

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGIA E MATERIAIS

HENRIQUE TORMEN HAAN DE OLIVEIRA

PROJETO DE UM COLAR DE ONDAS GUIADAS PARA APLICAÇÃO EM
TUBULAÇÃO ENTERRADA

Porto Alegre

2017

HENRIQUE TORMEN HAAN DE OLIVEIRA

**PROJETO DE UM COLAR DE ONDAS GUIADAS PARA APLICAÇÃO EM
TUBULAÇÃO ENTERRADA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Thomas G.R. Clarke

Porto Alegre

2017

CIP – Catalogação na Publicação

de Oliveira, Henrique Tormen Haan

Projeto de um colar de ondas guiadas para aplicação em tubulação enterrada / Henrique Tormen Haan de Oliveira. - 2017.

98 f.

Orientador: Thomas Gabriel Rosauro Clarke.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Ondas Guiadas. 2. Monitoramento. 3. Tubulação Enterrada. I. Clarke, Thomas Gabriel Rosauro, orient. II. Título.

HENRIQUE TORMEN HAAN DE OLIVEIRA

**PROJETO DE UM COLAR DE ONDAS GUIADAS PARA APLICAÇÃO EM
TUBULAÇÃO ENTERRADA**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação Engenharia em Metalurgia, Materiais e Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador: Prof. Dr. Thomas G.R. Clarke

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Afonso Reguly – UFRGS/DEMET

Dr. Eng. Ricardo Callegari Jacques – LAMEF/FAURGS

Dr. Toni Roger Schifelbain de Lima – LAMEF/UFRGS

“The object of computation is not numbers but insight.”

Richard Hamming

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Thomas Clarke pelo convite a trabalhar no assunto deste trabalho e pela orientação ao longo desses anos que realizou com profundo conhecimento e respeito.

A todos os colegas e amigos do grupo de ensaios não destrutivos do LAMEF, sem os quais esse trabalho não seria o mesmo.

Ao LAMEF que disponibilizou a infraestrutura e equipamentos necessários para a realização de um projeto tão complexo.

A Petrobrás por disponibilizar os recursos para o projeto e em especial aos engenheiros Rafael Wagner dos Santos e Júlio Endress Ramos que compartilharam suas experiências práticas com a técnica e colaboraram de forma decisiva para o sucesso deste trabalho.

Por fim, e não menos importante, aos meus pais, Eurico e Zélia, por todo o amor, carinho e toda a confiança depositada em mim. E à Marlise, companheira e amiga, sempre ao meu lado me fazendo ir cada vez mais longe.

RESUMO

São apresentados os resultados da caracterização elétrica de um sensor piezoelétrico, bem como o levantamento do campo acústico por ele gerado em uma chapa e posteriormente em um tubo. Os resultados em tubos foram contrastados com os de um modelo numérico onde boa concordância foi encontrada. A partir disso foram realizados estudos paramétricos para um colar de sensores avaliando-se o número de sensores distribuídos na circunferência e a distância entre colares. São apresentadas, também, as metodologias de análise de sinais provenientes de um colar a fim de aplicar no estudo numérico e coletas reais. Foi apresentado um projeto de um colar de ondas guiadas para ser aplicado em tubulação enterrada. Um teste em um trecho de tubulação de 24 metros de comprimento com dois tipos de revestimentos, PE e STOPAQ, foi realizado com dois colares propostos fabricados. Esse teste teve duração de 25 meses e contou com um sistema de aceleração de corrosão em pontos escolhidos sobre a superfície externa da tubulação. Resultados de coletas ao longo do teste são demonstrados e discutidos e os defeitos induzidos foram localizados com boa resolução espacial.

ABSTRACT

Results of the electrical characterization of a piezoelectric sensor are presented, as well as the characterization of the acoustic field generated by the sensor in a plate and later in a tube. The results in tubes were compared with those of a numerical model and good agreement was found. From this, parametric studies for a collar were performed, evaluating the number of sensors distributed in the circumference and the distance between rings. Also, the methodologies of signal processing are presented and applied to the numerical study data and test acquisitions. We present a guided wave collar design to be applied in buried piping. A test on a 24 meter long pipe with two types of coatings, PE and STOPAQ, was performed with two proposed collars manufactured. Results of inspections throughout the test are demonstrated and discussed and the defects induced were located with good spatial resolution.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE FASE E O PRODUTO FREQUÊNCIA-ESPESSURA PARA UMA CHAPA DE AÇO.....	18
FIGURA 2 – PULSO ARBITRÁRIO, DEMONSTRANDO O TREM DE ONDAS E A MODULADORA.....	20
FIGURA 3 – RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE FASE E FREQUÊNCIA PARA UM TUBO 6” SHEDULE 40 REPRESENTADA EM TRÊS PARTES, A) FAMÍLIA DO L(0,1); B) FAMÍLIA DO T(0,1); C) FAMÍLIA DO L(0,2)	21
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM TUBO E AS QUANTIDADES DE MOVIMENTO PARA: A) $n = 0$; B) $n = 1$; C) $n = 2$ E D) $n = 4$; ONDE O TRACEJADO REPRESENTA A AMPLITUDE DO MOVIMENTO; LINHA CHEIA POSIÇÃO DE REPOUSO.	22
FIGURA 5 – RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE FASE E FREQUÊNCIA PARA UM TUBO DE 85MM DE RAI0 E 7 MM DE ESPESSURA APRESENTADA EM PRODUTO FREQUÊNCIA-DIÂMETRO. APENAS OS MODOS DE ORDEM 0 SÃO MOSTRADOS.	23
FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA ESPESSURA PARA OS MODOS F(1,2) E F(2,2) NAS FREQUÊNCIAS DE 20 KHz, 30 KHz E 40 KHz, PARA UM TUBO 6 POLEGADAS SCHEDLUE 40.	24
FIGURA 7 – VELOCIDADE DE FASE PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO REPRESENTADA NO PRODUTO FREQUÊNCIA-ESPESSURA.	25
FIGURA 8 – COEFICIENTES DE REFLEÇÃO: A) INTENSIDADE DO MODO AXISSIMETRICO COM RESPEITO À PROFUNDIDADE PERCENTUAL DO DEFEITO $B\%$; B) INTENSIDADE DA RAZÃO F/A COM RESPEITO À EXTENSÃO CIRCUNFERENCIAL DO DEFEITO.	28
FIGURA 9 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DA MODULAÇÃO NA CIRCUNFERÊNCIA POR MODOS DE ORDENS 0, 1 E 2, PONDERADOS EM 1, 0.5 E -0.2 RESPECTIVAMENTE;	32
FIGURA 10 – DECOMPOSIÇÃO NA CIRCUNFERÊNCIA DOS DADOS DA FIGURA 9.	35
FIGURA 11 – PULSOS SIMULADOS COM BANDAS E FREQUÊNCIA DIFERENTES DEMONSTRANDO O ESPALHAMENTO DECORRENTE DA DISPERSÃO APÓS PROPAGADOS 15 METROS DA EMISSÃO	36
FIGURA 12 – PARES DE PULSO NO DOMÍNIO DO TEMPO E FREQUÊNCIA.....	37
FIGURA 13 – ESQUEMA REPRESENTANDO O REMAPEAMENTO DO gt PARA hx	39
FIGURA 14 – EFEITO DA COMPENSAÇÃO DA DISPERSÃO; A) SINAL NO TEMPO COLETADO A 15 METROS DA FONTE; B) SINAL COMPENSADO UTILIZANDO O ALGORITMO DE COMPENSAÇÃO.	40
FIGURA 15 – DECOMPOSIÇÃO DO kz E ks EM kc	41
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS MODELOS IMPLEMENTADOS.....	44
FIGURA 17 – MALHA PARA O MODELO COM AS POSIÇÕES DE APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO, DE ENGASTE E DE MONITORAÇÃO DO CAMPO ACÚSTICO;	45
FIGURA 18 – BANDAS EM FREQUÊNCIA DOSS CARREGAMENTOS UTILIZADAS; A) PULSO 50kHz DURAÇÃO 200 μ s; B) ESPECTRO DO PULSO EM 50 KHz; C) PULSO BANDA LARGA COM DURAÇÃO DE 250 μ s D) ESPECTRO DO CARREGAMENTO EM BANDA LARGA DE 16kHz ATÉ 72kHz COMO UMA SOMA DE PULSOS	46
FIGURA 19 – BANCADA DE INTEREFOMETRIA.	48
FIGURA 20 – SISTEMA DE INTERFEROMETRIA POLYTEC: A) UNIDADE DE CONTROLE OFV-5000 E B) FONTE LASER OFV-505	49
FIGURA 21 – ESQUEMA VETORIAL DA MEDIDA COM DOIS INTERFERÔMETROS; A) DECOMPOSIÇÃO DO MOVIMENTO NA BASE DOS INTERFERÔMETROS; B) AS DUAS BASES; C) DECOMPOSIÇÃO DO MESMO MOVIMENTO NAS DIREÇÕES NORMAL E PARALELA À MESA.	49
FIGURA 22 – ESQUEMA E POSICIONAMENTO DO SENSOR; A) SUPORTE E PESO; B) SUPORTE COM OS IMÃS E PROTETOR DO CONECTOR ELÉTRICO.	50
FIGURA 23 – POSIÇÕES PARA O TESTE DE MEDIDA DE CAMPO ACÚSTICO EM CHAPAS; A) ESQUEMA E B) FOTO DO CORPO DE PROVA.....	51

FIGURA 24 – ESQUEMA DO POSICIONAMENTO DOS INTERFERÔMETROS SOBRE A BANCADA.....	52
FIGURA 26 – DISPOSITIVO DE POSICIONAMENTO DO SENSOR A) DETALHE DA FIXAÇÃO DO SENSOR; B) POSICIONAMENTO DO TUBO NA BANCADA DE INTERFEROMETRIA.....	53
FIGURA 25 – ESQUEMA DO EXPERIMENTO PARA MEDIDA DE CAMPO ACÚSTICO EM TUBO.....	53
FIGURA 27 – MEIA CALHA COM SUPORTE PARA O SENSOR ACOPLADO EM (A) E ANALISADOR DE IMPEDÂNCIA AGILENT EM (B).....	55
FIGURA 28 – ESQUEMA DA MONTAGEM DO TESTE. A REGIÃO HACHURADA REPRESENTA ONDE HÁ REVESTIMENTO STOPAQ.....	56
FIGURA 29 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DE PROJETO DE COLAR.....	57
FIGURA 30 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO COMPOSTO POR COLAR DE SENSORES, COMPUTADOR E MULTIPLEXADOR.....	59
FIGURA 31 – SENSOR PIEZOELÉTRICO; A) ESQUEMA DE MONTAGEM; B) FOTO DO SENSOR FABRICADO.....	60
FIGURA 32 – RESPOSTA USUAL DA MEDIDA DE UM SENSOR COM APLICAÇÃO DE PRESSÃO; A) MÓDULO DA IMPEDÂNCIA; B) FASE DA IMPEDÂNCIA E C) CAPACITÂNCIA SÉRIE DO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	61
FIGURA 33 – RESPOSTA USUAL DA MEDIDA DE UM SENSOR SEM APLICAÇÃO DE PRESSÃO; A) MÓDULO DA IMPEDÂNCIA; B) FASE DA IMPEDÂNCIA E C) CAPACITÂNCIA SÉRIE DO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	62
FIGURA 34 – INTENSIDADE DO CAMPO ACÚSTICO NAS TRÊS DIREÇÕES CILÍNDRICAS.....	63
FIGURA 35 – CAMPO ACÚSTICO GERADO PELO SENSOR NAS DIREÇÕES DE PROPAGAÇÃO; A) REPRESENTAÇÃO EM GRÁFICO DE LINHA E B) REPRESENTAÇÃO EM GRÁFICO POLAR.....	63
FIGURA 36 – DESLOCAMENTOS NOS NÓS MONITORES DO MODELO 1.....	64
FIGURA 37 – ENVELOPE DA DECOMPOSIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS TANGENCIAIS NA TRÊS PRIMEIRAS ORDENS PARA OS DADOS DO PRIMEIRO MODELO.....	65
FIGURA 38 – ENVELOPE DA DECOMPOSIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS TANGENCIAIS NAS TRÊS PRIMEIRAS ORDENS PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS.....	66
FIGURA 39 – COMPARAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO ENTRE DADOS DE MODELO E DADOS EXPERIMENTAIS PARA DIFERENTES ORDENS DE DECOMPOSIÇÃO.....	66
FIGURA 40 – A) CURVA DE DISPERSÃO GERADA A PARTIR DO MODELO NUMÉRICO PARA UM PONTO DE EXCITAÇÃO; B) CURVAS DE DISPERSÃO f vs kz	67
FIGURA 41 – CURVAS DE DISPERSÃO A PARTIR DO DAS SUPERPOSIÇÕES DO MODELO NUMÉRICO PARA; A) 4 PONTOS DE EMISSÃO; B) 8 PONTOS DE EMISSÃO; C) 16 PONTOS DE EMISSÃO E D) AS CURVAS DE DISPERSÃO f vs kz	68
FIGURA 42 – A) CURVA DE DISPERSÃO A PARTIR DAS SUPERPOSIÇÕES DO MODELO NUMÉRICO PARA GANHOS DIFERENTES DA UNIDADE; B) GANHOS APLICADOS NO RESULTADO (A).....	69
FIGURA 43 – A) GANHOS DO FILTRO DE MÉDIA MÓVEL PARA 8 SENSORES; B) APÓS A SUBAMOSTRAGEM DE 2 OS GANHOS DAS ORDENS SUPERIORES SÃO REFLETIDOS PARA A BANDA INFERIOR.....	71
FIGURA 44 – CURVAS DE DISPERSÃO MEDIDAS DOS MODELOS DIRECIONALIZADOS COM DISTÂNCIA DE 36 MM (ESCALA DE CORES NORMALIZADA PARA CADA IMAGEM); A) NA DIREÇÃO DA SUPERPOSIÇÃO CONSTRUTIVA; B) NA DIREÇÃO DE SUPRESSÃO DE EMISSÃO;...	72
FIGURA 45 – CURVAS DE DISPERSÃO PARA PULSOS BANDA LARGA NA DIREÇÃO CONSTRUTIVA PARA AS DISTÂNCIAS ENTRE ANÉIS DE: A) $d = 27mm$; B) $d = 52mm$; C) $d = 112mm$. (ESCALA DE CORES NORMALIZADA PARA CADA IMAGEM).....	73
FIGURA 46 – INTENSIDADE DA EMISSÃO INTERPOLADA DA DIPERSÃO PARA AS DISTÂNCIAS DE A) $d = 36mm$ E B) $d = 112mm$	74
FIGURA 47 – COMPARAÇÃO DE INTENSIDADES ENTRE DIREÇÃO EMITIDA E SUPRIMIDA PARA DISTÂNCIA DE $d = 27mm$	75

FIGURA 48 – VELOCIDADE DE GRUPO PARA UM TUBO 10,75 POLEGADAS E 9,27 MM DE PAREDE; LINHAS DE PROJETO PARA BANDA DE FREQUÊNCIA E COEFICIENTE DA DIRECIONALIDADE. .	76
FIGURA 49 – COLAR DE SENSORES; A) PROJETO EM FERRAMENTA COMPUTACIONAL E B) INSTALAÇÃO FINAL.....	77
FIGURA 50 – VEDAÇÃO DO CONECTOR DO SENSOR; A) ESQUEMA DEMONSTRANDO OS DETALHES DO PROTETOR DO CONECTOR E B) RESULTADO DE UM SENSOR DESMONTADO APÓS O ENDURECIMENTO DO SILICONE PARA AVALIAÇÃO.	78
FIGURA 51 – DETALHE DO SUPORTE DOS SENSORES; A) ENCAIXE DOS SENSORES E BARRA; B) DETALHE DO GRAU DE LIBERDADE DE GIRO;	79
FIGURA 52 – DETALHE DA CADEIA DE SUPORTES DE SENSORES: A) ENCAIXE DAS DUAS METADES NA EXTREMIDADE DAS CADEIAS E B) FOTO DA CONSTRUÇÃO DO COLAR.	79
FIGURA 53 – SISTEMA DE APERTO INDIVIDUAL DOS SENSORES; A) ESQUEMA EM FERRAMENTA DE DESENHO; B) FOTO DO SISTEMA INSTALADO.....	80
FIGURA 54 – CAIXA DE ACONDICIONAMENTO DOS CONECTORES ELÉTRICOS DO COLAR APÓS O ENTERRO.....	80
FIGURA 55 – A-SCANS PARA COLETA 1, FREQUÊNCIA CENTRAL 30 KHZ, 5 CICLOS.....	83
FIGURA 56 – A-SCANS PARA COLETA 5, FREQUÊNCIA CENTRAL 30 KHZ, 5 CICLOS.....	83
FIGURA 57 – A-SCANS PARA COLETA 6, FREQUÊNCIA CENTRAL 30 KHZ, 5 CICLOS.....	84
FIGURA 58 – C-SCAN PARA COLETA 1, 30 KHZ, 5 CICLOS.....	85
FIGURA 59 – C-SCAN PARA COLETA 5, 30 KHZ, 5 CICLOS.....	85
FIGURA 60 – C-SCAN PARA COLETA 6, 30 KHZ, 5 CICLOS.....	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DIFERENÇAS ENTRE OS VALORES DE PICO ENCONTRADA NOS DADOS EXPERIMENTAIS E DADOS DE MODELO.	66
TABELA 2 – DATAS IMPORTANTES DO CRONOGRAMA DO TESTE COM CORROSÃO INDUZIDA:.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS

A-Scan	<i>Amplitude Scan</i> , Varredura de amplitude
C-Scan	<i>Compound Brightness Scan</i> , Varredura de brilho composto
EF	Elementos Finitos
EMAT	<i>Electromagnetic Acoustic Transducer</i> , Transdutor Acústico Eletromagnético;
SAFT	<i>Synthetic Aperture Focusing Technique</i> , Técnica de foco por abertura sintética;
CSM	<i>Common Source Method</i> , Método da fonte comum;
DTFT	<i>Discrete Time Fourier Transform</i> , transformada de Fourier em tempo discreto;
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> , Transformada de Fourier discreta;
DFT^{-1}	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i> , Inversa da transformada de Fourier discreta;
<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida de Fourier;
DHT	<i>Discrete Hilbert Transform</i> , Transformada de Hilbert discreta
<i>sen</i>	Seno
cos	Cosseno

LISTA DE SÍMBOLOS

x, y, z	Posição nas direções cartesianas, em metros
v	Velocidade em m/s
λ	Comprimento de onda em metros
d	Distância em metros
θ	Posição sobre o perímetro de um círculo, em metros
k	Número de onda angular em $\frac{rad}{m}$
k_z, k_c	Número de onda angular nas direções longitudinal e circunferencial em $\frac{rad}{m}$
k_s	Número de onda angular para o modo cisalhante em $\frac{rad}{m}$
t	Variável de tempo, em segundos
f	Frequência em Hz
ω	Frequência angular em $\frac{rad}{s}$
$\Delta x, \Delta y$	Variação de posição na direção de x, y em metros
i	Número complexo
N	Número de sensores
B	Matriz de rotação planar

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
SUMÁRIO	14
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 ONDAS GUIADAS	17
2.1.1 Ondas Guiadas em Chapas	17
2.1.2 Ondas Guiadas em Tubos	20
2.1.3 Transdutores	24
2.1.4 Arranjos de Sensores	26
2.2 PROCESSAMENTOS	27
2.3 MODELOS NUMÉRICOS	29
3 MÉTODOS	32
3.1 PROCESSAMENTOS	32
3.1.1 Decomposição na Ordem Circunferencial.....	32
3.1.2 Controle da Dispersão	35
3.1.3 Compensação da Dispersão	37
3.1.4 Planificação do Tubo	40
3.1.5 Medida da curva kz vs ω	42
3.2 MODELOS NUMÉRICOS	43
3.3 MEDIDAS EXPERIMENTAIS DE CAMPO ACÚSTICO.....	47
3.3.1 Bancada de Interferometria	47
3.3.2 Caracterização do sensor	50
3.3.3 Caracterização em um tubo e validação do EF.....	52
3.4 AVALIAÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SENSOR	54
3.5 TESTE COM CORROSÃO INDUZIDA	55
3.6 PROJETO DE COLAR DE ONDAS GUIADAS	56
3.6.1 Definição do Número de Sensores e faixa de frequência.....	57
3.6.2 Procedimento de instalação do colar de sensores	58
3.6.3 Sistema de aquisição.....	58
4 RESULTADOS	60
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR.....	60
4.1.1 Resposta em Frequência	60
4.1.2 Medidas de Campo Acústico	62
4.2 MODELOS NUMÉRICOS	64
4.2.1 Dados Experimentais e Calibração do modelo.....	64
4.2.2 Estudo de Seletividade e Número de Emissores	67
4.2.3 Filtro espacial	70
4.2.4 Direcionalidade.....	72
4.3 PROJETO E FABRICAÇÃO DO COLAR DE SENSORES.....	75
4.4 TESTE COM CORROSÃO INDUZIDA	81
5 CONCLUSÕES	87
6 TRABALHOS FUTUROS	89
BIBLIOGRAFIA	91

1 INTRODUÇÃO

No cenário industrial existe um esforço constante, em várias frentes, para o aumento da segurança de operação, para a preservação e prolongação de uso de ativos e, em muitas áreas, para o controle do impacto ambiental durante as operações. Nesse sentido, a aplicação de normas mais criteriosas de fabricação e o aumento no controle de qualidade dos materiais empregados são imprescindíveis nas fases de projeto e de construção de equipamentos. Durante a fase de produção, onde os ativos permanecem maior tempo de sua vida, o controle é feito através do plano de manutenção que descreve, além de outras ações, as inspeções as quais um equipamento deve ser submetido ao longo de sua vida. Em geral essas inspeções são realizadas com o uso de técnicas não destrutivas onde o objetivo é avaliar os materiais e detectar falhas sem que esse processo cause qualquer dano à estrutura avaliada.

Uma grande parte das técnicas não destrutivas utilizam ondas eletromagnéticas que vão desde frequências altas encontradas em raios gama e raios X, passando pela luz visível, até técnicas de correntes parasitas de baixa frequência. Todas elas apresentam algum tipo de interação da onda com alguma propriedade ou geometria do material. Outra parte importante das técnicas não destrutivas são as que utilizam ondas mecânicas para obter informação a respeito do material ou estrutura de interesse. Essas podem ser usadas tanto de maneira simples como para medir a espessura de uma chapa no ponto logo a baixo do sensor, ou de maneiras mais complexas como na reconstrução de imagens de defeitos utilizando um arranjo de sensores com em técnicas de phased-array.

Os resultados de muitas dessas técnicas são dados de forma puntual ou em uma região restrita, e é nesse ponto que a técnica acústica de ondas guiadas apresenta o seu principal aspecto positivo. Ao contrário do ultrassom convencional que é usado para inspecionar pequenas regiões por vez, as ondas acústicas de baixas frequências usadas em ondas guiadas ocupam toda a espessura do material e se propagam para longe do transdutor que as emitiu. Além disso, apresentam baixas atenuações podendo propagar por dezenas de metros. Por isso podem inspecionar grandes áreas a partir de um único ponto de aplicação da onda.

Desde o trabalho de Worlton (Worlton, 1961), que identificou o potencial das ondas de Lamb como uma ferramenta para inspeção, cada vez mais pesquisadores abordam assuntos relacionados à ondas guiadas. É possível encontrar aplicações de ondas guiadas para cascos

de navio, fuselagem de aeronaves, tubulações aéreas e enterradas, tubulações de trocadores de calor até tubulações submarianas.

Dentro da aplicação em tubulações, ainda existe a aplicação em monitoramento de locais críticos, como tubulações que cruzam por baixo de rodovias, ou instalações de difícil acesso ou que impõe custos adicionais à medida e locais onde não há segurança na operação. Para esses locais o colar de ondas guiadas pode ser instalado na tubulação de forma permanente e a conexão disposta em local apropriado para permitir a realização da coleta de dados de forma mais segura ou conveniente.

Nesse sentido fica evidente a necessidade da adaptação desses colares de sensores, que antes eram utilizados apenas para inspeção, e que para a aplicação em monitoramento terão seu acoplamento realizado de forma permanente.

Portanto, este trabalho tem como objetivo principal o projeto, construção e caracterização de um colar de sensores de ondas guiadas para instalação permanente a ser utilizado para monitoramento de tubulações enterradas. Também é objetivo validar o projeto através da aplicação do protótipo de colar em um teste em campo.

O trabalho será desenvolvido através da determinação de uma metodologia de projeto de colares utilizando modelo por elementos finitos e validações experimentais. Busca-se, com isso, determinar o número de sensores e faixa de frequência ótimos para a operação do colar de sensores. A metodologia apresentada considera o comportamento do sensor e parâmetros construtivos do colar, como o espaçamento entre sensores e esquema de ligação elétrica. É apresentado, também, uma metodologia para a caracterização de um sensor piezoelétrico através da medida da impedância elétrica e campo acústico emitido.

Esse trabalho culmina em um teste de campo para validação do projeto apresentado. O teste tem duração de aproximadamente 25 meses realizado fora das dependências do laboratório com custeio e gerencia da empresa parceira do desenvolvimento. O teste consiste em um trecho de tubulação enterrado com dois diferentes tipos de revestimento. Defeitos foram induzidos nessa tubulação através de um sistema de indução de corrosão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ONDAS GUIADAS

São chamadas de ondas guiadas todas as ondas mecânicas que propagam ao longo de uma estrutura e que sejam, de certa forma, guiadas pela sua geometria. Nesse conceito, a estrutura leva o nome de guia de onda. O fenômeno que rege as ondas guiadas é perceptível em uma ampla faixa de frequências que vão desde < 1 Hz, presente em terremotos, até frequências maiores a 100 MHz em ondas superficiais utilizadas em microscopia acústica.(Cawley, 2002; Wilcox, 2009)

Existem dois modos de formular o problema no estudo de ondas mecânicas, são elas: pela formulação de ondas volumétricas ou pela formulação de ondas guiadas. O que rege essa escolha normalmente é a relação entre o comprimento de onda e a dimensão característica da estrutura que guia a onda. A relação entre esses dois parâmetros é tão intrinsecamente ligada que é comumente utilizada para parametrizar o comportamento da onda guiada em um determinado guia (Wilcox, 2009).

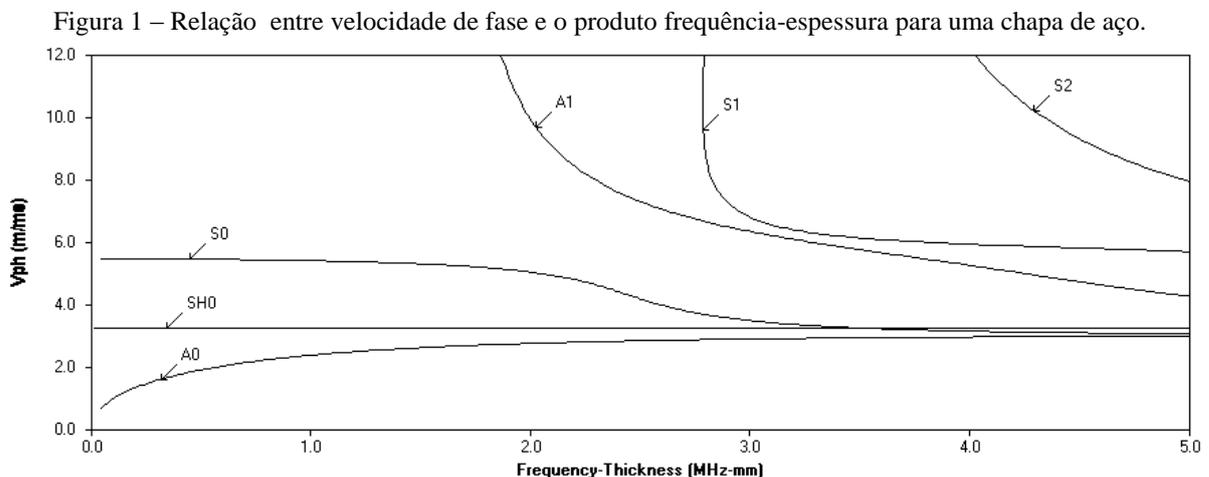
Ondas volumétricas são encontradas em meios infinitos, para o caso de meios sólidos dois tipos distintos de esforços são possíveis. No primeiro caso, o sólido transmite esforços trativos e compressivos implicando no movimento da partícula ser na direção da propagação da onda. No segundo caso, o sólido transmite esforços cisalhantes onde o movimento da partícula é transversal à direção de propagação da onda. O comportamento do primeiro caso também é encontrado em fluídos, todavia não há análogo do segundo caso. A principal característica da propagação em meios sólidos infinitos é que cada um desses casos propaga-se de forma independentemente (desacoplados) e com velocidades distintas (Graff, 1991).

2.1.1 Ondas Guiadas em Chapas

Quando uma onda volumétrica encontra uma interface para outro meio, existirá tanto o fenômeno de reflexão quanto o de transmissão respeitando-se a lei de Snell para o ângulo de incidência. A interface, como uma condição de equilíbrio para o movimento, traz outros aspectos à propagação como a possibilidade da conversão de um modo para outro ou mesmo a existência de ondas que propagam utilizando a interface como guia, a exemplo das ondas de Rayleigh e ondas de Love (Graff, 1991).

Em chapas, onde o sólido é delimitado por duas superfícies, pode-se ter sobreposição das reflexões quando os comprimentos de onda da onda volumétrica são comparáveis ao da espessura da chapa. Nesse caso a onda se soma a sua própria reflexão criando um campo acústico que se desloca no plano da chapa. Quando essa soma é estável à medida que se afasta da origem trata-se de um modo propagante. As equações que explicam esse fenômeno para chapas foram descritas no trabalho de Lamb (Lamb, 1917), e por essa razão levam seu nome.

Em geral os possíveis modos propagantes podem ser representados de forma gráfica onde linhas representam as relações estáveis entre comprimento de onda, frequência, velocidade de fase e de grupo e são chamadas de curvas de dispersão. Essas curvas são características do guia de onda. Nesse trabalho foi utilizado um programa desenvolvido especificamente para geração de tais curvas a partir do método da matriz global, chamado de DISPERSE (Pavlakovic *et al.*, 1997). A Figura 1 mostra um gráfico gerado pelo programa onde são mostradas curvas que representam a relação entre velocidade de fase e frequência para os diferentes modos em uma chapa. Neste gráfico o eixo de frequência é multiplicado pela espessura da chapa, o que generaliza a informação do gráfico tornando-o representativo para chapas de qualquer espessura.



Fonte: Programa DISPERSE

Os modos em chapas são nomeados de acordo com o deslocamento da partícula e seu estado de simetria com relação ao plano médio da chapa. Aos modos que apresentam tal simetria é designada a letra S seguido de um número (a ordem) que representa o ordenamento sequencial em que se apresentam. Aos modos que apresentam anti-simetria é designada a letra A e a numeração segue da mesma forma. Essas duas famílias abrangem os deslocamentos

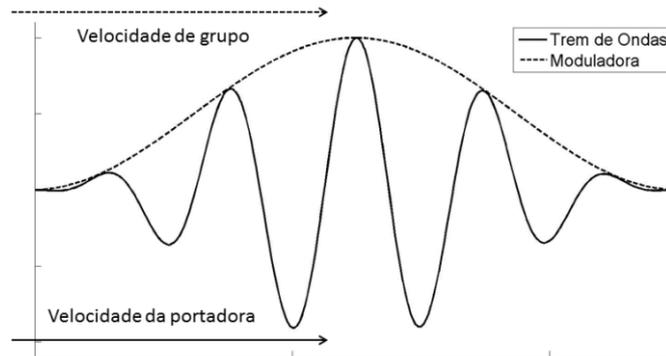
compressivos e de cisalhamento na direção da espessura. Para os modos que tem seu deslocamento cisalhante paralelo ao plano da chapa é dado o nome de SH seguido da sua ordem. Na Figura 1 está representado apenas o SH0. É notável que apenas os modos de ordem 0 estejam presentes desde a frequência zero sendo apenas a partir de 1.85 MHz-mm possível a propagação de mais um modo, o A1. À essa frequência é dado o nome de frequência de corte, indicando que para frequências abaixo deste valor o modo em questão não existe.

