VICTOR THOMAS TAYRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO
DE POTÊNCIA APLICADO EM PERFURAÇÃO DE ROCHAS E
USINAGEM DE METAIS**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia.**

São Paulo

2014

VICTOR THOMAS TAYRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO
DE POTÊNCIA APLICADO EM PERFURAÇÃO DE ROCHAS E
USINAGEM DE METAIS**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia.**

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador:
Prof. Dr. Flávio Buiochi**

São Paulo

2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de julho de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Tayra, Victor Thomas

Desenvolvimento de um transdutor ultrassônico de potência aplicado em perfuração de rochas e usinagem de metais / V.T.

Tayra. – versão corr. -- São Paulo, 2014.

156 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Transdutores piezelétricos de potência 2.Método dos elementos finitos (Aplicações) 3.Matrizes em cadeia (Aplicações) 4.Usinagem 5.Metais 6.Perfuração de rochas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Flávio Buiochi pela ótima orientação e ao Professor Júlio C. Adamowski pelos ensinamentos, sempre me inspirando a ir além dos limites.

Ao Professor Rodrigo L. Stoeterau pelo apoio precioso nos ensaios de perfuração no torno.

Ao Professor Márcio Yamamoto e Jorge Sakamoto pela calorosa recepção no Laboratório de Mecânica de Rochas (LMR/POLI) e concessão das rochas para os ensaios de perfuração.

Aos grandes amigos do laboratório de ultrassom Alan Tavares de Souza, Timóteo F. de Oliveira e Marco Aurélio B. Andrade, que me encorajaram mesmo nos momentos mais críticos da pesquisa.

Ao Gilberto e Adilson pela paciência e usinagem dos dispositivos essenciais para a montagem do protótipo.

À CAPES (Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por ter fornecido os recursos financeiros necessários a execução desse projeto.

Em especial, gostaria de agradecer ao Professor Ii Sei Watanabe, por sempre incentivar os jovens na carreira científica e tão cordialmente me apresentar à Sociedade Brasil Japão de Pesquisadores (SBPN).

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEF	método dos elementos finitos
MMC	método das matrizes em cadeia
PZT	titanato zirconato de chumbo

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
2 EFEITO PIEZELÉTRICO E TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS	7
2.1 PIEZELETRICIDADE E CERÂMICAS PIEZELÉTRICAS	7
2.2 TRANSDUTORES DE POTÊNCIA	11
3 MODELAGEM DO TRANSDUTOR - MÉTODO DAS MATRIZES EM CADEIA	15
3.1 MODELAGEM DOS ELEMENTOS ELETROMECHANICOS	15
3.2 MODELAGEM DOS ELEMENTOS MECÂNICOS	25
3.3 MODELAGEM DO TRANSDUTOR	28
3.4 MODELAGEM DO TRANSDUTOR COM AMPLIFICADOR	29
3.5 IMPEDÂNCIA ELÉTRICA DO TRANSDUTOR	30
3.6 MODELAGEM – TRANSDUTOR COM A BROCA	33

4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	36
4.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ESTRUTURAS	38
4.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA MATERIAIS PIEZELÉTRICOS	39
4.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS - ANÁLISE MODAL	40
4.4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS - ANÁLISE HARMÔNICA	41
4.5	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NO ANSYS	41
4.5.1	ANÁLISE MODAL DO MANDRIL COM A BROCA - MEF/ANSYS	43
4.5.1.1	MANDRIL SIMPLES	44
4.5.1.2	MANDRIL ESCALONADO	45
4.5.2	SIMULAÇÃO DO LANGEVIN COM AMPLIFICADOR, DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO E BROCA– MEF/ANSYS (ANÁLISE HARMÔNICA)	46
5	PROTÓTIPOS	48
5.1	TRANSDUTOR DE LANGEVIN	48
5.2	AMPLIFICADOR	50
5.3	BROCA E MANDRIL	51
5.3.1	MANDRIL SIMPLES - NÃO ESCALONADO	52
5.3.2	MANDRIL ESCALONADO	54

6 MATERIAIS E METODOS	56
6.1 MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS	56
6.1.1 IMPEDÂNCIA ELÉTRICA	56
6.1.2 INTERFERÔMETRO A LASER	58
6.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO	61
6.3 ENSAIOS DE PERFURAÇÃO DE DISCOS DE ALUMINIO	62
6.4 ENSAIOS DE PERFURAÇÃO DE ROCHAS	65
7 RESULTADOS	68
7.1 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE IMPEDÂNCIA	68
7.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	72
7.2.1 MÉTODO DAS MATRIZES	73
7.2.1.1 TRANSDUTOR E MANDRIL SIMPLES	73
7.2.1.2 TRANSDUTOR E MANDRIL ESCALONADO	74
7.2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	76
7.2.2.1 TRANSDUTOR COMPLETO COM O MANDRIL SIMPLES	76
7.2.2.2 TRANSDUTOR COMPLETO COM O MANDRIL ESCALONADO	77
7.2.3 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS	79
7.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERFURAÇÃO	80
7.3.1 PERFURAÇÃO – DISCOS DE ALUMÍNIO	80
7.3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERFURAÇÃO – ROCHA	83

8 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	85
8.1 MODELAGEM	85
8.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS	86
8.2.1 PERFURAÇÃO DE METAIS	87
8.2.2 PERFURAÇÃO DE ROCHAS	88
9 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	89
9.1 ASPECTOS DE MODELAGEM	89
9.2 ASPECTOS EXPERIMENTAIS	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	97
ANEXO A: PROPRIEDADE DOS MATERIAIS	97
ANEXO B: MÉTODO DAS MATRIZES EM CADEIA	99
B1.1 EQUACIONAMENTO DE UMA CERÂMICA PIEZELÉTRICA	99
B1.2 ASSOCIAÇÃO DE 2 CERÂMICAS PIEZELÉTRICAS EM PARALELO	101
B1.3 ASSOCIAÇÃO DE N CERÂMICAS PIEZELÉTRICAS EM PARALELO	104
B2 – TRANSDUTOR LANGEVIN	107
B3 – TRANSDUTOR DE LANGEVIN COM O AMPLIFICADOR	111
B4 – TRANSDUTOR COM CARGA	112

ANEXO C: ROTINA EM MATLAB – MMC	116
C1 – MANDRIL SIMPLES	116
C2 – MANDRIL ESCALONADO	119
ANEXO D: ROTINA APDL – ANSYS	123
D1 – MANDRIL SIMPLES	123
D2 – MANDRIL ESCALONADO	132

LISTA DE FIGURAS

2.1.1 Tensões mecânicas em uma elemento infinitesimal de cerâmica	9
2.1.1 Transdutor ultrassônico de potência com as massas metálicas e as cerâmicas montadas com os sentidos de polarização alternados, possibilitando a ligação elétrica em paralelo	12
2.2.2 – Transdutor de Langevin com quatro cerâmicas em paralelo. A meia senóide indicada na figura representa os deslocamentos axiais (máximos nas extremidades e nulo no centro).	13
2.2.3 – Representação de um transdutor com amplificador	14
3.1.1 – Cerâmica piezelétrica, geometria e eixos de referência	16
3.1.2 – Representação de um elemento infinitesimal da cerâmica piezelétrica	17
3.1.3 – Representação das condições de contorno na cerâmica	19
3.1.4 – Representação simbólica com 3 portas	23
3.1.5 – Representação simbólica de 2 cerâmicas em paralelo	23
3.1.6 – Representação simbólica de 4 cerâmicas em paralelo	24
3.1.7 – Representação simbólica do pacote de 4 cerâmicas em paralelo	25
3.2.1 – Representação das condições de contorno no elemento mecânico	26
3.2.2 – Representação simbólica com 2 portas do elemento mecânico	27
3.3.1 – Representação simbólica de um transdutor Langevin	28
3.4.1 – Representação simbólica transdutor de Langevin com amplificador	29
3.6.1 – Matrizes do transdutor com a broca	33
4.1 – Discretização no MEF	36
4.2 – Discretização no MEF – Elemento de 4 nós	37
4.5.1 – Discretização no MEF. Pilha de quatro cerâmicas, com polaridade invertida e aplicação de tensão nos eletrodos	42
4.5.2 – Cerâmicas empilhadas com polaridades invertidas	43
4.5.1.1.1 – Desenho bidimensional no ANSYS	45
4.5.1.1.2 – Análise modal – Vibração longitudinal a 19,991 kHz	45
4.5.1.2.1 – Desenho bidimensional no ANSYS	46
4.5.1.2.2 – Análise modal – Vibração longitudinal a 20,191 kHz	46
4.5.2.1 – Análise harmônica – Transdutor com mandril simples, com broca e folga de 15 mm	47
4.5.2.2 – Análise harmônica – Transdutor com mandril escalonado, com broca e folga de 10 mm	47
5.2.1 – Transdutor de Langevin conectado a um amplificador mecânico e a representação esquemática dos deslocamentos axiais	50
5.2.2 – Esquema da conexão do amplificador com o transdutor de potência e a representação esquemática dos deslocamentos axiais	51
5.3.1 – Esquema da montagem de todos os subsistemas no transdutor	52
5.3.1.1 – Desenho com dimensões do mandril simples	53
5.3.1.2 – Mandril simples usinado em aço 4340	54
5.3.2.1 – Desenho com dimensões do mandril escalonado	55

5.3.2.2 – Mandril escalonado usinado em aço 4340	55
6.1.1.1 – Medição da impedância em um HP4194A	58
6.1.2.1 – Interferômetro a LASER apontado para a ponta da broca	60
6.1.2.2 – Montagem em bases rígidas	60
6.3.1 – Dispositivo para fixação do transdutor no torno	63
6.3.2 – Adaptação do transdutor ultrassônico no torno convencional	63
6.3.3 – Transdutor perfeitamente centralizado com a placa do torno	63
6.3.4 – Setup experimental com o transdutor ligado, avançando na peça	64
6.4.1 – Bancada para ensaio de perfuração em rochas	67
7.1.1 – Transdutor com Mandril Simples : gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz)	68
7.1.2– Transdutor com Mandril Simples e Broca de Aço Rápido: gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz)	69
7.1.3 – Transdutor com Mandril Simples e Broca de WIDIA : gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz)	69
7.1.4 – Transdutor com Mandril Escalonado: gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz)	70
7.1.5 – Transdutor com Mandril Escalonado e Broca de Aço Rápido: gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz)	71
7.1.6 – Transdutor com Mandril Escalonado e Broca de WIDIA: gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz)	71
7.2.1.1.1 – MMC, Transdutor com Mandril Simples e broca de aço rápido: gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz)	73
7.2.1.1.2 – MMC, Transdutor com Mandril Simples e broca de aço rápido: gráfico Deslocamento (μm) vs. Frequência (kHz)	74
7.2.1.2.1 – MMC, Transdutor com Mandril Escalonado e broca de aço rápido: gráfico Impedância (Ohm) vs Frequência (kHz)	75

7.2.1.2.2 – MMC, transdutor com Mandril Escalonado e broca de aço rápido: gráfico Deslocamento (μm) vs Frequência (kHz)	75
7.2.2.1.1 – MEF, Transdutor com Mandril Simples e broca de aço rápido: gráfico Impedância (Ohm) vs Frequência (kHz)	76
7.2.2.1.2 – MEF, Transdutor com Mandril Simples e broca de aço rápido: gráfico Deslocamento (μm) vs Frequência (kHz)	77
7.2.2.2.1 – MEF, Transdutor com Mandril Escalonado e broca de aço rápido: gráfico Impedância (Ohm) vs Frequência (kHz)	78
7.2.2.2.2 – MEF, Transdutor com Mandril Escalonado e broca de aço rápido: gráfico Deslocamento (μm) vs Frequência (kHz)	78
7.3.1.1 – Perfuração do disco de 0,5 mm. Disco A.1 perfurado sem ultrassom e disco A.2 perfurado com ultrassom	81
7.3.1.2 – Perfuração do disco de 20 mm. Disco B.1 perfurado sem ultrassom e disco B.2 perfurado com ultrassom	81
7.3.1.3 – Perfuração do disco de 30 mm. Disco C.1 perfurado sem ultrassom e disco C.2 perfurado com ultrassom	81
7.3.1.4 – Cavaco resultante sem utilização de ultrassom na broca	82
7.3.1.5 – Cavaco resultante com a utilização de ultrassom na broca	82
7.3.2.1 – Perfuração sem ultrassom: apenas marcas na superfície da rocha	84
7.3.2.2 – Perfuração com ultrassom: perfuração total	84

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathbf{c}^E$	tensor de rigidez para $\mathbf{E}$ constante
$\mathbf{K}_{uu}$	matriz de rigidez mecânica
$\mathbf{K}_{u\phi}$	matriz de acoplamento piezelétrico
$\mathbf{K}_{\phi\phi}$	matriz de rigidez dielétrica
$\mathbf{D}$	vetor deslocamento elétrico
$\mathbf{E}$	vetor campo elétrico
$\mathbf{e}$	tensor de coeficientes piezelétricos
$\mathbf{F}$	vetor de forças externas
f_a	frequência de anti-ressonância
f_r	frequência de ressonância
f_{br}	folga da base da broca
I	corrente elétrica
j	$\sqrt{-1}$
k	número de onda
M	massa
$\mathbf{M}_{uu}$	matriz de massa estrutural
$\mathbf{Q}$	vetor de cargas elétricas
$\mathbf{S}$	tensor de deformações
S_{ij}	deformação
$\mathbf{T}$	tensor de tensões
T_{ij}	tensão
$\mathbf{u}$	vetor deslocamento
u_i	deslocamento
u	deslocamento
V	voltagens
$ Z $	impedância elétrica
$ R $	resistência elétrica
$ X $	condutância elétrica
$ G $	susceptância elétrica
$\boldsymbol{\epsilon}^S$	tensor de permissividades elétricas para $\mathbf{S}$ constante
ϵ_{ij}^S	permissividade elétrica para $\mathbf{S}$ constante
$\epsilon_{33}'^S$	permissividade elétrica para $\mathbf{S}$ constante, modificada
ϵ_i	alongamento na direção i
$\boldsymbol{\phi}$	vetor de potenciais elétricos
γ_{ij}	distorção no plano ij
ρ	densidade
ω	velocidade angular
w	coeficiente volumétrico do cavaco
V_e	volume total ocupado pelo cavaco
V_p	volume correspondente a massa do cavaco
Y	módulo de elasticidade
c	velocidade de propagação

RESUMO

A sobreposição de frequências ultrassônicas a uma ferramenta em operações de perfuração, utilizando transdutores piezelétricos, resulta em melhorias na usinagem de metais, garantindo melhor acabamento (ausência de rebarba), redução do tamanho do cavaco e menor desgaste ferramental. A utilização desse tipo de técnica na perfuração de rochas reduz a carga axial e aumenta a velocidade do processo, possibilitando maior profundidade de perfuração, podendo vir a ser muito útil em pesquisas aplicadas à perfuração de reservas petrolíferas e exploração mineral. Este trabalho teve como objetivo simular e aplicar um transdutor piezelétrico ultrassônico de potência para perfuração de rochas e metais. Para as simulações numéricas duas técnicas foram utilizadas: o método dos elementos finitos (MEF) e o método das matrizes em cadeia (MMC). O MEF permitiu análises harmônicas e modais de forma rápida e precisa enquanto o MMC resultou em expressão analítica, possibilitando melhor compreensão dos parâmetros físicos e geométricos envolvidos na performance do transdutor. Ambos os métodos nortearam o projeto do protótipo a ser usado em ensaios de perfuração. Para a construção do protótipo, foi projetado um mandril para a fixação da broca, que foi adaptado a um transdutor de potência de 20 kHz. Ensaios de perfuração de rochas e de discos de alumínio foram realizados com o protótipo. A aplicação do protótipo à perfuração de rochas carbonáticas demonstrou redução no tempo de furação, quando comparada ao método convencional (sem aplicação de ultrassom). Na furação de discos de alumínio, a redução de rebarbas, quebra do cavaco durante a operação e melhor acabamento da peça, são conclusões evidentes das melhorias proporcionadas pela sobreposição de frequências ultrassônicas à broca.

ABSTRACT

Superposition of high frequency vibration in the tool, driven by a piezoelectric actuator, in a drilling machining process of metals results in some improvements such as finishing quality (without burr), reduction of tool wear and chip dimensions. Similar techniques applied in rock perforation reduce the axial load in the tool, which enhances the process velocity, resulting in deeper perforation. This might be useful in oil and mineral exploration, opening the feasibility of researches in this field. The aim of this work is to simulate and implement an ultrasonic piezoelectric transducer to perforate rocks and metals. Concerning numerical simulation, two techniques were performed: finite element method (FEM) and chain matrix method (CMM). FEM simulations provide fast and effective modal and harmonic analysis. CMM provide mathematical expressions, analytically exposing geometrical and physical parameters involved in the transducer performance. Both methods were the guide and basement for the prototype project, able to perform perforation experiments. For the construction of the prototype, a drill chuck were designed and adapted for a 20 kHz power ultrasonic transducer. Aluminum drilling and rock perforation experiments were carried out with this prototype. A lower perforation time was achieved in carbonate rocks when the ultrasound-aided method was used as opposed to the conventional method. Results in aluminum disks presented burr reduction, better part finishing and breakage of chips during operation. Those results evidently appoint some improvements due to the power ultrasonic superposition in the drilling process.

1 INTRODUÇÃO

Assim como o som, o ultrassom é uma onda mecânica vibrando em sólidos ou fluidos, porém em uma frequência acima do espectro audível aos seres humanos. Em aplicações como formação de imagens, utiliza-se o ultrassom de baixa potência, em que as influências físicas sobre o objeto em análise são mínimas. A utilização do ultrassom de potência, por outro lado, induz alterações físicas no meio. Dentre os efeitos que o ultrassom de potência pode provocar no meio, estão a geração de calor, a cavitação e tensões mecânicas elevadas.

A indução da vibração mecânica em materiais sólidos a alta frequência é facilmente convertida em calor, tanto devido aos atritos na interface entre dois materiais como devido ao amortecimento interno do material. Isso possibilita uma união de materiais com extrema precisão, pois o calor gerado, e consequentemente a soldagem ocorre precisamente no local em que é aplicado o ultrassom de potência (NEPPIRAS, 1972).

A aplicação do ultrassom em líquidos provoca regiões alternadas de alta e baixa pressão. Sabe-se que quando a pressão ambiente é reduzida, reduz-se também o ponto de ebulição de líquidos. Se a pressão for reduzida substancialmente, o líquido entra em ebulição sem necessidade de aquecimento. Transdutores ultrassônicos provocam localmente variações intensas de baixa e alta pressão, criando bolhas de vapor e colapsos violentos, resultando em uma cavitação. A cavitação ultrassônica é utilizada em limpezas de materiais cirúrgicos e laboratoriais e também na indústria cosmética para separação de essências de flores e plantas na elaboração de fragrâncias de perfumes (NEPPIRAS, 1972).

Transdutores ultrassônicos também podem ser usados para perfuração e usinagem de materiais. O ultrassom de potência sobrepõe à ferramenta ciclos alternados de tensões em altas frequências (ordem de kHz), o que colabora para a fragilização do material e, conseqüentemente, facilita a penetração da ferramenta (BABITSKY et al 2007).

Em estudos de processos de furação em usinagem de aço e alumínio, demonstrou-se que a superposição de vibrações ultrassônicas da ferramenta em rotação axial, permitiu redução do tamanho do cavaco e, conseqüentemente, menor demanda de potência para a perfuração (NEUGEBAUER et al., 2004). Já na furação de materiais cerâmicos, devido à alta sensibilidade do material a elevadas tensões, os processos ultrassônicos possibilitam boa eficiência na perfuração com baixos riscos de danos à peça (HASELKORN et al., 1995).

1.1 JUSTIFICATIVA

Os tradicionais métodos de furação com brocas rotativas apresentam elevados desgastes na ferramenta, elevada demanda de torque e potência e suscetibilidade de quebra da ferramenta devido à concentração de carga axial. A sobreposição de vibrações ultrassônicas na ferramenta apresentou melhorias em processos de usinagem, na qual a ferramenta passou a sofrer menor desgaste, e também em perfuração de rochas, onde os impactos ultrassônicos facilitaram a propagação de trincas.

Entretanto, o fenômeno de furação ou perfuração ultrassônica não foi integralmente compreendido e várias tentativas de implementar um modelo ainda estão sendo estudadas. Abordagens utilizando métodos dos elementos finitos (WALLASCHEK et al 2008), osciladores lineares e não lineares (BABITSKY et al

2007) foram desenvolvidas, porém sem uma perfeita sintonia com os dados experimentais.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As primeiras publicações enfatizando o uso de transdutores ultrassônicos de potência, surgiram com os trabalhos de R.W Wood e A.L. Loomis em 1927, apresentando um dispersor de gotas ultrassônico. Em 1945, L. Balamuth constrói e patenteia uma furadeira ultrassônica que operava com fluidos de corte abrasivos (BALAMUTH, 1945).

Devido à popularidade da patente de Balamuth, os trabalhos posteriores na área de perfuração ultrassônicas enfatizavam veementemente o papel do fluido abrasivo na qualidade dos acabamentos das perfurações de materiais frágeis como o carbetto e o vidro. Considerava-se o atrito a altas frequências dos grãos abrasivos com a peça e a ferramenta como fatores cruciais no desempenho e qualidade nas perfurações ultrassônicas (ADITHAN et al 1974).

Muitos transdutores utilizavam princípios magnéticos na conversão da excitação elétrica em vibrações ultrassônicas. Eram baseados em materiais magnetostrictivos, ou seja, materiais ferromagnéticos deformáveis na presença de um campo magnético (ALEXANDER, 1966).

Devido às elevadas perdas térmicas e limitada conversão eletromecânica, os transdutores baseados em materiais magnetostrictivos foram substituídos pelos transdutores piezelétricos. Não somente pela eficiência, mas também pela praticidade na montagem dos transdutores com cerâmicas piezelétricas (THOE et al 1998).

Contrariamente à perspectiva antiga de enfatizar a abrasividade de fluidos na performance da perfuração, os atuais trabalhos concentram-se mais na compreensão do fenômeno ultrassônico e na modelagem, resultando no projeto do melhor transdutor e subsistemas para a broca ultrassônica.

Na modelagem dos transdutores piezelétricos, os modelos clássicos unidimensionais ainda são utilizados devido à sua clareza nas formulações matemáticas e simplicidade (BO FU, 2005) (SHUYU, 2004), porém os métodos dos elementos finitos ganharam maior popularidade com os modernos recursos computacionais e a versatilidade do método para simulações bi e tridimensionais (IULA et al 2002).

Há, entretanto, muitas divergências na modelagem do impacto ultrassônico da broca no material em perfuração. Há publicações utilizando modelos reológicos (ASTASHEV et al 1998), osciladores não lineares (KRIVTSOV et al 2000) (WIERCIGROCH et al 2005), mecânica do impacto e atratores (NEUMANN et al 2007), e modelos baseados em estimativas experimentais (PEI et al 1995).

