

Taubaté, 03/09/16 a 10/12/16

## TTEM 018/16

### USO DE ONDAS MECÂNICAS EM ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NA AVIAÇÃO: O *TAP TEST* E O ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA

### APPLICATION OF MECHANICAL WAVES TO AVIATION NON-DESTRUCTIVE TESTING: TAP TESTING AND ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE

Signatários:

- Vinícius Costa e Silva<sup>1</sup>
- Stephany de Barros Camargo<sup>2</sup>
- Prof. Dr. José Rubens de Camargo – Universidade de Taubaté
- Prof. Dr. Wendell de Queiroz Lamas – Universidade de São Paulo
- Prof. Dr. Francisco José Grandinetti – Universidade de Taubaté/FEG-UNESP

Finalidade: Análise da aplicação de técnicas baseadas em ondas mecânicas (*tap test* e emissão acústica) em ensaios não destrutivos (END) na aviação.

Duração: 3 meses.

1 – Aluno do curso de Especialização em nível de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica da Universidade de Taubaté (UNITAU/SP) – [vinicius\\_c\\_s@hotmail.com](mailto:vinicius_c_s@hotmail.com)

2 - Aluna do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté – (UNITAU/SP) – [stephanycamargo@live.com](mailto:stephanycamargo@live.com)

Palavras chave: Ensaio não destrutivo, *tap test*, emissão acústica.

**Resumo.** O presente trabalho técnico visa oferecer um panorama dos conceitos e da utilização de dois ensaios não destrutivos não convencionais baseados na propagação de ondas mecânicas: o *tap test* e o ensaio de emissão acústica que, embora não tão conhecidos quanto o ensaio de ultrassom, possuem características de grande valor para algumas aplicações. O trabalho utiliza como embasamento publicações que tratam de conceituação e utilização dos dois ensaios para resumir a fundamentação teórica das técnicas e apresentar suas formas de aplicação, bem como algumas aplicações concretas já realizadas. O *tap test* é apresentado como uma técnica já estabelecida e com um nicho bem definido de aplicação na manutenção de aeronaves e o ensaio de emissão acústica como uma técnica mais recente, mas com algumas aplicações já documentadas e muito potencial de ampliação de seu uso na aviação.

## 1. INTRODUÇÃO

Diversas aplicações industriais empregam equipamentos críticos do ponto de vista financeiro ou de segurança e, por isso, demandam atividades de manutenção preventiva, já que o prejuízo causado por sua falha em serviço pode ser grave ou até mesmo irreparável.

Dentre as atividades de manutenção preventiva mais utilizadas, os ensaios não destrutivos figuram como uma das mais importantes, abrangendo desde técnicas simples, como a inspeção visual, até técnicas mais complexas, como a termografia. As técnicas empregadas fazem uso de fenômenos físicos como emissão de radiação eletromagnética visível ou não visível, emissão de ondas mecânicas, deformação de campos magnéticos, etc.

Este trabalho técnico tem como objetivo oferecer um panorama dos conceitos e da utilização de duas técnicas de ensaios não destrutivos cuja característica em comum entre elas é a análise de ondas mecânicas projetadas sobre ou emitidas pelas peças ensaiadas. A metodologia utilizada consistirá em, partindo dos conceitos fundamentais associados às ondas mecânicas e aos ensaios não destrutivos, analisar cada uma das técnicas, com ênfase nos procedimentos, nos resultados esperados e nas aplicações práticas.

## 2. ONDAS MECÂNICAS

Ondas mecânicas são fenômenos oscilatórios decorrentes da propagação de energia mecânica ao longo de um corpo sólido ou meio fluido, ou entre corpos distintos. Quando uma força atua em um corpo ou meio deformável, as partículas situadas na região do ponto de aplicação da força se deslocam e atingem as partículas mais próximas. Como resultado da colisão e das forças de atração e repulsão interatômicas, as partículas inicialmente afetadas tendem a retornar à sua posição inicial e a energia comunicada a elas pela força se propaga por meio de novas colisões entre as próximas partículas e as seguintes. A propagação de energia por meio da oscilação de posição das partículas de um meio é chamada de onda mecânica, e suas características dependem das características do estímulo recebido (duração, intensidade, frequência, etc.) e do meio por onde se propagam. A figura 1 ilustra de maneira simplificada a propagação de uma onda mecânica no ar.