Outro aspecto fundamental que é evidenciado nesse tipo de gráfico é a dispersão dos modos. Essa característica é indicada por uma variação acentuada da velocidade com relação a variação de frequência. Tomando-se como exemplo o modo S0 na Figura 1, verifica-se uma dispersão relativamente baixa para valores de frequência abaixo de 1.5 MHz-mm, mas que se acentua a partir dessa frequência, tornando a estabilizar para frequências mais altas. Portanto a característica dispersiva dos modos pode ser restrita a certas regiões de frequência, todavia, para valores muito grandes de frequência onde os comprimentos de onda passam a ser muito menores que a espessura da chapa, todos os modos convergem para as velocidades de onda volumétrica e perdem sua característica dispersiva(Wilcox *et al.*, 2001a). Outro ponto notável a ser dito é que o modo SH0 é o único que não apresenta dispersão e a razão disso é que o movimento da partícula é contido no plano da chapa e não interage com a superfície livre da chapa. Isso implica na independência da velocidade de fase com respeito à frequência. A velocidade desse modo é a mesma da velocidade cisalhante no material(Graff, 1991).

A velocidade de fase indica a velocidade de propagação de um modo em particular para uma frequência específica, como se uma onda infinita com uma única frequência propagasse no material. No entanto, no uso de ondas guiadas para inspeção é utilizado um pulso com tempo definido e composto por uma faixa de frequências. Um exemplo arbitrário é mostrado na Figura 2. Nesse cenário há a sobreposição de uma faixa de velocidades que incorre em um fenômeno semelhante à modulação e batimento. O que se percebe é a propagação de um trem de ondas como um grupo, modulada por uma forma externa com frequência menor do que aquela que é modulada (a portadora). A velocidade de propagação dessas duas ondas pode ocorrer de três maneiras, se a velocidade da portadora é maior então tem-se a impressão que as ondas nascem atrás do grupo, se propagam mais rápido através do grupo, e morrem na frente do grupo. Isso causa uma distorção no grupo à medida que ela propaga no material. Ainda há o caso em que as velocidades são iguais, nesse caso a onda não sofre qualquer distorção à medida que propaga, portanto é uma onda não dispersiva. À essa

velocidade é dado o nome de velocidade de grupo e é utilizada para calcular os intervalos de tempo e distâncias entre refletores em uma inspeção utilizando a frequência central para escolher a velocidade (Graff, 1991).

Figura 2 – Pulso arbitrário, demonstrando o trem de ondas e a moduladora.

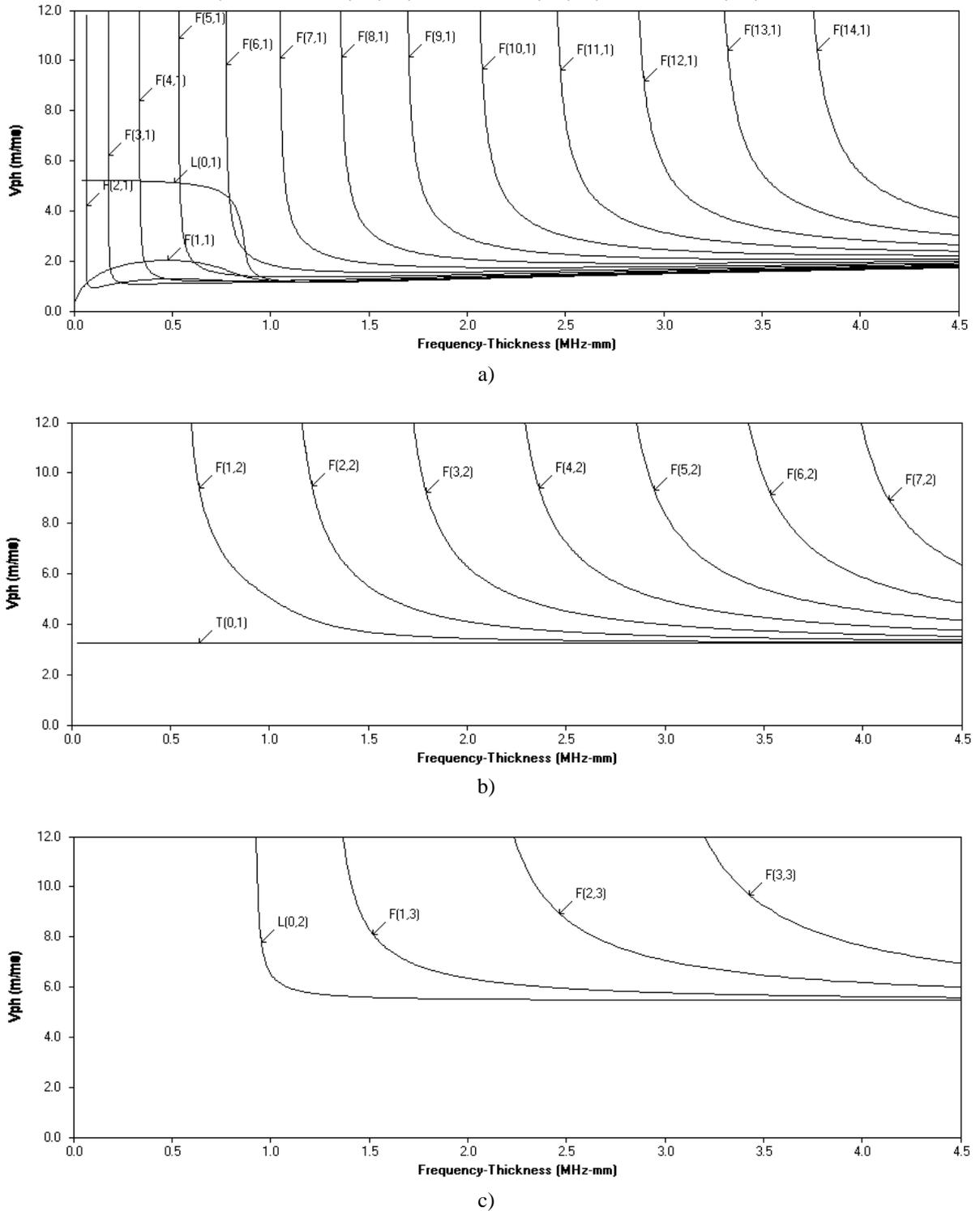


2.1.2 Ondas Guiadas em Tubos

Ondas de Lamb são ondas que propagam em um meio restrito por duas superfícies livres, o que resulta em uma chapa. Um tubo também pode ser encarado dessa forma onde a superfície externa e interna são as superfícies livres, mas com a condição de periodicidade em uma das dimensões.

Os comportamentos das ondas de Lamb também são percebidos em tubos onde ondas propagantes são definidas por três funções potenciais relacionadas com os movimentos longitudinal, transversal polarizado no sentido radial e transversal polarizado no sentido tangencial como demonstrado pela primeira vez por Gazis (Gazis, 1959). Os três movimentos principais dão origem a três famílias de modos onde cada família tem uma quantidade, teoricamente, infinita de membros. Isso se deve à dimensão circunferencial apresentar uma característica periódica, o que torna possível a interação entre ondas emitidas em direções diferentes a partir de uma mesma fonte (Wilcox, 2009). A Figura 3 mostra a velocidade de fase para um tubo de 6" Schedule 40 com a frequência multiplicada pelo diâmetro, e mostra a dispersão dividida em três partes, uma para cada família, para a visualização sem sobreposição. Estes gráficos podem ser generalizados para outros tubos multiplicando-se o eixo pelo diâmetro do tubo.

Figura 3 – Relação entre velocidade de fase e frequência para um tubo 6" schedule 40 representada em três partes, a) Família do L(0,1); b) Família do T(0,1); c) Família do L(0,2)



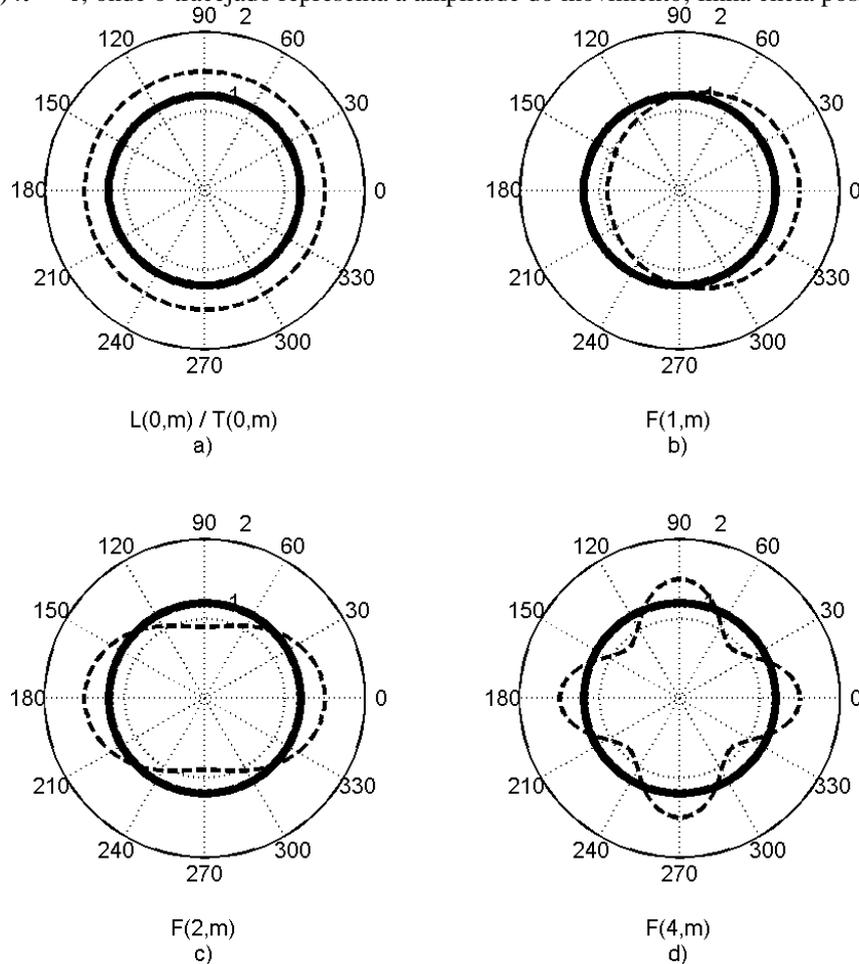
FONTE: Programa DISPERSE

Os modos são separados e nomeados de acordo com seu movimento principal, sua simetria circunferencial e distribuição na espessura, e para isso são utilizadas três classes (Silk e Baiton, 1979):

- a) Longitudinais axissimétricos: $L(0,m)$ onde $m = 1, 2, 3, 4, \dots$
- b) Torcional axissimétricos: $T(0,m)$ onde $m = 1, 2, 3, 4, \dots$
- c) Não axissimétricos (Flexurais): $F(n,m)$ onde $m = 1, 2, 3, 4, \dots$ e $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

A variável m na nomenclatura significa a ordem da vibração na espessura do material enquanto que a variável n representa o número de ciclos na direção circunferencial. A Figura 4 representa melhor o conceito da variável n onde o raio da linha tracejada representa a amplitude do movimento, seja qual for a direção, com relação ao ponto médio representado pela linha cheia.

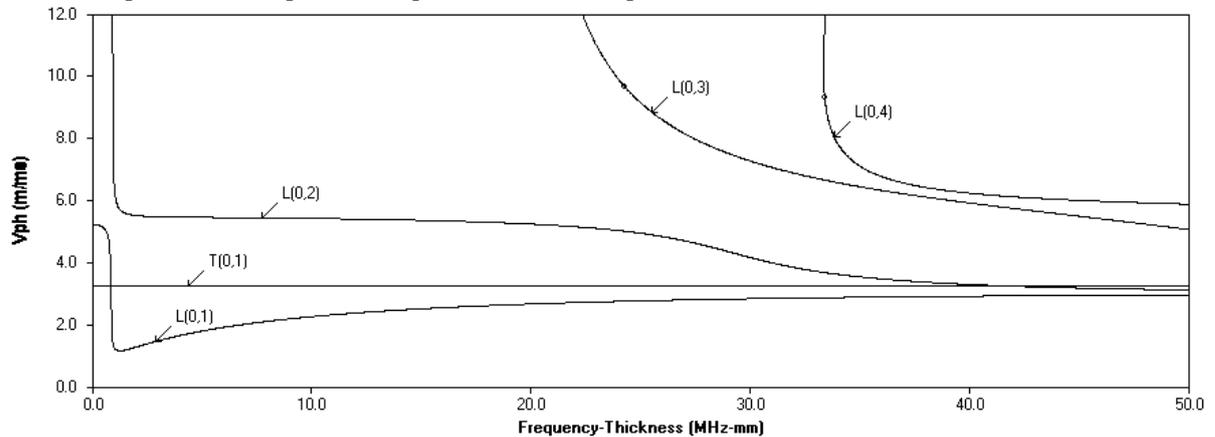
Figura 4 – Representação da seção transversal de um tubo e as quantidades de movimento para: a) $n = 0$; b) $n = 1$; c) $n = 2$ e d) $n = 4$; onde o tracejado representa a amplitude do movimento; linha cheia posição de repouso.



Se tomarmos o raio do tubo tendendo para o infinito, ou seja, o tubo tendendo para uma chapa, os modos $L(0,m)$ corresponderão a todos os modos da Lamb e o $T(0,1)$ corresponderá ao SH. O modo $L(0,1)$ corresponderia ao A_0 e o $L(0,2)$ ao S_0 e assim por diante (Silk e Baiton, 1979). A Figura 5 mostra a curva de dispersão para um tubo onde os

valores de frequência se assemelham aos da chapa; para isso foram mostrados apenas os modos com ordem 0.

Figura 5 – Relação entre velocidade de fase e frequência para um tubo de 85mm de raio e 7 mm de espessura apresentada em produto frequência-diâmetro. Apenas os modos de ordem 0 são mostrados.



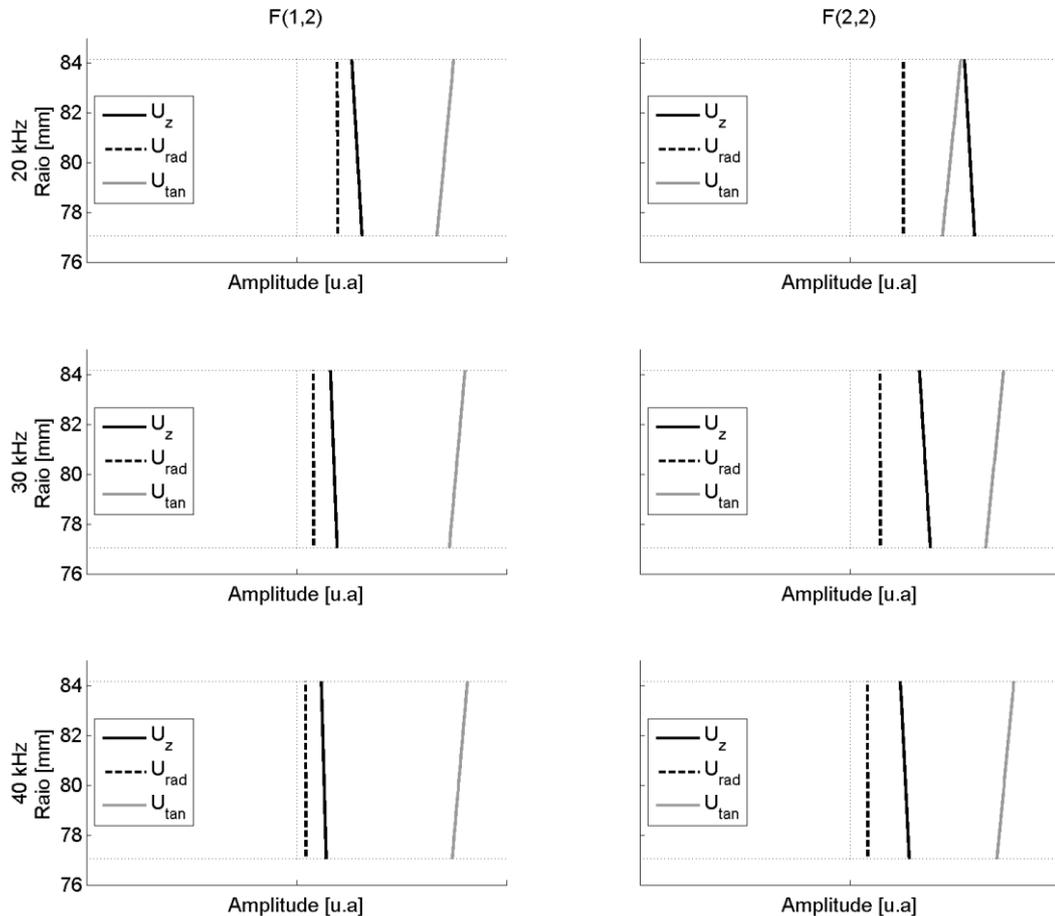
Fonte: Programa DISPERSSE.

A distribuição do movimento da partícula ao longo da espessura para um modo é dependente da frequência e pode variar consideravelmente. Isso impacta diretamente na capacidade de interação do modo com possíveis refletores e na sua excitabilidade. Por definição a distribuição do movimento do modo não se altera pela propagação, embora a amplitude do modo possa diminuir devido à efeitos de atenuação (Rose, 2002; Wilcox, 2009).

Para o modo T(0,1) a distribuição do movimento é praticamente constante na espessura e seu movimento contido apenas na direção tangencial. Contudo, para os flexurais da sua família, o F(1,2) e F(2,2), os deslocamentos são ponderados entre as três direções das coordenadas cilíndricas e diferem da distribuição do T(0,1) na medida em que a frequência desce e sua velocidade se afasta da do T(0,1). A Figura 6 mostra esses deslocamentos em unidades arbitrárias, onde pode ser percebido esse comportamento.

Autores já demonstram que a reflexão de defeitos está relacionada com a distribuição de deslocamentos na espessura, de forma que se o defeito é superficial e a distribuição se concentra no interior da parede então esse modo torna-se insensível a esse defeito (Lowe *et al.*, 1998; Demma, 2003). Para os modos de ordem mais baixa em tubos as distribuições não possuem mínimos, o que favorece a detecção em toda a área transversal do tubo.

Figura 6 – Distribuição dos deslocamentos na espessura para os modos F(1,2) e F(2,2) nas frequências de 20 kHz, 30 kHz e 40 kHz, para um tubo 6 polegadas Schedlue 40.



FONTE: Adaptado do programa DISPERSSE.

2.1.3 Transdutores

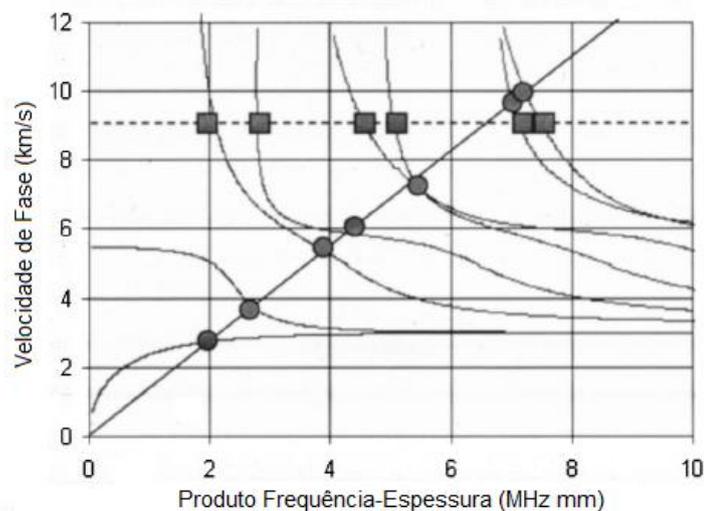
São duas as principais classes de transdutores utilizados em sistemas de ondas guiadas. Uma delas utiliza efeitos eletromagnéticos para efetuar a transdução e por isso normalmente é aplicada à estruturas metálicas. Essa classe é denominada EMAT, do inglês *Electromagnetic Acoustic Transducer*, e seu funcionamento pode decorrer de dois efeitos que são a magnetostricção e as forças de Lorentz. Normalmente apresentam um ou mais ímãs permanentes para estabelecer um campo magnético estático e um algum tipo de bobina para impor um campo alternado. Sensores dessa natureza apresentam o diferencial de não necessitarem de contato direto com o metal do guia de onda, podendo trabalhar sobre camadas de revestimento(Hirao e Ogi, 1999) ou em altas temperaturas (Kogia *et al.*, 2015).

A outra classe é composta de sensores que utilizam materiais piezoelétricos na sua constituição. Esses materiais operam valendo-se do efeito piezoelétrico que relaciona

deformação mecânica do material com o campo elétrico sobre seu volume. O efeito contrário também é verdadeiro, tornando os sensores dessa classe bidirecionais. Os materiais ditos piezoelétricos apresentam um momento de dipolo elétrico inerente de seu arranjo molecular é esse dipolo elétrico que reage com campos elétricos externos para mudar as distâncias inter-atômicas e, em maior escala, deformar o material. Um material piezoelétrico é, normalmente, arranjado em pequenas regiões chamados domínios, onde os momentos elétricos são alinhados. Entretanto o alinhamento entre os domínios é aleatório. Pode-se alinhar esses domínios pelo processo chamando Polarização onde o material é submetido à altos campos elétricos e elevadas temperaturas (Kino, 1987). A escolha de um cristal piezoelétrico com polarização adequada tem um papel importante na transdução já que a direção de polarização será a direção predominante do movimento quando tensão elétrica foi aplicada sobre o elemento piezoelétrico. Controlando a direção da polarização pode-se melhorar a seletividade de um arranjo de sensores (Zhou *et al.*, 2016).

Para transdutores piezoelétricos há duas maneiras clássicas de excitar modos de ondas guiadas demonstradas na Figura 7. A primeira é a utilização de transdutores acoplados a sapatas angulares que tenham regulação do ângulo de incidência da onda. Nesse caso o ângulo pode ser relacionado com a velocidade de fase resultante no guia de onda, representado por uma linha horizontal na dispersão. Pode-se excitar o modo desejado selecionando a frequência que intersecciona a velocidade de fase apontada pelo ângulo da sapata (Rose, 2002).

Figura 7 – Velocidade de fase para uma chapa de alumínio representada no produto frequência-espessura.



FONTE: ROSE, 2002, p277

O segundo modo de excitação é a utilização de transdutor composto de mais de um elemento piezoelétrico onde a distância entre os elementos define um comprimento de onda espacial. Esse comprimento de onda é representado como uma rampa na dispersão dada a relação $v_{fase} = \lambda \cdot f$. Novamente, fazendo a escolha da frequência obtém-se o modo posicionado na intersecção da rampa (Rose, 2002).

Se considerarmos um arranjo de dois transdutores espaçados de uma distância infinita, a rampa se tornaria uma linha vertical. Deste modo obtém-se um caso especial do segundo tipo de excitação onde um transdutor é utilizado sozinho para emissão. Desta maneira todos os modos existentes na frequência escolhida serão excitados.

2.1.4 Arranjos de Sensores

Com a grande quantidade de modos presentes no tubo, se faz necessária a utilização de técnicas que limitem ou que dissociem os modos emitidos ou recebidos pelo sensor. A esse estudo é dado o nome de seletividade. Uma alternativa para o controle da emissão de modos está no projeto dos sensores como discutido na seção anterior. O controle desses parâmetros dimensionais relacionados aos comprimentos de onda em sensores com mais de um elemento ativo é impraticável para ondas guiadas de longo alcance onde os comprimentos de onda envolvidos são da ordem de dezenas de centímetros. Os sensores resultantes dessa técnica teriam tamanhos exagerados ou mecanismos por demais complexos (Cawley, 2002).

Quando os comprimentos de onda a serem utilizados são muito maiores do que o tamanho do transdutor pode-se aproximar o mesmo para um ponto. Isso abre a possibilidade de trabalhar com arranjos de transdutores com um elemento piezoelétrico cada. Arranjos controlam os modos emitidos ou recebidos através da escolha cuidadosa da posição de cada transdutor (Alleyne e Cawley, 1996). Com o uso de arranjos pode-se emitir um conteúdo modal controlado de modo a ajustar o ponto focal em um ponto específico na superfície do tubo (phase-array) e com isso aumentar a sensibilidade à reflexões oriundas daquela posição (Li e Rose, 2001; 2002). Também é possível controlar a direção de emissão em guias de onda alongados (direcionalidade). Essa técnica que por vezes pode ser obtida por pós-processamentos também pode ser obtida no momento da emissão (Wilcox, 2009). Técnicas de processamentos avançados para chapas permitem até mesmo distinguir a direção a qual uma reflexão incide sobre um arranjo concentrado (Wilcox, 2003b).

Por fim, nesse trabalho serão utilizados arranjos de sensores em forma de anel posicionados em torno da circunferência do tubo. O conjunto de dois anéis de sensores será chamado de colar de sensores. Os objetivos principais do uso de um colar são: permitir a emissão do modo $T(0,1)$ em detrimento de outros modos; permitir a emissão direcional, facilitando a interpretação dos resultados e distinguir a ordem circunferencial das reflexões.

2.2 PROCESSAMENTOS

Mesmo fazendo uso do controle de modos no momento da emissão, seja pelo projeto do sensor, seja por uso de arranjo de sensores, ainda há a possibilidade do modo emitido ser convertido devido à interação com os defeitos ou refletores benéficos. Mesmo nesse cenário é possível utilizar um sistema de inspeção utilizando apenas a ordem 0 na emissão e utilizar um sensor que também só é sensível à ordem 0. Embora o sistema seja mais simples o resultado da localização é limitado à posição longitudinal sobre o tubo à exemplo de (Laguerre *et al.*, 2002). Trabalhos que tentam lidar com a quantidade de modos recebidos realizando algum tipo de separação através de técnicas de processamento são encontrados com mais frequência.

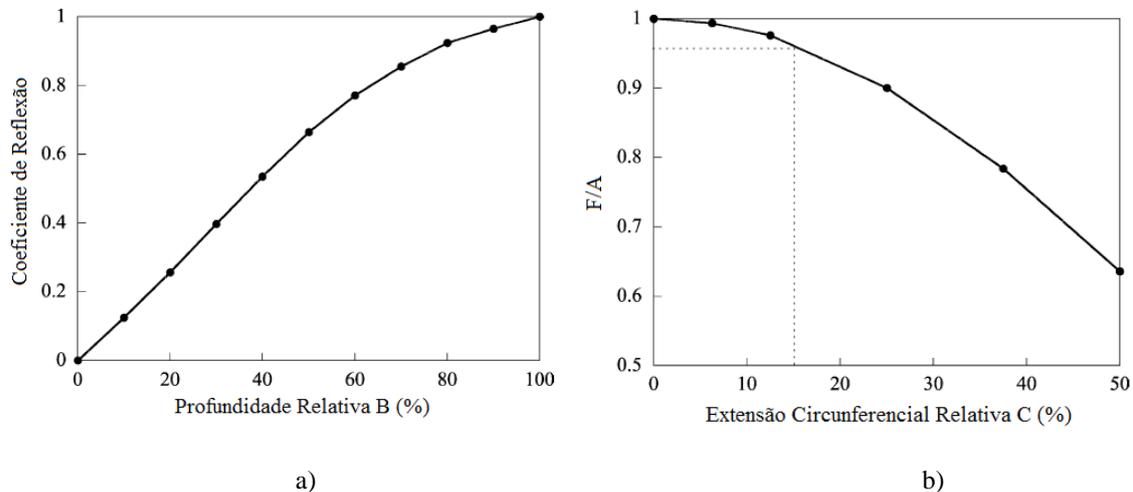
Nesse ponto a grande maioria dos trabalhos se utiliza de ferramentas matemáticas chamadas de transformadas integrais, as quais são amplamente utilizadas por serem capazes de traduzir determinado conjunto de sinais para uma base que seja interessante para a visualização, ou represente algum aspecto da propagação da onda (Bracewell, 2000). A transformada mais aplicada e amplamente difundida é a transformada de Fourier que encontra diversas aplicações no estudo de ondas mecânicas por relacionar o domínio temporal ou espacial nas suas respectivas frequências. A utilização mais direta dessa transformada é literalmente transformar dados de coletas para o domínio frequência vs número de onda. Nesse espaço os modos podem ser separados mesmo que estejam sobrepostos no domínio temporal-espacial (Alleyne e Cawley, 1991). Esse método de separação é aplicado com sucesso mesmo para dados experimentais em meios anisotrópicos (Hayward e Hyslop, 2006).

Em tubos onde um colar de sensores individuais é utilizado, a principal maneira de diferenciar os modos é decompor os resultados obtidos na ordens circunferenciais, parâmetro n na nomenclatura. A decomposição pode ser feita através da ligação correta entre os sensores como em (Alleyne e Cawley, 1996) que utilizou um colar com todos os cristais em paralelo para receber apenas a ordem 0. Outra maneira é coletar os dados dos sensores individualmente

e depois aplicar uma decomposição por transformada de Fourier ou Transformada de Cossenos para distinguir entre as ordens circunferenciais (Demma *et al.*, 2004).

Essas ferramentas se tornam importantes quando o interesse é caracterizar as reflexões, sendo possível, nesse caso, fazer a relação das intensidades para cada modo recebido com fatores geométricos dos defeitos. Foi demonstrado que a intensidade do modo de ordem 0, seja ele o T(0,1) ou o L(0,2), é aproximadamente linear com relação à profundidade de um defeito concentrado e que a relação de amplitudes do modo F(1,2) para o T(0,1) ou do modo F(1,3) para o L(0,2) é utilizada para inferir se o refletor apresenta a condição de simetria axial ou é localizado na circunferência (Lowe *et al.*, 1998; Demma *et al.*, 2004). O gráfico na Figura 8 mostra essas relações de intensidade. No caso da imagem em (a) a intensidade do modo Axissimétrico, seja T(0,1) ou L(0,2), com respeito à profundidade percentual representada por B%; para o caso da imagem em (b) a razão calculada entre o modo flexural F pelo modo axissimétrico A com respeito à extensão circunferencial percentual do defeito C%.

Figura 8 – Coeficientes de reflexão: a) Intensidade do modo Axissimétrico com respeito à profundidade percentual do defeito B%; b) Intensidade da razão F/A com respeito à extensão circunferencial do defeito.



FONTE: Imagens a) (Demma *et al.*, 2004) p172 e b) (Demma *et al.*, 2004) p171

Ainda há o fenômeno da dispersão do modo, e esse efeito inerente da propagação manifesta-se fazendo com que o tamanho do pacote emitido aumente, tanto no tempo quanto no seu tamanho espacial. Nesse assunto, técnicas como a decomposição por *wavelet* são utilizadas para extrair parâmetros de sinais dispersivos (Li *et al.*, 2009). Contudo, se o comportamento do guia de onda é totalmente entendido, como é o caso para chapas e tubos, pode-se aplicar uma técnica de processamento capaz de desfazer o efeito dispersivo

cumulativo da propagação. Esse método utiliza as curvas de dispersão juntamente com o sinal transformado para o domínio da frequência para retro-propagar o pacote para sua condição inicial (Wilcox *et al.*, 2001b; Wilcox, 2003a).

A informação de coletas de múltiplos sensores também é utilizada para compor imagens que representam uma planificação da estrutura inspecionada. O objetivo é produzir meios para localizar espacialmente os refletores vistos nos sinais. Existem técnicas aplicadas sobre arranjos esparsos de sensores em chapas, como o método da hipérbole e da elipse (Clarke *et al.*, 2009), e também para arranjos concentrados como em (Wilcox, 2003b).

Embora as técnicas de imagem sejam usualmente utilizadas com arranjos de sensores, foi demonstrada a possibilidade de se fazer uma reconstrução utilizando apenas um sensor onde sucessivas coletas em modo pulso-eco são arrançadas sobre uma linha, fazendo um arranjo sintético. Esse método foi chamado de SAFT (*Synthetic Aperture Focusing Technique*)(Sicard *et al.*, 2002).

Davies utilizou um arranjo em forma de anel de sensores piezoelétricos para gerar imagens de defeitos circunferenciais em um tubo. O modo T(0,1) foi utilizado na emissão e as reflexões geradas pelo defeito foram coletadas em todos os sensores do anel. O método utilizado foi o CSM (*Common Source Method*) que implica em ter vários pontos de vista da mesma fonte, no caso um defeito. Foi demonstrado através de estudos com modelos numéricos que é possível estimar o tamanho de defeitos circunferenciais se sua extensão não ultrapassar 1.5 vezes o tamanho do comprimento de onda do modo utilizado na inspeção (Davies e Cawley, 2009).

2.3 MODELOS NUMÉRICOS

Modelos computacionais são grandes ferramentas que possibilitam avaliar um problema em ondas guiadas de forma mais rápida e flexível à sua contrapartida experimental. O uso de ferramentas computacionais também é vantajoso na fase de projeto onde podem ser experimentados os efeitos de parâmetros de projeto de interesse. Contudo, a qualidade dos resultados obtidos dessa forma está diretamente vinculado à representatividade do modelo escolhido para representar o fenômeno estudado.

