



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

EDUARDO GONNELLI

*Estudo e aplicação da técnica de Vibroacustografia em
Ensaaios Não Destrutivos.*

Botucatu - SP
2010

EDUARDO GONNELLI

*Estudo e aplicação da técnica de Vibroacustografia em
Ensaio Não Destrutivo.*

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Biociências
da Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho” para
obtenção do Título de Bacharel em
Física Médica

Orientadores

Prof. Dr. Antonio Adilton Oliveira Carneiro

Prof. Dr. José Ricardo de Arruda Miranda

Botucatu - SP
2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA INFORM.
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CAMPUS DE BOTUCATU - UNESP
BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: *ROSEMEIRE APARECIDA VICENTE*

Gonnelli, Eduardo.

Estudo e aplicação da técnica de vibroacustografia em ensaios não destrutivos / Eduardo Gonnelli. - Botucatu, 2010

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Física Médica) - Instituto de Biociências de Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 2010

Orientador: Antonio Adilton Oliveira Carneiro

Capes: 31300006

1. Ultra-som. 2. Testes não-destrutivos.

Palavras-chave: Ensaios não destrutivos; Ultrassom; Vibroacustografia.

Agradecimentos

Agradeço minha família pelo incentivo e pela oportunidade dada em poder realizar um curso de graduação. À minha mãe que sempre orou por mim e pela sua dedicação e amor pelos filhos. Aos meus avós que sempre me orientam e com a experiência de vida que tiveram me ensinam distinguir o certo do errado sempre dando muito valor à vida. Ao meu pai por ser uma pessoa muito atenciosa e que sempre me deixou ser livre nas minhas escolhas.

Aos professores José Ricardo de Arruda Miranda e Antonio Adilton Oliveira Carneiro, pela orientação, incentivo e oportunidade. Por terem acreditado no meu potencial e na minha capacidade como aluno.

À equipe do laboratório GIIMUS (Grupo de Inovação em Imagens Médicas e Ultrassom) de Ribeirão Preto, local onde foi possível realizar e concretizar esse trabalho. Ao colega Baggio, pela ajuda e incentivo para sempre fazer o melhor possível.

À Republica BGD, local onde residi por quase toda a graduação, onde a amizade e a união dos moradores formam uma verdadeira família.

À banda Grau Etílico, uma experiência única de determinação e superação. Aos sons realizados em Botucatu e região, sempre com muito bom humor, seriedade e alto bom som.

Ao meu irmão, Orlando Netto, pessoa a qual admiro e que me fez enxergar e adentrar no fascinante mundo da física.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

Prefácio

O estágio de conclusão de curso deve ter a função de complementar a formação acadêmica do aluno e aprimorar a sua formação intelectual e profissional, seja na iniciação científica ou na instrumentação. Descrevo aqui um pouco da minha vivência como estagiário num período de seis meses em um laboratório de instrumentação em imagens médicas e ultrassom.

O laboratório em questão chama-se GIIMUS, Grupo de Inovação em Imagens Médicas e Ultrassom, que cedeu seu espaço para a minha permanência durante esse período e para o desenvolvimento das minhas atividades e aprendizagem. Nele realizam-se pesquisas com transdutores biomédicos, processamento de sinais e imagens médicas, desenvolvimento e caracterização de materiais simuladores de tecido biológico e de técnicas para aplicações ultrassônicas.

Inicialmente pude acompanhar como é a rotina de um laboratório de física experimental, auxiliar na manutenção do laboratório, entender o funcionamento e os princípios físicos dos equipamentos utilizados, como, por exemplo, geradores de funções, amplificadores do tipo Lock-in, Pulse/Receiver, Amplificadores, Osciloscópios, Transdutores e alguns softwares para o processamento de dados, como o MatLab™ e softwares para automação de sistemas e aquisição de dados, como o LabView™.

O laboratório é composto por vários pesquisadores com titulação de mestrado e doutorado e alunos de iniciação científica da graduação. Todos os membros fazem parte de um grupo de discussões e de seminários, que visam discutir a respeito dos problemas envolvidos em suas pesquisas, dos resultados adquiridos e das técnicas empregadas. Os seminários são ministrados semanalmente por cada aluno, e os tópicos abordados são referentes aos métodos e as técnicas adotadas na pesquisa em questão, tentando sempre buscar soluções inovadoras. Participei dessas reuniões e das discussões, que enriqueceram o meu modo de redigir uma apresentação, como aproveitar as críticas e sugestões dos professores e colegas e, principalmente, como se comportar diante de uma situação problemática durante um experimento. Juntamente com as reuniões do grupo, também freqüentei o ciclo de palestras direcionadas para a pós-graduação do departamento. Onde que a cada semana um profissional conceituado e renomado abordava um tema referente à área da física. Este ciclo me ajudou a ficar inteirado sobre as novas tecnologias e linhas de pesquisas.

Dentre as linhas de pesquisas do laboratório, acompanhei a realização de algumas medidas, sendo elas: Utilização de um transdutor híbrido para medidas suceptométricas e ultrassônicas simultaneamente, Medidas in vivo de Ressonância Magnética funcional (RMf) para o estudo de epilepsia, Estudo teórico de Elastografia, e a utilização da Vibroacustografia para caracterização de materiais simuladores do corpo humano. Este acompanhamento me deu uma nova abordagem nos tópicos de Biomagnetismo, Ressonância Magnética e Ultrassonografia. O meu objetivo principal era um direcionamento para área de ultrassom, e simultaneamente me envolvi em outras áreas da Física Médica, ampliando meus conhecimentos. Devido ao objetivo principal, procurei assistir algumas aulas da matéria de Ultrassom, ministrada pelo Prof. Dr. Antonio Adilton Oliveira Carneiro, que me recebeu muito bem e apoiou a ideia.

Além do acompanhamento de medidas, também desenvolvi um experimento envolvendo a técnica de Vibroacustografia. Descrevo a seguir o motivo pelo qual foi desenvolvido este trabalho, juntamente com uma revisão bibliográfica, seguida da metodologia empregada. Os resultados e as discussões estão no final deste trabalho.

Eduardo Gonnelli

Resumo

A presença de falhas, trincas, furos e fadigas causam perturbações nos modos vibracionais (normais) de uma estrutura, por exemplo, tubos, gasodutos e peças metálicas. Uma vez conhecido o espectro de frequência de uma estrutura instalada em condições normais (sem falhas), é possível acompanhar através, de ensaios não destrutivos uma alteração no espectro de frequência que pode estar associado a alguma falha mecânica na estrutura. O presente trabalho busca encontrar um padrão nos sinais de resposta dos materiais analisados pela técnica de Vibroacustografia, antes e depois das deformidades causadas. Tentando viabilizar a técnica para a utilização em Ensaios Não Destrutivos (END). E futuramente, para as amostras biológicas, espera-se estender os conhecimentos obtidos dos ensaios anteriores para detecção e prevenção de possíveis fraturas do tecido ósseo.