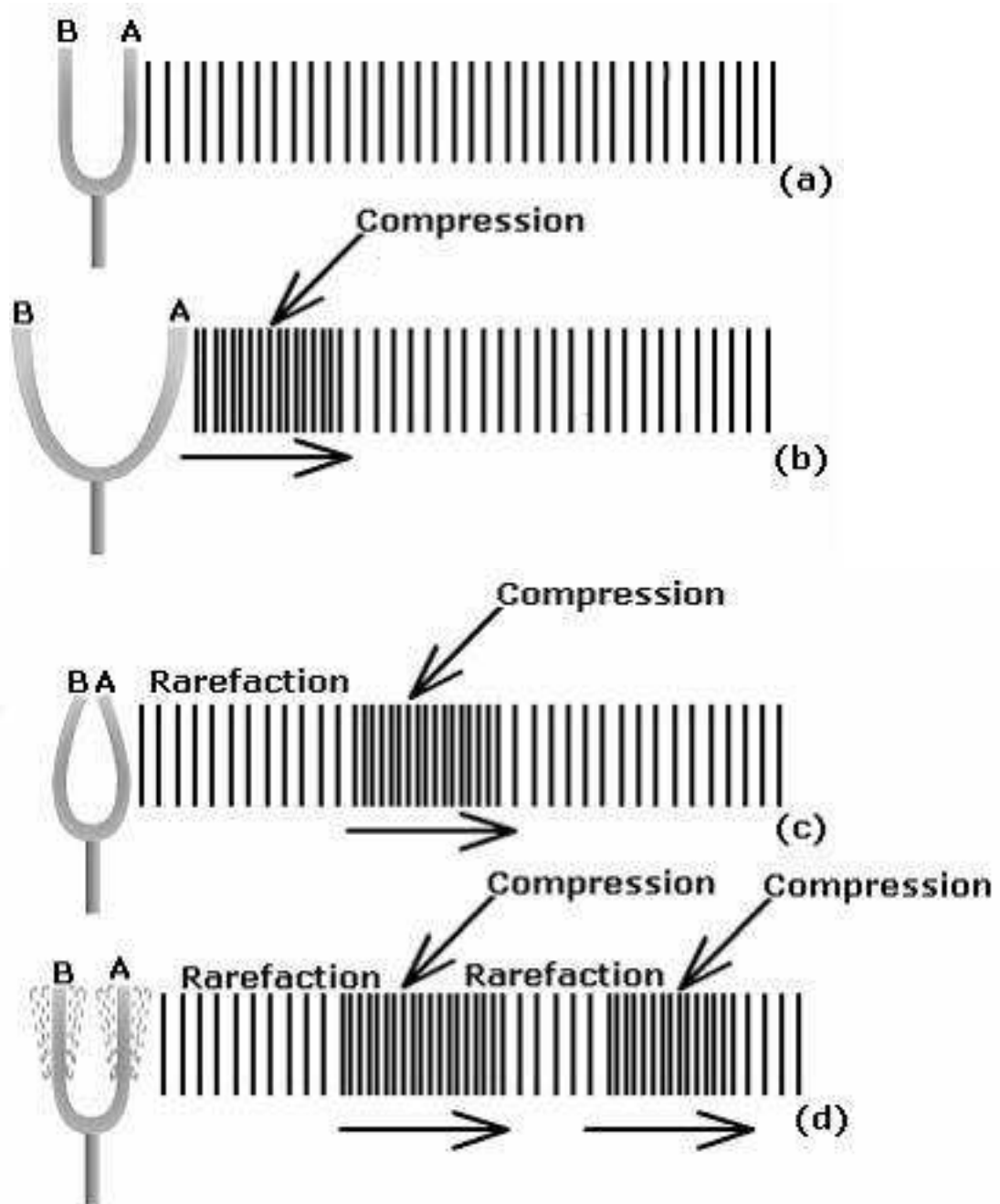


Figura 1 – Propagação de uma onda mecânica no ar, originária de um corpo sólido: (a) Corpo em repouso; (b) A deformação do corpo gera uma região de compressão do ar ao seu redor; (c) A compressão afeta as partículas próximas e uma rarefação se forma na região das primeiras partículas afetadas; (d) Enquanto durar a vibração no corpo, regiões adjacentes de compressão e rarefação são geradas e propagadas no ar. Extraída de [www.tutorvista.com](http://www.tutorvista.com).

Ao atravessar a fronteira entre dois meios distintos, é comum que uma onda mecânica tenha sua velocidade e frequência alteradas, devido aos diferentes valores das forças intermoleculares do novo meio de propagação em relação ao anterior.

### 3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os ensaios não destrutivos (END) são testes qualitativos executados sobre produtos para avaliar se há algum defeito oculto ou alteração das características do produto que contribua para a diminuição de sua confiabilidade. Esse tipo de ensaio visa avaliar o produto sem que suas características mecânicas sejam alteradas ou sua utilidade futura seja diminuída no processo.

Algumas dos principais defeitos que se busca identificar com os END são rachaduras de fadiga, de escoamento e danos causados por corrosão (estruturas metálicas), ou delaminação e descolamento (materiais compósitos). Dado que as descontinuidades podem surgir em diversas profundidades e com tamanhos variados, para cada tipo, extensão e profundidade há um conjunto de técnicas mais apropriadas. Por isso, é essencial que o escopo do teste seja bem caracterizado e as características do desgaste esperado para o produto em serviço sejam bem conhecidas.

Os métodos de ensaios não destrutivos mais comumente utilizados na indústria aeronáutica são inspeção visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, *eddy current*, ultrassom e radiografia. Cada uma das técnicas é indicada de acordo com a natureza do material e a profundidade das descontinuidades a serem detectadas. A tabela 1 lista algumas características das técnicas.

