

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A função manutenção vem, atualmente, respondendo por uma significativa alocação de recursos dentro das empresas, sendo que, a contribuição que a manutenção preditiva tem dado à indústria, caracteriza-se pela identificação de problemas, enquanto ainda pequenos, evitando-se:

- Danos catastróficos, caso o defeito cresça em gravidade e extensão;
- Paradas desnecessárias e atrasos na produção industrial;
- Aquisição de peças com maior custo;
- Redução da vida útil dos equipamentos.

A manutenção preditiva é a maneira mais eficaz e econômica de se fazer a manutenção e o controle dos equipamentos. Ela permite acompanhar, diariamente, a situação da máquina. A intervenção é programada para cada máquina, considerando a sua “condição” em particular. Assim, percebe-se que máquinas exatamente iguais podem ter paradas programadas, com intervalos de tempos diferentes [1].

Portanto, o objetivo da manutenção preditiva é prevenir falhas ou defeitos, avaliar o estado real dos diversos componentes de uma máquina, monitorar parâmetros de seu funcionamento e, por consequência, *monitorar a condição global do equipamento*. Com isso, têm-se os seguintes benefícios: o conhecimento do estado real do equipamento, o aumento da sua confiabilidade, a possibilidade de planejar os serviços de manutenção, a diminuição de paradas inesperadas, o aumento da disponibilidade do equipamento e a diminuição de danos maiores ao equipamento, às pessoas e ao meio ambiente [1, 17].

O desperdício pode chegar a zero, dependendo da complexidade do sistema de manutenção/acompanhamento implantado, pois as peças são substituídas quando é realmente necessário, sem gerar paradas inesperadas.

As informações obtidas, através da manutenção preditiva, fornecem subsídios para análise da causa da falha e criação de mecanismos para que a mesma não se repita de maneira descontrolada, ou mesmo deixe de ocorrer.

As principais técnicas de manutenção preditiva englobam as seguintes modalidades mais usuais de ensaios não destrutivos, conforme a seguir [2]:

- **Correntes Parasitas:** o campo magnético gerado por uma bobina, alimentada com corrente alternada, produz correntes induzidas (correntes parasitas) na peça. Tais correntes afetam a impedância da bobina que as gerou. A presença de qualquer descontinuidade no caminho das correntes parasitas causa variações tanto na intensidade quanto no fluxo, que por sua vez influem na impedância da bobina. A flutuação do sinal correspondente é um indicativo de uma possível descontinuidade.
- **Radiografia:** o método está baseado na mudança de atenuação da radiação eletromagnética (raios-X ou Gama), causada pela presença de descontinuidades quando a radiação passar pelo material.
- **Ensaio Visual:** o ensaio é baseado no uso da luz como um detector. Analisando-se a direção, amplitude e fase da luz difundida ou refletida pela superfície de um objeto opaco, ou transmitida por um meio transparente, obtêm-se as informações sobre o estado físico do objeto examinado.
- **Estanqueidade:** quando uma descontinuidade passante estiver presente numa parede separando dois meios que estejam com pressões diferentes, o fluido que estiver mais pressurizado passará para o meio menos pressurizado, a um determinado fluxo que será proporcional a sua velocidade. Em alguns casos a turbulência gerada no ponto do fluxo gera um ruído de faixa larga.
- **Líquidos Penetrantes:** este método é baseado no fenômeno da ação capilar que é a tendência de um líquido em entrar num tubo capilar e nas propriedades físicas do líquido, tais como viscosidade e tensão superficial. O poder de penetração é uma característica bastante importante uma vez que a sensibilidade do ensaio é enormemente dependente do mesmo.

- **Métodos Fotográficos Especiais:** estes métodos baseiam-se na irradiação de uma superfície com luz infravermelha (IV) ou ultravioleta (UV), quando ocorrem fenômenos tais como reflexão, absorção e transmissão, os quais não são detectáveis visualmente. Esses fenômenos, que dependem das condições superficiais da peça, podem ser registrados e fotografados para avaliação.
- **Partículas Magnéticas:** o método baseia-se nos desvios das linhas do fluxo magnético induzido no material, causados pela presença de descontinuidades.
- **Termografia:** o princípio da termografia é a medida da distribuição de temperatura superficial do objeto de interesse quando este estiver sujeito a tensões térmicas (normalmente calor).
- **Ultra-Som:** o ensaio ultra-sônico baseia-se no fenômeno de reflexão de ondas acústicas quando encontram obstáculos à sua propagação, dentro do material.
- **Vibração:** o ensaio baseia-se em avaliar o comportamento dinâmico dos equipamentos rotativos, onde a variação na intensidade das vibrações do sistema pode causar picos de amplitude com intensidade que excedem o nível de ruído normal do sistema.
- **Emissão Acústica:** o método é baseado na detecção de ondas acústicas emitidas por um material em função de uma força ou deformação nele aplicada. Caso este material tenha uma trinca, descontinuidade ou defeito, sua propagação irá provocar ondas acústicas detectadas pelo sistema. Os resultados do ensaio por emissão acústica não são convencionais. Este método não deve ser utilizado para determinar o tipo ou tamanho das descontinuidades em uma estrutura, mas sim para registrar e avaliar a evolução das descontinuidades durante a aplicação de tensões às quais a estrutura está sujeita, desde que as cargas sejam suficientes para gerar deformações localizadas, crescimento do defeito, destacamento de escória, fricção, ou outros fenômenos físicos.

Dentre os ensaios mencionados, destaca-se o ensaio não destrutivo por emissão acústica, cujos benefícios são: a redução dos custos de manutenção e a garantia da

integridade de um equipamento ou parte dele, através da avaliação dinâmica da propagação de uma onda de tensão dentro do material [31, 32].

### 3.1

#### O Ensaio de Emissão Acústica

A emissão acústica (EA) é um fenômeno que ocorre quando uma descontinuidade é submetida a uma solicitação térmica ou mecânica. Uma área portadora de defeitos é uma área de concentração de tensões que, uma vez estimulada, origina uma redistribuição de tensões localizadas. Este mecanismo ocorre com a liberação rápida de ondas de tensão mecânica, localizadas internamente no material, na forma de ondas mecânicas transientes. Estas ondas de tensão podem também ser produzidas por materiais tensionados [13, 23, 30, 32, 33].

A técnica consiste em captar esta perturbação no meio, através de transdutores piezelétricos instalados de forma estacionária sobre a estrutura. Estes receptores passivos, estimulados pelas ondas mecânicas transientes, transformam a energia mecânica em elétrica, sendo os sinais digitalizados e arquivados para análise através de parâmetros representativos [23, 33]. O ensaio é global, e pode ser realizado nas condições de serviço através de um incremento entre 5% a 10% acima da máxima condição de operação, ou durante provas de carga, como, por exemplo, testes de pressão [9, 33].

O princípio básico do ensaio de emissão acústica é mostrado na Figura 3.1. Aplica-se um estímulo estrutural em um material ou estrutura, de forma que movimentos repentinos da fonte produzem ondas de tensão mecânica. Essas ondas se propagam elasticamente pelo material, chegando a alguns pontos da superfície e estimulando os sensores piezelétricos. Os sensores transformam a energia mecânica em elétrica, sendo que os sinais gerados podem ser ou não amplificados antes de serem processados e armazenados. [13, 19, 29, 33].

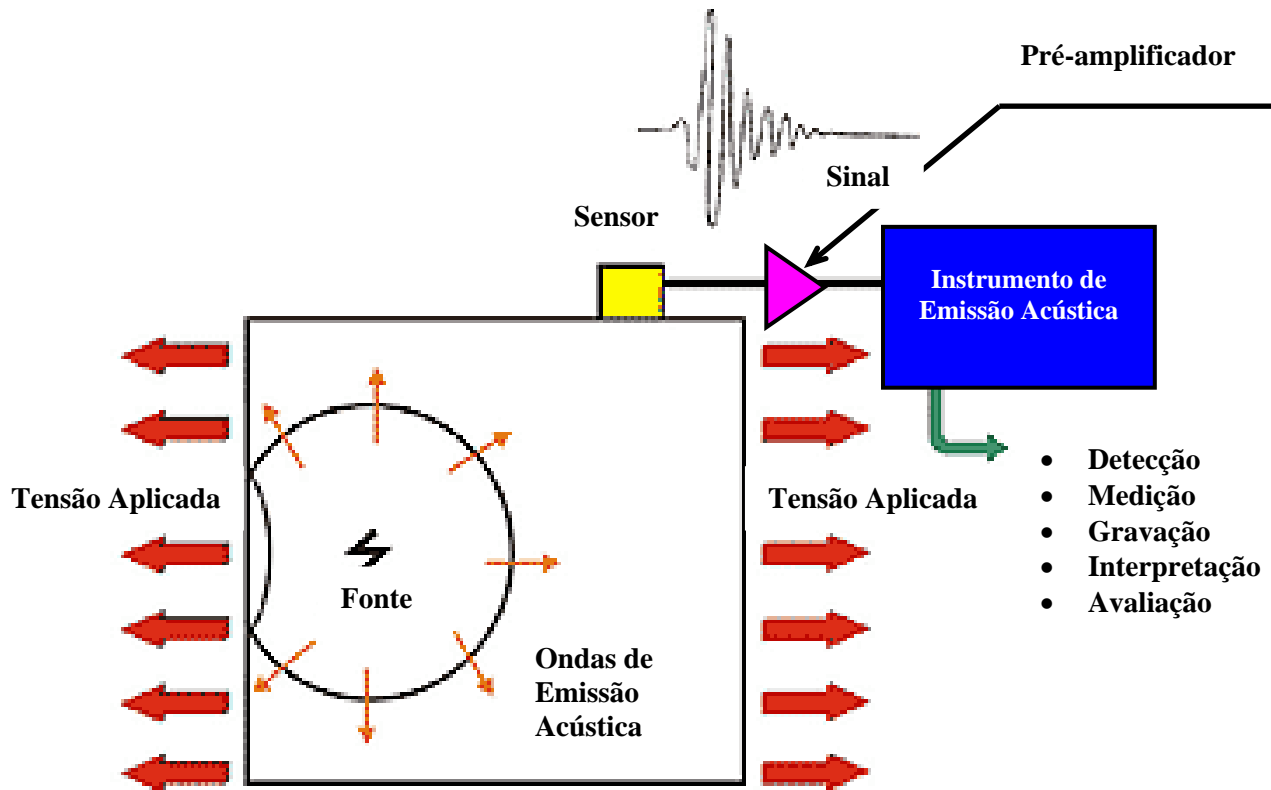


Figura 3.1: Princípio Básico do Método de Emissão Acústica [13], [29]

O objetivo do ensaio de emissão acústica é avaliar a condição de integridade, localizando e classificando as áreas ativas quanto ao grau de comprometimento que eventuais descontinuidades impõem à integridade estrutural [13, 19, 23, 26, 39, 32, 33].

Áreas ativas classificadas como severas deverão ser examinadas localizadamente, por outras técnicas de END como, por exemplo, ultra-som e partículas magnéticas, para caracterização da morfologia e dimensionamento dos defeitos presentes [13, 19, 23, 26, 30, 32, 33].

A maior contribuição da técnica de EA é a de analisar o comportamento dinâmico das descontinuidades, recurso este único dentro do elenco dos ensaios não destrutivos [26, 32].

As fontes clássicas de emissão acústica estão relacionadas a descontinuidades provenientes dos processos de deformação, tais como: crescimento de trinca e deformação plástica [13, 19, 23, 30, 32, 33].