SUMÁRIO

1 - Introdução	p. 10
1.1 - Ensaios Não Destrutivos	p. 11
1.2 - Ultrassom	p. 12
1.3 - Vibroacustografia	p. 15
2 - Materiais e Métodos	p. 19
3 – Resultados	p. 22
4 - Discussão	p. 26
5 - Conclusão	p. 27
6 - Referências Bibliográficas	p. 28

1 - Introdução

O transporte duto viário é o modo de transporte que utiliza um sistema de dutos (tubos ou cilindros previamente preparados para determinado tipo de transporte), formando uma linha chamada de dutovia ou via composta por dutos onde se movimentam produtos de um ponto a outro. Permitindo o transporte de produtos a longas distâncias como petróleo bruto, gás e minérios. Os dutos são tubos subterrâneos impulsionados por bombeamento para superação dos obstáculos do relevo. Esse sistema de transporte diminui consideravelmente o congestionamento das rodovias e ferrovias; São exemplos de dutos: oleoduto, gasoduto, mineroduto, aquaduto.

Historicamente as tubulações já eram conhecidas como meio de transporte de líquidos desde a Antiguidade (os chineses com bambus, os egípcios e astecas em material cerâmico e os gregos e romanos empregavam tubos de chumbo). Entre os meios de transporte utilizados, os oleodutos tornaram-se um meio de transporte preferencial tanto para atender ao abastecimento das refinarias como suprir a necessidade dos grandes centros de consumo de derivados.

O sistema de dutos é o meio mais seguro e econômico de se transportar petróleo e seus derivados, interligando regiões produtoras, plataformas, refinarias, terminais marítimos, parques de estocagem e os centros consumidores. O sistema de transporte por dutos contribui ainda para aumentar a segurança nas estradas e diminuir a poluição causada pelo tráfego pesado das carretas (só o oleoduto de Belo Horizonte, por exemplo, possibilitou retirar das estradas aproximadamente 1000 carretas por dia). Estes e outros aspectos deixam claro que, investir na ampliação, modernização e confiabilidade operacional da malha dutoviária brasileira é fundamental para atender às necessidades e exigências cada vez maiores do mercado consumidor de petróleo e seus derivados. [1,2]

Tendo em vista a importância dos benefícios e a necessidade da ampliação dessa malha, fica evidente a prioridade em investimentos financeiros, na pesquisa e no treinamento de profissionais qualificados responsáveis pela sua manutenção e conservação, assegurando um funcionamento adequado da malha dutoviária, prevenindo acidentes, gastos desnecessários e contribuindo para o seu desenvolvimento.

As inspeções realizadas em unidades metálicas, denominadas de ensaios não destrutivos (END), são amplamente utilizadas nos setores: industrial, petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico, naval, autopeças e transporte rodoviário e ferroviário, e têm como finalidade promover o controle de qualidade, prevenir acidentes e gastos desnecessários, através da detecção de fissuras e falhas estruturais.

Dentre as técnicas de ensaios não destrutivos temos a inspeção por ultrassom, que é normalmente utilizada para medir espessuras de materiais, detectar fissuras e falhas dos materiais, além de definir a profundidade das mesmas. Novas técnicas estão sendo desenvolvidas para melhorar os ensaios, quanto ao tempo de execução, à precisão e exatidão da medida, levando sempre em consideração o custo e a viabilidade do ensaio.

Atualmente, uma das técnicas de ultrassom que é estudada é a Vibroacustografia. Esta é uma técnica elastográfica desenvolvida recentemente que possui um grande potencial para ser empregada em Ensaios Não Destrutivos, pois mostrou inúmeras capacidades para produzir imagens de diferentes tipos de materiais e se fundamenta na análise das propriedades mecânicas através da aplicação de uma força acústica focalizada. [3]

Este trabalho estuda a viabilidade de se poder empregar essa recente técnica em inspeções de ensaios não destrutivos (END), voltada para o setor de duto viário. A partir dessa idéia, pensa-se em direcionar o estudo para a área médica hospitalar, com a análise estrutural de próteses mecânicas e no aprimoramento dos exames de densitometria óssea.

1.1 - Ensaios Não Destrutivos

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são definidos como testes para o controle da qualidade, de peças acabadas ou semi-acabadas. São utilizados para a detecção de falta de homogeneidade ou defeitos, através de princípios físicos definidos, sem prejudicar a posterior utilização dos produtos inspecionados. Constituem uma das principais ferramentas do controle da qualidade e são utilizados na inspeção de produtos soldados, fundidos, forjados, laminados, entre outros, com vasta aplicação nos setores

petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico, naval, autopeças e transporte rodoviário e ferroviário.

O método a ser utilizado depende das propriedades físicas do material. Um conhecimento geral dos métodos de END disponíveis faz-se necessário para a seleção do método mais adequado. Podem-se citar algumas situações típicas em que os ensaios não destrutivos são aplicados: melhoramento da confiabilidade de produtos para serem aceitos por uma determinada norma, prevenção de acidentes, redução de custos e gerar informações para reparo.

Para obter resultados satisfatórios e válidos, devem ser considerados como elementos fundamentais para os resultados destes ensaios: pessoal treinado, qualificado e certificado, equipamentos calibrados e procedimentos de execução de ensaios qualificados com base em normas e critérios de aceitação previamente definidos e estabelecidos. [4]

Os métodos mais utilizados são: Inspeção Visual, Partículas Magnéticas, Líquidos Penetrantes, Ultrassom, Radiografia, Emissão Acústica e Correntes Parasitas.

1.2 - Ultrassom

A técnica de exploração de um meio material por meio de ultrassons já é bem antiga na natureza, pois milhares de séculos antes do homem inventar o sonar, golfinhos e morcegos já caçavam, localizando suas presas por meio de ultrassons.

Em 1973, o famoso naturalista Lazzaro Spallanzani, ao estudar a extraordinária habilidade dos morcegos durante o voo noturno, conseguiu determinar, de maneira evidente, que os morcegos não se guiavam por um aguçado sentido de visão. O cirurgião e entomólogo Louis Jurine sugeriu, em 1794, que talvez no morcego o órgão da audição substituísse o da visão, para orientá-lo no voo noturno. Esta hipótese foi testada por Spallanzani, o qual verificou que morcegos cegados conservavam sua habilidade no voo noturno, enquanto que os animais cujos ouvidos houvessem sido obstruídos por cera, perdiam a capacidade de evitar obstáculos ou apanhar presas no ar.

Tanto Spallanzani quanto Jurine foram ridicularizados pelos seus contemporâneos e somente às vésperas da segunda guerra mundial é que o mistério dos morcegos foi definitivamente esclarecido. Os naturalistas Donald Griffin e Robert Galambos verificaram, então, que os morcegos emitem curtos gritos (até 200 ou mais por segundo), tão agudos que são inaudíveis pelos seres humanos. Sua frequência média

é de fato, aproximadamente três vezes maior do que a do mais agudo som audível pelo homem. As emissões ultra-sônicas dos morcegos são extremamente direcionais e intensas. Seus ouvidos reagem a sons cem bilhões de vezes mais fracos que os emitidos. Desta forma, algum tipo de eco sempre será por eles captado entre um grito e outro. Estes ecos orientam o morcego, indicando-lhe a posição dos obstáculos à sua frente e o tamanho e velocidade de suas presas. (Stevens e Warshofsky, 1969).

Todo sistema que utilize ultrassons para a localização de objetos funciona essencialmente segundo o mesmo princípio: Um pulso ultrassônico é emitido, incide no objeto a ser detectado e retorna à fonte sob forma de um eco, cujas peculiaridades (tempo de retorno e alterações na frequência) permitem determinar algumas características do objeto, como, por exemplo, sua localização e velocidade.