| Técnica               | Profundidade das descontinuidades        | Limitações  |
|-----------------------|--|---|
| Inspeção visual       | Superficiais                             | Demanda acesso visual à peça, iluminação suficiente e possui baixa sensibilidade.   |
| Líquido penetrante    | Descontinuidades com acesso à superfície | Reinspeção não admite mudança de método, sujeito a falsas indicações em peças mantidas unidas por pressão.  |
| Partículas Magnéticas | Superficiais                             | Aplicável apenas a materiais magnetizáveis, demanda avaliação de diversas características da peça e circunstâncias do ensaio para produzir resultados confiáveis. |
| <i>Eddy current</i>   | Superficiais e subsuperficiais           | Aplicável apenas a materiais condutivos e a peças com baixa espessura.  |
| Ultrassom             | Subsuperficiais e profundas              | Exige a utilização de padrões de referência e a elaboração de procedimentos exige profundo conhecimento técnico.  |
| Radiografia           | Subsuperficiais e profundas              | Método caro, cuja aplicabilidade pode ser limitada pela dificuldade de posicionamento do filme radiográfico.  |

**Tabela 1 – Algumas características dos END mais utilizados na indústria aeronáutica.**

As técnicas de END podem ser classificadas como ativas, quando exigem que se aplique alguma substância ou forma de energia sobre a peça ensaiada para se obter um resultado caso um defeito esteja presente, ou passivas, quando consistem em monitorar a peça em situações de carregamento normal de trabalho ou de teste para tentar identificar defeitos a partir de alguma reação da peça.

#### 4. TAP TEST

O *tap test*, também conhecido como técnica de impacto acústico, é uma técnica ativa que consiste em golpear leve e repetidamente a peça ensaiada, com um objeto apropriado, para produzir onda mecânica audível e, a partir de sua análise, detectar a presença de defeitos na peça.