O uso de técnicas computacionais para o estudo de ondas guiadas já é prática difundida. Podem ser encontrados estudos, por exemplo, na área de projeto de sensores de aplicação ampla (Belanger e Boivin, 2016) ou até para aplicações mais específicas, como em

altas temperaturas (Cegla *et al.*, 2011). Também foi demonstrado o seu uso no estudo e desenvolvimento de arranjos de sensores (Wilcox, 2003 ; Fromme *et al.*, 2006) de forma a controlar a direção de emissão e recepção das ondas acústicas. É uma ferramenta fundamental no estudo da excitabilidade de modos em chapas (Wilcox *et al.*, 2002) e no estudo de interação das ondas com defeitos (Alleyne e Cawley, 1992b; Demma, 2003). Os resultados de modelos também podem ser utilizados para validar técnicas de processamento de sinal voltadas à detecção de descontinuidades em tubos (Demma *et al.*, 2004; Davies, 2008) e representação de defeitos reais como por exemplo corrosão generalizada (Dobson e Cawley, 2017).

Dentre os métodos numéricos, a técnica de elementos finitos (EF) é uma das mais utilizadas para o estudo de ondas guiadas. Nesse método a estrutura é dividida em um número finito de elementos de tamanho finito onde cada um desses elementos é ligado ao vizinho por sua interface formando o todo da estrutura. A divisão de uma estrutura em elementos traz alguns benefícios como a capacidade de representar formas complexas, aplicação do estudo com propriedades distintas dentro do modelo (i.e. um interface metal-fluido) e o estudo de efeitos localizados.

O modelo no domínio do tempo permite calcular a propagação da onda sobre a estrutura em tempos discretos que podem ser obtidos através da aproximação por diferenças finitas. O resultado para cada tempo é obtido calculando-se a aceleração de cada elemento usando-se a sua massa e a força nele aplicada. A solução da equação de equilíbrio para a estrutura é obtida levando em consideração o resultado do tempo anterior. Ao final tem-se o campo de deslocamentos sobre os elementos para cada instante de tempo.

A discretização temporal e espacial deve ser selecionada apropriadamente já que interfere diretamente na convergência para o resultado correto. Para isso foi demonstrado que, dentro da banda de frequência utilizada, deve-se utilizar no mínimo 7 elementos para o menor comprimento de onda presente (Alleyne e Cawley, 1992b; Demma, 2003).

$$\Delta x \leq \frac{\lambda_{min}}{7}$$

Além disso o incremento de tempo deve ser menor do que o tempo necessário para a onda com a maior velocidade atravessar metade de um elemento.

$$\Delta t \leq 0.5 \frac{\Delta x}{V_{max}}$$

Nesse trabalho serão utilizados modelos representativos construídos utilizando a ferramenta computacional comercial Abaqus/explicit 6.12 da marca Dassault.

3 MÉTODOS

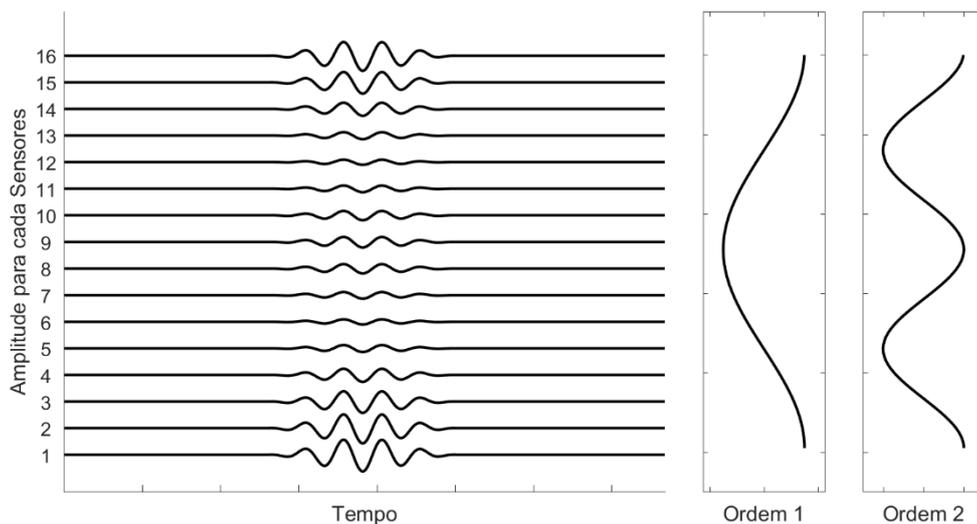
3.1 PROCESSAMENTOS

Nesta seção serão discutidos os algoritmos e rotinas de processamento que se aplicam à dados adquiridos tanto por coletas experimentais quanto para dados oriundos de modelos numéricos. O objetivo principal desses algoritmos é permitir a visualização de uma forma mais clara dos campos acústicos em questão. A principal ferramenta utilizada nesta seção é a transformação dos domínios através das transformadas de Fourier e suas implementações, onde a variável tempo se torna frequência e as variáveis espaciais se tornam números de onda nas suas respectivas direções.

3.1.1 Decomposição na Ordem Circunferencial

Os modos em tubos apresentam uma distribuição na circunferência e isso pode ser medido através de um anel de sensores. Essas distribuições seguem a restrição de periodicidade imposta pelo tubo, portanto os comprimentos de onda na direção circunferencial são sempre frações inteiras do perímetro. Sendo assim, os modos $F(1,m)$, onde a ordem é 1, apresentarão apenas um comprimento de onda disposto no perímetro, os modos $F(2,m)$ serão dois, e assim por diante (Lowe *et al.*, 1998). Na Figura 9 estão representados $n = 16$ respostas de sensores hipotéticos que são modulados por cossenos representando os períodos dos flexurais de ordem 1 e 2 somados a um modo de ordem 0 (constante na circunferência).

Figura 9 – Esquema representativo da modulação na circunferência por modos de ordens 0, 1 e 2, ponderados em 1, 0.5 e -0.2 respectivamente;



No exemplo da Figura 9 n sensores em um anel foram utilizados independentemente para digitalizar os movimentos por eles captados, portanto temos n históricos temporais dos movimentos com m amostras no tempo. Logo, podemos montar uma matriz de dados no tempo $M_{n \times m}$ que contém toda a informação da coleta. Nessa matriz, em cada instante de tempo m temos implícita a restrição de periodicidade.

Uma função real de forma arbitrária pode ser decomposta em uma soma infinita de cossenos através da Transformada de Fourier. Para sinais discretos, ou seja, quando só existem valores da função para instantes de tempo discretos, apresenta-se a implementação discreta da transformada, a transformada de Fourier em tempo discreto (no inglês *Discrete Time Fourier Transform*). A DTFT, aplica a decomposição do sinal de entrada em infinitos cossenos, portando transformando a função discreta no tempo para uma função contínua na frequência. Mas a DTFT apresenta um caso particular quando o intervalo da função discreta de entrada for considerado periódica, a chamada transformada discreta de Fourier (do inglês *Discrete Fourier Transform*). O resultado da DFT é uma sequência de valores de mesmo tamanho da sequência de entrada, representando o coeficientes cujos períodos são múltiplos inteiros do comprimento do sinal (Bracewell, 2000; Haykin e Vanveen, 2001). Se mudarmos a ideia implícita da aplicação de Fourier no tempo para decompor frequências e passarmos para a aplicação espacial poderemos decompor o sinal em número de comprimentos de onda dentro do perímetro o que estará representando a distribuição circunferencial dos modos. Essa aplicação é dada na direção de n na matriz $M_{n \times m}$. Deste modo a decomposição pela DFT nos revela diretamente as quantidades para cada ordem circunferencial em cada instante de tempo. A DFT é definida pelo par de transformada e inversa:

$$DFT\{x_{[n]}\} = X_{[k]} = \sum_{n=0}^{N-1} x_{[n]} \cdot e^{-i2\pi \frac{kn}{N}}$$

$$DFT^{-1}\{X_{[k]}\} = x_{[n]} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{[k]} \cdot e^{i2\pi \frac{kn}{N}}$$

Neste trabalho foi utilizada a implementação interna do Matlab para a DFT, chamada de FFT. Maiores informações sobre a implementação do cálculo podem ser encontradas em (Oppenheim e Schaffer, 2010).

Se tomarmos um vetor $a_{[n]}$ composto de uma das m colunas de M , ou seja uma amostra de tempo para todos os canais, e aplicarmos a DFT teremos:

$$A_{[k]} = DFT\{a_{[n]}\}$$

Os elementos de $A_{[k]}$ serão os coeficientes que representarão até a ordem circunferencial $N/2$. Os elementos complexos de $A_{[k]}$ são aplicados à transformada de Hilbert para se obter um sinal real a partir do resultado. A transformada de Hilbert discreta (DHT) é calculada através da sua implementação no domínio da frequência onde o núcleo da transformada de Hilbert é $H_{[k]}$ (Bracewell, 2000). Sendo assim:

$$DHT\{x_{[n]}\} = \hat{x}_{[n]} = DFT^{-1}\{H_{[k]} \cdot DFT\{x_{[n]}\}\}$$

$$H_{[k]} = \begin{cases} 0, & k = 0 \\ i, & 0 < k < N/2 \\ 0, & k = N/2 \\ -i, & N/2 < k < N \end{cases}$$

O $A_{[k]}$ associados as amostras de tempo são transformadas como:

$$\hat{A}_{[k]} = DHT\{A_{[k]}\}$$

O processo é repetido para as m colunas de M de obtendo $\hat{A}_{[k,m]}$ representando o sinais decompostos dos modos no domínio do tempo.

Para todos os cálculos envolvendo valores de pico dos modos decompostos a transformada de Hilbert é utilizada novamente, dessa vez no intuito de obter o envelope do sinal. Os envelopes dos sinais decompostos são utilizados para análise de amplitude (A-Scan) e permitem a sua visualização em escala logarítmica por serem sempre positivos. Para o cálculo do envelope a sequência $\hat{A}_{[k,m]}$ é decomposta nos seus vetores linha $b_{[m]}$ e para obter o envelope $e_{[m]}$ utiliza-se uma propriedade da transformada de Hilbert:

$$\hat{b}_{[m]} = DHT\{b_{[m]}\}$$

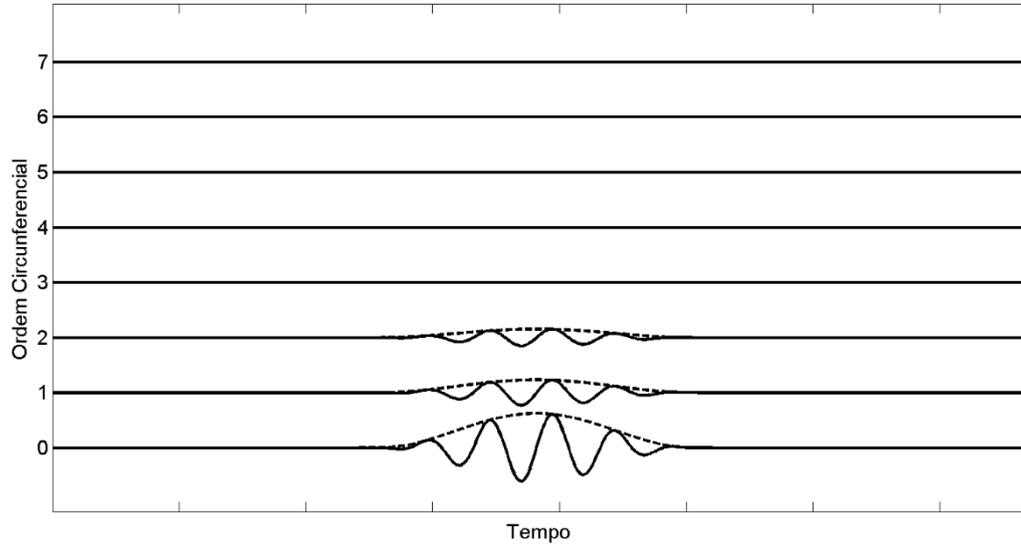
$$e_{[m]} = |b_{[m]} + i \hat{b}_{[m]}|$$

Da mesma forma a matriz $E_{[k,m]}$ contém os envelopes de todas as linhas de $\hat{A}_{[k,m]}$.

No conjunto de dados hipotéticos mostrados na Figura 9 temos 16 sensores recebendo um pulso modulado na direção da circunferência por modos de ordem 0, 1 e 2 com amplitudes

de 1, 0.75 e 0.2 respectivamente. A decomposição descrita anteriormente foi aplicada e o resultado pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Decomposição na circunferência dos dados da Figura 9.



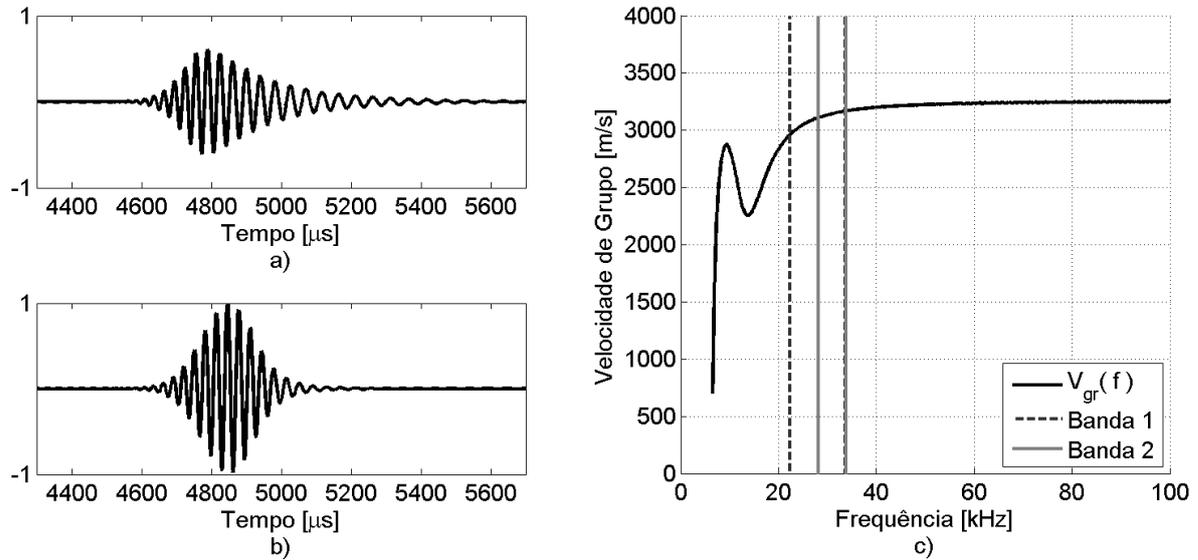
3.1.2 Controle da Dispersão

A dispersão causa um espalhamento nos pulso a medida em que ele propaga pelo material, ou seja, quanto mais distante é tomada uma medida a partir do seu ponto de emissão maior será o efeito do espalhamento. Isso ocorre tanto no domínio do tempo quanto no espaço e é evidenciado em sinais adquiridos como um aumento na duração do pulso se comparado à duração do pulso emitido, além de uma diminuição da sua amplitude. Isso é causado essencialmente por diferentes frequências presentes no pulso apresentarem diferentes velocidades de propagação. O efeito da dispersão na duração do sinal pode causar sobreposições de sinais o que prejudica sua análise e por esse motivo é um efeito que deve ser evitado.

É possível diminuir o efeito da dispersão controlando a banda de frequências do pulso de modo a concentrá-lo em uma faixa pequena ou menos dispersiva da curva, o que conseqüentemente diminui o delta de velocidades presentes no pulso (Alleyne e Cawley, 1992a; Wilcox *et al.*, 2001a). A Figura 11 mostra um exemplo de sinais simulados com presença apenas do modo F(1,2) em uma região dispersiva vista em (c). Após propagados 15 metros a partir do ponto de emissão os dois pulsos, que apresentam bandas em frequência diferentes, mostram formas diferentes. O sinal apresentado em (a) tem duração de pelo menos

1,5 vezes o sinal em (b). O pulso (a) apresenta diferença percentual da maior velocidade para a menor de 7% e o pulso (b) de 2%.

Figura 11 – Pulsos simulados com bandas e frequência diferentes demonstrando o espalhamento decorrente da dispersão após propagados 15 metros da emissão

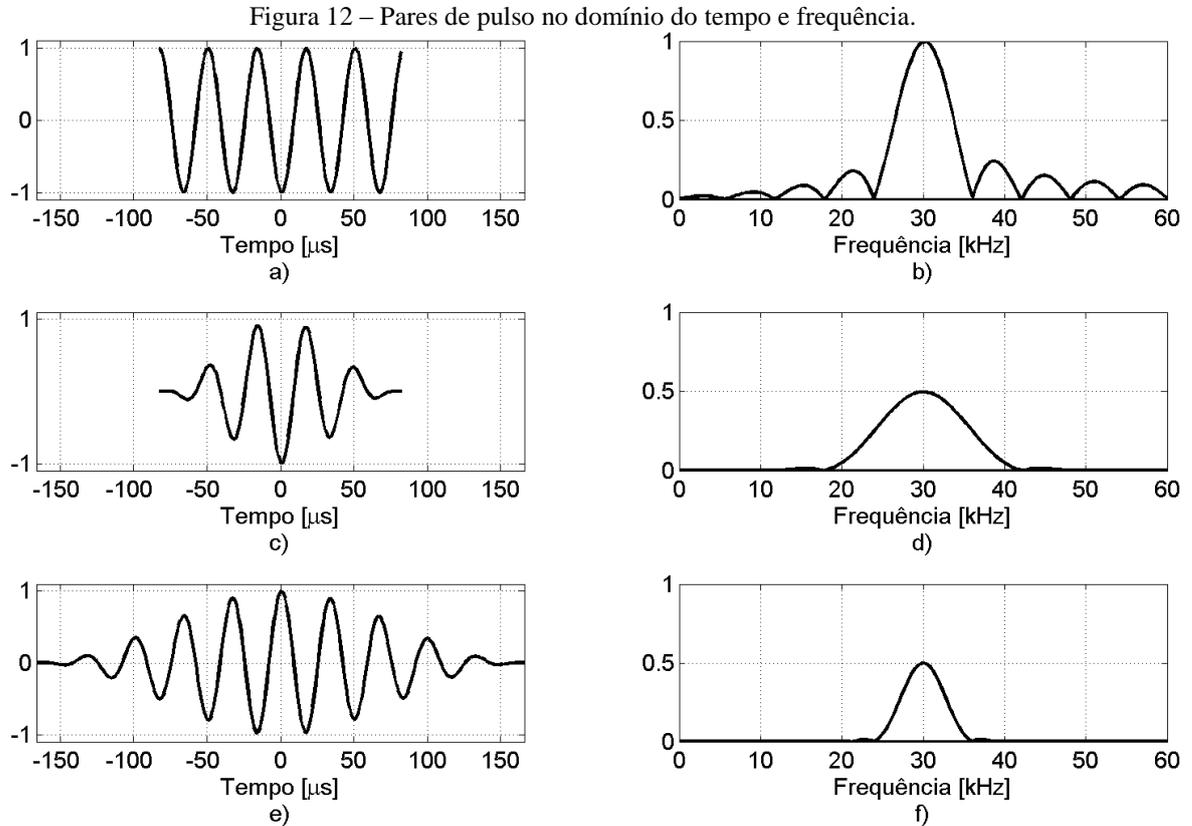


FONTE: c) Adaptado programa DISPERSSE.

Pode-se reduzir a banda de um pulso de dois modos. O primeiro é controlando a duração do pulso, pois quanto maior a duração de um sinal menor a sua banda e vice-versa. O segundo modo é escolhendo uma janela adequada de modo a controlar a atenuação do pulso fora da banda desejada. A Figura 12 demonstra as opções com três pulsos e suas bandas na frequência, o primeiro par, (a) e (b), com janelamento quadrado e duração de 165 microsegundos, o segundo par, (c) e (d), com duração de 165 microsegundos e janelamento de Hanning e o terceiro par, (e) e (f), com duração de 330 microsegundos e janelamento de Hanning. Embora a janela de Hanning diminua a energia total do sinal por um fator de 2, ela é capaz de atenuar as frequências laterais do pulso, já o incremento da duração do pulso apenas torna o espectro mais esbelto.

Percebe-se com isso que não é possível obter um pulso com banda infinitesimal pois para isso seria necessário um pulso com duração infinita. Somando-se a esse fato, tem-se que o efeito da dispersão é cumulativo com a distância e, portanto, para longas distâncias de propagação fica inevitável algum grau de espalhamento mesmo controlando a banda do sinal emitido como visto na Figura 11. Segundo aspecto a ser considerado é que aumentar demasiadamente a duração do pulso com o propósito de estreitar a banda em frequência

incorre na possibilidade de sobreposição das reflexões, o que pode até mesmo impossibilitar a análise dos resultados.



3.1.3 Compensação da Dispersão

Para avaliar os resultados de forma direta pode-se apresentar a intensidade dos sinais coletados pela distância com relação ao colar de sensores ao invés do tempo da aquisição. Para isso o eixo temporal é multiplicado pela velocidade de grupo da frequência central do pulso emitido, isso escala o eixo de forma a representar a distância total que o sinal viajou até retornar ao sensor. Para compensar o caminho de ida e volta ainda é utilizado um fator de 2. Essa descrição é exata para o T(0,1) que é não dispersivo. O remapeamento do tempo na distância é feito utilizando a relação abaixo:

$$d = \frac{v_{gr}}{2} \cdot t$$

Onde v_{gr} é a velocidade de grupo que é constante com respeito à frequência para o T(0,1). Para os demais modos o cálculo utilizando a velocidade para a frequência central do pulso coloca o pulso em uma posição aproximada e o efeito da dispersão não é afetado. Para solucionar essas diferenças pode-se utilizar uma técnica de pós-processamento que além de

remapear o tempo para a distância ainda remove o efeito da dispersão. Esse processamento consiste em retro-propagar sinteticamente o sinal com base no seu número de onda, que é dependente da frequência, para a posição onde a reflexão foi originada (Wilcox *et al.*, 2001b; Wilcox, 2003a).

Suponha que intensidade de um campo acústico em um guia de onda seja descrito por $u(x, t)$ onde t é a variável para tempo e x é a variável para posição sobre a direção de propagação. Considerando apenas a existência de um modo é possível calcular $u(x, t)$ para qualquer ponto x na direção de propagação sabendo-se o campo u para pelo menos um ponto em x . Portanto, suponha que na posição $x = 0$ há um emissor ideal que impõe sobre a estrutura um deslocamento tal que $u(0, t) = f(t)$. O cálculo para obter u em algum outro x é dado pela equação:

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i(k(\omega)x - \omega t)} d\omega$$

Onde $k(\omega)$ é o número de onda angular para o modo em questão e deve ser de conhecimento prévio, k é função da frequência angular ω . O termo $F(\omega)$ é a transformada de Fourier de $f(t)$.

É usual utilizar os sensores em modo pulso-eco, ou seja, no momento em que o sensor termina de emitir ele passa para a função de receptor. Agora, supondo que não há conversão de modo devido à interação com os refletores e que $g(t)$ representa a função lida no ponto $x = 0$ pelo sensor depois da emissão. Então o sinal que retornaria para o sensor pode ser calculado como:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) F(\omega) e^{-i(k(\omega)d - \omega t)} d\omega$$

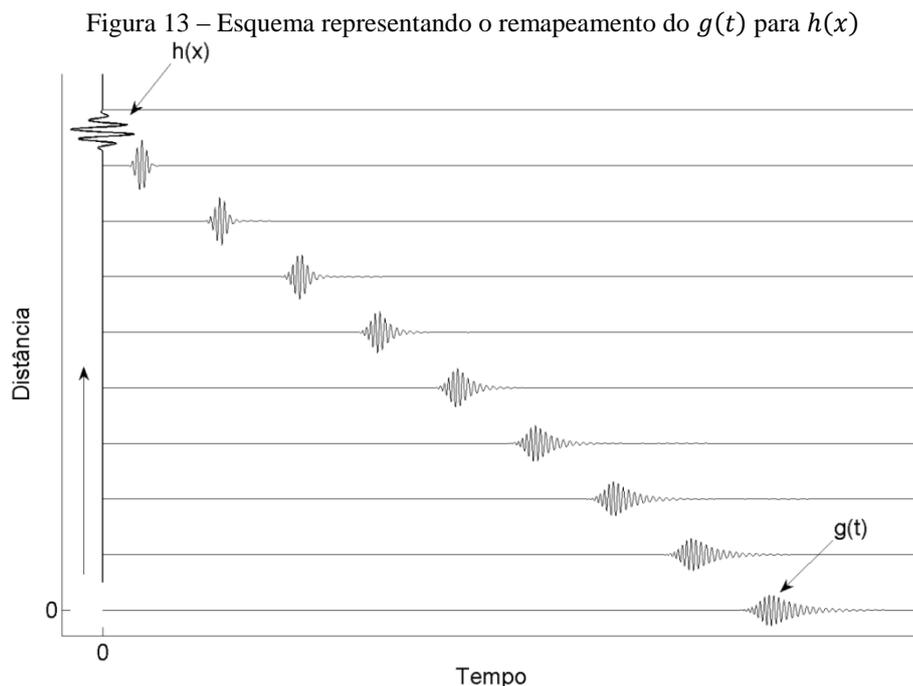
$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{-i(k(\omega)d - \omega t)} d\omega$$

Onde $A(\omega)$ é o coeficiente de reflexão do refletor e d representa a distância percorrida pelo pulso acústico no seu caminho de ida e volta. Agora para tornar a função $g(t)$ em uma função $h(x)$ dependente apenas de x devemos retro-propagar $g(t)$ para todos os x pontos desejados utilizando a equação acima e, após isso, tomando apenas o vetor dependente de x onde valores $t = 0$:

$$h(x) = u(x, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{-ik(\omega)x} d\omega$$

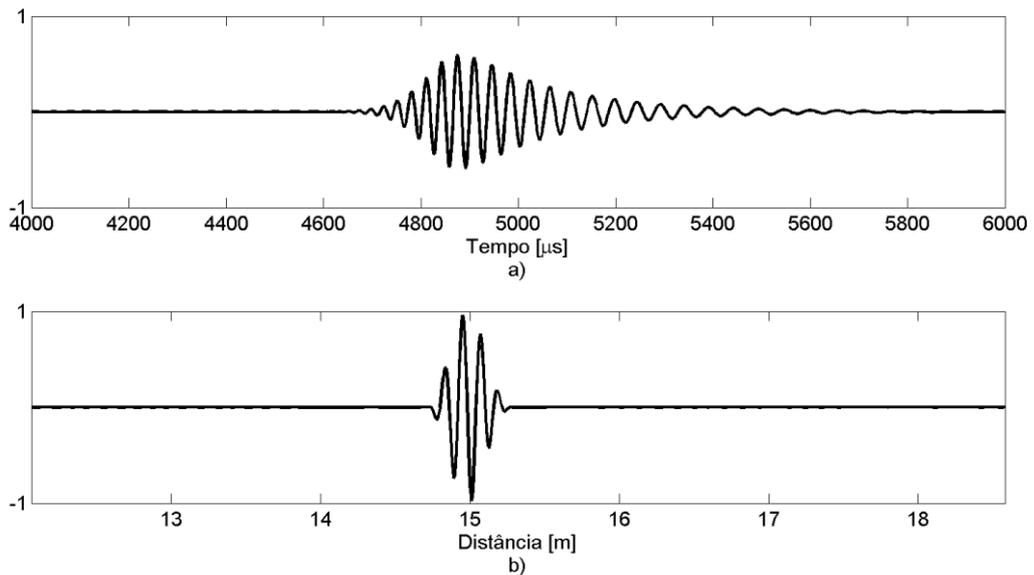
Se propagarmos na direção positiva, ou seja, valores positivos de x então o sinal apresentará a tendência de aumentar a dispersão (divergir) como se continuasse a se afastar da origem. Se propagarmos o sinal $g(t)$ na direção negativa ele terá a tendência de comprimir até chegar ao formato original do momento de sua formação. Se $A(\omega)$ for simplificado, então teríamos exatamente a forma da função $f(t)$ descrita em $h(x)$.

Essa transformação pode ser entendida graficamente como uma projeção ou um remapeamento de $g(t)$ em $h(x)$ onde cada um está posicionado sobre um dos eixos ortogonais. Essa representação pode ser vista na Figura 13 onde é apresentado o plano distância por tempo. No início temos apenas o sinal coletado pelo sensor $g(t)$ sobre o eixo t , depois são calculados repetidamente as retro-propagações representando diferentes valores de x negativos, ao final, é selecionada a coluna formada pelos instantes de tempo $t = 0$ para cada uma das posições x calculadas. O resultado é $h(x)$ colocado sobre o eixo vertical x . Como o sinal foi retro-propagado os valores para x são negativos, a correção para isso é simplesmente inverter o sinal da variável x . Deve ser observado o delta entre valores de x para o cálculo sendo que quando mais refinado melhor fica o resultado, a custos computacionais.



A decomposição circunferencial permite separar a coleta de N canais nas primeiras $N/2$ ordens circunferenciais. Cada decomposição é uma função apenas do tempo e, portanto pode-se aplicar a técnica de compensação da dispersão apenas utilizando a função $k(\omega)$ da ordem correspondente. A Figura 14 apresenta o resultado da compensação para o sinal de banda larga da Figura 11a.

Figura 14 – Efeito da compensação da dispersão; a) Sinal no tempo coletado a 15 metros da fonte; b) Sinal compensado utilizando o algoritmo de compensação.



3.1.4 Planificação do Tubo

A inspeção visual dos resultados de A-Scan permitem ao inspetor avaliar a posição longitudinal de um refletor, bem como, ter uma ideia da extensão circunferencial do mesmo, mas não deixa claro a posição para o caso de refletores com baixa extensão circunferencial. Há ainda o caso de refletores próximos uns aos outros ou com mesma distancia longitudinal mas separados na posição angular que são apresentados somados nos A-Scan.

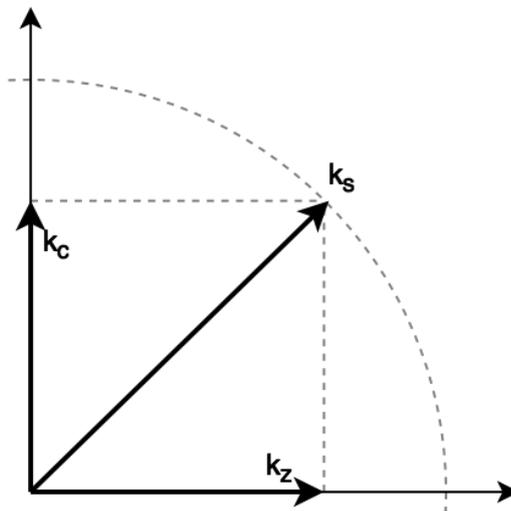
Para solucionar esse problema, pode-se utilizar de técnicas de planificação do tubo. A técnica escolhida para esse trabalho é a *Common Source Method* ou CSM por se assemelhar com a técnica de compensação da dispersão e por ser possível com apenas um disparo do anel de sensores. O resultado é uma imagem da superfície do tubo planificada, que por vezes é chamada de C-Scan.

Essa técnica se assemelha à compensação da dispersão por também se tratar de uma retro-propagação sendo que para a planificação são retro-propagados N curvas ao mesmo tempo representando os N sensores do anel. No caso anterior é usado o conhecimento do

número de onda na direção de propagação da onda para compensar o efeito da dispersão. No caso da planificação o número de onda passa a ser um vetor contendo as componentes para a direção longitudinal (k_z) e circunferencial (k_c). Esse vetor é utilizado para compensar os diferentes caminhos helicoidais que os modos podem apresentar ao propagarem no tubo.

Foi demonstrado que pode-se aproximar o valor de k_z pela medida de k_c através do colar de sensores (Davies, 2008). Para isso, é utilizada a relação geométrica no formato de um triângulo retângulo composto por k_z e k_c como catetos e a hipotenusa como sendo o número de onda k_s do modo T(0,1). A Figura 15 demonstra a decomposição no plano k_z vs k_c .