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho visa simular e adaptar um transdutor ultrassônico de potência para ser testado em processos de perfuração de rochas e usinagem de metais. Para a simulação, um modelo baseado no método das matrizes em cadeia e outro baseado no método dos elementos finitos são implementados e comparados. Para a construção do protótipo, foi projetado um mandril para a fixação da broca, que foi adaptado a um transdutor de potência de 20kHz. Os resultados experimentais obtidos com o protótipo são conferidos com os resultados dos modelos. Além disso, ensaios de perfuração de

rochas carbonáticas e de discos de alumínio são realizados com o protótipo, a fim de verificar a melhoria no processo de furação.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 apresentam-se os fundamentos da piezeletricidade, as cerâmicas piezelétricas e as equações constitutivas para materiais piezelétricos. Também é apresentado o transdutor ultrassônico de potência do tipo Langevin.

No capítulo 3 apresenta-se a modelagem pelo método das matrizes em cadeia (MMC). O modelo é deduzido em etapas, iniciando com o equacionamento das cerâmicas piezelétricas e dos elementos metálicos até finalmente obter um modelo completo do transdutor com amplificador, mandril e broca.

O capítulo 4 faz uma breve apresentação do Método dos Elementos Finitos (MEF) e da implementação desta técnica no ANSYS descrevendo a modelagem do transdutor, as simulações de análise modal e análise harmônica efetuados.

O capítulo 5 descreve a construção dos protótipos, enfatizando o cálculo da pré-tensão aplicados na construção dos transdutores de Langevin, a conexão do transdutor com seus subsistemas e o mandril projetado especialmente para fixar a broca no transdutor sem muitas perdas de acoplamento eletromecânico.

No capítulo 6, descreve-se a metodologia e a instrumentação científica utilizados nas medições experimentais feitas no protótipo, assim como os ensaios de perfuração e preparação das bancadas de teste.

O capítulo 7 divulga os resultados das simulações MEF e MMC, comparando-os com as medidas experimentais. Também divulga os resultados dos ensaios de perfuração dos discos de Al e das rochas.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões e discussões e finalmente no capítulo 9 apresentam-se motivações para trabalhos futuros.

2 EFEITO PIEZELÉTRICO E TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS

Transdutores são dispositivos que convertem uma forma de energia em outra. Logo, transdutores ultrassônicos de potência são dispositivos que convertem energia elétrica em vibrações mecânicas de alta frequência e intensidade. Os materiais piezelétricos geram carga elétrica proporcional à aplicação da tensão mecânica e também, de maneira contrária, exibem uma deformação mecânica proporcional ao campo elétrico aplicado. Por essa razão os materiais piezelétricos são amplamente utilizados na fabricação de transdutores ultrassônicos.

2.1 PIEZELETRICIDADE E CERÂMICAS PIEZELÉTRICAS

O fenômeno da piezeletricidade ocorre naturalmente em cristais de quartzo e foi descoberto por Jacques e Pierre Curie em 1880. Logo em seguida, surgiram técnicas de polarização de cerâmicas ferroelétricas tornando-as piezelétricas. Os materiais ferroelétricos possuem polarização espontânea, sendo necessária a aplicação de um campo elétrico externo para orientar os eixos polares, tornando-os piezelétricos. (DURAN et al 1986).

O efeito piezelétrico pode ser subdividido em dois efeitos; o efeito direto e o efeito inverso. No primeiro, há a geração de cargas elétricas quando o material é deformado mecanicamente, enquanto no efeito inverso ocorre uma deformação mecânica no material devido à aplicação de um campo elétrico (MOULSON et al 2003) (JANSCHKE, 2010).

O efeito direto é resumido pela seguinte equação constitutiva;

$$D = e S + \varepsilon^S E , \quad (2.1.1)$$

onde D é a densidade de carga elétrica, S é a deformação mecânica, E é o campo elétrico, e é o coeficiente piezelétrico e ε^S é a permissividade elétrica medida com deformação constante.

Quanto ao efeito inverso, a equação constitutiva é:

$$T = c^E S - e^t E , \quad (2.1.2)$$

O primeiro termo a direita, na equação (2.1.2) é a clássica Lei de Hooke, relacionando linearmente a tensão mecânica proporcionalmente a uma deformação S , multiplicado por uma constante c^E , denominada constante de rigidez mecânica. O segundo termo a direita na equação (2.1.2) associa a aplicação do campo elétrico com a tensão mecânica.

As equações (2.1.1) e (2.1.2) foram expostas de maneira genérica no intuito de abordar os conceitos físicos relacionados ao comportamento piezelétrico. Entretanto, ao considerarmos um elemento infinitesimal de cerâmica piezelétrica (figura 2.1.1), este está sujeito a vetores tridimensionais de tensão e deformação, sendo mais precisa a notação vetorial a seguir:

Figura 2.1.1 – Tensões mecânicas em uma elemento infinitesimal de cerâmica

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (2.1.3)$$

Onde T_{11} , T_{22} , e T_{33} são as tensões longitudinais e T_{12} , T_{13} e T_{23} as tensões de cisalhamento. O tensor das deformações, expressa a variação dos deslocamentos numa determinada direção sendo representado por:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (2.1.4)$$

Onde: $S_{23} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)$, $S_{13} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)$ e $S_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)$. u_1 , u_2 e

u_3 são os deslocamentos das partículas nas direções x_1 , x_2 e x_3 , respectivamente.

Para o material piezelétrico linear, c^E é o tensor de rigidez mecânica medido com campo elétrico constante (2.1.5), e é o tensor de coeficientes piezelétricos (2.1.6), ε^S é o tensor de permissividade elétrica medido com deformação constante (2.1.7), E é o campo elétrico e D é a densidade de carga.

$$[c^E] = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E \end{bmatrix} \quad (2.1.5)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1.6)$$

$$[\varepsilon^S] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (2.1.7)$$

onde $c_{66}^E = (c_{11}^E - c_{12}^E)/2$.

Resumindo todos os tensores estruturais e piezelétricos, e assumindo a cerâmica anisotrópica na direção de polarização 3 e isotrópica no plano 12 e considerando caso

bidimensional (figura 2.1.1), podemos resumir as equações constitutivas na sua forma tensorial como:

$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & e_{15} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (2.1.8)$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22}^S & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (2.1.9)$$

2.2 TRANSDUTORES DE POTÊNCIA

Os transdutores de potência, conforme mostra a figura 2.2.1, são montados com cerâmicas piezelétricas empilhadas e pré-tensionadas entre duas massas metálicas por um parafuso de alta resistência mecânica, garantindo melhor potência e desempenho do transdutor.

Para resultar em uma alta potência ultrassônica, as cerâmicas são submetidas a um intenso campo elétrico alternado o que causa elevadas temperaturas e degradação da cerâmica. Logo, é necessário o uso de cerâmicas “duras”, com alto fator de acoplamento eletromecânico (Q_m), elevado ponto de Curie, baixa perda dielétrica ($\tan \delta$), elevada constante de carga piezelétrica (d_{33}) e suas propriedades devem ser estáveis ao longo do tempo e temperatura. O calor gerado em estado fora de ressonância é originado

devido a perdas dielétricas intensas, enquanto em ressonância é causada por perdas mecânicas intensivas (HEYWANG et al 2008). Essas propriedades em conjunto melhoram a eficiência da cerâmica minimizando a dissipação térmica e elevam a sua confiabilidade a altas temperaturas (MOULSON et al 2003).

O titanato zirconato de chumbo (PZT) do tipo 4 e 8 apresentam propriedades adequadas atendendo a esse requisito. As cerâmicas utilizadas em transdutores de potência são planas, circulares no formato de anel, com diâmetros menores que $\lambda/4$ (GALLEGO, 1989).

As cerâmicas são polarizadas na direção longitudinal e são montadas com os sentidos de polarização alternadas, ligadas em paralelo. Entre as cerâmicas e entre as massas metálicas há eletrodos, que são utilizados para a aplicação de tensão elétrica (GALLEGO-JUAREZ, 1989).

Figura 2.2.1 – Transdutor ultrassônico de potência com as massas metálicas e as cerâmicas montadas com os sentidos de polarização alternados, possibilitando a ligação elétrica em paralelo.

Esse tipo de transdutor com cerâmicas piezelétricas empilhadas e pré-tensionadas entre duas massas metálicas por um parafuso também é denominado

transdutor Langevin. Normalmente esses transdutores ressonam em meio comprimento de onda $\lambda/2$.

No funcionamento de transdutores de potência, as cerâmicas piezelétricas trabalham sob elevada tensão elétrica e estão sujeitas a ciclos de deformação da ordem de kHz. Logo, torna-se necessária uma pré-tensão mecânica para manter a coesão da pilha de cerâmicas evitando eventuais rupturas. O conjunto de cerâmicas é prensado entre duas massas metálicas usando um parafuso de alta resistência mecânica. Por esse motivo, os transdutores Langevin também são denominados de transdutores do tipo sanduíche.

Figura 2.2.2 – Transdutor de Langevin com quatro cerâmicas em paralelo. A meia senóide indicada na figura representa os deslocamentos axiais (máximos nas extremidades e nulo no centro).

Essa montagem proporciona também elevado contato mecânico entre todos os componentes, diminuindo bastante o amortecimento mecânico interno no transdutor. Além disso, metais como o alumínio e titânio apresentam fatores de qualidade mecânicos maiores que as cerâmicas piezelétricas, além de serem melhores dissipadores de calor. A manufatura e usinagem de metais é mais prática comparada a de materiais piezelétricos, permitindo maiores configurações geométricas para o transdutor.

Para determinadas aplicações, o transdutor Langevin pode apresentar pequenos deslocamentos, sendo necessário um amplificador para aumentar as amplitudes de vibração. O amplificador mecânico (figura 2.2.3) é uma haste metálica acoplada ao transdutor, com área de secção menor e ressonando em meio comprimento de onda. A haste atua como uma guia de ondas concentradas em uma área menor, resultando em maiores deslocamentos na ponta do transdutor.

Figura 2.2.3 – Representação de um transdutor com amplificador.

3 MODELAGEM DO TRANSDUTOR - MÉTODO DAS MATRIZES EM CADEIA

O método das matrizes se fundamenta nas equações clássicas da propagação de ondas em meio sólido, nas equações das propriedades elásticas dos materiais e nas equações constitutivas das cerâmicas piezelétricas, representando em uma matriz todos esses princípios e equações envolvidos. A problemática de se trabalhar com múltiplas equações simultaneamente, se reduzirá a um simples problema de álgebra matricial.

Inicialmente serão deduzidas as expressões matriciais para os elementos eletromecânicos, que são as matrizes das cerâmicas piezelétricas, e depois serão deduzidas as expressões para os elementos mecânicos, que são as massas metálicas formando a parte estrutural do transdutor. Após a dedução e composição de todos os elementos matriciais, obtém-se a matriz final do transdutor mediante multiplicações matriciais.

3.1 MODELAGEM DOS ELEMENTOS ELETROMECAÑICOS

Considere uma cerâmica piezelétrica como um elemento cilíndrico sólido de raio r , vibrando unicamente no modo de espessura, e que o raio da cerâmica seja muito maior que sua espessura ($r \gg \ell$). Conforme a figura (3.1.1), o eixo 3 é o sentido de vibração axial, e os eixos 1 e 2 são o sentido de vibração radial. Sendo T_1 , T_2 e T_3 os vetores das tensões mecânicas, E_1 , E_2 e E_3 os vetores do campo elétrico e S_1 , S_2 e S_3 os vetores das deformações mecânicas com referência aos eixos 1, 2 e 3, respectivamente. Pode-se então, simplificar as equações mediante as hipóteses assumidas, conforme valores abaixo:

$$T_1 \neq 0, T_2 \neq 0 \text{ e } T_3 \neq 0, \quad (3.1.1)$$

$$E_1 = E_2 = 0 \text{ e } E_3 \neq 0, \quad (3.1.2)$$

$$S_1 = S_2 = 0 \text{ e } S_3 \neq 0 \quad (3.1.3)$$

Figura 3.1.1 – Cerâmica piezelétrica, geometria e eixos de referência.

Há somente deformação mecânica devido à vibração no sentido axial (equação 3.1.3), o campo elétrico tem componente diferente de zero somente na direção do eixo 3 e as tensões mecânicas que causam a propagação da onda encontram-se somente no eixo axial. As propriedades mecânicas e elétricas de uma cerâmica piezelétrica com polarização na direção do eixo 3 são descritas pelas seguintes equações constitutivas:

$$T_3 = c_{33}^E S_3 - e_{33} E_3, \quad (3.1.4)$$

$$D_3 = e_{33} S_3 + \epsilon_{33}^S E_3, \quad (3.1.5)$$

onde c_{33}^E representa a rigidez elástica medida com campo elétrico constante, e_{33} o coeficiente piezelétrico, ϵ_{33}^S a permissividade elétrica obtida a uma deformação constante e D_3 o vetor deslocamento elétrico.

Isolando o campo elétrico E_3 da equação (3.1.5), tem-se:

$$E_3 = \frac{D_3}{\epsilon_{33}^S} - \frac{e_{33} S_3}{\epsilon_{33}^S}. \quad (3.1.6)$$

Substituindo o campo elétrico (3.1.6) na equação constitutiva (3.1.4), a tensão mecânica em função de S_3 e D_3 é dada por:

$$T_3 = c_{33}^E \left(1 + \frac{e_{33}^2}{c_{33}^E \epsilon_{33}^S} \right) S_3 - \frac{e_{33} D_3}{\epsilon_{33}^S}. \quad (3.1.7)$$

Derivando a expressão acima em relação a z , onde a deformação mecânica pode ser representada como $S_3 = \partial u_3 / \partial z$, e assumindo que ao longo do eixo z não há cargas elétricas, segue que $\partial D_3 / \partial z = 0$, resultando na equação:

$$\frac{\partial T_3}{\partial z} = c_{33}^E \left(1 + \frac{e_{33}^2}{c_{33}^E \epsilon_{33}^S} \right) \frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2}. \quad (3.1.8)$$

Considere agora um elemento infinitesimal de cerâmica, de espessura dz , submetida a forças que provocam tensões mecânicas na superfície S da cerâmica, ρ é a densidade da cerâmica piezelétrica utilizada no transdutor (figura 3.1.2), tem-se da aplicação da segunda lei de Newton no elemento:

$$\rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = \frac{\partial T_3}{\partial z}, \quad (3.1.9)$$

onde u_3 é a vibração longitudinal, propagando-se na direção do eixo 3, A_s é a área superficial da cerâmica, F_3 é a força aplicada na superfície e T_3 a tensão mecânica, onde $T_3 = F_3 / A_s$.

Figura 3.1.2 – Representação de um elemento infinitesimal da cerâmica piezelétrica.

Da substituição de (3.1.8) em (3.1.9) resulta em:

$$\rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = c_{33}^E \left(1 + \frac{e_{33}^2}{c_{33}^E \epsilon_{33}^S}\right) \frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2}. \quad (3.1.10)$$

Substituindo $c_{33}^D = c_{33}^E + e_{33}^2 / \epsilon_{33}^S$ na equação acima, tem-se que a velocidade de propagação extensional da onda na cerâmica é dada por $c_c = \sqrt{c_{33}^D / \rho}$ e o número de ondas na cerâmica é dado por $k = \omega / c_c$. Assumindo excitação senoidal em uma determinada frequência ω , pode-se inferir que o deslocamento u_3 também será senoidal, ou seja:

$$u_3(z, t) = u_3(z) e^{j(\omega t + \varphi)t}, \quad (3.1.11)$$

onde φ é a fase. Admitindo $u_3(z, t)$ como uma solução da equação (3.1.10) e sabendo-se que as derivadas primeira e segunda, em relação ao tempo são respectivamente $\dot{u}_3(z, t) = j\omega u_3(z, t)$ e $\ddot{u}_3(z, t) = -\omega^2 u_3(z, t)$, mediante substituição, tem-se a seguinte equação diferencial na variável z :

$$\frac{d^2 u_3}{dz^2} + k^2 u_3 = 0. \quad (3.1.12)$$

Adotando as seguintes condições de contorno nas extremidades da cerâmica, conforme a figura 3.1.3:

$$T_3(0) = -F_1 / A_s, \quad T_3(l) = -F_2 / A_s, \quad (3.1.13)$$

$$\partial u_3(0) / \partial t = v_1, \quad \partial u_3(l) / \partial t = -v_2, \quad (3.1.14)$$

Figura 3.1.3 – Representação das condições de contorno na cerâmica.

As posições $z=0$ e $z=l$ correspondem às extremidades da cerâmica, v_1 e v_2 são as velocidades nas faces e F_1 e F_2 as forças nas faces. Logo, resolvendo a equação diferencial (3.1.12), respeitando as condições de contorno (3.1.13) e (3.1.14), tem-se:

$$u_3(z) = \frac{1}{j\omega} [v_1 \cos(kz) - (\frac{v_2 + v_1 \cos(kl)}{\sin(kl)}) \sin(kz)]. \quad (3.1.15)$$

Ao se substituir na equação constitutiva (3.1.5), resulta em:

$$D_3(z) = -\frac{e_{33}k}{j\omega} [v_1 \sin(kz) + (\frac{v_2 + v_1 \cos(kl)}{\sin(kl)}) \cos(kz)] + \epsilon_{33}^s E_3(z). \quad (3.1.16)$$

E para obter-se a corrente que circula na cerâmica, aplica-se a lei de Gauss, resultando em:

$$I = \frac{\partial}{\partial t} (D_3(z) A_s) = j\omega D_3(z) A_s. \quad (3.1.17)$$

Substituindo $D_3(z)$ de (3.1.16) em (3.1.17) e isolando o campo elétrico $E_3(z)$,

tem-se:

$$E_3(z) = \frac{I}{j\omega A_s \epsilon_{33}^s} + \frac{e_{33}}{j\epsilon_{33}^s c_c} [v_1 \sin(kz) + (\frac{v_2 + v_1 \cos(kl)}{\sin(kl)}) \cos(kz)]. \quad (3.1.18)$$

A tensão elétrica aplicada na cerâmica é obtida pela integração do campo elétrico $E_3(z)$ ao longo de toda a espessura da cerâmica, com os parâmetros de integração variando de 0 a l .

$$V = \int_0^l E_3(z) dz = \frac{I}{j\omega \epsilon_{33}^s A_s} l + \frac{e_{33}}{j\omega \epsilon_{33}^s} (v_1 + v_2) \quad (3.1.19)$$

As forças F_1 e F_2 , são obtidas da substituição de (3.15) e (3.18) na equação constitutiva (3.1.4), resultando em:

$$T_3(z) = \frac{-c_{33}^E k}{j\omega} [v_1 \sin(kz) + (\frac{v_2 + v_1 \cos(kl)}{\sin(kl)}) \cos(kz)] - e_{33} E_3. \quad (3.1.20)$$

Logo, para $z=0$, com $T_3(0) = -F_1 / A_s$, resulta;

$$-\frac{F_1}{A_s c_{33}^E} + \frac{e_{33} E_3}{c_{33}^E} = -\frac{1}{jc_c} (\frac{v_2 + v_1 \cos(kl)}{\sin(kl)}). \quad (3.1.21)$$

Para $z=l$, com $T_3(l) = -F_2 / A_s$, resulta em:

$$-\frac{F_2}{A_s c_{33}^E} + \frac{e_{33} E_3}{c_{33}^E} = -\frac{1}{j c_c} \left(\frac{v_1}{\sin(kl)} + \frac{v_2}{\tan(kl)} \right). \quad (3.1.22)$$

Agrupando todas as equações resulta em:

$$F_1 = \frac{Z_A}{j \tan(kl)} v_1 + \frac{Z_A}{j \sin(kl)} v_2 + \frac{e_{33}}{j \omega e_{33}} I, \quad (3.1.23)$$

$$F_2 = \frac{Z_A}{j \sin(kl)} v_1 + \frac{Z_A}{j \tan(kl)} v_2 + \frac{e_{33}}{j \omega e_{33}} I, \quad (3.1.24)$$

$$V = \frac{e_{33}}{j \omega \epsilon_{33}^s} v_1 + \frac{e_{33}}{j \omega \epsilon_{33}^s} v_2 + \frac{I}{j \omega C_0}, \quad (3.1.25)$$

Onde $Z_A = \rho c_c A_s$ e $C_0 = \epsilon_{33}^s A_s / l$.

As equações (3.1.23), (3.1.24) e (3.1.25) são agrupadas em uma matriz onde v_1 , F_1 e V são as variáveis independentes. Para evitar termos muitos extensos, serão utilizados na matriz os coeficientes A_{11} , A_{12} , ..., A_{33} . Os agrupamentos e demais operações matriciais estão detalhadas no Apêndice B.

A matriz, portanto, segue conforme equação abaixo:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix}. \quad (3.1.26)$$

Para facilitar as próximas operações matriciais e tornar a abordagem mais intuitiva, compartimenta-se a matriz 3x3 da equação (3.1.26), em quatro submatrizes:

$$A_{2 \times 2}^{Pm} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, \quad (3.1.27)$$

$$A_{2 \times 1}^{Pem} = \begin{pmatrix} A_{13} \\ A_{23} \end{pmatrix}, \quad (3.1.28)$$

$$A_{1 \times 2}^{Pme} = \begin{pmatrix} A_{31} & A_{32} \end{pmatrix}, \quad (3.1.29)$$

$$A^{Pe} = A_{33}. \quad (3.1.30)$$

Assim a matriz (3.1.26) torna-se:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 1}^{Pem} \\ A_{1 \times 2}^{Pme} & A^{Pe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix}. \quad (3.1.31)$$

Os coeficientes da matriz $A_{2 \times 2}^{Pm}$ relacionam as variáveis dependentes v_2 e F_2 com as variáveis independentes v_1 e F_1 , e por relacionar variáveis mecânicas em um elemento piezelétrico, utilizaremos o índice Pm (Piezelétrico - mecânico). A matriz $A_{2 \times 1}^{Pem}$ relaciona as variáveis dependentes v_2 e F_2 com a variável elétrica V , e por relacionar uma grandeza elétrica com grandezas mecânicas utilizaremos a notação Pem (Piezelétrico - elétrico - mecânico). Os coeficientes da matriz $A_{1 \times 2}^{Pme}$ relaciona a variável elétrica I com as variáveis independentes v_1 e F_1 , e por relacionar variáveis mecânicas com uma variável elétrica utilizaremos a notação Pme (Piezelétrico -

mecânico - elétrico). E A^{Pe} é um único coeficiente que relaciona somente as grandezas elétricas (I e V), e portanto representaremos pelo índice Pe (Piezelétrico - elétrico)

O modelo matricial pode ser interpretado como uma relação de dependência entre as variáveis de saída v_2 , F_2 e I com as variáveis de entrada v_1 , F_1 e V , como tradicionalmente é abordado em funções de transferência do tipo saída/entrada.

Simbolicamente a matriz pode ser representada como um elemento de três portas, conforme mostra a figura 3.1.4.

Figura 3.1.4 – Representação simbólica com 3 portas.

A relação entre as variáveis de entrada e saída de um sanduíche de duas cerâmicas em paralelo (figura 3.1.5), torna-se um simples problema de multiplicação matricial resultando na seguinte expressão:

Figura 3.1.5 – Representação simbólica de 2 cerâmicas em paralelo.