Para cada produto aeronáutico a ser ensaiado e em cada ensaio a ser realizado, o fabricante especifica algumas características da ferramenta a ser utilizada para golpear a peça. Em geral, a característica desejável para a ferramenta é ter rigidez suficiente para produzir vibrações analisáveis e dureza suficientemente baixa para não danificar a peça ensaiada. Por isso, é possível utilizar pequenos martelos metálicos para fazer os ensaios e não raro o fabricante informa que uma moeda comum é suficiente para realizar determinado ensaio.

O *tap test* é visto por alguns como uma técnica rudimentar, mas continua sendo empregada devido ao seu baixo custo e facilidade de aplicação. A técnica costuma ser empregada em peças constituídas por materiais compósitos, devido à facilidade de produzir sons em intensidade apreciável para o teste e à natureza das descontinuidades encontradas nesses materiais. As descontinuidades mais comuns a se detectar por meio da técnica são o descolamento de adesivos utilizados para unir peças de material compósito e o descolamento entre camadas de uma peça formada por esse tipo de material (delaminação). A figura 2 ilustra o uso da técnica com uma moeda para identificação de delaminação.

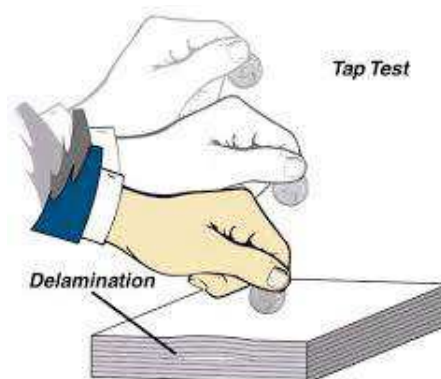


Figura 2 – Utilização de uma moeda para realização do *tap test*, extraída de [www.eaa.org](http://www.eaa.org).

#### 4.1 APLICAÇÃO DA TÉCNICA

Para realizar o teste, é necessário um padrão para o som produzido por uma peça em condição boa para uso e um padrão para o som produzido por uma peça defeituosa. Em geral, uma região defeituosa produz um som com frequência inferior à produzida por uma região sem defeitos.

Como exemplo da aplicação do *tap test* na manutenção de aeronaves, pode-se citar a tarefa de inspeção do adesivo que mantém o revestimento das pás do rotor principal, prevista para helicópteros do modelo Robinson R22 no boletim de serviço SB-103A. A figura 3 traz a descrição da tarefa no Boletim de Serviço, com a exigência da realização do *tap test* contida na segunda instrução do procedimento.

A técnica do *tap test* é recomendada para identificar descontinuidades em camadas finas de revestimentos, sendo necessário realizar o teste nos dois lados da peça caso se trate de estrutura mais espessa, como é o caso de estruturas em colmeia.

**ROBINSON  
HELICOPTER COMPANY**

2801 Airport Drive, Torrance, California 90505

Phone (310) 539-0508 Fax (310) 539-5198

Page 1 of 3

**R22 SERVICE BULLETIN SB-103A**  
(supersedes R22 SB-103)

**DATE:** 30 April 2010

**REVA:** 19 July 2012

**TO:** R22 owners, operators, and maintenance personnel

**SUBJECT:** Main Rotor Blade Bond Inspection

**ROTORCRAFT AFFECTED:** R22-series helicopters with A016-4 main rotor blades.

**TIME OF COMPLIANCE:** Every four months, 100-hour inspection, or annual inspection, whichever occurs first.

**BACKGROUND:** Debonding of rotor blade skins can occur when the bond line is exposed due to erosion of the blade finish, or when corrosion occurs on the internal aluminum tip cap. Proper inspection and protection (refinishing) of bonded areas is required. Debonding resulting from improper inspection and maintenance could cause a catastrophic accident.

**COMPLIANCE PROCEDURE:**

**NOTE**

To facilitate inspection, blade may be teetered down, collective fully raised, and cyclic stick positioned to apply maximum up pitch.

