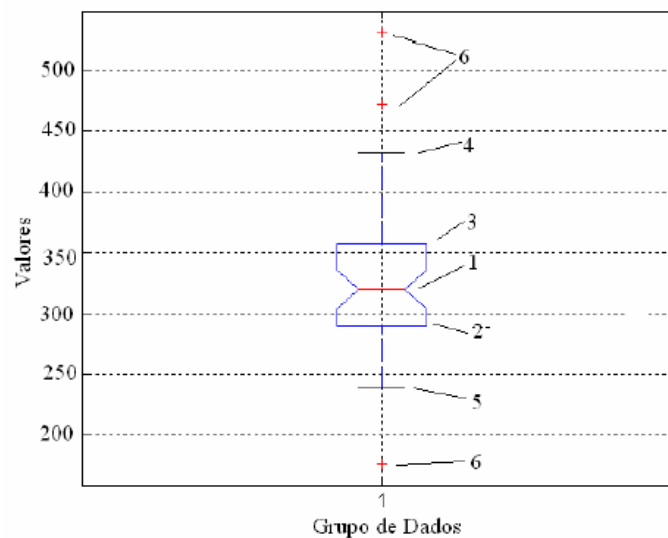


Figura 3.13 – Representação de um modelo de *boxplot* e dos seus componentes (Meola, 2005).

O *boxplot*, conhecido também como diagrama de caixas e bigodes, é uma valiosa ferramenta que condensa em um gráfico um grande número de informações a respeito da distribuição do conjunto de dados, como mostrados a seguir:

- . A linha 1 vermelha representa a mediana;
- . A linha 2 representa o primeiro quartil (indica que 25% dos dados estão abaixo desta linha);
- . A linha 3 representa o terceiro quartil (indica que 75% dos dados estão abaixo desta linha);

- . A linha 4 representa o bigode superior referente ao valor máximo de dados que é menor que o terceiro quartil mais uma constante (normalmente 1,5) vezes o comprimento do interquartil (valor da linha 3 menos o valor da linha 2);
- . A linha 5 representa o bigode inferior referente ao valor mínimo de dados que é maior que o primeiro quartil menos uma constante vezes o comprimento do interquartil;
- . Estas cruzes vermelhas (6) representam os valores de dados que estão fora dos limites dos bigodes.

Também pode-se observar desta ferramenta algumas interessantes informações estatísticas (Meola, 2005):

- . Em casos em que o grupo de dados tem grandes dispersões, como no caso da EA, a mediana é mais útil para análise que a média pois a primeira é menos sensível a valores extremos.
- . O nível de achatamento da distribuição pode ser avaliado pela distância das linhas do primeiro e do terceiro quartil até a mediana.
- . A assimetria da distribuição pode ser avaliada pela diferença entre o comprimento das caixas superior e inferior.
- . A distancia entre a mediana e os bigodes é um bom indicativo das “excursões fora da média” do grupo de dados.
- . As cruzes estão normalmente associadas a problemas na aquisição de dados.

Através da aplicação desta ferramenta, foi possível visualizar o quanto cada parâmetro, representando um estágio de desgaste de flanco, é diferente do mesmo parâmetro representando outro estágio de desgaste dentro da mesma condição de corte. Quanto maior a diferença do parâmetro para cada estágio de desgaste, melhor ele será para o reconhecimento da condição da ferramenta. Os parâmetros escolhidos serão utilizados posteriormente como será mostrado na seção 3.2.4. A Figura 3.14 mostra exemplo de um *boxplot* utilizado neste trabalho. Através deles foi possível definir o quanto cada parâmetro empregado se diferencia em cada estágio do desgaste.