Portanto, só é possível a realização do ensaio de emissão acústica se existir tensão mecânica aplicada. Desta forma, uma inspeção de emissão acústica pode ser empregada durante um carregamento controlado da estrutura. Como exemplo de carregamento ou estímulo do material ou estrutura, temos as seguintes situações: prova de carga antes da operação, através de uma variação de carga controlada, enquanto a estrutura está em serviço; teste de fadiga; teste de fluência; “cool down”; etc [13, 19, 23, 30, 32, 33].

Para melhor entendimento, fez-se uma comparação da aplicação dos outros métodos de END com o ensaio de EA. Vide Tabela 3.1 [13, 23, 32].

Tabela 3.1: Comparação do ensaio de emissão acústica (EA) com outros métodos de ensaios não destrutivos (END) [23, 32].

Emissão Acústica	Outros Métodos
Detecta o crescimento/movimento das descontinuidades	Detecta a presença e a geometria das descontinuidades
É necessário tensionar a estrutura	Não é necessário tensionar a estrutura
Cada carregamento é único	As inspeções podem ser repetidas
Avaliação global	Avaliação localizada
Mais sensível ao material	Menos sensível ao material
Menos sensível à geometria	Mais sensível à geometria
Menos intrusivo na planta ou processo	Mais intrusivo na planta ou processo
Requer acesso somente aos sensores de E.A.	Requer acesso a toda área de inspeção
A estrutura é avaliada completamente em uma única vez	Avalia regiões até atingir toda estrutura
Problemas principais: ruídos e avaliação	Problemas principais: acesso, geometria e avaliação

O ensaio de emissão acústica difere dos outros métodos de ensaios não destrutivos em dois principais aspectos:

- Primeiro: que o sinal detectado é gerado pelo próprio material ou estrutura, ou seja, a energia detectada é liberada de dentro do material em teste.
- Segundo: o método de emissão acústica é capaz de avaliar o comportamento dinâmico do material ou estrutura para a tensão aplicada, estando estes fenômenos associados à degradação da integridade estrutural, como: crescimento de trincas e deformações plásticas, sendo estas as maiores fontes de emissão acústica [13, 23, 32].

Como limitações da técnica de emissão acústica, podemos citar [7, 23]:

- A detecção de uma descontinuidade presente na estrutura é dependente do tipo de excitação induzida durante o ensaio, o que obriga a realização de estudos específicos, principalmente para as situações mais críticas de utilização;
- A grande quantidade de informações geradas durante o ensaio pode ocasionar uma dificuldade de análise;
- Não é ainda uma técnica desenvolvida para o dimensionamento de descontinuidades devendo, sempre que necessário, ser complementada pelas técnicas não-destrutivas convencionais.

### 3.1.1

#### **Aplicações do Ensaio de Emissão Acústica**

O ensaio de EA normalmente é baseado no processamento de sinais com frequência na faixa de 30 KHz a 1 MHz (banda larga). Com isso tem uma extensa gama de aplicações dentro da área de manutenção preditiva e inspeção de equipamentos. A seguir destacam-se algumas das aplicações do ensaio [23, 30, 32]:

- Indústria química e de petróleo;
- Indústria de utilidades e nuclear;

- Soldagem;
- Engenharia civil;
- Indústria eletrônica;
- Indústria aeroespacial;
- Engenharia biomédica;
- Monitoração de processos de fabricação.

Conforme descrito no item 3.1 deste Capítulo, só é possível realizar o ensaio de EA com a presença de sinais capazes de provocar no material ou estrutura uma liberação de energia em forma de ondas elásticas transientes. Sendo assim, no item seguinte apresenta-se os mecanismos que atuam como fonte de emissão acústica.

### 3.1.2

#### **Fontes de Emissão Acústica**

Diversos são os mecanismos que atuam como fontes de emissão acústica . Em tese todo mecanismo que impõe um comprometimento à integridade do equipamento ou estrutura é potencial fonte de EA. Este fato decorre do próprio princípio do ensaio de emissão acústica apresentado no item 3.1 deste Capítulo, ou seja, como é o material quem emite os sinais através da liberação de energia durante o processo de degradação, toda anomalia estrutural a que for submetido, será acompanhada de atividade de EA, [19, 23, 33].

As fontes de emissão acústica incluem diferentes mecanismos de deformação e fratura. Abalos sísmicos e explosões em minas são as maiores fontes naturais de emissão acústica. Deformação plástica (permanente), também é considerada uma das maiores fontes de emissão acústica. As fontes de deformação mecânica nos metais incluem crescimento de trincas, , escorregamento, maclação, escorregamento de grãos da vizinhança, fratura, corrosão, trincas por corrosão sob tensão, danos causados por hidrogênio e descoesão de inclusões. Em materiais compósitos, as fontes incluem trincas na matriz, arrancamento e fratura de fibras. Todos os mecanismos citados acima se referem a materiais com aplicação de



carga, tensionados. Outros mecanismos, que também estão dentro destas definições e são detectados com equipamentos de emissão acústica são [7, 23, 32]:

- Vazamentos;
- Cavitação;
- Fricção (como em mancais e rolamentos);
- Realinhamento ou o crescimento de subestrutura magnética (Efeito Barkhausen);
- Liquefação, solidificação e transformação de fase sólida.

Estes mecanismos também são chamados de fontes secundárias ou pseudo-fontes, de forma a distingui-las das fontes consideradas “clássicas” de emissão acústica [7, 23].

Dentre os mecanismos de fontes de emissão acústica, mencionados acima, destacam-se os seguintes:

- **Fontes em Materiais Cristalinos:** quando materiais monocristalinos são tensionados, o regime de deformação plástica é a região mais propícia para a ocorrência de fontes de emissão acústica, uma vez que esta deformação plástica ocorre em um único cristal orientado em um plano de escorregamento, o que então facilita a propagação das ondas elásticas transientes, gerando dessa forma sinais de emissão acústica [7, 23, 32].
- **Fontes em Compósitos:** as principais características de sinais de emissão acústica em compósitos são: grandes quantidades de sinais de emissão acústica; grande aumento na atividade (taxa de emissão acústica) antes da falha; altos níveis de tensão, ou seja, emissão contínua durante patamar de carga [7, 23, 32].
- **Outras Fontes de Emissão Acústica, consideradas como pseudo-fontes são:**
  - Vazamento de líquido e gás;
  - Atrito;
  - Fechamento de trincas;

- Impacto;
- Cavitação;
- Descarga elétrica;
- Transformação de fase;
- Reação química;
- Aquecimento;
- Resfriamento;
- Fundição.

Uma transformação de fase ocorre em um sólido quando a estrutura cristalina muda de um arranjo para outro. Por exemplo: aço em resfriamento rápido de temperaturas acima de 720°C, onde cristais austeníticos, de uma estrutura cúbica de face centrada, cisalham abruptamente de maneira a formar martensita tetragonal de corpo centrado. Neste caso a EA ocorre quando a transformação de fase produz uma súbita mudança de volume ou forma, sendo a transformação martensítica do aço uma fonte bem conhecida de EA de alta energia [7, 23, 32].

Em contraposição, em resfriamentos lentos o arranjo austenítico de face centrada transforma-se em arranjo ferrítico de corpo centrado por um processo de difusão átomo-átomo. Esta transformação de fase contínua de difusão controlada produz emissão acústica pequena, com baixa energia ou não detectável [7, 23, 32].

Características de vazamentos considerados como fonte de emissão acústica [7, 23, 32]:

- Súbito ataque de sinal contínuo durante a turbulência de fluídos (quando o número de Reynolds excede um valor crítico, aproximadamente 3.000);
- Amplitude de sinal aumenta com pressão e taxa de vazamento (taxas de vazamento e emissões acústicas são controladas por pressão, geometria, e propriedades do fluído).

A Figura 3.2 mostra um típico resultado experimental com variações dos sinais de emissão acústica para o alumínio de alta pureza com tensão e deformação em um cristal único sob deformação uniaxial, com taxa de deformação constante. Neste experimento, a amostra foi deformada em uma taxa de deformação constante relativamente baixa, com o objetivo de avaliar todos os movimentos das discordâncias. Para este experimento, observaram-se os seguintes pontos [23, 32]:

- O sinal de emissão acústica foi detectado na faixa de frequência entre 0,1 e 1,0 MHz;
- O sinal de emissão acústica foi primeiramente detectado durante o carregamento elástico nominal e alcançou a intensidade máxima após deformação em torno de 2% além do escoamento;
- O sinal de emissão acústica decresceu embora o escoamento por unidade de tempo tenha permanecido constante;

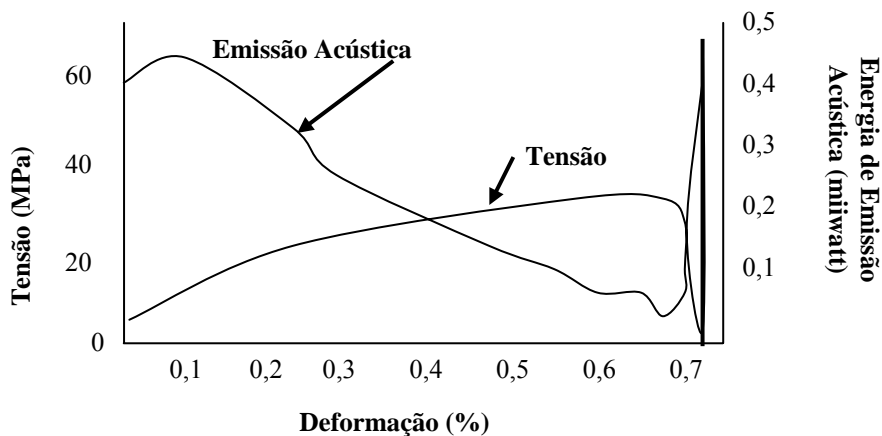


Figura 3.2: Variação de emissão acústica com tensão e deformação em um monocristal de alumínio de alta pureza sob tração uniaxial, com taxa de deformação constante [23, 32].

A Figura 3.3 mostra os tamanhos físicos de alguns danos que são detectados por emissão acústica e as respectivas intensidades dos sinais gerados durante o movimento repentino de propagação quando tensionados.