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 2}^{Pm} \\ A_{1 \times 2}^{Pme} + A_{1 \times 2}^{Pme} & A_{1 \times 2}^{Pme} & A_{1 \times 2}^{Pme} & A_{1 \times 2}^{Pme} & A_{1 \times 2}^{Pme} & A_{1 \times 2}^{Pme} & A_{1 \times 2}^{Pme} & A_{1 \times 2}^{Pme} \\ 2A_{2 \times 2}^{Pe} + A_{1 \times 2}^{Pme} & A_{2 \times 2}^{Pe} & A_{2 \times 2}^{Pe} & A_{2 \times 2}^{Pe} & A_{2 \times 2}^{Pe} & A_{2 \times 2}^{Pe} & A_{2 \times 2}^{Pe} & A_{2 \times 2}^{Pe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (3.1.32)$$

O protótipo construído e utilizado nos experimentos utilizaram quatro cerâmicas (figura 3.1.6) e a descrição dessa montagem será abordada na Seção 6.

Figura 3.1.6 – Representação simbólica de 4 cerâmicas em paralelo.

De maneira análoga, a matriz resultante da associação das quatro cerâmicas em paralelo resultam na seguinte expressão matricial (BO FU, 2005):

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{2 \times 2}^{Pm} & C_{2 \times 1}^{Pem} \\ C_{1 \times 2}^{Pme} & C^{Pe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (3.1.33)$$

$$C_{2 \times 2}^{Pm} = A_{2 \times 2}^{Pm} A_{2 \times 2}^{Pm} A_{2 \times 2}^{Pm} A_{2 \times 2}^{Pm} \quad (3.1.34)$$

$$C_{2 \times 1}^{Pem} = A_{2 \times 1}^{Pem} + A_{2 \times 2}^{Pm} A_{2 \times 1}^{Pem} + (A_{2 \times 2}^{Pm})^2 A_{2 \times 1}^{Pem} + (A_{2 \times 2}^{Pm})^3 A_{2 \times 1}^{Pem} \quad (3.1.35)$$

$$C_{1x2}^{Pme} = A_{1x2}^{Pme} + A_{1x2}^{Pme} A_{2x2}^{Pm} + A_{1x2}^{Pme} (A_{2x2}^{Pm})^2 + A_{1x2}^{Pme} (A_{2x2}^{Pm})^3 \quad (3.1.36)$$

$$C^{Pe} = 4A^{Pe} + 2A_{1x2}^{Pme} A_{2x1}^{Pem} + 2A_{1x2}^{Pme} A_{2x2}^{Pm} A_{2x1}^{Pem} + A_{1x2}^{Pme} (A_{2x2}^{Pm})^2 A_{2x1}^{Pem} \quad (3.1.37)$$

Detalhes da associação em paralelo de cerâmicas e suas respectivas matrizes da pilha resultante estão detalhados no Apêndice B. Também é deduzida por meio de indução finita uma relação para a associação de N cerâmicas. Doravante utilizaremos o elemento C (figura 3.1.7) representando simplificadaamente as quatro cerâmicas A associadas em paralelo (figura 3.1.6).

Figura 3.1.7 – Representação simbólica do pacote de 4 cerâmicas em paralelo.

3.2 MODELAGEM DOS ELEMENTOS MECÂNICOS

Além das massas metálicas dos transdutores de potência os amplificadores mecânicos, já comentados na Seção (2.2), também são modelados. Para a modelagem, assume-se que os materiais dos elementos mecânicos são homogêneos, isotrópicos e obedecem à lei elástica de Hooke. Consideram-se elementos mecânicos como barras cilíndricas sólidas. A seguir será aplicada a teoria de vibração de corpos elásticos mediante a propagação de ondas acústicas utilizando a equação (3.2.1), supondo que a

secção transversal da barra permaneça constante durante a vibração e que as partículas vibrem na direção axial.

Dada a equação de onda no meio elástico:

$$\frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} = c_m^2 \frac{\partial^2 u_m}{\partial z^2}, \quad (3.2.1)$$

onde c_m é a velocidade de propagação extensional da onda no elemento mecânico e u_m corresponde ao deslocamento na direção axial z . A figura (3.2.1) mostra as condições de contorno no elemento metálico, onde A_m é a área superficial da massa de alumínio e l_m corresponde a espessura.

Figura 3.2.1 – Representação das condições de contorno no elemento mecânico.

A velocidade de propagação extensional no elemento mecânico é dada por $c_m = \sqrt{\frac{Y}{\rho_m}}$, onde Y representa o módulo de elasticidade e o ρ_m é a densidade do material. De modo análogo aos processos efetuados anteriormente, tem-se a equação de onda (3.2.1) escrita no domínio da frequência:

$$\frac{d^2 u_m}{dz^2} + k_m^2 u_m = 0, \quad (3.2.2)$$

onde $k_m = \omega/c_m$ corresponde ao número de onda no elemento mecânico adotado. A resolução da equação (3.2.2) com as condições de contorno:

$$T_3(0) = -F_1 / A_m, \quad T_3(l) = -F_2 / A_m, \quad (3.2.3)$$

$$\partial u_m(0)/\partial t = v_1, \quad \partial u_m(l)/\partial t = -v_2, \quad (3.2.4)$$

resulta em:

$$F_1 = \cos(k_m l_m) F_2 + j Z_m \sin(k_m l_m) v_2, \quad (3.2.5)$$

$$v_1 = j \frac{\sin(k_m l_m)}{Z_m} F_2 + \cos(k_m l_m) v_2, \quad (3.2.6)$$

sendo $Z_m = \rho_m c_m A_s$. O agrupamento das equações (3.2.5) e (3.2.6) com v_1 e F_1 como variáveis independentes resulta na seguinte notação matricial:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k_m l_m) & \frac{-j \sin(k_m l_m)}{Z} \\ -j Z \sin(k_m l_m) & \cos(k_m l_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.7)$$

onde M (3.2.8) representa a matriz do elemento mecânico conforme figura 3.2.2

$$M = \begin{pmatrix} \cos(k_m l_m) & \frac{-j \sin(k_m l_m)}{Z} \\ -j Z \sin(k_m l_m) & \cos(k_m l_m) \end{pmatrix} \quad (3.2.8)$$

Simbolicamente (3.2.7) pode ser interpretado como um elemento de duas portas conforme abaixo:

Figura 3.2.2 – Representação simbólica com 2 portas do elemento mecânico.

3.3 MODELAGEM DO TRANSDUTOR

Posto o equacionamento das matrizes dos elementos eletromecânicos e mecânicos, a modelagem de um transdutor se resume à associação das matrizes dos elementos compostos pelo sanduíche de cerâmicas (C) prensadas pela massa traseira (M_1) e pela massa dianteira (M_2). A figura 3.3.1 representa a associação dos elementos e a equação (3.3.1), o produto das matrizes (Apêndice B).

Figura 3.3.1 – Representação simbólica de um transdutor Langevin.

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_2 C_{2 \times 2}^{Pm} M_1 & M_2 C_{2 \times 1}^{Pem} \\ C_{1 \times 2}^{Pme} M_1 & C^{Pe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (3.3.1)$$

onde as notações $C_{2 \times 2}^{Pm}$, $C_{2 \times 1}^{Pem}$, $C_{1 \times 2}^{Pme}$ e C^{Pe} são as submatrizes da matriz resultante do empilhamento das quatro cerâmicas (3.1.33).

As matrizes das massas traseira e dianteira são representadas por M_1 e M_2 respectivamente:

$$M_1 = \begin{pmatrix} \cos(k_1 l_1) & \frac{-j \sin(k_1 l_1)}{Z_1} \\ -jZ_1 \sin(k_1 l_1) & \cos(k_1 l_1) \end{pmatrix} \quad (3.3.2)$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} \cos(k_2 l_2) & \frac{-j \sin(k_2 l_2)}{Z_2} \\ -jZ_2 \sin(k_2 l_2) & \cos(k_2 l_2) \end{pmatrix} \quad (3.3.3)$$

onde l_1 e l_2 são as espessuras das massas metálicas, k_1 e k_2 são os números de onda das massas M_1 e M_2 respectivamente.

3.4 MODELAGEM DO TRANSDUTOR COM AMPLIFICADOR

A adição do amplificador é representada por uma massa M_3 adicionada à massa dianteira M_2 , conforme figura abaixo:

Figura 3.4.1 – Representação simbólica transdutor de Langevin com amplificador.

E a matriz do elemento mecânico M_3 , referente ao amplificador é:

$$M_3 = \begin{pmatrix} \cos(k_m l_3) & \frac{-j \sin(k_m l_3)}{Z_3} \\ -jZ_3 \sin(k_m l_3) & \cos(k_m l_3) \end{pmatrix} \quad (3.4.1)$$

Onde a matriz final do transdutor completo com amplificador resultante das multiplicações matriciais (Apêndice B) segue conforme abaixo:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_3 M_2 C_{2x2}^{Pm} M_1 & M_3 M_2 C_{2x1}^{Pem} \\ C_{1x2}^{Pme} M_1 & C^{Pe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (3.4.2)$$

3.5 IMPEDÂNCIA ELÉTRICA DO TRANSDUTOR

A curva de impedância elétrica do transdutor é obtida através da equação (3.4.2), supondo que as extremidades do transdutor estão livres, ou seja, $F_1 = F_2 = 0$. Obtém-se um conjunto de equações com os coeficientes matriciais e através de uma rotina computacional, plota-se a curva da impedância elétrica para um espectro de frequência. As rotinas foram implementadas no Matlab devido à sua versatilidade em trabalhar com matrizes e vetores, e o código está detalhado no Anexo C.

Seja MT a matriz do transdutor com o amplificador mecânico, ou seja:

$$MT = \begin{pmatrix} M_3 M_2 C_{2x2}^{Pm} M_1 & M_3 M_2 C_{2x1}^{Pem} \\ C_{1x2}^{Pme} M_1 & C^{Pe} \end{pmatrix} \quad (3.5.1)$$

Pode-se representá-la com coeficientes matriciais MT_{11} , MT_{12} , ... MT_{33}

$$MT = \begin{pmatrix} MT_{11} & MT_{12} & MT_{13} \\ MT_{21} & MT_{22} & MT_{23} \\ MT_{31} & MT_{32} & MT_{33} \end{pmatrix} \quad (3.5.2)$$

Assim, a equação (3.4.2) é representada por:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} MT_{11} & MT_{12} & MT_{13} \\ MT_{21} & MT_{22} & MT_{23} \\ MT_{31} & MT_{32} & MT_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix}. \quad (3.5.3)$$

De (3.5.3) resultam as seguintes equações:

$$v_2 = MT_{11} v_1 + MT_{13} V, \quad (3.5.4)$$

$$v_1 = -\frac{MT_{23}}{MT_{21}} V, \quad (3.5.5)$$

$$I = MT_{31} v_1 + MT_{33} V. \quad (3.5.6)$$

Substituindo (3.5.5) em (3.5.4) resulta em:

$$v_2 = \left(MT_{13} - MT_{11} \frac{MT_{23}}{MT_{21}} \right) V. \quad (3.5.7)$$

Substituindo (3.5.6) em (3.5.7) resulta:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{MT_{21}}{MT_{21}MT_{33} - MT_{31}MT_{23}}, \quad (3.5.8)$$

onde Z é a impedância elétrica do transdutor definida pela razão entre a tensão elétrica V e a corrente I .

A frequência onde a impedância é mínima, corresponde a frequência de ressonância e a frequência com impedância máxima é a frequência de antirressonância. No estado de ressonância, dada a alta admitância, a corrente flui facilmente no interior da cerâmica resultando em alta conversão eletromecânica. Na antirressonância, entretanto, a baixa admitância se traduz em baixa conversão eletromecânica (UCHINO et al., 2003).

Devido à grande importância desses parâmetros, analisaremos as curvas da impedância do transdutor em função da frequência na seção 7. Este será um importante parâmetro no projeto dos transdutores.

A fórmula aproximada do coeficiente de acoplamento eletromecânico, relacionando as frequências de ressonância e antirressonância é:

$$k^2 = \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2} \quad (3.5.9)$$

onde f_a é a frequência de antirressonância e f_r é a frequência de ressonância.

3.6 MODELAGEM – TRANSDUTOR COM A BROCA

Para a modelagem da broca, considera-se esta como uma barra cilíndrica sólida, conectada à ponta do transdutor funcionando como um guia de ondas ultrassônicas (BABITSKY et al 2007) (POTTHAST, 2008). Para isso considera-se a teoria de vibração de corpos elásticos mediante a propagação de ondas acústicas. Assumindo que o material é homogêneo, isotrópico e obedece a lei elástica de Hooke, a secção transversal da barra permanece constante durante a vibração e as partículas vibram na direção axial (TIMOSHENKO, 1937). Assim, pode-se modelar a broca de forma análoga aos elementos mecânicos anteriormente abordados, representando-a por uma matriz M_4 com seus respectivos parâmetros físicos e geométricos.

$$M_4 = \begin{pmatrix} \cos(k_4 l_4) & \frac{-j \sin(k_4 l_4)}{Z} \\ -jZ \sin(k_4 l_4) & \cos(k_4 l_4) \end{pmatrix} \quad (3.6.1)$$

A montagem total do transdutor com a broca está representada na figura abaixo:

Figura 3.6.1 – Matrizes do transdutor com a broca.

Observe que os parâmetros da modelagem permanecem M1 como a massa traseira, M2 a massa dianteira com a metade do amplificador de mesmo diâmetro e M3 compreendendo a parte do amplificador de menor diâmetro e o mandril, e a M4 a broca. De maneira análoga aos procedimentos nas seções anteriores e detalhados no apêndice B, a matriz final do transdutor é dada por:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_4 M_3 M_2 C^{Pm} M_1 & M_4 M_3 M_2 C^{Pem} \\ C^{Pme} M_1 & C^{Pe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (3.6.2)$$

Denominando a matriz MTB resultante de todos os elementos piezelétricos, estruturais e a broca:

$$MTB = \begin{pmatrix} M_4 M_3 M_2 C^{Pm} M_1 & M_4 M_3 M_2 C^{Pem} \\ C^{Pme} M_1 & C^{Pe} \end{pmatrix} \quad (3.6.3)$$

Para considerações posteriores, a matriz MTB é representada com todos os coeficientes de uma matriz 3x3 conforme abaixo:

$$MTB = \begin{pmatrix} MTB_{11} & MTB_{12} & MTB_{13} \\ MTB_{21} & MTB_{22} & MTB_{23} \\ MTB_{31} & MTB_{32} & MTB_{33} \end{pmatrix} \quad (3.6.4)$$

No Apêndice B4 é apresentada uma extensão do modelo de matrizes em cadeia sobre influência de carga. As saídas do transdutor são conectadas a um elemento viscoelástico com rigidez e amortecimento, constituindo um oscilador linear. Essa abordagem mostra

mais uma forma de se estimar o comportamento de algum elemento sobre influência ultrassônica de potência com base em parâmetros físicos como a rigidez e amortecimento. Devido à grande disparidade de modelos, abordando a modelagem da perfuração ultrassônica sob diferentes métodos não lineares (BLAZEJCZYK-OKOLEWSKA et al 1996) (WIERCIGROCH et al 2005) , o modelo visco-elástico linear é exposto brevemente não tendo pretensão de substituir modelos mais sofisticados.

4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.

O método dos elementos finitos consiste em discretizar o modelo no domínio contínuo decompondo-o em subdomínios finitos, também denominados de elementos (figura 4.1).

Figura 4.1 – Discretização no MEF.

Nos elementos, em pontos denominados nós, determina-se um conjunto de variáveis dependentes governadas por equações diferenciais. Essas equações diferenciais descrevem o princípio físico envolvido no problema e são aplicadas em cada elemento por meio do cálculo variacional ou resíduos ponderados. No interior dos elementos, uma função de interpolação das variáveis de cada nó fornece a solução aproximada (MADENCI et al 2006) (GÓMEZ, 2010).

Ilustraremos brevemente uma discretização com um elemento plano de quatro nós, elemento este utilizado nas simulações no ANSYS (plane 13). Assim a função de deslocamento contínuo u_x e u_y poderá ser representada por funções lineares de interpolação N_i , para $i = 1, 2, 3$ e 4 (FISH et al 2007).

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Onde $u = \begin{bmatrix} u_x & u_y \end{bmatrix}^T$, é o vetor deslocamento mecânico,

$U = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & x_2 & y_2 & x_3 & y_3 & x_4 & y_4 \end{bmatrix}^T$ é o vetor dos deslocamentos nodais

$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix}$ é a matriz das funções de forma dependentes

do polinômio e da forma geométrica do elemento.

Figura 4.2 – Discretização no MEF – Elemento de 4 nós.

Assim, para um elemento retangular de quatro nós (figura 4.2), teremos as seguintes funções de forma:

$$N_1(\xi, \eta) = (\xi - 1)(1 - \eta)(\xi + \eta + 1) / 4 \quad (4.2)$$

$$N_2(\xi, \eta) = (\xi + 1)(1 - \eta)(\xi - \eta + 1) / 4 \quad (4.3)$$

$$N_3(\xi, \eta) = (1 + \xi)(1 + \eta)(\xi + \eta - 1) / 4 \quad (4.4)$$

$$N_4(\xi, \eta) = (\xi - 1)(1 + \eta)(\xi - \eta + 1) / 4 \quad (4.5)$$

Os valores dos deslocamentos mecânicos, são calculados como uma combinação das funções polinomiais em cada nó, ou seja (MOAVENI, 1999):

$$u(x, y) = N_u(x, y)U(x_i, y_i) \quad (4.6)$$

De maneira análoga, o potencial elétrico também pode ser discretizado por elementos nodais e com a respectiva função polinomial de forma:

$$\phi(x, y) = N_\phi(x, y)\phi(x_i, y_i) \quad (4.7)$$

4.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ESTRUTURAS

O fundamento da modelagem de elementos estruturais pelo MEF baseia-se fortemente na teoria da elasticidade. Consideraremos pequenos deslocamentos, pois este é da ordem de micron nos transdutores piezelétricos de potência. Além disso, consideraremos o aço que compõe os elementos estruturais do transdutor como sólidos isotrópicos e com características lineares. A teoria do estado plano de tensões será suficiente na modelagem axissimétrica do transdutor, pois este usará elementos MEF bidimensionais. As equações que governam um elemento no estado plano de tensão são:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (4.1.1)$$

também denominada lei de Hooke generalizada, pois relaciona tensão mecânica com deformação, onde $(\varepsilon_{11} \ \varepsilon_{22} \ \gamma_{12})^T$, são as pequenas tensões relacionadas com o deslocamento, representadas por:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} \quad (4.1.2)$$

O problema de vibração para o elemento com forcas aplicadas em cada nó se resume a (BATHE, 1982):

$$[M_p][\ddot{u}] + [D_{uu}][\dot{u}] + [K_{uu}][u] = [F] \quad (4.1.3)$$

onde M_p é a matriz de massa, K_{uu} é a matriz de rigidez mecânica, D_{uu} a matriz do amortecimentos mecânico e F o vetor das forças nodais.

4.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA MATERIAIS PIEZELÉTRICOS

Nos problemas envolvendo transdutores piezelétricos, além dos graus de liberdade mecânicos (u - deslocamentos de translação e rotação), aplicam-se também os graus de liberdade elétricos (φ - potencial elétrico) em cada nó da cerâmica piezelétrica. O deslocamento e o potencial elétrico em locais arbitrários do elemento são combinações lineares de valores nodais do elemento (LERCH, 1990). Nos nós de cada elemento do transdutor é aplicada a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} M_P & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{uu} & 0 \\ 0 & D_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{\phi u} & -K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ Q \end{bmatrix}, \quad (4.2.1)$$

onde M_P é a matriz de massa, K_{uu} , $K_{\phi\phi}$ e $K_{u\phi}$ ($K_{\phi u}$) são as matrizes de rigidez, dielétrica e piezelétrica, respectivamente, D_{uu} e $D_{\phi\phi}$ são as matrizes dos amortecimentos mecânico e dielétrico, respectivamente, F é o vetor das forças nodais e Q o vetor de cargas elétricas.

4.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS - ANÁLISE MODAL

Da teoria de vibrações mecânicas, a frequência natural é obtida pelo problema de autovalores e autovetores (4.3.1), aplicados em cada elemento discretizado, sem aplicação de entradas. Por isso, aparece o vetor nulo no lado direito da igualdade (4.3.1).

$$\begin{bmatrix} K_{uu} - \omega^2 M_P & K_{u\phi} \\ K_{\phi u} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.1)$$

4.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS - ANÁLISE HARMÔNICA

Da teoria de vibrações mecânicas, a resposta harmônica é obtida pelo problema de autovalores e autovetores, aplicados em cada elemento discretizado, contemplando as condições de contorno do problema e as excitações harmônicas F e Q em cada nó

(4.4.1)

$$\begin{bmatrix} K_{uu} - \omega^2 M_p & K_{u\varphi} \\ K_{\varphi u} & K_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ Q \end{bmatrix} \quad (4.4.1)$$

4.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NO ANSYS

A modelagem pelo MEF foi implementada usando o software comercial ANSYS/Multiphysics. Optou-se pela simulação axissimétrica em 2D, devido à simetria do transdutor. Os procedimentos para simulação no ANSYS seguem os seguintes passos: pré-processamento, solução e pós-processamento (MOAVENI, 1999)

Pré-processamento: entrada dos parâmetros geométricos do transdutor, união de todos os subsistemas do transdutor (cerâmicas, massas metálicas, parafuso e amplificador), entrada das propriedades do material, do tipo de elemento (*plane 13* para piezelétrico e *plane 42* para estrutural), das dimensões do elemento e das condições de contorno e carregamento.

Solução: resolve o conjunto de equações estabelecidas na etapa anterior respeitando as respectivas condições de contorno em cada nó.

Pós-processamento: visualização dos resultados tais como distribuição das tensões mecânicas ou deslocamentos, no caso de estruturas mecânicas, ou a distribuição de potencial elétrico, no caso de materiais piezelétricos (MOAVENI, 1999).

As massas metálicas utilizadas no transdutor são modeladas utilizando elementos estruturais com graus de liberdade de deslocamento nas direções x e z e os elementos piezelétricos com quatro graus de liberdade; deslocamento U_x , U_y e U_z e tensão elétrica (ANDRADE et al 2010a). A modelagem das cerâmicas envolveu a geometria retangular bidimensional, sua discretização e a aplicação de tensão nos respectivos eletrodos (figura 4.5.1).

Figura 4.5.1 – Discretização no MEF. Pilha de quatro cerâmicas, com polaridade invertida e aplicação de tensão nos eletrodos.

As cerâmicas foram empilhadas com polaridade invertida (4.5.2) e os eletrodos energizados apropriadamente com tensões de 1 volt e terra (4.5.1) (4.5.2).

Figura 4.5.2 – Cerâmicas empilhadas com polaridades invertidas

Devido à sua circularidade e simetria, utilizamos elementos bidimensionais (2D) na modelagem do transdutor. A vantagem da utilização de elementos 2D é a performance computacional, uma vez que elementos 3D demandam mais processamentos computacionais.

4.5.1 ANÁLISE MODAL DO MANDRIL COM A BROCA – MEF/ANSYS

O projeto do conjunto mandril e broca partiu da seguinte suposição: broca com dimensões e massa tão ínfimas, comparada ao transdutor, que pode ser aproximada a uma massa concentrada (carga) na ponta do amplificador (BABITSKY et al 2007) (ENSMINGER et al 2009). Assim, o mandril foi projetado para ser um ressonador de meio comprimento de onda, e a broca uma impedância mecânica presa na ponta do mandril.