Figura 15 – Decomposição do k_z e k_s em k_c



FONTE: Adaptado de (Davies, 2008), p39

Sabe-se que k_s depende apenas da frequência em razão da velocidade constante, já o k_c dependente do perímetro do tubo já que deve respeitar a restrição de periodicidade. O k_c é definido como divisores inteiros do perímetro. Isso implica que o cálculo do k_z aproximado pode ter valores que não respeitam a relação do triângulo, nesses casos o k_z se torna um número imaginário. O valor imaginário torna a propagação atenuada e os modos correspondentes ao k_c nessa condição não serão propagados.

$$k_c = \frac{P}{div}, \quad div = 1, 2, 3, \dots \quad k_z = \sqrt{k_s^2 - k_c^2}, \quad k_c < k_s$$

$$k_z = i\sqrt{k_c^2 - k_s^2}, \quad k_c > k_s$$

$$k_s = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Agora os sinais coletados pelos sensores formam uma matriz $g(\theta, z, t)$ em $z = 0$, onde θ representa as posições sobre a circunferência e z a posição longitudinal sobre o tubo. A transformada de Fourier de duas dimensões do sinal $g(\theta, 0, t)$ é chamada de espectro angular e é definido a seguir:

$$G(k_c, 0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(\theta, 0, t) e^{-i(\omega t + k_c \theta)} dk_c d\omega$$

O espectro angular, juntamente com o conhecimento do vetor k , é usado para determinar o campo acústico em fatias do tubo em qualquer ponto de z . Para isso é utilizado a relação no domínio das frequências (Goodman, 2005; Davies, 2008):

$$G(k_c, z', \omega) = e^{i(k_s z')} G(k_c, 0, \omega) e^{i(k_z z')}$$

Onde o espectro $G(k_c, 0, \omega)$ é levado até a posição $z = z'$ através dos dois termos multiplicativos. O primeiro representa as mudanças de fase presentes propagação da onda a partir do colar até a fatia z' utilizando o número de onda do T(0,1). O segundo termo, o retorno da posição z' até o colar em $z = 0$. Após aplicar a compensação da propagação faz-se a inversa da transformada nas duas dimensões para retornar para o domínio tempo-circunferência. A inversa é definida como:

$$I(\theta, z', t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(k_c, z', \omega) e^{i(k_c \theta + \omega t)} dk_c d\omega$$

Sendo que a fatia da imagem final é dada para $t = 0$. Sendo assim, para obter uma imagem planejada do tubo é necessário calcular tantas fatias quando sejam necessárias e nas posições desejadas. Um delta para z apropriado é $\frac{1}{4} \lambda$ ou $\frac{1}{8} \lambda$ dependendo da resolução em z desejada, sendo λ o comprimento de onda do T(0,1) na frequência central utilizada. Acima desses valores o esforço computacional é elevado para baixo ganho de qualidade e informação na imagem. É possível aumentar a resolução na circunferência fazendo uma interpolação junto a uma das implementações na etapa da inversa, assim o tubo planejado pode apresentar mais linhas do que a quantidade de sensores utilizada.

3.1.5 Medida da curva k_z vs ω

Os processamentos demonstrados anteriormente utilizam dados em um conjunto de pontos equidistantes na circunferência para decompor, propagar e compor novas representações. Para o caso real, onde o número de anéis de sensores é limitado, essas

ferramentas são as mais apropriadas. Contudo, em modelos numéricos é possível controlar o tamanho do resultado, ou seja, pode-se ter quantas posições de leitura forem necessárias. Isso aumenta a quantidade de informação obtida e, portanto, nossa capacidade de separar os modos estudados.

No caso de haver medidas em um número maior de anéis sobre a superfície do tubo, é possível fazer uma decomposição espacial na direção longitudinal resultando, em um gráfico em cores no domínio k_z vs ω onde a intensidade representa a presença dos modos no sinal decomposto (Alleyne e Cawley, 1991; Hayward e Hyslop, 2006). A separação dos modos nesse domínio é facilmente realizada de forma visual, além disso esse resultado pode ser contrastado diretamente com as curvas obtidas no programa DISPERSE.

Teoricamente para tomar esse resultado bastaria medir o campo acústico em uma janela de tempo para vários pontos sobre uma linha na superfície do tubo na direção axial. Na prática, a coleta de somente uma linha longitudinal não armazena energia suficiente para representar os modos com velocidades mais baixas e ângulos de propagação maiores. Para resolver isso basta somar o resultado de outras linhas circunferencialmente equidistantes. Para a faixa de frequências utilizada nesse trabalho evidenciou-se que minimamente 4 linhas são suficientes para representar todos os modos.

Outro aspecto importante é a frequência de amostragem espacial e o comprimento dessas linhas. Quanto maior for o comprimento da linha maior será a resolução obtida no domínio k , e a distância entre pontos de medida infere o maior k representável.

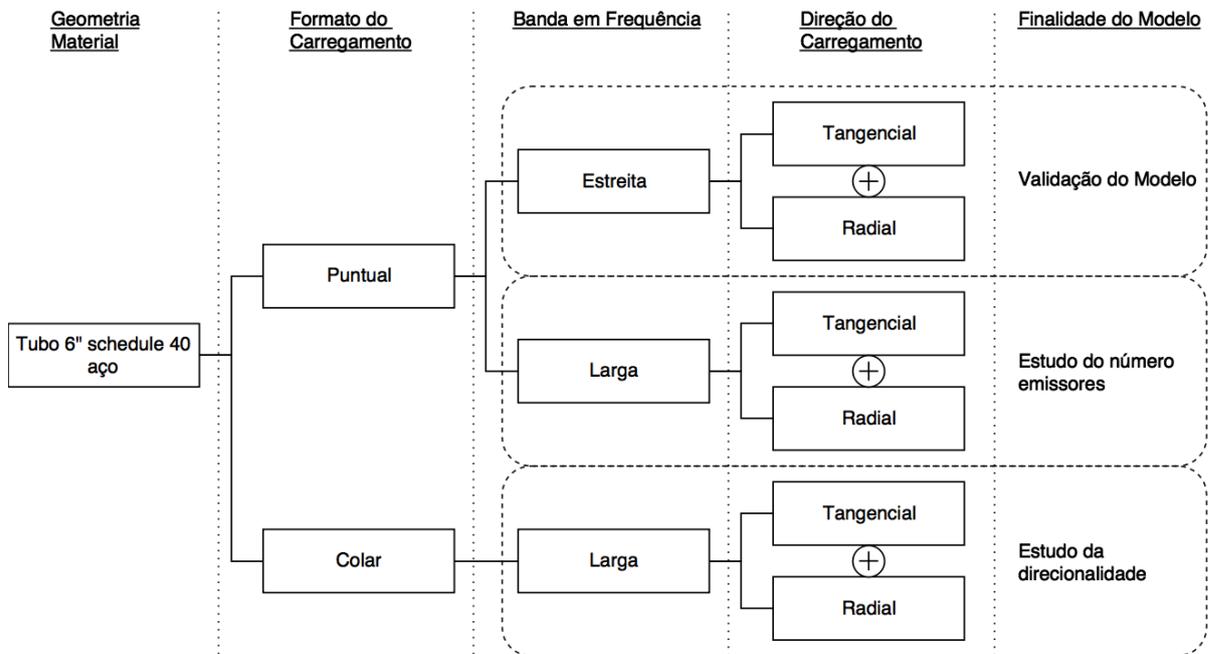
3.2 MODELOS NUMÉRICOS

Para resolver o modelo em elementos finitos foi utilizada a ferramenta computacional Dassault Abaqus 6.12. Esse programa permite obter a solução do modelo na forma explícita através de um arquivo, *input file*, que contém todas as informações da construção do modelo. O resultado do modelo é disponibilizado na forma de um arquivo, *odb*, contendo os deslocamentos nas três direções para cada um dos nós do modelo e para cada tempo calculado. Tendo sido definidos previamente os nós que seriam monitorados, é utilizada uma rotina para extrair os deslocamentos desse arquivo e disponibilizá-los na ferramenta de análise de dados, Matlab 2012a, onde são realizados os tratamentos dos dados. Todo o processo, desde a geração do arquivo de *input*, até a apresentação dos resultados é controlado por algoritmos desenvolvidos em Matlab.

Os objetivos desse estudo numérico são: possibilitar a comparação com o resultado de um experimento a fim de validar o modelo e criar subsídios para os estudos de seletividade e direcionalidade que serão utilizados no projeto do colar.

Para isso foi representada uma geometria, um tubo de 6 polegadas e dois formatos para o carregamento que representam uma fonte pontual (um transdutor isolado) e arranjo de fontes pontuais em forma de dois anéis espaçados (simulando um colar de transdutores). Para cada realização desse modelo foi utilizado uma banda em frequência como esquematizada na Figura 16. Cada realização dos modelos foi resolvida para a direção de aplicação do carregamento radial e tangencial e ao final os resultados foram somados.

Figura 16 – Representação esquemática dos modelos implementados.



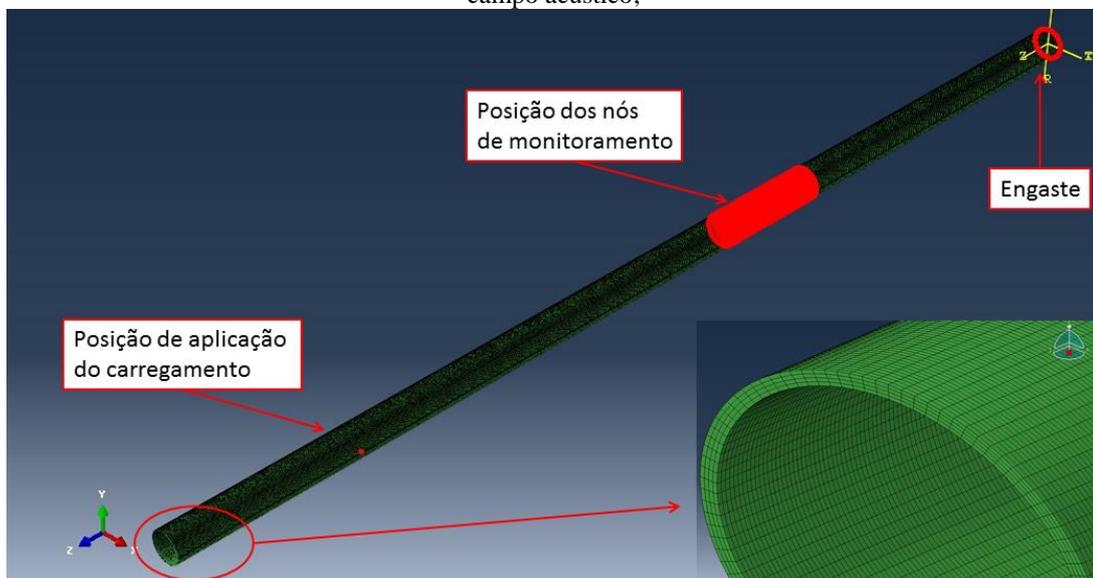
O estudo de propagação destina-se a avaliar o conteúdo modal presente no tubo de acordo com a condição de carregamento e a banda de frequência imposta. Isso é realizado monitorando-se uma grande área na superfície externa do tubo a uma dada distância do emissor. Os resultados dos deslocamentos nesses pontos são avaliados transformando os resultados para os domínios de frequência temporal e espacial, o que permite separar e avaliar os modos propagantes.

A geometria modelada foi um tubo 6 polegadas (170mm de diâmetro externo) com parede de 7.1mm de comprimento de 4 metros. O modelo foi representado por elementos do tipo hexaedro C3D8R em uma malha homogênea contendo 96 elementos na direção

circunferencial, 4 elementos na espessura e com 2203 elementos no comprimento. Assim os elementos atendem ao critério de tamanho apresentado anteriormente. Foi realizado um estudo de convergência de malha para confirmar a qualidade da malha proposta. Para todos os elementos do modelo, representando o corpo tubular, foram aplicadas as mesmas propriedades de material representando as propriedades médias de um aço carbono: Poisson de 0.2896; módulo de elasticidade de 210 GPa e densidade de 7983 kg/m³.

Todos os elementos da face na borda na posição 0 metros foram engastados. Foram monitorados nós sobre a superfície externa do tubo formando uma matriz contendo 96 nós na circunferência por 64 nós na longitudinal em uma faixa da posição 1,5 metros até 1,954 metros. Com isso obtém-se frequências de aquisição espacial de 179.7 e 140.8 pontos por metro na direção circunferencial e longitudinal respectivamente. Esses valores permitem descrever modos até a ordem 48 e números de onda na direção longitudinal de até 70.4 m^{-1} . A Figura 17 mostra a geometria do modelo com as posições dos nós de excitação, dos nós de monitoramento e dos elementos de engaste.

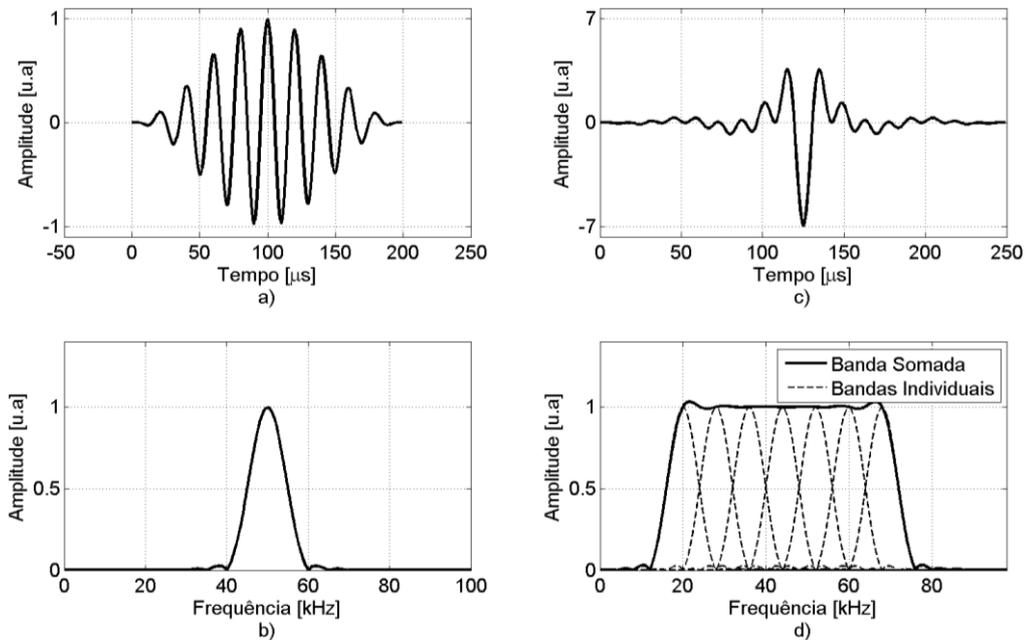
Figura 17 – Malha para o modelo com as posições de aplicação de carregamento, de engaste e de monitoração do campo acústico;



Para o caso de carregamento puntual, o nó foi posicionado à 1 metro da borda oposta (em 2.91m). A partir desse ponto foram gerados dois modelos, um com o histórico de carregamento no nó excitador utilizando um pulso com amplitude unitária e frequência central de 50 kHz com duração correspondente a 10 ciclos ou $200\ \mu\text{s}$. Esse modelo é utilizado para fazer a validação por comparação com os dados de coletas experimentais. O outro modelo utiliza um carregamento diferente para realizar a demais avaliações, trata-se de uma soma de

7 pares de frequência e ciclos que corresponde à uma banda plana de 16 kHz até 72kHz. Os modelos são resolvidos separadamente gerando cada um o seu conjunto de resultados. A Figura 18 mostra os espectros dos carregamentos em banda larga e centrado em 50 kHz.

Figura 18 – Bandas em frequência dos carregamentos utilizadas; a) Pulso 50kHz duração 200 μ s; b) Espectro do pulso em 50 kHz; c) Pulso banda larga com duração de 250 μ s d) Espectro do carregamento em banda larga de 16kHz até 72kHz como uma soma de pulsos



Através do princípio da superposição é possível utilizar o resultado de uma fonte emissora para representar o resultado de um arranjo de emissores distribuídos na circunferência. Faz-se isso acumulando os resultados para cada emissor rotacionado para sua posição. Essa técnica permite o estudo do efeito de um número variável de emissores. Foram avaliados arranjos com 4, 8 e 16 emissores.

Para o caso do carregamento em forma de colar, 32 emissores foram dispostos em dois anéis de 16 emissores que foram posicionados a 1 metro da borda oposta (em 2.91m) com o histórico de carregamento nos nós excitadores em banda larga. A distância entre anéis foi parametrizada em 27, 36, 54 e 112 mm para avaliar o seu efeito na emissão direcionalizada. Foi avaliada a capacidade de supressão de envio da onda para um dos lados (direcionalidade) do método, além disso as respostas em frequência foram analisadas a fim de formular empiricamente uma relação entre a intensidade do sinal direcionalizado e a distância entre anéis bem como a frequência.

O efeito de direcionalidade desejado é atingido quando as emissões dos dois anéis acontecem defasadas temporalmente entre si de forma que o segundo anel a disparar anule o efeito da emissão do primeiro anel. A emissão direcional para o sentido oposto é realizada invertendo-se os papéis dos dois anéis. O atraso temporal utilizado é calculado com a seguinte relação:

$$t_{atraso} = \frac{d}{v}$$

Onde t_{atraso} representa o intervalo de tempo entre disparos dos anéis e v representa a velocidade do modo T(0,1). É visto na literatura que este método implica em um pico de emissão direcionalizado na frequência em que d representa $\frac{1}{4}$, do comprimento de onda (Wilcox, 2009).

3.3 MEDIDAS EXPERIMENTAIS DE CAMPO ACÚSTICO

Foram levantadas medidas experimentais de campos acústicos em dois momentos para este trabalho. O primeiro para caracterização do modelo de sensor a ser utilizado no projeto e confirmação da sua aplicabilidade. O segundo para validação dos resultados dos modelos numéricos utilizados no estudo dos parâmetros de projetos do colar de sensores. Para ambos, foi utilizado o método de interferometria laser em uma bancada especialmente projetada para isso.

3.3.1 Bancada de Interferometria

A bancada é construída a partir de perfis de alumínio, desde a sua estrutura até a mesa de posicionamento de amostra. Ela possui uma massa considerável o que ajuda na diminuição da captação de vibrações externas. Na parte superior ela conta com um sistema de posicionamento semelhante a uma ponte rolante e mais um braço controlável vertical. Todos os movimentos são controlados por motores de passo acionados por um computador industrial NI PXIe-8108 da marca National Instruments. O controlador da bancada também conta com uma placa de geração de sinais arbitrários NI PXI-5422 para a geração dos pulsos utilizados nos testes. Além disso o sistema opera uma placa de digitalização de 8 canais NI PXI-5105 para fazer a digitalização dos sinais dos vibrômetros. Foi desenvolvido um programa para controlar os movimentos da bancada bem como a geração de pulsos e coleta dos vibrômetros. A bancada pode ser vista na Figura 19.

Existem dois interferômetros ópticos instalados no braço para leitura da velocidade de movimento superficial. Os interferômetros estão posicionados de modo que seus feixes incidam à 30° com relação ao vetor normal ao plano da mesa e que entre os dois feixes tenha-se 60° . Os feixes e o vetor normal estão alinhados em um mesmo plano.

Figura 19 – Bancada de interferometria.



Os interferômetros são da marca Polytec que utiliza um conceito modular para seus equipamentos. Esse sistema é composto de dois conjuntos completos compostos de uma unidade de controle (OFV-5000), um decodificador digital banda larga de velocidades (VD-09) e o cabeçote sensor classe 2 (OFV-505). O sistema pode ser visto na

Figura 20.

O sensor tem a capacidade de medir a velocidade em um ponto focal ($\sim 18\mu\text{m}$ de diâmetro) a uma distância ótima de 438 mm através do efeito Doppler medido a partir da interferência que a luz refletida impõe sobre luz emitida pelo emissor. O movimento na superfície do material testado gera pequenas variações na frequência captada que são demoduladas pelo decodificador e amplificadas para um estágio de filtro, após isso o sinal é disponibilizado em uma saída analógica através de um conector BNC 50 Ohms. As saídas são ligas à placa de digitalização do controlador da bancada. A Polytech recomenda o uso de uma

fita reflexiva autoadesiva para melhoria do sinal recebido, por isso, nos pontos de medição foram colados pequenos pedaços dessa fita.

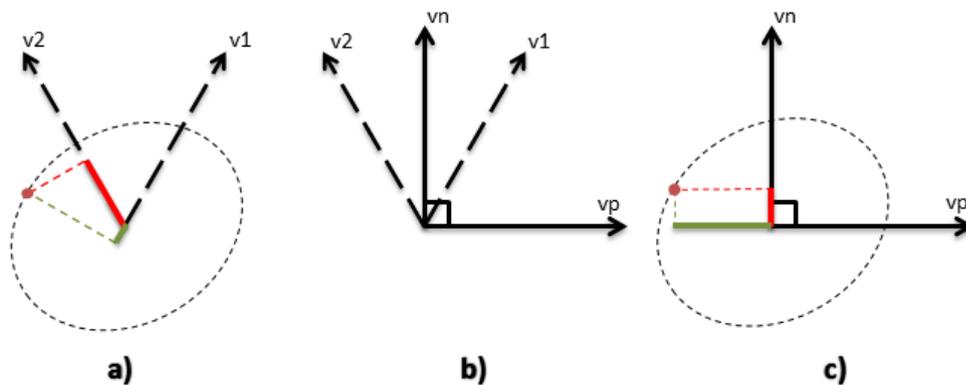
Figura 20 – Sistema de interferometria Polytec: a) Unidade de controle OFV-5000 e b) Fonte laser OFV-505



FONTE: www.polytec.com/

Sendo assim, o arranjo só é sensível a movimentos contidos nesse plano. Para levar os resultados descritos nas direções dos feixes para as direções paralela e normal à mesa pode-se realizar uma transformação de base para as coordenadas cartesianas. A Figura 21 mostra os vetores que compõem cada base e a relativa decomposição do movimento nas suas componentes.

Figura 21 – Esquema vetorial da medida com dois interferômetros; a) Decomposição do movimento na base dos interferômetros; b) As duas bases; c) Decomposição do mesmo movimento nas direções normal e paralela à mesa.



A base B_v definida pelos interferômetros é descrita pelas suas coordenadas na base cartesiana:

$$B_v = \begin{bmatrix} \text{sen } 30^\circ & \text{sen } -30^\circ \\ \text{cos } 30^\circ & \text{cos } -30^\circ \end{bmatrix}$$

Sendo assim, para transformar uma medida de velocidade, em qualquer tempo, do par de medidas basta montar o vetor v^v de tamanho 2×1 contendo as intensidades de velocidades e aplicar na equação a baixo

$$v^v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

$$B_v \cdot v^v = v^c = \begin{bmatrix} v_p \\ v_n \end{bmatrix}$$

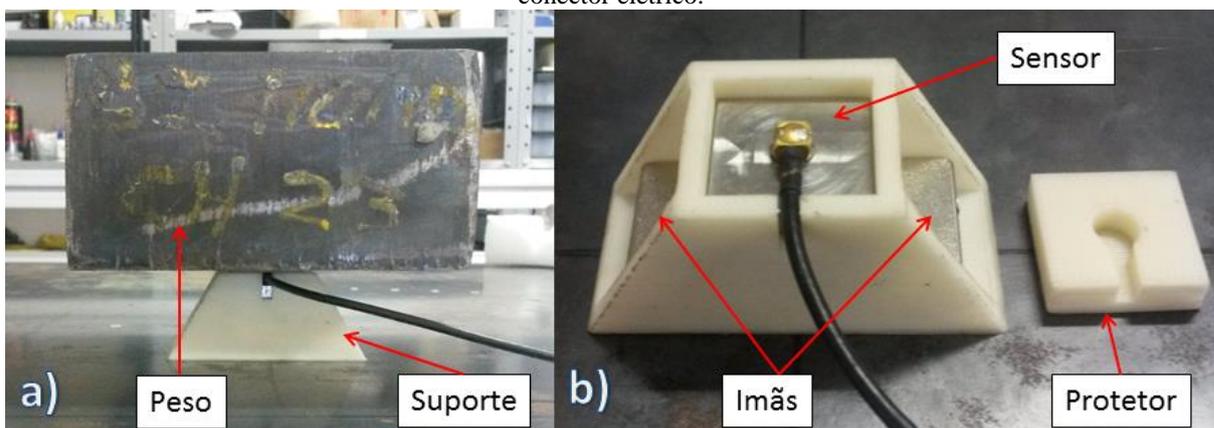
Onde v^v é o vetor de intensidades nas direções dos feixes e v^c é o vetor de intensidades nas direções horizontal e vertical. Para sinais medidos ao longo do tempo essa mudança de base deve ser realizada para cada instante de tempo. Ainda, um sinal representando velocidades no tempo pode ser integrado numericamente para obter-se o deslocamento pelo tempo no ponto, para isso pode-se utilizar regra do trapézio (Oppenheim e Schafer, 2010).

3.3.2 Caracterização do sensor

Um teste foi realizado para mapear a intensidade do campo acústico para cada direção a partir do emissor e descrever essas intensidades nas direções tangencial, normal e radial. Para isso o sensor foi posicionado sobre uma chapa de aço com dimensões de 1,2 metros por 1,2 metros com espessura de 2,2 mm e utilizado como emissor.

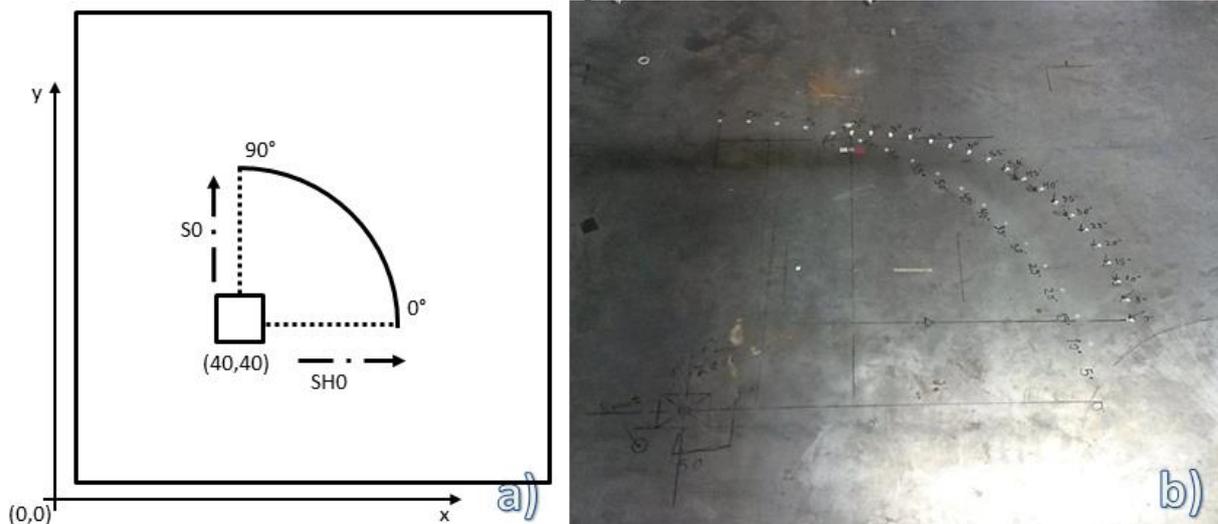
Considerando um dos seus vértices como a origem de dois eixos que descrevem as posições sobre a superfície da chapa, o emissor foi posicionado na posição $x = 40$ cm e $y = 40$ cm. O emissor foi fixo na chapa através de um suporte com imãs produzido utilizando uma impressora 3D comercial da marca Sethi3D que utiliza filamentos de ABS 3 mm. Para aplicar pressão sobre o emissor foi utilizado um peso metálico com aproximadamente 4 kgf. Outros pesos de menor valor foram testados e o escolhido foi o que apresentou melhores resultados, também o maior valor possível na ocasião do teste. A solução para o posicionamento do sensor na chapa pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Esquema e posicionamento do sensor; a) Suporte e Peso; b) Suporte com os imãs e protetor do conector elétrico.



Mantendo-se sua posição fixa foram medidas as velocidades de deslocamento nas três direções para 19 pontos posicionados em forma de um quarto de circunferência. Esses pontos representam de 0° até 90° com passo de 5° . O emissor foi posicionado de modo a apontar seu feixe para a direção 0° . Um esquema representando os posicionamentos do teste e chapa utilizada no teste podem ser vistas na Figura 23.

Figura 23 – Posições para o teste de medida de campo acústico em chapas; a) esquema e b) foto do corpo de prova



Dois vibrômetros foram utilizados para fazer as medidas de velocidade, embora para realizar a decomposição nas três direções foi necessário realizar a medida duas vezes para cada ponto, cada uma com uma orientação. Essas orientações foram necessárias para permitir medir as velocidades nos plano xz e no plano yz .

O emissor foi excitado com um pulso de 30 kHz e 5 ciclos gerados pela placa de geração do controlador da bancada e amplificados para 100 Volts de pico por uma fonte Krohn Hite modelo 7500. Os sinais dos dois vibrômetros foram digitalizados pelo controlador da bancada. Ainda foram feitas duas coletas para cada ponto de medição para obter as medidas das três direções cartesianas.

Os resultados das medidas são históricos temporais da variação da velocidade nas direções dos interferômetros. Esse resultados foram transformados para as direções em x , y e z como descrito na seção anterior. Após isso, foi feita uma segunda transformação a fim de levar esses resultados para o sistema de coordenadas cilíndrica, deste modo obtendo os deslocamentos nas direções radial, tangencial e normal ao plano da chapa. Desses resultados

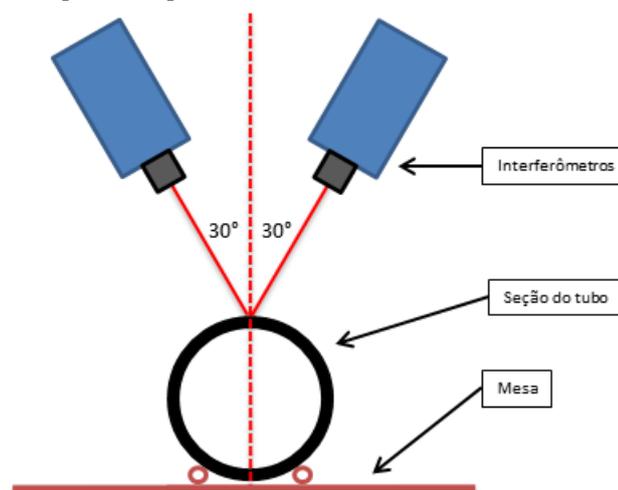
foram retirados os valores máximos dos pacotes considerando a velocidade de grupo para cada modo e posteriormente comparados.

3.3.3 Caracterização em um tubo e validação do EF

Para realizar o experimento representado pelo modelo numérico foi realizado uma coleta de campo acústico em pontos equidistantes na circunferência de um tubo. Para isso um tubo de 170 mm de diâmetro externo com parede de 7,1 mm (6 polegadas schedule 40) de 3,91 metros de comprimento fabricado em aço carbono foi posicionado na posição horizontal repousado sobre dois arranjos de roletes poliméricos que lhe permitem rotacionar em torno de seu eixo. Os dois arranjos estão montados sobre a bancada para mapeamento de campo acústico.

A amostra é posicionada de modo que o plano formado pelos feixes dos interferômetros coincida com o plano transversal da amostra. O ponto focal é colocado sobre a superfície do tubo alinhada com a direção radial. Esse posicionamento implica na decomposição das velocidades nas direções tangencial e radial. A Figura 24 mostra um esquema com os posicionamentos dos interferômetros e seus feixes sobre a seção transversal do tubo.

Figura 24 – Esquema do posicionamento dos interferômetros sobre a bancada.



Para gerar o campo acústico no material foi utilizado o transdutor caracterizado no procedimento descrito anteriormente. Esse transdutor foi fixado à 25,4 mm da borda através de um dispositivo metálico em formato de anel com uma peça polimérica que exerce pressão na parte superior do sensor. Essa peça conta com uma cavidade para reter uma mola que é

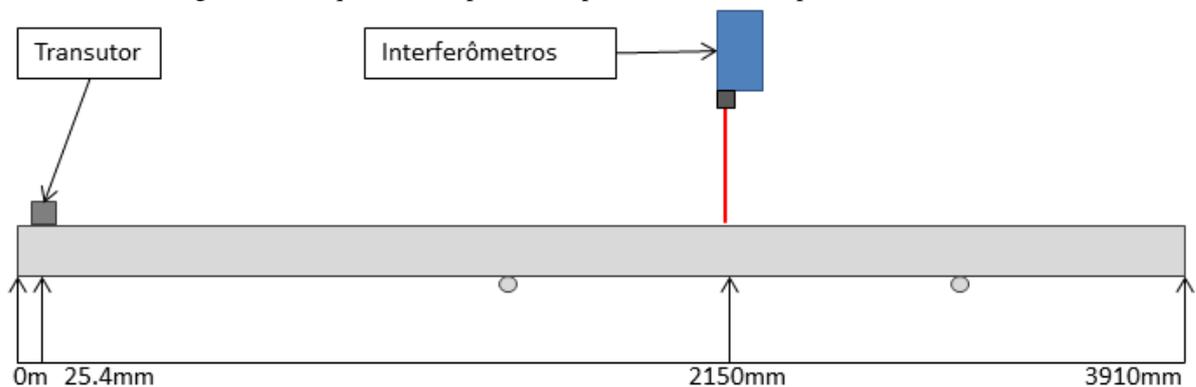
ensionada através de uma barra ligada ao anel metálico fixada através de parafusos. O dispositivo de fixação pode ser visto na Figura 25 com o tubo posicionado na bancada de teste.