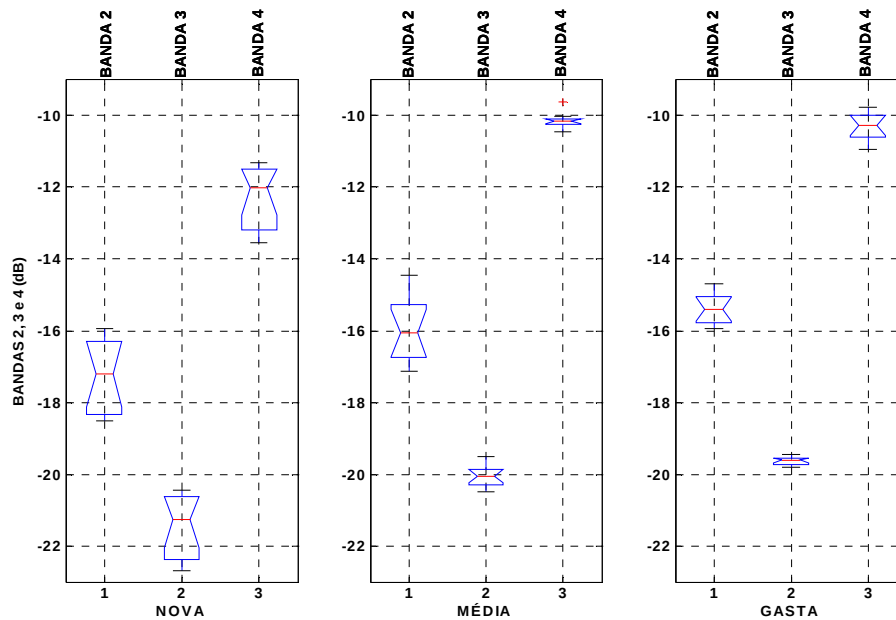


Figura 3.14 – Exemplo de *boxplot* com alguns dos parâmetros utilizados neste trabalho.

A figura anterior mostra exemplos dos critérios adotados na verificação da capacidade de diferenciação dos estágios de desgaste de cada parâmetro. Em situações em que a diferenças entre os sinais foram mais claras, os bigodes superior e inferior para cada estágio de desgaste tem pouca ou nenhuma sobreposição de valores uns com os outros. O parâmetro Banda 3 representa bem esta situação. Para os casos em que a diferenciação por bigodes não foi clara, foi utilizada a mediana como recurso para a escolha de parâmetros (Banda 2). Em outras situações, o parâmetro foi excluído porque não conseguiu diferenciar bem o estado da ferramenta por nenhum dos critérios citados acima (Banda 4).

Nesta etapa de análise do sinal também foi avaliada a metodologia empregada na aquisição do sinal de EA, que separou a peça em três partes distintas e em cada uma foi realizada uma aquisição. Esta avaliação foi executada pois havia interesse em saber se o posicionamento relativo entre o sensor e a fresa, que era móvel, afetaria ou não o sinal. Nesta avaliação foi empregado o Teste de Hipótese na verificação dos conjuntos de dados. O dados de entrada do teste foram os nove parâmetros estatísticos calculados a partir do sinal de cada uma das etapas de aquisição anteriormente mencionados.

Para o cálculo do Teste de Hipótese, tem-se que t_0 , dado pela Eq. 3.1, é uma distribuição t de Student com o número de graus de liberdade calculado pela Eq. 3.2.

$$t_0 = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (3.1)$$

$$v = \frac{\left[\left(\frac{s_1^2}{n_1} \right) + \left(\frac{s_2^2}{n_2} \right) \right]^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} \right)^2}{n_1 + 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{n_2 + 1}} - 2 \quad (3.2)$$

Onde:

- . $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as estimativas das médias dos grupos 1 e 2, respectivamente;
- . s_1^2 e s_2^2 são as estimativas das variâncias dos grupos 1 e 2, respectivamente;
- . n_1 e n_2 são os números de dados dos grupos 1 e 2, respectivamente.

Considerando como hipótese nula que as médias dos dois grupos sejam iguais e com hipótese alternativa que as médias dos grupos sejam diferentes. Para um nível de significância α_t alto de 95% para o Teste de Hipótese, se o valor calculado de t_0 for maior que o de t_α , então $t_0 / t_\alpha > 1$, a hipótese nula é rejeitada e conclui-se que as duas médias pertencem a grupos estatísticos distintos. Caso contrário, se t_0 for menor que t_α , então $t_0 / t_\alpha < 1$, a hipótese nula é aceita e conclui-se que as duas médias pertencem ao mesmo grupo estatístico.

No caso da verificação da influência no sinal do procedimento de dividir a aquisição em três partes, é esperado que o teste mostre que os grupos estatísticos que representem cada uma das partes não sofreram nenhum tipo de influência de posicionamento, ou seja, as três aquisições representam o mesmo grupo estatístico. Portanto, a aquisição não sofreu nenhuma influência do posicionamento se o resultado do teste for menor que 1.