Subsistemas conectados a um transdutor ultrassônico de potência devem vibrar adequadamente em uma frequência igual à frequência de trabalho do transdutor. Não basta apenas atingir um modo qualquer de vibração na frequência de trabalho; é

fundamental que este modo de vibração proporcione deslocamentos longitudinais na broca (OSTASEVICIUS et al 2012). Dessa forma, as análises modais foram implementadas no ANSYS para o mandril simples com a broca e o mandril escalonado com a broca. A profundidade da haste da broca presa ao mandril foi ajustada até atingir o perfeito equilíbrio entre frequência de trabalho e deslocamentos longitudinais.

4.5.1.1 MANDRIL SIMPLES

As dimensões do mandril e da broca foram inseridas no ANSYS, bem como as características dos materiais. A broca tem diâmetro de 4 mm e comprimento de 75 mm. Na extremidade final do mandril foi feito um furo de diâmetro 4 mm e profundidade de 30 mm, com interferência deslizante permitindo a entrada da broca sem grandes perdas de acoplamento mecânico e também com a possibilidade de ajustar o melhor comprimento para fixação da broca no mandril. Assim, nas simulações no ANSYS, considerou o parâmetro variável f_{br} para ajustar a melhor profundidade no encaixe da broca no mandril. A rotina implementada no ANSYS, considerou um valor de $f_{br}=0$, variando no passo de 1 mm. Para cada valor de f_{br} ajustado, efetuava-se a análise modal observando o modo de vibração e a respectiva frequência natural. Para um valor de f_{br} de 15 mm, o conjunto apresentou modo de vibração longitudinal em uma frequência natural de 19,991 kHz, bem próxima à frequência de trabalho do transdutor. ($f_{br}=15$ mm) (figura 4.5.1.1.1) (figura 4.5.1.1.2).

Figura 4.5.1.1.1 – Desenho bidimensional no ANSYS

Figura 4.5.1.1.2 – Análise modal – Vibração longitudinal a 19,991 kHz

4.5.1.2 MANDRIL ESCALONADO

Os mesmos procedimentos também foram implementados para o mandril escalonado. A frequência natural de 20,191 kHz foi alcançada com uma folga entre a base da broca e o mandril de $f_{br} = 10$ mm (4.5.1.2.1), com a broca vibrando em modo longitudinal (4.5.1.2.2).

Figura 4.5.1.2.1 – Desenho bidimensional no ANSYS

Figura 4.5.1.2.2 – Análise modal – Vibração longitudinal a 20,191 kHz

4.5.2 SIMULAÇÃO DO LANGEVIN COM AMPLIFICADOR, DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO E BROCA– MEF/ANSYS (ANÁLISE HARMÔNICA)

Foram definidas as características geométricas das cerâmicas e configuradas suas propriedades (Anexo A), com seus graus de liberdade elétricos e mecânicos, e também foram aplicadas as condições de contorno elétricas. Para os elementos estruturais, somente os graus de liberdade mecânicos foram considerados. Aplicou-se também uma restrição estrutural (deslocamento nulo) na aba do transdutor, pois é a posição onde o transdutor é fixo.

A análise harmônica foi feita pelo método da superposição modal do ANSYS, na qual o software resolve equações (4.4.1) com entradas harmônicas do tipo $F(t) = F_0 e^{-j\omega t}$ e $Q(t) = Q_0 e^{-j\omega t}$. Para os elementos, utilizou-se discretizações de 2 mm.

Como o ANSYS não fornece diretamente o valor da impedância elétrica do transdutor, calcula-se inicialmente a carga elétrica nas superfícies da cerâmica. Assim, sabendo que: $Q(t) = Q_0 e^{-j\omega t}$, temos $I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -j\omega Q(t)$. Logo, a impedância elétrica pode ser obtida pela razão entre a tensão elétrica de referência aplicada no eletrodo e a corrente elétrica; $Z = \frac{V}{I(t)} = -\frac{V}{j\omega Q(t)}$ (JOHNSON et al 2000). Com os dados da carga elétrica obtidos no ANSYS e a implementação dessas equações no Matlab, obtém-se a curva de impedância do transdutor.

Os valores dos deslocamentos axiais (U_y), determinados no ANSYS em função da frequência, são exportados para o Matlab para melhor apresentação gráfica e serão apresentadas e comentadas na Seção 7.2 – Resultados das Simulações.

Figura 4.5.2.1 – Análise harmônica – Transdutor com mandril simples, com broca e folga de 15 mm.

Figura 4.5.2.2 – Análise harmônica – Transdutor com mandril escalonado, com broca e folga de 10 mm.

5 PROTÓTIPOS

Um transdutor de Langevin foi montado mantendo o conjunto de quatro cerâmicas piezelétricas alinhadas e presas com a tensão mecânica apropriada. Detalhes do cálculo do torque e aperto com torquímetro são abordados na seção 5.1. Um amplificador mecânico ressonando a meio comprimento de onda foi conectado ao transdutor com a ajuda de um parafuso prisioneiro.

As etapas de dimensionamento de um dispositivo para fixar a broca no conjunto transdutor e amplificador envolveram a análise modal e a hipótese de considerar a broca como um elemento de parâmetros concentrados. Em outras palavras, não houve a preocupação em ajustar a broca como um ressonador de $\lambda/2$, mas sim a preocupação em ajustá-la na ponta do mandril como uma massa concentrada, ressonando em uma frequência natural próxima a do transdutor (20 kHz). Isso resultou na construção de dois dispositivos: um simples e outro escalonado. No primeiro caso, o dispositivo atua como uma continuidade do amplificador (*booster*); e, no segundo caso, a variação de área proporciona maiores deslocamentos na ponta da broca.

5.1 TRANSDUTOR DE LANGEVIN

Os componentes da montagem de um transdutor de potência do tipo Langevin são: as cerâmicas piezelétricas, os elementos estruturais e o parafuso de pré-tensão. As propriedades dos materiais encontram-se nas tabelas A₁ e A₂ do apêndice A.

Um parafuso de elevada resistência é utilizado para prender as massas metálicas e as pilhas de cerâmica, formando um sanduíche. A pré-tensão aplicada pelo torque no parafuso mantém todo o conjunto do transdutor coeso, garantindo bom contato dos

terminais elétricos com a cerâmica e as massas, e evitando fraturas das cerâmicas piezelétricas durante a operação na frequência de ressonância. Além disso, as cerâmicas possuem uma resistência mecânica muito mais alta à compressão (420 a 700 MPa) do que à tração (90 MPa), e a pré-tensão é, portanto, um importante fator de confiabilidade no funcionamento do transdutor (ZHANG et al 1999).

Entretanto, se uma tensão mecânica muito elevada for aplicada na cerâmica, isto pode deslocar as frequências de ressonância e antirressonância e também aumentar o desgaste da cerâmica. Simulações e resultados experimentais apontam a pré-tensão ótima em torno de 30 a 50 MPa (ARNOLD et al 2001). Sendo a tensão mecânica dada por $\sigma = F/A$, onde F é a força aplicada na superfície da cerâmica e A é a área superficial da cerâmica. Sendo r_{ext} o raio total da cerâmica e r_{int} o raio interno do anel da cerâmica, a área A é expressa por $A = \pi(r_{ext}^2 - r_{int}^2)$.

Substituindo os valores geométricos da cerâmica, conforme tabela A_1 , resulta $A = 1787 \text{ mm}^2$ e a força de aproximadamente $F = 54 \text{ kN}$, para exercer uma pressão nas cerâmicas de aproximadamente 30 MPa. Logo, o torque necessário aplicado a um parafuso com diâmetro $d = 12,7 \text{ mm}$ é:

$$\text{Torque} = 0,2 F d = 137,16 \text{ N.m} \quad (\text{NIEMANN, 2002})$$

Para garantir um torque, dentro dos limites ótimos de tensão mecânica foi utilizado um torquímetro GEDORE BDS 80E com relógio e ponteiro.

5.2 AMPLIFICADOR

O amplificador utilizado respeitou os parâmetros de projeto de transdutores ultrassônicos de potência, com um comprimento compatível a um ressonador de $\lambda/2$, feito com o mesmo material que o corpo metálico do transdutor de Langevin, e unido a este por um parafuso prisioneiro (figura 5.2.1) (figura 5.2.2). A união entre esses elementos foi aplicada com uma chave fixa, e a aplicação de torque suficiente para evitar qualquer folga entre o transdutor e o amplificador o que possivelmente perderia acoplamento eletromecânico.

Figura 5.2.1 – Transdutor de Langevin conectado a um amplificador mecânico, construídos no Laboratório de Ultrassom da Escola Politécnica da USP.

Figura 5.2.2 – Esquema da conexão do amplificador com o transdutor de potência e a representação esquemática dos deslocamentos axiais.

5.3 BROCA E MANDRIL

Conforme abordado na seção de simulações no ANSYS, dois mandris com diferentes configurações paramétricas foram analisados e construídos. A fixação da broca foi orientada com base na análise modal discutida na seção anterior. Experimentalmente esse ajuste foi nortado por medições sequenciais em um interferômetro a LASER, ajustando a profundidade da broca no mandril e apertando os parafusos laterais de fixação.

As brocas utilizadas correspondem a uma dimensão de 4 mm x 75 mm, uma de aço rápido e outra de WIDIA, utilizadas nos ensaios de perfuração de alumínio e rochas

respectivamente. A conexão do mandril no amplificador foi feito através de um parafuso prisioneiro (figura 5.3.1).

Figura 5.3.1 – Esquema da montagem de todos os subsistemas no transdutor

Dois mandris foram construídos; um considerando uma extensão do amplificador (Booster), e outro escalonado com mais um fator de amplificação mecânica. As medidas e detalhes desses mandris serão explanados a seguir.

5.3.1 MANDRIL SIMPLES - NÃO ESCALONADO

As dimensões do mandril simples encontram-se na figura 5.3.1.1. O diâmetro é o mesmo do amplificador ($\varnothing$ 31mm) e seu comprimento (123 mm) foi projetado como ressonador de meio comprimento de onda. Em uma extremidade há uma entrada para o parafuso prisioneiro, conectando o mandril ao amplificador, e em outra extremidade um furo de 4 mm de diâmetro para um ajuste deslizante com a broca. Há também dois furos perpendiculares ao eixo do mandril para fixar a broca com parafusos M3 de alta resistência. Além disso, a profundidade do furo é de 35 mm para ajustar a broca em uma distância ótima, conforme a análise modal apresentada na seção 4.5.1.

Figura 5.3.1.1 – Desenho com dimensões do mandril simples

A peça foi usinada com o mesmo material metálico do transdutor e amplificador; aço 4340 (figura 5.3.1.2)

Figura 5.3.1.2 – Mandril simples usinado em aço 4340

5.3.2 MANDRIL ESCALONADO

As dimensões do mandril escalonado são mostradas na figura 5.3.2.1. Nesse caso, uma parte apresenta o mesmo diâmetro do amplificador e em outra parte há uma redução subta para 20 mm. Além de projetar o mandril como ressonador de meio comprimento de onda – regra básica de projetos para transdutores ultrassônicos de potência – houve também a intenção de incorporar no mandril, um amplificador mecânico. Conforme o mandril simples, este também apresenta em uma extremidade entrada para o parafuso prisioneiro, e em outra extremidade um furo de 4 mm de diâmetro para encaixar a broca. Há também dois furos perpendiculares ao eixo do mandril para fixar a broca com parafusos M3 de alta resistência. A profundidade ideal da broca para permanecer presa ao mandril também foi ajustada segundo análise modal apresentada na seção 4.5.1.

Figura 5.3.2.1 – Desenho com dimensões do mandril escalonado

A peça foi usinada com o mesmo material metálico do transdutor e amplificador; aço 4340 (figura 5.3.2.2)

Figura 5.3.2.2 – Mandril escalonado usinado em aço 4340

6 MATERIAIS E METODOS

Esta seção descreverá a metodologia utilizada nas medições realizadas no transdutor com amplificador, mandril e broca (6.1), a modelagem e simulação (6.2) e os ensaios de usinagem (6.3) e a perfuração de rochas (6.4). Concomitantemente, serão descritos também os equipamentos e instrumentação científica utilizada.

6.1 MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

6.1.1 IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

Nesta seção comentaremos a metodologia das medições de impedância elétrica realizadas no protótipo com o mandril simples e com o mandril escalonado. Além disso, as medições foram feitas encaixando-se no mandril, tanto a broca de aço rápido como a broca de WIDIA.

A variação da impedância elétrica do transdutor em função da frequência é de fundamental importância para se determinar as frequências de ressonância e antirressonância do transdutor. Na frequência de ressonância um oscilador piezelétrico atinge a sua máxima condutância e na frequência de antirressonância atinge-se a máxima resistência elétrica. Com base na teoria de circuitos elétricos, podemos considerar uma cerâmica piezelétrica simplificada como um componente elétrico com resistência elétrica R , reatância elétrica X , condutância elétrica G e susceptância elétrica B ; onde a impedância elétrica é dada por $|Z| = \sqrt{|R|^2 + |X|^2}$ e a admitância por $|Y| = \sqrt{|G|^2 + |B|^2}$. Assim, na frequência de antirressonância a impedância é

máxima devido à alta resistência elétrica e na frequência de ressonância a impedância é mínima devido à alta condutância. Sob o ponto de vista do comportamento oscilatório, maiores tensões mecânicas e, portanto, maiores deslocamentos estruturais surgem no transdutor na frequência de ressonância (UCHINO et al 2003). Assim, todos os ensaios serão realizados excitando o transdutor em sua frequência de ressonância.

Logo, o levantamento da curva de impedância elétrica do transdutor é de fundamental importância para determinar a frequência de ressonância do transdutor e permitir gerar o sinal elétrico de excitação na frequência adequada de trabalho.

As medições de impedância elétrica foram obtidas com um analisador de impedância Hewlett-Packard HP4194A (figura 6.1.1.1) e as curvas apresentadas na seção 7. A varredura concentrou-se na região de 20 kHz a 21 kHz, em torno da primeira frequência de ressonância do transdutor, pois será essa a região de trabalho.

É interessante notar que a adição da broca alterou a frequência de ressonância e antirressonância do conjunto além da adição do ganho de impedância. Entretanto, essas alterações na curva não foram tão substanciais se tivéssemos adicionado um elemento ressonador. Tal fato enfatiza simplificações feitas anteriormente na modelagem da broca, considerando-a de dimensões pequenas e atuando como uma massa concentrada adicionando impedância mecânica. Algumas alternativas de cálculo de impedância mecânica de cargas concentradas na ponta de transdutores ultrassônicos de potência consideram-na como $|Z_M| = j\omega M$, também expressa por $|Z_M| = j\omega\rho V$ (ENSMINGER et al 2009). Onde $|Z_M|$ denota o módulo da impedância mecânica adicionada pela carga, M a massa da carga, ρ sua densidade e V o volume.

Nas modelagens apresentadas anteriormente, optamos por seguir os equacionamentos baseados em equações de ondas e vibrações mecânicas, não adotando esse cálculo de $|Z_M|$.

Figura 6.1.1.1 – Medição da impedância em um HP4194A

6.1.2 INTERFERÔMETRO A LASER

A vibração do transdutor ultrassônico de potência ocorre em altas frequências (ordem de kHz) e com pequenos deslocamentos (ordem de μm). Logo, há a necessidade de medir esses pequenos deslocamentos com técnicas de precisão. Uma das técnicas é a interferometria a laser.

O princípio da interferometria a laser é baseada na divisão de um feixe de laser com um jogo de lentes adequadas; um dos feixes incide no objeto em vibração e outro feixe utilizado como referência. Após reflexão no objeto em estudo, essa onda sofre uma defasagem e é sobreposta com o feixe de referência. Assim, a interferometria de duas ondas com diferenças de fase fornece uma estimativa precisa da velocidade do objeto sob vibração em alta frequência (KARASIK et al 1995).

Foram efetuadas montagens com o mandril simples e o escalonado e, em cada caso, as medidas foram feitas na ponta da broca com um interferômetro a laser OFV – 5000 Polytec, 2011 (figura 6.1.2.1). Tanto a broca de WIDIA como a de aço rápido foi encaixada nos mandris e os deslocamentos na ponta de cada broca foram medidos.

Tanto o transdutor como o canhão de Laser foi fixado em bases rígidas evitando ruídos de vibração na medição (figura 6.1.2.2). O controlador do interferômetro apresenta diversos canais com saídas para sinais de medidas de velocidade e deslocamento que podem ser visualizados com a conexão de um osciloscópio nessas saídas. No manual do fabricante do interferômetro pode-se constatar que a resolução para as medidas de velocidade é da ordem de $1,6 \mu\text{m/s}$ e de deslocamento 160 nm . Para atingir a melhor precisão da medição utilizamos o canal da velocidade pois está na ordem de microns e portanto mais compatível com a escala dos deslocamentos de transdutores ultrassônicos de potência. Com um osciloscópio Agilent, Infiniium MSO8104A, foi possível visualizar o sinal do vibrômetro e a obtenção do deslocamento convertida com uma simples operação de integração.

É importante constatar, que as medições variavam bastante durante o funcionamento do transdutor, pois este aquecia e adquiria outra frequência de ressonância. Assim, as medidas foram todas realizadas instantaneamente evitando deixar o transdutor ligado por longos períodos durante a medição.

Figura 6.1.2.1 – Interferômetro a LASER apontado para a ponta da broca

Figura 6.1.2.2 – Montagem em bases rígidas

6.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Os modelos MEF foram criados no programa ANSYS, já descritos e apresentados na seção de elementos finitos.

O método das matrizes em cadeia (MMC), já formulado e apresentado na Seção 3, foi implementado no Matlab, e o respectivo código encontra-se no Apêndice C.

O MMC é de fácil implementação computacional e exige baixos recursos computacionais para simulação. A abordagem é intuitiva. Sua modelagem baseia-se nos conhecimentos de vibração mecânica, e equações constitutivas de materiais piezelétricos e princípios fundamentais de eletricidade, reduzindo-se a multiplicações matriciais. Além disso, abstrações simbólicas, com elementos dotados de terminais, tornam o raciocínio ainda mais intuitivo.

O MMC oferece conjuntos de expressões matemáticas com variáveis relacionadas a diversos parâmetros dos transdutores tais como propriedades dos materiais piezelétricos, propriedade dos materiais metálicos, geometria dos elementos estruturais do transdutor e geometria das cerâmicas. Através de manipulações algébricas diversas funções objetivo podem ser expressas tais como impedância elétrica, deslocamento e potência. Essas funções, sujeitas a algum requerimento geométrico ou físico nas variáveis independentes, consistem na técnica multi –objetiva de otimização (BO FU, 2005).

6.3 ENSAIOS DE PERFURAÇÃO DE DISCOS DE ALUMÍNIO

Os ensaios de perfuração dos discos de alumínio foram realizados em um torno convencional. A fixação do transdutor no torno foi feita por meio de um dispositivo mecânico (figura 6.3.1) preso nos trilhos do carro transversal com porcas e parafusos de alta resistência (figura 6.3.2). Esse dispositivo (figura 6.3.1) foi projetado considerando as medidas do torno convencional, mantendo o transdutor centralizado e alinhado durante a perfuração com o disco fixo na placa giratória do torno (figura 6.3.3). Parafusos de alta resistência também foram usados na fixação do transdutor ao dispositivo, que foi preso pela aba na região de deslocamentos nulos.

Figura 6.3.1 – Dispositivo para fixação do transdutor no torno

Figura 6.3.2 – Adaptação do transdutor ultrassônico no torno convencional

Figura 6.3.3 – Transdutor perfeitamente centralizado com a placa do torno.

Figura 6.3.4 – Setup experimental com o transdutor ligado, avançando na peça.

Conjuntos de discos de alumínio com diâmetro de 80 mm e espessuras de 0,5 mm, 20 mm e 30 mm foram preparados para o ensaio.

Os tornos convencionais apresentam um painel para configurar as relações de engrenagens da máquina (figura 6.3.4), fixando valores de rotação para a peça e de avanço para o transdutor. Nesse ensaio, utilizou-se uma rotação de 180 rpm para a peça e avanço de 3 m/min para o transdutor, enquadrando-se na faixa de valores recomendada para perfuração de materiais como o alumínio, usando uma broca de aço rápido de diâmetro 4 mm (STEMMER, 2005).

Os ensaios de perfuração dos discos de alumínio foram agrupados em: perfuração convencional sem ultrassom, perfuração com ultrassom utilizando mandril simples e perfuração com ultrassom utilizando mandril escalonado.

Nos ensaios os cavacos foram coletados para posterior análise qualitativa dos processos de perfuração com ou sem ultrassom. A coleta dos cavacos foi manual e foi utilizada uma lona abaixo da placa do torno para evitar misturas de cavacos resultantes de diferentes processos de perfuração.

A alimentação de potência, com os sinais nas respectivas frequências de ressonância, exigidas por cada configuração de mandril e broca, foi fornecida por um amplificador de potência que amplifica os sinais recebidos por um gerador de funções (figura 6.3.4).

6.4 ENSAIOS DE PERFURAÇÃO DE ROCHAS

As rochas utilizadas nos ensaios são de origem carbonática, cordialmente cedidas pelo Laboratório de Mecânica de Rochas (LMR) da Escola Politécnica da USP. Foram extraídas com uma serra copo, formando cilindros com diâmetro médio de 30 mm. Os cilindros foram cortados com jato de água para a obtenção de corpos de prova com espessura de 30 mm. Foram confeccionados oito corpos de prova: dois corpos para o ensaio sem ultrassom, três corpos para o ensaio com ultrassom e mandril simples e outros três corpos para o ensaio com ultrassom e mandril escalonado.

Os ensaios foram realizados em rochas carbonáticas devido à ampla aplicação dessas no mercado de construção, pois dela é extraído o calcário para a fabricação do

cimento e cal. Outra forte motivação é que rochas areníticas e carbonáticas são obstáculos muito presentes na perfuração de reservatórios de petróleo, setor este que ainda apresenta muitos desafios, possibilitando uma fértil aplicação das pesquisas de perfuração ultrassônica (THOMAS, 2004) (OTON, 2012).

Nos ensaios com ultrassom houve as seguintes etapas: encaixe do mandril no transdutor; instalação da broca de WIDIA, encaixando-a na profundidade ótima e de acordo com a análise modal (seção 4.5.1), medição no analisador de impedância para adquirir a frequência de ressonância do conjunto e instalação do transdutor completo na bancada experimental (figura 6.4.1). Um gerador de funções (Agilent, 33220A, 20 MHz), acoplado a um amplificador de potência (AR 800A3 - 800Watts), foi ajustado para alimentar o transdutor com trens de pulso senoidais na devida frequência de ressonância. Após a fixação do transdutor na guia e seu correto posicionamento no centro da rocha, o motor elétrico para girar a rocha foi acionado concomitantemente ao sistema de geração de sinais, e iniciada a cronometragem do tempo de perfuração.

Contrariamente aos ensaios de perfuração de metais, os ensaios com rochas não foram baseados em valores tabelados, pois não há especificamente valores tabelados de rotação e avanço para esses materiais. Portanto, surgiu a necessidade de projetar uma bancada apropriada para fazer os ensaios. Nessa bancada, o transdutor é fixado em uma guia linear, permitindo seu deslocamento vertical com seu próprio peso. A ponta da broca é mantida em contato com o centro da rocha, que por sua vez está fixa em um copo giratório tracionado por uma polia solidária ao motor elétrico de 12 V, resultando numa rotação no corpo de prova de 60 rpm (figura 6.4.1).

Figura 6.4.1 – Bancada para ensaio de perfuração em rochas.