Figura 25 – Dispositivo de posicionamento do sensor a) Detalhe da fixação do sensor; b) posicionamento do tubo na bancada de interferometria.



As medidas de velocidade foram tomadas em 16 pontos circunferencialmente equidistantes na posição 2150 mm tomando-se como referência a borda próxima à emissão. Os roletes foram negligenciados por entender-se que causam espalhamento mínimo no campo acústico antes de chegar aos pontos de medição. A Figura 26 mostra um esquema dos pontos de emissão e recepção do experimento.

Figura 26 – Esquema do experimento para medida de campo acústico em tubo.



Todas precauções foram tomadas no sentido de garantir os alinhamentos do tubo e dos feixes uma vez que o reposicionamento do tubo pode incorrer em pequenos desalinhamentos impactando na qualidade do resultado do experimento.

O pulso utilizado para a excitação do transdutor é o mesmo utilizado no estudo numérico de banda estreita, 50 kHz com duração de 200 μ s. O equipamento utilizado para a

excitação do sensor e para a coleta dos dados do vibrometro é o mesmo utilizado nas coletas com o colar finalizado e será melhor descrito na seção 3.6.3. Duas portas digitais do computador industrial foram utilizadas para capturar o sinal de saída dos vibrômetros.

Para cada ponto de coleta foram feitos 200 disparos para realizar a média das aquisições. Ao fim de uma aquisição o tudo era rotacionado sobre seus roletes para enquadrar o próximo ponto de medição.

Após a coleta dos 16 pontos os resultados em forma de velocidades medidas pelos vibrômetros foram transformados para as velocidades tangenciais e após isso foi aplicado o algoritmo de decomposição nas ordens circunferenciais.

3.4 AVALIAÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SENSOR

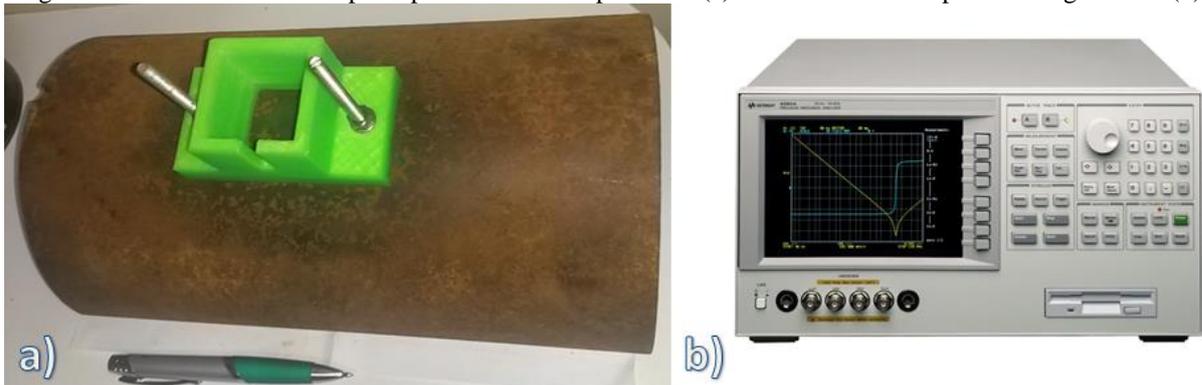
Uma forma possível, e mais rápida, para a localização de pontos de ressonância do sensor é realizar a medida da impedância elétrica. Essa medida mapeia a impedância elétrica com respeito a frequência. Pelo fato do elemento sensor ser piezoelétrico ele tem seu movimento oscilatório mecânico acoplado à um potencial elétrico, ao aplicar sinal elétrico contínuo nos terminais do sensor o mesmo passa a vibrar continuamente. Em pontos onde as reflexões internas ou com a estrutura (caso esteja acoplado a alguma) forem construtivas teremos um ponto de ressonância.

A fim de realizar essa caracterização o sensor é submetido a uma varredura em frequência onde é aplicado uma tensão elétrica oscilatória nos seus terminais com amplitude de 500 mV e a corrente que passa por ele é medida. Após um período de estabilização os valores de tensão e corrente são confrontados para resultar na medida de impedância elétrica naquela frequência. Esse passo é realizado repetidamente alterando-se a frequência aplicada. O valor de impedância, por ser um valor complexo por definição, é apresentado em forma de dois gráficos, um representando o módulo da impedância e o outro representando a sua fase, ambo com relação à frequência. Esses valores podem ser convertidos nos parâmetros concentrados de um circuito equivalente, nesse caso é usado o valor da capacitância de um circuito série para aproximar o comportamento do piezoelétrico. Todo o processo é realizado pelo analisador de impedâncias Agilent E4294A, inclusive a decomposição para o valor da capacitância. Os resultados são exportados em forma de planilha para um computador.

O teste é realizado utilizando trecho curto de um tubo cortado em meia calha. O tubo original tem diâmetro de 6 polegadas e parede de 8 mm, o trecho usado tem pouco mais de 20

cm de comprimento. Nessa meia calha foram feitos dois furos para fixar um suporte para o acoplamento do sensor. Esse suporte fabricado através de prototipagem 3D para isso foi utilizado uma impressora 3D comercial da marca Sethi3D que utiliza filamentos de ABS 3 mm. O suporte tem o objetivo de alinhar o sensor enquanto ele é submetido a uma pressão que é exercida utilizando um parafuso. Na ponta do parafuso existe um pé polimérico para evitar o contato direto do parafuso com o sensor. Apertando-se o parafuso aplica-se pressão na face superior do sensor. Esse parafuso é preso em uma barra metálica que está montada em dois parafusos laterais que são prolongamentos da fixação do suporte na calha. Percebeu-se que a partir de uma determinada pressão aplicada sobre o sensor a medida estabilizava, então todas as tomadas de medida foram feitas pressionando o sensor até sua estabilização. O analisador de impedância e a meia calha com o suporte são apresentados na Figura 27.

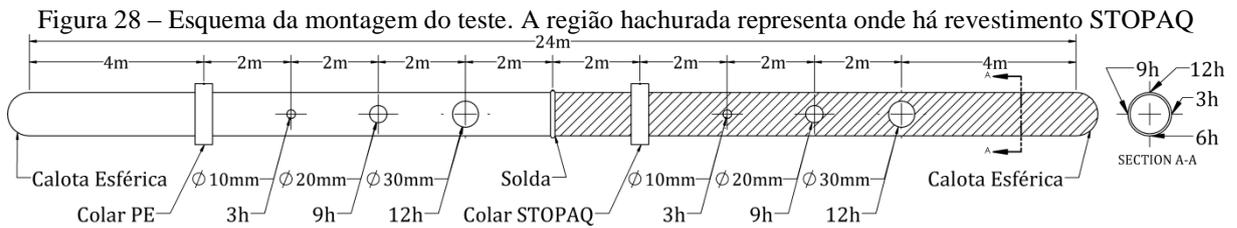
Figura 27 – Meia calha com suporte para o sensor acoplado em (a) e Analisador de Impedância Agilent em (b)



FONTE: em b) www.keysight.com

3.5 TESTE COM CORROSÃO INDUZIDA

O teste consistiu em enterrar um trecho de tubulação composto de dois tubos de 12 metros unidos por solda. Os tubos apresentam diferentes revestimentos, um é revestido por uma camada de 3 mm de espessura de polietileno e o outro por uma massa viscoelástica recoberta por uma fita polimérica da marca STOPAQ. Foi removido o revestimento em uma faixa de 1 metro de comprimento em cada um dos tubos, expondo o metal. Essas regiões foram protegidas com uma pintura anticorrosão apropriada para metais. Nessas regiões foram instalados os colares projetados neste trabalho. O cordão de solda encontrava-se sob o revestimento STOPAQ, indicando que a aplicação desse revestimento havia ocorrido após a união dos tubos o que impossibilitou a sua localização exata. A Figura 28 mostra um esquema da tubulação testada.



Para cada tubo foram removidos 3 pontos do revestimento expondo o metal base. O formato da remoção é circular e possuem 3 diâmetros diferentes 10, 20 e 30 mm. Os diâmetros e posições relativas ao colar foram repetidos para cada revestimento. Se descrevermos as posições em torno da circunferência do tubo como um relógio, os defeitos encontram-se às 3 horas, 9 horas e 12 horas conforme a sequência demonstrada no esquema da Figura 28.

Para induzir o crescimento dos defeitos foi utilizado um sistema para induzir a corrosão nos tubos. Para isso foi montado um arranjo onde a tubulação foi enterrada lado a lado com chapas metálicas. Essas chapas foram posicionadas próximas aos defeitos induzidos. A tubulação e as chapas foram ligadas nos polos de uma fonte de tensão elétrica em um circuito. A tubulação foi enterrada a pelo menos 1 metro de profundidade e nenhum outro sistema de medida quantitativo foi instalado na tubulação para acompanhamento do crescimento dos defeitos.

3.6 PROJETO DE COLAR DE ONDAS GUIADAS

Visando a aplicação de um colar em tubulação enterrada foram avaliadas e definidas as seguintes premissas para a realização do projeto:

- Depois de enterrados o sistema, os colares e a tubulação, todos estarão submetidos a temperaturas amenas e sem gradientes de temperatura;
- Os colares deverão ser resistentes à água e corrosão e se possível operáveis com solo molhado (em decorrência de chuva fraca durante a coleta, ou chuvas anteriores ao dia da coleta que encharquem o solo);
- Os colares deverão ser resistentes ao deslocamento natural do solo devido a compactação após o enchimento da vala;
- O sistema deve prever um ponto de conexão acima do solo para o sistema de aquisição de dados, que será levado até o local em cada uma das coletas;

- e) A estrutura de suporte dos sensores deve prever um mecanismo de aplicação de pressão no sensor que permita ajuste individual, e se possível evitar contatos metal-metal com o sensor;
- f) Colar de sensores deve ser bipartido para facilitar o transporte e sua instalação.

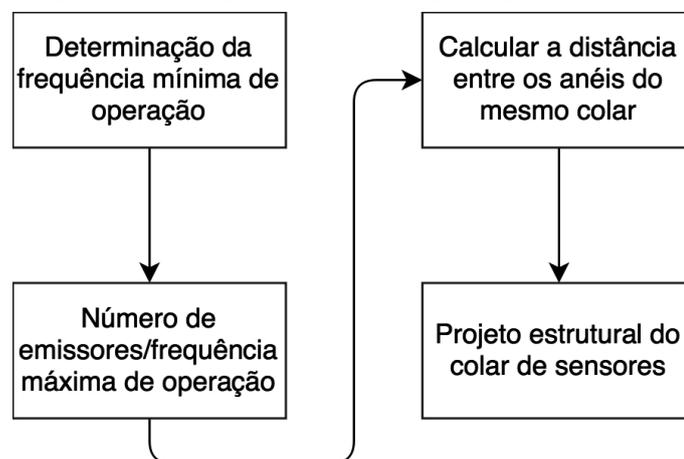
Sendo as três primeiras premissas oriundas de condições de operação impostas pelo meio, e as restantes decorrentes da aplicação e resultados anteriores a esse trabalho.

Além dessas considerações, é apresentado uma metodologia simples para a seleção do número de sensores e faixa de frequência de operação do colar.

3.6.1 Definição do Número de Sensores e faixa de frequência

Com base nos conceitos e estudos apresentados neste trabalho foi montada uma metodologia para auxiliar o projeto do colar de sensores. O objetivo aqui é determinar a quantidade de sensores a ser utilizada e a distância entre os anéis, parâmetros importantes para o projeto da estrutura de fixação do colar. Essa metodologia é apresentada em forma de fluxograma na Figura 29.

Figura 29 – Fluxograma da metodologia de projeto de colar.



O primeiro passo no projeto do colar deve ser avaliar a curva de dispersão do guia que se pretende inspecionar, lembrando que para gerar o A-Scan em tubos são utilizados o T(0,1) e o F(1,2). Seleciona-se a menor frequência de inspeção com base na diferença de velocidade de grupo entre esse dois modos e na quantidade de dispersão aceita para o modo F(1,2). Neste trabalho essa frequência foi escolhida baseada na diferença máxima de 5% entre as velocidades desses modos

O segundo passo é determinar o número de pontos de emissão, que impacta diretamente na frequência máxima de operação. Essa etapa está fundamentada no estudo de seletividade demonstrado na seção 4.2.2 que utiliza resultados de modelos numéricos para identificar a máxima frequência que um arranjo pode operar sem efeitos negativos na recepção.

Para o terceiro passo, tendo fixado a banda de operação, calcula-se a distância entre anéis de modo que o coeficiente da direcionalidade encontre um máximo na metade da banda escolhida. O coeficiente será introduzido na seção 4.2.4.

3.6.2 Procedimento de instalação do colar de sensores

Foi definido um procedimento para a instalação do colar de sensores no local designado que consiste em

- a) Preparação da superfície;
- b) Posicionar as metades e uni-las;
- c) Fazer o pré aperto dos sensores;
- d) Ajustar as pressões nos sensores;
- e) Fechar o colar com a tampa protetora.

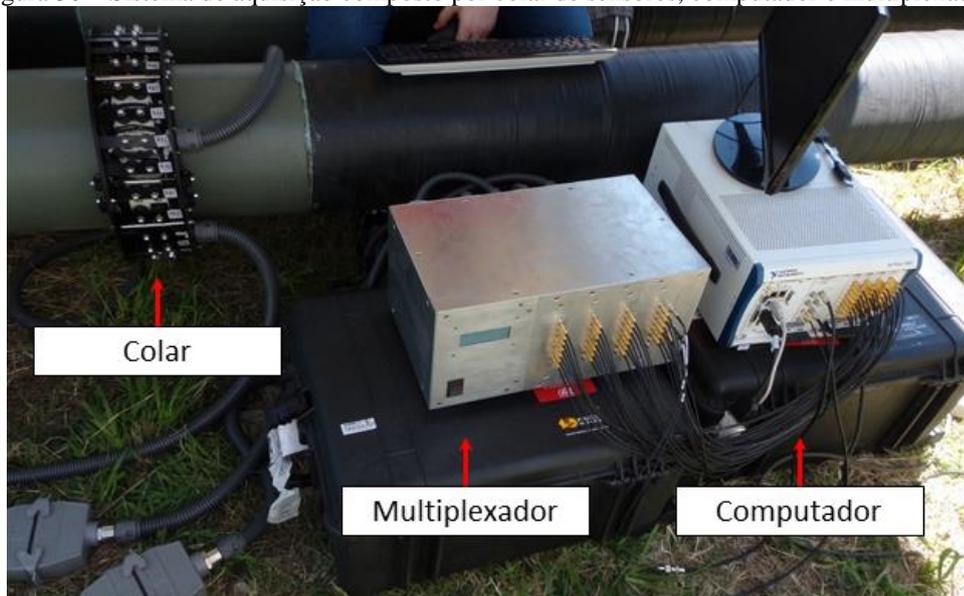
A preparação da superfície consiste basicamente em limpar e se necessário lixar a superfície para evitar elementos que possam desalinhar os sensores. O posicionamento das metades deve ocorrer de modo a não causar desalinhamentos e falta de concentricidade entre o tubo e o colar. A etapa de pré-aperto consiste em aplicar uma pressão intermediária e semelhante em todos os sensores para possibilitar o disparo da onda mecânica necessária para a etapa seguinte.

O ajuste de pressões é realizado através de tela específica do programa de coleta de dados, e portanto, com o sistema todo em funcionamento. Deve-se selecionar um refletor axissimétrico, preferencialmente um cordão de solda, e ajustar manualmente a pressão de cada sensor de modo que a intensidade da reflexão seja homogênea entre os sensores. Uma faixa de variação de $\pm 20\%$ é tolerável nesta etapa. Após realizado o ajuste de pressão basta fechar a tampa de proteção dos sensores.

3.6.3 Sistema de aquisição

O sistema de aquisição de dados utilizado durante a instalação e todas as demais coletas foi desenvolvido durante o projeto do colar, mas não são escopo desse trabalho. O sistema consiste em um computador industrial responsável pela geração do pulso em baixa tensão elétrica e digitalização dos 28 canais dos sensores, bem como a execução do programa de aquisição. O sinal elétrico do pulso é amplificado e ligado aos sensores através do multiplexador controlável que também é responsável pelo ganho de pré-digitalização. A Figura 30 mostra a foto do hardware do sistema.

Figura 30 – Sistema de aquisição composto por colar de sensores, computador e multiplexador.



O computador industrial da marca National Instruments modelo NI PXIe 3185 é equipado com 5 placas de expansão das quais 4 placas são de aquisição modelo NI PXI-5105 com 8 canais de digitalização cada e 1 placa de geração modelo NI PXIe-5451 com dois canais de saída. O multiplexador controlável tem a função de chave analógica e opera comandado pelo programa de aquisição através de uma interface USB. No momento da emissão da onda acústica o multiplexador amplifica o pulso gerado na placa de geração e aplica nos sensores. A tensão aplicada nos sensores é de 100 Volts de pico. Após a emissão o multiplexador retorna a ligação dos sensores para as placas de digitalização do computador, esse estágio conta com uma seleção do ganho de pré-digitalização entre 1x, 10x, 100x e 1000x.

4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos primeiro para a caracterização do sensor, definindo suas condições de operação. Após isso será apresentada a validação do modelo numérico através da comparação dos resultados obtidos experimentalmente. Com um modelo validado, são apresentados resultados de modelos parametrizados e o impacto dos parâmetros na

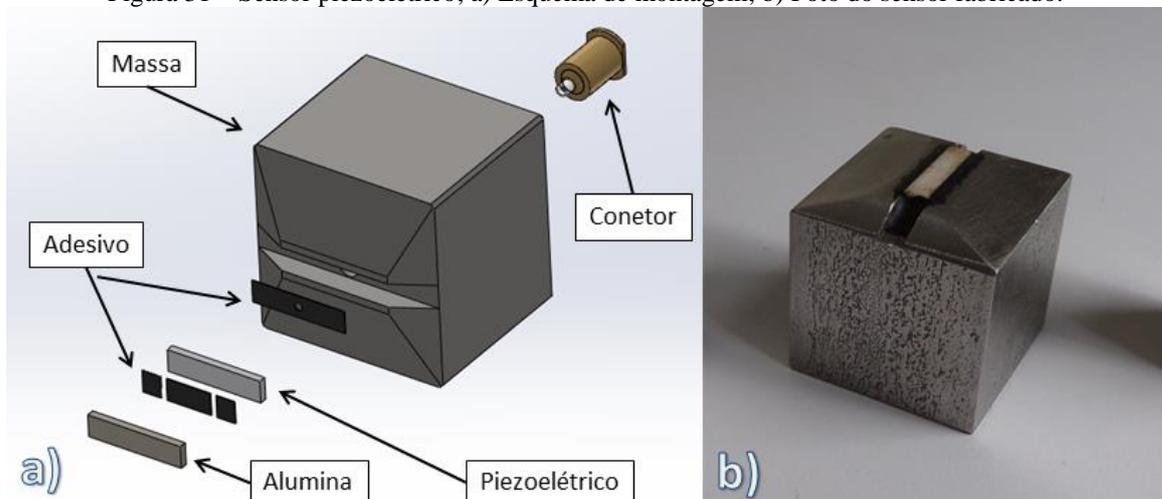
Também será apresentado o projeto e fabricação do colar de transdutores, passando para a aplicação, onde serão discutidos os resultados das coletas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR

Os testes elétricos foram realizados em um lote reduzido de sensores a fim de definir sua faixa de operação e avaliar a capacidade de emissão do modo de interesse, o $T(0,1)$.

O sensor em questão utiliza um cristal piezoelétrico PZ27 com dimensões de 13 mm por 3 mm por 1 mm, polarizado na direção da sua maior dimensão. O cristal é montado em um bloco maciço de aço inox de 25 mm cúbicos que conta com um rebaixo, onde o cristal é encaixado, e um furo passante onde é instalado o conector coaxial. No interior da massa existe apenas um canal utilizado na conexão elétrica entre o núcleo do conector e o cristal. O outro terminal é ligado à própria massa. Por cima do cristal é colocada uma pastilha de alumina com de 1 mm de espessura para proteção, já que o cristal é um material com alta fragilidade. O sensor pode ser visto na Figura 31 juntamente com um esquema de montagem.

Figura 31 – Sensor piezoelétrico; a) Esquema de montagem; b) Foto do sensor fabricado.



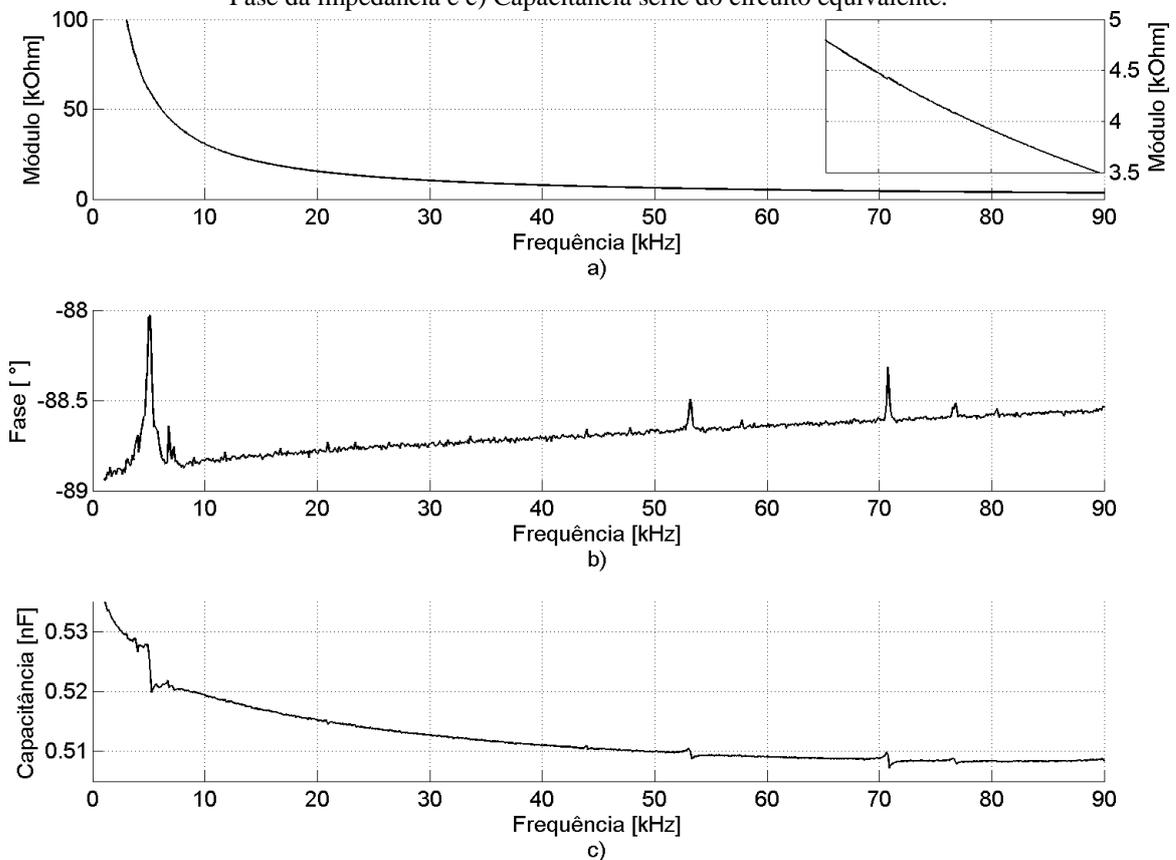
4.1.1 Resposta em Frequência

A tomada das curvas de impedância foi realizada logo após a fabricação dos sensores. Todos os sensores foram submetidos à varredura, contudo serão apresentados apenas os resultados para um sensor, os demais apresentaram comportamentos semelhantes a esse.

O resultado da varredura no sensor pode ser visto na Figura 32, ele é apresentado na forma de três gráficos com mesma faixa de frequências. O primeiro mostra o módulo da impedância, o segundo mostra a fase da impedância e o terceiro a capacitância série do circuito equivalente.

O valor absoluto da fase não tem interpretação física, porém seu formato indica claramente as posições das ressonâncias que, nesse caso, são representados por picos. Um pico visto na fase tem contra-partida nítida no valor de capacitância, já para o módulo essas variações representam valores percentuais muito baixos e não são perceptíveis. A terceira ressonância foi demonstrada no detalhe da Figura 32 a onde a escala vertical foi alterada enquanto a escala horizontal é a mesma da posição onde se encontra.

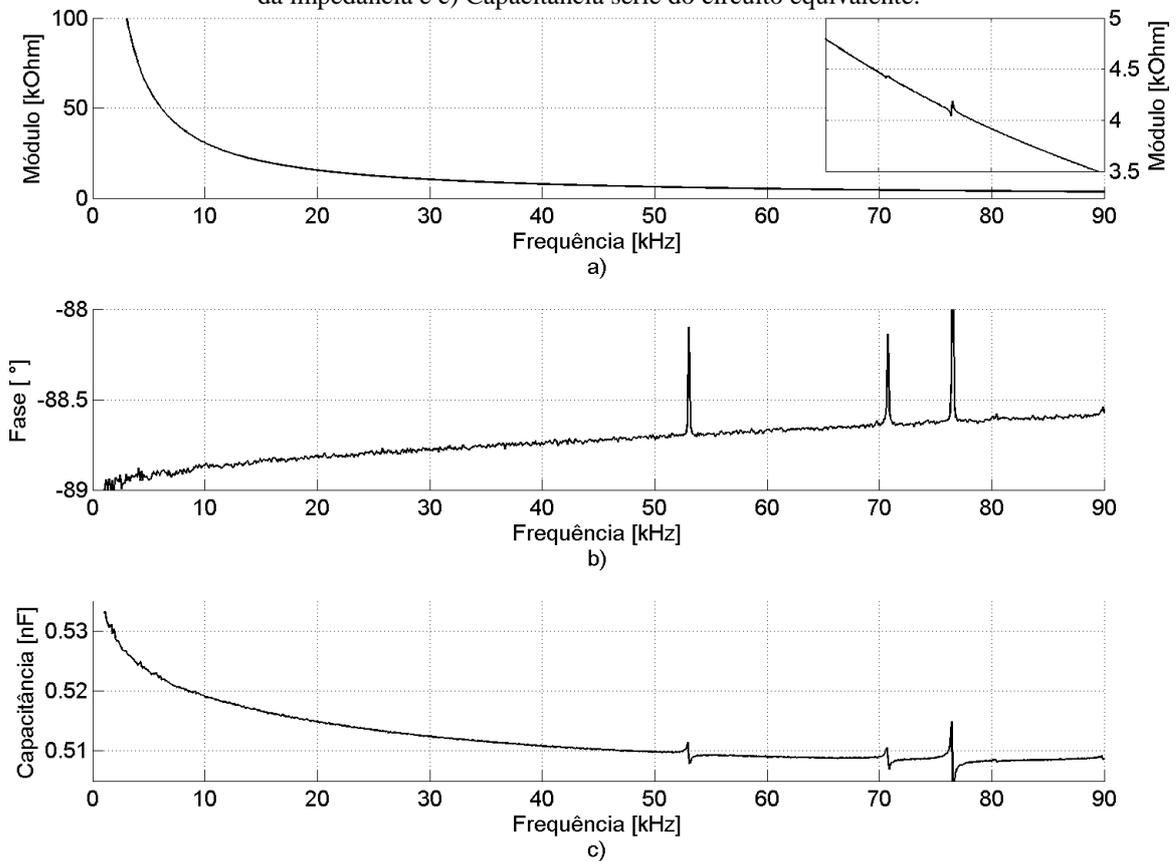
Figura 32 – Resposta usual da medida de um sensor com aplicação de pressão; a) Módulo da impedância; b) Fase da impedância e c) Capacitância série do circuito equivalente.



Ao remover a pressão sobre o sensor a ressonância em 6 kHz some completamente indicando que ela é dependente do acoplamento. As outras ressonâncias aumentam o seu

efeito, indicando que quando o sensor está sob pressão essas são atenuadas. A medida para o sensor sem a aplicação de pressão é mostrada na Figura 33.

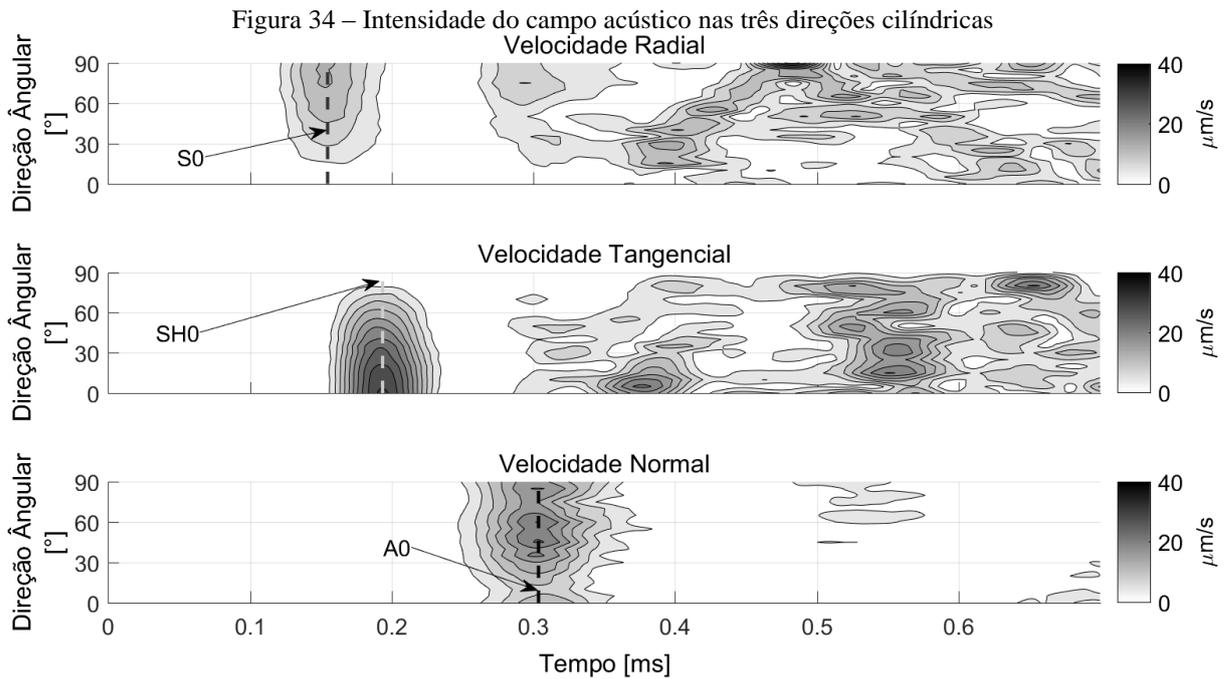
Figura 33 – Resposta usual da medida de um sensor sem aplicação de pressão; a) Módulo da impedância; b) Fase da impedância e c) Capacitância série do circuito equivalente.



A partir desses resultados entende-se que a faixa de operação ideal para esse sensor, quando acoplado, fica entre 10 kHz e 50 kHz.