As comparações para este teste foram realizadas duas a duas. Portanto, o grupo 1, que representa os parâmetros estatísticos retirados da aquisição na parte 1, foi comparado com o grupo 2, retirado da parte 2. Em seguida, o grupo 1 foi comparado com o grupo 3. E, finalmente, o grupo 2 foi comparado ao grupo 3, tendo-se assim calculadas todas as combinações possíveis.

3.2.4. Aplicação de inteligência artificial (RNA)

Neste trabalho empregou-se uma rede neural artificial com a finalidade de avaliar a capacidade do sinal de emissão acústica e da metodologia utilizada como uma ferramenta para o reconhecimento das classes (estágios de desgaste de flanco máximo do inserto). O modelo de classificação empregado foi do tipo Rede Neural Probabilística (PNN). Esta rede foi desenvolvida por Master (1993) em um *software* C++ e adaptada por um grupo de professores da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU (FEMEC). Os valores de entrada desta rede (*input*) são os parâmetros estatísticos que foram previamente escolhidos (seção 3.2.3) para representar cada estágio de desgaste em cada condição de corte. Primeiro foram usados as doze repetições de treinamento, em seguida as quatro repetições reservadas para a validação dos resultados. Durante o treinamento, cada um dos conjuntos de parâmetros é que será responsável pelos cálculos que irão definir suas respectivas classes na saída da rede.

Como a PNN é uma rede de aprendizado supervisionado, durante o treinamento foi fornecido a qual classe pertencia os dados fornecidos a ela (se pertencia ao conjunto de dados referentes a uma ferramenta sem desgaste, com desgaste intermediário ou altamente desgastada).

Quando houve o reconhecimento do desgaste através de duas classes (boa ou gasta), os parâmetros da classe nova e da classe média foram empregados juntos para representar a nova classe (boa).

Quando houve o reconhecimento do desgaste independentemente da condição de corte, os parâmetros que representam certo estágio de desgaste em determinada condição de corte foram somados com os parâmetros que representam o mesmo estágio de desgaste das outras duas condições de corte.

3.2.5 Saída da rede

Na classificação, são empregados os dados de validação e estes são desconhecidos da rede. Os valores de saída (*output*) da PNN aparecem em termos da probabilidade de cada novo conjunto de dados fornecidos à rede pertencer a cada uma das classes definidas na seção anterior.

Duas formas de saída da rede foram utilizadas: Na primeira, a rede classificou três estágios de desgaste (ferramenta nova, ferramenta com desgaste intermediário e ferramenta desgastada). Na segunda, apenas duas classes representavam o estágio do desgaste (ferramenta boa ou ferramenta desgastada).

Capítulo IV

Resultados e Discussões

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos empregando-se os procedimentos experimentais descritos no capítulo III. Além disto, serão realizadas discussões item por item dos resultados apresentados.

4.1 – Resultados Obtidos nos Testes com Sinal RMS da Emissão Acústica

Os resultados de testes com o sinal de EA_{RMS} , em que se buscou também uma melhor compreensão dos equipamentos de aquisição e observar as potencialidades da emissão acústica na usinagem, apresentaram interessantes imagens geradas pelo mapa de intensidade luminosa.

4.1.1 Fresamento com quatro insertos

A Figura 4.1 mostra o mapa de intensidade luminosa de uma fresa montada com quatro insertos. Para este ensaio, foram utilizadas três insertos novos, sem nenhum tipo de desgaste e um inserto com desgaste de flanco em torno de 0,31 mm. Como o processo foi o fresamento frontal em uma barra de 400 mm de comprimento e 50 mm de largura, não havia a possibilidade de haver dois insertos simultaneamente no corte.

No mapa, cada região em que a intensidade luminosa é maior, corresponde a fase ativa de cada uma das insertos, representadas pelos números 1, 2, 3 e 4. O inserto número 2 é o que apresentava desgaste de flanco preliminar. Observa-se no mapa que o inserto 2 gera uma intensidade luminosa menor. Como a intensidade luminosa é diretamente proporcional ao nível de energia emitido, o desgaste de flanco diminui a profundidade de corte deste inserto e diminui a geração de emissão acústica, o que está em acordo com a literatura existente.