7 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das medições da impedância elétrica (seção 7.1), das simulações numéricas (seção 7.2) e dos ensaios experimentais obtidos com os protótipos (seção 7.3).

7.1 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE IMPEDÂNCIA

As curvas de impedância medidas com o analisador de impedância Hewlett-Packard HP4194A estão apresentadas abaixo. A medida efetuada no transdutor com mandril simples sem broca está representada na figura 7.1.1 e as figuras 7.1.2 e 7.1.3 representam as medidas efetuadas no transdutor com o mandril simples com as brocas de aço rápido e WIDIA respectivamente.

Figura 7.1.1 – Transdutor com Mandril Simples : gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz).

Figura 7.1.2– Transdutor com Mandril Simples e Broca de Aço Rápido: gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz).

Figura 7.1.3 – Transdutor com Mandril Simples e Broca de WIDIA : gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz).

A medida efetuada no transdutor com mandril escalonado sem broca está representada na figura 7.1.4 e as figuras 7.1.5 e 7.1.6 representam as medidas efetuadas no transdutor com o mandril escalonado com as brocas de aço rápido e WIDIA respectivamente.

Figura 7.1.4 – Transdutor com Mandril Escalonado: gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz).

Figura 7.1.5 – Transdutor com Mandril Escalonado e Broca de Aço Rápido:
gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz).

Figura 7.1.6 – Transdutor com Mandril Escalonado e Broca de WIDIA: gráfico
Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz).

7.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados das simulações numéricas obtidos com o método das matrizes em cadeia são apresentados na seção 7.2.1 e os obtidos pelo MEF, na seção 7.2.2. Ambas as seções incluem os gráficos da impedância elétrica do transdutor em função da frequência, bem como o deslocamento. Na seção 7.2.3, são comparadas as simulações com as medições realizadas.

Foram utilizadas duas brocas distintas, uma de aço rápido para perfuração dos discos de alumínio e outra de WIDIA para perfuração dos corpos de prova de rochas. O carboneto cementado é um material de elevada dureza utilizado na fabricação de ferramentas e é popularmente conhecido como WIDIA, abreviação de *Wie Diamant* que do alemão quer dizer “como diamante”, provavelmente para se referir a dureza do carboneto cementado.

As brocas de WIDIA comerciais, normalmente contém carboneto cementado somente na ponta da broca e o restante do corpo é constituído de aço. As brocas de aço rápido são inteiramente constituídas do mesmo material e as propriedades do aço rápido são bem conhecidas e fornecidas pelos fabricantes de ferramentas. Nas simulações, os resultados apresentados estão considerando somente a broca de aço rápido. As propriedades utilizadas nas simulações são apresentadas no Apêndice A, tabela A₃.

7.2.1 MÉTODO DAS MATRIZES

7.2.1.1 TRANSDUTOR E MANDRIL SIMPLES

As curvas obtidas pelo MMC para um transdutor com mandril simples e broca de aço rápido estão apresentadas abaixo. A figura 7.2.1.1.1 representa a curva da impedância elétrica e a figura 7.2.1.1.2 o deslocamento mecânico na ponta da broca. Para as simulações do deslocamento mecânico, foi utilizada uma amplitude de 100 volts para a tensão elétrica.

Figura 7.2.1.1.1 – MMC, Transdutor com Mandril Simples e broca de aço rápido: gráfico Impedância (Ohm) vs. Frequência (kHz).

Figura 7.2.1.1.2 – MMC, Transdutor com Mandril Simples e broca de aço rápido: gráfico Deslocamento (μm) vs. Frequência (kHz).

7.2.1.2 TRANSDUTOR E MANDRIL ESCALONADO

As curvas obtidas pelo MMC para um transdutor com mandril escalonado e broca de aço rápido estão apresentadas abaixo. A figura 7.2.1.2.1 representa a curva da impedância elétrica e a figura 7.2.1.2.2 o deslocamento mecânico na ponta da broca. Para as simulações do deslocamento mecânico, foi utilizada uma amplitude de 100 volts para a tensão elétrica.

Figura 7.2.1.2.1 – MMC, Transdutor com Mandril Escalonado e broca de aço rápido : gráfico Impedância (Ohm) vs Frequência (kHz).

Figura 7.2.1.2.2 – MMC, transdutor com Mandril Escalonado e broca de aço rápido: gráfico Deslocamento (μm) vs Frequência (kHz).

7.2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos foi implementado no ANSYS, e a rotina APDL encontra-se no Apêndice D. As propriedades dos materiais utilizadas no modelo estão sumarizadas no Apêndice A.

7.2.2.1 TRANSDUTOR COMPLETO COM O MANDRIL SIMPLES

As curvas obtidas pelo MEF para um transdutor com mandril simples e broca de aço rápido estão apresentadas abaixo. A figura 7.2.2.1.1 representa a curva da impedância elétrica e a figura 7.2.2.1.2 o deslocamento mecânico na ponta da broca. Para as simulações do deslocamento mecânico, foi utilizada uma amplitude de 100 volts para a tensão elétrica.

Figura 7.2.2.1.1 – MEF, Transdutor com Mandril Simples e broca de aço rápido:

gráfico Impedância (Ohm) vs Frequência (kHz).

Figura 7.2.2.1.2 – MEF, Transdutor com Mandril Simples e broca de aço rápido: gráfico Deslocamento (μm) vs Frequência (kHz).

7.2.2.2 TRANSDUTOR COMPLETO COM O MANDRIL ESCALONADO

As curvas obtidas pelo MEF para um transdutor com mandril escalonado e broca de aço rápido estão apresentadas abaixo. A figura 7.2.2.2.1 representa a curva da impedância elétrica e a figura 7.2.2.2.2 o deslocamento mecânico na ponta da broca. Para as simulações do deslocamento mecânico, foi utilizada uma amplitude de 100 volts para a tensão elétrica.

Figura 7.2.2.2.1 – MEF, Transdutor com Mandril Escalonado e broca de aço rápido:
gráfico Impedância (Ohm) vs Frequência (kHz).

Figura 7.2.2.2.2 – MEF, Transdutor com Mandril Escalonado e broca de aço
rápido: gráfico Deslocamento (μm) vs Frequência (kHz).

7.2.3 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

As simulações basearam-se nos transdutores montados com a broca de aço rápido, logo as comparações se restringirão somente a este caso.

As curvas obtidas com o MEF apresentam uma tendência de deslocamento para a esquerda exibindo frequências de ressonância e antirressonância ligeiramente menores que as medições experimentais. Por outro lado, as obtidas via MMC foram curvas deslocadas para a direita exibindo frequências de ressonância e antirressonância ligeiramente maiores que as medições experimentais.

De fato, o MMC é um modelo unidimensional, concentrando-se nas vibrações longitudinais. Sua curva de impedância, ao ignorar os modos radiais de vibração, apresentam os modos de vibração longitudinais em frequências maiores que as experimentais (IULA et al 1998). O MEF, entretanto, considera elementos bidimensionais, abrangendo também as vibrações radiais.

Diferenças entre as curvas simuladas e as medidas experimentalmente podem ser atribuídas a ausência de um estudo mais preciso com análise de sensibilidade de cada propriedade piezelétrica no comportamento do transdutor, pois as caracterização das propriedades piezelétricas desempenham um papel importante na qualidade das simulações (PEREZ et al 2010). Além disso, há fatores que não foram considerados no modelo tais como a pré-tensão exercida na montagem do sanduíche de cerâmicas, o envelhecimento dos materiais e o aquecimento do protótipo durante o funcionamento.

As medidas experimentais dos deslocamentos, realizadas na seção 6.1.2 resultaram em cerca de 1 μm para o mandril simples com broca de aço rápido e 1,6 μm para o mandril escalonado com broca de aço rápido.

Com o mandril escalonado, constata-se um deslocamento um pouco maior. Entretanto, este não foi significativo devido ao baixo fator de amplificação, podendo ser aumentado pela razão entre as áreas.

Os resultados dos deslocamentos obtidas via MEF e MMC ficaram próximos aos valores experimentais.

7.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERFURAÇÃO

Os ensaios de perfuração se subdividiram em dois grupos: perfuração de discos de alumínio (seção 7.3.1) e perfuração de rochas (seção 7.3.2).

7.3.1 PERFURAÇÃO – DISCOS DE ALUMÍNIO

Os ensaios concentram-se mais em uma análise qualitativa, comparando os acabamentos, rebarbas e cavacos resultantes de perfurações com e sem ultrassom.

Optou-se por discos finos com espessura de 0,5 mm, por apresentarem maior propensão em deformar e, possivelmente, formar rebarbas com facilidade. Os discos com espessura de 20 mm foram usados para comparações de acabamento, porém com menor susceptibilidade de deformação. Já os discos com espessura de 30 mm foram usados por apresentarem espessura suficiente para coleta de cavaco.

Os discos perfurados sem ultrassom apresentaram rebarbas consideráveis, principalmente no furo final de saída da ferramenta. As perfurações com ultrassom, tanto com o mandril simples como com o mandril escalonado apresentaram ótimo acabamento (Figura 7.3.1.1 – 7.3.1.3).

Figura 7.3.1.1 – Perfuração do disco de 0,5 mm. Disco A.1 perfurado sem ultrassom e disco A.2 perfurado com ultrassom

Figura 7.3.1.2 – Perfuração do disco de 20 mm. Disco B.1 perfurado sem ultrassom e disco B.2 perfurado com ultrassom

Figura 7.3.1.3 – Perfuração do disco de 30 mm. Disco C.1 perfurado sem ultrassom e disco C.2 perfurado com ultrassom

Os cavacos coletados das perfurações apresentaram nítidas diferenças morfológicas. Durante a perfuração sem ultrassom, o cavaco espiralava-se ao longo da broca, só desprendendo-se desta após atingir um comprimento considerável (figura 7.3.1.4). Nas perfurações ultrassônicas os cavacos fragmentavam-se antes mesmo de se espiralar em volta da ferramenta (figura 7.3.1.5).

Figura 7.3.1.4 – Cavaco resultante sem utilização de ultrassom na broca

Figura 7.3.1.5 – Cavaco resultante com a utilização de ultrassom na broca

7.3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERFURAÇÃO – ROCHA

Os ensaios de perfuração de rochas foram realizados na bancada mostrada na figura 6.4.1, sem a aplicação de ultrassom (transdutor desligado) e com a aplicação de ultrassom (transdutor ligado). No ensaio sem ultrassom os mandris exercem a mera função de fixar a broca, pois nesse caso apenas a pressão e rotação da rocha são fatores essenciais na perfuração e as diferenças de formato nos mandris não exercem influências na perfuração. Nas perfurações com ultrassom, entretanto, os ensaios com o mandril simples e escalonado acarretam diferenças no desempenho.

O ensaio sem a aplicação de ultrassom não foi suficiente para perfurar a rocha, resultando apenas em demarcações superficiais na rocha (figura 7.3.2.1). Ou seja, nas condições experimentais (baixa rotação e pouca pressão sobre a rocha) não seria possível perfurar a rocha completamente. Nos ensaios com ultrassom, a broca trespassou completamente a rocha.

As três rochas perfuradas com o transdutor munido de mandril simples resultaram nos seguintes tempos de perfuração: 40 s, 43 s e 45 s. Quando equiparado

com o mandril simples, o escalonado garantiu maiores vantagens em tempo de perfuração: 30 s, 31 e 33 s. É importante realçar que, em ambos os casos, os furos nas rochas apresentaram um bom acabamento, não ocorrendo fraturas na rocha ou nas regiões periféricas à perfuração (figura 7.3.2.2).

Figura 7.3.2.1 – Perfuração sem ultrassom: apenas marcas na superfície da rocha.

Figura 7.3.2.2 – Perfuração com ultrassom: perfuração total.

8 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O trabalho apresentou modelos matemáticos e simulações numéricas, assim como a construção definitiva de um protótipo e observação de melhorias em processos de perfuração. A conclusão será dividida em dois tópicos; métodos de modelagem do transdutor na seção 8.1 e ensaios de perfuração na seção 8.2.

8.1 MODELAGEM

O MMC, apresenta uma abordagem unidimensional e descreve as vibrações no modo de espessura, desconsiderando os modos laterais de vibração. Isto de fato limita o uso do modelo para uma varredura ampla no espectro de frequência, restringindo seu uso para os modos de vibração longitudinal (IULA et al 1998). Devido à exclusividade unidimensional, o MMC não pode ser implementado por geometrias de transdutores muito complexas. Por outro lado, por ser um método intuitivo, pode ser assimilado por estudantes de engenharia, ainda que não possuam conhecimentos avançados sobre ultrassom.

O MEF é geometricamente mais versátil, simulando problemas unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. Para cada caso se estuda os elementos mais apropriados conforme a geometria, adaptação de graus de liberdade nos nós e tipo de fenômeno físico influenciando o elemento. As curvas obtidas com o MEF, também contemplam os modos radiais de vibração, apresentando uma varredura no espectro de frequência mais próxima do caso experimental.

Com respeito a ambos os métodos utilizados neste trabalho, deve-se considerar que as propriedades dos materiais foram consultadas em referências tabeladas (GROTE

et al 2007), ou catálogos de fabricantes (Morgan). O acúmulo de erros devido às diferenças entre as propriedades reais e as tabeladas afastam as curvas teóricas das experimentais. As curvas teóricas estarão tão mais próximas das experimentais quanto melhor caracterizados estiverem os materiais.

Há também demais fatores não detectados pelas simulações: degradação de propriedades piezelétricas conforme a idade, aquecimento excessivo das cerâmicas, ensaios prolongados com múltiplas variações da tensão e ajuste de frequência que alteram as propriedades da cerâmica.

Através do MEF foi possível simular iterativamente diversos ajustes da broca no mandril efetuando as análises modais e posteriormente a análise harmônica no conjunto formado pelo transdutor, amplificador, mandril e broca. O MMC, por outro lado, possibilitou a obtenção das curvas da impedância elétrica e do deslocamento longitudinal de maneira rápida. As simulações proporcionaram grande economia, evitando desperdícios de tempo e de recursos na elaboração dos protótipos.

8.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

As melhorias nos processos de perfuração com ultrassom foram verificadas nos ensaios de perfuração dos discos de alumínio e de perfuração das rochas. Analisaremos os resultados em cada tipo de ensaio.

8.2.1 PERFURAÇÃO DE METAIS

Quanto ao conjunto de discos perfurados, a ausência de rebarbas é um dos resultados qualitativos nitidamente observáveis nas perfurações ultrassônicas. Isso se opõe às perfurações convencionais onde a formação de rebarbas está presente, principalmente do lado de saída da ferramenta. Por isso, a técnica de perfuração ultrassônica está bastante relacionada à engenharia de precisão, sendo usada em micro perfurações (ZHANG et al 2011).

Há alguns ensaios de perfuração, semelhantes aos feitos neste trabalho, porém com materiais de uso aeronáutico, ao invés de discos de alumínio. Nesses estudos a perfuração de discos de super ligas de níquel (Inconel 738-LC), também apresentou bom acabamento sem rebarbas (AZARHOUSHANG et al 2007).

Também analisamos nos ensaios os tipos de cavacos de cada operação. Dos estudos de usinagem de metais, sabe-se que longos fios de cavaco exercem tensões na ferramenta, desgastando-a ou até mesmo quebrando-a. Por isso, brocas modernas apresentam orifícios para facilitar a saída e quebra do cavaco (FERRARESI, 1969). Assim é muito importante técnicas que facilitem a quebra do cavaco, ou seja, a redução do coeficiente volumétrico do cavaco. Este coeficiente, representado por w , expressa a relação entre o volume total ocupado pelo cavaco V_e e o volume correspondente a massa do cavaco V_p . O coeficiente é calculado por $w = V_e/V_p$ e quanto menor essa relação, menor será o tamanho do cavaco (FERRARESI, 1969).

Além do bom acabamento proporcionado na peça a perfuração ultrassônica também contribuiu com a redução do coeficiente volumétrico do cavaco, melhorando o processo, evitando excessiva impregnação de cavaco na broca e consequentemente melhorando o processo.

8.2.2 PERFURAÇÃO DE ROCHAS

Os ensaios foram realizados a uma baixa velocidade de rotação, usando um motor de corrente contínua de baixo torque. Na tentativa de perfuração por meios convencionais, sem ultrassom, a broca apenas provocou uma endentação superficial na peça não a perfurando. De fato, furadeiras convencionais de perfuração de rochas demandam elevado torque rotativo e submetem a broca a altas cargas axiais (BAR-COHEN et al 2008). Torna-se, portanto coerente concluir que sob essas condições de ensaios a baixa rotação e baixas forças axiais no contato da broca com a rocha não haveria perfuração.

Por outro lado, a aplicação de ultrassom, nessas mesmas condições de ensaio, garantiu a perfuração das rochas com rapidez e bom acabamento. Isso enfatiza a eficiência das perfurações auxiliadas por ultrassom, não exigindo torques excessivos entre a broca e a rocha para completa perfuração.

Nos ensaios com o mandril escalonado o tempo de perfuração foi menor. Isso está coerente com a teoria de amplificadores mecânicos em transdutores ultrassônicos de potência, pois o escalonamento amplificou a amplitude do movimento da broca e, por conseguinte, em um mesmo ciclo, perfurava distâncias maiores que o mandril simples.

9 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

9.1 ASPECTOS DE MODELAGEM

As expressões matemáticas do MMC podem ser acopladas em equações diferenciais de osciladores mecânicos. Estudos de mecânica das rochas e seus modelos matemáticos, interfaceando com as equações do MMC, podem auxiliar no entendimento do fenômeno de perfuração ultrassônico de elementos rochosos.

Há também alternativas em considerar a interação broca com a peça como um problema de mecânica do impacto, reduzindo esta parte da modelagem como um oscilador não linear de impacto (BLAZEJCZYK-OKOLEWSKA et al 1996).

No MEF, há também possibilidades de simular interações da broca com algum elemento com propriedades compatíveis com rochas. Entretanto, a modelagem desses elementos exigirá bastante conhecimento da mecânica de rochas e caracterização de suas propriedades como também simulações pelo MEF com impacto.

Os materiais piezelétricos têm grande número de constantes e propriedades. Eventuais erros nos valores dessas propriedades podem resultar em simulações sem perfeita sintonia com os valores experimentais. Assim, trabalhos de caracterização dos elementos do transdutor e simulações com ajustes otimizados das propriedades (PEREZ et al 2010) tornarão o modelo mais realista.

9.2 ASPECTOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios de perfuração foram feitos com brocas de 4 mm de diâmetro, e o projeto do mandril considerou como hipótese a broca como uma massa com parâmetros concentrados. Entretanto, para diâmetros maiores essa hipótese se torna falsa, pois a haste da broca constitui elemento concentrador de ondas ultrassônicas. Assim, propõem-se projetos em que a broca seja considerada uma extensão amplificadora do mandril, além de ensaios de perfurações com diâmetros maiores são boas motivações de trabalhos futuros.

Há também projetos alternativos de furadeiras ultrassônicas que não se preocupam detalhadamente com a broca como ressonador, mas sim com a percussão de uma massa livre oscilando via ultrassom e impactando uma broca. A construção de protótipos seguindo essa diferente concepção de projeto pode facilitar o entendimento do fenômeno de perfuração ultrassônica além de possibilitar comparações com a perspectiva tradicional de projeto para furadeiras ultrassônicas (BAO et al., 2003) (BAR-COHEN et al., 2008).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADITHAN, M.; VENKATESH, V. C.; Parameter Influence on Tool Wear in Ultrasonic Drilling. *Tribology International*, p. 260-264, 1974.
- ALEXANDER, W., Principles and applications of magnetostriction. *Electronics and Power*, p. 186-191, 1966.
- ANDRADE, M. A. B.; ALVAREZ, N. P.; BUIOCHI, F.; NEGREIRA, C.; ADAMOWSKI, J. C. . Analysis of 1-3 Piezocomposite and Homogeneous Piezoelectric Rings for Power Ultrasonic Transducers. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (Impresso)*, v. 31, p. 312-318, 2009.
- ANDRADE, M. A. B.; PEREZ, N.; BUIOCHI, F.; ADAMOWSKI, J. C.. Finite Element Analysis and Optimization of a Single-axis Acoustic Levitator. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 57, p. 469-479, 2010a.
- ANSYS, ANSYS Tutorials Release 8.0, ANSYS INC.
- ARNOLD, F. J.; MÜHLEN, S. S., The Mechanical Pre-stressing in Ultrasonic Piezotransducers. *Ultrasonics*, v. 39, p. 7-11, 2001.
- ASTASHEV, V.K.; BABITSKY, V.I.; Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process. *Ultrasonics*, v.36, p. 89-96, 1998.
- AZARHOUSHANG, B.; AKBARI, J., 2007, “Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.47, p. 1027-1033
- BABITSKY, V. I.; ASTASHEV, V.K.; MEADOWS, A.. Vibration excitation and energy transfer during ultrasonically assisted drilling. *Journal of sound and vibration*, v. 308, p. 805-814, 2007.

BALAMUTH, L., Method of Abradin, British Patent 602 801.

BAO, X.; BAR-COHEN, Y.; CHANG, Z.; DOLGIN, P.; SHERRIT, S.; PAL, D.; Du, S.; Peterson, T., 2003, “ Modeling and Computer Simulation of Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC)” IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 50, n. 9, pp. 1147-1159.

BAR-COHEN, Y .; STROESCU, S., BADESCU, M., 2008, “Rotary hammer ultrasonic/sonic drill system”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 602-607.

BATHE, K. J., 1982, “Finite Element Procedures in Engineering Analysis”, Prentice-Hall.

BLAZEJCZYK-OKOLEWSKA, B.; KAPITANIAK, T., 1996, “Dynamics of Impact Oscillator with Dry Friction”, Chaos, Solutions and Fractals, v.7, p.1455-1459

BO FU.; 2005 “Piezoelectric Actuator Design via Multiobjective Optimization Methods”

DURAN, P.; MOURE, C., 1986, “Piezoelectric Ceramics”, Materials Chemistry and Physics, v.15, p.193-211

ENSMINGER, D.; STULEN, F.B., 2009, “Ultrasonics - Data, Equations, and Their Practical Uses”, CRC Press.

FERRARESI, D .,1969, “Fundamentos da Usinagem dos Metais ”, Editora Edgard Bluecher.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T., 2007, “A First Course in Finite Elements”, John Wiley.

GALLEGO, J. A.; “Piezoelectric Ceramics and Ultrasonic Transducers”. J.Phys. E: Sci.Instrum., 22, pp. 804-816, 1989.

GÓMEZ, E.S., 2010, “Piezoelectric Ceramics”, Sciyo : Croatia.