Os golfinhos também se utilizam de processo análogo para se orientarem e localizarem sua caça. Os morcegos também são mamíferos; seus órgãos para a recepção e emissão de sons foram moldados pela evolução para funcionarem, primitivamente, no ar e, posteriormente, na água. Também utilizam ultra-sons e como veremos quanto mais elevada for a frequência empregada, mais direcional será a emissão e mais facilmente perceptíveis serão os ecos dos objetos.

A humanidade também percebeu a vantagem das frequências elevadas, quando começou a desenvolver tecnologia para detectar objetos por meio de ecos [5].

Em 1880, os físicos Franceses Pierre e Jacques Curie descobriram o efeito piezelétrico [6]. O físico francês Paul Langevin tentou desenvolver materiais piezelétricos como emissores e receptores de distúrbios mecânicos de alta frequência (ondas de ultrassom) através de materiais [7].

As primeiras tentativas neste sentido ocorreram logo após a colisão do “Titanic” com um “iceberg”, quando Richardson e Fessenden requereram a patente para um equipamento que permitia a localização de obstáculos na rota de um navio. O princípio de funcionamento era o já discutido: O aparelho emitia um som muito intenso que se propagava pela água e, ao incidir o obstáculo, produzia um eco que era captado pelo navio. Como, porém, o som emitido era audível, portanto de baixa frequência, havia certa dificuldade em se determinar com exatidão de que direção provinha o eco.

Sua aplicação específica foi o uso do ultrassom para detectar submarinos durante a Primeira Guerra Mundial. Esta técnica, de navegação sonora e localização (SONAR), finalmente se tornou prática durante a Segunda Guerra Mundial. O uso industrial do ultrassom começou em 1928 com a sugestão do físico soviético Sokolov que poderia ser

usado para detecção de falhas escondidas nos materiais. O uso médico do ultrassom na década de 1930 foi confinado para aplicações terapêuticas como o tratamento de câncer e terapia física para várias doenças. Aplicação diagnóstica do ultrassom começou no final da década de 1940, com a colaboração entre físicos e engenheiros, que foi similar ao desenvolvimento do SONAR, abreviação de “Sound Navigation and Ranging”, figura 01 [8].

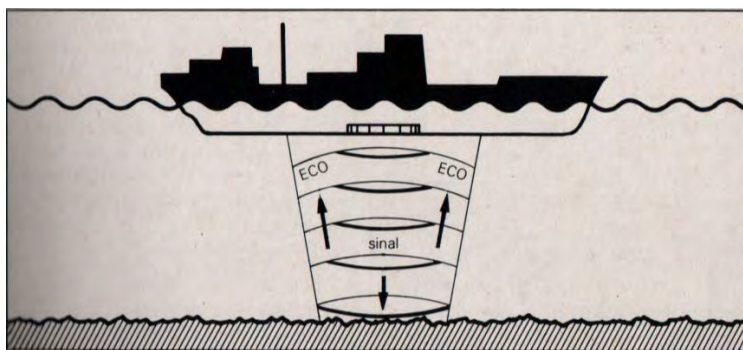


Figura 01 - Sonar - Uma das primeiras aplicações do ultrassom.

O ensaio por ultrassom caracteriza-se como método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos e não ferrosos. Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componentes a serem examinados como, por exemplo, bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro trincas em forjados, escórias em uniões soldadas e muitos outros. Portanto, o exame ultrassônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades.

Dispositivos especiais, chamados transdutores, permitem captar estas ondas de alta frequência, pois estas se refletem em direção ao transdutor cada vez que encontram uma descontinuidade. A geração e a detecção das ondas ultrassônicas ocorrem pelo efeito piezelétrico, apenas alguns materiais encontrados na natureza apresentam esta característica, por isso os materiais utilizados atualmente são em sua maioria sintetizados pelo homem. O material PZT (Zirconato Titanato de Chumbo) é o mais difundido na indústria de transdutores.

1.3 - Vibroacustografia

O estudo de objetos em termos de sua resposta mecânica a forças externas é de considerável interesse em ciências dos materiais e diagnóstico médico. As constantes elásticas estão intimamente ligadas às propriedades termodinâmicas dos materiais e podem ser relacionadas a uma ampla gama de parâmetros físicos. Constantes elásticas podem ser determinadas pela medição da deformação em resposta a uma força aplicada. Apesar de que uma força estática pode ser usada para este fim, é preferível utilizar a força dinâmica caso o interesse for medir as características dinâmicas do material [9].

Avaliação das características de um objeto (ou meio), ouvindo seu som é uma abordagem tradicional que tem sido utilizada para muitas finalidades. A avaliação qualitativa de um copo de cristal batendo nele é um exemplo simples. Vibroacustografia utiliza a mesma abordagem, mas em uma micro escala, e de uma forma que poderia ser aplicada aos tecidos. Ao medir o campo de emissão acústica, seria possível, em princípio, estimar alguns parâmetros do objeto ou do meio. Por exemplo, pode-se usar a Vibroacustografia para medir a frequência de ressonância de um objeto e, a partir dessa informação é possível estimar alguns parâmetros viscoelásticos do objeto e do meio. Este método tem sido usado para medir o módulo de elasticidade de uma haste metálica (Fatemi e Greenleaf, 1999b). Em outro experimento, medindo a frequência de ressonância de um ressonador conhecido no meio líquido, a viscosidade do fluido foi estimada com boa precisão (Fatemi e Greenleaf 1999c). Estas aplicações não são necessariamente médicas, mas o princípio poderia ser usado para a avaliação dos tecidos moles, sangue, ossos, etc.

Em aplicações médicas, pode-se usar a Vibroacustografia para obter uma imagem do objeto para fins de diagnóstico. Em tais aplicações, a imagem pode não representar uma quantidade física, em vez disso, fornece um meio para visualizar detalhes do objeto. [10]

Esta técnica consiste na utilização de um transdutor com dois elementos piezelétricos confocais para gerar uma força de radiação acústica oscilante (extremamente focalizada) a partir do fenômeno de batimento. Esta força gerada é aplicada sobre um determinado objeto de interesse que irá vibrar, devido à ressonância, e emitir um som (a baixa frequência, kHz) que é captado por um hidrofone.

Os elementos do transdutor são de material PZT4 e estão arranados numa configuração coaxial e confocal, isto é, os feixes ultrassônicos gerados por cada um deles estão focalizados no mesmo eixo e no mesmo ponto, figura 02.

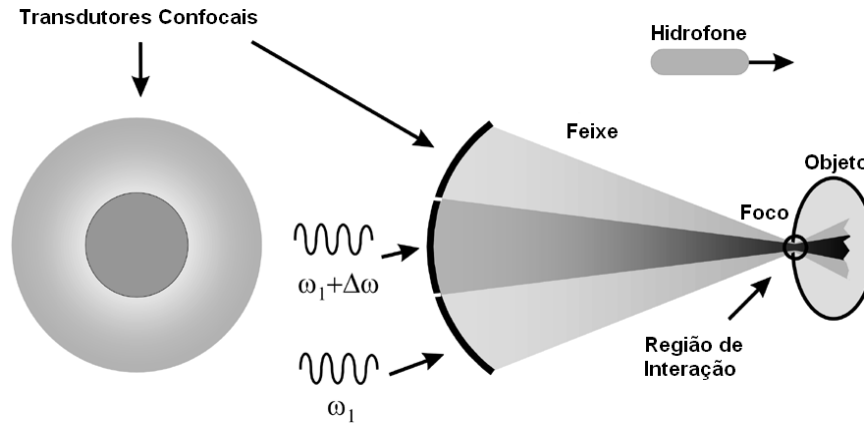


Figura 02 - O elemento central tem forma de disco e é contornado pelo segundo elemento que tem forma anelar, sendo ambos côncavos e com foco comum em 5,0 cm.