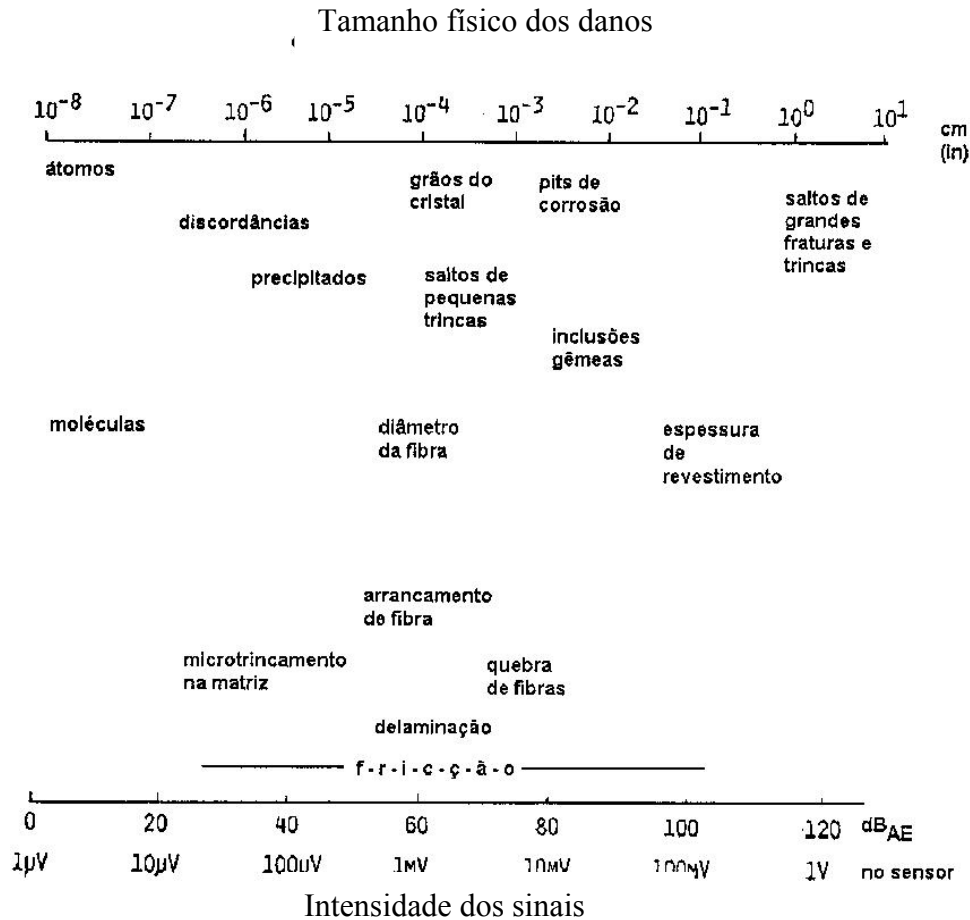


Figura 3.3: Escala do tamanho físico dos danos e intensidade dos sinais de fontes de emissão acústica [32].

O aumento de intensidade dos sinais apresentados por altas amplitudes, em estruturas metálicas é um indicador típico da necessidade de atenção, como sendo prováveis defeitos significativos ou sérios problemas de ruído. Em compósitos, as altas amplitudes, decorrentes do aumento de intensidade dos sinais, são tipicamente interpretadas como quebra de fibra, enquanto longas durações são características de delaminação [5, 32].

O ensaio de EA, sempre reconhece a presença de ruídos de fundo que podem ou não interferir nos sinais registrados, sendo estes ruídos um dos grandes dificultadores para realização do ensaio. Portanto, deve-se identificar e localizar as origens das fontes destes ruídos antes e durante o ensaio de emissão acústica.

Normalmente, estes ruídos são inerentes ao equipamento, material, instalações ou meio que se utiliza para realizar o ensaio de emissão acústica [7, 9, 12, 13, 18, 23, 26, 30, 31, 32].

Os tipos de fontes de ruídos de fundo mais comuns são [9, 23, 30, 31, 32]:

- Turbulência do produto interno (fluido) de operação do equipamento;
- Vibração da máquina de ensaio;
- Taxa de pressurização ou carregamento muito alto;
- Bombas, motores e outros dispositivos mecânicos;
- Interferência eletromagnética como, por exemplo: soldagem, estações de rádio, sistemas de navegação, iluminação, etc;
- Ruídos mecânicos causados por fricção como, por exemplo: deslocamento dos corpos de prova nas garras, cabos em movimentos sobre a estrutura, estruturas fixadas no equipamento, neste caso a fonte do ruído é o óleo hidráulico cavitando em um canal estreito do pistão e o cilindro;
- Ruídos hidráulicos em equipamentos com sistema de teste servo hidráulico podem ser provocados pela cavitação do fluido;
- Ambientes como: chuva, vento, etc.

Os sinais de emissão acústica oriundos dos ruídos mencionados acima devem ser identificados, eliminados ou minimizados. Quando possível, deve-se determinar o nível destes sinais espúrios antes da solicitação do equipamento. Recomenda-se um tempo mínimo de 15 minutos para identificação dos níveis destes sinais espúrios. Caso o nível destes ruídos esteja acima do limite de referência (threshold), deve-se realizar o ensaio com uma frequência acima da frequência do ruído ou buscar eliminar as fontes de ruído [7, 9, 12, 13, 18, 23, 26, 31, 32].

No item a seguir, apresenta-se a forma e propagação de onda de EA e qual a influência do meio de origem da fonte dos sinais.

### 3.1.3

#### Forma e Propagação de Onda de Emissão Acústica

Como já definido na seção 3.1, emissão acústica é um fenômeno onde ocorre liberação de energia em forma de onda. A velocidade de propagação é chamada de velocidade da onda. Frequência e amplitude são exemplos de propriedades intrínsecas de ondas, que são regularmente monitorados nos ensaios de emissão acústica. A tabela 3.2 apresenta uma visão de como as variadas propriedades do material e as condições do ensaio influenciam nas amplitudes [7, 23].

Tabela 3.2: Fatores que afetam a amplitude de respostas do sinal de emissão acústica.

Fatores que Promovem o <i>Aumento</i> da Amplitude de Respostas de Emissão Acústica	Fatores que Promovem a <i>Diminuição</i> da Amplitude de Respostas de Emissão Acústica
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta Resistência</li> <li>• Alta Taxa de Deformação</li> <li>• Temperatura Baixa</li> <li>• Anisotropia</li> <li>• Não Homogeneidade</li> <li>• Seções Espessas</li> <li>• Fratura Frágil</li> <li>• Material contendo Descontinuidades</li> <li>• Transformação de Fase Martensítica</li> <li>• Propagação de Trincas</li> <li>• Materiais Fundidos</li> <li>• Grãos Grandes</li> <li>• Maclação Induzida Mecanicamente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa Resistência</li> <li>• Baixa Taxa de Deformação</li> <li>• Temperatura Alta</li> <li>• Isotropia</li> <li>• Homogeneidade</li> <li>• Seções Finas</li> <li>• Fratura Dúctil</li> <li>• Material sem Descontinuidades</li> <li>• Transformação de Fase Controlada - Difusão</li> <li>• Deformação Plástica</li> <li>• Materiais Forjados</li> <li>• Grãos Pequenos</li> <li>• Maclação Induzida Termicamente</li> </ul>

A forma de onda dos sinais de EA é afetada pelos seguintes fatores [7, 23]:

- Características da fonte;
- Percurso do sinal da fonte até o sensor;
- Características do sensor e do sistema de medição.

A Figura 3.4, apresenta uma onda primitiva gerada por uma fonte de emissão acústica. A onda de deslocamento é uma função do tipo rampa, correspondendo a uma variação permanente ocorrida no material, no caso a deformação plástica ocorrida em função da tensão ( $\sigma$ ) aplicada.

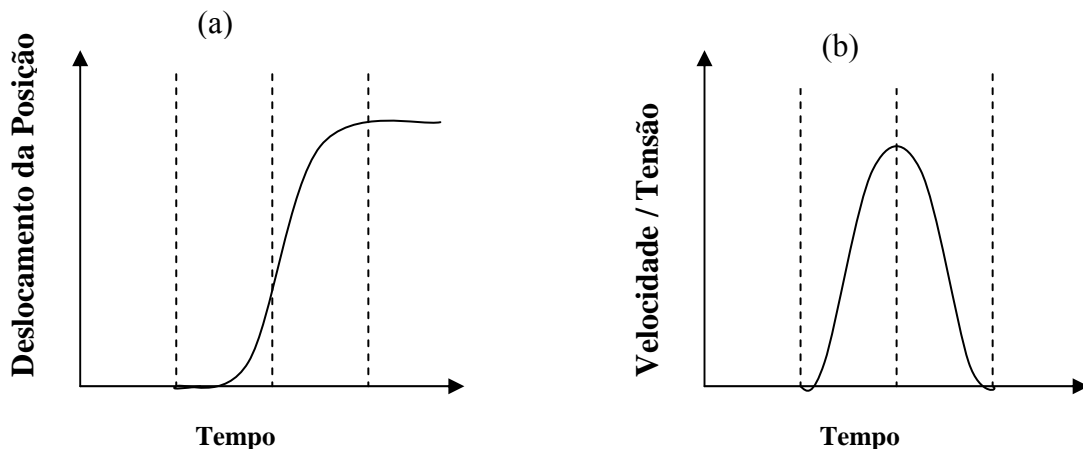


Figura 3.4: Características das fontes de emissão acústica [32]: (a) deslocamento da posição X tempo; (b) velocidade / tensão X tempo

A propagação da onda de emissão acústica é crítica para a aplicação do ensaio.

Portanto, deve-se levar em consideração três importantes aspectos [32]:

- A atenuação controla o espaçamento necessário do sensor para a efetiva detecção;
- A velocidade de propagação da onda é a chave para o cálculo da posição da fonte;
- Os modos de onda múltiplos e padrões de onda, muito mais que fatores da fonte, controlam a forma de onda na proximidade do sensor.

As principais características da emissão acústica como fontes de ondas acústicas são [32]:

- Emissão acústica é efetivamente uma fonte; Emissão acústica é essencialmente um pulso de tempo de subida de curto deslocamento (um pulso de velocidade de pequena duração) com o correspondente espectro largo de frequência.

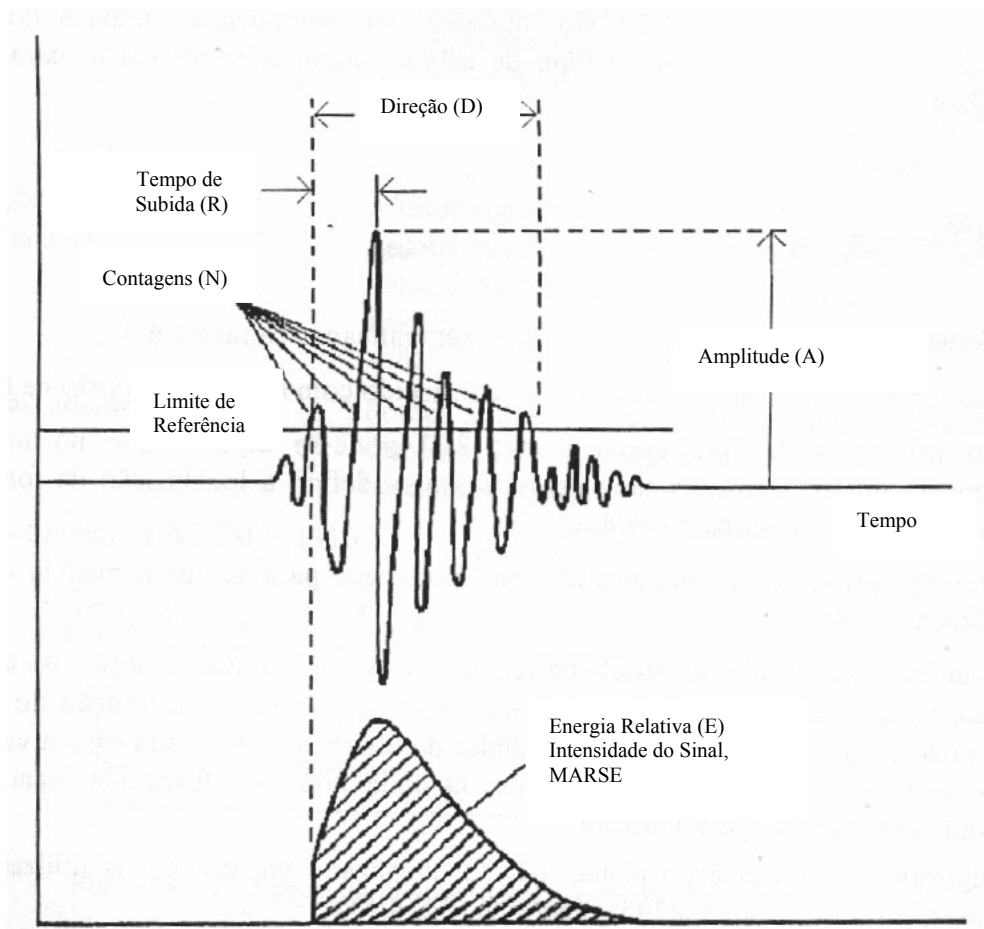


Figura 3.5: Características dos parâmetros retirados da forma de onda [30, 32].