- GROTE, K.H.; FELDHUSEN, J ., 2007, “Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau ”, Springer-Verlag : Berlin.
- HANSEN, H. H.; “Optimal design of an ultrasonic transducer”. Structural Optimization., 14, pp. 150-157, 1997.
- HASELKORN, M.; PEI, Z. J.; PRABHAKAR, D.; FERREIRA, P. M.. A mechanistic approach to the prediction of material removal rates in rotary ultrasonic machining. Journal of Engineering for Industry, v.117, p. 117-151, 1995.
- HEYWANG, W.; LUBITZ, K.; WERSING, W., 2008, “Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology”, Springer Verlag : Berlin.
- IULA, A. M.; LAMBERTI, N.; PAPPALARDO, M., “An Approximated 3D Model of Cylinder-Shapped Piezoceramic Elements for Transducer Design”. IEEE Transactions on ultrasonics, vol. 45, p. 1056-1064, 1998.
- IULA, A.; VAZQUEZ, F.; PAPPALARDO, M.; GALLEGGO, J. A., 2002, “Finite Element Three-Dimensional Analysis of the Vibrational Behaviour of the Langevin-Type Transducer”, Ultrasonics, v.40, pp. 513-517.
- JANSCHKE, KLAUS., 2010, “Systementwurf Mechatronischer Systeme – Methoden, Modelle, Konzepte”, Springer Verlag: Berlin.
- JOHNSON, D.E.; HILBURN, J.L.; JOHNSON, J.R., 2000, “Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos”, LTC.
- KARASIK, A.Y.; ZUBOV, V.A., 1995, “Laser Interferometry Principles”, Mir Publishers.
- KIM, J.; VARADAN, V.V.; VARADAN, V.K., 1997, “Finite Element Modelling of Structures Including Piezoelectric Active Devices”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, v.40, p.817-832.

- KRASZEWSKI, R.J., SIGELMANN, R.A., HERBERTZ, J., “Electrical multiport transfer functions and efficiency in layered media of piezoelectric and/or nonpiezoelectric materials”. J. Acoust. Soc. Am., v. 90, n.5, p. 2769-74, nov. 1991.
- KRIVTSOV, A. M.; WIERCIGROCH, M., “Penetration rate prediction for percussive drilling via dry friction model”. Chaos, Solitons and Fractals., 11, pp. 2479-2485, 2000.
- LERCH, R., 1990, “Simulation of Piezoelectric Devices by Two-and-Three-Dimensional Finite Elements”. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control. v.37, n.2, pp. 233-247.
- MADENCI, E.; GUVEN, I., 2006, “The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS”, Springer Science : USA.
- MOAVENI, SAEED., 1999, “Finite Element Analysis: Theory and Applications with ANSYS”, Prentice Hall : USA.
- MOULSON, A. J.; HERBERT, J.M., 2003, “Electroceramics”, Inglaterra: John Wiley and Sons.
- NAKASONE, Y.; YOSHIMOTO, S.; STOLARSKI, T. A., 2006, “Engineering Analysis with ANSYS Software”, Elsevier Butterworth-Heinemann.
- NEPPIRAS, E.A.. Macrosonics in industry – 1. Introduction. Ultrasonics, p. 9-13, 1972.
- NEUGEBAUER, R.; STOLL, A.. Ultrasonic application in drilling. Journal of Materials Processing Technology, v.149, p. 633-639, 2004.
- NEUMANN, N.; SATTEL, T., 2007, “Set-oriented numerical analysis of a vibro-impact drilling system with several contact interfaces”, Journal of Sound and Vibration, vol. 308, pp. 831-844.
- NEUMANN, N.; SATTEL, T.; WALLASCHEK, J., 2007, “On set-oriented numerical methods for global analysis of non-smooth mechanical systems”, Journal of vibration and control, vol. 13, pp. 1393-1405.

- NIEMANN, G ., 2002, “Elementos de Máquinas – Vol. I”, Edgard Blucher.
- OSTASEVICIUS, V.; UBARTAS, M.; GAIDYS, R.; JURENAS, V.; SAMPER, S.;
 DAUKSEVICIUS, R., 2012, “Numerical – experimental identification of the most effective dynamic operation mode of a vibration drilling tool for improved cutting performance”, *Journal of Sound and Vibration*, v.331, p.5175-5190
- OTON, L.S.C., 2012, “Petróleo – Noções sobre Exploração, Perfuração, Produção e Microbiologia”, Interciencia.
- PEI, Z.J.; PRABHAKAR, D.; FERREIRA, P.M., 1995, “A Mechanistic Approach to the Prediction of Material Removal Rates in Rotary Ultrasonic Machining”, *Journal of Engineering for Industry*, vol. 117, p.142-151
- PEREZ, N.; ANDRADE, M. A. B.; BUIOCHI, F.; ADAMOWSKI, J. C., 2010, “Identification of Elastic, Dielectric, and Piezoelectric Constants in Piezoceramic Disks”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 57, n. 12, pp. 2772-2783.
- POTTHAST, C.; EISSELER, R.; KLOTZ, D.; WALLASCHEK, J.; HEISEL, U..
 Piezoelectric actuator design for ultrasonically assisted deep hole drilling. *Journal of Electroceramics*, v.20, p. 187-192, 2008.
- POTTHAST, C.; TWIEFEL, J.; WALLASCHEK, J.. Modelling approaches for an ultrasonic percussion drill. *Journal of Sound and Vibration*, v.308, p. 405-417, 2007.
- SHUYU, L., 2004, “Optimization of the performance of the sandwich piezoelectric ultrasonic transducer”, *Journal of Acoustic*, vol. 115, pp. 182-186.
- STEMMER, C.E., 2005, “Ferramentas de Corte vol II – Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscar, Fresas, Brochas, Rebolo, Abrasivos”, Editora UFSC.
- THOE, T. B.; ASPINWALL, D. K.; WISE, M.L.H., 1998, “Review on Ultrasonic Machining”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, n. 4, pp. 239-255.

- THOMAS, J. E., 2004, “Fundamentos de Engenharia de Petróleo”, Editora Interciencia.
- TIMOSHENKO, S., 1937, “Vibration problems in engineering”, D.Van Nostrand Company:USA.
- TZOU, H.S.; TSENG, C.I., 1990, “Distributed Piezoelectric Sensor/Actuator Design for Dynamic Measurement/Control of Distributed Parameter Systems: A Piezoelectric Finite Element Approach”, Journal of Sound and Vibration, v.138, p.17-34
- UCHINO, K.; GINIEWICZ J.R., 2003, “Micromechatronics”, Marcel Dekker : USA.
- WIERCIGROCH, M.; WOJEWODA, J.; KRIVTSOV, A.M., 2005, “Dynamics of ultrasonic percussive drilling of hard rocks”, Journal of Sound and Vibration, v.280, p.739-757
- ZHANG, Z.; BABITSKY V.I ., Finite element modeling of a micro-drill and experiments on high speed ultrasonically assisted micro-drilling Journal of Sound and Vibration v.330, p.2124- 2137, 2011.
- ZHANG, Q.M.; ZHAO, J., 1999, “Electromechanical Properties of Lead Zirconate Titanate Piezoceramics Under the Influence of Mechanical Stresses”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, v.46, n.6, pp.1518-1526.

ANEXOS

ANEXO A: PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

As tabelas A₁ e A₂ indicam as propriedades físicas dos elementos usados na construção dos transdutores. Esses mesmos valores também foram usados como parâmetros de entrada nos modelos numéricos (método das matrizes em cadeia e método dos elementos finitos - ANSYS).

Tabela A₁: Propriedades - PZT8

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade (ρ)	7749	Kg/m ³
Velocidade de propagação	3820	m/s
Constante dielétrica ($\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$)	582	-
Constante piezelétrica e_{33}	13,8	C/m ²
Constante piezelétrica e_{31}	-4,0	C/m ²
Constante piezelétrica e_{15}	10,4	C/m ²
Rigidez c_{11}	13,7x10 ¹⁰	N/m ²
Rigidez c_{12}	6,97x10 ¹⁰	N/m ²
Rigidez c_{13}	7,16x10 ¹⁰	N/m ²
Rigidez c_{33}	12,4x10 ¹⁰	N/m ²
Rigidez c_{44}	3,4x10 ¹⁰	N/m ²
Rigidez c_{66}	3,36x10 ¹⁰	N/m ²
Fator de qualidade mecânico Q_m	500	-
Espessura da cerâmica - ℓ	5,00	mm
Raio externo da cerâmica	25	mm
Raio interno da cerâmica	7,5	mm
Raio externo da cerâmica	25	mm
Raio interno da cerâmica	7,5	mm

Tabela A₂: Propriedades Aço – 4340

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade (ρ)	7846	Kg/m ³
Poisson	0,29	
Módulo de Elasticidade	208	GPa
Velocidade de propagação ($\sqrt{Y/\rho}$)	5152	m/s

Tabela A₃: Propriedades do Aço Rápido

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade (ρ)	8160	Kg/m ³
Poisson	0.28	
Módulo de Elasticidade	200	GPa
Velocidade de propagação ($\sqrt{Y/\rho}$)	4950	m/s

ANEXO B: MÉTODO DAS MATRIZES EM CADEIA

B1.1 – EQUACIONAMENTO DE UMA CERÂMICA PIEZELÉTRICA:

Nas equações (3.1.23), (3.1.24) e (3.1.25), apresentadas na seção 3.1, algumas expressões matemáticas são substituídas pelas letras A (1.4b), B (1.5b), C (1.6b) e D (1.7b) resultando:

$$F_1 = Av_1 + Bv_2 + CI, \quad (1.1b)$$

$$F_2 = Bv_1 + Av_2 + CI, \quad (1.2b)$$

$$V = Cv_1 + Cv_2 + DI, \quad (1.3b)$$

Onde:

$$A = \frac{Z_A}{j \tan(kl)}, \quad (1.4b)$$

$$B = \frac{Z_A}{j \sin(kl)}, \quad (1.5b)$$

$$C = \frac{e_{33}}{j\omega\epsilon_{33}}, \quad (1.6b)$$

$$D = \frac{1}{j\omega C_0}. \quad (1.7b)$$

Manipulando as equações (1.1b), (1.2b) e (1.3b) têm-se v_2 , F_2 e I como variáveis dependentes, têm-se v_2 , F_2 e I como variáveis de saída e v_1 , F_1 e V como variáveis de entrada:

$$v_2 = A_{11}v_1 + A_{12}F_1 + A_{13}I \quad (1.8b)$$

$$F_2 = A_{21}v_1 + A_{22}F_1 + A_{23}I \quad (1.9b)$$

$$V = A_{31}v_1 + A_{32}F_1 + A_{33}I \quad (1.10b)$$

Onde:

$$A_{11} = \frac{AD - C^2}{BD - C^2} \quad (1.11b)$$

$$A_{12} = \frac{-D}{BD - C^2} \quad (1.12b)$$

$$A_{13} = \frac{C}{BD - C^2} \quad (1.13b)$$

$$A_{21} = \left[\frac{BD - C^2}{D} - \frac{(AD - C^2)^2}{D(BD - C^2)} \right] \quad (1.14b)$$

$$A_{22} = \frac{AD - C^2}{BD - C^2} \quad (1.15b)$$

$$A_{23} = \frac{C}{D} \left[1 - \left(\frac{AD - C^2}{BD - C^2} \right) \right] \quad (1.16b)$$

$$A_{31} = \frac{ADC - C^3}{BD^2 - DC^2} - \frac{C}{D} \quad (1.17b)$$

$$A_{32} = \frac{-C}{BD - C^2} \quad (1.18b)$$

$$A_{33} = \frac{1}{D} + \frac{C^2}{BD^2 - C^2} \quad (1.19b)$$

Resultando na seguinte matriz:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (1.20b)$$

B1.2 – ASSOCIAÇÃO DE 2 CERÂMICAS PIEZELÉTRICAS EM PARALELO:

A figura 1b representa duas cerâmicas ligadas em paralelo. A equação matricial que representa a cerâmica C_1 é dado por:

Figura 1b – Representação simbólica de duas cerâmicas em paralelo.

$$\begin{pmatrix} v_2^{C_1} \\ F_2^{C_1} \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (1.21b)$$

Já para a cerâmica C_2 tem-se:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1^{C_2} \\ F_1^{C_2} \\ V \end{pmatrix} \quad (1.22b)$$

Como as cerâmicas na pilha apresentam as mesmas geometrias e propriedades, as matrizes 3x3 de (1.21b) e (1.22b) possuem os mesmos coeficientes. Onde $v_2^{C_1}$ e $F_2^{C_1}$ são, respectivamente, a velocidade e a força de saída da cerâmica C_1 e estão aplicadas na entrada da cerâmica C_2 como $v_1^{C_2}$ e $F_1^{C_2}$. Já v_1 e F_1 correspondem à entrada da pilha

de cerâmicas e v_2 e F_2 à saída da pilha. As cerâmicas da pilha estão em paralelo, logo todas estão submetidas à mesma tensão elétrica V . A corrente total I da pilha corresponde a soma de cada corrente circulando em cada cerâmica, ou seja, $I = I_1 + I_2$.

Os sistemas de equações para a cerâmica C_1 é:

$$\begin{cases} v_2^{C_1} = A_{11}v_1 + A_{12}F_1 + A_{13}V, & (1.23b) \\ F_2^{C_1} = A_{21}v_1 + A_{22}F_1 + A_{23}V, & (1.24b) \\ I_1 = A_{31}v_1 + A_{32}F_1 + A_{33}V, & (1.25b) \end{cases}$$

e para a cerâmica C_2 é:

$$\begin{cases} v_2 = A_{11}v_1^{C_2} + A_{12}F_1^{C_2} + A_{13}V, & (1.26b) \\ F_2 = A_{21}v_1^{C_2} + A_{22}F_1^{C_2} + A_{23}V, & (1.27b) \\ I_2 = A_{31}v_1^{C_2} + A_{32}F_1^{C_2} + A_{33}V, & (1.28b) \end{cases}$$

Na interface entre as cerâmicas, têm-se $v_2^{C_1} = v_1^{C_2}$, $F_2^{C_1} = F_1^{C_2}$ e $I = I_1 + I_2$. A

substituição nas equações (1.23b) e (1.24b) em (1.26b), (1.27b) e (1.28b) resulta em:

$$\begin{aligned} v_2 &= A_{11}(A_{11}v_1 + A_{12}F_1 + A_{13}V) + A_{12}(A_{21}v_1 + A_{22}F_1 + A_{23}V) + A_{13}V = \\ &= (A_{11}A_{11} + A_{12}A_{21})v_1 + (A_{11}A_{12} + A_{12}A_{22})F_1 + (A_{11}A_{13} + A_{12}A_{23} + A_{13})V \end{aligned} \quad (1.29b)$$

$$\begin{aligned} F_2 &= A_{21}^{C_2}(A_{11}^{C_1}v_1 + A_{12}^{C_1}F_1 + A_{13}^{C_1}V) + A_{22}^{C_2}(A_{21}^{C_1}v_1 + A_{22}^{C_1}F_1 + A_{23}^{C_1}V) + A_{23}^{C_2}V = \\ &= (A_{21}^{C_2}A_{11}^{C_1} + A_{22}^{C_2}A_{21}^{C_1})v_1 + (A_{21}^{C_2}A_{12}^{C_1} + A_{22}^{C_2}A_{22}^{C_1})F_1 + (A_{21}^{C_2}A_{13}^{C_1} + A_{22}^{C_2}A_{23}^{C_1} + A_{23}^{C_2})V \end{aligned} \quad (1.30b)$$

$$I = (A_{31}^{C_1} + A_{31}^{C_2} A_{11}^{C_1} + A_{32}^{C_2} A_{21}^{C_1})v_1 + (A_{32}^{C_1} + A_{31}^{C_2} A_{12}^{C_1} + A_{32}^{C_2} A_{22}^{C_1})F_1 + (A_{33}^{C_1} + A_{31}^{C_2} A_{13}^{C_1} + A_{32}^{C_2} A_{23}^{C_1} + A_{33}^{C_2})V \quad (1.31b)$$

A matriz resultante das duas cerâmicas associadas em paralelo é:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11}^{C_1} A_{11}^{C_1} + A_{12}^{C_1} A_{21}^{C_1} & A_{11}^{C_1} A_{12}^{C_1} + A_{12}^{C_1} A_{22}^{C_1} & A_{11}^{C_1} A_{13}^{C_1} + A_{12}^{C_1} A_{23}^{C_1} + A_{13}^{C_1} \\ A_{21}^{C_1} A_{11}^{C_1} + A_{22}^{C_1} A_{21}^{C_1} & A_{21}^{C_1} A_{12}^{C_1} + A_{22}^{C_1} A_{22}^{C_1} & A_{21}^{C_1} A_{13}^{C_1} + A_{22}^{C_1} A_{23}^{C_1} + A_{23}^{C_1} \\ A_{31}^{C_1} + A_{31}^{C_2} A_{11}^{C_1} + A_{32}^{C_2} A_{21}^{C_1} & A_{32}^{C_1} + A_{31}^{C_2} A_{12}^{C_1} + A_{32}^{C_2} A_{22}^{C_1} & A_{33}^{C_1} + A_{31}^{C_2} A_{13}^{C_1} + A_{32}^{C_2} A_{23}^{C_1} + A_{33}^{C_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (1.32b)$$

Onde:

$$\begin{pmatrix} A_{11}^{C_2} & A_{12}^{C_2} \\ A_{21}^{C_2} & A_{22}^{C_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{11}^{C_1} & A_{12}^{C_1} \\ A_{21}^{C_1} & A_{22}^{C_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11}^{C_2} A_{11}^{C_1} + A_{12}^{C_2} A_{21}^{C_1} & A_{11}^{C_2} A_{12}^{C_1} + A_{12}^{C_2} A_{22}^{C_1} \\ A_{21}^{C_2} A_{11}^{C_1} + A_{22}^{C_2} A_{21}^{C_1} & A_{21}^{C_2} A_{12}^{C_1} + A_{22}^{C_2} A_{22}^{C_1} \end{pmatrix} \quad (1.33b)$$

$$\begin{pmatrix} A_{11}^{C_2} & A_{12}^{C_2} \\ A_{21}^{C_2} & A_{22}^{C_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{13}^{C_1} \\ A_{23}^{C_1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_{13}^{C_2} \\ A_{23}^{C_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11}^{C_2} A_{13}^{C_1} + A_{12}^{C_2} A_{23}^{C_1} + A_{13}^{C_2} \\ A_{21}^{C_2} A_{13}^{C_1} + A_{22}^{C_2} A_{23}^{C_1} + A_{23}^{C_2} \end{pmatrix} \quad (1.34b)$$

$$\begin{pmatrix} A_{31}^{C_1} & A_{32}^{C_1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_{31}^{C_2} & A_{32}^{C_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{11}^{C_1} & A_{12}^{C_1} \\ A_{21}^{C_1} & A_{22}^{C_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{31}^{C_1} + A_{31}^{C_2} A_{11}^{C_1} + A_{32}^{C_2} A_{21}^{C_1} & A_{32}^{C_1} + A_{31}^{C_2} A_{12}^{C_1} + A_{32}^{C_2} A_{22}^{C_1} \end{pmatrix} \quad (1.35b)$$

$$A_{33}^{C_1} + A_{33}^{C_2} + \begin{pmatrix} A_{31}^{C_2} & A_{32}^{C_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{13}^{C_1} \\ A_{23}^{C_1} \end{pmatrix} = A_{33}^{C_1} + A_{31}^{C_2} A_{13}^{C_1} + A_{32}^{C_2} A_{23}^{C_1} + A_{33}^{C_2} \quad (1.36b)$$

Que pode ser reduzido a:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{2 \times 2}^{Pm} A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 2}^{Pm} A_{2 \times 1}^{Pem} + A_{2 \times 1}^{Pem} \\ A_{1 \times 2}^{Pme} + A_{1 \times 2}^{Pme} A_{2 \times 2}^{Pm} & 2A_{1 \times 2}^{Pe} + A_{1 \times 2}^{Pme} A_{2 \times 1}^{Pem} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (1.37b)$$

B1.3 – ASSOCIAÇÃO DE N CERÂMICAS PIEZELÉTRICAS EM PARALELO:

Para facilitar a prova por indução da equação matricial correspondendo a uma associação de N cerâmicas em paralelo, a notação vetorial (1.38b) representa o vetor velocidade e força de saída e (1.39b) representa o vetor velocidade e força de entrada. Equacionaremos o problema com 3 cerâmicas em paralelo pois torna-se notável a formação de sequências entre alguns elementos matriciais e, logo em seguida, generalizaremos as sequências para uma associação de N cerâmicas. Para efeitos de simplicidade não apresentaremos aqui provas desgastantes com sequências de mais elementos, até o N-éssimo e (N+1)-éssimo elemento. Com 3 elementos torna-se perceptível a formação de uma sequência, estendendo-a para um caso geral.

$$X_2 = \begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (1.38b)$$

$$X_1 = \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \end{pmatrix} \quad (1.39b)$$

Com essa representação, tem-se para a cerâmica C_1 da equação (1.21b)

$$\begin{pmatrix} X_2^{C_1} \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 1}^{Pem} \\ A_{1 \times 2}^{Pme} & A^{Pe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (1.40b)$$

para a cerâmica C_2 da equação (1.22b)

$$\begin{pmatrix} X_2^{C_2} \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 1}^{Pem} \\ A_{1 \times 2}^{Pme} & A^{Pe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1^{C_2} \\ V \end{pmatrix} \quad (1.41b)$$

e para uma terceira cerâmica C_3 :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{2 \times 2}^{Pm} & A_{2 \times 1}^{Pem} \\ A_{1 \times 2}^{Pme} & A^{Pe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1^{C_3} \\ V \end{pmatrix} \quad (1.42b)$$

Nas ligações entre as cerâmicas, conforme ilustra a figura 2b, têm-se $v_2^{C_1} = v_1^{C_2}$,

$F_2^{C_1} = F_1^{C_2}$ na ligação entre as cerâmicas C_1 e C_2 , $v_2^{C_1} = v_1^{C_2}$ e $F_2^{C_1} = F_1^{C_2}$ entre as

cerâmicas C_2 e C_3 ou, simplesmente, $X_2^{C_1} = X_1^{C_2}$ e $X_2^{C_2} = X_1^{C_3}$.

Figura 2b – Representação simbólica de três cerâmicas em paralelo.

Após a manipulação algébrica entre as equações (1.40b), (1.41b) e (1.42b), a matriz final das três cerâmicas em paralelo resulta em:

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{2x2}^{TPm} & A_{2x1}^{TPem} \\ A_{1x2}^{TPme} & A^{TPe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (1.43b)$$

Onde:

$$A_{2x2}^{TPm} = A^{Pm} A^{Pm} A^{Pm} \quad (1.44b)$$

$$A_{2x2}^{TPem} = A^{Pm} A^{Pm} A^{Pem} + A^{Pm} A^{Pem} + A^{Pem} \quad (1.45b)$$

$$A_{1x2}^{TPme} = A^{Pme} + A^{Pme} A^{Pm} + A^{Pme} A^{Pm} A^{Pm} \quad (1.46b)$$

$$A_{1x2}^{TPe} = A^{Pe} + A^{Pme} A^{Pem} + A^{Pe} + A^{Pme} A^{Pm} A^{Pem} + A^{Pme} A^{Pem} + A^{Pe} \quad (1.47b)$$

Repetindo os mesmos procedimentos para uma pilha com N cerâmicas, determina-se a seguinte sequência por indução:

$$A_{2x2}^{TPm} = (A^{Pm})^N \quad (1.48b)$$

$$A_{2x2}^{TPem} = \sum_{i=0}^{N-1} (A^{Pm})^i A^{Pem} \quad (1.49b)$$

$$A_{1x2}^{TPme} = \sum_{i=1}^N A^{Pme} (A^{Pm})^{i-1} \quad (1.50b)$$

$$A_{1x2}^{Tpe} = A^{Pe} + \sum_{i=2}^N (A^{Pe} + \sum_{r=0}^{i-2} A^{Pme} (A^{Pm})^r A^{Pem}) \quad (1.51b)$$

B2 – TRANSDUTOR LANGEVIN:

A figura (3b) apresenta os elementos mecânicos e eletromecânicos interconectados como em um típico transdutor Langevin.