Os elementos são excitados por dois geradores de ondas contínuas, mas com frequências ligeiramente diferentes, iguais a ω_1 e $\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega$. O objeto é posicionado no ponto focal do transdutor, pois é nessa região que os feixes se interagem, produzindo uma força de radiação acústica oscilante sobre o objeto. Essa diferença de frequência ($\Delta\omega$) irá causar a modulação em amplitude (batimento) no ponto focal e pode variar de 0,1 até 70 kHz, dependendo do material a ser analisado. Essa modulação em amplitude resultante é que provoca a vibração do material.

O som emitido pela vibração do alvo é detectado por um ou mais hidrofones posicionados próximos ao objeto de estudo [11]. Ao considerar a frequência de batimento acima de 20 kHz ou mesmo para o caso de o alvo ser imóvel existe uma discussão de que o sinal adquirido pelo hidrofone é devido a efeitos não lineares de propagação da radiação acústica e não do som emitido pelo alvo vibrante [12,13]. Este método se beneficia pela alta definição espacial da força de radiação ultrassônica e pela alta sensibilidade de detecção do movimento oferecido pela sensibilidade do hidrofone [14].

A força de radiação acústica dinâmica é a força média exercida pelo campo acústico em um objeto. Esta força é um exemplo de um fenômeno universal em qualquer movimento ondulatório que apresente algum tipo de força unidirecional em alvos de absorção ou de reflexão que estejam no trajeto da onda. A força de radiação é

produzida pela mudança da densidade de energia de um campo acústico incidente. Para uma análise deste fenômeno, vide referência [15]. A magnitude dessa força é proporcional à média da densidade de energia da onda incidente $\langle E \rangle$ no objeto. Onde $\langle \rangle$ representa o tempo médio e S, a área projetada do objeto.

$$F(t) = \vec{dr} S \langle E \rangle \quad (1)$$

Onde $\vec{dr}$ é o vetor do coeficiente de arraste com uma componente na direção do feixe incidente e outra transversal a direção do feixe incidente. O coeficiente $\vec{dr}$ é definido por unidade incidente de densidade de energia e unidade de área projetada. Para um objeto planar, $\vec{dr}$ é numericamente igual à força no objeto. Fisicamente, $\vec{dr}$ representa as propriedades de espalhamento e de absorção do objeto e é dado por:

$$\vec{d}_r = \hat{p} S^{-1} (\Pi_a + \Pi_s - \int \gamma \cos \alpha_s dS) + \hat{q} S^{-1} \int \gamma \sin \alpha_s dS \quad (2)$$

Sendo $\vec{p}$ e $\vec{q}$ vetores unitários na direção do feixe e normal ao feixe, respectivamente. As quantidades Π_a e Π_s são as forças totais absorvidas e espalhadas, respectivamente, e γ é a intensidade espalhada, todos expressos por unidade de intensidade incidente. Além disso, α_s é o ângulo entre a intensidade incidente e a espalhada, e dS é o elemento de área. O coeficiente de arrasto também pode ser interpretado como a razão da magnitude da força de radiação em um determinado objeto para o valor correspondente, se o objeto foi substituído por um objeto totalmente absorvente de tamanho similar. Isso porque $|\vec{dr}|=1$ para um objeto totalmente absorvente. Este coeficiente pode ser determinado para objetos de formas e tamanhos diferentes. Por simplicidade, assumimos um objeto planar normal ao eixo do feixe. Nesse caso, a componente transversal desaparece e o coeficiente de arraste (força) terá apenas uma componente normal na superfície do alvo, na qual denotamos pelo escalar $dr(F)$. Valores de dr para esferas, em termos do diâmetro e do comprimento de onda, são dados na referencia [16].

Para produzir uma força de radiação dinâmica, pode-se usar um feixe de amplitude modulada. Considerando um campo de pressão incidente (ultrassônico) com amplitude modulada, $p(t)$, como

$$p(t) = P_{\omega_0} \cos(\Delta\omega t/2) \cos \omega_0 t \quad (3)$$

Onde, P_{ω_0} , $\Delta\omega/2$ e ω_0 são, respectivamente, a pressão, a frequência modulada, e a frequência central. Nas nossas análises experimentais, assumimos que a condição $\Delta\omega \ll \omega_0$ se mantenha. Em tal caso, a densidade de energia do campo incidente apresenta uma baixa variação no tempo. Para discriminar as variações do tempo lento de uma função, vamos definir o tempo médio de curto prazo de uma função arbitrária

$$\langle \xi(t) \rangle_T = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} \xi(\tau) d\tau$$

$\xi(t)$ sob o intervalo de T segundos no instante t, sendo

na qual é uma função de t. O tempo médio de longo prazo (ou simplesmente tempo médio) é obtido através da definição $T \rightarrow \infty$. Para calcularmos o tempo médio de curto prazo da densidade de energia acústica relativo às variações de campo em $\Delta\omega/2$, escolhemos T mais longo do que o período da onda ultrassônica, porém mais curta do que o período de modulação, ou seja, $2\pi/\omega_0 \ll T \ll 4\pi/\omega$. Sob essas condições, o tempo médio de curto prazo de $p^2(t)$ é

$$\langle p^2(t) \rangle_T = (P_{\omega_0}^2/4)(1 + \cos \Delta\omega t) \quad (4)$$

A densidade de energia é dada por $p^2(t)/\rho c^2$, onde ρ e c são, respectivamente, a densidade e a velocidade de propagação no meio. Estamos interessados na componente que varia com o tempo do tempo médio de curto prazo da

densidade de energia. Denotando essa componente por $e\Delta_\omega(t)$, podemos escrever

$$e\Delta_\omega(t) = (P_{\omega_0}^2/4\rho c^2) \cos \Delta\omega t$$

. Esta componente da densidade de energia produz uma força de radiação no alvo com uma frequência $\Delta\omega$. A amplitude dessa força, $F_{\Delta\omega}$,

é $F_{\Delta\omega} = P_{\omega_0}^2 S dr / 4\rho c^2$. Esta equação afirma que a amplitude da força variável no tempo é proporcional ao quadrado da pressão ultrassônica incidente, ou equivalentemente, à potência incidente. Se o objeto se move em resposta a esta força,

então a energia de alta frequência do ultrassom converteria para energia mecânica de baixa frequência.

A força de radiação $F_{\Delta\omega}$ vibra o objeto alvo com uma frequência $\Delta\omega$. A vibração do objeto resulta em um campo acústico no meio (emissão acústica). Este campo está relacionado com a forma, tamanho, e propriedades visco elásticas do objeto[10].