1. Refer to Figures 1 and 2. Remove both main rotor blade tip covers and clean the blades. Clean and remove any corrosion from tip covers.
2. Using 10x magnification, visually inspect uncovered skin-to-tip cap bond joints. Using a 1965-or-later United States quarter-dollar coin, tap test skin-to-tip cap bond joints on both upper and lower surfaces. If corrosion, separation, or voids are detected, blade is unairworthy. A tap test tutorial video is available on our website, [www.robinsonheli.com](http://www.robinsonheli.com), under the Publications tab.
3. Using 10x magnification, visually inspect any exposed skin-to-spar bond line for gaps (empty space between skin and spar). Blade is unairworthy if any gap, including "pin hole(s)", is detected in the bond line.
4. Refer to Figure 2. Mark outboard 120 inches of blade lower surface as shown to identify skin-to-spar bond joint area.

(OVER)

Figura 3 – Boletim de serviço SB-103A (Página 1/3), extraída de [6].

## 5. EMISSÃO ACÚSTICA

Emissão acústica é uma técnica de ensaio não destrutivo que consiste em monitorar uma peça em suas condições de carregamento de trabalho para detectar a formação e a propagação de descontinuidades no material.

Quando uma descontinuidade está presente em uma peça, energia é liberada na forma de ondas mecânicas conforme a peça é submetida a esforços em condições de trabalho. As ondas emitidas geralmente possuem frequência na faixa de 150 a 300 kHz, por isso a técnica consiste em utilizar sensores de ultrassom (transdutores piezoelétricos) dispostos ao longo da peça para captar essas ondas e convertê-las em uma tensão elétrica, que é amplificada eletronicamente e convertida em dados, que são processados de acordo com sua localização, tensão e frequências contidas. O método, portanto, se diferencia de grande parte dos outros END por ser um método passivo.

A emissão acústica produzida por uma peça metálica em serviço é consequência de deformações plásticas sofridas por ela, e pode ter duas fontes principais: a quebra de material incrustado na peça ou a formação de rachaduras na estrutura metálica. Quando a emissão acústica é produzida pela quebra de materiais mais frágeis que acabaram incrustados na peça durante sua fabricação, a emissão produzida possui menor amplitude do que aquela produzida por rachaduras na estrutura metálica, sendo essa última de maior importância para o END.

O estudo das emissões produzidas por materiais que sofreram deformações plásticas em serviço permitiu chegar às seguintes conclusões, amplamente utilizadas na análise dos dados obtidos em ensaios:

- As emissões produzidas são impulsos curtos, portanto carregam energia em uma ampla faixa de frequências.
- A amplitude da onda resultante depende da intensidade e da velocidade do evento original: a emissão produzida por uma trinca formada em um evento rápido e discreto possui amplitude maior do que aquela produzida por uma trinca de mesmo tamanho formada em um processo lento e contínuo.
- A deformação plástica reorganiza a distribuição de tensões no interior de uma peça, transferindo para outras regiões o carregamento que produziu a deformação. Por isso, a emissão produzida uma vez não é produzida novamente se a peça é descarregada e então carregada até a intensidade de carregamento anterior. Esse fenômeno é observado em regiões sem defeitos ou em regiões com defeitos insignificantes, sendo conhecido como efeito Kaiser.
- Em defeitos estruturalmente significantes, novos carregamentos da peça produzem novas emissões acústicas em valores de carregamento inferiores ao máximo já aplicado à peça. Esse é o chamado efeito Felicity.

Outro aspecto importante para o estudo da emissão acústica é a atenuação sofrida pela onda conforme viaja pela peça: as características geométricas da peça, as características de absorção do material e as fronteiras estruturais encontradas pela onda em seu caminho contribuem para reduzir a amplitude da onda.

## 5.1 CADEIA DE CONFORMAÇÃO DO SINAL E IDENTIFICAÇÃO DE *HITS*

As emissões acústicas produzidas pela deformação plástica de peças carregadas possuem componentes em uma ampla banda de frequências, sendo por isso consideradas sinais de banda larga. Por isso, na captação e interpretação desses sinais é possível utilizar sensores com frequência de resposta em banda larga ou sensores com frequência de resposta em banda estreita, os chamados sensores ressonantes.