A Figura 3.5 mostra os parâmetros de emissão acústica extraídos da forma de onda como: contagem, amplitude, duração, tempo de subida e energia.

A amplitude representa o maior pico de voltagem atingido pela onda. Este é um importante parâmetro, pois é a partir dele que se determina diretamente a detecção do evento de emissão acústica. As amplitudes dos sinais de emissão acústica são diretamente relacionadas à magnitude da fonte do evento, e variam numa grande



faixa, de microvolts a volts. De todos os parâmetros a amplitude é o mais adequado para obter informações estatísticas da forma de distribuição de funções.

As amplitudes de emissão acústica são normalmente expressas em decibéis (dB), onde: 1  $\mu\text{V}$  é definido como 0 dB, 10  $\mu\text{V}$  é 20 dB, 100  $\mu\text{V}$  é 40 dB e assim por diante [30, 32].

A Figura 3.5, também indica o limite de referência (threshold) para o qual o ensaio de emissão acústica foi ajustado [30, 32].

A velocidade de propagação das ondas de emissão acústica está relacionada diretamente com a densidade do material. Para materiais anisotrópicos a velocidade varia em função da orientação de propagação, gerando ondas transversais e longitudinais, dificultando dessa forma a localização de fontes ativas. Já em materiais isotrópicos as ondas propagam-se com a mesma velocidade em todas as direções, tornando mais simples o processo de localização das fontes ativas de EA [23, 32].

A velocidade de propagação das ondas de emissão acústica está relacionada diretamente com as técnicas de localização utilizadas nos algoritmos do software de EA, sendo que a localização da fonte é mostrada na tela com as posições dos sensores, onde as coordenadas usadas podem ser [23, 32]:

- Em unidades de tempo;
- Em valores de calibração do  $\Delta T$  medido para posicionar os sensores;
- Em unidades de distância.

Para cada aplicação acima a velocidade de propagação da onda deve ser conhecida, seja fornecida ou calculada através das medidas de calibração, conforme mostrado na Figura 3.4 [32].

Para melhor entendimento sobre as técnicas de localização, a Tabela 3.3 mostra os tipos de localização, a quantidade de sensores necessários, as características da forma de onda e as aplicações [32].

Tabela 3.3: Técnicas de localização das fontes de emissão acústica [32].

<b>Tipos</b>	<b>Sensores Necessários</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicações</b>
Localização computada (linear)	2	Algoritmo simples requer velocidade bem definida. Localiza um ponto em uma linha, uma linha em um plano.	Tubos, tubulações, soldas, amostras de laboratório.
Localização do primeiro <i>hit</i> (zonal)	1	Não necessita saber a velocidade. Localiza somente uma região.	Todo tipo de estrutura, especialmente as grandes, onde existe grande espaçamento de sensores.
Localização computada (planar)	3 – 4	Muitos tipos possíveis de algoritmo, todos requerendo velocidade bem definida. Localiza um ponto em uma superfície 2-D.	Comumente usado em vasos de pressão, tanques de armazenamento, fuselagem de aeronaves e todo tipo de superfície plana.
Localização computada 3-D	4 - 5	Muitos algoritmos possíveis, usualmente requerendo velocidade bem definida. Localiza um ponto em um sólido 3-D.	Concreto, mineração, Engenharia Civil, geologia e transformadores elétricos.
Localização adaptada	3 ou mais	Fontes simuladas usadas em combinação com computação baseada em variações de tempo.	Geometria complexa.

A seguir, apresenta-se a influência do controle da carga no primeiro carregamento e em carregamentos repetidos para avaliação dos sinais de EA obtidos da forma de onda.

### 3.1.4

#### Comportamento dos Sinais de Emissão Acústica – Controle da Carga e Carregamentos Repetidos

Como emissão acústica é gerada pela deformação da tensão aplicada no material, ela é altamente dependente do histórico das tensões/carregamentos aplicados no equipamento, material ou estrutura. A relação entre emissão acústica, tensão e tempo também dependem do material e do tipo de deformação produzida pela emissão acústica. Sabe-se que alguns materiais respondem quase que instantaneamente a tensão aplicada emitindo sinais de emissão acústica e então estabilizando rapidamente estes sinais. Outros materiais levam algum tempo para ocorrer esta estabilização após aplicação da tensão/carga; isto é claramente observado nos materiais viscoelásticos, sendo este um material que pode deslizar enquanto tendo rigidez elástica. Com este tipo de material, a emissão acústica é possível não somente durante o incremento, mas durante também patamares de carga. Emissão acústica durante patamar de carga é geralmente observado, especialmente em níveis de tensão elevados, conforme pode ser observado na Figura 3.6 [23 30, 32].

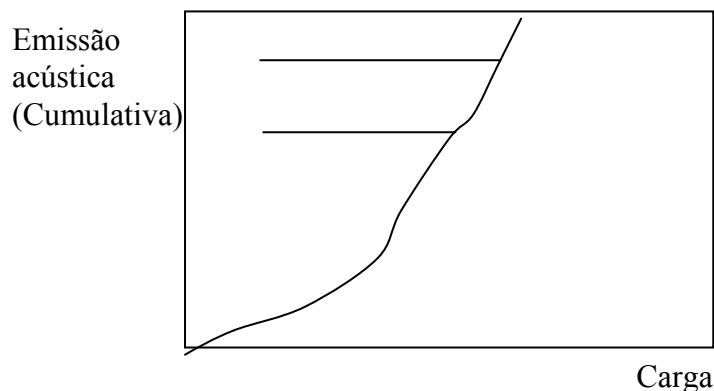


Figura 3.6: Emissão acústica versus carga [32].

Em outros casos uma tensão/carga constante pode produzir um dano e a estrutura não mais estabilizar. Um exemplo deste fenômeno é o crescimento de uma trinca de hidrogênio induzida, o qual pode proceder de uma carga constante de falha, com emissão contínua [23, 30].

Sabe-se que o ensaio de emissão acústica é freqüentemente realizado sob condições de carregamentos crescentes. A primeira aplicação de carga produzirá, tipicamente, mais sinais de emissão acústica que carregamentos subseqüentes. De fato, para materiais que entram em regime plástico instantaneamente, carregamentos subseqüentes não devem produzir sinais de emissão acústica até que a carga máxima prevista seja excedida. Este comportamento foi relatado em uma dissertação de doutorado, publicada em 1950, por Joseph Kaiser, onde relatou as primeiras investigações dos fenômenos de emissão acústica. Para desenvolvimento da sua dissertação, Kaiser utilizou os conceitos de engenharia de materiais, associados ao teste de tensão convencional, para determinar [23, 30]:

- Níveis de ruídos gerados pelo corpo de prova em ensaio;
- Fenômenos acústicos envolvidos;
- Níveis de freqüência encontrados;
- Relação entre a curva de tensão/deformação e as freqüências encontradas para várias tensões, as quais o corpo de prova foi submetido.

Após Kaiser ter constatado o fenômeno descrito acima, Dunegan confirmou que para os materiais que obedecem ao efeito de Kaiser, a emissão acústica em um carregamento repetido indicará que os danos estruturais ocorreram em serviço subsequente entre o primeiro carregamento e o carregamento repetido. Esta confirmação de Dunegan tornou-se um conceito base para os ensaios realizados na década de 1970, quando as primeiras organizações implementaram inspeções periódicas de emissão acústica em vasos de pressão e outras estruturas [23, 30].

Os ensaios recentes consideram significativas as emissões que ocorrem em carregamentos abaixo da máxima carga aplicada anteriormente, e a emissão contínua quando a carga é constante em um determinado nível de patamar do carregamento. A evidência para este caso é que os defeitos significativos estruturalmente tenderão a apresentar estes comportamentos.

A Figura 3.7 mostra estes comportamentos. A emissão é observada no carregamento inicial de A até B, mas não no descarregamento de B a C. Na reaplicação da carga, não é constatado nenhum sinal de emissão (linha horizontal)

até que B seja novamente alcançado; este é o efeito de Kaiser. É realizado um aumento de carga até o ponto D, com registro de novos níveis de emissão, e então um outro ciclo de descarregamento é aplicado. Neste momento, devido ao nível mais elevado de tensão aplicada, os defeitos significativos são detectados onde começam a surgir a emissão a partir do ponto F, que é um ponto inferior a carga máxima prévia. Este comportamento é conhecido como o efeito Felicity. Este efeito pode ser quantificado (FR) através da relação entre a carga na qual a emissão acústica recomeça e a carga máxima prévia [7, 23, 30].

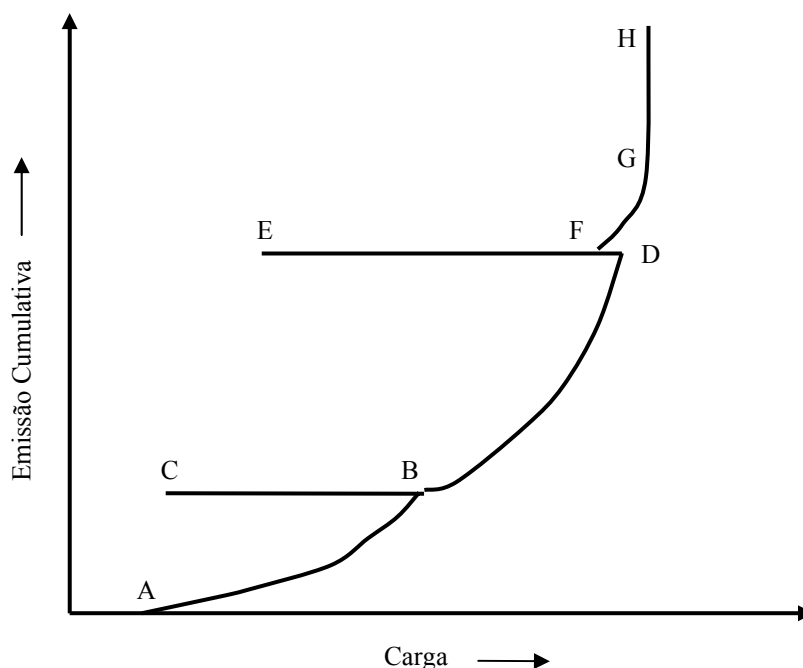


Figura 3.7: Diagrama contendo Efeito Kaiser, Felicity e sinais de emissão acústica durante o carregamento e estabilização da carga [30, 32]

Tecnicamente, o efeito de Kaiser pode ser comprovado quando FR for igual ou maior que 1. A diminuição sistemática na relação Felicity (FR) como a falha do material tem sido bem registrado em materiais reforçado com fibras de plástico e uma razão de FR menor que 0,95 é motivo de rejeição para tanques ou vasos de pressão inspecionados por emissão acústica [7, 23, 30].