2 - Materiais e Métodos

Neste experimento foi utilizado um tubo de ferro de 30,0 cm de comprimento, 3,0 cm de diâmetro e com 2,0 mm de espessura, que foi submetido a uma corrosão por ácido sulfúrico. A corrosão foi realizada em duas etapas até ser obtido um furo na estrutura do tubo. Um impulso mecânico foi aplicado sobre a amostra e o som emitido foi registrado e analisado. Comparações entre o sinal registrado antes, durante e depois da corrosão permitem detectar que alguma falha ocorreu.

O experimento foi dividido em duas partes, sendo que na primeira verifica-se a existência de diferenças entre as respostas de vibrações do tubo alterando-se as regiões onde se aplica a força de radiação acústica. Na segunda parte analisa-se a evolução da corrosão feita no tubo, e também é feito o teste de reprodutibilidade e repetibilidade do experimento, realizando duas medidas para cada estágio de corrosão (tubo normal, tubo semi corroído e tubo corroído), sendo que entre cada medida realizada o experimento foi desmontado.

Os experimentos foram realizados em um tanque acústico preenchido com água degaseificada, a razão de se utilizar este meio é que a atenuação da onda ultrassônica em altas frequências é menor na água do que no ar, além de auxiliar na dissipação térmica da cerâmica. Foi utilizado um tanque acústico com as dimensões 100 x 40 x 50 cm. O tanque foi posicionado sobre uma mesa anti vibratória (SmartTable – Newport – Smart Series – Irvine, Alifornia, EUA) sendo que ambos se localizavam dentro de uma sala com isolamento acústico apropriado para evitar interferências externas.

O módulo de excitação acústica consiste de um transdutor composto de dois elementos piezelétricos PZT4 com casamento de impedância em 50 Ohms, arrançados numa configuração coaxial e confocal. O elemento central tem forma de disco e é contornado pelo segundo elemento que tem forma anelar, sendo ambos côncavos e com foco comum em 5,0 cm.

Para a geração dos sinais que chegam à cerâmica foi utilizado um gerador de função com sinais independentes (Tektronix AFG320). Os sinais foram amplificados por uma eletrônica de potência dedicada. Para limitar o ruído dos amplificadores, principalmente por serem de alta potência e trabalharem na faixa de radiofrequência, foi incluído um filtro passa banda em cada uma das duas saídas amplificadas que chegam a cada elemento da cerâmica.

A detecção do sinal de resposta emitido pelo tubo foi feita utilizando um hidrofone (Modelo ITC6050) especificado para trabalhar na faixa de frequência de 0,03 - 70 kHz. Foi desenvolvido um software em LabView (National Instruments) para controlar o gerador de funções e os dados adquiridos foram processados utilizando o software MatLab™.

I Parte

Fixa-se o tudo de ferro na distancia focal do transdutor; Posiciona-se o hidrofone a uma distancia de 10,0 cm do tubo, figura 03.

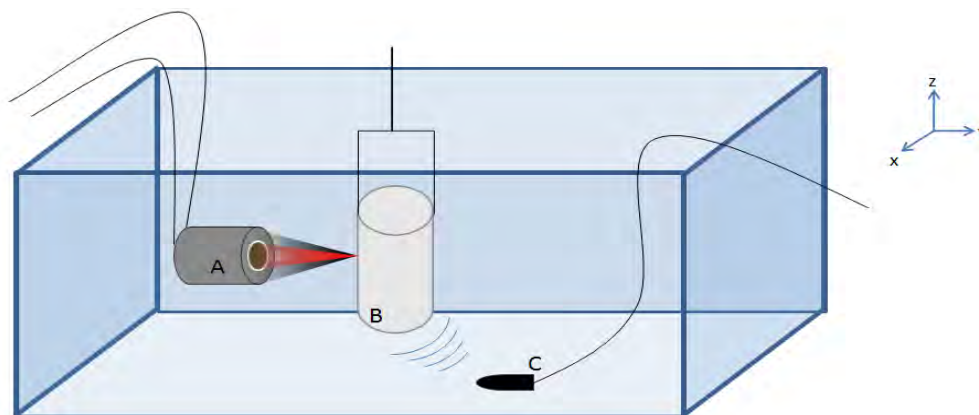


Figura 03 – Montagem experimental. (A) Transdutor, (B) Tubo de alumínio, (C) Hidrofone. Todos os componentes estão imersos no tanque.

Após a montagem experimental o tubo foi dividido em quatro quadrantes angulares com passos de noventa graus, iniciando a partir do zero (0° , 90° , 180° e 270°). Além da variação angular, o tubo terá duas secções horizontais, originando três segmentos: Superior, Medial e Inferior. A figura 04 representa as divisões.

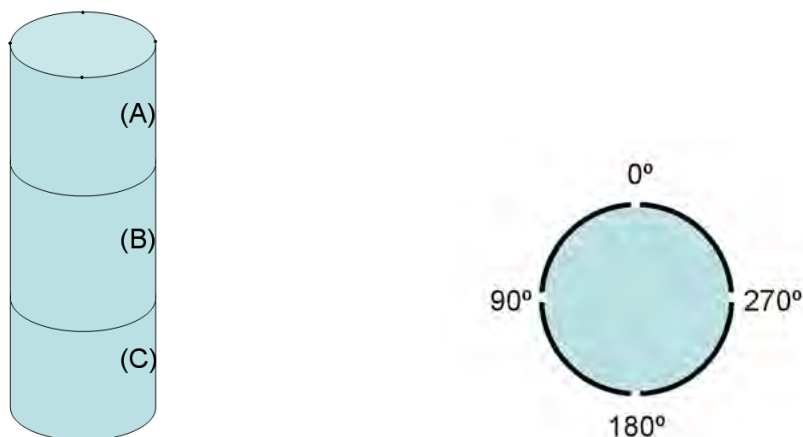


Figura 04 – A ilustração da esquerda representa o tubo dividido em três segmentos: Superior (A), Medial (B) e Inferior (C); A ilustração da direita mostra as secções angulares em uma visão superficial do tubo.

É realizada uma medida para cada segmento do tubo no ângulo zero e quatro medidas referentes a cada variação angular no segmento inferior.

II Parte

Para iniciar o processo de corrosão no tubo utiliza-se ácido sulfúrico e o seu manuseio foi realizado no interior de uma capela. Primeiramente adquiriu-se o espectro de resposta da frequência do tubo antes de se começar a corrosão. Em seguida o tubo foi retirado do tanque e levado até a capela, onde foi iniciado o processo de corrosão. Interrompe-se o processo de corrosão do tubo antes de se formar um furo e tomando os cuidados necessários o tubo é levado para o tanque para se obter o seu espectro de resposta de frequência nesse estado (semi corroído). Após adquirir os dados desse estado, repete-se a operação de corrosão, até se obter um furo na estrutura do tubo e em seguida leva-se o tubo para o tanque para ser realizada as medições desse estado corroído. Em todas as etapas foram realizadas duas medidas para cada estado.

3 - Resultados

Os dados obtidos para o procedimento de divisão do tubo em regiões estão expressos nas figuras 05 e 06.