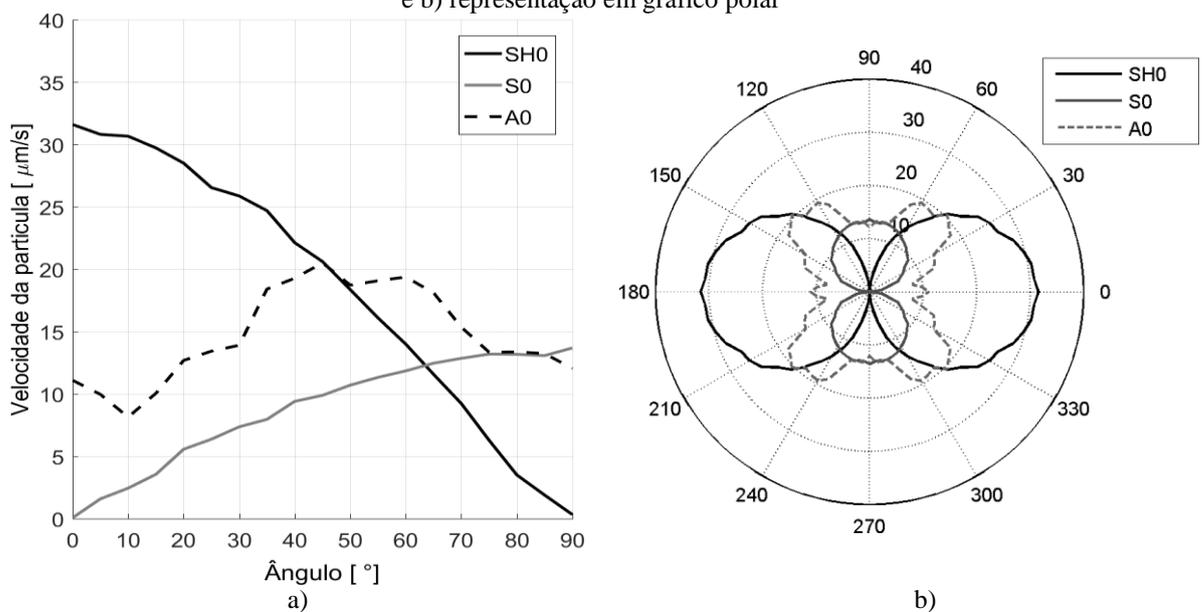
4.1.2 Medidas de Campo Acústico

Os resultados obtidos das medidas de velocidade nos 19 pontos sobre a chapa foram transformados nos deslocamentos em coordenadas cilíndricas centradas no emissor e transformados para seus envelopes. O resultado para todas as coletas pode ser vista na Figura 34 separados por direção de deslocamento. Os primeiros lóbulos que se pode ver da esquerda para direita representam as chegadas dos modos ao ponto de medida.



Os valores de velocidade de deslocamento foram retirados do resultado acima nos tempos indicados pelas linhas verticais correspondentes aos tempos de máximo para cada modo, e posteriormente expandidos para representar os 360°. O resultado pode ser visto na Figura 35.

Figura 35 – Campo acústico gerado pelo sensor nas direções de propagação; a) representação em gráfico de linha e b) representação em gráfico polar



Com era esperado, o sensor emite com mais intensidade na direção 0° e com direção de movimento cisalhante, representado pelo pico do modo SH0. O movimento compressivo emitido na direção 90° é inerente do próprio movimento do transdutor. A medida que o

ângulo aumenta o movimento gerado pelo emissor se transfere do SH0 para o S0 até o ponto onde não há mais SH0, em 90°. Esse transdutor também é capaz de emissão de movimentos fora do plano, embora isso não seja o resultado desejado. Não foram feitas alterações no sensor dentro deste trabalho no intuito de melhorar a razão de emissão SH0/A0.

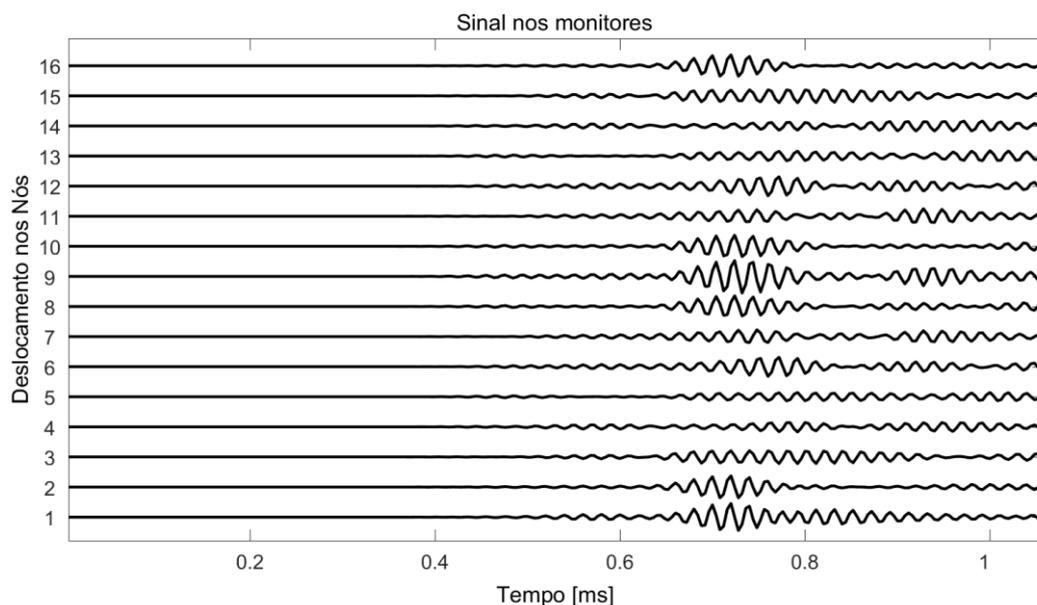
4.2 MODELOS NUMÉRICOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através do método computacional de elementos finitos e seus resultados serão desdobrados em estudos do impacto da quantidade de sensores em um anel e da eficiência da direcionalidade em um colar.

4.2.1 Dados Experimentais e Calibração do modelo

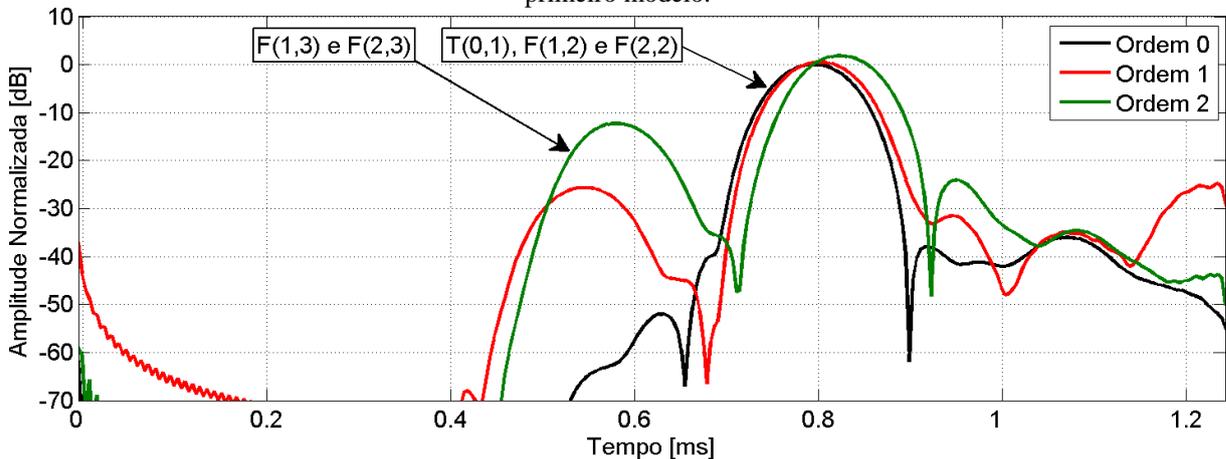
Os resultados do modelo descrito na seção 3.2 para a excitação pontual em 50 kHz são apresentados na forma do histórico temporal de deslocamentos tangenciais em 16 dos 96 nós na direção circunferencial para uma das seções longitudinais monitoradas. A seção escolhida corresponde à posição da coleta experimental realizada. O resultado para os deslocamentos tangenciais podem ser vistos na forma de um empilhamento de gráficos de deslocamento na Figura 36. Percebe-se, à primeira vista, uma distribuição não simétrica dos deslocamentos ao longo da circunferência o que indica a presença de modos além do modo T(0,1).

Figura 36 – Deslocamentos nos nós monitores do modelo 1



A partir dos dados contidos na Figura 36 foi feita a decomposição nas ordens circunferenciais, o resultado pode ser visto na Figura 37. O resultado apresenta três linhas em escala logarítmica que representam as ordens 0,1 e 2. Nesse gráfico são apresentados picos com a duração aproximada do pulso utilizado na emissão. Observa-se a presença de um único pico linha da ordem 0, que para os deslocamentos tangenciais, representa o modo $T(0,1)$. Os valores das três curvas foram normalizados para o valor do pico do $T(0,1)$. Para a ordem 1 e 2 é percebido a presença de dois pulsos para cada, que puderam ser diferenciados pelo seu tempo de chegada, sendo os dois mais rápidos o $F(1,3)$ e $F(2,3)$ e os dois mais lentos, com velocidade muito próxima ao do $T(0,1)$, reconhecidos como $F(1,2)$ e $F(2,2)$.

Figura 37 – Envelope da decomposição dos deslocamentos tangenciais na três primeiras ordens para os dados do primeiro modelo.



Os dados experimentais coletados, já transformados para a direção tangencial e normalizados, podem ser vistos já decompostos nos envelopes das ordens circunferenciais na Figura 38. A interpretação desse resultado é feita da mesma forma que para os dados do modelo, à exceção da presença de ruído elétrico da medição que impõe um limite inferior na intensidade de sinal que podemos distinguir como um pulso. Para os dados experimentais não foi possível verificar a presença de forma clara do modo $F(1,3)$.

A comparação direta dos resultados para o modelo e para os dados experimentais pode ser vista na Figura 39 e valores das diferenças estão demonstrados na Tabela 1. Pode-se verificar que os valores das amplitudes e suas posições no tempo são muito semelhantes o que indica uma boa representação do fenômeno pelo modelo à exceção do $F(2,3)$ onde houve uma diferença de 3dB que ainda assim pode ser atribuído à erros experimentais devido a natureza muito sensível do experimento.

Figura 38 – Envelope da decomposição dos deslocamentos tangenciais nas três primeiras ordens para os dados experimentais.

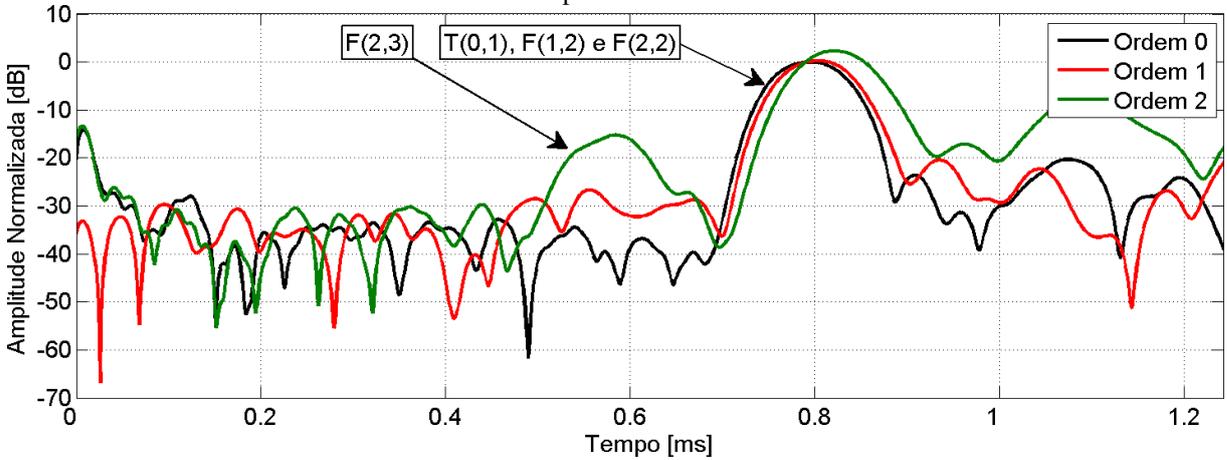
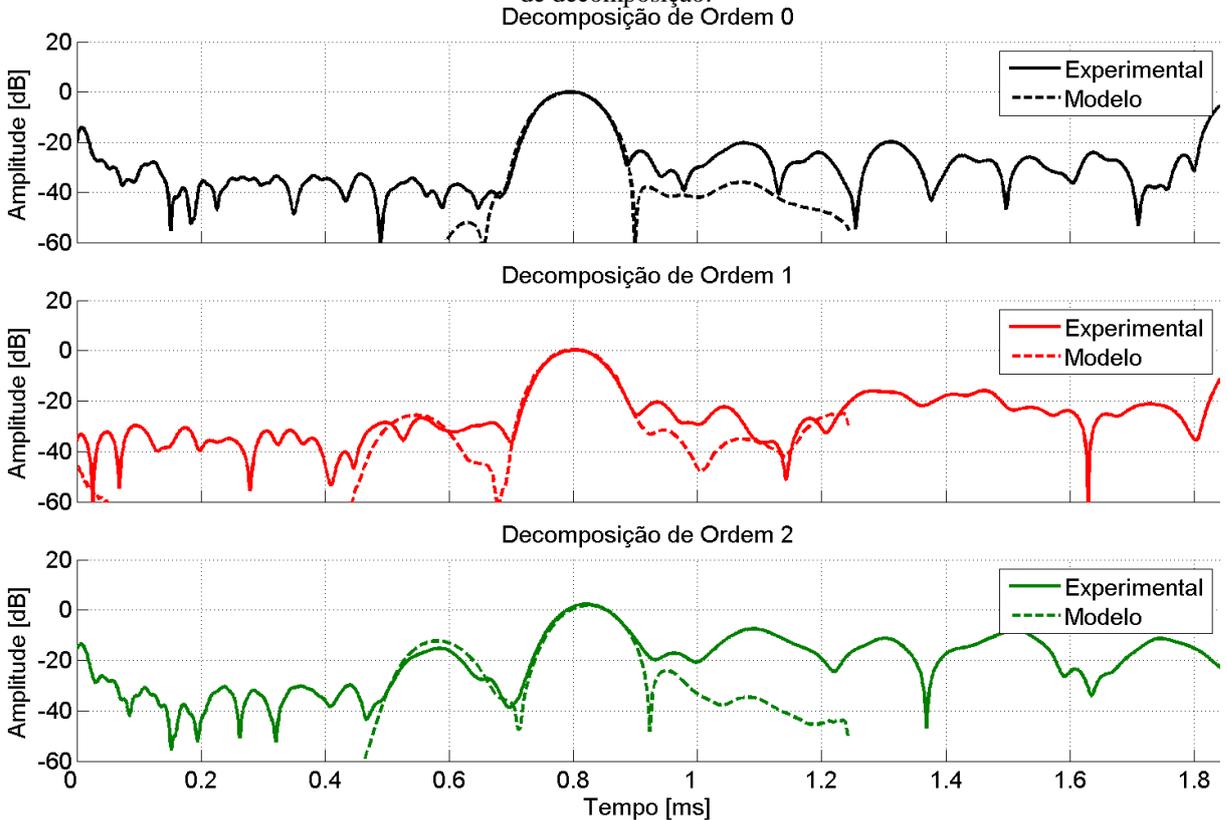


Tabela 1 – Diferenças entre os valores de pico encontrada nos dados experimentais e dados de modelo.

Modo	Modelo dB	Experimental dB	Diferença dB
SH	0	0	0
F(1,2)	0,51	0,23	0,28
F(2,2)	1,82	2,31	0,49
F(1,3)	-25,86	-	-
F(2,3)	-12,27	-15,35	3,08

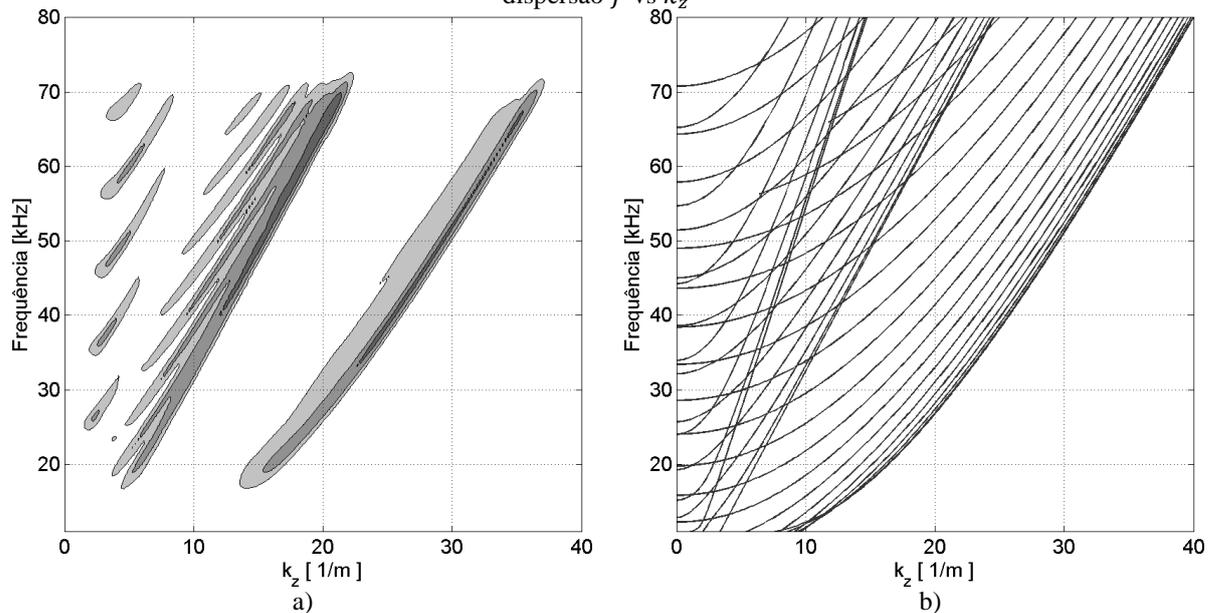
Figura 39 – Comparação da decomposição entre dados de modelo e dados experimentais para diferentes ordens de decomposição.



4.2.2 Estudo de Seletividade e Número de Emissores

Os resultados dos modelos compreenderam uma matriz de pontos sobre a superfície do tubo. Para a validação foi utilizado o anel de pontos correspondente à posição das medidas, sendo assim, um subconjunto do resultado total do modelo. Na avaliação do comportamento de arranjos de sensores foi usando todo o conjunto de dados para representar a dispersão k_z vs ω . Para esse resultado foi utilizado a excitação de banda larga de 16 kHz à 72 kHz. O mapa de intensidades representando a dispersão a partir do modelo pode ser visto na Figura 40 onde valores abaixo de 5% do pico foram removidos para aumentar o contraste da imagem. Também são mostrados, na Figura 40, as curvas geradas pelo programa DISPERSE. É importante notar que individualmente o sensor emite todos os modos existentes na faixa de frequências excitada, à exceção do modo L(0,2) que só poderia ter sido emitido com carregamento na direção longitudinal.

Figura 40 – a) Curva de dispersão gerada a partir do modelo numérico para um ponto de excitação; b) Curvas de dispersão f vs k_z



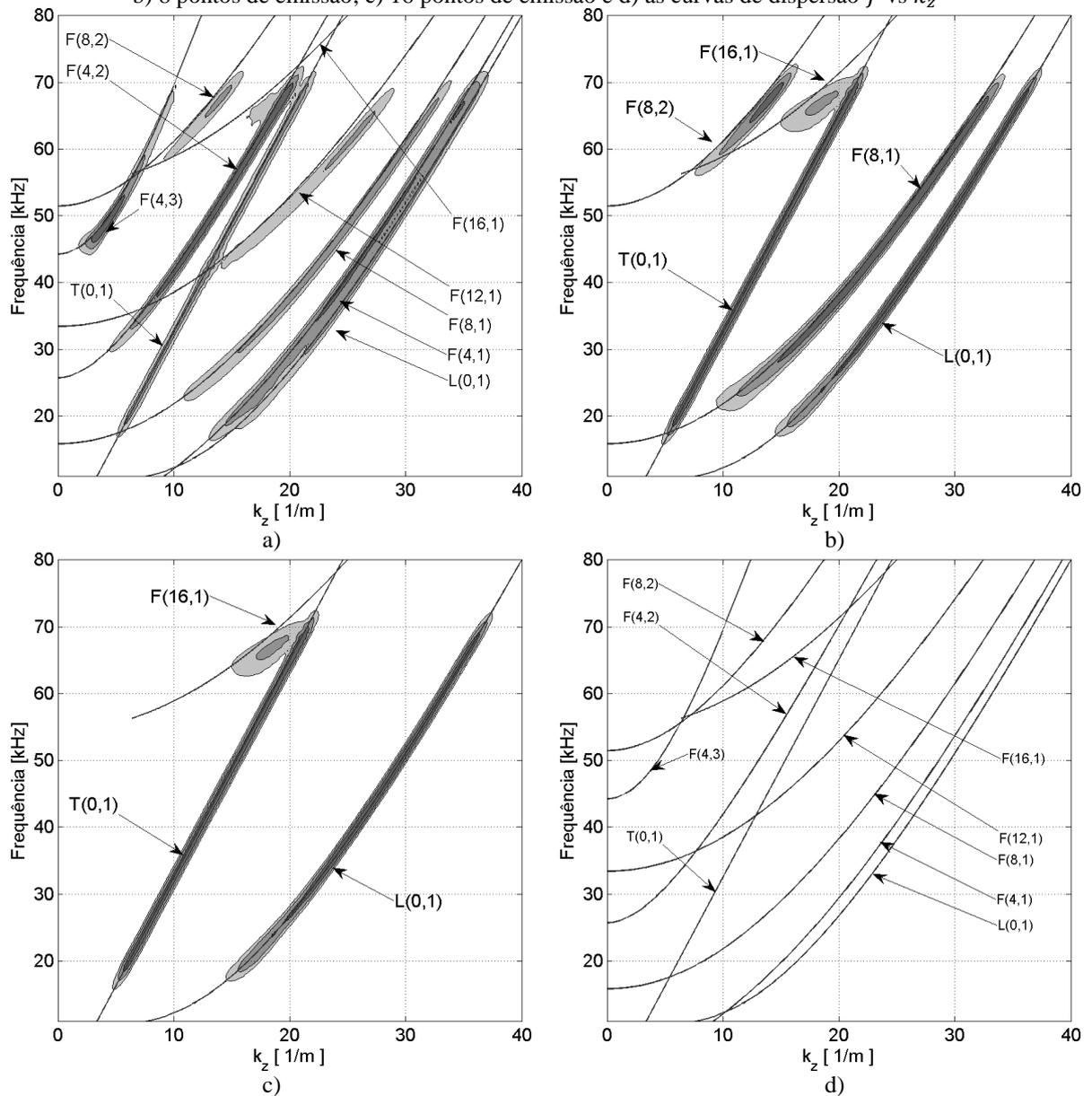
FONTE: b) Adaptado do programa DISPERSE

Utilizando o princípio da superposição é possível representar um colar de emissores através da soma dos efeitos individuais de um sensor. Para isso o resultado foi rotacionado na direção circunferencial de modo a deslocar a matriz de dados para a posição de interesse.

Como foram salvos 96 pontos sobre a circunferência pôde-se fazer arranjos de 4 sensores, 8 sensores e 16 sensores. Para o primeiro caso o resultado individual foi deslocado 24 linhas e acumulado, repetindo-se esse procedimento 4 vezes. Os outros dois casos foram

realizados da mesma maneira apenas deslocando 12 linhas 8 vezes e 6 linhas 16 vezes respectivamente. Os resultados na forma de dispersão para os 3 arranjos podem ser vistos na Figura 41. Na Figura 41a, representando 4 emissores, o modos com menor ordem depois da ordem 0 são os de ordem 4, $F(4,1)$, $F(4,2)$ e $F(4,3)$, após esses se encontram os modos $F(8,1)$, $F(12,1)$, $F(16,1)$ e $F(8,2)$. Na Figura 41b, representando 8 emissores, são visíveis os modos $F(8,1)$, $F(16,1)$ e $F(8,2)$ além dos de ordem 0.

Figura 41 – Curvas de dispersão a partir do das superposições do modelo numérico para; a) 4 pontos de emissão; b) 8 pontos de emissão; c) 16 pontos de emissão e d) as curvas de dispersão f vs k_z



FONTE: Dispersões na forma de linha são extraídas do programa DISPERSE.

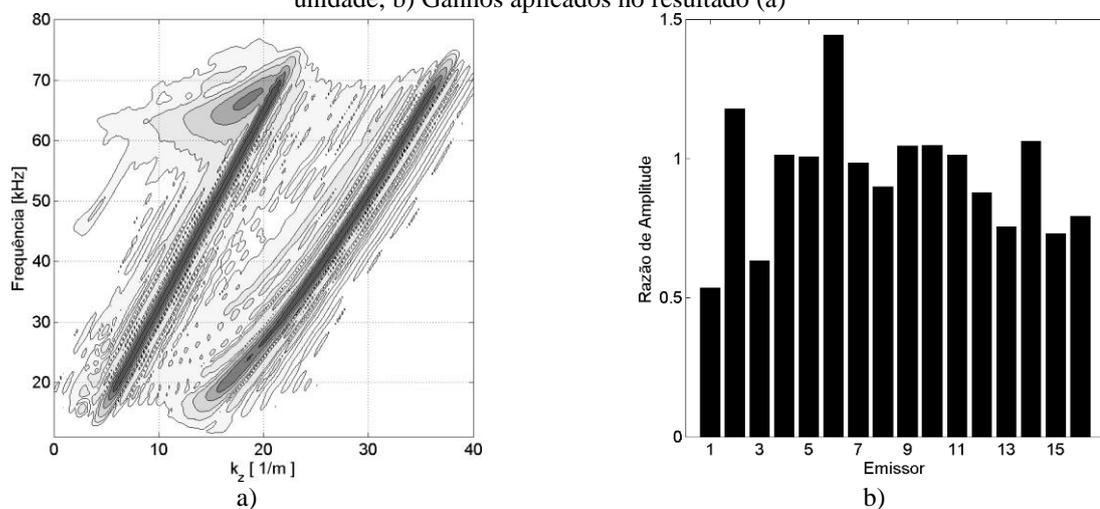
O aumento de emissores implica em uma redução clara na quantidade de modos presentes, e mais do que isso, fica claro que para um arranjo com N emissores a menor ordem emitida será a ordem N respeitada a sua frequência de corte. Uma conclusão imediata desse resultado é que, dado um anel de N sensores, então a máxima frequência em que o arranjo emite apenas ordem 0 é a frequência de corte mais baixa entre os modos de ordem N . Exemplo para o anel de 16 emissores em um tubo 6" seria 52 kHz que é a frequência de corte do F(16,1).

Nesse ponto percebe-se que com uma quantidade elevada de emissores é possível cancelar todos os modos com ordem maior que 0, e ainda reforçar os da ordem 0.

Para o caso do T(0,1) e do L(0,1) a transdução está intimamente relacionada com as direções do movimento que o transdutor infere no material e, portanto, para emitir um ou outro é necessário que o emissor exerça deslocamento na direção de interesse.

Outro ponto importante desse resultado é que para chegar aos gráficos demonstrados na Figura 41 os N pontos de emissão são ideais e emitem mesma intensidade, por essa razão os modos se cancelam perfeitamente. No momento em que as intensidades de cada emissor apresentarem influências de efeitos externos termos, inevitavelmente, outros modos propagando, mas com amplitudes bem inferiores à dos modos de ordem 0. A Figura 42 mostra a dispersão para um anel com 16 emissores ponderados por ganhos gerados randomicamente para efeito de exemplo (distribuição normal, média 1, desvio 0.25).

Figura 42 – a) Curva de dispersão a partir das superposições do modelo numérico para ganhos diferentes da unidade; b) Ganhos aplicados no resultado (a)



Trazendo para um caso prático, um colar de transdutores deve apresentar baixo desbalanço entre canais de modo que os modos indesejados emitidos estejam abaixo o ruído

de recepção. O exemplo da Figura 42 demonstra um desbalanço forte, onde se encontram canais com variação de $\pm 50\%$ espalhando a energia dos modos de ordem 0, o que acarreta em ruído modal durante a medição.

4.2.3 Filtro espacial

A amostragem espacial neste caso está intimamente relacionada com o fenômeno e *Aliasing* normalmente tratado quando se fala em processamento de sinais ou em tratamento de imagens (Oppenheim e Schaffer, 2010). Esse fenômeno implica na perda de capacidade de identificar corretamente a frequência de um determinado sinal se ele se encontra mal amostrado. Para esta aplicação, se a ordem do modo que deve ser amostrado por um anel de sensores for maior que a maior ordem por ele reconhecido então esse modo acabará sendo representado somado à uma componente de ordem menor.

Para o caso prático de um anel de 8 sensores, o maior modo representável é o de ordem 4. Assim um modo de ordem 5 estará somado à ordem 3, o modo de ordem 6 estará somado à ordem 2, o modo de ordem 7 estará somado à ordem 1, e por fim, o modo de ordem 8 estará somado à ordem 0.

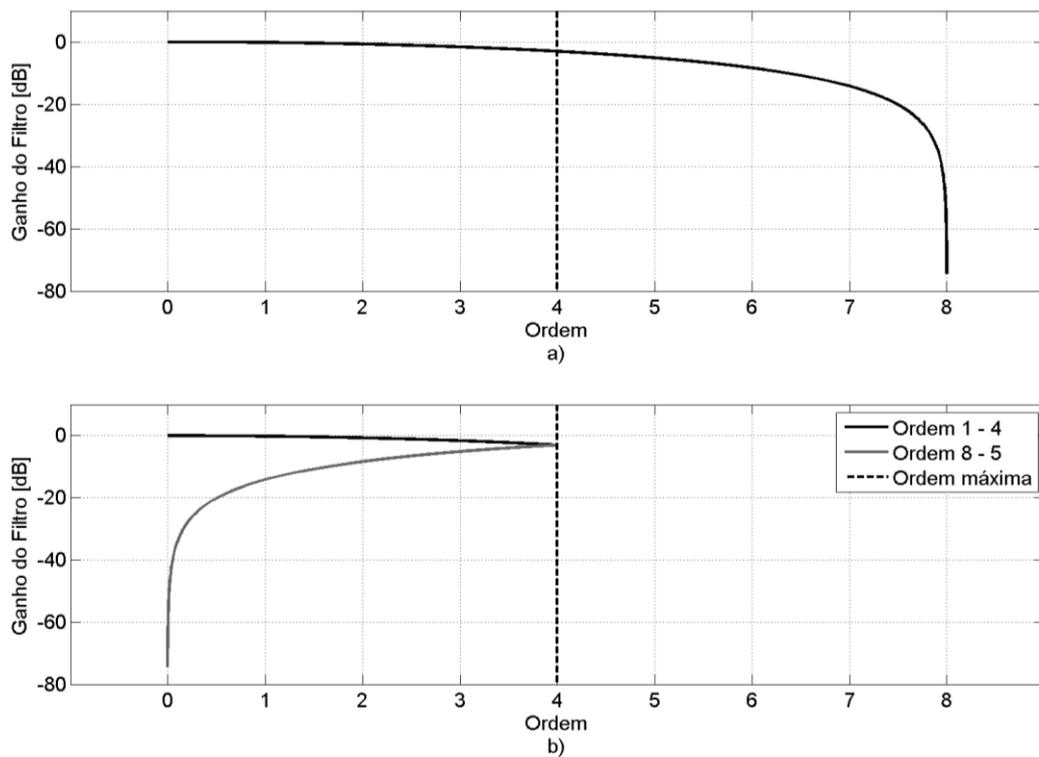
A contra-medida natural para esse efeito é o uso de filtros. Em sinais temporais, digitalizados por um hardware é prática comum utilizar um filtro físico limitador da banda (passa baixas) antes da digitalização, forçando a situação onde só haverão frequências que podem ser descritas apropriadamente pelo processo de amostragem (Oppenheim e Schaffer, 2010).

Para o caso do anel de sensores não há como realizar um filtro espacial de característica passa baixa, embora o que pode ser feito é a ligação elétrica em paralelo entre sensores. Quando o elemento sensor, o cristal piezoelétrico, é deformado ele cria campo elétrico em seus contatos agindo como uma fonte tensão elétrica. Assim, o resultado do paralelo de dois sensores é o mesmo que o paralelo entre fontes. Se o potencial elétrico dos cristais for igual entre si então o potencial visto do paralelo será o mesmo que para um dos cristais. Se houver desequilíbrio entre os cristais o potencial visto no paralelo será menor que o maior dos valores e maior que o menor dos dois valores. Se considerarmos que o valor do paralelo é a média dos dois sensores, como em (Alleyne e Cawley, 1996), então um anel que utiliza N sensores ligados dois a dois estará fazendo filtro de média móvel sem sobreposição

na direção circunferencial. A redução de dois pontos de medida para um sinal elétrico implica em uma subamostragem espacial.

Considere um anel receptor com $N = 8$ sensores, se houver uma reflexão contendo um modo de ordem 8 teremos o problema de *Aliasing* espacial e a medida para ele se apresentará junto ao de ordem 0. Neste caso podemos aumentar o número de receptores para 16, então o modo de ordem 8 poderá ser representado. Ao ligar os sensores dois a dois manteremos o número de canais do digitalizador em 8 o que representa uma subamostragem espacial. A representação do filtro de média móvel para esse caso está mostrando na Figura 43a e a subamostragem com a sobreposição dos modos é mostrado na Figura 43b.

Figura 43 – a) Ganhos do filtro de média móvel para 8 sensores; b) Após a subamostragem de 2 os ganhos das ordens superiores são refletidos para a banda inferior.