A Figura 3.7 mostra também a emissão contínua durante o período de estabilização do carregamento (G a H). O efeito Felicity e a ocorrência de emissão durante a estabilização da carga, ambos os sinais estão associados a defeitos significativos, estruturais, naturais e instáveis [7, 23, 30].

Para os ensaios de emissão acústica realizados periodicamente, considera-se que [7, 23, 30]:

- Efeito Kaiser mostra a irreversibilidade de um resultado de emissão acústica;
- Efeito Felicity é uma indicação de danos significativos;
- Efeito Dunegan são defeitos estruturalmente significativos que irão emitir sinais de emissão acústica em serviço subsequente entre o primeiro carregamento e carregamento repetido.

A Figura 3.8 apresenta um diagrama resumido destes comportamentos [32]:

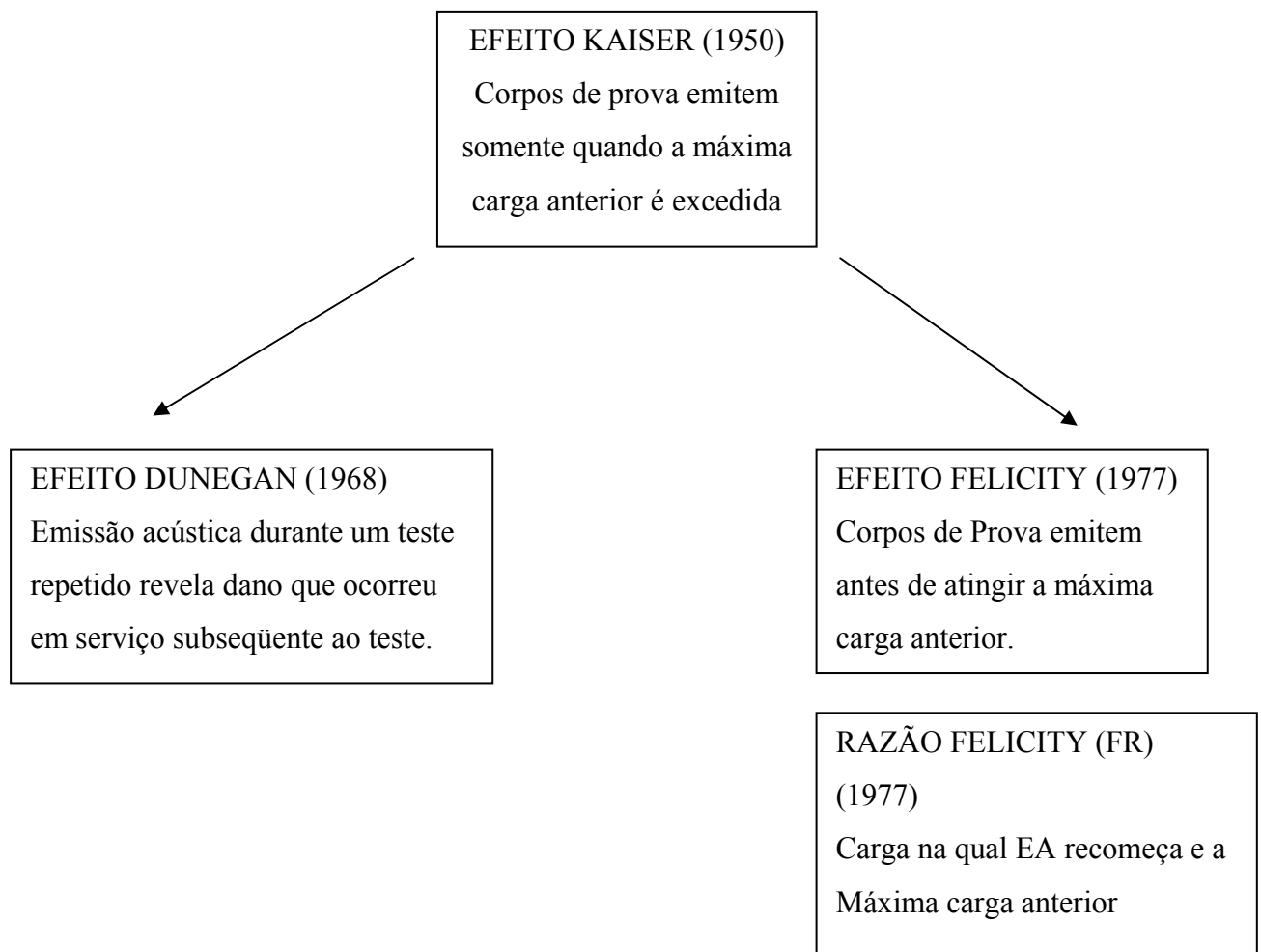


Figura 3.8: Diagrama resumido contendo Efeito Kaiser, Dunegan, Felicity e razão Felicity [32]

Para o sucesso do ensaio de emissão acústica, deve-se elaborar um procedimento, tomando os devidos cuidados com os patamares de carregamento. Este procedimento deve especificar corretamente a sequência e os respectivos valores das cargas a serem aplicadas. Estas cargas devem ser determinadas em função da carga de operação ou projeto do equipamento, material ou estrutura a ser inspecionada [23, 30].

Para aplicar todos os conceitos e parâmetros definidos no item 3.1 deste Capítulo, deve-se conhecer também o equipamento de emissão acústica, seus acessórios, suas limitações e a forma de parametrização para realizar o ensaio de emissão acústica. Portanto, para continuidade do estudo desta dissertação de Mestrado, a seguir apresentaremos o equipamento de emissão acústica, seus acessórios e a configuração do mesmo para aplicação do ensaio de emissão acústica.

### **3.2**

#### **Equipamento e Acessórios de Emissão Acústica**

A Figura 3.9 mostra o que consiste o equipamento de medição e gravação para realizar ensaio de emissão acústica e os seus respectivos acessórios [31].

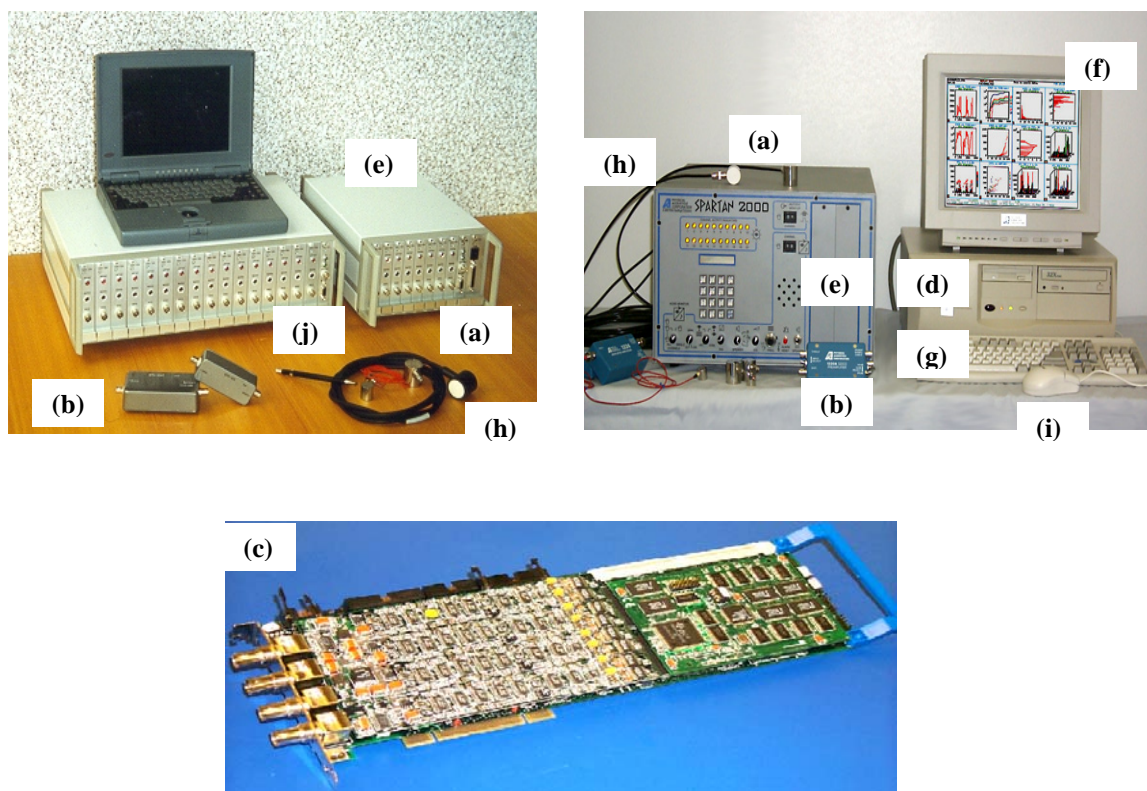


Figura 3.9: Equipamento e acessórios de emissão acústica [31]: (a) sensores; (b) pré-amplificadores; (c) placa microprocessada para 4 canais; (d) PC computador; (e) equipamento de emissão acústica – Spartam 2000; (f) monitor colorido; (g) teclado; (h) cabos coaxiais de conexão dos sensores; (i) mouse e (j) lapiseira 0,3 mm.

O equipamento de medição e de gravação para a aplicação do ensaio de emissão acústica deve ser capaz de medir os seguintes parâmetros extraídos da forma de onda conforme mencionado no item 3.1.3 e Figura 3.5 como: contagem, amplitude, duração, tempo de subida e energia.

A seguir uma descrição para explicar a função e aplicação de cada componente e acessório mostrado na Figura 3.9:

#### (a) Sensores

Os principais tipos de sensores são: os piezelétricos, eletromagnéticos, capacitivos e óticos; sendo que os mais utilizados são os sensores piezelétricos que possuem frequência de ressonância e banda larga (30 KHz a 1 MHz), conforme mencionado no item 3.1.1 [23].



Os sensores eletromagnéticos têm baixa sensibilidade (aproximadamente 40 dB menor que o piezelétrico), são sensíveis as correntes de soldagem e a cargas aéreas e sofrem interferência elétrica [23; 32].

Os sensores capacitivos são usados principalmente em laboratórios e tem resposta plana em frequência [23, 32].

Os sensores óticos são o padrão de interferômetro a laser, possuem pequeno foco do feixe (aproximadamente 10 mm) [23, 32].

Normalmente, os sensores piezelétricos ressonantes utilizados no ensaio de emissão acústica são na faixa de 100 kHz a 400 kHz e devem estar sempre em temperatura estável sobre a faixa de uso pretendido e recomendado pelo fabricante; não devem apresentar mudança de sensibilidade maior que 3 dB sobre esta faixa de uso como garantia dada pelo fabricante; devem ser protegidos contra rádio frequência e ruído de interferência eletromagnética e não devem ter uma resposta de frequência ressonante com variações excedendo a 4 dB da resposta de pico. A sensibilidade mínima do sensor deve ser -80 dB, referenciado a 1 volt/microbar, o que é determinado durante a calibração do sensor (ver Anexos 2 e 3 – Certificado de Calibração do Sensor) [2, 9, 23, 30, 31].

A principal função do sensor de emissão acústica é detectar o movimento de propagação da onda no material e a subsequente transformação da energia mecânica em elétrica ou vice versa, através do cristal piezelétrico. Este fenômeno é conhecido como piezeletricidade, ou seja, é a geração de cargas elétricas como resultado de deformação mecânica ou vice versa, o que define o ensaio de emissão acústica conforme mencionado no item 3.1 deste Capítulo [23, 32].

A Figura 3.10 mostra um diagrama esquemático de construção típica de um sensor ressonante.