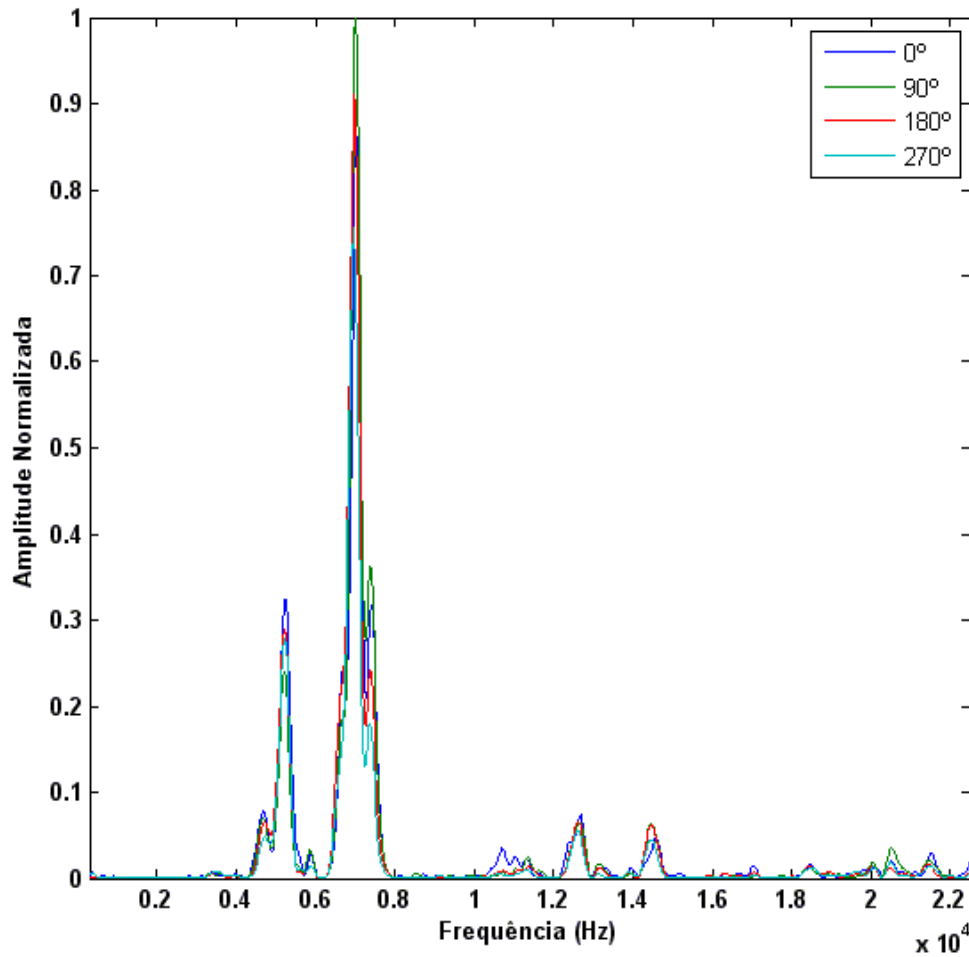


Figura 05 - Espectro de frequência da resposta de vibração segundo a variação angular do segmento inferior.

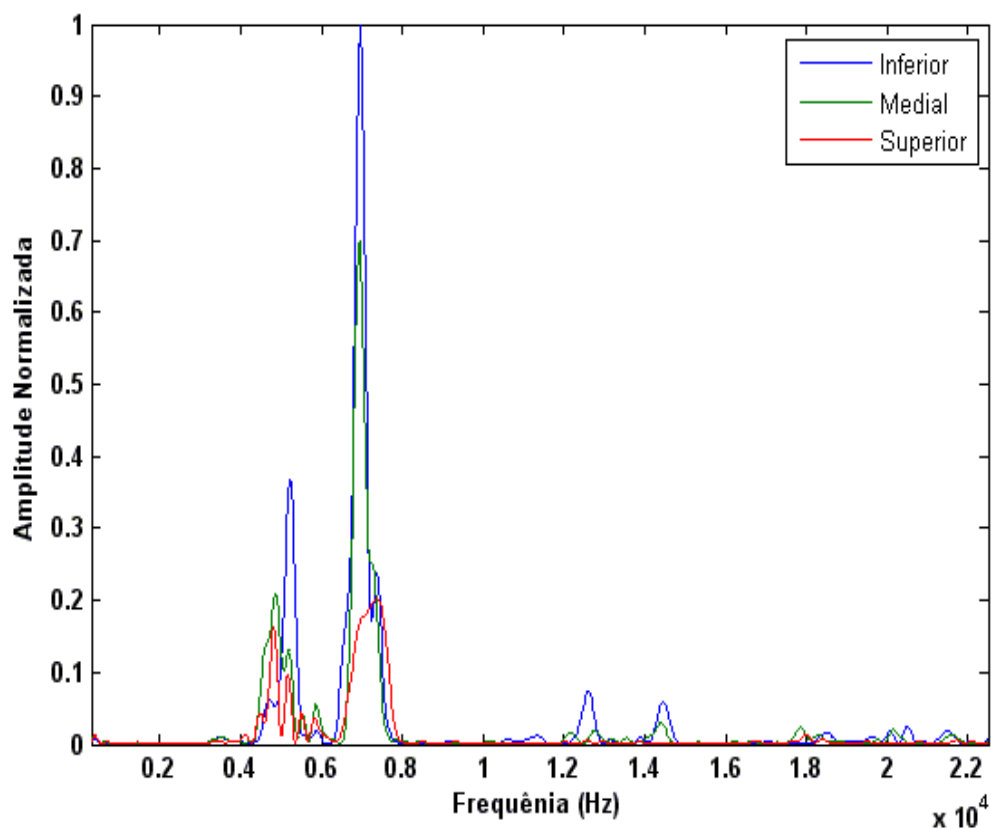


Figura 06 – Espectro de frequência da resposta de vibração do tubo normal para os segmentos Inferior (azul), Medial (verde) e Superior (vermelho).

Os dados referentes à evolução do estado de corrosão do tubo estão na figura 07.