Outro aspecto interessante observado nesta figura é uma região de maior intensidade luminosa, que é representada pelo círculo, que está fora da fase ativa dos insertos. Isto acontece em virtude dos insertos possuírem aresta alisadora que, ao passarem pela superfície já usinada, durante a fase inativa, raspam e causam deformações plásticas e elásticas nestas superfícies. Estas deformações são uma das fontes de emissão acústica na usinagem. Os

insertos 1 e 3 estão montados diametralmente opostos na fresa, assim como os insertos 2 e 4. Assim, como esta região de intensidade luminosa aparece próxima da fase ativa do inserto 1, significa que esta região está a 180° deste inserto, representando portanto, o alisamento efetuado pelo inserto 3 durante sua fase inativa.

Todos os insertos deveriam produzir uma região similar na fase inativa, porém, estas não estão bem claras na figura devido ao batimento axial. O inserto 3 estava montado cerca de 0,03 mm abaixo do nível dos outros. Com isto, sua profundidade de corte estava ligeiramente superior às outras, impedindo-os de alisarem a superfície com a mesma intensidade durante suas respectivas fases inativas. Este fato também pode ser observado pelo sinal do inserto 3 na sua fase ativa, que é ligeiramente mais claro que o das outros insertos devido ao maior nível de geração de energia.

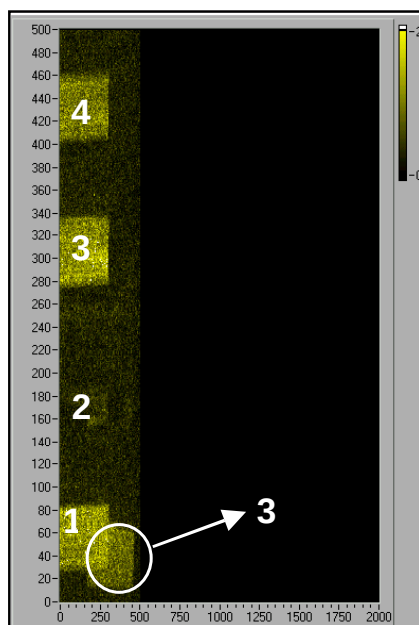


Figura 4.1 – Mapa de intensidade luminosa de uma fresa frontal com quatro insertos.

4.1.2 Fresamento com oito insertos

Os mesmos procedimentos descritos no ensaio anterior foram realizados para uma fresa frontal com oito insertos montados. Os insertos são idênticos aos anteriores. Na Figura 4.2 pode-se identificar os mesmos fatos vistos no mapa da fresa com quatro insertos. Aqui se observa claramente a fase ativa de cada um dos oito insertos. Este mapa também mostra as fases inativas, que no caso destes insertos também tem um trecho em que estão alisando a superfície. Como aparece apenas o alisamento executado pelos insertos 4, 6 e 7, conclui-se que estes possuem batimento axial mais acentuado em relação aos outros.

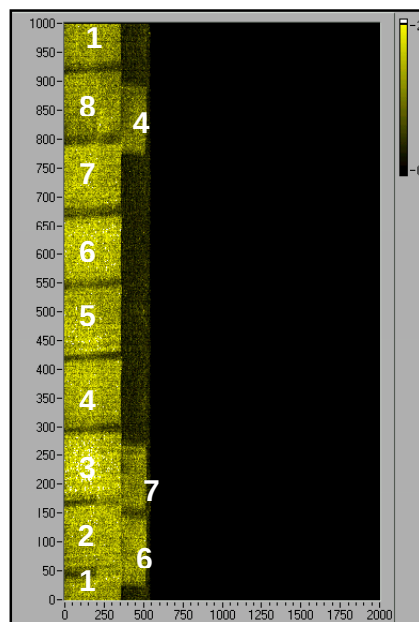


Figura 4.2 – Mapa de intensidade luminosa de uma fresa frontal com oito insertos.

Um eventual erro de batimento radial não apresentaria qualquer influência no sinal durante o alisamento. Este erro pode ser visto apenas no ciclo ativo, com o aumento da intensidade da luminosidade referente a este inserto no mapa devido ao aumento da geração de energia causado pelo aumento da espessura do cavaco, considerando que todas ferramentas possuam o mesmo nível de desgaste.

4.1.3 Fresamento com dois insertos e mudança de direção de avanço

O comportamento visual da mudança de direção de avanço pode ser visto nas Figs. 4.3a e b, onde uma reta vertical separa as duas regiões. A diferença de espessura também é possível de ser visualizada no mapa, pois a região do ciclo ativo dos dois insertos (1 e 2) na ordenada é maior que nas figuras anteriores.