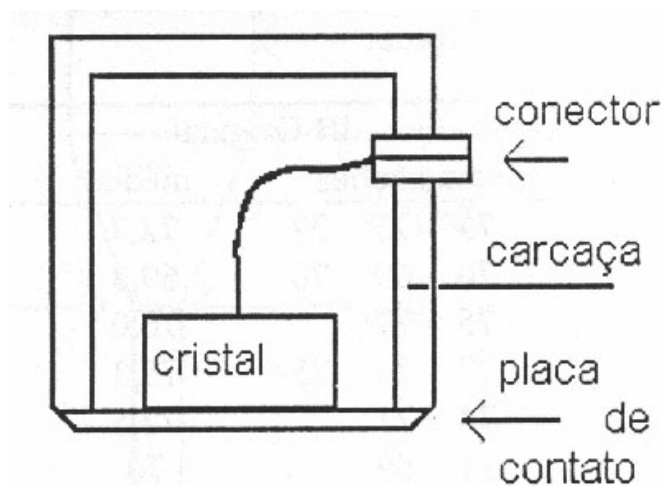


Figura 3.10: Diagrama esquemático de construção típica de um sensor ressonante [23], [32].

### (b) Pré-amplificador

O pré-amplificador deve ser montado na proximidade do sensor, ou no alojamento do sensor. Caso o pré-amplificador seja de projeto diferencial, um mínimo de 40 dB de rejeição de ruído em modo comum deve ser proporcionado. A resposta de frequência não deve variar mais do que 4 dB na frequência de operação e na faixa de temperatura dos sensores [9, 23, 30, 31].

Os filtros devem estar situados internamente no pré-amplificador, sendo que devem ser dos tipos passa banda ou passa alta e devem proporcionar um mínimo de 24 dB/oitava de atenuação de sinal. Filtros adicionais também podem estar incorporados dentro do processador. Os filtros devem assegurar que a frequência de processamento principal corresponda à frequência do sensor especificado para o uso [9, 23, 30, 31].

### (c) Placa Microprocessada

A placa apresentada na Figura 3.9 é composta de 4 canais para aquisição e processamento dos dados coletados, sendo responsável por distribuir a amplitude, por canal, para a caracterização da fonte de emissão acústica. O equipamento deve ter cais suficientes para prover a quantidade de sensores definidos em cada ensaio de emissão acústica [9, 23, 30, 31].

**(h) Cabo de Sinal**

O cabo de sinal do sensor para o pré-amplificador não deve exceder 1.5m de comprimento e deve estar protegido contra interferência eletromagnética [9, 23, 30, 31].

**(j) Lapiseira 0,3 mm com Grafite de Dureza 2H**

Acessório utilizado para verificar a sensibilidade de todo o sistema de medição em campo, através da quebra do grafite [9, 23, 30, 31]. Este assunto será comentado no item 3.1.6 a seguir.

Portanto, para melhor esclarecimento quanto ao funcionamento do equipamento de emissão acústica e não apresentado na Figura 3.9, será comentado nos seguintes itens adicionais a seguir:

**1) Cabo de Sinal de Alimentação**

O cabo de sinal que fornece alimentação para o pré-amplificador, conduzindo o sinal amplificado para o processador principal deve estar protegido contra ruído eletromagnético. A perda de sinal deve ser menor que 1 dB para 30,5 m de comprimento do cabo. O comprimento máximo de cabo recomendado é de 152,4 m para evitar atenuação excessiva do sinal [9, 23, 30, 31].

**2) Fonte de Alimentação**

Deve ser utilizada uma fonte de alimentação estável aterrada eletricamente, de acordo com as especificações da instrumentação [9, 23, 30, 31].

**3) Amplificador Principal (instalado internamente no equipamento)**

A função de um amplificador, conforme mostrado na Figura 3.11 é aumentar a intensidade (usualmente, voltagem) de um sinal, para torná-lo mais disponível para medição e transmissão. Dentre as características dos amplificadores, o ganho

de amplificação é o mais importante, sendo que deve ser linear dentro de 3 dB na faixa de temperatura de 4°C a 50°C. Usualmente o ganho é de 40 dB, podendo ser alterado, quando possível para 20 dB ou 60 dB através da configuração do software [9, 23, 30, 31].

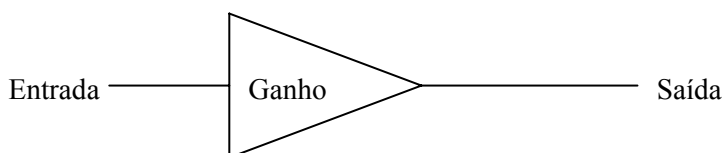


Figura 3.11: Amplificador

De forma assegurar a conformidade, desempenho e confiabilidade nos resultados obtidos através do ensaio de emissão acústica, é necessário realizar-se a calibração de todo o equipamento de medição descrito neste item. A seguir mostraremos qual o procedimento adotado, bem como os cuidados e critérios de aceitação aplicados.

### 3.3

#### Calibração do Equipamento de Emissão Acústica

A conformidade, o desempenho e a confiabilidade nos resultados do ensaio de emissão acústica podem ser realizados de duas maneiras conforme a seguir:

- **Calibração de todo sistema de medição:** esta calibração é realizada em laboratório através da geração de um sinal de emissão acústica simulado eletronicamente em cada entrada do amplificador principal. Este sistema deverá injetar um sinal do tipo senoidal sincronizado de amplitude, duração e frequência. No mínimo esta calibração deverá ser capaz de verificar o limite de referência, contagens, energia e pico de amplitude. Esta calibração deverá ser anual e seguir as referências de aceitação para cada modelo de equipamento conforme especificado pelo fabricante. Deve-se realizar a calibração a uma temperatura entre 15°C a 27°C [9, 13, 23, 31].

Para a calibração em campo, pequenos geradores de sinais portáteis e transdutores de calibração podem ser conduzidos com o equipamento e usado para verificação periódica do sensor, pré-amplificador e sensibilidade do canal. A periodicidade da calibração e o critério de aceitação são os mesmos adotados para a calibração em laboratório [9, 13, 23, 31].

Todos os sensores devem ser fornecidos com dados de desempenho documentado, Certificado de Calibração, com rastreabilidade a um padrão de reconhecimento nacional ou internacional [9, 13, 23, 31].

- **Caracterização da atenuação:** Um estudo de atenuação é executado com critério para determinar o espaçamento entre sensores e o desempenho de cada canal. Esta avaliação é executada em campo antes de iniciar cada ensaio de emissão acústica [2, 5, 7, 9, 23, 31]. Atenuação é a perda de amplitude com a distância em que as ondas propagam-se, através da estrutura em teste. É a perda de energia por unidade de distância [15, 32]. A queda de amplitude de um sinal típico deve ser determinado através do seguinte procedimento: selecionar uma região representativa ao longo do equipamento, material ou estrutura partindo de uma referência, montar um sensor e traçar uma geratriz de comprimento de 3.000 mm; quebrar um grafite de dureza 2H, diâmetro 0,3 mm a 20 mm do sensor e registrando a amplitude; a cada 60 mm repetir esta operação. Traçar uma curva amplitude *versus* distância, sendo esta a curva característica de atenuação. O resultado é considerado aprovado, caso as medições de pico de amplitude, em cada canal, não estejam variando mais que 4 dB [9, 13, 23, 31].

### 3.4

#### Processamento do Sinal de Emissão Acústica

Os equipamentos atuais de emissão acústica utilizam tecnologia digital para a coleta, apresentação, armazenamento e processamento de dados. Estes equipamentos permitem,

no mínimo, uma taxa de amostragem de 8 MHz ( 8 milhões de sinais/segundo) em placas de conversão analógico-digital de 16 bits, armazenando até 20.000 eventos por segundo, apresentando e armazenando a forma de onda e os parâmetros tradicionais dos dados de emissão acústica. A CPU destes novos equipamentos (placas de processamento) dispõe de inúmeros filtros em hardware e podem compor um equipamento de emissão acústica em qualquer computador [7, 9, 23, 32].

Existem equipamentos pequenos e portáteis a sistemas de multi-canais. A Figura 3.12 mostra um diagrama esquemático de blocos de um sistema genérico de emissão acústica de quatro canais. Dentre as funções de cada componente, inclusive já mencionada no item 3.2 deste Capítulo, destaca-se neste diagrama o processador principal. Este componente deve ser ter circuitos processadores através do qual o sinal captado pelo sensor será processado. Este, portanto, deve ser capaz de processar os seguintes sinais conforme a seguir [7, 9, 23, 32]:

- **Limite de referência:** a instrumentação de emissão acústica usada para inspeção deve ter um controle de limite de referência exato dentro de  $\pm 1$ dB na sua faixa útil;
- **Contagens:** o circuito de contagens de emissão acústica usado para inspeção deve detectar contagens em um ajuste de limite de referência com uma exatidão de  $\pm 5\%$ ;
- **Sinais:** a instrumentação de emissão acústica para inspeção deve ser capaz de medir, gravar e exibir no mínimo 20 sinais/segundo no total para todos os canais para um período mínimo de 10 segundos e medidas contínuas, gravações e exibições contínuas com um mínimo de 10 sinais/segundo no total para todos os canais. O sistema deve exibir um aviso se houver um valor maior do que 5 segundos de atraso entre a gravação e exibição durante taxas de dados elevador;
- **Pico de amplitude:** o circuito de emissão acústica usado para inspeção deve medir a amplitude de pico com uma exatidão de  $\pm 2$ dB;
- **Energia:** o circuito de emissão acústica usado para inspeção deve medir a energia com uma exatidão de  $\pm 5\%$ . A faixa dinâmica usual para energia deve estar num mínimo de 40 dB;

- **Voltagem paramétrica:** se a voltagem paramétrica é medida pelo instrumento de emissão acústica, este deve medir com uma exatidão de 2% do fundo de escala.

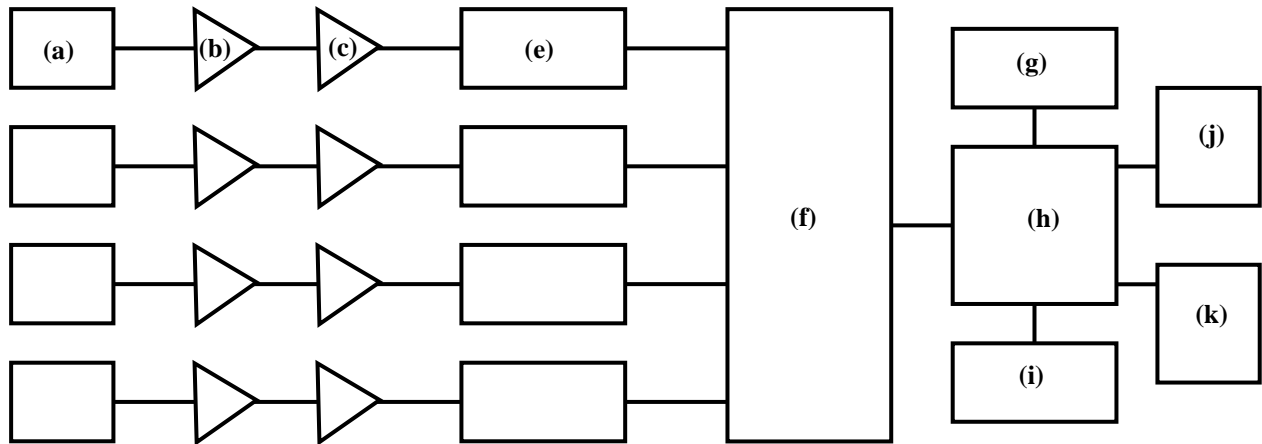


Figura 3.12: Diagrama esquemático de blocos de um sistema genérico de emissão acústica: (a) sensor, (b) pré-amplificador com filtro, (c) amplificador principal, (d) circuito de medição, (e) processador principal dos sinais, (f) disco rígido, (g) microcomputador, (h) teclado, (i) monitor e (j) impressora [7, 9, 23, 32].