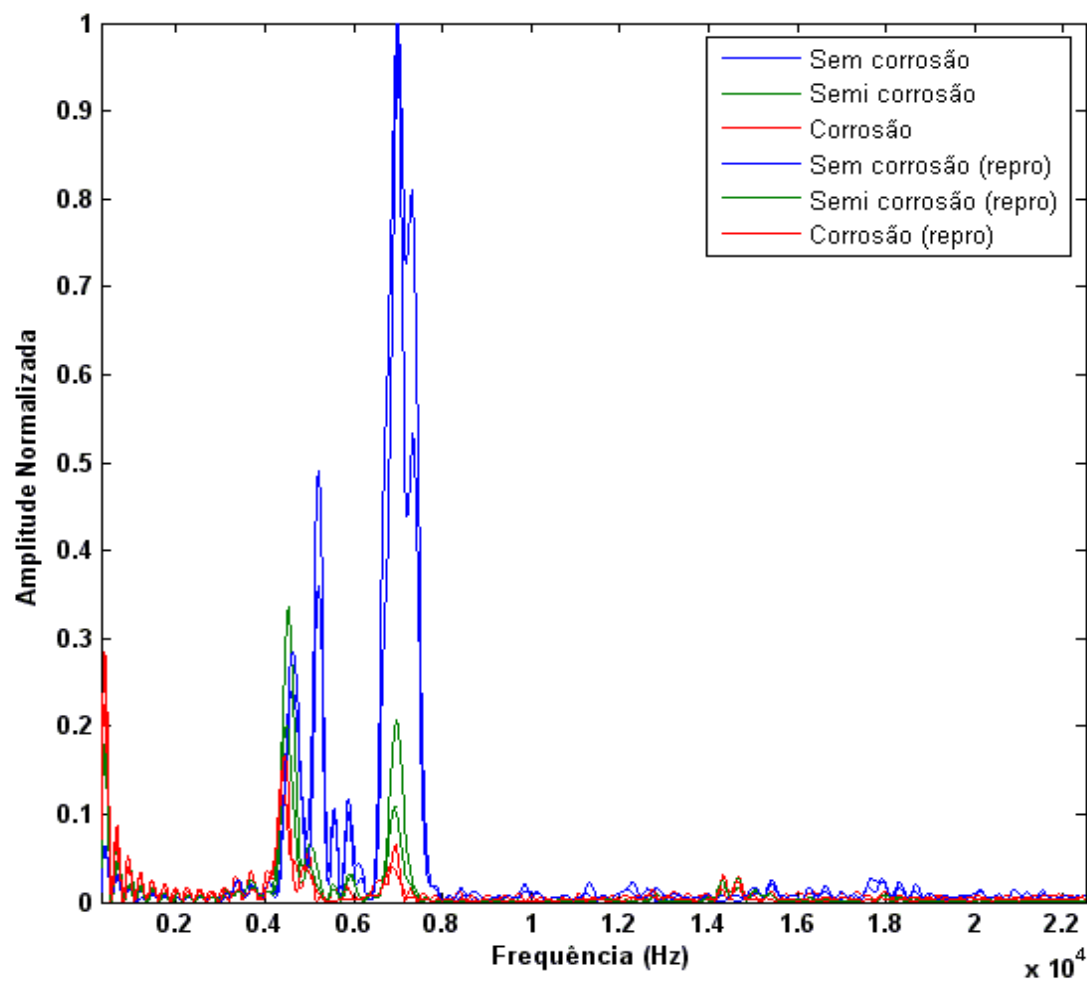


Figura 07 – Evolução do espectro de frequência da resposta de vibração do tubo em relação aos graus de corrosão. Cada estado de integridade do tubo foi reproduzido duas vezes.

O deslocamento das frequências para cada estado está expresso na figura 08.

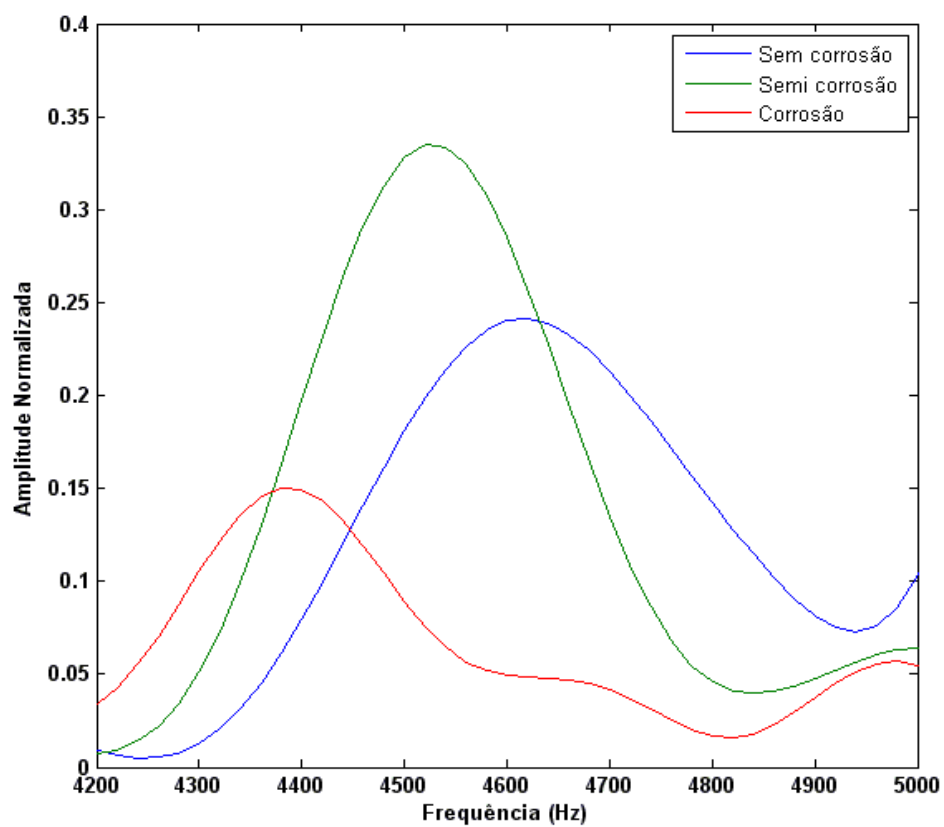


Figura 08 – Média do deslocamento das frequências de vibração para cada estado do tubo.

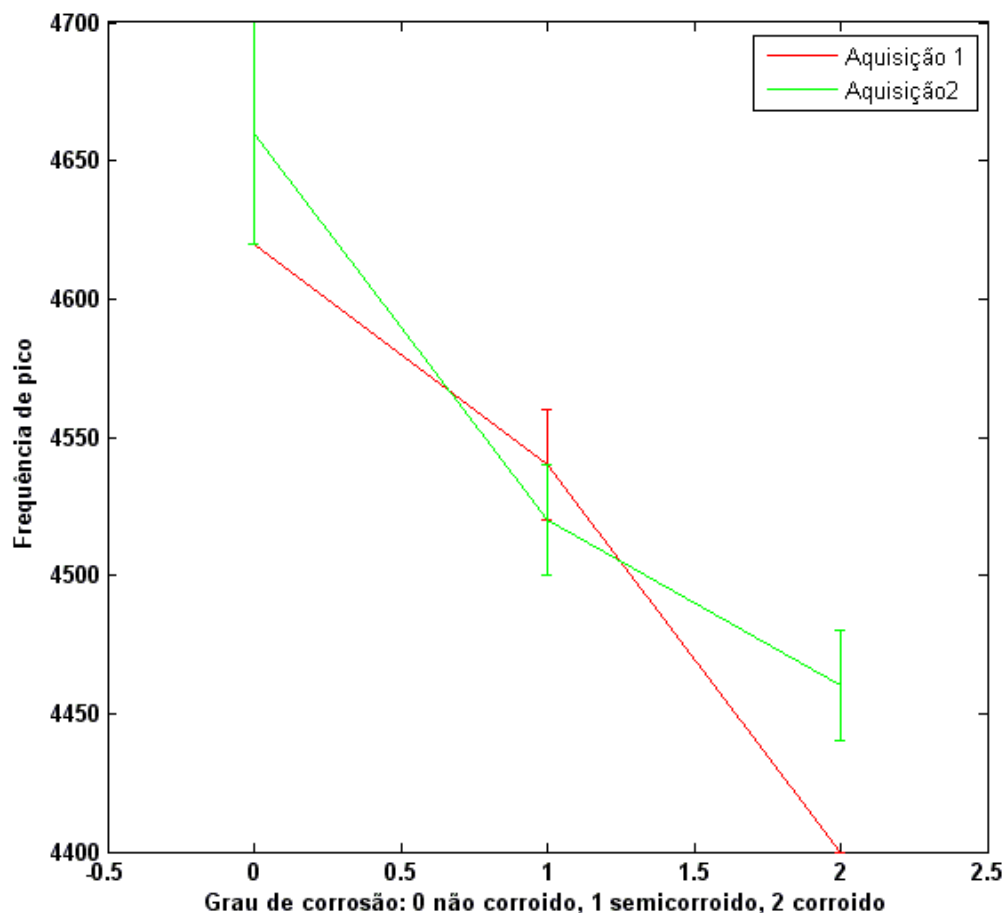


Figura 09 – Deslocamento da frequência onde ocorre a máxima amplitude para diferentes graus de corrosão.