O inserto 1, após a mudança de direção do avanço, teve sua representação no mapa partida em duas partes. Isto ocorre devido ao posicionamento do *trigger*. O ajuste deste foi idealizado para não dividir o sinal da fase ativa dos insertos dentro de mapa de intensidade durante a primeira direção de avanço. Após a mudança de direção, este ajuste acabou sendo alterado. Com isto, durante a fase ativa do inserto 1, o sinal do *trigger*, que avisa o final de uma rotação e o começo de outra, era dado e iniciava-se a construção de uma nova coluna. Portanto, parte do sinal representando o ciclo ativo deste inserto era transferido para o início da outra coluna que representa a próxima rotação.

Nestas duas figuras, pode-se observar o comportamento da utilização de dois inserts em estágios diferentes de desgaste. Na Figura 4.3a, foi empregado um inserto novo (1) e o outro (2) com $VB_{Bm\acute{a}x}$ de 0,30 mm. Na Figura 4.3b, um era novo (1) e o outro (2) apresentava um $VB_{Bm\acute{a}x}$ de 0,31 mm. Na segunda figura, a peça usinada apresentava uma pequena deformação (devido a algum problema de fabricação) em baixo relevo em sua superfície. Pode-se observar esta deformação através da mancha escura na região do inserto 1 (seta). Esta mancha apareceu apenas no inserto 1 pois este apresentava uma combinação de desgaste e de diferença no batimento axial. Com isto, tinha sua penetração na peça reduzida e sua aresta não tocava em nada ao passar por essa região. Ao contrário do inserto 2 que, por ser novo e não apresentar nenhum desgaste, tinha altura suficiente para penetrar abaixo do ponto mais profundo deste defeito.

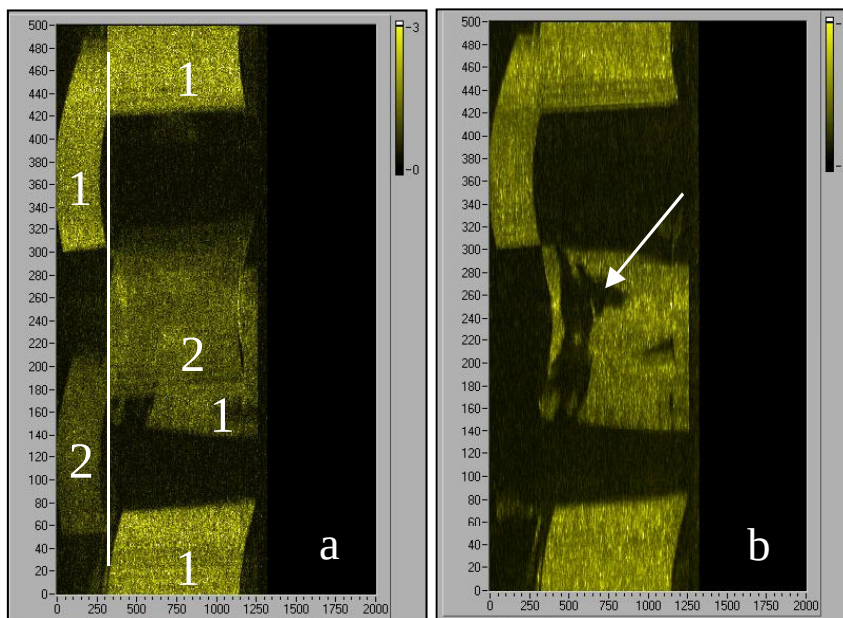


Figura 4.3 – Mapa de intensidade luminosa de uma fresa frontal com dois inserts. (a) visualização dos inserts 1 e 2 e mudança de direção de avanço da fresa; (b) visualização de um defeito na peça (em baixo relevo) através do inserto com maior desgaste.

4.1.4 Reprodução do fresamento de um bloco de motor

A emissão acústica, através do mapa de intensidade luminosa, também se revelou útil na reprodução da superfície que está sendo usinada e alguns fenômenos que ocorrem durante a usinagem. A Figura 4.4 mostra uma superfície de um bloco de motor de ferro fundido cinzento com quatro cilindros. A usinagem foi realizada com apenas um inserto montado em