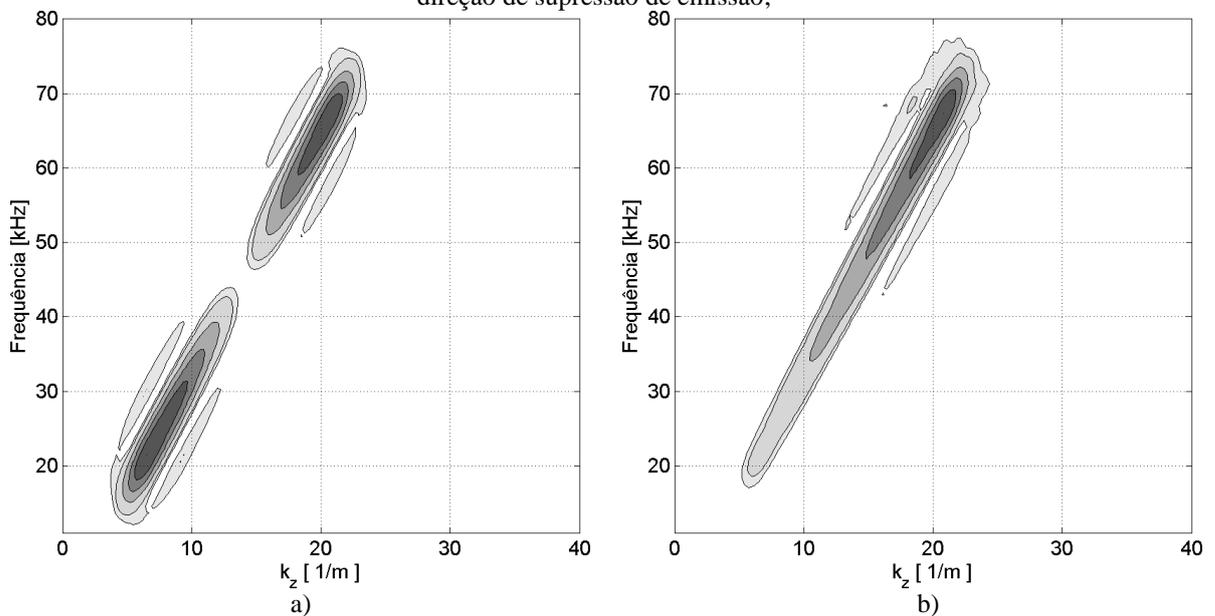


Assim sendo o modo 8 que chega ao anel receptor será ponderado com um ganho muito baixo antes de ser somado à decomposição do modo 0, tornando esse sinal menos propenso a ruídos modais. De maneira semelhante a decomposição da ordem 1 é somada ao *Aliasing* do modo 7 ponderado por -13.85 dB ($\times 0.2$).

4.2.4 Direcionalidade

A avaliação da capacidade de supressão direcional foi feita através das curvas de dispersão obtidas de modelos numéricos e comparações feitas entre as amplitudes do modo T(0,1) nessas curvas em cada direção. Apenas a influência da distância entre anéis foi estudada nesse trabalho e o tempo de atraso entre disparos foi selecionado através da relação apresentada anteriormente na seção 3.2. A Figura 44 mostra as curvas medidas de dispersão k_z por f coletadas para a direção com superposição construtiva e para a direção com superposição destrutiva (supressão) para o modelo com a distância de 36 mm.

Figura 44 – Curvas de dispersão medidas dos modelos direcionalizados com distância de 36 mm (escala de cores normalizada para cada imagem); a) Na direção da superposição construtiva; b) Na direção de supressão de emissão;



Os mapas de intensidade foram normalizados para melhorar a comparação de forma das emissões. Na Figura 44a é mostrado a dispersão da direção construtiva onde se percebe a presença de uma frequência de mínima emissão de energia, já na emissão na direção suprimida Figura 44b o formato apresenta um leve acento monotônico com relação à frequência. Os resultados para os modelos com as demais distâncias para a direção construtiva são mostrados na Figura 45. Os resultados para a direção de supressão para todas as demais distâncias são semelhantes e não serão mostrados. Para todas as distâncias estudadas observaram-se a existência de mínimos sendo que quanto maior essa distância menor o período evidenciado nos gráficos.

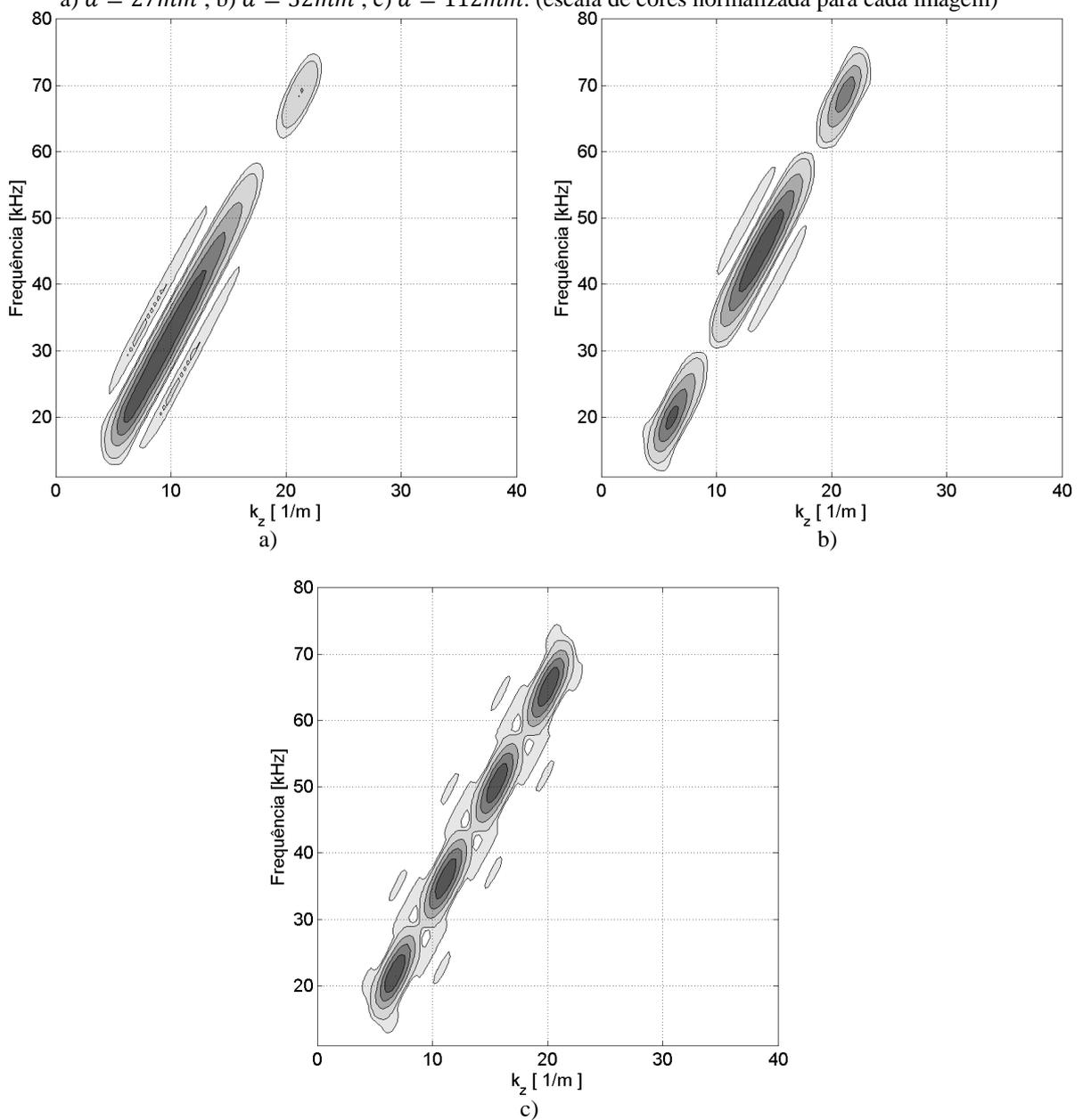
As intensidades das dispersões no mapa de cores foram transformadas em gráficos de linha interpolando-se o valor da intensidade nas posições no plano k_z por f referentes ao

modo T(0,1). Essas posições foram retiradas do programa DISPERSE. Além disso, foi proposta uma formulação para representar o coeficiente de intensidade na direção construtiva em função da frequência f e distância d entre os anéis, essa relação é:

$$D(d, f) = \left| \text{sen} \left(\frac{2\pi f d}{v_{T(0,1)}} \right) \right|$$

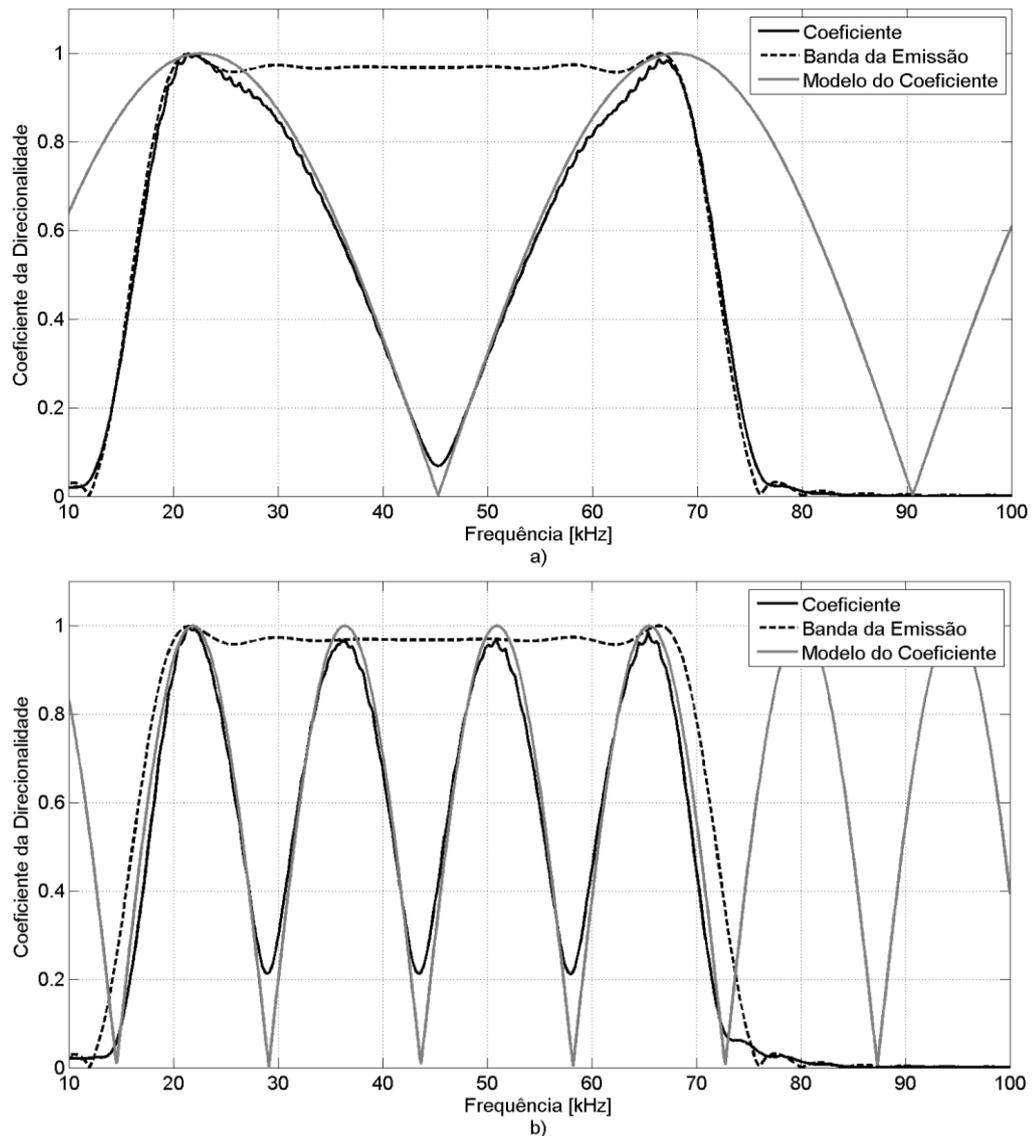
onde $v_{T(0,1)}$ é a velocidade do modo T(0,1).

Figura 45 – Curvas de dispersão para pulsos banda larga na direção construtiva para as distâncias entre anéis de: a) $d = 27\text{mm}$; b) $d = 52\text{mm}$; c) $d = 112\text{mm}$. (escala de cores normalizada para cada imagem)



Na Figura 46 são apresentadas a interpolação do resultado da dispersão medida, a banda de frequências do pulso emitido e uma linha representando a formulação proposta.

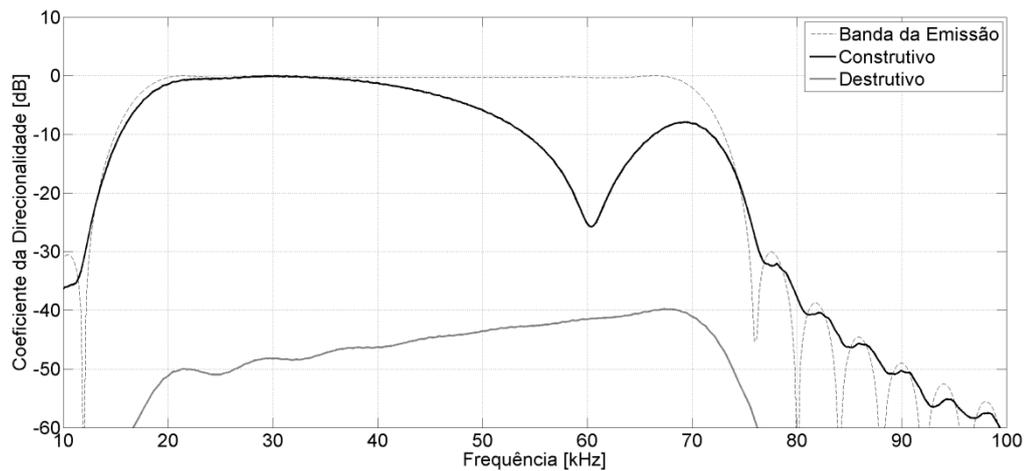
Figura 46 – Intensidade da emissão interpolada da dispersão para as distâncias de a) $d = 36\text{mm}$ e b) $d = 112\text{mm}$



Verifica-se que o resultado condiz com o apresentado na literatura onde para uma dada frequência o máximo acontece ciclicamente em $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{4}$ do comprimento de onda e assim por diante em uma série infinita (Wilcox, 2009). A razão pela qual o coeficiente medido não atinge o eixo da frequência é que a resolução em frequência do mapa de intensidades é insuficiente para representar isso. Esse passo de frequência está vinculado ao tamanho da janela de tempo utilizada nas transformações e, portanto, o tempo total do modelo. Este tempo foi ajustado para não haver reflexões indesejadas.

O mesmo procedimento para interpolar as intensidades do modo T(0,1) para a direção construtiva foi realizado para a direção suprimida. O resultado da comparação em escala logarítmica pode ser visto na Figura 47 onde pode se ver que a atenuação entre a direção escolhida e a suprimida está por volta de -45 dB em baixo do primeiro máximo de emissão direcionada. Esse resultado é semelhante para todas as outras condições de distanciamento.

Figura 47 – Comparação de intensidades entre direção emitida e suprimida para distância de $d = 27\text{mm}$



4.3 PROJETO E FABRICAÇÃO DO COLAR DE SENSORES

Foram definidos os seguintes parâmetros de projeto para o colar de sensores abrangendo os três primeiros passos da sequência da Figura 29. No primeiro passo, a frequência que atende o critério de 5% de diferença de velocidade entre o T(0,1) e o F(1,2) é de 16,6 kHz. Essa escolha pode ser generalizada para outras tubulações de utilizarmos o parâmetro fD (com diâmetro de 160mm) que para esse ponto corresponde a 2,18 MHz-mm;

Para o segundo passo, foi demonstrado nas seções anteriores que 16 emissores emitem apenas ordem 0 até 52 kHz (frequência de corte do F(16,1) para o tubo de 6 polegadas) e que a recepção realizada com sensores ligados em pares confere imunidade ao efeito de adição desse modo ao T(0,1) pelo *Aliasing* espacial. O valor de 52 kHz pode ser descrito na forma do produto frequência-diâmetro, considerando o diâmetro do tudo de seis polegadas, resultando em $fD = 8,84\text{ MHz}\cdot\text{mm}$. Passando o valor do parâmetro para o tubo de 10,75 polegadas temos $f = 32,4\text{ kHz}$.

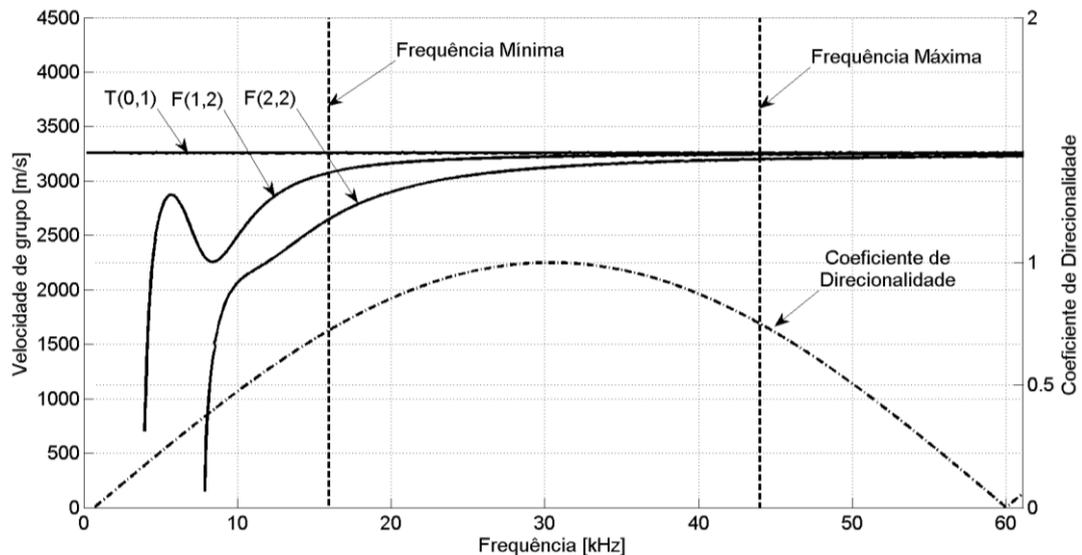
Embora os estudos indiquem a quantidade de 16 emissores como sendo satisfatória foi decidido por aumentar o número de sensores instalados nos colares de maneira a mitigar os efeitos de uma eventual perda de sensores. Por limitação do tamanho do sensor a ser utilizado,

o máximo número de sensores na circunferência é de 28 sensores. Foi necessário fazer a ligação dos sensores dois a dois por limitação da quantidade de canais do equipamento digitalizador o que resulta em 14 canais de recepção por anel. Esse arranjo é capaz de emitir apenas ordem 0 até valores de 44 kHz. A frequência de corte do F(28,1) não pôde ser determinada através do DISPERSE, então se tomou a frequência de corte do modo de maior ordem por ele fornecido, o F(18,1).

Chegando ao terceiro passo a banda selecionada (16.6 kHz – 44 kHz) tem frequência média de 30,3 kHz. O valor da distância calculado para essa frequência, através da formulação apresentada na seção 4.2.4, é $d = 27,16$ mm. Mais uma vez o tamanho do sensor limita a distância entre anéis para $d = 27,6$ mm.

O resultado da banda de frequência selecionada pode ser vista na Figura 48 sobreposta com a velocidade de grupo dos modos T(0,1), F(1,2) e F(2,2) para o tubo de 10,75 polegadas. Nela, também, é possível ver o coeficiente da direcionalidade.

Figura 48 – Velocidade de grupo para um tubo 10,75 polegadas e 9,27 mm de parede; Linhas de projeto para banda de frequência e coeficiente da direcionalidade.



O passo seguinte refere-se ao projeto da estrutura de sustentação do colar de sensores e cabeamento. O projeto deve atender aos critérios de robustez e facilidade na instalação, além de prover a primeira barreira de proteção contra ingresso de água.

Dada a premissa de temperatura de operação foi ponderado que a temperatura não seria elevada a ponto de impedir o uso de materiais poliméricos, portanto baixo risco de que eles sofressem perda de rigidez. Isso permitiu que projeto fosse conduzido utilizando

prototipagem 3D em material polimérico. O projeto resultou em um colar dividido em duas partes iguais à exceção da saída dos cabos elétricos que é espelhada entre as partes. As duas metades são unidas através de quatro parafusos de 6 mm de diâmetro acessíveis na parte externa das metades. O sistema de fechamento contém um grau de liberdade para facilitar o encontro dos parafusos. A estrutura foi construída a partir de chapas de aço de 3,18 mm cortadas com laser e pintadas. Cada metade conta com uma tampa em aço de 1 mm de espessura pré conformadas para acesso à parte interna. A Figura 49 mostra o desenho final do projeto e uma foto do colar já instalado, onde pode se ver o exterior do colar.

Figura 49 – Colar de sensores; a) Projeto em ferramenta computacional e b) instalação final.

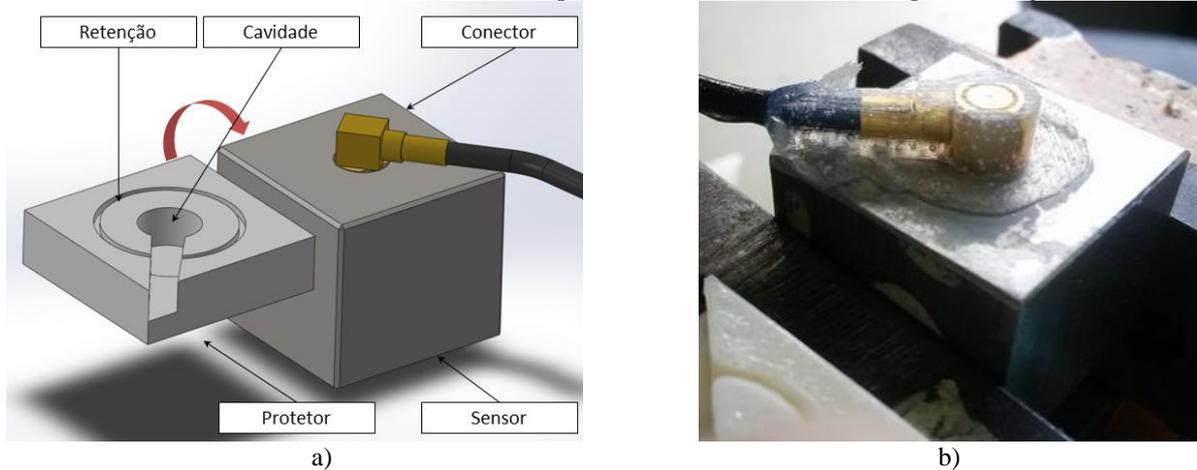


Para combater o ingresso de água no colar foram utilizadas duas barreiras, a primeira na forma de borrachas de vedação nas interfaces de montagem da estrutura do colar para evitar o ingresso de água dentro da cavidade onde ficam os sensores. Na Figura 49b ainda pode ser visto em cor verde uma massa moldável do mesmo material do revestimento do tubo, o STOPAQ. Esse elemento foi adicionado ao projeto apenas no momento da instalação onde houve a oportunidade de fazê-lo.

A segunda barreira é feita diretamente no sensor, essa vedação ocorre em dois pontos: na interface da alumina com o metal e no conector elétrico. Na interface alumina-metal foi simplesmente trocado o adesivo utilizado anteriormente que apresentava fissuras recorrentemente oriundas da retração do material durante sua cura. Foi selecionado o adesivo Seayu SE120B a base de poliuretano que, segundo o fabricante, apresenta boas qualidades hidrofílicas e baixa retração após a cura. Esse adesivo não apresentou fissuras visíveis em

inspeção com lupa. Já o conector foi protegido com uma peça produzida na prototipadora 3D. Essa peça protetora conta com uma cavidade onde o conector elétrico fica imerso em silicone industrial para vedação 3245RTV da marca Dow Corning. O protetor é adesivado na superfície superior do sensor utilizando adesivo LOCTITE 496. Para evitar a mistura do adesivo com o vedante no momento do encaixe da peça foi feito um rebaixo de retenção por onde o excesso de silicone que seria expulso durante a inserção do protetor pudesse sair. A saída do cabo é feita em ângulo de 45 graus para facilitar o enfileiramento dos sensores no anel. Na Figura 50 pode se ver o resultado da vedação com silicone em uma peça desmontada para inspeção, e um esquema mostrando o protetor do conector.

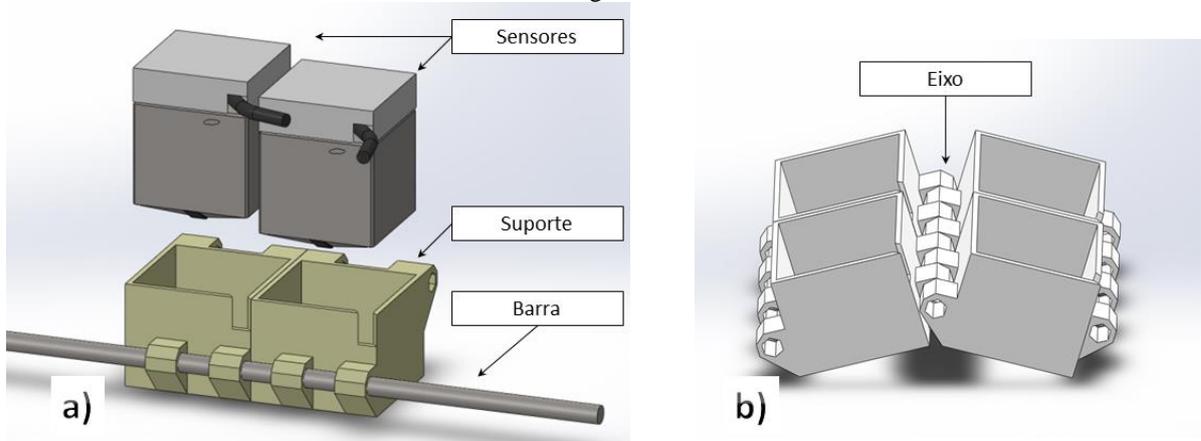
Figura 50 – Vedação do conector do sensor; a) esquema demonstrando os detalhes do protetor do conector e b) resultado de um sensor desmontado após o endurecimento do silicone para avaliação.



Para sustentar os sensores nas suas posições e ao mesmo tempo permitir um pequeno deslocamento radial para acomodação de variações de diâmetro do tubo foi concebido uma peça para ser produzida na prototipadora 3D.

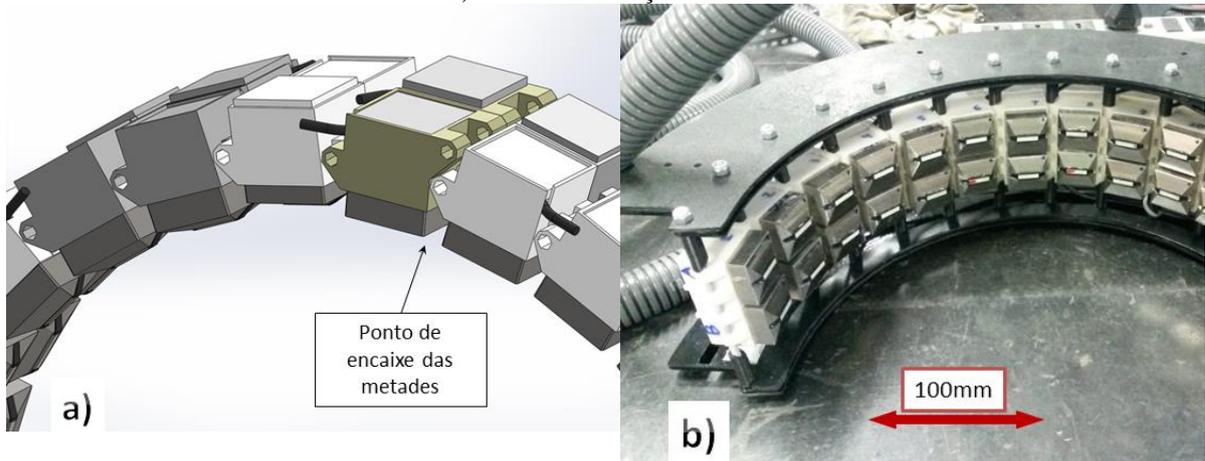
O suporte dos sensores conta com duas cavidades onde os sensores são posicionados já com o protetor do conector montado. Essa cavidade é passante e não limita o movimento do sensor, embora quando montado com seu cabo elétrico o próprio cabo funciona como um fim de curso. As paredes internas dos suportes foram lixadas para diminuir o atrito com o sensor. Uma cadeia de suportes é interligada utilizando barras roscadas que permitem o giro em seu eixo. A Figura 52 mostra os detalhes do projeto do suporte.

Figura 51 – Detalhe do suporte dos sensores; a) encaixe dos sensores e barra; b) detalhe do grau de liberdade de giro;



Foram construídas duas sequências desses suportes para formar as duas metades. Os suportes das extremidades das sequências são ligeiramente diferentes para permitir o encaixe com o suporte da outra metade, garantindo espaçamento dos sensores. A Figura 52 mostra os detalhes do projeto e execução da cadeia de suportes. Os eixos são fixados na estrutura metálica lateral em pontos fixos, isso faz com que todos os suportes apontem para o centro da circunferência e com eles os sensores.

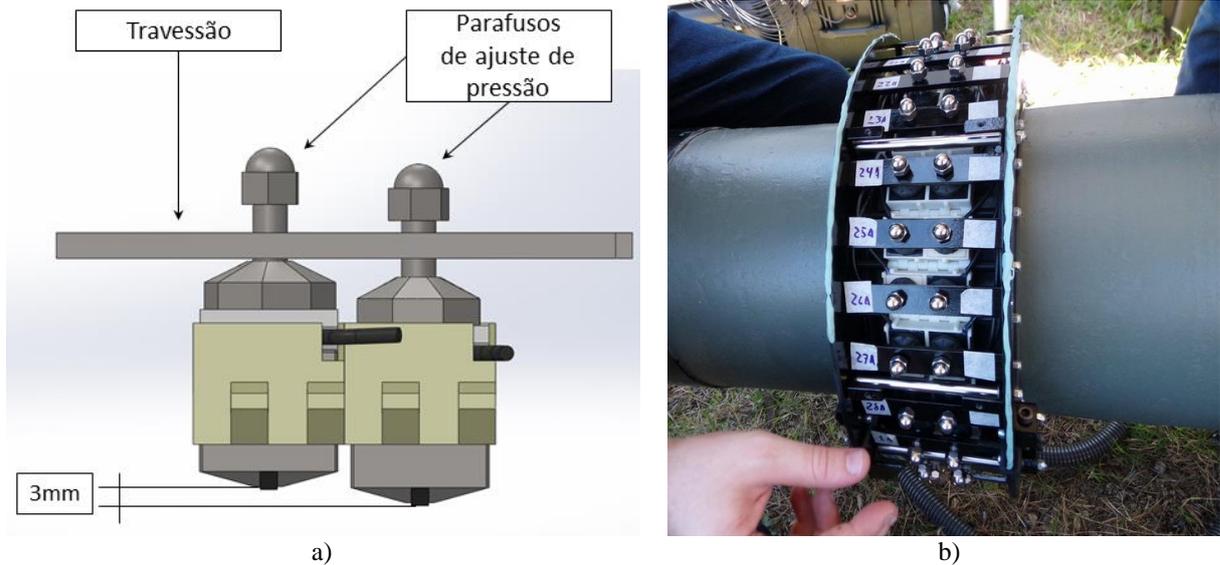
Figura 52 – Detalhe da cadeia de suportes de sensores: a) encaixe das duas metades na extremidade das cadeias e b) Foto da construção do colar.



Para limitar o movimento do sensor e aplicar pressão na sua superfície superior foi utilizado um parafuso, contendo um pé polimérico, fixado em uma barra que atravessa a cavidade dos sensores. O parafuso foi terminado com uma porca calota sextavada que teve a sua rosca colada ao parafuso, de modo que pode-se apertar ou soltar o parafuso livremente com o uso de uma chave de boca colocada sobre a porca. Nesta configuração não há partes metálicas em contato direto com o sensor, evitando interações que pudessem gerar pontos de

ressonância indesejados. A Figura 53 mostra um esquema do sistema de aperto dos sensores juntamente com o curso máximo obtido e uma foto do sistema posicionado sobre o tubo.

Figura 53 – Sistema de aperto individual dos sensores; a) Esquema em ferramenta de desenho; b) Foto do sistema instalado.