Embora todas as frequências abrangidas contêm alguma informação útil a respeito do sinal emitido pela peça, há muita interferência e ruído nas faixas de frequência mais baixas e sensores com resposta em banda larga costumam ser mais caros e menos sensíveis do que sensores ressonantes. Devido a esses fatores, a maioria das aplicações práticas utilizam sensores ressonantes de alta frequência.

Uma vez definidos os sensores a partir da faixa de frequências desejada para o ensaio, é possível construir a chamada cadeia de conformação do sinal (do inglês *signal shaping chain*), um modelo que leva em consideração a emissão acústica produzida pelo surgimento ou crescimento de uma descontinuidade na peça ensaiada, o sinal produzido pela propagação dessa emissão na estrutura da peça, o sinal produzido pelos sensores utilizados para medir a emissão e o sinal que será interpretado no ensaio, que é obtido após amplificação e filtragem dos sinais produzidos pelos sensores. A figura 4 mostra um esquema da cadeia de conformação do sinal, com as respostas de cada etapa exibidas no domínio da frequência e no domínio do tempo.

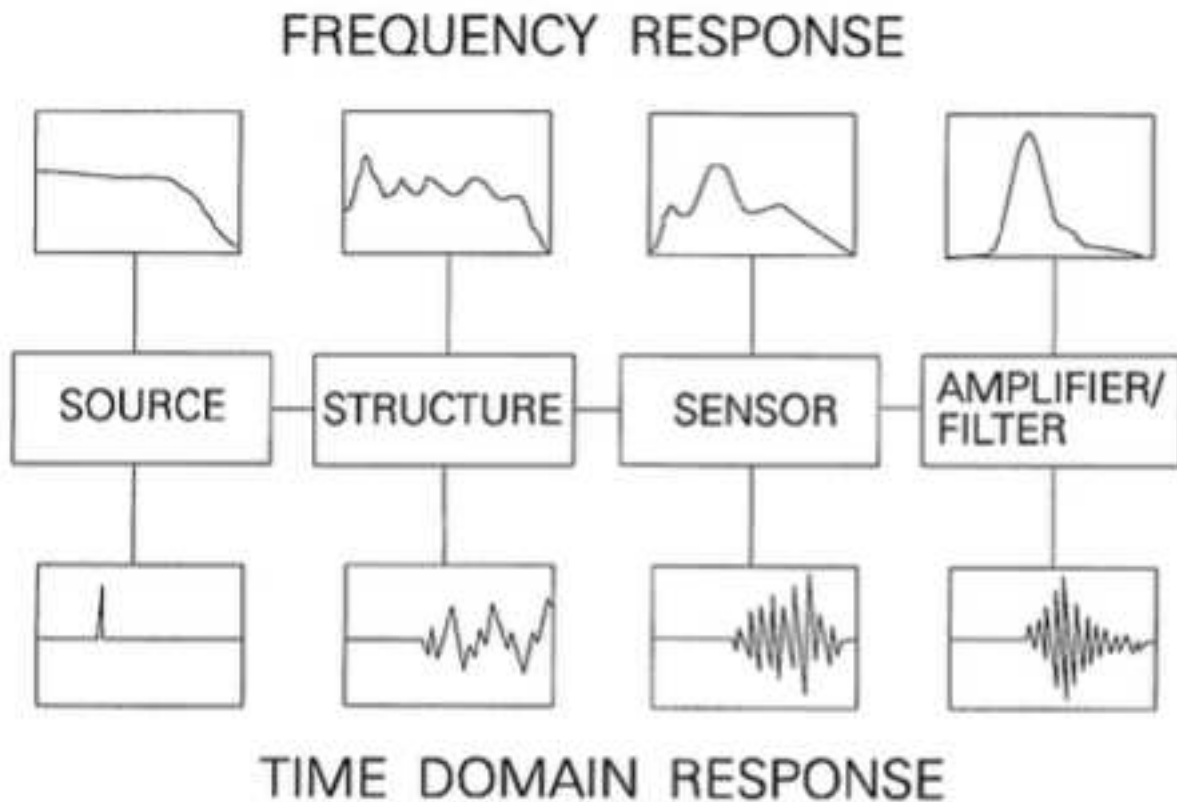


Figura 4 – Cadeia de conformação do sinal, extraída de [3].