Figura 3b – Representação simbólica do transdutor Langevin.

O elemento C corresponde a pilha de cerâmicas piezelétricas e os elementos M_1 correspondem as massas traseira e dianteira, respectivamente.

A matriz das cerâmicas é representada por:

$$\begin{pmatrix} v_2^C \\ F_2^C \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1^C \\ F_1^C \\ V \end{pmatrix} \quad (1.52b)$$

e formando o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} v_2^C = C_{11}v_1^C + C_{12}F_1^C + C_{13}V, & (1.53b) \\ F_2^C = C_{21}v_1^C + C_{22}F_1^C + C_{23}V, & (1.54b) \\ I = C_{31}v_1^C + C_{32}F_1^C + C_{33}V, & (1.55b) \end{cases}$$

A matriz da massa traseira é representada por;

$$\begin{pmatrix} v_2^{M_1} \\ F_2^{M_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{1\ 11} & M_{1\ 12} \\ M_{1\ 21} & M_{1\ 22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \end{pmatrix} \quad (1.56b)$$

formando o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} v_2^{M_1} = M_{1\ 11}v_1 + M_{1\ 12}F_1 & (1.57b) \\ F_2^{M_1} = M_{1\ 21}v_1 + M_{1\ 22}F_1 & (1.58b) \end{cases}$$

A matriz da massa dianteira às cerâmicas é representada por;

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{211} & M_{212} \\ M_{221} & M_{222} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1^{M_2} \\ F_1^{M_2} \end{pmatrix} \quad , \quad (1.57b)$$

formando o respectivo sistema de equação:

$$\begin{cases} v_2 = M_{211} v_1^{M_2} + M_{212} F_1^{M_2} & (1.58b) \\ F_2 = M_{221} v_1^{M_2} + M_{222} F_1^{M_2} & (1.59b) \end{cases}$$

Conforme mostra a figura 3b, têm-se as seguintes condições $v_2^{M_1} = v_1^C$,

$F_2^{M_1} = F_1^C$ na interface entre a massa traseira e a pilha de cerâmicas. A substituição

de (1.57b) e (1.58b) em (1.53b), (1.54b) e (1.55b) resulta em:

$$v_2^C = C_{11}(M_{111} v_1 + M_{112} F_1) + C_{12}(M_{121} v_1 + M_{122} F_1) + C_{13}V \quad (1.60b)$$

$$F_2^C = C_{21}(M_{111} v_1 + M_{112} F_1) + C_{22}(M_{121} v_1 + M_{122} F_1) + C_{23}V \quad (1.61b)$$

$$I = C_{31}(M_{111} v_1 + M_{112} F_1) + C_{32}(M_{121} v_1 + M_{122} F_1) + C_{33}V \quad (1.62b)$$

Na interface entre a pilha de cerâmicas e a massa dianteira, substituindo

$v_2^C = v_1^{M_2}$ e $F_2^C = F_1^{M_2}$ em (1.58b) e (1.59b) , resulta em:

$$\begin{aligned}
v_2 = & [M_{211}(C_{11}M_{111} + C_{12}M_{121}) + M_{212}(C_{21}M_{111} + C_{22}M_{121})]v_1 + \\
& + [M_{211}(C_{11}M_{112} + C_{12}M_{122}) + M_{212}(C_{21}M_{112} + C_{22}M_{122})]F_1 + (M_{211}C_{13} + M_{212}C_{23})V]
\end{aligned}
\tag{1.63b}$$

$$\begin{aligned}
F_2 = & [M_{221}(C_{11}M_{111} + C_{12}M_{121}) + M_{222}(C_{21}M_{111} + C_{22}M_{121})]v_1 \\
& + [M_{221}(C_{11}M_{112} + C_{12}M_{122}) + M_{222}(C_{21}M_{112} + C_{22}M_{122})]F_1 + (M_{221}C_{13} + M_{222}C_{23})V]
\end{aligned}
\tag{1.64b}$$

$$I = (C_{31}M_{111} + C_{32}M_{121})v_1 + (C_{31}M_{112} + C_{32}M_{122})F_1 + C_{33}V
\tag{1.65b}$$

A matriz resultante do transdutor Langevin é:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{211} & M_{212} \\ M_{221} & M_{222} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{111} & M_{112} \\ M_{121} & M_{122} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} M_{211} & M_{212} \\ M_{221} & M_{222} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{13} \\ C_{23} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{111} & M_{112} \\ M_{121} & M_{122} \end{pmatrix} & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix}
\tag{1.66b}$$

Que na notação simplificada é expressa por:

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_2 C^{Pm} M_1 & M_2 C^{Pem} \\ C^{Pme} M_1 & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix}
\tag{1.67b}$$

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{311} & M_{312} \\ M_{321} & M_{322} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1^{M_3} \\ F_1^{M_3} \end{pmatrix} \quad (1.69b)$$

De maneira análoga às operações algébricas efetuadas anteriormente, temos:

$$\begin{pmatrix} v_2^{M_2} \\ F_2^{M_2} \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_3 M_2 C^{Pm} M_1 & M_3 M_2 C^{Pem} \\ C^{Pme} M_1 & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (1.70b)$$

Que representa a matriz total relacionando as entradas e as saídas para o transdutor completo com o amplificador mecânico.

B4 – TRANSDUTOR COM CARGA:

A partir da matriz MTB (3.50), da seção (3.5), representamos o transdutor completo com o amplificador mecânico e broca conectada a um elemento dotado de elasticidade e amortecimento (figura xx)

Figura 5b – Representação do transdutor completo com carga

Para representar a interação do impacto da broca com a rocha, vamos assumir simplifcadamente a rocha como um elemento visco-elástico de Kelvin-Voigt (POTTHAST, 2007). A rocha apresenta uma elasticidade de deformação dada pela constante K e um atrito viscoso B , conforme apresentado na figura (4.2.1).

A extremidade traseira do transdutor encontra-se livre, e em virtude disso $F_1 = 0$. A broca está em contato com a rocha, representada pelos elementos mecânicos K (elasticidade) e B (atrito). Tem-se, pelo princípio de D'Alembert:

$$F_2 = B\dot{u} + Ku, \quad (4.2.1)$$

onde u é o deslocamento harmônico da broca e é dado por:

$$u = Ae^{j(\omega t + \theta)} \quad (4.2.2)$$

e a velocidade da broca é representada por,

$$v_2 = \dot{u} = j\omega Ae^{j(\omega t + \theta)} = j\omega u \quad (4.2.3)$$

A equação (4.2.1) torna-se:

$$F_2 = \left(\frac{k}{j\omega} + B\right)v_2 \quad (4.2.4)$$

A equação matricial (4.2.5) representada abaixo,

$$\begin{pmatrix} v_2 \\ F_2 \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} MTB_{11} & MTB_{12} & MTB_{13} \\ MTB_{21} & MTB_{22} & MTB_{23} \\ MTB_{31} & MTB_{32} & MTB_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ F_1 \\ V \end{pmatrix} \quad (4.2.5)$$

considerando a suposição de $F_1 = 0$, resulta nos sistemas abaixo:

$$v_2 = MTB_{11}v_1 + MTB_{13}V \quad (4.2.6)$$

$$F_2 = MTB_{21}v_1 + MTB_{23}V \quad (4.2.7)$$

$$I = MTB_{31}v_1 + MTB_{33}V \quad (4.2.8)$$

Substituindo (4.2.4) em (4.2.7) resulta

$$v_1 = \left(\frac{K}{j\omega MTB_{21}} + \frac{B}{MTB_{21}} \right) v_2 - \frac{MTB_{23}}{MTB_{21}} V \quad (4.2.9)$$

Substituindo (4.2.9) em (4.2.6), tem-se:

$$v_2 = \left[\frac{j\omega(MTB_{23})(MTB_{11}) - j\omega(MTB_{21})(MTB_{13})}{j\omega B(MTB_{11}) - j\omega(MTB_{21}) + K(MTB_{11})} \right] V \quad (4.2.10)$$

De (4.2.10) em (4.2.9), e substituindo v_1 em (4.2.7) temos F_2 dado por:

$$F_2 = \frac{[(MTB_{23})(MTB_{11}) - (MTB_{21})(MTB_{13})](K + j\omega B)}{j\omega[B(MTB_{11}) - (MTB_{21})] + K(MTB_{11})} \quad (4.2.11)$$

Substituindo v_1 em (4.2.8), tem-se a razão V/I , que é a impedância elétrica Z abaixo:

$$Z = \frac{1}{\frac{MTB_{31}[(MTB_{23})(MTB_{11}) - (MTB_{21})(MTB_{13})](K + j\omega B)}{MTB_{21}[K(MTB_{11}) + j\omega(BMTB_{11} - MTB_{21})]} + \frac{MTB_{33}MTB_{21} - MTB_{31}MTB_{23}}{MTB_{21}}} \quad (4.2.12)$$

Com as equações (4.2.10) e (4.2.11) é possível determinar a potência mecânica do transdutor:

$$P_m = |F_2| |v_2| \cos \phi \quad (4.2.13)$$

Com os parâmetros das equações apresentadas, é possível estimar a potência necessária para perfurar determinado material. A apresentação do modelo visco-elástico nada mais é do que uma simplificação por oscilador linear de um problema mais complexo envolvendo de oscilador não-linear.

ANEXO C: ROTINA EM MATLAB – MMC

C1 – MANDRIL SIMPLES:

```
% *** CODIGO FONTE IMPLEMENTADO NO MATLAB

% *** Matrizes em Cadeia para Transdutores de Potência
% *** Implementado por Victor T.Tayra p/ defesa do MSc
% *** Langevin + Amplificador + Mandril Simples + Broca Aço Rapido
clear all
% *** Setup da frequência de varredura e configuração da discretização
***

fmax = 30e3; %freq. maxima em kHz
faux = 20e3; %freq inicial, var auxiliar
N = 1*10000; %numeros de pontos na discretização
interF = (fmax-faux)/N; %intervalo

% ***** Dados da Ceramica - PZT8 *****

rext= 25e-3; % cerâmica diametro externo 50 mm
rint= 7.5e-3; % Ceramica diametro interno 15 mm
espC = 5e-3; % espessura da Ceramica 5 mm
areaC = pi*(rext)^2-pi*(rint)^2; % area efetiva da ceramica
denC = 7700; % densidade da ceramica (kg/m^3)
vC=3820; % velocidade do som na ceramica
Qm = 600; % fator de qualidade mecanica
vCc = vC*sqrt(1+(j/Qm)); % velocidade complexa (ajustada
por Qm)
E33S = 582*8.85E-12; % Epsilon da ceramica - Cte
permissividade
Co = E33S*areaC/espC; % Capacitancia
ZC = denC*vCc*areaC; % impedancia da ceramica
piezeletrica
e33 = 13.8; % e33(C/m^2)

% ***** Dados do Aço (Sandwich - M1 e M2)
*****

raioAco = 27e-3; % raio dos cilindros de Aço para
Sandwich
Aaco = pi*(raioAco^2); % area contemplando o furo
p/parafuso.
espM1=53.5e-3; % espessura cilindro M1
espM2=53.5e-3 + 73e-3; % espessura cilindro M2 + Metade
do amplificador
vAl = 5152.43; % velocidade extensional do som no
Aço (m/s)
denAl = 7846.3; % densidade (kg/m^3)
vM1 = vAl*sqrt(1+(j/Qm)); % velocidade complexa

% ***** Dados do Aço (Para o Amplificador e Mandril)
*****

raco = 15.5e-3; % raio cilindros de Al ~ raio
ceramica.
Aaco3 = pi*(raco^2); % area contemplando o furo
p/parafuso.
espM3= 57e-3 + 123e-3; % espessura amplificador + mandril
```

```

% ***** Dados do Aço Rapido (Broca) *****
rbr = 2e-3; % raio cilindros da broca
Abr = pi*(rbr^2); % area broca
Lbr = 30e-3; % espessura cilindro da broca (m)
denbr = 8100;
vbr = 5152.43;
vM3 = vbr*sqrt(1+(j/600)); % velocidade complexa

% ***** Looping para construção das matrizes varrendo as frequências
*****

for I = 1:N
    faux = interF+faux;
    w = 2*pi*faux; % frequência angular
    F(I) = faux; % Vetor da frequência
    k = w/vCc;
    beta = k*espC;
    A = ZC/(j*tan(beta));
    B = ZC/(j*sin(beta));
    C = e33/(j*w*E33S);
    D = 1/(j*w*Co);
    A11 = (A*D - C^2)/(B*D - C^2); % Construcao da Matriz da
Ceramica
    A12 = -D/(B*D - C^2); % Matriz M com os termos
A11...A33
    A13 = C/(B*D - C^2);
    A21 = (B*D-C^2)/D - (A*D -C^2)^2/(D*(B*D - C^2));
    A22 = (A*D - C^2)/(B*D - C^2);
    A23 = (1 - (A*D - C^2)/(B*D - C^2))*(C/D);
    A31 = (A*D*C - C^3)/(B*D^2 - D*C^2) - C/D;
    A32 = -C/(B*D-C^2);
    A33 = 1/D + C^2/(B*D^2 - D*C^2);

    M = [A11 A12 A13; A21 A22 A23; A31 A32 A33]; % Matriz de 1
ceramica PZT8
    Apm = [A11 A12; A21 A22];
    Apem = [A13; A23]; % M = [Apm Apem;
Apme Ape]
    Apme = [A31 A32];
    Ape = A33;

    % Manipulação para pilha com 4 ceramicas PZT8
    Apsm = Apm^4;
    Apsem = Apem + Apm*Apem + (Apm^2)*Apem + (Apm^3)*Apem;
    Apsme = Apme + Apme*Apm + Apme*(Apm^2)+Apme*(Apm^3);
    Apse = 4*Ape + 2*Apme*Apem + 2*Apme*Apm*Apem + Apme*(Apm^2)*Apem;
    MC = [Apsm Apsem; Apsme Apse]; % Matriz MC da pilha com 4
ceramicas

    % Construcao da Matriz elementos M1 e M2
    ZM1 = vM1*denAl*Aaco; % impedancia do Aço
    beta1 = (w*espM1)/vM1;
    beta2 = (w*espM2)/vM1;

    B11 = cos(beta1); % Construcao da Matriz M1
    B12 = j*ZM1*sin(beta1);
    B21 = (j/ZM1)*sin(beta1);
    B22 = cos(beta1);
    C11 = cos(beta2); % Construcao da Matriz M2
    C12 = j*ZM1*sin(beta2);

```

```

C21 = (j/ZM1)*sin(beta2);
C22 = cos(beta2);

B = [B11 B12;B21 B22];          % Matriz - M1
M1 = B';

C = [C11 C12;C21 C22];          % Matriz - M2
M2 = C';

% Construcao da Matriz Amplificador
ZM3 = vM1*denAl*Aaco3; % impedancia do Aço do Mandril e
Amplificador
beta3 = (w*espM3)/vM1;
D11 = cos(beta3);
D12 =j*ZM3*sin(beta3);
D21 =(j/ZM3)*sin(beta3);
D22 = cos(beta3);

D = [D11 D12;D21 D22]; % Matriz Aço M3 amplificador + Mandril
M3 = D';

% Construcao da Matriz Broca
Zbr = vM3*denbr*Abr; % impedancia do Aço da Broca
betabr = (w*Lbr)/vM3;
E11 = cos(betabr);
E12 =j*Zbr*sin(betabr);
E21 =(j/Zbr)*sin(betabr);
E22 = cos(betabr);

E = [E11 E12;E21 E22]; % Matriz Aço Rapido - Broca
M4 = E';

% *** 4 ceramicas sanduichadas por dois cilindros de aluminio M1 e
M2 ***
Aptm = M2*Apsm*M1;
Aptem = M2*Apsem;
Aptme = Apsme*M1;
Apte = Apse;

% *** Acoplamento do amplificador mecanico M3 ***

AptmT = M3*Aptm;
AptemT = M3*Aptem;

% *** Matriz final do Transdutor com a Broca (M4) ***
MTt = [M4*AptmT M4*AptemT; Aptme Apte];

% *** Calculo das Admitancias ***
Yt(I) = MTt(3,3)- MTt(3,1)*MTt(2,3)/MTt(2,1); %
Admitancia TRANSDUTOR TOTAL
ut(I) = (1/(j*w))*(MTt(1,3)- MTt(1,1)*MTt(2,3)/MTt(2,1)); %
Deslocamento TRANSDUTOR TOTAL
end

Zt = 1./Yt; % Calculo da Impedância do Transdutor

```

```
% *** Plotar os graficos ***

figure(1)

semilogy(F*1e-3,abs(Zt));
title('TRANSDUTOR TOTAL');
xlabel('frequência (Hz)');
ylabel('Modulo - Impedancia Eletrica (\Omega)');

figure(2)

semilogy(F*1e-3,abs(ut));
title('TRANSDUTOR TOTAL');
xlabel('frequência (kHz)');
ylabel('Deslocamento');

zoom on,
```

C2 – MANDRIL ESCALONADO:

```
% *** CODIGO FONTE IMPLEMENTADO NO MATLAB
% *** Matrizes em Cadeia para Transdutores de Potência
% *** Implementado por Victor T.Tayra p/ defesa do Mestrado
% *** Langevin + Amplificador + Mandril ESCALONADO + Broca Aço
Rápido
clear all
% *** Setup da frequência de varredura e configuração da discretização
***

fmax = 30e3; %freq. maxima em kHz
faux = 20e3; %freq inicial e variavel auxiliar
N = 1*10000; %numeros de pontos na discretização
interF = (fmax-faux)/N; %intervalo para plotagem

% ***** Dados da Ceramica - PZT8 - anel *****

rext= 25e-3; % cerâmica diametro externo 50 mm
rint= 7.5e-3; % Ceramica diametro interno 15 mm
espC = 5e-3; % espessura da Ceramica 5 mm
areaC = pi*(rext)^2-pi*(rint)^2; % area efetiva da ceramica
denC = 7700; % densidade da ceramica (kg/m^3)
vC=3820; % velocidade do som na ceramica
Qm = 500; % fator de qualidade mecanica
vCc = vC*sqrt(1+(j/Qm));
E33S = 582*8.85E-12; % Epsilon da ceramica - cte
permissividade
Co = E33S*areaC/espC; % Capacitancia
ZC = denC*vCc*areaC; % impedancia da ceramica
piezeletrica
e33 = 13.8; % e33 (C/m^2)

% ***** Dados do Aço (Sandwich - M1 e M2)
*****

raioAco = 27e-3; % raio dos cilindros de Aço para
Sandwich
```



```

Aaco = pi*(raioAco^2); % area contemplando o furo
p/parafuso.
espM1=53.5e-3; % espessura cilindro M1
espM2=53.5e-3 + 73e-3; % espessura cilindro M2 + Metade
do amplificador
vAl = 5152.43; % velocidade extensional do som no
Aço (m/s)
denAco = 7846.3; % densidade (kg/m^3)
vM1 = vAl*sqrt(1+(j/Qm)); % velocidade complexa

% ***** Dados do Aço (Amplificador) *****
raco = 15.5e-3; % raio cilindros de Al ~ raio
ceramica.
Aaco3 = pi*(raco^2); % area contemplando o furo
p/parafuso.
espM3= 60e-3 + 63e-3; % espessura cilindro do
amplificador (m)

% ***** Dados do Aço (Amplificador do Mandril)
*****
raco4 = 10e-3; % raio cilindros de Al ~ raio
ceramica.
Aaco4 = pi*(raco4^2); % area contemplando o furo
p/parafuso.
espM4= 63e-3; % espessura cilindro do
amplificador (m)

% ***** Dados do Aço Rapido (Broca) *****

rbr = 2e-3; % raio cilindros de Al ~ raio
ceramica.
Abr = pi*(rbr^2); % area contemplando o furo
p/parafuso.
Lbr = 40e-3;
denbr = 8100; % densidade do aço rapido =
8,1kg/dm3
vbr = 5152.43;
vBR = vbr*sqrt(1+(j/600)); % velocidade complexa

% ***** Looping para construção das matrizes varrendo as frequências
*****

for I = 1:N
    faux = interF+faux;
    w = 2*pi*faux; % frequência angular
    F(I) = faux; % Vetor da frequência
    k = w/vCc;
    beta = k*espC;
    A = ZC/(j*tan(beta));
    B = ZC/(j*sin(beta));
    C = e33/(j*w*E33S);
    D = 1/(j*w*Co);
    A11 = (A*D - C^2)/(B*D - C^2);
    A12 = -D/(B*D - C^2);
    A13 = C/(B*D - C^2);
    A21 = (B*D-C^2)/D - (A*D -C^2)^2/(D*(B*D - C^2));
    A22 = (A*D - C^2)/(B*D - C^2);
    A23 = (1 - (A*D - C^2)/(B*D - C^2))*(C/D);
    A31 = (A*D*C - C^3)/(B*D^2 - D*C^2) - C/D;

```

```

A32 = -C/(B*D-C^2);
A33 = 1/D + C^2/(B*D^2 - D*C^2);

M = [A11 A12 A13; A21 A22 A23; A31 A32 A33]; % Matriz de 1
ceramica
Apm = [A11 A12; A21 A22];
Apem = [A13; A23]; % M = [Apm Apem;
Apme Ape]
Apme = [A31 A32];
Ape = A33;

% Manipulação para pilha com 4 ceramicas PZT8
Apsm = Apm^4;
Apsem = Apem + Apm*Apem + (Apm^2)*Apem + (Apm^3)*Apem;
Apsme = Apme + Apme*Apm + Apme*(Apm^2)+Apme*(Apm^3);
Apse = 4*Ape + 2*Apme*Apem + 2*Apme*Apm*Apem + Apme*(Apm^2)*Apem;

MC = [Apsm Apsem; Apsme Apse];

% Construcao da Matriz elementos M1 e M2
ZM1 = vM1*denAco*Aaco; % impedancia do Aco
beta1 = (w*espM1)/vM1;
beta2 = (w*espM2)/vM1;

B11 = cos(beta1);
B12 = j*ZM1*sin(beta1);
B21 = (j/ZM1)*sin(beta1);
B22 = cos(beta1);

C11 = cos(beta2);
C12 = j*ZM1*sin(beta2);
C21 = (j/ZM1)*sin(beta2);
C22 = cos(beta2);

B = [B11 B12;B21 B22]; % Matriz - M1
M1 = B';
C = [C11 C12;C21 C22]; % Matriz - M2
M2 = C';

% Construcao da Matriz Amplificador
ZM3 = vM1*denAco*Aaco3; % impedancia Aco
beta3 = (w*espM3)/vM1;
D11 = cos(beta3);
D12 =j*ZM3*sin(beta3);
D21 =(j/ZM3)*sin(beta3);
D22 = cos(beta3);

D = [D11 D12;D21 D22]; % Matriz M3 amplificador
M3 = D'; % ... + parte n escalonada Mandril
% Construcao da parte escalonada do mandril
ZM4 = vM1*denAco*Aaco4;
beta4 = (w*espM4)/vM1;
E11 = cos(beta4);
E12 =j*ZM4*sin(beta4);
E21 =(j/ZM4)*sin(beta4);
E22 = cos(beta4);

E = [E11 E12;E21 E22]; % Matriz Aço M4, parte n escalonada do
mandril

```

```

M4 = E';

Zbr = vbr*denbr*Abr;           % impedancia do Aço rapido - Broca
betabr = (w*Lbr)/vbr;
G11 = cos(betabr);
G12 =j*Zbr*sin(betabr);
G21 =(j/Zbr)*sin(betabr);
G22 = cos(betabr);

G = [G11 G12;G21 G22];       % Matriz Aço Rapido - Broca
M5 = G';

% *** 4 ceramicas sanduichadas por dois cilindros de aluminio M1 e
M2 ***

Aptm = M5*M4*M3*M2*Apsm*M1;
Aptem = M5*M4*M3*M2*Apsem;
Aptme = Apsme*M1;
Apte = Apse;

% *** Matriz final do Transdutor ***

MTt = [Aptm Aptem; Aptme Apte];

% *** Calculo das Impedancias ***
Yt(I) = MTt(3,3)- MTt(3,1)*MTt(2,3)/MTt(2,1);           % Admitancia
TRANSDUTOR TOTAL
ut(I) = (1/(j*w))*(MTt(1,3)- MTt(1,1)*MTt(2,3)/MTt(2,1)); %
Deslocamento TRANSDUTOR TOTAL

end

Zt = 1./Yt;           % Impedância do Transdutor

% *** Plotar os graficos ***

figure(1)

semilogy(F*1e-3,abs(Zt));
title('TRANSDUTOR TOTAL');
xlabel('frequência (kHz)');
ylabel('Modulo - Impedancia Eletrica (\Omega)');

figure(2)

semilogy(F*1e-3,abs(ut));
title('TRANSDUTOR TOTAL');
xlabel('frequência (kHz)');
ylabel('Deslocamento');

zoom on,

```

ANEXO D: ROTINA APDL – ANSYS

D1 – MANDRIL SIMPLES:

```

/CLEAR,START

/FILNAME,BROCA !Muda o JobName usado no ansys <<<<=====*

/CONFIG,NRES,10000

/PREP7

/TITLE, Amplif_Tx_50kHz

Vent = 1!Voltagem excitação (Volt)

Rbr= 2e-3      ! Raio da broca 2 mm (diametro = 4 mm)

R1 = 15.5e-3

Fb= 5e-3

!Keypoints BROCA

K,1,    0,    0

K,2,    2e-3,  0

K,3,    2e-3,  75e-3 ! Comprimento da brocas 75 mm

k,4,    0,    75e-3

LSTR, 1,    2

LSTR, 2,    3

LSTR, 3,    4

LSTR, 4,    1

AL,1,2,3,4      !Area da BROCA


K,5,    Rbr,    45e-3 + Fb !Keypoints MANDRIL

K,6,    R1,    45e-3 + Fb

K,7,    R1,    45e-3 + 126e-3 + Fb

K,8,    0,    45e-3 + 126e-3 + Fb

K,9,    0,    75e-3 + Fb

K,10,   Rbr,    75e-3 + Fb

LSTR,    5,    6

```

LSTR, 7, 6

LSTR, 7, 8

LSTR, 8, 9

LSTR, 9, 10

LSTR, 10, 5

AL,5,6,7,8,9,10 !Area MANDRIL

!!! DESENHO BOOSTER !!!