4 - Discussão

No estudo da variação da região de onde se aplica a força de radiação acústica pode-se observar uma coincidência no sinal de resposta do tubo (figura 05) entre 5,00 kHz - 5,40 kHz e entre 6,80 kHz – 7,20 kHz, isso quando se varia apenas o ângulo e mantêm-se um segmento fixo. Isso pode ocorrer com maior ou menor intensidade na amplitude do sinal, dependendo do segmento que foi excitado, pois se o tubo estiver recebendo uma força de tensão muito intensa no suporte para sua fixação (segmento superior), o som que será emitido é mais fraco (figura 06), isto pode ocorrer devido a uma maior transmissão das ondas vibratórias para o suporte, processo de atenuação. Com isto o tubo acaba por vibrar menos, porém com a mesma tonalidade, daí ocorre a coincidência dos picos de amplitudes nas mesmas frequências de batimento. O tubo

apresenta uma frequência característica que só é captada quando entra em ressonância com a força de radiação acústica focalizada exercida sobre a sua superfície.

Na evolução da corrosão (figura 07) observa-se uma boa repetitibilidade e reprodutibilidade entre as medidas realizadas antes, durante e após a corrosão. Pode-se observar para a frequência de 5,20 kHz e para a banda de frequência entre 6,00 kHz - 8,00 kHz, uma diferença significativa entre a amplitude dos sinais. Para a frequência de 5,20 kHz o sinal da amplitude para o tubo normal (linha azul) decresce de 0,48 para 0,03, isto é, uma diminuição de aproximadamente 93,5%. Para a banda de frequência o valor escolhido foi a frequência de 7,20 kHz, pois esta decresce o sinal de 0,99 para 0,02, isto é, uma diminuição de aproximadamente 98%.

Para cada estado do tubo é observado um deslocamento das frequências de vibração em relação ao tubo normal (figura 08). Sendo possível distinguir, não apenas pela alteração da amplitude do sinal, alterações estruturais no tubo através desse deslocamento. Isso fica evidente quando é feito duas aquisições para cada estado do tubo (figura 09) e a partir do desvio padrão das frequências de pico pode-se observar que não há sobreposição das frequências, indicando que cada frequência é característica de um dado estado.

5 - Conclusão

A técnica e os métodos empregados para a realização desse experimento sobre ensaios não destrutivos, visando a detecção de falhas estruturais, tiveram resultados consideráveis. Assim, pode-se observar que a Vibroacustografia apresentou viabilidade no seu emprego em ensaios não destrutivos.

Observou-se também que a resposta em frequência do tubo é pouco dependente da região em que se excita como observado na parte I. Isto dá subsídios para a técnica, pois a mudança no espectro é mais perceptível devido a um dano na estrutura do tubo do que se alterando a região onde se excita. Esse resultado é importante para mostrar que em um sistema real de dutos, onde os tubos estarão fixos, e podendo estar com sua estrutura em um estado total ou parcialmente submersa em algum meio (solo, água, etc) não influenciaria na resposta vibracional do tubo, sendo assim, aplica-se a força de radiação acústica criando um espectro vibracional padrão para aquele tubo e assim pode-se iniciar um monitoramento sobre ele.

Comparações entre o sinal registrado antes, durante e depois da corrosão permitem detectar que a falha ocorreu, pois os dados obtidos pela figura 05 apresentam uma variação na amplitude do espectro de frequência que é bem evidente e pelo fato das medidas terem sido feitas duas vezes para todas as situações, isso mostra a existência de repetibilidade e de reprodutibilidade do experimento. Partindo desse princípio, já podemos pensar em ampliar os estudos adicionando-se mais tubos às partes experimentais aqui desenvolvidas para que seja desenvolvido um protótipo que tenha aplicação em uma dutovia real.

A técnica pode se tornar mais uma ferramenta para orientar e auxiliar nos princípios que se fundamentam os ensaios não destrutivos. Isso nos sugere que a técnica pode vir a servir como um meio de monitorar a integridade do tubo, pois obtendo-se o espectro de resposta vibracional quando o tubo estiver em condições adequadas de funcionamento, é esperado que este espectro mude se a sua estrutura sofrer alguma alteração.

6 - Referências Bibliográficas

- [1] - Silvio Montes Pereira Dias. “Transporte e Distribuição” - Diretor da BA logística e Celera Consultoria e Treinamento.
- [2] - André Gasparini; Tese de Mestrado, “Transporte Dutoviário e Meio Ambiente. O Controle da Rede de Dutos Terrestres da Petrobrás Operadas Pela Transpetro”
- [3] - F. G. Mitria, M. Fatemi. “Improved vibroacoustography imaging for nondestructive inspection of materials”. *Journal of Applied Physics* 98, 114901 (2005)
- [4] - ABENDI, Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. Disponível em: <www.abende.org.br>. Acessado em 15/06/2010.
- [5] - Mário Dolnokoff - Ultrassonografia, 1º Ed. (1980).
- [6] - Graff KF. *Ultrasonics: Historical aspects*. Presented at the IEEE Symposium on Sonics and Ultrasonics, Phoenix, October 26–28, 1977

- [7] - Hendee, W. R., and Holmes, J. H. History of Ultrasound Imaging, in Fullerton, G. D., and Zagzebski, J. A. (eds.), *Medical Physics of CT and Ultrasound*. New York: American Institute of Physics, 1980
- [8]- Hendee, W. R. Cross sectional medical imaging: A history. *Radiographics* 1989; 9:1155–1180
- [9] Maynard, J. (1996) *Phys. Today* 49(1), 26–31).
- [10] - Fatemi, M.; Greenleaf, J.F. Probing the dynamics of tissue at low frequencies with the radiation force of ultrasound. **Physics in Medicine and Biology**, Vol. 45, p.1449-1464, Mar. 2000.
- [11] - Konofagou EE, Hynynen K. (2003) "Localized harmonic motion imaging: Theory, imulations and experiments." *Ultrasound in Medicine and Biology*, 29(10):1405-1413.
- [12] - Silva GT, Chen SG, Greenleaf JF, Fatemi M. (2003) "Dynamic ultrasound radiation force in fluids." *Physical Review E* 71(5).
- [13] - Silva GT, Urban MW, Fatemi M. (2007) "Multifrequency radiation force of acoustic waves in fluids." *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 48-53.
- [14] - Fatemi, M.; Greenleaf, J.F. Vibro-acoustography: An imaging modality based on ultrasound-stimulated acoustic emission. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Vol. 96, p.6603–6608, Jun 1999.
- [15] Beyer, R. T. (1978) *J. Acoust. Soc. Am.* 63(4), 1025–1030.
- [16] - Westervelt, P. J. (1951) *J. Acoust. Soc. Am.* 23(4), 312–315.