Para detecção do pico de amplitude, a calibração deve seguir os seguintes requisitos [7, 9, 23, 32]:

- Faixa dinâmica usual deve estar num mínimo de 60 dB com 1 dB de resolução na faixa de frequência de 100 kHz a 400 kHz, e faixa de temperatura de 4°C a 50°C. Variação maior que 2 dB na exatidão de detecção de pico não deve ser permitida na faixa de temperatura estabelecida acima. Valores de amplitude devem ser fixados em dB, e devem ser referenciados para um ganho fixo de saída do sistema (sensor ou pré-amplificador).

Componentes como sensores, pré-amplificadores, filtros e amplificadores que tornam os sinais mensuráveis são comuns a todos os sistemas de equipamentos de ensaio por emissão acústica. Já os métodos utilizados para medição, podem ser capazes de mostrar e armazenar uma faixa muito maior ou menor dependendo da aplicação [7, 9, 23, 32].

### 3.5

#### **Planejamento para Realização do Ensaio de Emissão Acústica**

Para maior embasamento técnico e científico para o desenvolvimento desta dissertação de Mestrado, com enfoque na elaboração do Procedimento Experimental, neste item descrevem-se todas as etapas, metodologia e os requisitos mínimos necessários para a realização do ensaio de emissão acústica. O planejamento a seguir, foi descrito para aplicação em vasos de pressão metálicos inspecionados por emissão acústica durante o teste de pressão, considerando desde a calibração do equipamento, a verificação e avaliação dos dados coletados.

O ensaio é global, e será realizado nas condições de serviço através de incremento de pressão entre 5% e 10% acima da máxima pressão de operação, ou durante provas de carga, como, por exemplo, teste de pressão.

Objetiva-se com este ensaio localizar e monitorar as fontes de emissão causadas por descontinuidades na superfície interna ou externa a parede do vaso de pressão, em soldas e em outros componentes montados como: bocais, bocas de visita, flanges, suporte de fixação, etc.

Portanto, conforme já apresentado na Figura 1, Capítulo 1, desta dissertação, e seguindo os conceitos e aplicação da manutenção preditiva, também descritos neste mesmo Capítulo, sabe-se que para todas as indicações relevantes detectadas por fontes de emissão acústica, devem ser aplicados outros métodos de ensaios não destrutivos, por exemplo, ultra-som e partículas magnéticas, para conhecimento da dimensão, morfologia, profundidade e largura da descontinuidade detectada, conforme descrito no item 3.1. Isto se faz necessário, uma vez que, a aplicação isolada de apenas uma técnica de manutenção preditiva não é suficiente para avaliar em sua totalidade a integridade de um equipamento, material ou estrutura.

O planejamento a seguir abordará os seguintes itens:



- Material e configurações para ser ensaiado, incluindo dimensões e forma do produto;
- Medidas de ruído de fundo;
- Tipo de sensor, frequência e fabricante;
- Método de fixação do sensor;
- Acoplante;
- Tipo do instrumento de emissão acústica e filtro de frequência;
- Localizações dos sensores;
- Método para seleção das localizações dos sensores;
- Descrição do sistema de calibração;
- Dados a serem gravados e método de gravação;
- Limpeza do vaso de pressão após inspeção;
- Relatórios necessários;
- Qualificação/certificação do examinador.

O planejamento descrito neste item é o Procedimento aprovado e utilizado pela ABENDE - Associação de Ensaio Não destrutivos, para qualificação e certificação de pessoal em ensaios não destrutivos na modalidade do ensaio por emissão acústica [2].

### 3.5.1

#### **Tensionamento do Vaso de Pressão**

Deve ser feita uma programação para pressurizar o vaso usando a pressão interna, sendo que a taxa de pressurização deve ser de acordo com o descrito no item 3.5.10.2 deste Capítulo e ser suficiente para propiciar o ensaio com o mínimo de ruídos de interferência. Deve-se tomar providências para realizar o carregamento dentro dos patamares de pressão estabelecidos [2, 5, 7, 9, 23, 31].

### 3.5.2

#### **Redução de Ruído**

As fontes de ruído externo tais como chuvas, ventos fortes, objetos externos em contato com o vaso, e ruídos dos equipamentos utilizados para a pressurização

devem estar abaixo do limite de referência estabelecido para o ensaio [2, 5, 7, 9, 23, 31].

### 3.5.3

#### **Frequência do Sensor**

A seleção da frequência do sensor deve ser baseada na consideração do ruído de fundo, na atenuação acústica e configuração do vaso. Frequências na faixa de 100 kHz a 400 kHz são as mais efetivas, conforme descrito no item 3.2 [2, 5, 7, 9, 23, 31].

### 3.5.4

#### **Montagem do Sensor**

Para a localização e o espaçamento entre os sensores, deve-se seguir as orientações descritas no item 3.3, Caracterização da Atenuação. Os sensores devem ser acoplados acusticamente usando fluídos que asseguram a continuidade na transmissão dos sinais de emissão acústica. Para casos em que a temperatura da superfície comprometa a integridade dos sensores, pode-se utilizar guias de onda (haste metálica), que devem ser fixadas ou soldadas à superfície a ser ensaiada. Os acoplantes mais utilizados são: graxa de silicone, adesivos, água ou todo líquido que cujo acoplamento acústico tenha sido verificado quanto à sua eficácia. A composição química dos acoplantes utilizados deve ser verificada para garantir que não seja prejudicial a superfície em que está sendo montado o sensor [2, 5, 7, 9, 23, 31].

O sensor pode ser fixado por meios mecânicos ou magnéticos. Antes da fixação deve ser feita uma preparação da superfície, eliminando qualquer meio que possa comprometer a transmissão dos sinais de emissão acústica. A área de contato entre o sensor e superfície deve estar limpa, isenta de oxidação, “carepa”, rugosidade e curvaturas excessivas [2, 5, 7, 9, 23, 31].

As localizações dos sensores no vaso devem ser determinadas pela configuração do vaso e o espaçamento máximo entre sensores conforme itens 3.5.6 e 3.5.7. A

quantidade de sensores montados é definida pelo resultado do ensaio para caracterização da atenuação conforme item 3.2.

Deve-se tomar cuidados no posicionamento dos sensores para detecção de falhas estruturais nas regiões críticas, por exemplo, soldas, áreas de concentração de tensões, descontinuidades geométricas, bocais, bocas de visita, regiões reparadas, flanges e defeitos visíveis, de forma que estes sinais de emissão possam ser capturados e registrados para análise dos resultados. Cuidados adicionais deverão ser tomados para possíveis defeitos de atenuações de soldas [2, 5, 7, 9, 23, 31].

### **3.5.5**

#### **Localização das Fontes de Emissão Acústica**

As fontes devem ser localizadas através de técnicas de localização multicanal, zonal, ou ambas. Todos os sinais detectados pelo instrumento devem ser gravados e usados para avaliação [2, 5, 7, 9, 23, 31].

A exatidão de localização da fonte de multicanal deve ser no máximo 2 vezes a espessura da parede ou 5% da distância entre os sensores, aquele que for o maior [2].

### **3.5.6**

#### **Espaçamento Entre Sensores para Localização Zonal**

Os sensores devem estar localizados de modo que um grafite quebrado em qualquer região na área inspecionada é detectado por pelo menos um sensor, sendo que a medida de amplitude registrada deve ser maior que a estabelecida para o ensaio. O maior espaçamento entre sensores não deve ser maior que 1,5 vez o da distância estabelecida para o limite de referência (threshold). A distância do limite de referência é definido como a maior distância de um sensor no qual a quebra do grafite de dureza 2H, diâmetro 0,3 mm gere um sinal igual ou maior que o valor do limite de referência (em dB) estabelecido para o ensaio [2, 5, 7, 9, 23, 31].

O procedimento descrito neste item é o mesmo mencionado nos itens 3.3 e 3.5.4.

### **3.5.7**

#### **Espaçamento Entre Sensores para Algoritmos de Localização de Fonte**

Os sensores devem ser localizados de modo já mencionado no item 3.5.5 deste Capítulo, sendo que o sinal seja detectado por pelo menos o número mínimo de sensores necessários pelos algoritmos de cálculo da localização de fonte estabelecido em cada equipamento de ensaio por emissão acústica [2, 5, 7, 9, 23, 31].

### **3.5.8**

#### **Equipamento e Material**

O equipamento e acessórios para a realização do ensaio por emissão acústica, conforme está representado na Figura 3.9, item 3.2 deste Capítulo [2, 5, 7, 9, 23, 31].

A instrumentação de medição de dados e de gravação deve ser capaz de medir os parâmetros já descritos nos itens 3.1.3 - Figura 3.5 e 3.2 - Figura 3.9 deste Capítulo como: contagem, amplitude, duração, tempo de subida e energia [2, 7, 9, 23, 31].

Não é permitido misturar ou combinar de maneira diferente os sinais de emissão acústica de diferentes sensores em um mesmo pré-amplificador [2, 23, 31].

O sistema de aquisição de dados deverá ter canais suficientes para prover a quantidade de sensor definida em 3.4 à distribuição da amplitude, por canal, é exigida para caracterização da fonte. A instrumentação deverá ser capaz de gravar os dados de emissão acústica medido por sinal e número de canal. O limite de referência (threshold) deve ser ajustado para um valor fixo de 40 dB, uma vez que a amplitudes do sinal de propagação de fratura frágil ocorre próximo deste valor,

o que já foi comprovado em experiências anteriores pela PAC e MONSATO [2, 7, 9, 23, 31].

O tempo e/ou a pressão devem ser mantidos e gravados como parte dos dados para avaliação do ensaio de emissão acústica. A pressão deve ser monitorada continuamente com exatidão de  $\pm 2\%$  da máxima pressão de ensaio [2, 9, 23, 31].

O instrumento do tipo analógico indicando a medida de pressão usado no ensaio deverá ser graduado numa faixa compreendida entre 1,5 a 4 vezes a pressão de ensaio e estar devidamente calibrado com padrões de reconhecimento nacional ou internacional [2, 7, 9, 23, 31].

O instrumento do tipo digital indicando a medida de pressão pode ser usado sem restrição de faixa provido do erro combinado, sendo que a calibração e a capacidade de leitura não excedam a 1% da pressão de ensaio [2, 7, 9, 23, 31].

### **3.5.9**

#### **Calibração do Sistema no Local**

Para cada ensaio de vaso ou série de ensaios, o desempenho de cada canal utilizado do equipamento de emissão acústica deve ser avaliado conforme descrito no item 3.3 deste Capítulo [2, 5, 7, 9, 23, 31].

Esta calibração deve ser realizada quando o ensaio de emissão acústica for realizado para uma quantidade de vasos de pressão cuja geometria é diferente ou quando o ensaio for realizado no mesmo local por um período acima de 8 horas de trabalho consecutivo [2, 5, 7, 9, 23, 31].

#### **3.5.9.1**

##### **Caracterização da Atenuação**

Um estudo de atenuação deve ser realizado com critério para determinar o espaçamento entre sensores. Este estudo é realizado conforme descrito no item 3.3 deste Capítulo.