K,11, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb$

K,12, $15.5e-3$, $45e-3 + 126e-3 + Fb$

K,13, $15.5e-3$, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 64.3e-3$

k,14, $27e-3$, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 64.3e-3$

k,15, $27e-3$, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3$

k,16, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3$

LSTR, 11, 12

LSTR, 12, 13

LSTR, 13, 14

LSTR, 14, 15

LSTR, 15, 16

LSTR, 16, 11

AL,11,12,13,14,15,16

!!! DESENHO TRANSDUTOR !!!

k,17, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3$

k,18, $25e-3$, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3$

k,19, $25e-3$, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533$

k,20, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533$

LSTR, 17, 18

LSTR, 18, 19

LSTR, 19, 20

LSTR, 20, 17

AL,17,18,19,20

!!! CERAMICAS !!!

! CERAMICA 1

k,21, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533$

k,22, 25e-3, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533$

k,23, 25e-3, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 5E-3$

k,24, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 5E-3$

LSTR, 21, 22

LSTR, 22, 23

LSTR, 23, 24

LSTR, 24, 21

AL,22,23,21,24

! CERAMICA 2

k,25, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 5E-3$

k,26, 25e-3, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 5E-3$

k,27, 25e-3, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 2*5E-3$

k,28, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 2*5E-3$

LSTR, 25, 26

LSTR, 26, 27

LSTR, 27, 28

LSTR, 28, 25

AL,25,26,27,28

! CERAMICA 3

k,29, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 2*5E-3$

k,30, 25e-3, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 2*5E-3$

k,31, 25e-3, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 3*5E-3$

k,32, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 3*5E-3$
 LSTR, 29, 30
 LSTR, 30, 31
 LSTR, 31, 32
 LSTR, 32, 29
 AL,29,30,31,32

! CERAMICA 4

k,33, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 3*5E-3$
 k,34, 25e-3, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 3*5E-3$
 k,35, 25e-3, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3$
 k,36, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3$
 LSTR, 33, 34
 LSTR, 34, 35
 LSTR, 35, 36
 LSTR, 36, 33
 AL,33,34,35,36

!!! MASSA FRONTAL

k,37, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3$
 k,38, 25e-3, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3$
 k,39, 25e-3, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3 + 0.0533$
 k,40, 0, $45e-3 + 126e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3 + 0.0533$
 LSTR, 37, 38
 LSTR, 38, 39
 LSTR, 39, 40
 LSTR, 40, 37
 AL,37,38,39,40

/PNUM,AREA,1 !Mostra o número das áreas

/NUMBER,0 !Mostra número e cor

/REPLOT

APLOT

! NUMCMP,AREA !Comprime os números

!!! Chama arquivo (Materiais) com as propriedades dos materiais

/INPUT,'Materiais','txt','G:\MSc\SimulacaoANSYS\','0

!***** Redefinindo numero das areas *****

AGLUE,ALL

!concatena as áreas antes de malhar para compartilhar

!o mesmo nó nas interfaces das áreas coincidentes, ou seja,

!linhas de mesmo tamanho; **nao se usa p/ areas descontinuas**

!***** Atributos *****

ASEL,,,,15 !amplificador

AATT, 4, , 2, 0,

ASEL,ALL

ASEL,,,,10 !massa traseira (estrutura)

AATT,4,,2,0,

ASEL,ALL

ASEL,,,,14 !ceramica 4 (Piezo - polarização negat.)

AATT,3,,1,0,

ASEL,ALL

ASEL,,,,13 !ceramica 3 (Piezo - polarização posit.)

AATT,2,,1,0,

ASEL,ALL

ASEL,,,,12 !ceramica 2 (Piezo - polarização negat.)

AATT,3,,1,0,


```

ASEL,ALL
ASEL,,,,11                                !ceramica 1 (Piezo - polarização posit.)
AATT,2,,1,0,
ASEL,ALL
ASEL,,,,18                                !massa dianteira (estrutura)
AATT,4,,2,0,
ASEL,ALL
ASEL,,,,17                                !cabeça paraf. (estrutura)
AATT,4,,2,0,
ASEL,ALL
ASEL,,,,16                                !corpo paraf. (estrutura)
AATT,4,,2,0,
ASEL,ALL

```

```
*IF,0,EQ,1,THEN !Comandos usados para conferência dos atributos
```

```
/PNUM,MAT,1 !Mostra o número dos MATERIAIS
```

```
/NUMBER,0 !Mostra número e cor
```

```
/REPLOT
```

```
/PNUM,TYPE,1 !Mostra o número dos TIPOS DE ELEMENTOS
```

```
/NUMBER,0 !Mostra número e cor
```

```
/REPLOT
```

```
/PNUM,AREA,1 !Mostra o número das ÁREAS
```

```
/NUMBER,0 !Mostra número e cor
```

```
/REPLOT
```

```
*ENDIF
```

```
!
```

```
!***** Malha *****
```

!

!LESIZE,10,1e-3,,,,,1 !garante que a malha das areas 11 e 12 sejam iguais

!!! CERAMICAS

AESIZE,11,0.5e-3, !AESIZE,2,1e-3, !ceramica 2 - pode-se utilizar discretizacao diferente

AMESH,11

AESIZE,12,0.5e-3, !AESIZE,3,1e-3, !ceramica 1

AMESH,12

AESIZE,13,0.5e-3, !AESIZE,3,1e-3, !ceramica 1

AMESH,13

AESIZE,14,0.5e-3, !AESIZE,3,1e-3, !ceramica 1

AMESH,14

!!! ESTRUTURAIS

AESIZE,15,0.5e-3,

AMESH,15

AESIZE,10,0.5e-3,

AMESH,10

AESIZE,18,0.5e-3,

AMESH,18

AESIZE,17,0.5e-3,

AMESH,17

AESIZE,16,0.5e-3,

AMESH,16

!***** Restrições de deslocamentos *****

LSEL,,,23 !seleciona a linha

NSLL,,1 !seleciona todos os nos (interior e keypoint) das linhas selecionadas

CP,1,VOLT,ALL !acopla os nos ("coupled DOF)" para todos os nos selecionados

D,ALL,VOLT,1 !carga (aplica um tensao 1 volt no eletrodo definido por todos os nos

da linha)

*GET,nocarga,NMIN !busca menor nó entre nós selecionados (usa p/ calcular a carga elétrica)

LSEL,,31

NSLL,,1 !seleciona todos os nos (interior e keypoint) das linhas selecionadas

CP,1,VOLT,ALL !acopla os nos ("coupled DOF)" para todos os nos selecionados

D,ALL,VOLT,1 !carga (aplica um tensao 1 Volt no eletrodo definido por todos os nos

da linha)

LSEL,,19

NSLL,,1 !seleciona todos os nos das linhas acima

CP,2,VOLT,ALL

D,ALL,VOLT,0 !Terra (aplica um tensao 0 Volt no eletrodo definido por todos os nos

das linhas)

LSEL,,27

NSLL,,1

CP,2,VOLT,ALL

D,ALL,VOLT,0 !Terra (aplica um tensao 0 Volt no eletrodo definido por todos os nos

das linhas)

LSEL,,35

NSLL,,1

CP,2,VOLT,ALL

D,ALL,VOLT,0

DK,14,UY,0, !restringindo o deslocamento UY no keypoint 14

ALLSEL !seleciona todas as entidades

/PNUM,TYPE,1 !Mostra o número dos TIPOS DE ELEMENTOS

/NUMBER,1 !Mostra somente a cor

/REPLOT

FINISH

!*****

!***** SOLUCAO HARMONICA *****

```

!*****

/SOL

ANTYPE,HARMIC

HARFRQ,15000,22000,

NSUBST,500,                !Specifies the number of substeps to be taken this load step

KBC,1                      !variacao da freq. em degrau (stepped)

SOLVE

FINISH

!*****

!***** GERANDO ARQUIVO DE SAIDA *****

!*****

/POST26

LINES,1000,                !define numero de linhas continuas que podem ser lidas no
matlab

PRCPLX,0                   !mostra os resultados como parte real e imaginaria

RFORCE,2,nocarga,AMPS,,carga    !define a variável 2 (carga) do nó 'nocarga' e salva as
cargas em função da freq.

/OUTPUT,'prvarcarga','txt'      !direciona saída para o arquivo 'prvarcarga.txt'

PRVAR, 2                    !Print frequency vs. variables

/OUTPUT, TERM                !retorna a saída para a janela do ansys

ALLSEL                      !seleciona todas as entidades

!!!***Dados do Deslocamento Ponta da Broca - Oscil. Harmonica

KSEL,,,1                    !seleciona o keypoint 1 - PONTA DA BROCA

NSLK,                        !seleciona o nó definido no Keypoint

*GET,no3,NMIN                !parâmetro no2 = número do nó relacionado ao
keypoint

!*GET,no3,NODE,,NUM,MIN      !funciona igual ao *GET acima.

LINES,1000,                !define numero de linhas continuas que podem ser
lidas no matlab

```

PRCPLX,1	!mostra os resultados como amplitude e fase
NSOL,3,no3,U,Y,uy	!define a variável 3 (uy) do nó 'no3' e salva os deslocamentos em função da freq.
/OUTPUT,'prvaruy','txt'	!direciona saída para o arquivo 'prvaruy.txt'
PRVAR, 3	!Print frequency vs. variables
/OUTPUT, TERM	!retorna a saída para a janela do ansys
ALLSEL	!seleciona todas as entidades
FINISH	

D2 – MANDRIL ESCALONADO:

```

/CLEAR,START
/FILNAME,BROCA !Muda o JobName usado no ansys <<<<====*
/CONFIG,NRES,10000
/PREP7
/TITLE, Amplif_Tx_50kHz
Vent = 1 !Voltagem excitação (Volt)
Rbr= 2e-3
R1 = 15.5e-3
R2 = 10e-3
Fb= 10e-3
L = 63e-3
K,1, 0, 0 !Keypoints BROCA
K,2, 2e-3, 0
K,3, 2e-3, 75e-3
k,4, 0, 75e-3
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 1

```

AL,1,2,3,4 !Area da BROCA

K,5, Rbr, $40e-3 + Fb$!Keypoints MANDRIL

K,6, R2, $40e-3 + Fb$

K,7, R2, $40e-3 + 120e-3 + Fb - 63e-3$

K,8, R1, $40e-3 + 120e-3 + Fb - 63e-3$

K,9, R1, $40e-3 + 120e-3 + Fb$

K,10, 0, $40e-3 + 120e-3 + Fb$

K,11, 0, $75e-3 + Fb$

K,12, Rbr, $75e-3 + Fb$

LSTR, 5, 6

LSTR, 6, 7

LSTR, 7, 8

LSTR, 8, 9

LSTR, 9, 10

LSTR, 10, 11

LSTR, 11, 12

LSTR, 12, 5

AL,5,6,7,8,9,10,11,12 !Area MANDRIL

!!! DESENHO BOOSTER !!!

K,13, 0, $40e-3 + 120e-3 + Fb$

K,14, $15.5e-3$, $40e-3 + 120e-3 + Fb$

K,15, $15.5e-3$, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 64.3e-3$

k,16, $27e-3$, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 64.3e-3$

k,17, $27e-3$, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3$

k,18, 0, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3$

LSTR, 13, 14

LSTR, 14, 15

LSTR, 15, 16

LSTR, 16, 17

LSTR, 17, 18

LSTR, 18, 13

AL,13,14,15,16,17,18

!!! DESENHO TRANSDUTOR !!!

k,19, 0, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3$

k,20, 25e-3, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3$

k,21, 25e-3, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533$

k,22, 0, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533$

LSTR, 19, 20

LSTR, 20, 21

LSTR, 21, 22

LSTR, 22, 19

AL,19,20,21,22

!!! CERAMICAS !!!

! CERAMICA 1

k,23, 0, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533$

k,24, 25e-3, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533$

k,25, 25e-3, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 5E-3$

k,26, 0, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 5E-3$

LSTR, 23, 24

LSTR, 24, 25

LSTR, 25, 26

LSTR, 26, 23

AL,23,24,25,26

! CERAMICA 2

k,27,	0,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 5E-3$
k,28,	25e-3,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 5E-3$
k,29,	25e-3,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 2*5E-3$
k,30,	0,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 2*5E-3$
LSTR,	27,	28
LSTR,	28,	29
LSTR,	29,	30
LSTR,	30,	27
AL,27,28,29,30		

! CERAMICA 3

k,31,	0,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 2*5E-3$
k,32,	25e-3,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 2*5E-3$
k,33,	25e-3,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 3*5E-3$
k,34,	0,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 3*5E-3$
LSTR,	31,	32
LSTR,	32,	33
LSTR,	33,	34
LSTR,	34,	31
AL,31,32,33,34		

! CERAMICA 4

k,35,	0,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 3*5E-3$
k,36,	25e-3,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 3*5E-3$
k,37,	25e-3,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3$
k,38,	0,	$40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3$
LSTR,	35,	36
LSTR,	36,	37
LSTR,	37,	38
LSTR,	38,	35

AL,35,36,37,38

!!! MASSA FRONTAL

k,39, 0, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3$

k,40, 25e-3, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3$

k,41, 25e-3, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3 + 0.0533$

k,42, 0, $40e-3 + 120e-3 + Fb + 2*64.3e-3 + 0.0533 + 4*5E-3 + 0.0533$

LSTR, 39, 40

LSTR, 40, 41

LSTR, 41, 42

LSTR, 42, 39

AL,39,40,41,42

/PNUM,AREA,1 !Mostra o número das áreas

/NUMBER,0 !Mostra número e cor

/REPLOT

APLOT

! NUMCMP,AREA !Comprime os números

/INPUT,'Materiais-Modelo1','txt','I:\',0

!***** Redefinindo numero das areas *****

AGLUE,ALL

!concatena as áreas antes de malhar para compartilhar

!o mesmo nó nas interfaces das áreas coincidentes, ou seja,

!linhas de mesmo tamanho; **nao se usa p/ areas descontinuas**

!***** Atributos *****

!

ASEL,,,,15 !amplificador

AATT, 4, , 2, 0,

ASEL,ALL

```

ASEL,,,,10                                !massa traseira (estrutura)
AATT,4,,2,0,
ASEL,ALL
ASEL,,,,14                                !ceramica 4 (Piezo - polarização negat.)
AATT,3,,1,0,
ASEL,ALL
ASEL,,,,13                                !ceramica 3 (Piezo - polarização posit.)
AATT,2,,1,0,
ASEL,ALL
ASEL,,,,12                                !ceramica 2 (Piezo - polarização negat.)
AATT,3,,1,0,
ASEL,ALL
ASEL,,,,11                                !ceramica 1 (Piezo - polarização posit.)
AATT,2,,1,0,
ASEL,ALL

ASEL,,,,18                                !massa dianteira (estrutura)
AATT,4,,2,0,
ASEL,ALL

ASEL,,,,17
AATT,4,,2,0,
ASEL,ALL

ASEL,,,,16
AATT,4,,2,0,
ASEL,ALL

```

*IF,0,EQ,1,THEN !Comandos usados para conferência dos atributos

/PNUM,MAT,1 !Mostra o número dos MATERIAIS

/NUMBER,0 !Mostra número e cor

/REPLOT

/PNUM,TYPE,1 !Mostra o número dos TIPOS DE ELEMENTOS

/NUMBER,0 !Mostra número e cor

/REPLOT

/PNUM,AREA,1 !Mostra o número das ÁREAS

/NUMBER,0 !Mostra número e cor

/REPLOT

*ENDIF

!

!***** Malha *****

!

!LESIZE,10,1e-3,,,,,1 !garante que a malha das areas 11 e 12 sejam iguais

!!! CERAMICAS

AESIZE,11,0.5e-3, !AESIZE,2,1e-3, !ceramica 2 - pode-se utilizar discretizacao diferente

AMESH,11

AESIZE,12,0.5e-3, !AESIZE,3,1e-3, !ceramica 1

AMESH,12

AESIZE,13,0.5e-3, !AESIZE,3,1e-3, !ceramica 1

AMESH,13

AESIZE,14,0.5e-3, !AESIZE,3,1e-3, !ceramica 1

AMESH,14

!!! ESTRUTURAIS

AESIZE,15,0.5e-3,

AMESH,15

AESIZE,10,0.5e-3,

AMESH,10

AESIZE,18,0.5e-3,

AMESH,18

AESIZE,17,0.5e-3,

AMESH,17

AESIZE,16,0.5e-3,

AMESH,16

!***** Restrições de deslocamentos *****

LSEL,,,33 !seleciona a linha

NSLL,,1 !seleciona todos os nos (interior e keypoint) das linhas selecionadas

CP,1,VOLT,ALL !acopla os nos ("coupled DOF)" para todos os nos selecionados

D,ALL,VOLT,1 !carga (aplica um tensao 1 volt no eletrodo definido por todos os nos da linha)

*GET,nocarga,NMIN !busca menor nó entre nós selecionados (usa p/ calcular a carga elétrica)

LSEL,,,25

NSLL,,1 !seleciona todos os nos (interior e keypoint) das linhas selecionadas

CP,1,VOLT,ALL !acopla os nos ("coupled DOF)" para todos os nos selecionados

D,ALL,VOLT,1 !carga (aplica um tensao 1 Volt no eletrodo definido por todos os nos da linha)

LSEL,,,21

NSLL,,1 !seleciona todos os nos das linhas acima

CP,2,VOLT,ALL

D,ALL,VOLT,0 !Terra (aplica um tensao 0 Volt no eletrodo definido por todos os nos das linhas)

LSEL,,,29

NSLL,,1

CP,2,VOLT,ALL

D,ALL,VOLT,0 !Terra (aplica um tensao 0 Volt no eletrodo definido por todos os nos
das linhas)

LSEL,,,,,37

NSLL,,1

CP,2,VOLT,ALL

D,ALL,VOLT,0

DK,16,UY,0, !restringindo o deslocamento UY no keypoint

ALLSEL !seleciona todas as entidades

/PNUM,TYPE,1 !Mostra o número dos TIPOS DE ELEMENTOS

/NUMBER,1 !Mostra somente a cor

/REPLOT

! NUMMRG,NODE,10e-6,,,LOW !cria um no' a partir de dois nos muito juntos (def. tolerancia)

FINISH

!*****

!***** SOLUCAO HARMONICA *****

!*****

/SOL

ANTYPE,HARMIC

HARFRQ,15000,22000,

NSUBST,500, !Specifies the number of substeps to be taken this load step

KBC,1 !variacao da freq. em degrau (stepped)

!OUTRES,ALL,NONE !não salva os resultados, mas depois posso escolher o que salvar

!OUTRES,RSOL,ALL !salva todas as reações nodais após SOLVE

!OUTRES,FFLUX,ALL !Element nodal fluxes

SOLVE

FINISH

```

!*****
!***** GERANDO ARQUIVO DE SAIDA *****
!*****

/POST26

matlab
LINES,1000,          !define numero de linhas continuas que podem ser lidas no

PRCPLX,0              !mostra os resultados como parte real e imaginaria

RFORCE,2,nocarga,AMPS,,carga      !define a variável 2 (carga) do nó 'nocarga' e salva as
cargas em função da freq.

/OUTPUT,'prvarcarga','txt'        !direciona saída para o arquivo 'prvarcarga.txt'

PRVAR, 2                !Print frequency vs. variables

/OUTPUT, TERM           !retorna a saída para a janela do ansys

ALLSEL                  !seleciona todas as entidades

!!!**Dados do Deslocamento Ponta da Broca - Oscil. Harmonica

KSEL,,,,1              !seleciona o keypoint 1 - PONTA DA BROCA

NSLK,                  !seleciona o nó definido no Keypoint

*GET,no3,NMIN           !parâmetro no2 = número do nó relacionado ao keypoint

!*GET,no3,NODE,,NUM,MIN  !funciona igual ao *GET acima.

LINES,1000,            !define numero de linhas continuas que podem ser lidas no
matlab

PRCPLX,1               !mostra os resultados como amplitude e fase

NSOL,3,no3,U,Y,uy      !define a variável 3 (uy) do nó 'no3' e salva os deslocamentos
em função da freq.

/OUTPUT,'prvaruy','txt'    !direciona saída para o arquivo 'prvaruy.txt'

PRVAR, 3                !Print frequency vs. variables

/OUTPUT, TERM           !retorna a saída para a janela do ansys

ALLSEL                  !seleciona todas as entidades

FINISH

```