Um evento de emissão acústica tem curta duração e abrange uma faixa ampla de frequências, com amplitude similar em grande parte delas. A onda mecânica gerada no evento de emissão propaga-se pela peça, produzindo um efeito de maior duração e com amplitude acentuada em alguns valores de frequência, em função das características da peça. O efeito local da propagação da onda é captado pelo sensor, que produz uma resposta de curta duração com amplitude acentuada em sua faixa de maior sensibilidade. Por fim, o sinal produzido pelo sensor é amplificado e filtrado, produzindo um sinal interpretável na região de frequências de interesse do ensaio, que é chamado de sinal condicionado.

O sinal condicionado é submetido então à entrada de um circuito comparador que produz um pulso digital toda vez que o sinal ultrapassa um valor limiar de tensão. O primeiro pulso gerado pelo circuito comparador marca o início de um sinal chamado de *hit*, que marca a ocorrência de um evento relevante para um ensaio. O sistema de captação e registro do sinal condicionado continua a registrar o sinal recebido como parte de um *hit* até que se passe um intervalo de tempo pré-definido (HDT – *hit definition time*) sem que nenhum pulso seja produzido, o que marca o fim do *hit*, que poderá então ser processado e interpretado.

## 5.2 ARQUITETURA BASEADA EM HITS

A atividade de monitoramento contínuo realizado por um sistema de ensaios de emissão acústica pode se mostrar cara em termos de energia ou de capacidade de armazenamento de dados. Para reduzir esses gastos, é utilizada uma arquitetura de sistema conhecida como arquitetura baseada em *hits* (do inglês *hit-based architecture*).

A arquitetura baseada em *hits* consiste em manter o sistema inativo enquanto o circuito comparador não recebe um valor acima do limiar pré-estabelecido, iniciando um *hit*. Quando isso ocorre, o pulso inicial ativa a captação e o armazenamento do sinal. Após finalizado, o *hit* é armazenado em uma pequena quantidade de bits e procede-se à sua interpretação, ao final da qual o sistema é retornado ao seu estado de dormência.

## 5.3 POSICIONAMENTO DE SENSORES E IDENTIFICAÇÃO DA FONTE

O posicionamento dos sensores depende do objetivo do ensaio: é possível utilizar uma pequena quantidade de sensores dispostos ao redor de uma região na qual se suspeita que haja um defeito, utilizar uma quantidade de sensores espalhados de forma que toda parte da peça seja monitorada por ao menos um sensor, ou utilizar a técnica conhecida como localização de fonte por múltiplos canais (do inglês *multichannel source location technique*).

A técnica de localização de fonte por múltiplos canais consiste em dispor sensores com um posicionamento tal que um mesmo evento seja registrado por vários sensores. A partir da resposta de cada sensor, é possível identificar o hit de cada sensor que corresponde a um determinado evento ocorrido e estimar a distância da fonte do evento até cada sensor que o detectou. Cada distância estimada permite traçar uma circunferência com centro no sensor correspondente e a interseção das circunferências marca a localização mais provável do defeito correspondente. A figura 5 ilustra a triangulação estabelecida para identificar a localização da fonte de uma emissão a partir da leitura de três sensores.