### **3.5.9.2**

#### **Verificação de Desempenho do Sistema de Medição**

Uma verificação do acoplamento do sensor e continuidade do circuito para a transmissão dos sinais deve ser executada seguindo a montagem do sensor e o sistema de ligação e repetido imediatamente após o ensaio. A resposta do pico de amplitude de cada sensor para uma fonte de emissão acústica simulada reproduzível numa distância específica de cada sensor deverá ser feita antes e após o ensaio (ver item 3.3 – Caracterização da Atenuação). A medida do pico de amplitude não poderá variar mais que 4dB da média de todos os sensores. Qualquer canal reprovado neste teste deverá ser reparado ou substituído se necessário. Se durante qualquer teste é constatado que o equipamento de ensaio não está funcionando adequadamente, todo o dado obtido desde o último teste de desempenho considerado satisfatório do sistema deve ser reexaminado [2, 5, 7, 9, 23, 31].

### **3.5.10**

#### **Procedimento de Ensaio**

O vaso de pressão deve ser submetido a um incremento programado de níveis de solicitação, para um máximo pré-determinado, enquanto está sendo monitorado por sensores que detectam fontes de emissão acústica.

#### **3.5.10.1**

##### **Ruído de Fundo**

Ruídos externos devem ser identificados, minimizados e gravados conforme item 3.5.3 [2, 5, 7, 9, 23, 31].

Deve ser feita uma verificação do ruído de fundo antes de iniciar o carregamento conforme item 3.5.10.2 [2, 5, 7, 9, 23, 31].

O monitoramento de emissão acústica do vaso de pressão em relação aos níveis de ruído de fundo, durante as condições de ensaio pretendido e após o término do

teste de desempenho do sistema e antes da solicitação do vaso, é necessário para identificar e determinar o nível de sinais espúrios. Um período de monitoramento recomendado antes da solicitação do vaso de pressão é de 15 minutos. Se o ruído do fundo estiver acima do limite de referência de avaliação, a fonte de ruído deve ser eliminada ou a inspeção terminada [2, 5, 7, 9, 23, 31].

As fontes de ruído de fundo durante a inspeção mais comum para esta aplicação são [2, 5, 7, 9, 23, 31]:

- Líquido esguichando dentro do vaso;
- Taxa de pressurização muito alta;
- Bombas, motores e outros dispositivos mecânicos;
- Interferência eletromagnética;
- Ambiente (chuva, vento, etc.)

Vazamentos em vasos de pressão como válvulas, flanges e dispositivos de alívio de segurança podem mascarar os sinais de emissão acústica. Os vazamentos devem ser eliminados antes de continuar o ensaio [2, 5, 7, 9, 23, 31].

### **3.5.10.2**

#### **Pressurização do vaso**

As taxas de pressurização, equipamentos de pressurização e dispositivos de segurança devem estar estabelecidos, conforme recomendado no item 3.5.1.

A pressurização deve ser feita numa taxa que permitirá um ensaio com um mínimo nível de ruído de fundo externo ver item 3.5.3 e 3.5.10..

### **3.5.10.3**

#### **Seqüência de pressurização**

O ensaio deve ser realizado de acordo com procedimento escrito, onde devem estar definidas todas as etapas. Se os dados do primeiro carregamento indicam uma possível descontinuidade ou é inclusivo, o vaso deve ser pressurizado novamente de 50% a 100% da máxima pressão de ensaio. O período de patamares

para cada incremento dever ser de 10 minutos e para o último patamar deve ser no mínimo de 30 minutos [2, 5, 7, 9, 23, 31].

Durante o carregamento, a taxa de pressurização/carregamento não deve exceder 10% da máxima pressão de ensaio em 2 minutos [2, 5, 7, 9, 23, 31].

Para ensaios em serviço, 100% da máxima pressão de ensaio de emissão acústica equivale a um incremento de 10% da máxima pressão de operação ocorrida nos últimos 6 (seis) meses. Para ensaios fora da condição de serviço, 100% da pressão de ensaio equivale à pressão da prova de carga, como por exemplo, testes hidrostáticos e pneumáticos [5, 31].

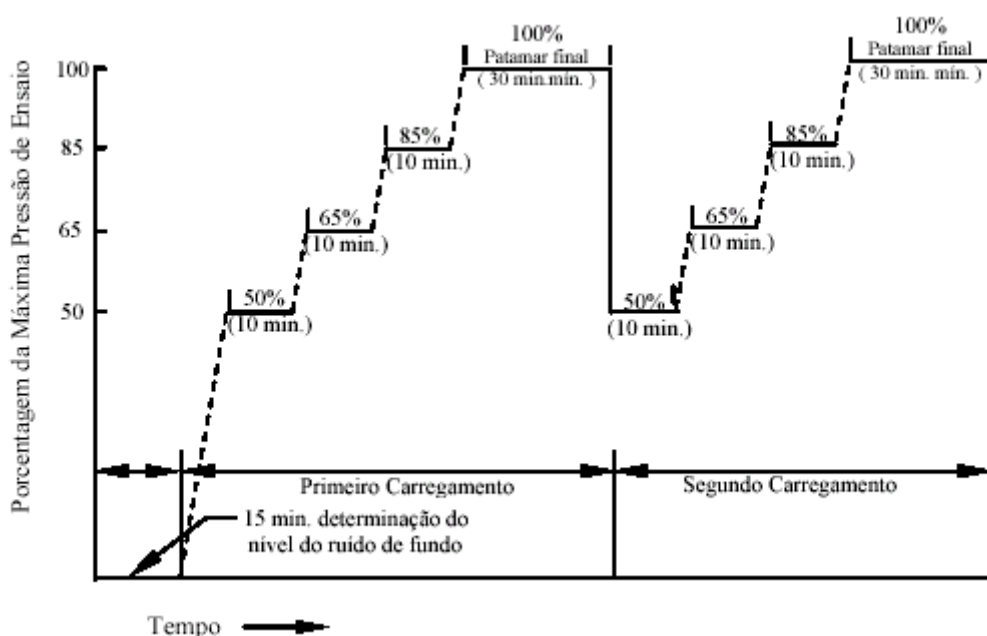


Figura 3.13: Exemplo da sequência de carregamento para ensaio de vaso de pressão [2, 5, 7, 9, 23, 31].

Normalmente, o ensaio de pressão causa uma resistência local em regiões de tensão secundária elevada. Esta resistência local é acompanhada por sinais de emissão acústica as quais não necessariamente indicam descontinuidades. Portanto, durante as provas de carga hidrostática é possível a detecção de atividades no primeiro ciclo. Estes sinais estão associados ao trabalho mecânico induzido pela pressão final de teste, normalmente muito superior a de operação ocorrida nos últimos anos. Nesta situação é normal a ocorrência de pequenas



fissuras superficiais, e a presença de atividade acústica próxima a regiões onde existem estas descontinuidades, pois estas atuam como concentradores de tensão promovendo uma redistribuição localizada, sem, contudo estarem associadas a um processo de crescimento sub-crítico de defeito. Os casos citados são caracterizados pela ausência de atividades durante o segundo ciclo.

Este comportamento também é notado, nas situações em que a prova de carga promove uma deformação plástica na extremidade de trincas, a qual evita o crescimento do defeito. Este caso é muito comum em vasos de pressão que não tiveram tratamento térmico após soldagem (alívio de tensões) [2, 5, 7, 9, 23, 31].

O vaso de pressão deve ser descarregado, despressurizado lentamente até que o medidor de pressão possa identificar pressão nula [2, 5, 7, 9, 23, 31].

#### **3.5.11**

##### **Critério de Avaliação**

O critério de avaliação, para o ensaio de emissão acústica conforme descrito no item 3.5 deste Capítulo é estabelecido diante de uma base para avaliar o significado dos sinais de emissão acústica coletados e arquivados. Estes critérios foram baseados numa série específica de condições de monitoramento de emissão acústica. O critério a ser usado deve estar especificado no procedimento de ensaio [2, 9].

Tabela 3.4: Exemplo de critério de avaliação para localização zonal [2].

Tipo de Vaso	Emissão Durante o Patamar	Taxa de Contagem	Número de Sinais	Sinais de Larga Amplitude	MARSE ou Amplitude	Atividade	Limite de Referência para Avaliação dB
(Primeiro Carregamento) Vasos de Pressão sem Tratamento Térmico após Soldagem	Não mais que $E_H$ sinais além do tempo $T_H$	Não aplicado	Não aplicado	Não mais que $E_A$ sinais acima da amplitude especificada	MARSE ou Amplitudes não aumentam com o incremento de carga	Atividade não aumenta com o incremento de carga	$V_{TH}$
Outros Vasos de Pressão que aqueles citados acima	Não mais que $E_H$ sinais além do tempo $T_H$	Menor que $N_T$ contagens por sensor para o incremento de carga especificado	Não mais que $E_T$ sinais acima da amplitude especificada	Não mais que $E_A$ sinais acima da amplitude especificada	MARSE ou Amplitudes não aumentam com o incremento de carga	Atividade não aumenta com o incremento de carga	$V_{TH}$

Notas: (a)  $E_H$ ,  $N_T$ ,  $E_T$  e  $E_A$  são os valores de critério de aceitação especificado;

(b)  $V_{TH}$  limite de referência de avaliação especificado;

(c)  $T_H$  tempo de patamar especificado;

Onde:

$E_H$  = energia no patamar;  $E_T$  = energia no tempo

$N_T$  = n° de contagens;  $E_A$  = energia acima da amplitude

$T_H$  = tempo de patamar  $V_{TH}$  = limite de referência

MARSE = energia relativa (E). Ver Figura 3.5 do Capítulo 3.

### 3.5.12

#### Documentação

O relatório de ensaio por emissão acústica deve conter no mínimo as seguintes informações [2, 9, 31]:

- (a) Identificação completa do vaso de pressão, incluindo tipo de material, método de fabricação, nome do fabricante e número de série;
- (b) Um desenho do vaso de pressão com dimensões e localização dos sensores;
- (c) O fluido de ensaio usado para a pressurização;
- (d) Temperatura do fluido de ensaio para preparação;

- (e) Seqüência da taxa de carga do ensaio, tempo dos patamares e níveis dos patamares;
- (f) Caracterização da atenuação e resultados;
- (g) Gravação das verificações de desempenho do sistema;
- (h) Correlação dos dados de ensaio como o critério de aceitação;
- (i) Desenho do vaso de pressão mostrando a localização de qualquer zona não em não conformidade com o critério de avaliação estabelecido;
- (j) Quaisquer efeitos ou observações anormais durante, ou antes do ensaio;
- (k) Data(s) do(s) ensaio(s);
- (l) Nome(s) e qualificações do(s) operador(es) do ensaio; e
- (m) Descrição completa do equipamento de emissão acústica utilizado, incluindo nome do fabricante, número do modelo, tipo do sensor, ajustes do instrumento, dados de calibração, etc.

O registro dos resultados do ensaio de emissão acústica deve conter no mínimo as seguintes informações:

- (a) Sinais de emissão acústica acima do limite de referência x tempo e/ou patamares de pressão para as zonas de interesse;
- (b) Energia x tempo e/ou patamares de pressão;
- (c) Relatórios escritos.

O relatório de emissão acústica deve ser mantido com outros registros do vaso de pressão, de modo que o mesmo possa ser utilizado para acompanhamento do historio quanto à avaliação de sua integridade estrutural.