Os cabos elétricos foram acomodados em um espaço entre a lateral da cadeia de suportes e a parede interna da estrutura. Para cada uma das metades os cabos foram arranjados de forma a saírem por um orifício onde um conduíte plástico foi fixado através de um adaptador roscado. Na extremidade oposta, à 4 metros, foi instalado um conector industrial para cada uma das metades. Os cabos utilizados para ligar os sensores e o conector industrial são cabos coaxiais RF174 de 50 Ohms, enquanto que o conduíte e o conector industrial são da marca Haarting. Após enterrar o sistema os conectores ficam armazenados em uma caixa plástica montada em uma haste de alumínio cravada ao solo.

Figura 54 – Caixa de acondicionamento dos conectores elétricos do colar após o enterro.



Os conectores que permitem a ligação entre o colar de sensores e o sistema de aquisição são de mesmo fabricante, necessitando apenas um adaptador em formato “Y” que transforma um conector do colar, com 14 canais, em dois conectores do sistema de aquisição com 7 canais cada.

4.4 TESTE COM CORROSÃO INDUZIDA

Os colares foram instalados na tubulação seguindo o procedimento de instalação descrito na seção 3.5. Logo após a instalação foram coletados dados da tubulação totalmente exposta e repousada sobre dormentes de madeira e foi verificada visualmente a realização dos defeitos nos revestimentos. A tubulação permaneceu exposta à intempérie até o seu enterro 210 dias depois. Após isso foi realizada uma sequência de coletas, uma antes de se enterrada (coleta 1), após o enterro, mas sem o sistema de aceleração da corrosão acionado (coleta 2), e uma coleta com o sistema de corrosão recém acionado (coleta 3). Como esperado a diferença de atenuação da coleta 1 para a 2 é notável. Já entre as coletas 2 e 3 não ocorreram mudanças significativas no sinal, nem com respeito à ruído elétrico.

O sistema de corrosão foi deixado acionado durante dois meses e meio quando foi realizada mais uma coleta, de número 4, que não mostrou nenhuma diferença significativa com relação à coleta anterior. Um tempo maior foi aguardado para a coleta 5 que apresentou alguns pequenos sinais dos danos. E por fim na última coleta foi evidenciado as reflexões nas posições dos defeitos, dado que o potencial nesse último intervalo de tempo tinha sido aumentado. Todas as datas importantes do teste estão relacionadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Datas importantes do cronograma do teste com corrosão induzida:

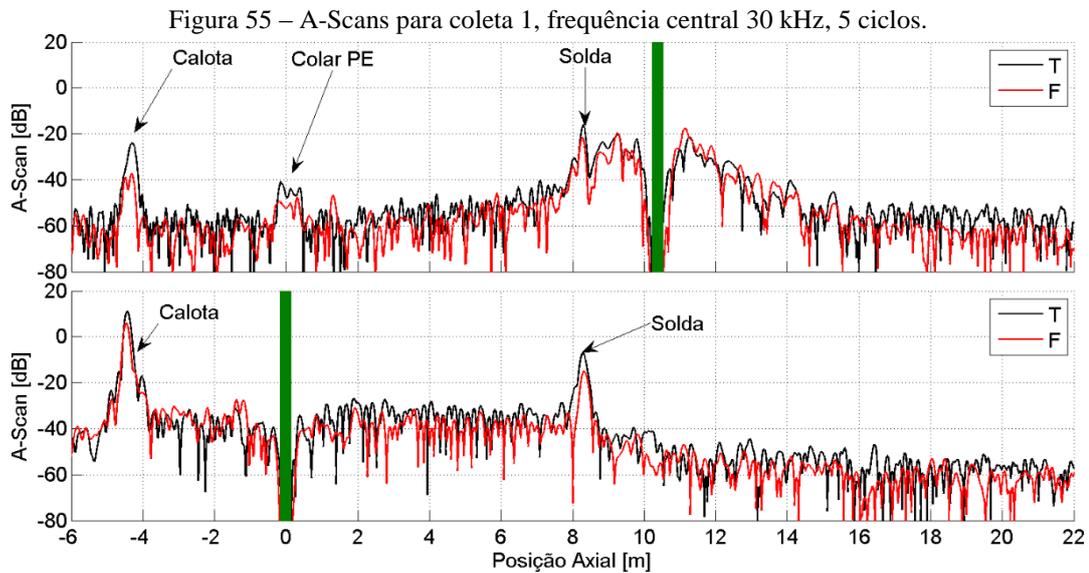
Sequência da Coleta	Condição	sistema de corrosão	Data	Intervalo em dias
	Instalação		03-12-2014	
1	Ar		25-06-2015	204
	Enterro		06-07-2015	11
2	Enterrado	desligado	21-07-2015	15
3	Enterrado	ligado	26-08-2015	36
4	Enterrado	ligado	13-11-2015	79
5	Enterrado	ligado	01-12-2016	384
6	Enterrado	ligado	19-07-2017	230

Em cada coleta foi utilizado uma sequência de pulsos para abranger a banda de frequência definida na etapa de projeto, mas para brevidade desse trabalho foi escolhida a frequência de 30 kHz para a apresentação dos resultados de A-Scan e C-Scan, por se tratar da

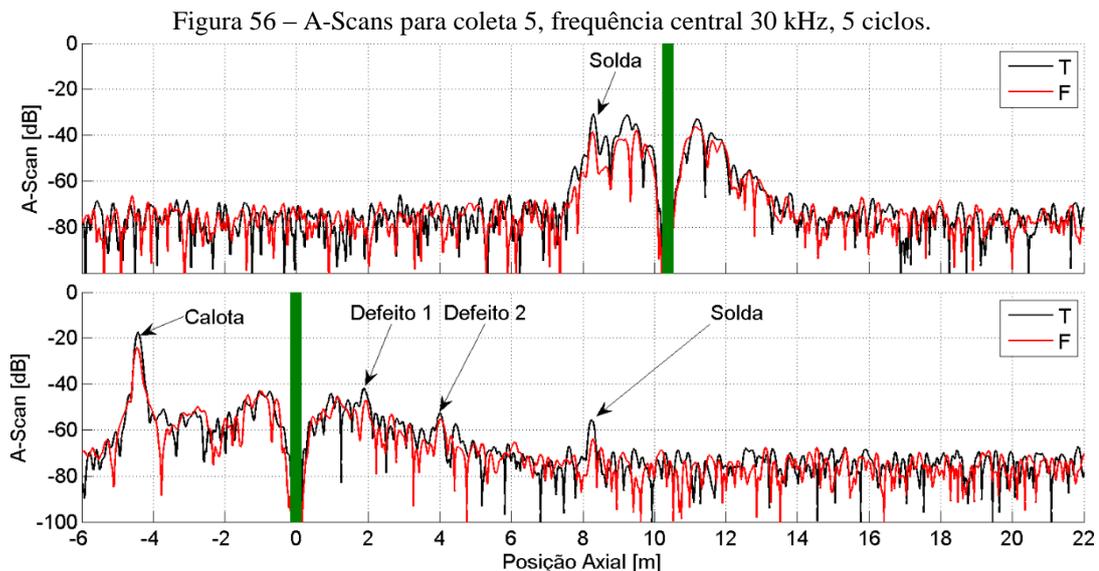
frequência com o maior coeficiente de direcionalidade, visto na Figura 48. Cada frequência foi emitida para cada uma das direção sobre a tubulação. E em cada direção foram realizados 1000 disparos para fazer a médias dos sinais e, assim, reduzir o nível de ruído elétrico.

Os resultados de A-Scan são apresentados na forma de dois gráficos empilhados, sendo o gráfico da parte superior proveniente do resultado do colar instalado no lado com STOPAQ e o gráfico inferior proveniente do colar no PE. Em cada um são representadas duas linhas, uma para a decomposição de ordem 0, relacionada com o $T(0,1)$, e outra para a ordem 1. Essas linhas já estão mapeadas para a distância e compensadas pelo efeito da dispersão. As distâncias no eixo x são relativas à posição do colar instalado no tubo revestido com PE, ou seja, esse colar está na posição 0 metros. Os resultados para o colar instalado do lado com STOPAQ foram transladados de tal forma que a reflexão do cordão de solda para ambos os resultados fosse coincidente, por essa razão os eixos x são idênticos e portanto foi omitido do gráfico superior. À direita de cada colar foi colocado os A-Scans emitidos naquela direção e, conseqüentemente, à esquerda os da direção oposta. O faixa de distâncias dos gráficos compreende os valores de -4 metros até 20 metros o que representa o comprimento total da tubulação de 24 metros. As posições dos colares foram marcadas por uma linha espessa na vertical e representam os locais onde não há informação sobre o tubo. Portanto, a única forma de inspecionar a região logo abaixo de um colar é com a medida do outro colar.

O resultado para a coleta 1 pode ser visto na Figura 55, e nela são apontados cada refletor identificado do tubo. Para ambos os resultados é possível identificar a calota do tubo com PE e o cordão de solda da união dos tubos. Considerando todas as frequências e coletas, em nenhuma delas foi possível identificar a calota do lado com STOPAQ. Além desses refletores, é possível ver uma indicação no local de instalação do colar PE, a razão disso é que o colar é rigidamente acoplado ao tubo. Nas proximidades do colar STOPAQ é visto uma intensidade que atenua rapidamente ao se afastar em ambas as direções. É possível que estejam sendo excitados modos com muito baixa velocidades e de ordem próxima da ordem 7 (maior modo reconhecido pelo colar) e que por isso sofrem o fenômeno de *Aliasing* espacial. Essa situação é evidenciada nas outras coletas também.



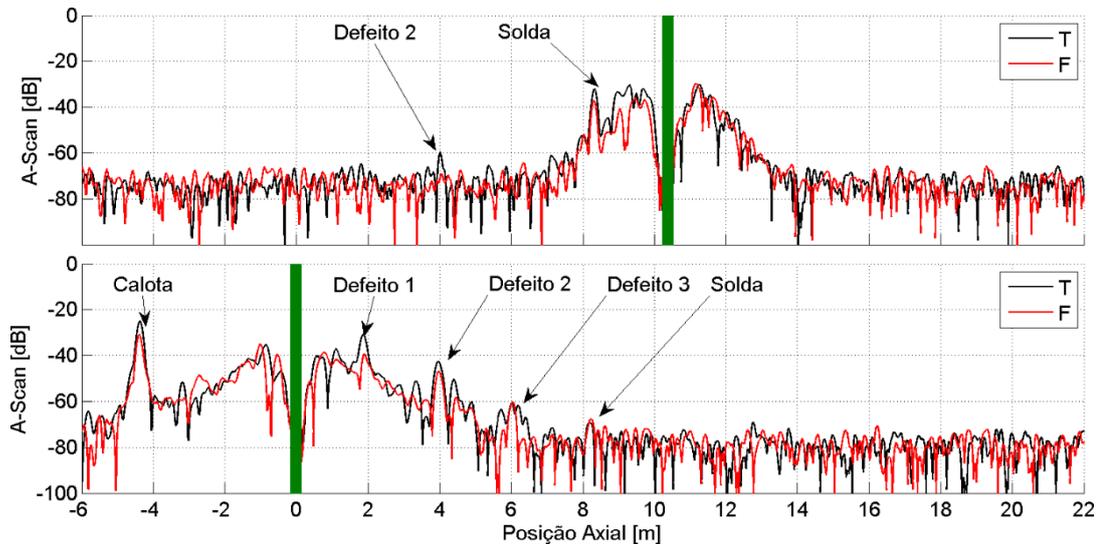
A Figura 56 mostra o resultado para a coleta 5, já na condição enterrada e acumulados 463 dias da ação do sistema para aceleração da corrosão. Nesse resultado não é mais possível ver a reflexão da calota pelo colar do STOPAQ, de fato, em nenhum resultado após o enterro do tubo. Apenas a solda é visível e nenhum defeito dentro do tubo com STOPAQ. Já para o tubo revestido com PE é possível ver as reflexões de dois dos três defeitos e a solda. Houve um acréscimo de 8 dB no ruído elétrico após o enterro do tubo que se manteve até a última coleta.



Ao acumular 693 dias contados do acionamento do sistema para aceleração da corrosão foi realizada a 6 e última coleta. O resultado é apresentado na Figura 57. Nesse resultado houve uma acentuação nas reflexões dos defeitos 1 e 2, além disso foi detectado o

defeito 3. Houve uma redução nas reflexões da solda e da calota. Essa redução também é vista pelo colar STOPAQ. Notavelmente uma pequena chamada do defeito 2 é perceptível a partir desse colar.

Figura 57 – A-Scans para coleta 6, frequência central 30 kHz, 5 ciclos.

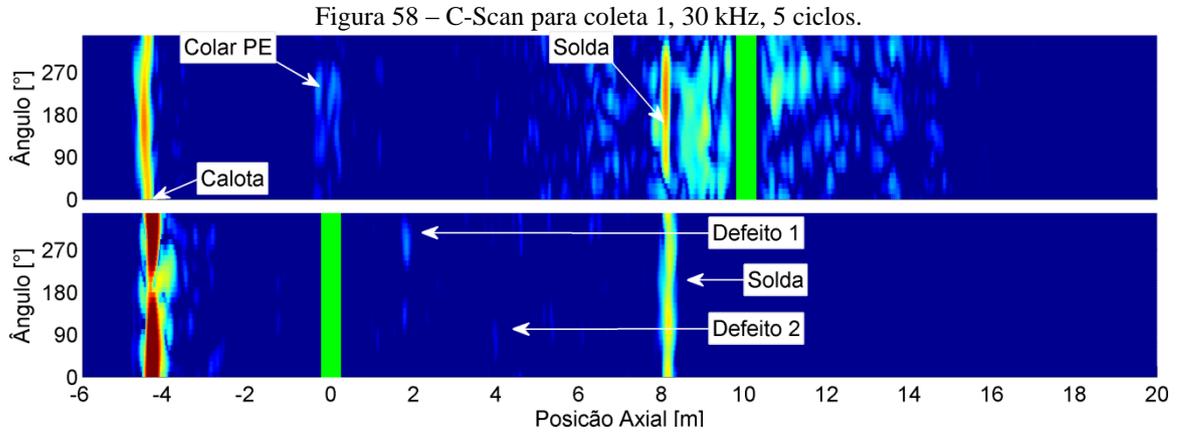


Na coleta de número 4 foi evidenciado um aumento da impedância elétrica em 1 canal em cada um dos colares, já para a 5ª coleta o colar PE apresentou 3 sensores com esse aumento e o colar STOPAQ apresentou 2. O aumento da capacitância no canal prejudica a capacidade de digitalização e foi necessário alterar a faixa de digitalização de ± 50 mV para ± 6 V para contornar esse problema. Com essa alteração não houve prejuízo para obtenção do resultado. Contabilizando os 5 sensores que mostraram esse problema em um universo de 112 sensores fabricados, temos uma taxa de 95.5% de sucesso na aplicação desse sensor para aplicação enterrada.

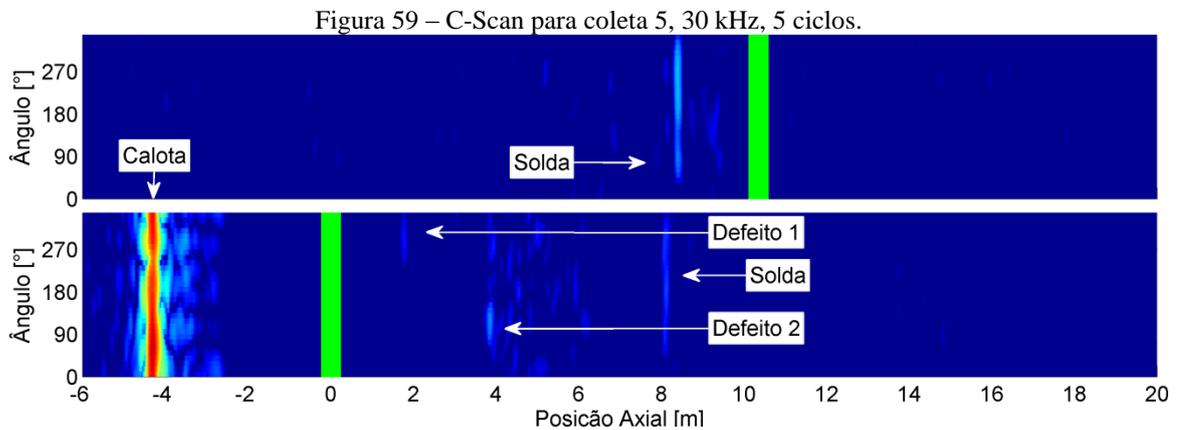
Foram gerados os C-Scans para cada um dos resultados apresentados de A-Scan. A apresentação das planificações segue o mesmo formato de gráficos empilhados. Nesses resultados o eixo vertical representa o ângulo sobre a circunferência do tubo, onde o 180° representa a parte de cima do tubo e é coincidente com o 12h da representação dos defeitos. A representação de 3h e 9h é mostrada aqui como 270° e 90°.

Na Figura 58 é apresentada a planificação para a coleta 1, onde podem ser vistos os mesmos elementos vistos no A-Scan. Além disso pequenas indicações nos locais dos defeitos 1 e 2. A razão dessas indicações terem sido evidenciadas na planificação é que para a construção da imagem são usadas as informações somadas das decomposições até a ordem 7, portanto carregando muito mais informação do que a apresentada nos A-Scans. A região

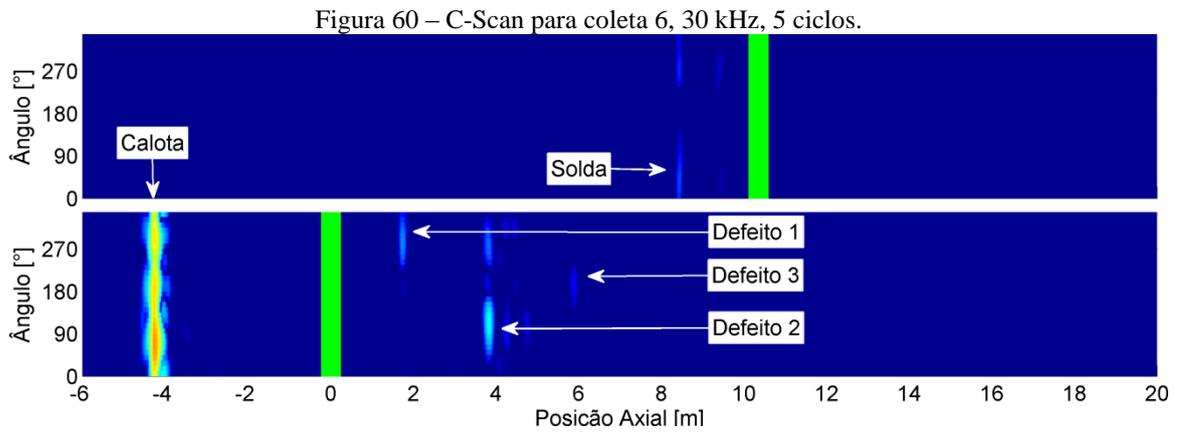
próxima ao colar STOPAQ se mostrou repleta de ruído não focado, o que reforça a ideia de haver modos indesejados sendo emitidos pelo colar.



O C-Scan da coleta 5 é mostrada na Figura 59. As indicações dos defeitos 1 e 2 continuam a serem vistas, mas a atenuação imposta pelo solo torna as amplitudes menores. Há um espalhamento que começa na região do defeito 2 e se estende até a região do defeito 3. Provavelmente isso se deve a modos que não foram focados corretamente, ou por pertencerem a famílias diferentes da $F(n,2)$, ou por serem de ordem acima da 7 e portanto sofreram *Aliasing*.



Com o progressivo aumento da severidade dos defeitos, por efeito do sistema de corrosão, o resultado da coleta 6, visto na Figura 60, se mostra ainda mais nítido. O defeito 3 é mostrado com uma baixa intensidade, mas focado. Ainda é visto um artefato com mesma distância do defeito 2 na posição 270°. Como não é esperado um defeito nessa posição o mais provável é que tenha ocorrido um efeito aumentado do modo $F(1,2)$. O mesmo pode ser visto na solda vista pelo colar STOAQ. Esse efeito pode indicar que os colares estão perdendo a calibração de pressão realizada na instalação.



Mais uma vez não foi possível detectar a calota ou qualquer defeito do tubo com revestimento STOPAQ, nem com a capacidade de soma das componentes da planificação.

5 CONCLUSÕES

A caracterização elétrica do sensor piezoelétrico utilizado evidenciou a presença de duas ressonâncias importantes por volta de 6 kHz e 55 kHz. Esses pontos não foram impactantes no resultado final do sistema pois outros aspectos do projeto levaram a escolha da faixa de frequências afastada dessas ressonâncias. Já a caracterização do campo acústico do sensor mostrou a emissão indesejada de deslocamentos na direção normal as quais, em dutos, resultam nos modos da família do $L(0,1)$. Os modos dessa família apresentam velocidades menores e maior atenuação embora ocorram em ordens circunferenciais maiores dentro da faixa de frequência de interesse, o que incorre em uma maior incidência de ruído modal nos resultados.

O estudo do colar com número de sensores como parâmetro variável foi realizado através de modelos de elementos finitos cujos resultados foram demonstrados através de curvas de dispersão. Nesse estudo foi demonstrado que a quantidade de sensores altera o conteúdo modal emitido pelo colar e que é possível determinar a frequência máxima na qual o colar opera emitindo apenas o modo $T(0,1)$. Também foi considerado o impacto na recepção dos modos quando os sensores são ligados eletricamente em paralelo. Além disso foi apresentada uma formulação empírica para representar a eficiência da direcionalidade com respeito à frequência e à distância entre anéis emissores.

A partir desses estudos foi possível apresentar uma metodologia para dimensionamento do número de sensores em um colar, distância entre anéis e banda de operação.

Foram demonstradas técnicas de processamento de sinal que auxiliam na interpretação dos resultados obtidos. Também foram demonstradas as formulações para a decomposição em ordens circunferenciais e a planificação do tubo, processamentos que foram aplicadas nos resultados desse trabalho.

Foi apresentado um conceito de colar de ondas guiadas para aplicação em tubos enterrados que obedeceu às premissas de projeto propostas para superar as condições de operação foram apresentadas. Dois colares protótipos foram construídos para serem instalados e testados em um trecho de tubulação enterrada. A tubulação teste consistiu em dois tubos de 12 metros unidos por solda. Cada tubo apresenta um tipo de revestimento, um com polietileno com 3 mm de espessura e outro com massa viscoelástica da marca STOPAQ. O teste

dispunha de um sistema para acelerar a corrosão nos pontos de remoção do revestimento através da aplicação de potencial elétrico. O teste teve duração aproximada de 25 meses e demonstrou a estabilidade dos sensores fabricados e da estrutura de fixação projetada.

Coletas sucessivas foram realizadas para monitorar o crescimento dos defeitos, embora não tenha sido apresentado resultados quantitativos.

O sistema proposto foi validado pois foi capaz de detectar e localizar os defeitos induzidos no tubo com revestimento de PE. Foram localizadas indicações de dano no tubo ainda sem ação da corrosão, apenas pela remoção do revestimento de PE quando exposto ao ar, demonstrando a sensibilidade do sistema. Após o enterramento da tubulação essas chamadas foram atenuadas abaixo do ruído elétrico para serem observadas novamente apenas na quinta coleta.

Nenhum resultado foi obtido para o tubo com revestimento viscoelástico, apenas o cordão de solda distante 2 metros do colar. Conclui-se que a atenuação para esse revestimento torna impraticável a inspeção pelo sistema proposto.

Pro fim, através da metodologia de caracterização do sensor e da metodologia de projeto do colar de sensores apresentados foi possível conceber e fabricar dois colares protótipos que foram validados através de um teste em capo de longa duração com defeitos induzidos.

6 TRABALHOS FUTUROS

No decorrer desse estudo ficou evidente a multidisciplinaridade do tema e as possibilidades de continuidade desse trabalho se estendem todas as direções. Nesta seção ficam descritos aqueles que foram identificados como mais impactantes para o melhoramento do sistema sem acarretarem em grandes alterações de equipamento.

Dos estudos apresentados para a determinação dos parâmetros do colar de sensores, fica evidente que muitos tópicos poderiam ser aprofundados e enriquecidos por experimentação na medida que todos foram estudados através de resultados numéricos.

Outro tópico que não foi abordado neste trabalho, mas tem a acrescentar na qualidade de trabalhos futuros é o estudo das estratégias de excitação codificada, como emissão com Chirp ou Golay code ao invés de um simples pulso janelado. Seu impacto no melhoramento do nível de sinal ruído implicará diretamente na sensibilidade do sistema à pequenos defeitos.

Nesse trabalho o monitoramento do tubo teste foi realizado através de sucessivas inspeções, como em um acompanhamento de uma medida. A literatura já apresenta formas de se vincular os resultados obtidos de diferentes coletas a fim de melhorar a sensibilidade da técnica. Nesses estudos está sempre presente o estudo da influência das variáveis ambientais, tal como a temperatura.

Em algumas das coletas foram evidenciados perda de canais, os quais não impossibilitaram a operação do sistema e a obtenção dos resultados, então parece claro que um estudo de robustez frente a perda de canais possa aumentar a segurança em operar com o sistema apresentado.

Fica em haver a comparação dos resultados obtidos pelo sistema demonstrado com a inspeção final, por técnica quantitativa a ser definida, dos corpos de prova após serem desenterrados. Espera-se que esse resultado possa ser publicado em forma de artigo e dará a continuidade necessária a este trabalho.

O resultado demonstrado pelas medidas de impedância do sensor mostrou a dependência das suas ressonâncias com respeito a pressão aplicada, isso poderia ser usado com um parâmetro de qualidade de aperto do colar, mas carece de testes apropriados.

Ainda há trabalho no sentido de melhorar a razão de movimento emitido e recebido pelo sensor piezoelétrico, o que envolve estudos paramétricos das suas dimensões bem como materiais utilizados.

BIBLIOGRAFIA

ALLEYNE, D.; CAWLEY, P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. **Journal of Acoustic Society of America**, v. 83, n. 3, 1991.

ALLEYNE, D. N.; CAWLEY, P. **Optimization of Lamb Wave Inspection Techniques**. NDT&E International. 25 1992a.

_____. The Interaction of Lamb Waves with Defects. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 39, n. 3, p. 381-397, 1992b.

_____. The Excitation of Lamb Waves in Pipes Using Dry-Coupled Piezoelectric Transducers. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 15, n. 1, p. 11-19, 1996.

BELANGER, P.; BOIVIN, G. **Development of an Omnidirectional SH0 Piezoceramic Transducer**. AIP Conference Proceedings: AIP Publishing 2016.

BRACEWELL, R. **The Fourier Transform And Its Applications**. 3ed. New York: McGraw-Hill, 2000.

CAWLEY, P. PRACTICAL LONG RANGE GUIDED WAVE INSPECTION - APPLICATIONS TO PIPES AND RAIL. National Seminar of ISNT, 2002, Chennai. ISNT.

CEGLA, F. B. et al. **High-Temperature (>500°C) Wall Thickness Monitoring Using Dry-Coupled Ultrasonic Waveguide transducers**. Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control: IEEE. 58 2011.

CLARKE, T. et al. Evaluation of the Damage Detection Capability of a Sparse-Array Guided-Wave SHM System Applied to a Complex Structure Under Varying Thermal Conditions **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 56, n. 12, 2009.

DAVIES, J.; CAWLEY, P. The Application of Synthetic Focusing for Imaging Crack-Like Defects in Pipelines Using Guided Waves. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 56, n. 4, 2009.

DAVIES, J. O. **INSPECTION OF PIPES USING LOW FREQUENCY FOCUSED GUIDED WAVES** 2008. (Doctor of Philosophy). Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, Imperial College London.

DEMMA, A. **The Interaction of Guided waves With Discontinuities on Structures**. 2003. (Doctor of Philosophy). Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Imperial College of Science, Technology and Medicine.

DEMMA, A. et al. **The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements**. *NDT&E International: Elsevier*. 37: 167-180 p. 2004.

DOBSON, J.; CAWLEY, P. The scattering of torsional guided waves from Gaussian rough surfaces in pipework. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 141, n. 3, p. 1852-1861, 2017.

FROMME, P. et al. **On the Development and Testing of a Guided Ultrasonic Wave Array for Structural Integrity Monitoring**. *Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric, and Frequency Control: IEEE* 53 2006.

GAZIS, D. C. Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. I. Analytical Foundation; II. Numerical Results. **THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA**, v. 31, 1959.

GOODMAN, J. W. **Introduction to Fourier Optics**. 3ed. Englewood: Roberts & Co, 2005.

GRAFF, K. F. **Wave motion in Elastic Solids**. New York: Dover Science, 1991. ISBN 978-0-486-66745-4.

HAYKIN, S. S.; VANVEEN, B. **Sinais e Sistemas**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HAYWARD, G.; HYSLOP, J. Determination of Lamb Wave Dispersion Data in Lossy Anisotropic Plates Using Time Domain Finite Element Analysis. Part I: Theory and Experimental Verification. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 53, n. 2, 2006.

HIRAO, M.; OGI, H. An SH-Wave EMAT Technique for Gas Pipeline Inspection. **NDT&E International**, v. 32, 1999.

KINO, G. S. **Acoustic waves: devices, imaging, and analog signal processing**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1987.

KOGIA, M. et al. Electromagnetic Acoustic Transducers Applied to High Temperature Plates for Potential Use in the Solar Thermal Industry. **Applied Sciences**, v. 5, p. 1715-1734, 2015.

LAGUERRE, L.; AIME, J.-C.; BRISSAUD, M. Magnetostrictive pulse-echo device for non-destructive evaluation of cylindrical steel materials using longitudinal guided waves. **Ultrasonics** v. 39, p. 503-514, 2002.

LAMB, H. **On Waves in an Elastic Plate.** CONFERENCE OF THE ROYAL SOCIETY. London: 114-128 p. 1917.

LI, F. et al. Optimal Mother Wavelet Selection for Lamb Wave Analyses. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 20, 2009.

LI, J.; ROSE, J. L. Implementing Guided Wave Mode Control by Use of a Phased Transducer Array. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 48, n. 3, p. 761-768, 2001.

_____. Angular-Profile Tuning of Guided Waves in Hollow Cylinders Using a Circumferential Phased Array. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 49, n. 12, p. 1720-1729, 2002.

LOWE, M. J. S.; ALLEYNE, D. N.; CAWLEY, P. Defect detection in pipes using guided waves. **Ultrasonics**, v. 36, p. 147-154, 1998.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing.** 3ed. London: Prentice Hall, 2010. ISBN 978-0-13-198842-2.

PAVLAKOVIC, B. et al. DISPERSE: A GENERAL PURPOSE PROGRAM FOR CREATING DISPERSION CURVES **Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation**, v. 16, 1997.

ROSE, J. L. **A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential** Journal of Pressure Vessel Technology: ASME. 124 2002.

SICARD, R.; GOYETTE, J.; ZELLOUF, D. A SAFT algorithm for lamb wave imaging of isotropic plate-like structures. **Ultrasonics**, v. 39, p. 487-494, 2002.

SILK, M. G.; BAITON, K. F. **The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to Lamb waves** IPC Business Press 1979.

WILCOX, P. D. A Rapid Signal Processing Technique to Remove the Effect of Dispersion from Guided Wave Signals. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 50, n. 4, p. 419-427, 2003a.

_____. Omni-Directional Guided Wave Transducer Arrays for the Rapid Inspection of Large Areas of Plate Structures. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 50, n. 6, p. 699-709, 2003b.

_____. Omni-Directional Guided Wave Transducer Arrays for the Rapid Inspection of Large Areas of Plate Structures. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 50, n. 6, p. 699-709, 2003

_____. Guided-wave Array Methods. In: BOLLER, C.;CHANG, F.-K., *et al* (Ed.). **Encyclopedia of Structural Health Monitoring**. Sheffield: John Wiley & Sons, v.1, 2009. cap. 16, p.1-19.

WILCOX, P. D. et al. **Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section** Review of Quantitative Nondestructive Evaluation. 21 2002.

WILCOX, P. D.; LOWE, M. J. S.; CAWLEY, P. **Mode and Transducer Selection for Long Range Lamb Wave Inspection** JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES. 12 2001a.

WILCOX, P. D.; LOWE, M. S. J.; CAWLEY, P. **A signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals.** Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. New York: AIP Conference Proceedings. 20: 180-187 p. 2001b.

WORLTON, D. C. Experimental Confirmation of Lam Waves at Megacycle Frequencies. **Journal of Applied Physics**, v. 32, n. 6, 1961.

ZHOU, W.; YUAN, F.; SHI, T. Guided Torsional Wave Generation of a Linear in-plane Shear Piezoelectric Array in Metallic Pipes **Ultrasonics**, v. 65, 2016.