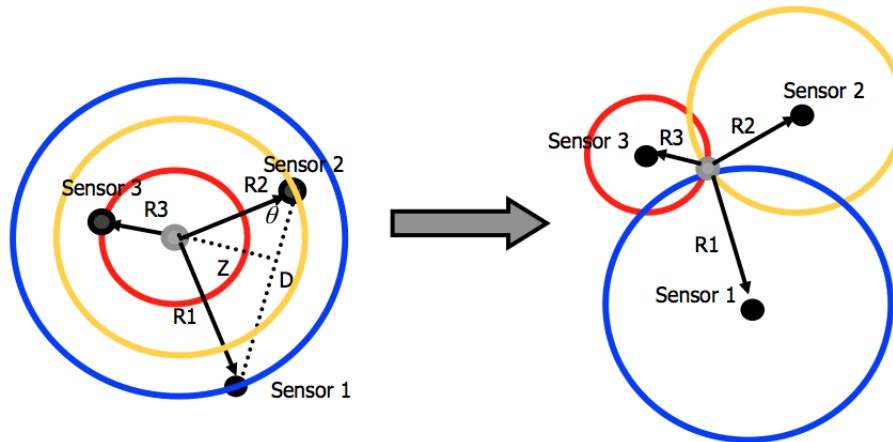


Figura 5 – Localização de fonte a partir de três sensores, modificada de [www.muravin.com](http://www.muravin.com).

## 5.4 APLICAÇÃO DA TÉCNICA

O ensaio não destrutivo por emissão acústica é utilizado na aviação predominantemente em testes de resistência a fadiga de chapas e elementos estruturais, durante etapas de projeto ou no aperfeiçoamento de projetos já existentes. A técnica não é empregada na manutenção de aeronaves em virtude de ser economicamente inviável até o momento operar aeronaves com a carga adicional de sistemas utilizada para os ensaios, que demandaria espaço da aeronave para ser instalada e prejudicaria seu desempenho.

Dentre as aeronaves nas quais há registros de ensaios de emissão acústica, pode-se citar a aeronave militar F-15 e a aeronave civil Airbus A340-600.

## 6. CONCLUSÃO

O trabalho técnico realizado permitiu conhecer algumas técnicas de ensaios não destrutivos não convencionais que empregam ondas mecânicas para detectar a presença de defeitos em estruturas de aeronaves. Apesar de não terem um uso tão comum quanto a técnica de ultrassom, cada uma delas possui suas vantagens e possibilidades reais de aplicação na indústria de aviação: a utilização de ensaios de emissão acústica vem crescendo ao longo dos anos devido à sua capacidade de monitoramento global e à possibilidade de identificar defeitos em formação, e o *tap test* parece ter seu espaço garantido por muito tempo devido ao baixo custo e à facilidade de execução.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Beatie, A. G., *Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2013.

[2] Finlayson, R. D. et al., *Health Monitoring of Aerospace Structures with Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonics*, 15th World Conference on Nondestructive Testing, Roma, 2000.

- [3] Hellier, C. J., *Handbook of Nondestructive Evaluation*, Second Edition, McGraw-Hill Professional, 2013.
- [4] International Atomic Energy Agency, *Non-Destructive Testing: A Guidebook For Industrial Management And Quality Control Personnel*, IAEA, Vienna, 1999.
- [5] Staszewski, W. et al., *Health Monitoring of Aerospace Structures*, First Edition, John Wiley & Sons, 2004.
- [6] [http://www.robinsonheli.com/rhc\\_r22\\_service\\_bulletins.html](http://www.robinsonheli.com/rhc_r22_service_bulletins.html)

## 8. COMUNICADO DE RESPONSABILIDADE

O autor é o único responsável pelo material pesquisado.

**Abstract.** The present study offers an overview of the theoretical concepts and applications of two non-destructive testing techniques that rely on the propagation of mechanical waves through a medium: the tap test and the acoustic emission technique. Both techniques, although not as well known as the ultrasound technique, possess features that produce great results when put to use on some applications. The study bases itself upon a few other technical publications in order to summarize the theoretical basis of the techniques and present the ways in which they may be used, as well as list a few of their applications developed so far. Tap testing is thus presented as a well-established technique that finds its proper niche on aircraft maintenance, and the acoustic emission technique as a more recent method with some of its applications already documented and a great potential yet to be realized in the aviation industry.